

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт"

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций

Journal is registered by Federal Service for monitoring compliance with cultural heritage protection law

ISSN 2072-8743 (Online) ISSN 2072-8735 (Print)

Media Registration Certificate

PI No. FS77-55956. Date of issue: November 7, 2013

Publication language: Russian, English.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved.
No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company

© "Media Publisher", 2021

Editorial and Publisher Address

111024, Russia, Moscow, Aviamotornaya str. 8, bloc 1, office 323

e-mail: t-comm@media-publisher.ru.

Tel.: +7 (495) 957-77-43

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

Язык публикации: русский, английский.

Территория распространения:

Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж: 1000 экз.

Периодичность выхода: 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра: 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

Предпечатная подготовка:

ООО "ИД Медиа Паблишер"

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет

Материалы, опубликованные в журнале — собственность ООО "ИД Медиа Паблишер". Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя

© ООО "ИД Медиа Паблишер", 2021

Адрес редакции и издателя

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, стр. 1, офис 323

e-mail: t-comm@media-publisher.ru

Тел.: +7 (495) 957-77-43

Адрес типографии

Москва, ул. Складочная, д. 3, корп. 6

Индексация журнала:

Ulrich's Periodicals Directory; EBSCO; elibrary.ru (ПИНЦ)
Google Scholar; CyberLeninka (Open Science);
Bielefeld Academic Search Engine (BASE); OCLC WorldCat;
Registry of Open Access Repositories (ROAR)

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР



ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

www.media-publisher.ru

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

Главный редактор

Тихвинский Валерий Олегович

Издатель

Дымкова Светлана Сергеевна

ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Анютин Александр Павлович

(д.ф.-м.н., профессор, член программного и оргкомитетов WSEAS), Россия, Мексика

Бугаев Александр Степанович

(академик РАН), Россия

Вааль Альберт

(д.т.н., старший научный сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница на кафедре коммуникационной техники), Германия

Варламов Олег Витальевич

(д.т.н., в.н.с. МТУСИ), Россия

Головачев Юлиус

(управляющий консультант Detecon International GmbH), Германия

Гребенников Андрей Викторович

(Sumitomo Electric Europe), Великобритания

Данилов Владимир Григорьевич

(д.ф.-м.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), Россия

Дулкейтс Эрик

(д.т.н., старший исполнительный директор корпорации Detecon), Силиконовая долина, США

Елизаров Андрей Альбертович

(д.т.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), Россия

Зубарев Юрий Борисович

(д.т.н., член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ), Россия

Ибрагимов Байрам

(д.т.н., профессор Азербайджанского технического университета, АзТУ), Азербайджан

Корбетт Ровэлл

(д.т.н., директор по исследованиям в научно-исследовательском центре China Mobile Research Institute, профессор университета Назарбаева), Гон-Конг (Китай), США

Кузовкова Татьяна Алексеевна

(д.э.н., декан экономического факультета МТУСИ), Россия

Кюркчан Александр Гаврилович

(д.ф.-м.н., профессор МТУСИ), Россия

Омельянов Георгий Александрович

(д.ф.-м.н., Университет де Сонора, факультет математики, Эрмосильо), Мексика

Самойлов Александр Георгиевич

(д.т.н., профессор Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых), Россия

Сысоев Николай Николаевич

(д.ф.-м.н., декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), Россия

Чиров Денис Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шаврин Сергей Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шарп Майкл

(д.э.н., Европейский институт стандартизации – ETSI), Великобритания

Яшина Марина Викторовна

(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Шацкий Н.В., Ходатаев Н.А.

Метод определения направления на цель цифровой антенной решеткой моноимпульсной радиолокационной станции

4

СВЯЗЬ

Покаместов Д.А., Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Новичков С.А., Лаконцев Д.В.

Модель оценки пропускной способности транспортных backhaul сетей 5G NR

11

Дорохов С.В., Михайлов В.Э.

Методика расчета коэффициента взаимной корреляции между двумя случайными сигналами в условиях помех эфира

17

Диязитдинов Р.Р.

Итерационный алгоритм оценки смещения и масштаба для совмещения одномерных сигналов при влиянии аддитивных и мультипликативных помех

24

ИНФОРМАТИКА

Кузнецов Е.В., Ермаков Д.Н., Самусенко О.Е., Голяев Ю.Д., Соловьева Т.И., Кузнецов Н.Е.

Особенности применения средств компьютерного моделирования для совершенствования процессов изготовления лазерных гироскопов

31

ТРАНСПОРТ

Поспелов П.И., Таташев А.Г., Трофименко Ю.В., Яшина М.В.

Подход к исследованию факторов риска совершения нарушений, связанных с использованием смартфонов во время вождения

44

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Коптев Д.С., Мухин И.Е.

Практические результаты и перспективы использования волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии для диагностики технического состояния агрегатов летательных аппаратов

52

ТРАНСПОРТ

Карелина М.Ю., Поспелов П.И., Таташев А.Г., Терентьев А.В., Трофименко Ю.В., Яшина М.В.

Анализ факторов риска отвлекающих от вождения действий

62

Карелина М.Ю., Терентьев А.В., Розенблатт Г.М., Яшин В.Б.

Модели автомобильного колеса, использующие законы распределения силовых воздействий в области контакта с дорожным покрытием

72

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Shatskiy N.V., Hodataev N.A.
Method for determining the target direction of a digital antenna
GRID OF A MONOPULSE radar station 4

COMMUNICATIONS

- Pokamestov D.A., Kryukov Ya.V., Rogozhnikov E.V.,
Novichkov S.A., Lakontsev D.A.
Model for estimating the throughput of 5G NR backhaul networks 11

- Dorokhov S.V., Mikhaylov V.E.
Method for calculating cross-correlation coefficient between
two random signals in the presence of etheric interference 17

- Diyazitdinov R.R.
Iterative algorithm for offset and scale estimation for 1d signals
superposition with additive and multiplicative noise 24

COMPUTER SCIENCE

- Kuznetsov E.V., Ermakov D.N., Samusenko O.E.,
Golyaev Yu.D., Solovyeva T.I., Kuznetsov N.E.
Features of the use of computer modeling tools for improving
the manufacturing processes of laser gyroscopes 31

TRANSPORT

- Pospelov P.I., Tatashev A.G., Trofimenko Yu.V., Yashina M.V.
Investigation of risk factors for violations related
to the use of smartphones while driving 44

PUBLICATIONS IN ENGLISH

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Koptev D.S., Mukhin I.E.
Practical results and prospects of using fiber optical sensors
of acoustic emission for diagnosing the technical condition
of aircraft units 52

TRANSPORT

- Karelina M.Yu., Pospelov P.I., Tatashev A.G., Terentyev A.V.,
Trofimenko Yu.V., Yashina M.V.
Risk factors analysis of distraction actions from driving 62

- Karelina M.Yu., Terentyev A.V., Rosenblatt G.M., Yashin V.B.
Car wheel models using the distributions laws of forces
on a contact patch with the road surface 72

T•C o m m

Telecommunications and transport
Volum 15. No. 12-2021

Release date: 24.12.2021

The journal is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses.

Founder: "Media Publisher", Ltd.

Publisher: Svetlana S. Dymkova
ds@media-publisher.ru

Editor in Chief: Dr. Valery O. Tikhvinskiy

Editorial board

Artem S. Adzhemov

Doctor of sciences, Professor MTUCI, [Russia](#)

Alexander P. Anyutin

Doctor of sciences, Professor, member of the program and organizing committee WSEAS, [Russia](#), [Mexico](#)

Alexander S. Bugaev

Academician of the RAS, [Russia](#)

Corbett Rowell

Full Professor: Electronic & Electrical Engineering
Nazarbayev University, [Hong Kong \(China\)](#), [USA](#)

Denis S. Chirov

Doctor of sciences, MTUCI, [Russia](#)

Vladimir G. Danilov

Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, [Russia](#)

Eric Dulkeys

Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, [USA](#)

Julius Golovachyov

Managing Consultant Detecon International GmbH, [Germany](#)

Andrey Grebennikov

Ph.D., Sumitomo Electric Europe, [United Kingdom](#)

Bayram Ibrahimov

Ph.D., Professor of Azerbaijan Technical University (AzTU),
[Azerbaijan](#)

Tatyana A. Kuzovkova

Doctor of sciences, MTUCI, [Russia](#)

Alexander G. Kyurkchan

Doctor of sciences, Professor MTUCI, [Russia](#)

Georgii A. Omel'yanov

Doctor of sciences, Universidad de Sonora,
Department of Mathematics, Hermosillo, [Mexico](#)

Alexander G. Samoilo

Doctor of sciences, VLSU, [Russia](#)

Michael Sharpe

PhD, European Standards Institute – ETSI, [United Kingdom](#)

Sergey S. Shavrin

Doctor of sciences, MTUCI, [Russia](#)

Nikolai N. Sysoev

Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics
of Moscow State University. Lomonosov, [Russia](#)

Oleg V. Varlamov

Doctor of sciences, MTUCI, [Russia](#)

Albert Waal

Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz
at the Department of Communications Technology, [Germany](#)

Marina V. Yashina

Doctor of sciences, Professor MTUCI, [Russia](#)

Andrey A. Yelizarov

Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, [Russia](#)

Yuri B. Zubarev

Doctor of sciences, Corresponding member of the Russian
Academy of Sciences, Honored Scientist of Russia, [Russia](#)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ НА ЦЕЛЬ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ МОНОИМПУЛЬСНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-4-10

Manuscript received 15 July 2021;
Accepted 27 August 2021

Шацкий Николай Витальевич,

АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца",
Москва, Россия, nshatsky@rti-mints.ru

Ходатаев Николай Андреевич,

АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца",
Москва, Россия, nkhodataev@krtis.ru

Ключевые слова: моноимпульсный метод пеленгации, нейронные сети, уходы равносигнального направления, пеленгационная характеристика, угловые координаты цели, градиентный метод, система координат наблюдения.

На основе анализа погрешностей моноимпульсного метода пеленгации цели радиолокационной станции с цифровой антенной решеткой выделена в особый кластер группа погрешностей, связанная с флуктуациями равносигнального направления при сканировании луча антенной системы, а также с неидентичностью формы формируемых лучей моноимпульсной группы. Данное обстоятельство особо критично проявляется у крупноапертурных РЛС с ЦФАР с электрическим сканированием, где количество формируемых приемных лучей значительно, дополнительно координаты цели обычно не совпадают с координатными плоскостями, вдоль которых производится измерение координат (этой проблеме была посвящена статья автора, опубликованная в предыдущем номере журнала). Нелинейность данной задачи требует уникальных подходов и решений. Классическая постановка задачи связана с получением оценки вектора излучения всей антенной решетки по известному измеренному вектору комплексных сигналов на выходе антенной решетки в фиксированный момент времени. Для решения данной задачи и определения решающего правила использован нейросетевой подход, при этом обучение нейронной сети выполнено по критерию минимума выбранной целевой функции. Приведено обоснование повышения точности измерений угловых координат в моноимпульсных системах со сканирующими цифровыми фазированными антенными решетками (ЦФАР) на основе применения в процессе обработки радиолокационных данных нейронных сетей без формирования пеленгационных характеристик. Результаты моделирования характеристик ЦФАР (на примере плоской антенной решетки размерностью 30 на 30 излучателей) в условиях, принятых в модели ЦФАР допущений при реализации классического и оригинального методов показаны на примерах поверхностей дисперсий ошибок измерения угловых координат моноимпульсным методом в прямоугольной пространственной области, которые показали уменьшение ошибки и расширение области измерений. В дальнейшем предполагается практическая реализация данного подхода с использованием FPGA в приемных трактах частотно-зависимой части РЛС.

Информация об авторах:

Шацкий Николай Витальевич, АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца", Ростовский филиал АО РТИ, г. Ростов-на-Дону, начальник комплексного отдела АО РТИ (заместитель главного конструктора), к.т.н., доцент, Москва, Россия

Ходатаев Николай Андреевич, АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца", Заместитель директора Центра (первый заместитель главного конструктора), Москва, Россия

Для цитирования:

Шацкий Н.В., Ходатаев Н.А. Метод определения направления на цель цифровой антенной решеткой моноимпульсной радиолокационной станции // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 4-10.

For citation:

Shatskiy N.V., Hodataev N.A. (2021) Method for determining the target direction of a digital antenna GRID OF A MONOPULSE radar station. T-Comm, vol. 15, no.12, pp. 4-10. (in Russian)

1. Введение

Первичными этапами жизненного цикла современной радиолокационной станции (РЛС) на этапах опытно-конструкторской работы являются эскизное проектирование и техническое проектирование, которые иногда объединяются в один этап. Таким образом, до разработки рабочей конструкторской документации и изготовления опытного образца формируется технический облик Изделия, включающий в себя не только аппаратную часть, но и концепции разработки программного обеспечения как аппаратно-программных средств и радиоэлектронных комплексов, так и РЛС в целом. Постоянный рост требований к тактико-техническим характеристикам РЛС и принципиально новые цели с уникальными характеристиками излучения, а также широкое применение в трактах приема-передающей аппаратуры ПЛИС (FPGA) ведущих производителей Intel (Altera), Xilinx, Silego и т.д. со встроенными процессорами, развитой архитектурой, ранее недостижимыми производительностями и энергоэффективностями обеспечили возможность применения новых или существенно усовершенствованных классических методов оценки координат объектов.

Моноимпульсный метод пеленгации существует с 1940-х гг. и широко применяется в современных РЛС [1-4]. При его практической реализации на точность измерения угловых координат влияет целый ряд факторов, которые можно разделить на следующие группы. Первая группа обусловлена наличием внутренних шумов и внешних источников помех. Вторая группа факторов обусловлена уходами равносигнального направления (РСН) при сканировании и неидентичностью формируемых лучей моноимпульсной группы.

Для борьбы с влиянием факторов первой группы в составе РЛС используют приемные устройства с низким коэффициентом шума, а при формировании приемных диаграмм направленности снижают уровень боковых лепестков [3].

Погрешности, обусловленные уходами РСН и неидентичностью формы лучей больше всего проявляются в приемных антенных решетках с электронным сканированием. Форма и ширина луча зависят от его пространственной ориентации. В результате неидентичной формы лучей пеленгационная характеристика становится нелинейной, что и приводит к ошибкам измерений. В связи с этим в примерах, приведенных в монографии [5] рассмотрены уплотненные сетки лучей. Однако увеличение числа приемных лучей может существенно усложнить алгоритм обработки и время обзора пространства.

В патенте [6] рассмотрен вариант линеаризации пеленгационной характеристики, а в патенте [7] при проведении измерений угловых координат моноимпульсным методом учитывают нелинейность пеленгационной характеристики. Кроме того, следует учитывать, что координаты цели обычно не совпадают с координатными плоскостями, вдоль которых производится измерение координат при том, что линейность пеленгационной характеристики утверждается только в данной плоскости.

В общем случае для борьбы с влиянием факторов второй группы следует строить некоторое нелинейное правило, с использованием которого получать оценку угловых координат цели. Сформулировать такое правило аналитически не представляется возможным, что и ограничивает возможности моноимпульсной пеленгации.

В настоящее время при решении задач, для которых не удается аналитически записать решающее правило, во многих областях человеческой деятельности и, в частности, в радиолокации, используют нейронные сети [8].

Цель работы состоит в повышении точности измерений угловых координат в моноимпульсных системах со сканирующими цифровыми фазированными антенными решетками (ЦФАР) на основе применения в процессе обработки радиолокационных данных нейронных сетей.

2. Постановка задачи

Пусть имеется M -элементная ЦФАР, на выходах которой источник, излучающий в направлении $\mathbf{p}$, возбуждает вектор детерминированных сигналов

$$\mathbf{x}(\mathbf{p}, t) = (x_m(\mathbf{p}, t) = a \exp(i\phi) \exp(ik\mathbf{q}_m^T \mathbf{p}) \exp(i\omega t))_{m=1,2,\dots,M}, \quad (1)$$

где a, ϕ – амплитуда и фаза источника; $\mathbf{q}_m$ – вектор, определяющий положение фазовых центров антенных элементов АР; T – символ транспонирования; ω – круговая частота.

На выходах каналов АР также присутствует составляющая шума, которую обозначим вектором $\xi(t) = (\xi_m(t))_{m=1,2,\dots,M}$.

Собственные шумы элементов АР будем считать распределенными по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсией σ^2 , независимыми между собой и полезным сигналом.

В результате выходной вектор сигналов каналов АР можно представить в виде

$$\mathbf{z}(\mathbf{p}, t) = \mathbf{x}(\mathbf{p}, t) + \xi(t). \quad (2)$$

На выходе АР для обработки сигналов используют множество диаграмм направленности (ДН), формируемых при помощи N наборов M -элементных комплексных весовых коэффициентов (КВК), которые могут быть заданы прямоугольной матрицей $\mathbf{A}$.

Тогда комплексные сигналы на выходе АР могут быть записаны в виде

$$\mathbf{u}(\mathbf{p}, t) = \mathbf{A}^T \mathbf{z}(\mathbf{p}, t) = \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}, t) + \mathbf{A}^T \xi(t). \quad (3)$$

Второе слагаемое в выражении (3) представляет собой случайную вектор-функцию, компоненты которой распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями σ_A^2 . В силу статистической независимости шумов каналов мощность шума в выходном сигнале АР увеличивается по сравнению с мощностью шума канала менее значительно, чем мощность сигнала. Поскольку мощность шума в сигнале каждого луча АР зависит от выбранных КВК, то дисперсии шумов могут быть неодинаковыми. В то же время, если КВК, составляющие матрицу $\mathbf{A}$, отличаются незначительно, например, направлением фазирования, то можно считать, что все компоненты вектора σ_A^2 одинаковы и равны σ_A^2 .

Вектор $\mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}, t)$ – детерминированная составляющая вектор функции $\mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$.

Задача состоит в получении оценки вектора $\mathbf{p}$ по известному измеренному вектору $\mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$ в фиксированный момент времени t .

3. Обоснование метода

Оценку вектора $\mathbf{p}$ будем искать как оценку максимально правдоподобия.

Функция правдоподобия выборки входного сигнала в некоторый момент времени t имеет вид [9]

$$L_u = \frac{1}{(2\pi\sigma_A^2)^M} \exp \times \left(-(\mathbf{u}(\mathbf{p}, t) - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}, t))^H (\mathbf{u}(\mathbf{p}, t) - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}, t)) / \sigma_A^2 \right), \quad (4)$$

где H – символ эрмитова сопряжения.

Максимизация функции правдоподобия L_z эквивалентна минимизации квадрата нормы евклидова пространства

$$g(\mathbf{p}) = \|\mathbf{u}(\mathbf{p}, t) - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}, t)\|^2 = (\mathbf{u}(\mathbf{p}, t) - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}, t))^H \times (\mathbf{u}(\mathbf{p}, t) - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}, t)) \quad (5)$$

по неизвестному параметру $\mathbf{p}$.

Для решения задачи будем использовать нейросетевой подход, в соответствии с которым единичный вектор $\mathbf{p}'$ представляет собой отклик нейронной сети на входные воздействия, т.е.

$$\mathbf{p}' = \mathbf{Y} \left(\mathbf{u}', \left\{ \mathbf{w}^{(1)}, \mathbf{w}^{(2)}, \dots, \mathbf{w}^{(L)}; \mathbf{b}^{(1)}, \mathbf{b}^{(2)}, \dots, \mathbf{b}^{(L)} \right\} \right) = \mathbf{Y}(\mathbf{u}', \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\}), \quad (6)$$

где $\mathbf{w}^{(n)}$ и $\mathbf{b}^{(n)}$ – коэффициенты связи и смещения n -го слоя нейронной сети $n = 1, 2, \dots, L$;

$$\mathbf{u}' = \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}'); \quad (7)$$

$\{\mathbf{w}; \mathbf{b}\}$ – компактная форма записи, обозначающая множество всех коэффициентов нейронной сети.

Обучение нейронной сети может быть выполнено по критерию минимума целевой функции (5) после замены $\mathbf{p}$ на $\mathbf{Y}(\mathbf{u}', \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\})$ и $\mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$ на $\mathbf{u}'$. При этом целевая функция (5) становится функцией коэффициентов связи и смещения нейронной сети

$$g_{u'}(\{\mathbf{w}; \mathbf{b}\}) = \|\mathbf{u}' - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{Y}(\mathbf{u}', \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\}))\|^2 = (\mathbf{u}' - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{Y}(\mathbf{u}', \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\})))^H (\mathbf{u}' - \mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{Y}(\mathbf{u}', \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\}))). \quad (8)$$

В силу того, что между векторами $\mathbf{u}'$ и $\mathbf{p}'$ существует однозначная функциональная связь, задача поиска минимума (8) эквивалентна минимизации целевой функции

$$g_{p'}(\{\mathbf{w}; \mathbf{b}\}) = \|\mathbf{p}' - \mathbf{Y}(\mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}'), \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\})\|^2 = (\mathbf{p}' - \mathbf{Y}(\mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}'), \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\}))^T (\mathbf{p}' - \mathbf{Y}(\mathbf{A}^T \mathbf{x}(\mathbf{p}'), \{\mathbf{w}; \mathbf{b}\})). \quad (9)$$

Методы обучения нейронных сетей известны, например, [8]. В настоящее время в основе большинства методов обучения с учителем лежат разновидности градиентных методов и метод обратного распространения ошибки, при котором задача сводится к определению компонентов вектора градиента $\partial g_{p'} / \partial w_{j,j}^{(n)}$ и $\partial g_{p'} / \partial b_j^{(n)}$.

Пусть координаты элементов плоской M -элементной АР заданы в правой декартовой системе координат $Oxyz$, в которой начало отсчета (точка O совпадает с фазовым центром антенны, направление оси Ox – с направлением внешней нормали, оси Oz и Oy расположены в плоскости раскрыва антенны). При этом элементы векторов-столбцов $\mathbf{q}_m = (q_{xm}; q_{ym}; q_{zm})$ имеют нулевую составляющую $q_{xm} = 0$.

Пусть вектор-строка $\mathbf{r}_0 = (r_{0x}; r_{0y}; r_{0z})$ определяет положение равносигнального направления, относительно которого вдоль ортогональных координатных направлений попарно разведены лучи АР, образующие прямую моноимпульсную связку.

В этом случае элементы матрицы $\mathbf{A}$ могут быть заданы при помощи выражений

$$A_{m,1} = |A_{0m}| \exp(i\psi_{0m}) \exp(-ik(q_{ym}r_{0y} + q_{zm}(r_{0z} + \delta r_z))); \quad (10)$$

$$A_{m,2} = |A_{0m}| \exp(i\psi_{0m}) \exp(-ik(q_{ym}r_{0y} + q_{zm}(r_{0z} - \delta r_z))); \quad (11)$$

$$A_{m,3} = |A_{0m}| \exp(i\psi_{0m}) \exp(-ik(q_{ym}(r_{0y} + \delta r_y) + q_{zm}r_{0z})); \quad (12)$$

$$A_{m,4} = |A_{0m}| \exp(i\psi_{0m}) \exp(-ik(q_{ym}(r_{0y} - \delta r_y) + q_{zm}r_{0z})), \quad (13)$$

где $A_{0m} = |A_{0m}| \exp(i\psi_{0m})$ – комплексная амплитуда m -го канала АР при формировании неотклоненного луча; $\delta r_y, \delta r_z$ – смещения лучей вдоль соответствующих координатных направлений.

Матрице КВК $\mathbf{A}$ соответствуют четыре приемных ДН, определяемых выражением

$$F_n(p_y, p_z) = (\mathbf{A}^T \mathbf{f}(p_y, p_z))_n \cdot \sqrt{1 - p_y^2 - p_z^2}, \quad (14)$$

где (p_y, p_z) – направляющие косинусы, определяющие направление на цель;

$$\mathbf{f}(p_y, p_z) = \exp(ik(q_{ym}p_y + q_{zm}p_z)). \quad (15)$$

Сомножитель $\sqrt{1 - p_y^2 - p_z^2}$ в выражении (14) соответствует ДН одиночного элемента и в общем случае равен скалярному произведению вектора, направленного на точку наблюдения, и единичного вектора внешней нормали к раскрыву АР.

Как видно, вектор-функция $\mathbf{f}(p_y, p_z)$ аналогична вектор-функции $\mathbf{x}(\mathbf{p}, t)$ и отличается только тем, что в ней от-

брошена составляющая $\exp(i\omega t)$ и учтена система координат наблюдения. Отсюда следует, что на выходе антенны с учетом составляющей шума в момент времени t получают вектор сигналов

$$\mathbf{z}(p_y, p_z) = a \exp(i\phi) \mathbf{A}^T \mathbf{f}(p_y, p_z) + \xi. \quad (16)$$

В этом случае измерение угловых координат классическим амплитудным методом осуществляют при помощи двух пеленгационных характеристик (ПХ):

$$D_z(p_y, p_z) = \frac{|z_1(p_y, p_z)| - |z_2(p_y, p_z)|}{|z_1(p_y, p_z) + z_2(p_y, p_z)|}; \quad (17)$$

$$D_y(p_y, p_z) = \frac{|z_3(p_y, p_z)| - |z_4(p_y, p_z)|}{|z_3(p_y, p_z) + z_4(p_y, p_z)|}. \quad (18)$$

Измерение координат моноимпульсным методом осуществляют на линейном участке ПХ. При этом крутизна ПХ соответствует отношению

$$\frac{\partial D_z(r_{0y}, r_{0z})}{\partial p_z} = 0,5 \delta r_z^{-1} (z_1(r_{0y}, r_{0z}) - z_2(r_{0y}, r_{0z})); \quad (19)$$

$$\frac{\partial D_y(r_{0y}, r_{0z})}{\partial p_y} = 0,5 (\delta r_y)^{-1} (z_3(r_{0y}, r_{0z}) - z_4(r_{0y}, r_{0z})), \quad (20)$$

а соответствующие угловые координаты находят по формулам:

$$p_z = \left(\frac{\partial D_z(r_{0y}, r_{0z})}{\partial p_z} \right)^{-1} D_z(p_y, p_z);$$

$$p_y = \left(\frac{\partial D_y(r_{0y}, r_{0z})}{\partial p_y} \right)^{-1} D_y(p_y, p_z). \quad (21)$$

В отличие от классического моноимпульсного метода нейросетевой подход не требует формирования ПХ.

Выходные сигналы моноимпульсной группы лучей необходимо подвергнуть нормировке (чтобы исключить влияние на отклик нейронной сети амплитуды A источника).

Рассмотрим набор входных сигналов нейронной сети, получаемых после нормировки к максимальной амплитуде сигналов моноимпульсной группы:

$$Y_n^{(0)} = \frac{1}{\max_{n=1,2,3,4} |z_n(p_y, p_z)|} |z_n(p_y, p_z)|. \quad (22)$$

Например, пусть нейронная сеть содержит три слоя. В этом случае отклик НС можно представить в виде вектора

$$\mathbf{Y} = \mathbf{c}^{(3)} \left(\mathbf{w}^{(3)} \cdot \mathbf{c}^{(2)} \left(\mathbf{w}^{(2)} \cdot \mathbf{c}^{(1)} \left(\mathbf{w}^{(1)} \mathbf{Y} + \mathbf{b}^{(1)} \right) + \mathbf{b}^{(2)} \right) + \mathbf{b}^{(3)} \right), \quad (23)$$

где $\mathbf{c}^{(n)}(x)$ – функция активации нейронов n -го слоя.

Число слоев может быть и больше, но не меньше двух. При этом выражение (22) несложно трансформировать для любого произвольного числа слоев.

4. Численные результаты

Пусть плоская АР состоит из $M = 30 \times 30 = 900$ антенных элементов, размещенных в узлах прямоугольной сетки с одинаковым шагом $0,5\lambda$ по вертикали и горизонтали. Для формирования приемных лучей моноимпульсной группы будем использовать синфазные распределения

$$A_{0m} = \left(\Delta_{Ay} + (1 - \Delta_{Ay}) \cos^2 \left(\frac{\pi q_{ym}}{L_y} \right) \right) \left(\Delta_{Az} + (1 - \Delta_{Az}) \cos^2 \left(\frac{\pi q_{zm}}{L_z} \right) \right), \quad (24)$$

где $\Delta_{Ay,z}$ – «пьедесталы» амплитудных распределений; $L_{y,z}$ – линейные размеры антенной системы.

В главных сечениях ширина ориентированного по нормали к раскрытию луча рассматриваемой АР с амплитудным распределением вида (24) при $\Delta_{Ay} = 0,3$ равна $4,22^\circ$.

В этом случае для реализации классического моноимпульсного пеленгатора необходимо развести лучи АР в противоположные стороны от равносигнального направления $\mathbf{r}_0 = (1, 0, 0)$ на угол, равный половине ширины луча. При этом параметры $\delta r_y = \delta r_z = \sin 2,11^\circ = 0,0368$.

На рисунке 1 приведена соответствующая обычному методу пеленгации прототипу поверхность дисперсий оценок угловых координат от истинных значений, полученных при ОСШ комплексных сигналов моноимпульсной группы лучей, равном 12,2 дБ. Точка А на рисунке 1 соответствует максимальной дисперсии ошибки измерения угловых координат цели моноимпульсным методом в прямоугольной области пространства направляющих косинусов при смещении цели относительно РСН (точка С на рис. 1) по обеим координатам. Точка В обозначает максимальную дисперсию ошибки измерения угловой координаты моноимпульсным методом при смещении цели вдоль одного из координатных направлений.

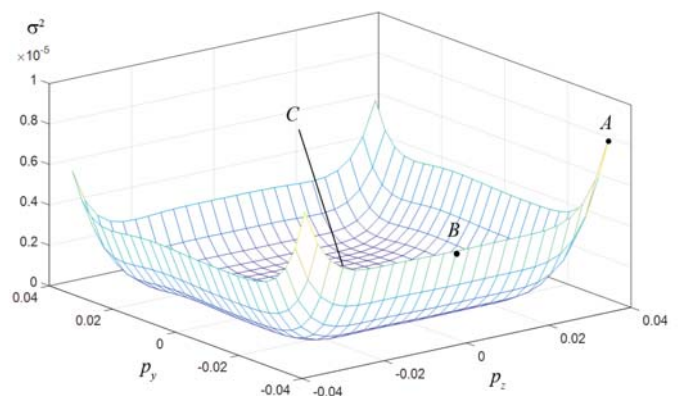


Рис. 1. Поверхность дисперсий ошибок измерения угловых координат моноимпульсным методом в прямоугольной пространственной области

Видно, что при увеличении отклонения цели от РСН даже при низком уровне шумов точность оценивания направляющих косинусов быстро уменьшается. Для рассматриваемого примера в точке A величина дисперсии ошибки $\sigma_A^2 \approx 8 \cdot 10^{-6}$, а в точке $B - \sigma_B^2 \approx 4 \cdot 10^{-6}$.

На рисунке 2 показано распределение лучей моноимпульсной группы в пространстве относительно РСН. Области лучей по уровню половинной мощности пронумерованы и разнесены вдоль координатных направлений. При этом штриховой линией показана область, занимаемая центральным или суммарным лучом моноимпульсной группы. Штрих-пунктирная линия соответствует области измерений, для которой получена поверхность дисперсии ошибок на рис. 1. Соотношение площадей, занимаемой центральным лучом и квадрата, в который вписан центральный луч, по известным формулам площади квадрата и круга составляет 1,273.

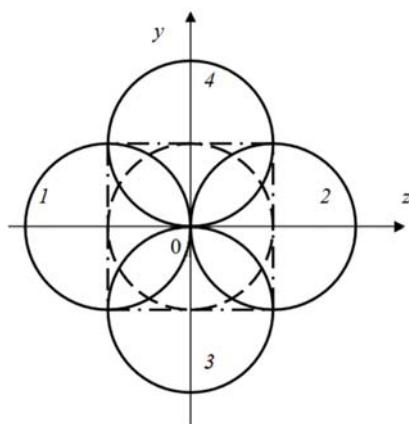


Рис. 2. Распределение лучей моноимпульсной группы в пространстве (сплошные кривые), штриховая линия ограничивает область измерений известного пеленгатора, штрих-пунктирная линия ограничивает область измерений предлагаемым методом

Отметим, что в выбранной системе координат составляющие (p_1, p_2) вектора направления соответствуют компонентам вектора p_y и p_z , а составляющая $p_3 = p_x$ определяется из условия единичной длины вектора направления.

Для реализации предлагаемого метода была использована полносвязная нейронная сеть прямого распространения с четырьмя входными сигналами, тремя скрытыми слоями, содержащими 100, 40 и 10 нейронов. Функции активации во всех скрытых слоях соответствовали функции $\tanh(x)$. Выходной слой содержал два нейрона с линейной функцией активации, т.е. НС имела два выходных сигнала.

Обучение НС осуществлялось на выборке из 4000 примеров, которые были сгенерированы при помощи датчика случайных чисел, распределенных равномерно в прямоугольной области, в которую вписана линия уровня 0,707 центрального луча АР. Эта область показана на рисунке 2 штрих-пунктирной линией.

На рисунке 3 приведена диаграмма, иллюстрирующая сходимость процесса обучения нейронной сети и качество обучения при использовании метода Левенберга-Маквардта [9].

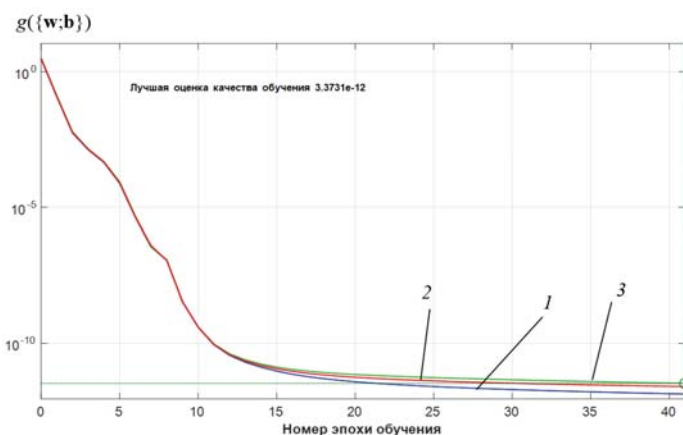


Рис. 3. Обучение нейронной сети:
1 – средняя ошибка по всему множеству примеров обучающей выборки; 2 – средняя ошибка для тестовой выборки примеров; 3 – индикатор переобучения

Первые две кривые на рисунке 3 соответствуют значениям показателя (9) в конце каждой эпохи обучения. При этом кривая 1 характеризует среднюю ошибку всех выходов сети по всему набору обучающих примеров. Кривая 2 – среднюю ошибку всех выходов сети для тестовой выборки примеров, не используемых в обучении. Кривая 3 соответствует индикатору переобучения нейронной сети (процесс обучения может быть остановлен при условии монотонного роста кривой 3 на протяжении нескольких эпох). Процесс обучения занял 5 минут 17 секунд.

На рисунке 4 представлена соответствующая предлагаемому методу поверхность дисперсий оценок угловых координат от истинных значений, полученных при ОСШ комплексных сигналов моноимпульсной группы лучей, равному 12,2 дБ. Обозначения на данной фигуре соответствуют введенным ранее на рисунке 1. При этом $\sigma_A^2 \approx 3 \cdot 10^{-7}$, $\sigma_B^2 \approx 1 \cdot 10^{-7}$. Это позволяет заключить, что предлагаемый метод позволил снизить величину дисперсии измерения угловых координат более, чем на порядок.

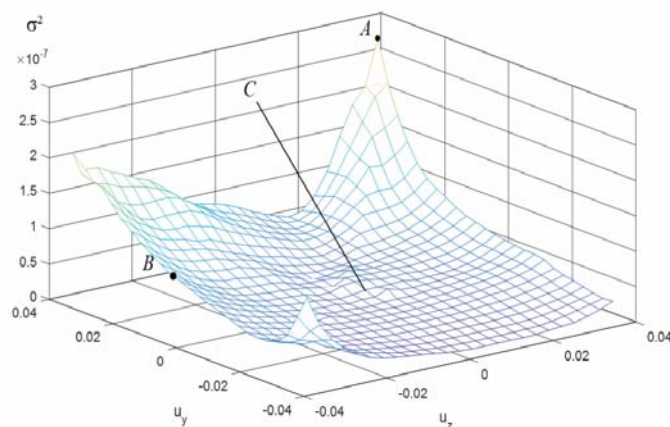


Рис. 4. Поверхность дисперсий ошибок измерения угловых координат моноимпульсным методом в прямоугольной пространственной области

При реализации моноимпульсного метода для рассматриваемой прямоугольной области пространства направляющих косинусов, если руководствоваться правилом «трех сигм», в точке A на рисунке 1 угловая ошибка достигает значения $0,48^\circ$, а в точке $B - 0,3^\circ$. При реализации предлагаемого метода во всей рассматриваемой области пространства направляющих косинусов величина ошибки не превышает значения $0,094^\circ$. Это доказывает повышение точности измерений при его использовании.

Чтобы ограничить рост угловой ошибки при смещении цели в двух плоскостях в моноимпульсных системах выполняют измерения угловых координат в области пространства, соответствующей центральному или суммарному лучу моноимпульсной группы. При этом площадь пространства, в которой производятся измерения уменьшается. Предлагаемый метод позволяет рассматривать прямоугольную область измерений, при чем величина угловой ошибки меньше, а область измерений расширяется примерно в 1,3 раза.

Поскольку полученные оценки соответствуют одной из возможных реализаций шума, в таблице 1 приведены несколько значений средних дисперсий по всей области измерений для известного и предлагаемого методов определения направления на цель. Из анализа данных таблицы 1 следует вывод о преимуществе предлагаемого метода по сравнению с известным.

Таблица 1

Средние дисперсии оценок измерения координат при различном ОСШ

Метод измерений	ОСШ, дБ			
	7,5	8,8	12,2	13,9
Обычный пеленгатор	3,56e-6	3,32e-6	2,65e-6	2,62e-6
Предлагаемый метод	3,11e-6	2,71e-6	2,08e-6	1,75e-6

5. Заключение

Таким образом, предложенный метод пеленгации отличается от известного применением нейронных сетей и не требует формирования пеленгационной характеристики для решения задачи определения угловых координат.

Полученные результаты показывают, что предлагаемый метод позволяет расширить пространственную область оценки угловых координат по сравнению с обычным способом примерно в 1,3 раза, что может оказать существенное значение для сокращения времени обзора пространства.

Дисперсия ошибки измерения угловых координат предлагаемым методом в отличие от известного равномерно распределена во всей пространственной области и зависит от уровня шума на входе устройства обработки. В связи с этим можно использовать предлагаемый метод в tandem с классическим методом пеленгации. При этом реализация нейронной сети возможна с применением технологии программируемых логических интегральных схем.

Литература

1. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. Под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 2. М.: Техносфера, 2015. 680 с.
2. Коростелев А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
3. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
4. Ратынский М.В., Порсев В.И. Моноимпульсная пеленгация в РЛС с цифровыми ФАР / Под ред. В.И. Порсева. М.: Радиотехника, 2019. 160 с.
5. Вендик О.Г. Парнес В.М. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию) / Под ред. Л.Д. Бахраха. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.
6. Патент РФ № 2225990. Способ обработки сигналов при двухканальной амплитудной пеленгации / Автисьянц В.А., Горовой А.В., Ларионов Б.А., Музыченко Н.Ю., Фоминченко Г.Л. МПК G01S 3/14. Оpubл. 20.03.2003.
7. Патент РФ № 2615491. Способ одновременного измерения двух угловых координат цели в обзорной амплитудной моноимпульсной радиолокационной системе с антенной решеткой и цифровой обработкой сигнала / Джигоев А.Л., Омельчук И.С., Яковленко В.В. МПК G01S 13/44, G01S 3/14. Оpubл. 05.04.2017.
8. Николенко С.И., Кадуринов А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. С-Пб.: Питер, 2018. 480 с.
9. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
10. Ратынский М.В., Порсев В.И. Моноимпульсная пеленгация в РЛС с цифровыми ФАР / Под ред. В.И. Порсева. М.: Радиотехника, 2019. С. 18.

METHOD FOR DETERMINING THE TARGET DIRECTION OF A DIGITAL ANTENNA GRID OF A MONOPULSE RADAR STATION

Nikolay V. Shatskiy, Mints Radio-Technical Institute (RTI), Moscow, Russia, nshatsky@rti-mints.ru

Nikolay A. Hodataev, Mints Radio-Technical Institute (RTI), Moscow, Russia, nkhodataev@krtis.ru

Abstract

On the basis of the analysis of the errors of the monopulse method of direction finding of the target of a radar station with a digital antenna array, a group of errors associated with fluctuations of the equisignal direction when scanning the beam of the antenna system, as well as with the non-identical shape of the generated beams of the monopulse group, was separated into a special cluster. This circumstance is especially critical for large-aperture radars with phased array with electric scanning, where the number of formed receiving beams is significant, in addition, the coordinates of the target usually do not coincide with the coordinate planes along which the coordinates are measured. The nonlinearity of this problem requires unique approaches and solutions. The classical formulation of the problem is associated with obtaining an estimate of the radiation vector of the entire antenna array from the known measured vector of complex signals at the output of the antenna array at a fixed time. To solve this problem and determine the decision rule, a neural network approach was used, while the neural network was trained according to the criterion of the minimum of the selected objective function. The substantiation of increasing the accuracy of measurements of angular coordinates in monopulse systems with scanning digital phased antenna arrays based on the use of neural networks in the process of radar data processing without the formation of direction finding characteristics is given. The results of modeling the characteristics of the antenna array (using the example of a flat antenna array with a dimension of 30 by 30 emitters) under the conditions adopted in the model of the antenna array of assumptions when implementing the classical and original methods are shown using examples of the surfaces of the variances of errors in measuring angular coordinates by the monopulse method in a rectangular spatial domain, which showed reduction of error and expansion of the measurement area. In the future, the practical implementation of this approach is assumed using FPGA in the receiving paths of the frequency-dependent part of the radio direction finder.

Keywords: monopulse DF methods, neural networks, radio beam deflection, DF characteristic angular target coordinates, the gradient method, the coordinate system of observation.

References

1. Handbook on radar / Ed. M.I. Skolnik. Per. from English Ed. V.S. Willows. In 2 books. Book 2. Moscow: Technosphere, 2015. 680 p. (In Russian)
2. A.A. Korostev, N.F. Klyuev, Yu.A. Melnik (1978). Theoretical Foundations of Radar / Ed. V.E. Dulevich. Moscow: Sov. radio. 608 p. (In Russian)
3. A.I. Leonov, K.I. Fomichev (1984). Monopulse radar. Moscow: Radio and communication. 312 p. (In Russian)
4. M.V. Ratynsky, V.I. Porsev (2019). Monopulse direction finding in radar with digital phased array / Ed. IN AND. Porseva. Moscow: Radiotekhnika, 160 p. (In Russian)
5. O.G. Vendik, V.M. Parnes (2002). Antennas with electrical scanning (introduction to theory) / Ed. L. D. Bahrakha. Moscow: SAYNS-PRESS. 232 p. (In Russian)
6. Patent No. 2225990. Method for processing signals with two-channel amplitude direction finding / Avetisyants V.A., Gorovoy A.V., Larionov B.A., Muzychenko N.Yu., Fominchenko G.L. IPC G01S 3/14. Publ. 03/20/2003 (In Russian)
7. Patent No. 2615491. Method of simultaneous measurement of two angular coordinates of a target in a survey amplitude monopulse radar system with an antenna array and digital signal processing / Dzhioev A.L., Omelchuk I.S., Yakovlenko V.V. IPC G01S 13/44, G01S 3/14. Publ. 04/05/2017 Russian)
8. S.I. Nikolenko, A.A. Kadurin E.O. Arkhangelskaya (2018). Deep Learning. St. Petersburg. 480 p. (In Russian)
9. F. Gill, W. Murray, M. Wright (1985). Practical optimization. Moscow: Mir. 509 p. (In Russian)
10. M.V. Ratynsky, V.I. Porsev (2019). Monopulse direction finding in radar with digital phased array. Moscow: Radiotekhnika. P. 18 (In Russian)

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ BACKHAUL СЕТЕЙ 5G NR

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-11-16

Покаместов Дмитрий Алексеевич,

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия, dmaltomsk@mail.ru

Крюков Яков Владимирович,

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия,
kryukov.tusur@gmail.com

Рогожников Евгений Васильевич,

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия, udzhon@mail.ru

Новичков Серафим Алексеевич,

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия,
S.Novichkov@skoltech.ru

Лаконцев Дмитрий Владимирович,

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия,
d.lakontsev@skoltech.ru

Manuscript received 28 September 2021;

Accepted 22 November 2021

Ключевые слова: 5G, NR, транспортные сети,
backhaul, пропускная способность, Cloud RAN,
базовые станции, gNB, CU, DU, RU

В настоящее время во всем мире внедряются системы мобильной связи пятого поколения стандарта 5G NR. Одним из важнейших компонентов этих систем являются транспортные backhaul сети, соединяющие базовую станцию и ядро сети. Пропускная способность этих сетей должна быть достаточной для передачи большого объема трафика. В этой статье мы предлагаем математическую модель расчета пропускной способности backhaul сетей, которая может быть использована при проектировании инфраструктуры 5G. Также мы рассматриваем некоторые важные аспекты архитектуры 5G, принципиально отличающиеся от технологий сетей связи предыдущих поколений. Одним из таких аспектов является использование распределенных базовых станций, в которых блоки обработки радиосигналов, блоки низкоуровневой и высокоуровневой обработки протоколов разделены не только логически, но и физически, а также могут быть пространственно разнесены. Таким образом, системы 5G вписываются в концепцию облачных сетей, за счет чего можно существенно сэкономить ресурсы на развертывание инфраструктуры. Однако, такое решение повышает требования к транспортным сетям. Рассмотрены возможные подходы к физической реализации транспортных сетей, включая принципиально новое решение, интегрирующее радиодоступ и backhaul сети. Наконец, с учетом этих и других факторов описана созданная нами математическая модель оценки требуемой пропускной способности backhaul сетей. Модель основана на расчете максимальной сетевой нагрузки в соте базовой станции с учетом таких параметров как количество пространственных лучей, агрегированное число поднесущих, индекс модуляции, скорость кодирования и др. Также в модели учитывается распределенная структура базовой станции. Показаны три характерных сценария работы базовой станции 5G и для них приведена оценка требуемой пропускной способности backhaul сетей.

Информация об авторах:

Покаместов Дмитрий Алексеевич, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, к.т.н., доцент, г. Томск, Россия

Крюков Яков Владимирович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, к.т.н., доцент, Москва, Россия

Рогожников Евгений Васильевич, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, к.т.н., заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, доцент, г. Томск, Россия

Новичков Серафим Алексеевич, Сколковский институт науки и технологий главный конструктор лидирующего исследовательского центра "Сеть радиодоступа 5G с открытой архитектурой", Москва, Россия

Лаконцев Дмитрий Владимирович, Сколковский институт науки и технологий, руководитель центра компетенций национальной технической инициативы "Технологии беспроводной связи и интернета вещей" к.т.н., доцент, Москва, Россия

Для цитирования:

Покаместов Д.А., Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Новичков С.А., Лаконцев Д.В. Модель оценки пропускной способности транспортных backhaul сетей 5G NR // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 11-16.

For citation:

Pokamestov D.A., Kryukov Ya.V., Rogozhnikov E.V., Novichkov S.A., Lakontsev D.A. (2021) Model for estimating the throughput of 5G NR backhaul networks. T-Comm, vol. 15, no.12, pp. 11-16. (in Russian)

Введение

Сети мобильной связи пятого поколения 5G NR обеспечивают колоссальную абонентскую скорость передачи до нескольких гигабит в секунду. Это достигается благодаря использованию прорывных (по сравнению с сетями четвертого поколения LTE) решений. Стоит отметить такие технологии как многоантенные системы с цифровым диаграммообразованием MU-Massive MIMO (Multi User Massive Multiple Input Multiple Output), повышение индекса модуляции до QAM-256, использование эффективных LDPC (Low Density Parity Check) и полярных кодов, расширение используемой полосы частот (до 1 ГГц), освоение новых частотных диапазонов (диапазон FR1 от 0.4 до 6 ГГц, диапазон FR2 от 24.25 до 52.6 ГГц). Сети 5G обладают гибкой архитектурой базовой станции (gNB).

Такая архитектура подразумевает функциональное разделение на блок, отвечающий за формирование и обработку радиосигналов RU (Radio Unit), распределенный блок промежуточной обработки DU (Distributed Unit), который в режиме реального времени реализует остальные функции физического уровня, а также MAC и RLC и централизованный блок CU (Central Unit), выполняющий функции более высоких уровней (такие как PDCP, SDAP, RLC и др.). Благодаря такому решению могут строиться распределенные базовые станции, в которых один CU работает с несколькими DU, к каждому из которых подключено несколько RU. При этом DU и CU могут быть виртуальными и реализовываться на удаленных серверах, что вписывается в концепцию облачных сетей Cloud RAN (Radio Access Network) [1].

Для реализации сетей 5G в рамках описанной выше концепции необходимы высокоскоростные транспортные сети, соединяющие блоки gNB и ядро сети. Транспортную сеть можно разделить на так называемые fronthaul (между RU и DU), midhaul (между DU и CU) и backhaul (между CU и ядром сети – 5GC). В этой статье мы проводим анализ ключевых особенностей архитектуры 5G, влияющих на требования к сети backhaul и предлагаем математическую модель расчета пропускной способности этой сети.

Разработанная нами математическая модель основывается на анализе усредненной максимальной сетевой нагрузки соты и экстраполяции результата на структуру распределенной сети. В модели мы учитываем такие характеристики как полоса частот, особенности MIMO, скорость кодирования, индекс модуляции, накладные расходы и др. Также мы приводим оценку пропускной способности при некоторых типовых сценариях функционирования сетей 5G.

1. Особенности архитектуры сетей 5G

Как было сказано выше, базовая станция gNB 5G делится на функциональные блоки CU, DU, RU (для RU также встречается название RRH (Remote Radio Head)), рисунок 1, UE (User Equipment) – мобильное абонентское оборудование.

Стандартом 3GPP TR 38.801 V14.0.0 предусмотрено 8 основных вариантов (опций) разделения процедур между функциональными блоками [2], [3]. Блок RF включает в себя радиочастотную часть, а также цифро-аналоговое и аналого-цифровое преобразование. В блоке операций физического уровня выполняются прямое и обратное преобразования Фурье (БПФ и ОБПФ), цифровое диаграммообразование,

модуляция и демодуляция, эквалайзирование, прекодирование, маппинг, скремблирование, выравнивание скоростей и помехоустойчивое кодирование. В зависимости от разделения этих операций между Low-PHY и High-PHY выделяют дополнительно 4 подопции (7.1, 7.2, 7.2a, 7.3). Блок MAC также делится на две части: Low-MAC, в котором реализованы функции протокола запроса на повторную передачу HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) и High-MAC выполняет функции управления радиоресурсами RRM (Radio Resource Management). Блок управления радиоканалом RLC (Radio Link Control) разделен на блок Low-RLC, в котором операции выполняются в режиме реального времени и High-RLC, операции в котором не привязаны к реальному времени. Следующим блоком является протокол PDCP (Packet Data Convergence Protocol), выполняющий большое количество различных сетевых функций. Последний блок, который обязательно входит в состав CU это протокол управления радиоресурсами RRC (Radio Resource Control). Блоки RF и PHY относятся к первому уровню сетевой иерархии L1. Блоки MAC и RLC относятся к L2, а PDCP и RRC к L3.

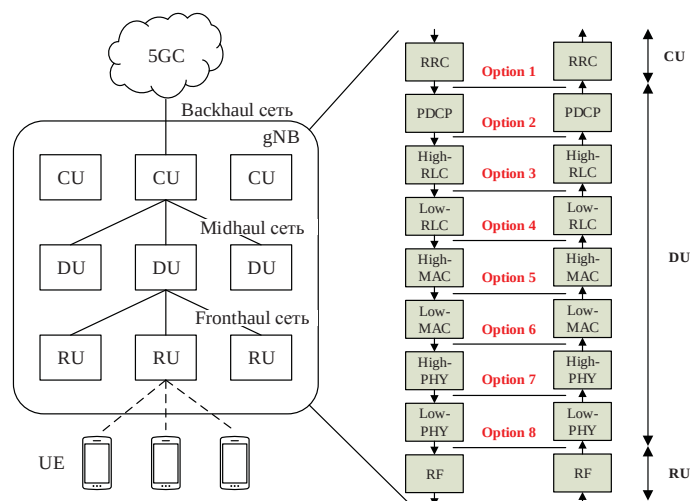


Рис. 1. Архитектура базовой станции 5G

Таким образом, предусмотренная стандартом 5G NR архитектура базовой станции позволяет создавать гибкие решения, адаптированные под нужды и интересы оператора и сценарии развертывания сети. Эта архитектура вписывается в концепцию Cloud RAN, которая подразумевает развертывание блоков CU и DU (как вместе, так и по отдельности) в удаленном дата центре. Такой подход обладает рядом преимуществ по сравнению с классическим развертыванием сетей [1]. Объем обрабатываемого трафика в течение дня мигрирует между спальными и деловыми районами. В концепции Cloud RAN весь этот трафик обрабатывает единый вычислитель (удаленный сервер), вместо распределенного по территории пула базовых станций, простаивающих во время низкой загрузки. За счет этого существенно снижается энергопотребление и себестоимость развертывания сети. С другой стороны, повышаются требования к пропускной способности всех участков транспортной сети.

2. Варианты реализации backhaul сетей

Для реализации backhaul сети необходимо использовать специальные решения, позволяющие обеспечить постоян-

ную высокую пропускную способность [4]. Рассмотрим основные варианты таких решений.

1. Проводная оптическая сеть. Классическое решение при развертывании всех типов транспортных сетей. Благодаря стабильности и огромной пропускной способности это решение является основным и для сетей 5G. В качестве конкретных технологий следует упомянуть гибридные оптико-коаксиальные сети HFC (Hybrid Fiber Coaxial) и пассивные оптические сети PON (passive optical network). Кроме того, развитие технологии Ethernet позволяет строить транспортные сети и на ее основе. Так, новые версии стандарта IEEE P802.3bs поддерживают скорость до 400 Гбит/с [5]. Отметим, что Ethernet целесообразно использовать на относительно малые расстояния, в то время как оптические сети меньше зависят от расстояния [4].

2. Беспроводные каналы связи. Это также традиционное решение, применяемое там, где развертывание инфраструктуры проводных (прежде всего, оптических) сетей по каким-либо причинам затруднено. В качестве физической реализации могут применяться радиорелейные линии, в том числе с диаграммообразованием.

3. Интегрированный доступ и транспортная backhaul сеть IAB (Integrated Access and Backhaul) [6], как частный случай беспроводного канала. Это инновационное решение, предложенное в Release 16 специально для реализации 5G. Технология IAB подразумевает развертывание транспортной backhaul сети на основе радиointерфейса 5G.

Таким образом, backhaul трафик передается напрямую между базовыми станциями одновременно с абонентским трафиком. Это позволяет снизить накладные расходы на развертывание транспортной сети и в целом повышает гибкость и рентабельность системы для оператора. Очевидно, при этом снижается пропускная способность системы за счет использования части радиоресурсов под передачу backhaul трафика. Для разделения трафика может быть использовано временное, частотное и пространственное мультиплексирование (с использованием massive MIMO). Для повышения пропускной способности может быть применена технология полнодуплексной связи [7]. Таким образом, развертывание и планирование IAB является предметом тщательного планирования для операторов [4]. По причине новизны этой тематики в настоящее время появляется большое количество исследований IAB, посвященных анализу потенциала и ограничений этой технологии [8], [9], [10] и др.

Различные решения построения транспортных сетей имеют свои преимущества и недостатки. Проводные сети обеспечивают стабильный канал связи с высокой пропускной способностью, что важно для сот нормального размера. Кроме того, оптические сети широко используются и возможно подключение к существующей инфраструктуре. С другой стороны, IAB может быть эффективно использован для малых (пико, фемто) сот и в случае отсутствия инфраструктуры оптических сетей.

3. Расчет пропускной способности транспортной backhaul сети 5G

Для планирования и развертывания backhaul сетей необходим расчет их пропускной способности. Мы предлагаем метод такого расчета, основанный на оценке усредненной максимальной сетевой нагрузки на соту и экстраполяции

результатов с учетом структуры распределенной базовой станции и сети. Трафик backhaul сети состоит из [11]:

1. User Plane (UP) трафик – основной трафик, передаваемый пользователями [12], [1].
2. Трафик, передаваемый по интерфейсу Xn между базовыми станциями, который физически проходит через backhaul сегмент. Составляет около 4% UP трафика.
3. Control Plane CP трафик – служебная информация (объем пренебрежимо мал относительно UP трафика [11]).
4. Заголовки транспортного уровня. Т.к. стек протоколов транспортного интерфейса S1 в сети LTE [13] совпадает со стек протокола транспортного интерфейса NG в 5G NR [14], считаем возможным воспользоваться результатами из [11], где объем накладных расходов оценивается в 10%.
5. IPsec (14 % согласно [11]).

Следует уточнить, что ряд заголовков и служебной информации уровней L1, L2 и L3 добавляемые при передаче в RAN сети отбрасываются в базовой станции и не учитываются при расчете трафика backhaul сети.

Скорость передачи данных абонента в соответствии с [12] может быть рассчитана как (1). В случае передачи всех ресурсов одному абоненту формулой (1) может быть описан UP трафик за единицу времени.

$$C = 10^{-6} \sum_{j=1}^J (n_{beams}^{(j)} \cdot v_{Layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j), \mu} \cdot 12}{T_s^{\mu}} (1 - OH^{(j)})) \quad (1)$$

где

J – количество агрегированных поднесущих в заданном диапазоне, или комбинации диапазонов (максимум 16);

R – скорость помехоустойчивого кодирования (максимальная 948/1024) [12];

$n_{beams}^{(j)}$ – количество пространственных лучей, формируемых с использованием Massive Multi User MIMO;

$v_{Layers}^{(j)}$ – количество мультиплексируемых слоев MIMO.

Для Single User SU-MIMO – 8 (максимум на одного пользователя) в DL, 4 в UL, для Multi User MU-MIMO – 16 (максимум 4 на одного пользователя, до суммарно 16 на 4 пользователей).

$Q_m^{(j)}$ – максимальный индекс модуляции. Стандартом для передачи в каналах PUSCH и PDSCH (основные каналы передачи пользовательского трафика в uplink и downlink) определены модуляции $\pi/2$ BPSK ... 256 QAM, соответственно, индекс модуляции $Q_m^{(j)}$ равен 1 ... 8 [15].

$f^{(j)}$ – масштабирующий фактор. Может принимать значения 1, 0.8, 0.75 и 0.4. Зависит от используемой пользователем полосы частот, индекса модуляции и количества слоев MIMO [16]. При передаче нескольким пользователям одной gNB, общий $f^{(j)}$ можно принять равным 1.

μ – нумерология. Это один из основных параметров физического уровня, влияющий на расстояние между поднесущими и длину циклического префикса. Документом [15] определены значения нумерологий $\mu = 0 \dots 4$, расстояние между поднесущими $\Delta f = 2^{\mu} 15$ [кГц].

T_s^{μ} – длительность OFDM символа в субфрейме с нумерологией μ , $T_s^{\mu} = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^{\mu}}$

$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ – максимальное количество ресурсных блоков RB в полосе $BW^{(j)}$ с нумерологией μ , определяется [17, 18].

$OH^{(j)}$ – накладные расходы на заголовки протоколов.

$OH^{(j)}$ принимает значения: 0.14 для частотного диапазона FR1 для DL, 0.18 для FR2 для DL, 0.08 для FR1 для UL, 0.1 для FR2 для UL [12].

Мы рассматриваем базовую станцию, которая состоит из одного CU, к которому подключено N^{DU} , каждый из которых обслуживает N^{RU} . В этом случае объем передаваемого UP трафика в единицу времени может быть рассчитан как:

$$R = \sum_{n^{DU}=1}^{N^{DU}} \sum_{n^{RU}=1}^{N^{RU}} C^{n^{RU},DU}, \quad (2)$$

где $C^{n^{RU},DU}$ – скорость передачи, обеспечиваемая RU с индексом n^{RU} , подключенным к DU с индексом n^{DU} , рассчитанная как (1).

Максимальная пропускная способность, необходимая для передачи UP трафика, рассчитанная при допущении, что каждый RU обеспечивает максимально возможную скорость передачи R^{MAX} в соответствии с (1) может быть описана как:

$$R^{MAX} = N^{DU} N^{RU} C^{MAX}. \quad (3)$$

Суммарные накладные расходы на заголовки транспортного уровня и IPsec составляют согласно [11] 28%, таким образом максимальная суммарная требуемая пропускная способность может быть рассчитана как:

$$R^{\Sigma} = 1.25 R^{MAX}. \quad (4)$$

4. Результаты моделирования

В таблице 1 приведено три типовых сценария работы распределенной базовой станции и рассчитанные значения требуемой пропускной способности транспортной сети. Расчет осуществлялся в соответствии с математической моделью, описанной выше. Для упрощения мы считаем, что во всех пространственных лучах и частотных компонентах используются одинаковые параметры.

Таблица 1

Номер сценария	1	2	3
Количество DU	1	5	1
Количество RU на DU	1	4	1
J	8	4	1
Количество лучей n_beams	24	24	1
$v_{Layers}^{(j)}$	1	1	4
$Q_m^{(j)}$	8	8	6
R_{max}	0.9258	0.9258	0.6016
Нумерология μ	1	2	0
Количество ресурсных блоков $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ в диапазоне	273	2	106
Ширина полосы частот в основном диапазоне, МГц	100	2	20
Длительность OFDM символа, мкс	35.714	17.857	71.429
Накладные расходы на заголовки OH	0.14	0.18	0.14
Диапазон	FR1	FR2	FR1
Требуемая пропускная способность backhaul сети (Гбит/с)	143.5	441.3	0.283

Первый сценарий соответствует максимальной сетевой нагрузке классической базовой станции с одним RU и одним DU, агрегирующей 8 частотных компонент. Базовая станция формирует 24 (максимальное значение) пространственных луча, в каждом из которых используется большое число ресурсных блоков с максимальным индексом модуляции и скоростью кодирования. Передача идет в классическом (FR1) диапазоне. Рассчитанная требуемая пропускная способность транспортной backhaul сети составила 143.5 Гбит/с.

Второй сценарий соответствует распределенной базовой станцией с 5 DU, каждый из которых обслуживает 4 RU. Передача ведется в частотном диапазоне FR2. Основные параметры, влияющие на пропускную способность такие же, как и в первом сценарии и близки к максимальным, что соответствует, с одной стороны, высокой сетевой нагрузке, и с другой, хорошим условиям распространения радиосигналов (абоненты находятся вблизи базовой станции). Рассчитанное значение пропускной способности составило 441.3 Гбит/с.

Третий сценарий соответствует менее производительной по сравнению с первыми двумя сценариями базовой станцией с одним DU и одним RU. В этом сценарии не поддерживается диаграммообразование (но формируется четыре слоя MIMO) и агрегирование поднесущих. Передача ведется в полосе 20 МГц, в частотном диапазоне FR1. Условия распространения радиоволн хуже, чем в предыдущих сценариях, поэтому индекс модуляции и скорость кодирования не максимальны. Рассчитанная пропускная способность составила 283 Мбит/с.

Рассмотренные сценарии позволяют сформировать представление о пропускной способности backhaul сети при различной характерной конфигурации базовых станций и условий распространения радиоволн.

Заключение

Сети мобильной связи пятого поколения обеспечивают принципиально новый уровень качества обслуживания абонентов. Ключевой частью инфраструктуры сетей 5G являются транспортные сети, один из сегментов которых – backhaul был рассмотрен в этой статье. Были рассмотрены особенности и возможности архитектуры сетей 5G, влияющие на транспортные сети. Описаны основные подходы к построению этих сетей и факторы, влияющие на их пропускную способность.

Предложен метод расчета требуемой пропускной способности, основанный на анализе абонентской скорости передачи и особенностей распределенной базовой станции. На пропускную способность влияет ряд факторов – от частотных диапазонов, типов антенных систем, условий распространения радиоволн до сложности и производительности базовых станций. Нами была разработана и описана в этой статье математическая модель расчета пропускной способности, позволяющая учесть все эти факторы.

Показан пример расчета пропускной способности backhaul сети для трех сценариев работы базовой станции, в которых значение пропускной способности различается более чем в 100 раз. Математическая модель может применяться при создании, проектировании и оптимизации backhaul сетей.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минцифры России и АО «РВК», а также Сколковского института науки и технологий, идентификатор соглашения предоставления субсидии 0000000007119P190002, №005/20 от 26.03.2020 г.

Литература

1. Крюков Я.В. и др. Анализ вычислительной сложности и времени выполнения стека протоколов в сетях 5G New Radio // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23, № 3. С. 31-37.
2. 3GPP TR 38.801 «3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14) v.14.0.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3056>, Published December 2020
3. 5G NR Logical Architecture and its Functional Splits. <https://www.parallelwireless.com/wp-content/uploads/5GFunctionalSplits.pdf>
4. Innovation in 5G Backhaul Technologies", A 5G Americas White Paper. <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/06/Innovations-in-5G-Backhaul-Technologies-WP-PDF.pdf> Published June 2020.
5. IEEE standard for Ethernet. https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html Published August 2018.
6. 3GPP TS 38.174 Integrated access and backhaul radio transmission and reception» (Release 16) V16.2.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3665> Published June 2021.
7. Rogozhnikov E.V. et al. Full duplex wireless communication system, analog and digital cancellation, experimental research // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2017. P. 1-5.
8. Polese M. et al. Integrated access and backhaul in 5G mmWave networks: Potential and challenges // IEEE Communications Magazine. 2020. Vol. 58. No. 3. P. 62-68.
9. Saha C., Afshang M., Dhillon H. S. Integrated mmwave access and backhaul in 5G: Bandwidth partitioning and downlink analysis // 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018. P. 1-6.
10. Saha C., Dhillon H. S. Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2019. Vol. 37. No. 12. P. 2669-2684.
11. Guidelines for LTE Backhaul Traffic Estimation. NGMN Alliance; 2011. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_Whitepaper_Guideline_for_LTE_Backhaul_Traffic_Estimation.pdf. Published July 2011.
12. 3GPP TS 38.306 V16.4.0 User Equipment (UE) radio access capabilities. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3193> Published March 2017.
13. 3GPP TS 38.414. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1-M data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2447> Published July 2020.
14. 3GPP TS 38.414. NG-RAN; NG data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3224> Published July 2020.
15. 3GPP TS 38.211 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3213> Published April 2017.
16. 3GPP TSG RAN WG1 Meeting#92 R1-1801352 <https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R1-92--18769.htm> Published March 2018
17. 3GPP TS 38.101-1: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283> Published July 2021
18. 3GPP TS 38.101-2: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 2: Range 2 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3284> Published July 2021.

MODEL FOR ESTIMATING THE THROUGHPUT OF 5G NR BACKHAUL NETWORKS

Dmitry A. Pokamestov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, dmaltomsk@mail.ru

Yakov V. Kryukov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, kryukov.tusur@gmail.com

Evgeny V. Rogozhnikov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, udzhon@mail.ru

Serafim A. Novichkov, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia, S.Novichkov@skoltech.ru

Dmitry A. Lakontsev, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia, d.lakontsev@skoltech.ru

Abstract

Currently, the fifth generation of mobile communication systems of the 5G NR standard are being introduced all over the world. One of the most important components of these systems are backhaul transport networks connecting the base station and the core of the network. The bandwidth of these networks must be sufficient to carry a large amount of traffic. In this article, we propose a mathematical model for calculating the throughput of backhaul networks, which can be used in the design of 5G infrastructure. We also consider some important aspects of the 5G architecture, which make fundamental differences from communication networks of previous generations. One of these aspects is the use of distributed base stations, in which radio signal processing units, low-level and high-level protocol processing units are separated not only logically, but also physically, and can also be spatially separated. Thus, 5G systems fit into the concept of cloud networks, due to which it is possible to significantly save resources for infrastructure deployment. However, such a solution increases the requirements for transport networks. Possible approaches to the physical implementation of transport networks are considered, including a fundamentally new solution that integrates radio access and backhaul networks. Finally, taking into account these and other factors, a mathematical model created by us for estimating the required bandwidth of backhaul networks is described. The model is based on calculating the maximum network load in a base station cell, taking into account such parameters as the number of spatial beams, the aggregated number of subcarriers, modulation index, coding rate, etc. The distributed structure of the base station is also taken into account in the model. Three scenarios of 5G base station operation are shown and an estimate of the required throughput of backhaul networks is given for them.

Keywords: 5G, NR, backhaul, bandwidth, Cloud RAN, base stations, gNB, CU, DU, RU.

References

1. Ya.V. Kryukov et al. (2020). Analysis of Computational Complexity and Execution Time of the Protocol Stack in 5G Networks. New Radio TUSUR reports. Vol. 23, no. 3, pp. 31-37. (in Russian)
2. 3GPP TR 38.801 "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14) v.14.0.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3056>, Published December 2020.
3. 5G NR Logical Architecture and its Functional Splits. <https://www.parallelwireless.com/wp-content/uploads/5GFunctionalSplits.pdf>
4. Innovations in 5G Backhaul Technologies", A 5G Americas White Paper. <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/06/Innovations-in-5G-Backhaul-Technologies-WP-PDF.pdf> Published June 2020.
5. IEEE Standard for Ethernet. https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html Published August 2018.
6. 3GPP TS 38.174 "Integrated access and backhaul radio transmission and reception" (Release 16) V16.2.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3665> Published June 2021.
7. E.V. Rogozhnikov et al. (2017). Full duplex wireless communication system, analog and digital cancellation, experimental research. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE. P. 1-5.
8. M. Polese et al. (2020). Integrated access and backhaul in 5G mmWave networks: Potential and challenges. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 58. No.. 3. P. 62-68.
9. C. Saha, M. Afshang, H.S. (2018). Dhillon Integrated mmwave access and backhaul in 5G: Bandwidth partitioning and downlink analysis. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. P. 1-6.
10. C. Saha, H.S. Dhillon (2019). Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 37. No. 12. P. 2669-2684.
11. Guidelines for LTE Backhaul Traffic Estimation. NGMN Alliance; 2011. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_Whitepaper_Guideline_for_LTE_Backhaul_Traffic_Estimation.pdf Published July 2011.
12. 3GPP TS 38.306 V16.4.0 User Equipment (UE) radio access capabilities. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3193> Published March 2017.
13. 3GPP TS 36.414. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); SI data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2447> Published July 2020.
14. 3GPP TS 38.414. NG-RAN; NG data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3224> Published July 2020.
15. 3GPP TS 38.211 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3213> Published April 2017.
- 16 3GPP TSG RAN WGI Meeting#92 RI-1801352 <https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--RI-92--18769.htm> Published March 2018
- 17 3GPP TS 38.101-1: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283> Published July 2021
- 18 3GPP TS 38.101-2: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 2: Range 2 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3284> Published July 2021

Information about authors:

Dmitry A. Pokamestov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Tomsk, Russia

Yakov V. Kryukov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Tomsk, Russia

Evgeny V. Rogozhnikov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Tomsk, Russia

Serafim A. Novichkov, Skolkovo Institute of Science and Technology, Lead Engineer of LRC "5G Radio Access Network with Open Architecture", Moscow, Russia

Dmitry A. Lakontsev, Skolkovo Institute of Science and Technology, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of the Competence Center of the National Technical Initiative "Technologies of Wireless Communication and the Internet of Things", Moscow, Russia

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ДВУМЯ СЛУЧАЙНЫМИ СИГНАЛАМИ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ ЭФИРА

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-17-23

Дорохов Станислав Васильевич,
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия

Михайлов Вячеслав Эдуардович,
МИРЭА – Российский технологический университет;
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, v.e.mihaylov@mtuci.ru

Manuscript received 07 September 2021;
Accepted 26 October 2021

Ключевые слова: случайный сигнал, генератор шума, методика расчета, коэффициент взаимной корреляции, эфирные помехи, соотношение сигнал-шум, цифровая обработка сигналов, математическая статистика, статистическая радиотехника

На практике во многих случаях необходимо измерять величину коэффициента взаимной корреляции между двумя случайными сигналами. При расчете величины коэффициента взаимной корреляции между выходными сигналами генераторов шума (ГШ) на рабочем месте в помещении всегда присутствуют эфирные помехи, которые существенно искажают результаты измерений. Для случаев, когда нет возможности воспользоваться существующими способами для избавления от эфирной помехи при проведении измерений, авторами данной статьи разработана новая методика, позволяющая вычислять величину коэффициента взаимной корреляции между двумя случайными сигналами в условиях эфирных помех, которая может использоваться для оценки специальных свойств генераторов шума, создающих маскирующую помеху. В первой части статьи проведен обзор существующих методик проведения измерений при расчете величины коэффициента взаимной корреляции между двумя случайными сигналами в условиях эфирных помех. Во второй части изложена новая методика и приведены примеры расчета коэффициента взаимной корреляции по данной методике. В процессе исследования было установлено, что коэффициент взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ зависит от величины соотношения "мощность помехи/мощность сигнала" (т.е. от величины мощности коррелированной части в составе сигналов ГШ). Практическая значимость проведенного исследования заключается в возможности использования методики, позволяющей вычислять коэффициент взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ в условиях случайных помех на рабочем месте разработчика, не имея возможности проводить измерения в экранированном помещении.

Информация об авторах:

Дорохов Станислав Васильевич, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры БК №235 "Цифровые устройства и системы защиты информации" Института кибернетики ФГБОУ ВО "МИРЭА - Российский технологический университет", Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-7833-5773>

Михайлов Вячеслав Эдуардович, ассистент кафедры "Безопасность телекоммуникаций" факультета "Кибернетика и информационная безопасность" ФГБОУ ВО "Московский технический университет связи и информатики", ассистент кафедры БК №235 "Цифровые устройства и системы защиты информации" Института кибернетики ФГБОУ ВО "МИРЭА - Российский технологический университет", Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2609-2666>

Для цитирования:

Дорохов С.В., Михайлов В.Э. Методика расчета коэффициента взаимной корреляции между двумя случайными сигналами в условиях помех эфира // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 17-23.

For citation:

Dorokhov S.V., Mikhaylov V.E. (2021) Method for calculating cross-correlation coefficient between two random signals in the presence of etheric interference. *T-Comm*, vol. 15, no.12, pp. 17-23. (in Russian)

Введение

В настоящее время значительно и быстро растут требования к параметрам средств защиты информации от утечки по побочным каналам. Это обусловлено тем, что непрерывно улучшаются методы выделения информационных сигналов из смеси их с маскирующей помехой (МП) и одновременно разрабатывается более совершенная и скоростная аппаратура, используемая для их разделения.

Наиболее эффективными являются активные средства защиты (АСЗ). Одним из требований, предъявляемых к генераторам МП, является выполнение норм по величине коэффициента взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ.

В процессе проведения измерений величины коэффициента взаимной корреляции на входы измерительного прибора попадает эфирная помеха, способная исказить результаты измерений. В данной статье предложена методика, позволяющая вычислять коэффициент взаимной корреляции между выходными сигналами генераторов шума в условиях эфирных помех.

На заводах-изготовителях в партии ГШ требуется измерить величину коэффициента взаимной корреляции между выходными сигналами всех ГШ на плате между собой (величина не должна превышать нормированного значения). Это кропотливая и трудная работа, так как при измерении коэффициента взаимной корреляции трудно избавиться от помех эфира, от помех питания, взаимных наводок (зависит от конструкции платы, на которой расположены ГШ) и других факторов. Эти трудности можно частично облегчить, организовав рабочее место в экранированном помещении.

Тем не менее, в экранированном помещении все же может иметь место помеха, способная повлиять на результаты измерений. Это может являться следствием недостаточно эффективного экранирования, а также наличия собственных помех от работающей измерительной аппаратуры. Анализ помех при измерениях низкочастотных шумов рассмотрен в статье [1].

Существуют методики, которые позволяют снижать уровень указанных помех. Например, использование симметричного (балансного) подключения. Данная методика заключается во взаимном исключении помехи из смеси сигнала и помехи благодаря тому, что по одному из проводников в кабеле сигнал передается в противофазе. Принцип действия данной методики подробно описан в издании [2]. Кроме того, в статье [3] рассмотрен метод двухканальной компенсации помехи на основе вычисления весового коэффициента.

Для случаев, когда нет возможности воспользоваться существующими способами для избавления от эфирной помехи при проведении измерений, разработана новая методика, позволяющая рассчитывать величину коэффициента взаимной корреляции между выходными сигналами двух ГШ в условиях помехи эфира.

Описание структуры измеряемых сигналов

Пусть имеются два ГШ, величину коэффициента взаимной корреляции между выходными сигналами которых необходимо измерить. В данном разделе рассматриваются составные части сигналов ГШ₁ и ГШ₂, поступающих на входы измерительного прибора.

Выходные сигналы ГШ₁ и ГШ₂ случайны, так как формируются на основе тепловых шумов, но также могут иметь в своем составе одинаковую составляющую. Ее наличие обуславливается особенностями конструкции платы, на которой расположены ГШ (взаимными наводками, общим питанием, заземлением платы и т.д.), и определяет величину коэффициента взаимной корреляции ($K_{КОРР.}$) между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂. Данную составляющую далее будем называть *мощностью собственной помехи* в составе каждого из сигналов ГШ₁ и ГШ₂:

$$P_{СОБСТВ.} = P_{СОБСТВ.1} = P_{СОБСТВ.2}$$

Для измерения величины коэффициента взаимной корреляции на выходах ГШ₁ и ГШ₂ устанавливаются сигналы равной мощности:

$$P_{ГШ\ 1} = P_{ГШ\ 2} = P_{ГШ}$$

Таким образом, мощности выходных сигналов этих ГШ можно описать формулой:

$$P_{ГШ} = P_{СИГ.} + P_{СОБСТВ.} \quad (1)$$

Как правило, при измерении величина $K_{КОРР.}$ может превышать норму из-за наличия внешних помех. Чаще всего для снижения уровня эфирных помех измерение величины $K_{КОРР.}$ проводят в экранированном помещении. При проведении измерений вне экранированного помещения к мощности каждого выходного сигнала ГШ неминуемо добавляется *мощность помехи эфира* ($P_{ЭФИРА}$). В этом случае величина суммарной мощности помехи в составе каждого из сигналов на входах измерительного прибора будет иметь вид:

$$P_{ПОМЕХИ} = P_{СОБСТВ.} + P_{ЭФИРА} \quad (2)$$

На рисунке 1 приведена структура сигналов на входах измерительного прибора.

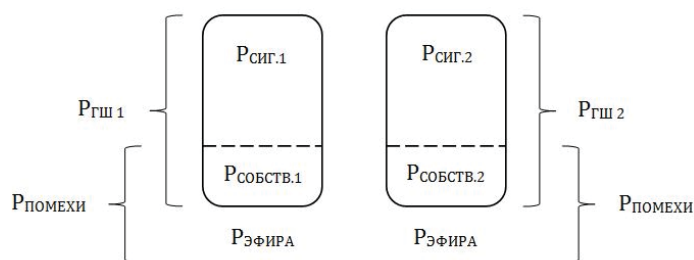


Рис. 1. Структура сигналов ГШ₁ и ГШ₂ на входах измерительного прибора

Описание эксперимента

Предлагаемая методика вычисления значения коэффициента взаимной корреляции $K_{КОРР.}$ между двумя случайными сигналами включает в себя использование зависимости величины $K_{КОРР.}$ от соотношения $\frac{P_{ПОМЕХИ}}{P_{СИГНАЛА}}$.

Схема установки, на которой выполнялся эксперимент, показана на рисунке 2.

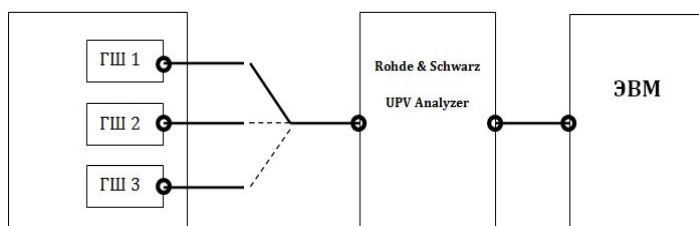


Рис. 2. Схема измерительной установки

Установка состоит из платы ГШ, измерительного прибора Rohde & Schwarz UPV Audio Analyzer [4], использующегося в качестве АЦП, и персонального компьютера (ЭВМ) с установленным программным обеспечением GNU Octave [5].

Для построения корреляционной зависимости в память ЭВМ с помощью измерительного прибора записываются одинаковые по мощности выходные сигналы трех независимых ГШ в полосе 0-10 кГц длительностью 48 секунд. Выбор времени измерения сигналов обусловлен необходимостью накопления материала для достижения точных результатов расчета $K_{КОРР.}$

На рисунке 3а представлено изображение одного из сигналов во временном окне длительностью 1 секунда, на рисунке 3б – спектральное изображение сигнала.

По формуле (3), описанной в изданиях [6], [7], рассчитывается коэффициент взаимной корреляции:

$$K_{КОРР.} = \frac{\max |F_D^{-1} [X(p) \times Y^*(p)]|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \times \sum_{i=1}^N y_i^2}}, \quad (3)$$

где N – количество отсчетов в сигнале (одинаково в сигнале 1 и сигнале 2);

F_D^{-1} – обратное преобразование Фурье;

$X(p)$ – прямое значение результата дискретного преобразования Фурье над сигналом 1;

$Y^*(p)$ – комплексно-сопряженное значение результата дискретного преобразования Фурье над сигналом 2;

x_i – i -й отсчет сигнала 1;

y_i – i -й отсчет сигнала 2.

Так как эти сигналы некоррелированы, величина вычисленного $K_{КОРР.}$ будет близка к нулю.

В качестве помехи используется третий случайный сигнал. При постепенном добавлении его в одинаковом количестве в состав сигнала 1 и сигнала 2, т.е. при увеличении доли одинаковой мощности в $\Sigma_1 = [P_{СИГНАЛА\ 1} + P_{ПОМЕХИ\ 1}]$ и $\Sigma_2 = [P_{СИГНАЛА\ 2} + P_{ПОМЕХИ\ 2}]$ при $P_{ПОМЕХИ\ 1} = P_{ПОМЕХИ\ 2}$, коэффициент взаимной корреляции между Σ_1 и Σ_2 также будет увеличиваться (рис. 4).

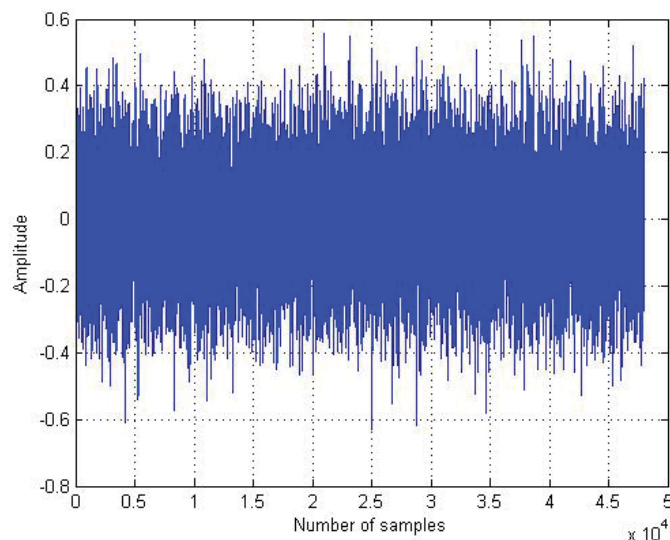


Рис. 3а. Изображение сигнала во временном окне

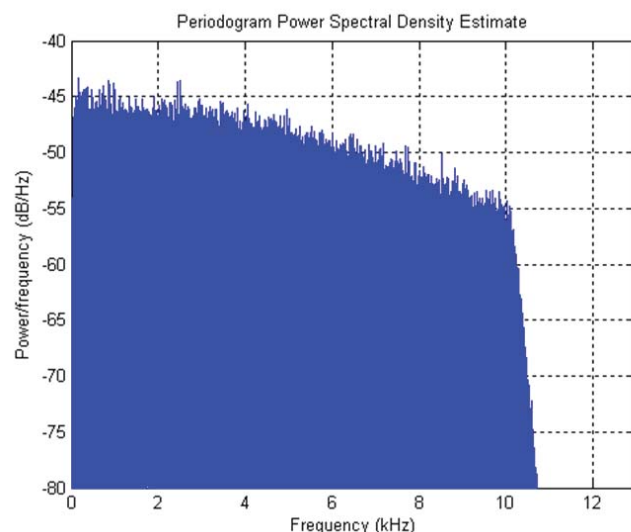


Рис. 3б. Спектральное изображение сигнала

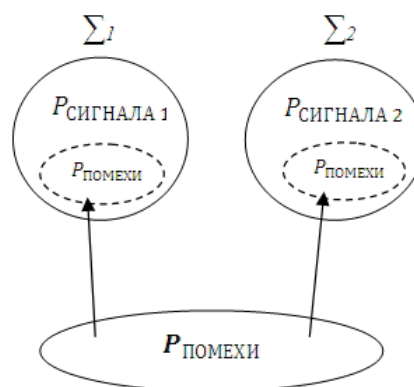


Рис. 4. Одна и та же помеха в одинаковом количестве добавляется и к сигналу 1, и к сигналу 2

По результатам эксперимента получена зависимость величины коэффициента взаимной корреляции от соотношения $\frac{P_{\text{ПОМЕХИ}}}{P_{\text{СИГНАЛА}}}$, где $P_{\text{СИГНАЛА}} = P_{\text{СИГНАЛА1}} = P_{\text{СИГНАЛА2}}$, а $P_{\text{ПОМЕХИ}}$ имеет одинаковую мощность в составе Σ_1 и Σ_2 .

График зависимости при $K_{\text{КОРР.}} = 0 \div 0.15$ изображен на рисунке 5. При рассмотрении графика видно, что при увеличении соотношения $\frac{P_{\text{ПОМЕХИ}}}{P_{\text{СИГНАЛА}}}$ увеличивается и значение коэффициента взаимной корреляции между Σ_1 и Σ_2 .

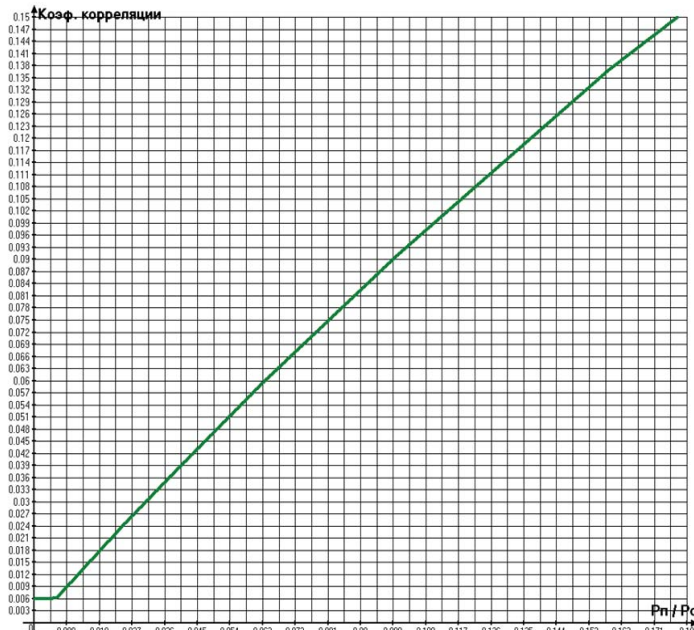


Рис. 5. Зависимость величины $K_{\text{КОРР.}}$ от соотношения $\frac{P_{\text{ПОМЕХИ}}}{P_{\text{СИГНАЛА}}}$

Таким образом, можно однозначно определить зависимость величины $K_{\text{КОРР.}}$ от соотношения $\frac{P_{\text{ПОМЕХИ}}}{P_{\text{СИГНАЛА}}}$:

$$f\left(\frac{P_{\text{ПОМЕХИ}}}{P_{\text{СИГНАЛА}}}\right) = K_{\text{КОРР.}}[\Sigma_1; \Sigma_2] \quad (4)$$

при $P_{\text{СИГНАЛА1}} = P_{\text{СИГНАЛА2}} = P_{\text{СИГНАЛА}}$, $K_{\text{КОРР.}}[\text{Сигнал1}; \text{Сигнал2}] \approx 0$.

В ходе эксперимента было установлено, что величина коэффициента взаимной корреляции между случайными сигналами равной мощности в одинаковом диапазоне частот в присутствии помехи одинаковой мощности в Σ_1 и Σ_2 зависит лишь от доли мощности помехи в составе суммы сигнала и помехи:

$$K_{\text{КОРР.}}[\text{Сиг.1}; \text{Сиг.2}] = \frac{P_{\text{ПОМЕХИ}}}{P_{\text{СИГНАЛА}} + P_{\text{ПОМЕХИ}}} = \frac{1}{\frac{P_{\text{СИГНАЛА}}}{P_{\text{ПОМЕХИ}}} + 1} \quad (5)$$

Следовательно, зависимость на рисунке 5 можно описать функцией вида:

$$f(z) = \frac{z}{z+1}, \quad z > 0 \quad (6)$$

Описание методики измерения величины коэффициента взаимной корреляции между двумя случайными сигналами в условиях эфирной помехи.

Перед началом измерений необходимо выровнять действующие значения напряжений выходных сигналов ГШ₁ и ГШ₂. Для подключения выходов ГШ₁ и ГШ₂ к входам измерительного прибора (анализатора – Rohde & Schwarz RTO2004) используем кабели одинакового типа и длины. Схема подключения изображена на рисунке 6.

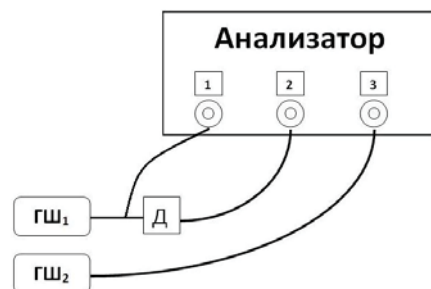


Рис. 6. Схема подключения двух ГШ к измерительному прибору

Условные обозначения: ГШ₁, ГШ₂ – генераторы шума; Д – делитель напряжения; 1,2,3 – аналоговые входы анализатора.

Требования к измерительному прибору:

1. Наличие трех аналоговых входов с возможностью параллельной оцифровки сигналов;
2. Полоса пропускания анализатора в диапазоне частот ГШ (0-10 кГц).

Величины мощностей сигналов с выходов ГШ₁ и ГШ₂, пришедших на 1-й и 3-й входы анализатора, записываются в виде системы:

$$\begin{cases} P_{\text{ГШ1}} + P_{\text{ЭФИРА}} = P_{\text{ВХ.1}}, \\ P_{\text{ГШ2}} + P_{\text{ЭФИРА}} = P_{\text{ВХ.3}} \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $P_{\text{ГШ1}} = P_{\text{ГШ2}}$, $P_{\text{ЭФИРА}} = \text{const}$ (во время проведения измерений).

ПРИМЕЧАНИЕ: Как известно, величина мощности P , выделяемой на сопротивлении R , рассчитывается по формуле $P = \frac{U^2}{R}$. В нашем случае выходные сопротивления источников сигнала равны между собой, входные сопротивления измерительного прибора также равны, поэтому далее мощность будет определяться через $P = U^2$.

Для нахождения величин $P_{\text{ЭФИРА}}$, $P_{\text{ГШ1}}$, а затем и величины $K_{\text{КОРР.}}$ необходимо провести три измерения:

Измерение 1 (мощность на 1-м входе анализатора):

$$(U_{\text{ГШ1}})^2 + P_{\text{ЭФИРА}} = P_{\text{ВХ.1}}, \quad (8)$$

Измерение 2 (мощность на 2-м входе анализатора):

$$\left(\frac{U_{ГШ1}}{2}\right)^2 + P_{ЭФИРА} = P_{ВХ.2}, \quad (9)$$

Измерение 3 (мощность на 3-м входе анализатора):

$$(U_{ГШ2})^2 + P_{ЭФИРА} = P_{ВХ.3}, \quad (10)$$

где $U_{ГШ1} = U_{ГШ2}$ – напряжение на выходе каждого из ГШ;

$\frac{U_{ГШ1}}{2}$ – напряжение на выходе ГШ₁, поделенное в два раза при помощи делителя напряжения. Так как анализатор показывает эффективные значения сигналов $U_{ВХ.1}$, $U_{ВХ.2}$ и $U_{ВХ.3}$, для перехода к мощностям действующие значения сигналов возводятся в квадрат.

В силу взаимно однозначного соответствия между величиной $K_{КОРР.}$ и соотношением $\frac{P_{ПОМЕХИ}}{P_{СИГНАЛА}}$ (формула

(4), рис. 5) для определения величины коэффициента взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂ без вклада $P_{ЭФИРА}$ достаточно определить величину отношения $\frac{P_{СОБСТВ.}}{P_{СИГ.}}$.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1) Вычислить $K_{КОРР.}$ между сигналами ГШ₁ и ГШ₂ с учетом вклада общей составляющей ($P_{ЭФИРА}$) по формуле (3);

2) Воспользовавшись зависимостью на Рис. 5, перейти к соотношению $s_k = \frac{P_{СОБСТВ.} + P_{ЭФИРА}}{P_{СИГНАЛА}}$, где s_k – значение на

оси абсцисс, соответствующее вычисленному значению $K_{КОРР.}$ на кривой;

3) Вывести формулу для вычисления величины $P_{СОБСТВ.}$:

$$P_{СОБСТВ.} = s_k \times P_{СИГ.} - P_{ЭФИРА} \quad (11)$$

Выразим величину $P_{СИГ.}$ через формулы (1), (8):

$$P_{СИГ.} = P_{ВХ.1} - P_{СОБСТВ.} - P_{ЭФИРА} \quad (12)$$

Выразим величину $P_{СОБСТВ.}$ из формулы (11), представив величину $P_{СИГ.}$ в виде формулы (12):

$$P_{СОБСТВ.} = s_k \times (P_{ВХ.1} - P_{СОБСТВ.} - P_{ЭФИРА}) - P_{ЭФИРА} \\ P_{СОБСТВ.} \times (s_k + 1) = s_k \times (P_{ВХ.1} - P_{ЭФИРА}) - P_{ЭФИРА}.$$

Согласно системе уравнений (7), $P_{ВХ.1} - P_{ЭФИРА} = P_{ГШ1}$. Получим:

$$P_{СОБСТВ.} = \frac{s_k \times P_{ГШ1} - P_{ЭФИРА}}{s_k + 1}.$$

4) Вывести формулу для вычисления величины $P_{СИГ.}$:

Согласно формуле (1), $P_{СИГ.} = P_{ГШ1} - P_{СОБСТВ.}$,

$$P_{СИГ.} = P_{ГШ1} - \frac{s_k \times P_{ГШ1} - P_{ЭФИРА}}{s_k + 1} = \\ = \frac{P_{ГШ1} \times (s_k + 1) - s_k \times P_{ГШ1} + P_{ЭФИРА}}{s_k + 1} = \frac{P_{ГШ1} + P_{ЭФИРА}}{s_k + 1}$$

5) Вывести соотношение $\frac{P_{СОБСТВ.}}{P_{СИГ.}}$:

$$\frac{P_{СОБСТВ.}}{P_{СИГ.}} = \frac{\left(\frac{s_k \times P_{ГШ1} - P_{ЭФИРА}}{s_k + 1}\right)}{\left(\frac{P_{ГШ1} + P_{ЭФИРА}}{s_k + 1}\right)} = \frac{s_k \times P_{ГШ1} - P_{ЭФИРА}}{P_{ГШ1} + P_{ЭФИРА}}.$$

6) Вычислив величину соотношения $\frac{P_{СОБСТВ.}}{P_{СИГ.}}$, пе-

рейти к величине $K_{КОРР.}$ между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂ без вклада $P_{ЭФИРА}$, воспользовавшись корреляционной зависимостью (рис. 5).

Рассмотрим пример вычисления величины $K_{КОРР.}$ между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂ в условиях эфирной помехи по данной методике.

Пусть имеются два ГШ, мощности сигналов которых равны друг другу ($P_{ГШ1} = P_{ГШ2}$). Известно, что при проведении измерений к мощностям сигналов ГШ добавляется некоторая величина $P_{ЭФИРА}$. Требуется вычислить коэффициент взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂ в условиях помехи эфира, воспользовавшись методикой с применением корреляционной зависимости.

Пример вычисления величины $K_{КОРР.}$ между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂.

1) Подключим ГШ₁ и ГШ₂ к анализатору согласно схеме на рисунке 6. Получим действующие значения напряжений на входах анализатора и перейдем к величинам мощностей:

$$U_{ВХ.1} = 0.9103 \text{ В} \Rightarrow P_{ВХ.1} = (U_{ВХ.1})^2 = 0.8286 \text{ Вт}$$

$$U_{ВХ.2} = 0.5086 \text{ В} \Rightarrow P_{ВХ.2} = (U_{ВХ.2})^2 = 0.2587 \text{ Вт}$$

$$U_{ВХ.3} = 0.9096 \text{ В} \Rightarrow P_{ВХ.3} = (U_{ВХ.3})^2 = 0.8274 \text{ Вт}$$

2) Запишем сигналы с входов анализатора в память ЭВМ. Вычислим коэффициент взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂ с учетом вклада помехи эфира по формуле (3):

$$K_{КОРР.} = \frac{\max |F_D^{-1} [X(p) \times Y^*(p)]|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \times \sum_{i=1}^N y_i^2}} = 0.1386$$

3) Вычислим мощность сигнала с выхода ГШ₁:

$$P_{ГШ1} = \frac{4}{3} \times (P_{ВХ.1} - P_{ВХ.2}) = \frac{4}{3} \times (0.8286 - 0.2587) = 0.7598 \text{ Вт}$$

4) Вычислим мощность помехи эфира:

$$P_{\text{ЭФИРА}} = P_{\text{ВХ.1}} - P_{\text{ГШ1}} = 0.0687 \text{ Вт}$$

5) Перейдем к вычислению величины S_k по корреляционной зависимости (рис. 5). Для удобства вычисления воспользуемся формулой $g(y) = \frac{y}{1-y}$, полученной на основе формулы (6):

$$s_k = g(K_{\text{КОРР.}}) = \frac{|K_{\text{КОРР.}}|}{1 - |K_{\text{КОРР.}}|} = \frac{0.1386}{1 - 0.1386} = 0.1609$$

6) Вычислим величину отношения $P_{\text{СОБСТВ.}}/P_{\text{СИГ.}}$:

$$\begin{aligned} \frac{P_{\text{СОБСТВ.}}}{P_{\text{СИГ.}}} &= \frac{s_k \times P_{\text{ГШ1}} - P_{\text{ЭФИРА}}}{P_{\text{ГШ1}} + P_{\text{ЭФИРА}}} = \\ &= \frac{0.1609 \times 0.7598 - 0.0687}{0.7598 + 0.0687} = 0.0646 \end{aligned}$$

7) Перейдем к вычислению величины коэффициента взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂ в условиях помехи эфира по корреляционной зависимости (рис. 5). Для удобства вычисления воспользуемся формулой (6):

$$\begin{aligned} K_{\text{КОРР. вычисл.}}[ГШ_1; ГШ_2] &= f\left(\frac{P_{\text{СОБСТВ.}}}{P_{\text{СИГ.}}}\right) = \\ &= \frac{\frac{P_{\text{СОБСТВ.}}}{P_{\text{СИГ.}}}}{\frac{P_{\text{СОБСТВ.}}}{P_{\text{СИГ.}}} + 1} = 0.0607 \end{aligned}$$

Так как искомая величина $K_{\text{КОРР.}}[ГШ_1; ГШ_2]$ была задана равной 0.0603, погрешность при вычислении составила:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(K_{\text{КОРР. вычисл.}}[ГШ_1; ГШ_2] - K_{\text{КОРР.}}[ГШ_1; ГШ_2])}{K_{\text{КОРР.}}[ГШ_1; ГШ_2]} = \text{или } 0.7\%. \\ &= \frac{(0.0607 - 0.0603)}{0.0603} \approx 0.007 \end{aligned}$$

Таким образом, предложенная методика при использовании корреляционной зависимости позволяет вычислять величину $K_{\text{КОРР.}}$ между выходными сигналами ГШ₁ и ГШ₂ в присутствии эфирных помех.

Заключение

При расчете величины коэффициента взаимной корреляции между двумя ГШ может иметь место влияние помехи эфира на результат расчета. В таких случаях необходимо пользоваться альтернативными методиками, позволяющими вычислять коэффициент взаимной корреляции в условиях случайных помех. Методики, рассмотренные в данной статье, позволяют это сделать:

1) использование экранированного помещения при проведении измерений;

2) использование симметричного подключения при проведении измерений;

3) использование предложенной методики, позволяющей вычислить $K_{\text{КОРР.}}$ между двумя ГШ при помощи корреляционной зависимости.

Выбор определенной методики зависит от технических возможностей, доступных разработчикам на момент проведения измерений.

В процессе исследования было установлено, что коэффициент взаимной корреляции между выходными сигналами двух ГШ зависит от величины соотношения $P_{\text{ПОМЕХИ}}/P_{\text{СИГНАЛА}}$ (другими словами, от величины мощности коррелированной части в составе сигналов двух ГШ). Зависимость однозначно определяется выражением (4). Также было установлено, что при известных $P_{\text{СИГНАЛА}}$ и $P_{\text{ПОМЕХИ}}$ величина $K_{\text{КОРР.}}$ может вычисляться по формулам (5), (6).

Практическая значимость проведенного исследования заключается в возможности использования методики, позволяющей вычислять коэффициент взаимной корреляции между выходными сигналами ГШ в условиях помехи эфира на рабочем месте разработчика, не имея возможности проводить измерения в экранированном помещении.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Ключев А.В., Якимов А.В. Анализ помех при измерениях низкочастотных шумов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. 2007. Вып. 6. С. 52-55.
2. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: пер. с нем. И.Д. Гурвица / науч. ред. А.С. Городникова. М.: Мир, 1991. 446 с.
3. Былинкин А.А. Двухканальная компенсация помехи на основе вычисления одного весового коэффициента. // Вопросы защиты информации. 2017. Вып. 4. С. 25-31.
4. Rohde & Schwarz UPV Audio Analyzer. Руководство по эксплуатации. 620 с.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: Питер, 2002. 608 с. ISBN 5-318-00666-3
6. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
7. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х томах. / пер. с франц. А.Ф. Горюнова и А.В. Крянева / науч. ред. Н.Г. Волкова. М.: Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
8. Козлов С.В., Кубанков А.Н. О направлениях интеграции информационных, управляющих и телекоммуникационных систем на процессной основе // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 9. С. 34-40. 14
9. Кубанков А.Н. Классификация видов деятельности в инновационной отрасли информационной безопасности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 2. С. 68-70.
10. Кубанков А.Н., Кубанков Ю.А. Повышение качества подготовки кадров в информационной сфере как условие технологического прорыва // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 6. С. 51-54.

METHOD FOR CALCULATING CROSS-CORRELATION COEFFICIENT BETWEEN TWO RANDOM SIGNALS IN THE PRESENCE OF ETHERIC INTERFERENCE

Stanislav V. Dorokhov, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

Vyacheslav E. Mikhaylov, MIREA - Russian Technological University:

Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, v.e.mihaylov@mtuci.ru

Abstract

In practice, in many cases it is necessary to measure the value of cross-correlation coefficient between two random signals. While calculating the value of cross-correlation coefficient between the two noise generators output signals at the indoor workplace there is always an etheric interference that significantly distorts the measurement results. When there is no possibility to use existing methods for removing interference while making measurements, the new method for calculating cross-correlation coefficient between two random signals in the presence of etheric interference that can be used to evaluate the special properties of the noise generators is developed by the authors of this article. The first part of the article reviews existing methods of making measurements for calculating cross-correlation coefficient between two random signals in the presence of etheric interference. The second part introduced the new method and gives some examples of calculating cross-correlation coefficient by this method. During the study it was found that the value of cross-correlation coefficient of the two noise generators output signals depends on the value of signal-to-noise ratio (SNR) (i.e., on the value of power of correlated part in both noise generators output signals). Practical significance of the study lies in the possibility of using the method for calculating cross-correlation coefficient between the two noise generators output signals in the presence of etheric interference when it is impossible to use EMI shielded room to make measurements.

Keywords: random signal, noise generator, method for calculating, cross-correlation coefficient, etheric interference, signal-to-noise ratio, digital signal processing, mathematical statistics, statistical radio engineering.

References

1. A.V. Klyuev, A.V. Yakimov (2007). Analysis of interferences in low-frequency noise measurements. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I.Lobachevskogo*. (6):52-55 (in Russian)
2. P. Skritek (1988). *Handbuch der Audio-Schaltungstechnik: Berechnungsmethoden, Messverfahren, Schaltungsentwicklung, digitale Tonverarbeitung*. München: Franzis 453 p. (in Germ.). ISBN 9783772387319. [Skritek P. Sound circuitry reference guide: transl. from Germ. Moscow: Mir, 1991. 446 p. (in Russian)]
3. A.A. Bylinkin (2017). Double-channel interference compensation on the basis of single weight coefficient calculation. *Voprosy zaschity informatsii = Information security questions*. (4):25-31 (in Russian)
4. Rohde & Schwarz UPV Audio Analyzer. Operation manual. 620 p. (in Russ.)
5. A.B. Sergienko (2002). *Digital signal processing*. Saint Petersburg: Piter. 608 p. (in Russ.). ISBN 5-318-00666-3
6. V.I. Tikhonov (1982). *Statistical radio engineering*: 2nd edition. Moscow: Radio and communications. 624 p. (in Russian)
7. J. Max (1981). *Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*. Tome I. Edite par Masson. 384 p. (in Fr.). ISBN 9782225656705. [Max J. Methods and techniques for processing signals in physical measurements. First volume: transl. from Fr. Moscow: Mir, 1983. 312 p. (in Russian)]
8. S.V. Kozlov, A.N. Kubankov (2018). Ways of integrating information, controlling and telecommunication systems on a process basis. *T-Comm*, Vol. 12. No.9, pp. 34-40. (in Russian)
9. A.N. Kubankov (2016). Classification of activities in innovative industry of information security. *T-Comm*. Vol. 10. No.2, pp. 68-70.
10. A.N. Kubankov, Yu.A. Kubankov (2017). Improvement of cyberspace personnel training quality as an essential for technological breakthrough. *T-Comm*. Vol. 11. No.6, pp. 51-54.

Information about authors:

Stanislav V. Dorokhov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Associate Professor of the Chair BD №235 "Digital Devices and Information Security Systems", Institute of Cybernetics, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7833-5773>

Vyacheslav E. Mikhaylov, Assistant of Professor of the Chair "Telecommunications Security", Faculty of Cybernetics and Information Security, Moscow Technical University of Communications and Informatics:

Assistant of Professor of the Chair BD №235 "Digital Devices and Information Security Systems", Institute of Cybernetics, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-2609-2666>

ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СМЕЩЕНИЯ И МАСШТАБА ДЛЯ СОВМЕЩЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВЛИЯНИИ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-24-30

Manuscript received 02 September 2021;
Accepted 05 October 2021

Диязитдинов Ринат Радмирович,
ФГБОУ ВО Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информатики
г. Самара, Россия, rinat.diyazitdinov@gmail.com

Ключевые слова: итерационный, совмещение,
смещение, масштаб, аддитивный, мультипликативный

В статье представлен алгоритм для совмещения одномерных сигналов. Совмещение сигналов определяется параметрами смещения и масштаба. Дополнительно на сигналы оказывают влияние аддитивная и мультипликативная помехи. Для совмещения подобных сигналов был разработан итерационный алгоритм. Этот алгоритм включает в себя отдельную оценку смещения и масштаба. Смещение оценивается по сигналам в декартовой системе координат. Масштаб оценивается по сигналам в логарифмической системе координат. Итерационный подход заключается в последовательном приближении к оцениваемым параметрам. Значение параметров текущей итерации зависит от результатов оценки, полученных на предыдущей итерации. Для определения погрешности оценки параметров в зависимости от мощности аддитивной гауссовой помехи проводилось численное моделирование. Разработанный алгоритм сравнивался с алгоритмом полного перебора (эталонный алгоритм). Сравнение показало, что разработанный алгоритм и алгоритм полного перебора характеризуются практически одними и теми же погрешностями оценки параметров, но разработанный алгоритм характеризуется более высокой скоростью обработки.

Информация об авторе:

Диязитдинов Ринат Радмирович, ФГБОУ ВО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, кафедра Сети и системы связи, доцент кафедры, доцент, к.т.н., г. Самара, Россия

Для цитирования:

Диязитдинов Р.Р. Итерационный алгоритм оценки смещения и масштаба для совмещения одномерных сигналов при влиянии аддитивных и мультипликативных помех // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 24-30.

For citation:

Diyazitdinov R.R. (2021) Iterative algorithm for offset and scale estimation for 1d signals superposition with additive and multiplicative noise. T-Comm, vol. 15, no.12, pp. 24-30. (in Russian)

Введение

Телевизионные системы широко применяются в измерительных системах. При возможности двумерные телевизионные изображения преобразовывают в одномерные сигналы. В этом случае значительно сокращается объем хранимых данных и, как правило, упрощается алгоритм обработки данных [1].

Ниже представлены подобные измерительные системы.

В системах измерения скорости протяженных объектов одномерные сигналы определяются в результате суммирования интенсивности пикселей столбцов изображения. Совмещение определяется по смещению, которое позволяет оценить скорость движения объекта [1, 2].

На вагонах-путеизмерителях одномерные сигналы определяются как координаты точек контуров (профилей рельсов). А совмещение определяется по смещению и масштабу. Совмещенные сигналы позволяют оценить метрологические характеристики путеизмерителя. По разности совмещенных одномерных сигналов определяется среднеквадратичная величина измеренного параметра, которая определяет погрешность путеизмерителя [3, 4]. Также совмещенные сигналы позволяют выявить аномальные помехи в измеренных параметрах, которые имеют вид значительных отличий формы и амплитуды сигналов [5].

Задача совмещения одномерных сигналов является очень известной задачей и достаточно просто формализуемой. Это обстоятельство послужило толчком к активному исследованию данной задачи и разработке большого числа алгоритмов. Основными способами решения задачи совмещения являются:

- метод свертки на основе вычисления коэффициента корреляции или среднеквадратичного отклонения [1-5];
- метод линеаризации для прецизионного совмещения [6].

Для сокращения времени обработки при работе сигналами с количеством отсчетов 1000 и более используется метод Фурье. Чем больше отсчетов в сигналах, тем выше производительность по методу Фурье в сравнении с прямым способом расчетов свертки сигналов.

В случае наличия небольших масштабных искажений (5% и менее) никаких дополнительных измерений в алгоритм совмещения, как правило, не вносится. Проводят совмещение отдельных фрагментов сигнала. А масштабный коэффициент оценивается следующим образом. Если обозначить отсчеты первого сигнала как x_i , которые соответствуют отсчетам второго сигнала u_i , $i = 1, 2 \dots N$, то формула, связывающая их между собой, имеет вид:

$$u_i = x_i \cdot \alpha + h, \quad (1)$$

где α – масштаб, h – смещение.

То же самое преобразование в матричной форме имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Параметры α и h можно оценить по методу наименьших квадратов:

$$F(\alpha, h) = \sum_{i=1}^N (x_i \cdot \alpha + h - u_i)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\frac{\partial F(\alpha, h)}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial F(\alpha, h)}{\partial h} = 0. \quad (4)$$

Параметры α и h оцениваются путем решения уравнения:

$$\begin{cases} \alpha \cdot A11 + h \cdot A12 = B1; \\ \alpha \cdot A21 + h \cdot A22 = B2, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } A11 = \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad A12 = A21 = \sum_{i=1}^N x_i, \quad A22 = N,$$

$$B1 = \sum_{i=1}^N x_i \cdot u_i, \quad B2 = \sum_{i=1}^N u_i.$$

В том случае, если масштабные искажения превышают 5%, то совмещение отдельных фрагментов сигналов может происходить со значительными погрешностями, которые приводят к неверному совмещению сигналов в целом.

Задача учета масштабных искажений может быть решена методами полного перебора. Но эти методы имеют серьезный недостаток – относительно большое время обработки.

Таким образом, при решении задачи совмещения с учетом масштаба и смещения, актуальной становится задача оптимизации скорости обработки.

Данной проблеме посвящена данная статья.

Обзор существующих работ

Теме совмещения одномерных сигналов посвящено достаточно большое количество научных статей.

Работа [1] посвящена совмещению сигналов, отличающихся только смещением. Смещение оценивается по максимуму коэффициента корреляции. Однако в работе рассматривались сигналы, которые не содержат масштабных искажений.

Работы [3-5] посвящены задаче совмещения сигналов, содержащих как смещение, так и масштаб. Однако из-за того, что масштабные искажения не превышали 5%, то предварительно проводилось совмещение отдельных фрагментов сигнала без учета масштаба, а уже по совмещенным фрагментам оценивался масштаб.

В работе [6] рассматривалась задача прецизионного совмещения сигналов за счет линеаризации, но при этом не учитывались масштабные искажения.

В работах [7-9] рассматривается несколько иная задача – совмещение изображений. Однако при совмещении сигналов учитываются масштабные искажения. Для оценки масштаба используется логарифмически-полярная система координат. Этот прием будет использован для оценки смещения и масштаба для совмещения одномерных сигналов.

Описание задачи

Пусть заданы два сигнала (x_i, f_i) , $i = 1..N$, (u_j, g_j) , $j = 1..K$. Между координатами x_i и u_j нет однозначного соответствия. Однако известно, что они связаны между собой следующим законом:

$$u = x \cdot \alpha + h, \quad (6)$$

где α – масштаб, h – смещение.

Формула (5) совпадает с формулой (1) с точностью до индексов.

Сигналы f и g описывают один и тот же сигнал s с точностью до аддитивной и мультипликативной помехи.

$$\begin{cases} f(x) = s(x) + k(x); \\ g(x) = \lambda s(\alpha x + h) + \gamma + m(x), \end{cases} \quad (7)$$

где λ – мультипликативная помеха, γ – аддитивная помеха, $k(x)$, $m(x)$ – аддитивный белый гауссовский шум.

Идея оценки параметров α , h , λ , γ заключается в поиске таких аргументов, при которых функция F принимала бы минимальное значение:

$$F = \sum_i (\lambda f(\alpha x_i + h) + \gamma - g(x_i))^2. \quad (8)$$

Для решения задачи по формуле (8) была разработана итерационная процедура для оценки этих параметров.

Исходные данные

Для проведения численных расчетов были использованы сигналы. Их описание приведено в таблицах 1 и 2.

Сигнал (x_i, f_i)

Таблица 1

№	координата	№	координата
1	(1; 0)	30	(88; 1,4794)
2	(4; 0)	31	(91; 1,4193)
3	(7; 0)	32	(94; 1,0616)
4	(10; 0)	33	(97; 0,6232)
5	(13; 0,0198)	34	(100; 0,3021)
6	(16; 0,0439)	35	(103; 0,1670)
7	(19; 0,0889)	36	(106; 0,2059)
8	(22; 0,1645)	37	(109; 0,4118)
9	(25; 0,2780)	38	(112; 0,8021)
10	(28; 0,4296)	39	(115; 1,3736)
11	(31; 0,6065)	40	(118; 2,0458)
12	(34; 0,7827)	41	(121; 2,6475)
13	(37; 0,9231)	42	(124; 2,9767)
14	(40; 0,9950)	43	(127; 2,9077)
15	(43; 0,9802)	44	(130; 2,4677)
16	(46; 0,8825)	45	(133; 1,8196)
17	(49; 0,7261)	46	(136; 1,1657)
18	(52; 0,5461)	47	(139; 0,6488)
19	(55; 0,3753)	48	(142; 0,3137)
20	(58; 0,2357)	49	(145; 0,1318)
21	(61; 0,1354)	50	(148; 0,0481)
22	(64; 0,0713)	51	(151; 0,0153)
23	(67; 0,0359)	52	(154; 0,0042)
24	(70; 0,0249)	53	(157; 0,0010)
25	(73; 0,0488)	54	(160; 0,0002)
26	(76; 0,1456)	55	(163; 0)
27	(79; 0,3748)	56	(166; 0)
28	(82; 0,7597)	57	(169; 0)
29	(85; 1,2012)	58	(172; 0)

Сигнал (u_i, g_i)

Таблица 2

№	координата	№	координата
1	(6; 4.1619)	16	(51; 3.7226)
2	(9; 4.4392)	17	(54; 3.2715)
3	(12; 4.4831)	18	(57; 3.3618)
4	(15; 4.2732)	19	(60; 3.9759)
5	(18; 3.9097)	20	(63; 5.1546)
6	(21; 3.5412)	21	(66; 6.5709)
7	(24; 3.2682)	22	(69; 7.4502)
8	(27; 3.1107)	23	(72; 7.1625)
9	(30; 3.0434)	24	(75; 5.9234)
10	(33; 3.0617)	25	(78; 4.5431)
11	(36; 3.2816)	26	(81; 3.6090)
12	(39; 3.9255)	27	(84; 3.1822)
13	(42; 4.8543)	28	(87; 3.0410)
14	(45; 5.2326)	29	(90; 3.0067)
15	(48; 4.6226)	30	(93; 3.0009)

Параметры совмещения этих сигналов: $h = -17,7$; $\alpha = 0,7$; $\lambda = 1,5$; $\gamma = 3,0$.

На рисунке 1а показаны исходные сигналы.

На рисунке 1б показан результат совмещения. При этом визуально видно (увеличенная область), что между отдельными координатами сигналов x_i и u_i нет соответствия.

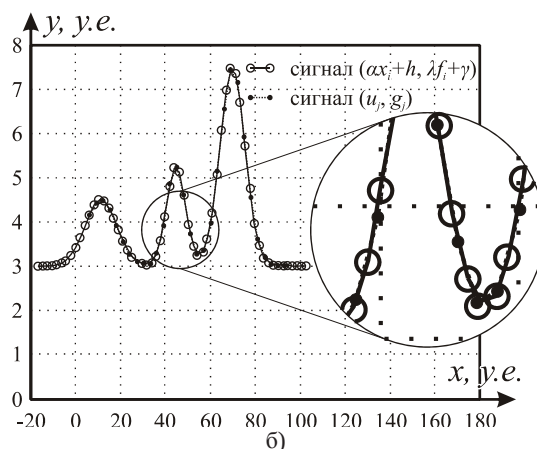
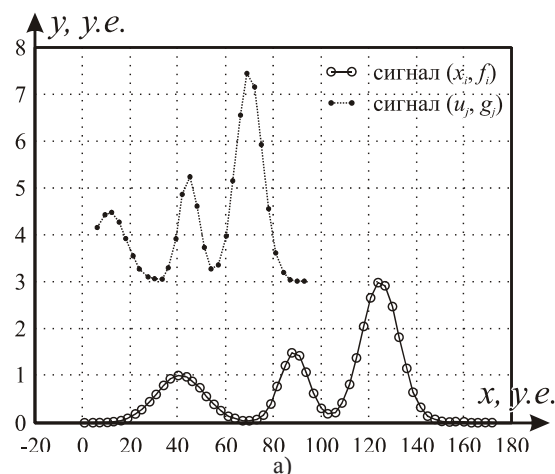


Рис. 1. Исходные данные:
(а) до совмещения, (б) после совмещения

Принципы оценки параметров

Пусть известны координаты x_0 и u_0 , которые связаны между собой преобразованием $u_0 = x_0 \cdot \alpha + h$.

Относительно координат x_0 и u_0 найдем отображение сигналов f_i, g_j в логарифмической системе координат.

Для сигнала f_i абсцисса будет равна:

$$rx = \log_2(x - x_0). \quad (9)$$

Для сигнала g_j абсцисса будет равна:

$$\begin{aligned} ru &= \log_2(u - u_0) = \log_2(x \cdot \alpha + h - (x_0 \cdot \alpha + h)) = \\ &= \log_2(\alpha) + \log_2(x - x_0) = \log_2(\alpha) + rx. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, координаты точек сигналов f_i, g_j отличаются только на аддитивную составляющую $\log_2(\alpha)$ в логарифмической системе координат.

Если известен масштабный коэффициент α , то координаты точек $x \cdot \alpha$ и $u = x \cdot \alpha + h$ отличаются только на аддитивную составляющую h .

Оценить аддитивную составляющую, как в случае, если известны координаты x_0 и u_0 или масштаб α , можно путем свертки двух сигналов по максимуму коэффициента корреляции [1] (*примечание:* максимальное значение коэффициента корреляции соответствует наибольшей схожести сигналов по форме).

Также дополнительным преимуществом коэффициента корреляции является его инвариантность к мультипликатив-

ной и аддитивной помехи. Это легко доказать, рассчитав коэффициент корреляции для произвольных векторов a и b , a и $b \cdot \lambda + \gamma$. В обоих случаях коэффициент корреляции не изменится.

Задача оценки параметров осложняется тем, что для совмещения неизвестно ни координат x_0 и u_0 , ни масштаба α .

Чтобы преодолеть эту трудность, предлагается следующий способ.

- 1) Выбор координат x_0 и u_0 .
- 2) Преобразование сигналов $(x_i, f_i), (u_j, g_j)$ в логарифмическую систему координат относительно координат x_0 и u_0 .
- 3) Оценка параметра α по сигналам $(x_i, f_i), (u_j, g_j)$ в логарифмической системе.
- 4) Преобразование сигналов $(\alpha \cdot x_i, f_i), (u_j, g_j)$ в декартовую систему координат относительно координат x_0 и u_0 .
- 5) Оценка смещения h по сигналам $(\alpha \cdot x_i, f_i), (u_j, g_j)$ в декартовой системе.
- 6) Уточнение координат x_0 и u_0 по сигналам $(\alpha \cdot x_i + h, f_i), (u_j, g_j)$.
- 7) Переход к шагу №2.

Если на первом шаге значения x_0 и u_0 были выбраны удачно, то каждая новая итерация приведет к уточнению смещения h и масштаба α , приближая их к истинным значениям.

Выход из цикла может происходить или через фиксированное количество итераций, или если при очередной итерации параметры меняются незначительно.

На рисунке 2 схематично показан способ совмещения.

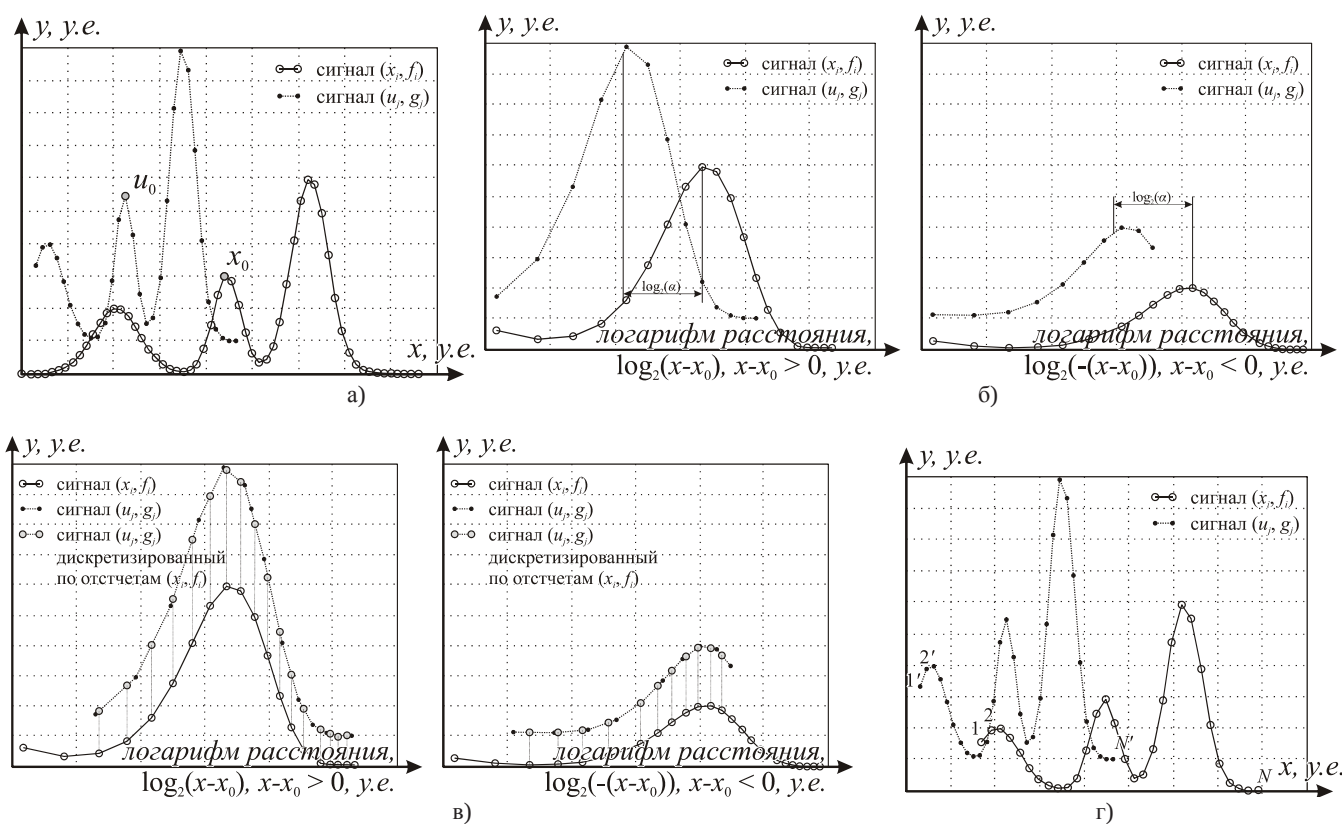


Рис. 2. Этапы совмещения одномерных сигналов:

(а) исходные сигналы; (б) оценка масштаба по сигналам в логарифмической системе;

(в) передискретизация; (г) соответствие между точками

На рисунке 2а показаны исходные сигналы и координаты x_0 и u_0 . На рисунке 2б показаны сигналы, преобразованные в логарифмическую систему координат относительно x_0 и u_0 .

Так как функция логарифмирования определена при значениях аргумента больше нуля, то чтобы использовать сигнал с отрицательным значением аргумента, исходный сигнал делится на две части:

– $x - x_0 > 0$, значение в логарифмической системе будет $\log_2(x - x_0)$;
– $x - x_0 < 0$, значение в логарифмической системе будет $\log_2(-(x - x_0))$.

Аналогично происходит преобразование и для аргумента u .

По сигналам, представленным на рисунке 2б, оценивается масштаб α .

Используя параметр α , графики совмещаются, после чего передискретизируются на один и тот же шаг дискретизации (см. рис. 2в).

Обратный переход из логарифмической системы в декартовую образует два графика, у которых имеется однозначное соответствие между точками: точка 1 соответствует точке 1', точка 2 – точке 2' и т.д. (см. рис. 2г).

Оценка параметров по двум последовательностям точек с однозначным соответствием проводится по формуле (5).

После совмещения сигналов можно оценить аддитивную и мультипликативную помеху.

Исходными данными для оценки значения аддитивной и мультипликативной помехи будут являться сигналы (x_i, f_i) , $i = 1..N$, (u_j, g_j) , $j = 1..K$, оценка смещения $\hat{h}$ и масштаба $\hat{\alpha}$.

Пересчет координат первого одномерного сигнала $(\hat{\alpha}x_i + \hat{h}; f_i)$ и передискретизация на сетку аргумента u_j позволяет сформировать два вектора f'_j и g'_j , $j = 1..K$.

Параметры λ , γ рассчитываются исходя из метода наименьших квадратов:

$$\sum_{j=1}^K (\lambda f'_j + \gamma - g'_j)^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{Sg \cdot Sf - K \cdot Sfg}{Sf^2 - K \cdot Eg}, \quad \hat{\gamma} = \frac{Sg \cdot Sfg - Sg \cdot Ef}{Sf^2 - K \cdot Eg}, \quad (12)$$

$$\text{где } Sf = \sum_{j=1}^K f'_j, \quad Sg = \sum_{j=1}^K g'_j, \quad Sfg = \sum_{j=1}^K f'_j \cdot g'_j, \quad Ef = \sum_{j=1}^K (f'_j)^2.$$

Предварительный выбор координат x_0 и u_0

Координаты точек x_0 и u_0 для первой итерации будут выбраны как средние значения аргумента всех точек сигналов f и g :

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad u_0 = \frac{\sum_{j=1}^K u_j}{K}. \quad (13)$$

Такое предположение делается исходя из того, что если сигналы можно совместить, то $u_0 \approx \alpha \cdot x_0 + h$.

Алгоритм совмещения

Исходными данными являются:

(x_i, f_i) , $i = 1..N$ – первый одномерный сигнал,

(u_j, g_j) , $j = 1..K$ – второй одномерный сигнал.

Выходными данными являются:

$\hat{h}$, $\hat{\alpha}$ – смещение и масштаб;

$\hat{\gamma}$, $\hat{\lambda}$ – значение аддитивной и мультипликативной помехи.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Загрузка сигналов (x_i, f_i) и (u_j, g_j) .
2. Вычисление координат x_0 и u_0 по формуле (13).
3. Выбор количества итераций L (примеч.: в работе $L = 9$).
4. Инициализация матрицы преобразования в соответствии с количеством итераций:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdots M_L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

5. Цикл по количеству итераций, $k = 1$.

- 5.1. Определение промежуточной матрицы преобразования M_{res} :

если $k = 1$, то $M_{res} = M_1$,

если $k = 2$, то $M_{res} = M_2 \cdot M_1$,

...

если $k = L$, то $M_{res} = M_L \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1$.

- 5.2. Вычисление сигнала (u'_j, g'_j) по матрице преобразования M_{res} :

$$u'_j = u_j \cdot M_{res}(1,1) + M_{res}(1,2), \quad (14)$$

$$g'_j = g_j. \quad (15)$$

- 5.3. Вычисление матрицы M_i по данным (x_i, f_i) , x_0 , (u'_j, g'_j) , u_0 согласно процедуре оценки параметров, описанной ниже.

- 5.4. Приравнивание точки u_0 к точке x_0 (примеч.: если первоначальное приближение по п. 5.3 было выбрано верно, то в дальнейшем нет необходимости делать оценок этой координаты, так как после первой итерации будет вычислены достаточно точные значения параметров преобразования, и на последующих итерациях можно считать, что точка $u_0 = x_0$).

- 5.5. Проверка на выход из цикла: $k=k+1$, если $k \geq L$, то выход из цикла, в противном случае переход к п. 5.1.

6. Оценка параметров $\hat{h}$, $\hat{\alpha}$ по матрице M_{res} :

$$\hat{h} = M_{res}(1,2), \quad (16)$$

$$\hat{\alpha} = M_{res}(1,1). \quad (17)$$

7. Оценка параметров $\hat{\gamma}$, $\hat{\lambda}$ по процедуре, описанной выше, и формуле (12).

8. Выход из программы.

Процедура оценки параметров п.5.3 описана ниже.

Входные данные: (x_i, f_i) , $i = 1..N$ – первый одномерный сигнал, (u'_j, g'_j) , $j = 1..K$ – второй одномерный сигнал, x_0 и u_0 – координаты для преобразования из декартовой в логарифмическую систему.

Выходное значение: M – матрица преобразования размером 2×2 .

1. Преобразование сигнала (x_i, f_i) , $i = 1..N$ в логарифмическую систему координат относительно точки x_0 :

$$rx_000_i = \log_2(x_i - x_0), \quad fx_000_i = f_i, \\ \text{если } x_i - x_0 > 0, \quad (18)$$

$$rx_{180i} = \log_2(-(x_i - x_0)), fx_{180i} = f_i, \\ \text{если } x_i - x_0 < 0. \quad (19)$$

2. Преобразование сигнала (u_j, g_j) , $j = 1..K$ в логарифмическую систему координат относительно точки u_0 :

$$ru_{000j} = \log_2(u_j - u_0), gu_{000i} = g_j, \\ \text{если } u_j - u_0 > 0, \quad (20)$$

$$ru_{180j} = \log_2(-(u_j - u_0)), gu_{180i} = g_j, \\ \text{если } u_j - u_0 < 0. \quad (21)$$

3. Дискретизация сигнала (rx_{000i}, fx_{000i}) на равномерную сетку с шагом $step$ (примечание: $step = 0,01$): $rxn_{000} = min_{rx}, min_{rx} + step, .. max_{rx}$, где min_{rx} / max_{rx} – минимальное / максимальное значение в векторах (rx_{000i}, rx_{180i}) . Формирование сигнала fxn_{000} . Аналогичным образом рассчитывается сигнал (rxn_{180}, fxn_{180}) .

Примечание: для обозначения векторов использовался полужирный шрифт, чтобы не вводить дополнительных индексов и не затруднять восприятие, ранее при обозначении векторов использовались индексы, как например, « rx_{000i} », « fx_{000i} », чтобы показать связь с исходными данными « x_i », « f_i ».

4. Дискретизация сигнала (ru_{000j}, gu_{000j}) на равномерную сетку с шагом $step$: $run_{000} = min_{ru}, min_{ru} + step, .. max_{ru}$, где min_{ru} / max_{ru} – минимальное / максимальное значение в векторах (ru_{000j}, ru_{180j}) . Формирование сигнала gun_{000} . Аналогичным образом рассчитывается сигнал (run_{180}, gun_{180}) .

5. Вычисление первоначального смещения вдоль оси «логарифм расстояния»:

$$d0 = rxn_{0001} - run_{0001}. \quad (22)$$

6. Совмещение векторов (fxn_{000}, fxn_{180}) с векторами (gun_{000}, gun_{180}) с использованием корреляционно-экстремального алгоритма [1]. Результатом будет являться значение смещения d (в отсчетах) между векторами (fxn_{000}, fxn_{180}) и (gun_{000}, gun_{180}) .

7. Преобразование из логарифмической системы в декартовую:

$$x_{000i} = 2^{rx_{000i}} \quad (23)$$

$$u_{000i} = 2^{rx_{000i} - (d0 + d \cdot step)} + u_0. \quad (24)$$

$$x_{180i} = 2^{rx_{180i}} \quad (25)$$

$$u_{180i} = 2^{rx_{180i} - (d0 + d \cdot step)} + u_0. \quad (26)$$

Формирование векторов:

$$x''_i = (x_{000i}, x_{180i}), u''_i = (u_{000i}, u_{180i}). \quad (27)$$

8. Оценка преобразования – матрицы M по векторам x''_i и u''_i по формулам (2-5).

Численное моделирование

Для определения погрешности оценки параметров совмещения было проведено численное моделирование, которое заключалось в добавлении помехи с гауссовым распределением к ординатам одномерных сигналов.

При выбранном значении мощности (дисперсии помехи, σ_n^2) проводилась серия опытов, по которым оценивалась погрешность оценки параметра.

В качестве погрешности выступало значение среднеквадратичной величины (RMS):

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a)^2}{n}}, \quad (28)$$

где a – действительное значение параметра; a_i – измеренное значение параметра в i -ом опыте; n – количество опытов.

По результатам численного моделирования был построен график зависимости RMS от среднеквадратичного отклонения (СКО) помехи (σ_n).

Результаты численного моделирования приведены на рисунке 3.

Разработанный алгоритм сравнивался с алгоритмом полного перебора (проверка гипотез относительно измеряемых параметров с выбором той гипотезы, которая определяет минимальное евклидово расстояние между контурами). Погрешности обоих алгоритмов совпадают. Но у разработанного алгоритма скорость вычисления приблизительно в 12 раз выше.

Как видно из графиков (см. рис. 3), значение погрешности практически не меняется на интервале $\sigma_n [10^{-3}; 3 \cdot 10^{-2}]$ у.е. Это связано с тем, что линейная интерполяция при дискретизации контура приводит к появлению погрешности координат точек контура, которая по мощности выше, чем мощность аддитивной гауссовой помехи. И только при превышении СКО помехи более $3 \cdot 10^{-2}$ у.е. становится заметно ее влияния на погрешность оценки параметров совмещения.

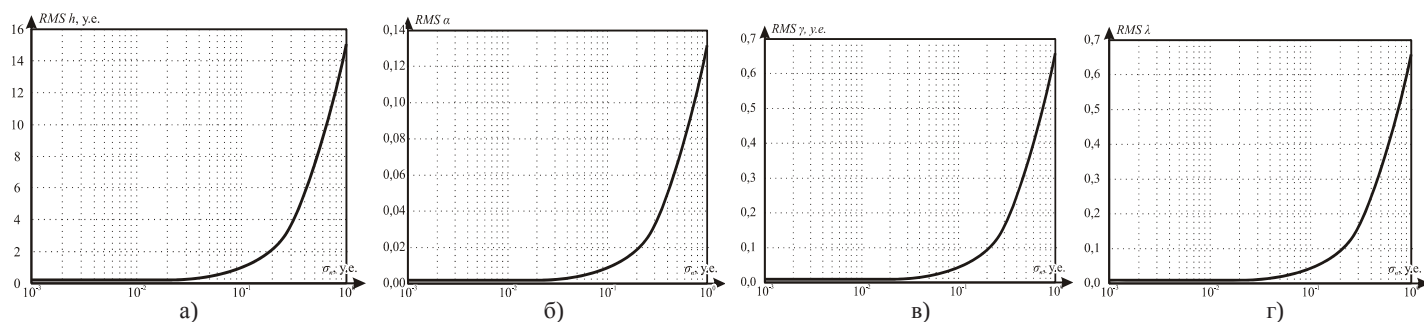


Рис. 3. Погрешность оценки параметров

Таким образом, разработанный алгоритм характеризуется низкой погрешностью оценки параметров (как в алгоритме полного перебора) и высоким быстродействием.

Заключение

Разработанный алгоритм совмещения одномерных сигналов был апробирован на данных вагонов-путьеизмерителей (совмещение данных различных сессий измерений, полученных на одних и тех же участках пути).

Кроме измерений на железной дороге, разработанный алгоритм можно использовать в медицине, аэрокосмической отрасли и других промышленных отраслях. В также можно расширять функциональные возможности измерительных систем, проводящих совмещение сигналов.

Погрешности измерения у разработанного алгоритма сравнима с погрешностями по алгоритму полного перебора, но скорость обработки данных на порядок выше.

Литература

1. Васин Н.Н., Куринский В.Ю. Обработка видеосигналов для измерения скорости движения железнодорожных вагонов на сортировочной горке // Компьютерная оптика. № 27, 2005. С. 185-188.
2. Васин Н.Н., Диязитдинов Р.Р., Шапорин А.А. Усовершенствование алгоритма измерения скорости движения объектов // Вестник СамГУПС. 2016. № 1 (31). С. 10-14.
3. Кузьмин С.В. Инвариантное к масштабу определение задержек между двумя одномерными цифровыми сигналами // Информационные технологии. №2. 2011. С. 7-10.
4. Кузьмин С.В., Васин Н.Н. Многоканальный корреляционный метод совмещения данных параметров объектов инфраструктуры // Вестник транспорта Поволжья. №1 (25). 2011. С. 68-75.
5. Васильев Д.В., Денисов С.А., Серебряков С.А. Исследование адаптивного корреляционного измерителя скорости с применением математического моделирования // Вестник МЭИ. 1995. №2. С. 9-18.
6. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proc. Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1981. P. 674-679.
7. Мясников Е.В. Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 3. С. 77-82.
8. Reddy B., Chatterji B. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration // IEEE transactions on image processing. 1996. Vol. 5. P. 1266-1271. DOI: 10.1109/83.506761.
9. Evangelidis G., Psarakis E. Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2008. Vol. 30. P. 1858-1865. DOI: 10.1109/TPAMI.2008.113.

ITERATIVE ALGORITHM FOR OFFSET AND SCALE ESTIMATION FOR ID SIGNALS SUPERPOSITION WITH ADDITIVE AND MULTIPLICATIVE NOISE

Rinat R. Diyazitdinov, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia,
rinat.diyazitdinov@gmail.com

Abstract

We describe the algorithm for ID signal superposition. The superposition is defined by offset and scale. Also the signals contain additive and multiplicative noise. We developed the iterative procedure for superposition of those signals. This procedure includes the separate estimation of offset and scale. The offset is estimated by signals in the Cartesian coordinate system. The scale is estimated by signals in the logarithm coordinate system. The iterative method is approximation to real value of superposition parameters. The parameters of the current iteration depend on the estimation of previous iteration. The error of the parameters estimation from additive gauss noise was by the numerical simulation. The developed algorithm compares with the brute force algorithm (the etalon algorithm). The comparison show that both algorithms are characterized the similar error of the parameters estimation, but developed algorithm is faster.

Keywords: iterative, superposition, offset, scale, additive, multiplicative.

References

1. N.N. Vasin, V.Yu. Kurinsky (2005). Video signal processing for measuring the speed of railway cars on the marshalling hill. *Computer optics*, no. 27, pp. 185-188.
2. N.N. Vasin, R.R. Diyazitdinov, A.A. Shaporin (2016). Improvement of the algorithm for measuring the speed of movement of objects. *SamGUPS Bulletin*. No. 1 (31), pp. 10-14.
3. S.V. Kuzmin (2011). Scale-invariant determination of delays between two ID digital signals. *Infocommunication technologies*, no. 2, pp. 7-10.
4. S.V. Kuzmin, N.N. Vasin (2011). Multichannel correlation method for combining these parameters of infrastructure objects. *Bulletin of transport of the Volga region*. No. 1 (25), pp. 68-75.
5. D.V. Vasiliev, S.A. Denisov, S.A. Serebryakov (1995). Research of an adaptive correlation speed meter using mathematical modeling. *MEI Bulletin*. No. 2, pp. 9-18.
6. B.D. Lucas, T. Kanade (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674-679.
7. E.V. Myasnikov (2007). Determination of parameters of geometric transformations for blending portrait images. *Computer optics*. Vol. 31. No. 3, pp. 77-82.
8. B. Reddy, B. Chatterji (1996). An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. *IEEE Transactions on image processing*. Vol. 5, pp. 1266-1271. DOI: 10.1109/83.506761
9. G. Evangelidis, E. Psarakis (2008). Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 30, pp. 1858-1865. DOI: 10.1109/TPAMI.2008.113

Information about author:

Rinat R. Diyazitdinov, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Associate professor of the department Networks and Communication Systems, Samara, Russia

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Кузнецов Евгений Викторович,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха";
Инженерная академия Российского университета дружбы народов,
Москва, Россия, berreg@niipolyus.ru

Ермаков Дмитрий Николаевич,
Инженерная академия Российского университета дружбы народов;
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия,
dermakow@mail.ru

Самусенко Олег Евгеньевич,
Инженерная академия Российского университета дружбы народов,
Москва, Россия, samusenko@rudn.ru

Голяев Юрий Дмитриевич,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Соловьева Татьяна Ивановна,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха";
Инженерная академия Российского университета дружбы народов,
Москва, Россия

Кузнецов Никита Евгеньевич,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-31-43

Manuscript received 05 September 2021;
Accepted 16 November 2021

Ключевые слова: лазерный гироскоп, компьютерное тепловое моделирование, метод электротепловых аналогий, метод поэтапного разукрупнения (масштабирования – zooming), метод конечных разностей, метод сеток, метод графов

В статье рассматриваются пути повышения качества и экономической эффективности разработки и производства сложных инновационных электронных приборов, к которым относятся лазерные гироскопы (ЛГ). Описаны проблемы, возникающие при обеспечении надежной работы ЛГ в широком диапазоне температур, связанные с плотной компоновкой прибора. Детально рассмотрены теоретические принципы и математический аппарат, которые используются при построении тепловых моделей трехосных ЛГ с электроникой. Приводится разработанный алгоритм построения тепловой модели ЛГ, предусматривающий процедуру поэтапного разукрупнения (масштабирования – zooming). Описан процесс моделирования ЛГ с помощью системы АСОНИКА, представлена построенная тепловая модель ЛГ, а также тепловое поле одного из печатных узлов ЛГ. Указаны обнаруженные теплонагруженные электронные компоненты. Приведены результаты экспериментальной проверки точности моделирования посредством реального измерения термодатчиками температур в узлах модели, подтвердившие достоверность теплового моделирования с помощью системы АСОНИКА. Подчеркивается, что стоимость изготовления и испытаний ЛГ является достаточно высокой. Поэтому задача поиска путей снижения стоимости на этапах разработки и производства ЛГ с одновременным обеспечением повышения качества и надежности выпускаемых приборов является крайне актуальной. Точное тепловое моделирование на ранних стадиях разработки является эффективным способом решения этой задачи благодаря экономии средств на испытания и переконструирование, а также благодаря применению недорогой отечественной компьютерной системы моделирования АСОНИКА.

Информация об авторах:

Кузнецов Евгений Викторович, д.т.н., профессор, Генеральный директор АО "НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха"; Руководитель Центра НТИ "Фотоника" Инженерной академии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия

Ермаков Дмитрий Николаевич, доктор политических наук, доктор экономических наук, кандидат исторических наук, профессор, Академик РАЕН, Магистр технических наук, профессор Департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности Инженерной академии Российского университета дружбы народов, главный научный сотрудник научно-технического отдела АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Самусенко Олег Евгеньевич, к.т.н., доцент, Директор Департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности Инженерной академии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия

Голяев Юрий Дмитриевич, д.т.н., профессор, начальник ИПК- 470 АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Соловьева Татьяна Ивановна, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", доцент Инженерной академии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия

Кузнецов Никита Евгеньевич, аспирант АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Для цитирования:

Кузнецов Е.В., Ермаков Д.Н., Самусенко О.Е., Голяев Ю.Д., Соловьева Т.И., Кузнецов Н.Е. Особенности применения средств компьютерного моделирования для совершенствования процессов изготовления лазерных гироскопов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 31-43.

For citation:

Kuznetsov E.V., Ermakov D.N., Samusenko O.E., Golyaev Yu.D., Solovyeva T.I., Kuznetsov N.E. (2021) Features of the use of computer modeling tools for improving the manufacturing processes of laser gyroscopes. T-Comm, vol. 15, no. 12, pp. 31-43. (in Russian)

1. Введение

Старт большой технологической гонки дали в Кремле 10 июля 2019 года. В присутствии президента с госкомпаниями подписаны контракты на исследования в самых передовых областях. Искусственный интеллект, квантовые технологии – то, что на острие прогресса и что обеспечит лидерство нашей стране.

Для успеха, по словам Владимира Путина, все есть: выдающиеся умы, богатая научная база. Нужна еще четкая организация. И кому как не корпорациям, развивающим банковские услуги, транспорт, энергию, связь, поработать на будущее.

«Мы ожидаем от наших крупнейших компаний настоящего лидерства – технологического, кадрового, финансового. Мировой опыт показывает, что до 80 процентов успешных исследований и разработок обеспечивается именно корпоративным сектором. Я вчера в Екатеринбурге говорил, вы, может быть, обратили внимание: в Италии только что был, разговаривал с коллегами, они пошли именно по такому пути. Прямо за рабочим обедом мне об этом в свободной беседе и сказали: мы нацеливаем наши крупнейшие компании с госучастием именно на такую работу», — сказал Президент РФ Владимир Владимирович Путин.

Российский лидер справедливо отметил: «Глобальная конкуренция за обладание технологиями будущего развернулась уже сейчас. Наша задача, не теряя времени, сделать все, чтобы войти в число лидеров, гарантировать России технологический суверенитет, достойное место среди ведущих игроков на перспективных новых рынках» [https://www.1tv.ru/news/2019-07-10/368378-vladimir_putin_postavil_zadachu_dobitsya_liderstva_rossii_v_sfere_tehnologiy_budushego] (Дата обращения: 20.07.2021)].

Одним из путей организации высокоэффективного производства ЭП с улучшенными параметрами качества является создание «умных заводов» с системами автоматизации управления производством (в зарубежной терминологии ERP-systems) [26]. Нами рассматривались пути создания таких автоматизированных компьютерных систем, включающих контроль качества ЛГ на разных стадиях их производства [3, 4].

Рассматриваемый в данной работе трехосный лазерный гироскоп (ЛГ) является сложным электронным прибором (ЭП), состоящим из трех лазерных датчиков (He-Ne кольцевых лазеров) и электроники обеспечения их функционирования и обработки сигналов. Производством ЛГ овладели всего несколько фирм в мире, так как оно является комплексным, включающим в себя одновременно целый ряд разнородных технологий и процессов: технологию механической обработки металлических и стеклокерамических материалов; вакуумные, оптические, электронные, компьютерные технологии, нанотехнологии; всесторонние испытания на устойчивость к внешним воздействующим факторам. Вследствие этого стоимость изготовления ЛГ является достаточно высокой. Поэтому задача поиска путей повышения экономической эффективности этапов разработки и производства ЛГ с одновременным обеспечением высокого качества и надежности выпускаемых приборов является крайне актуальной.

В данной работе мы продолжаем исследования, направленные на повышение качества и экономической эффектив-

ности разработки и производства ЛГ, используя компьютерные методы моделирования поведения ЛГ с учетом условий реальной эксплуатации в широком температурном диапазоне.

Экономическая эффективность и качество новой техники закладываются на стадиях научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР). Именно здесь имеются наибольшие возможности в реализации прогрессивных идей по созданию технологичных в изготовлении, надежных и долговечных образцов техники. К числу таких прогрессивных идей относится использование компьютерного моделирования.

Затраты на подготовку и многократные испытания ЛГ занимают существенную часть бюджета, выделяемого на НИОКР. Часто после первых испытаний обнаруживаются чрезмерные тепловые нагрузки на электронные компоненты (ЭК). В данной работе рассмотрена возможность повышения надежности ЛГ и экономической эффективности их разработки и производства за счет сокращения (а фактически сведения к нулю) количества изменений, вносимых в конструкцию ЛГ после испытаний готовых макетов или опытных образцов. Этого можно добиться, если необходимые изменения внести на ранних этапах проектирования ЛГ путем выявления перегруженных ЭК на печатных узлах в процессе компьютерного моделирования ЛГ на тепловые воздействия. Сокращается объем необходимых испытаний, исключается необходимость многократных повторных испытаний. Средства, сэкономленные благодаря этому, могут быть направлены на развитие предприятия.

В последние годы в мировой практике при конструировании ЭП с целью сокращения сроков и затрат на создание конкурентоспособной аппаратуры предварительное тепловое моделирование используется все шире [5, 21]. Оно позволяет уже на ранних этапах проектирования до изготовления макетов и опытных образцов определить фактические температуры на компонентах ЭП, оптимизировать схемотехнические решения и конструкцию для обеспечения работы прибора в пределах допустимых тепловых нагрузок, сократить сроки проведения испытаний готовых приборов и практически исключить доработки из-за погрешностей конструирования.

Анализ особенностей разработки ЭП показал, что большинство инженеров понимают, какое существенное влияние оказывает температура на работу приборов. Но из-за недостаточного внимания к тепловому проектированию они чаще всего обнаруживают перегревы слишком поздно, что приводит к дорогостоящему устранению ошибок [2, 30]. По представленной статистике 40% инженеров считают тепловое проектирование низким приоритетом при разработке своих устройств. Для многих из них главными приоритетами являются соответствие требованиям технического задания, использование инноваций и обеспечение надежности приборов. Но именно точное тепловое проектирование на ранних стадиях разработки позволяет в конечном итоге достичь всего этого.

Миниатюризация и повышение плотности компоновки ЭП, к числу которых относятся ЛГ, сопровождаются ростом плотности внутреннего тепловыделения, в результате температура в ЭП повышается. Вызванные этим отклонения электрических параметров ЭК приводят к отклонениям выходных параметров ЭП. К тому же повышение температуры

ускоряет процесс необратимых физико-химических изменений в материалах, использованных для построения ЭП, особенно критичным является материал ПП, в результате резко увеличивается интенсивность отказов ЭК и, следовательно, снижается надежность ЭП. Установлено, что повышение температуры с 20 до 80 С приводит к увеличению интенсивности отказов полупроводниковых приборов в 3-4 раза, резисторов в 2-3 раза, конденсаторов в 6-8 раз, интегральных микросхем – в 6-10 раз [29].

Вступают в противоречие требования потребителей по увеличению функциональных возможностей изделия, сокращению его габаритно-массовых характеристик, обеспечению высокой надежности и безотказности работы ЭП и в то же время – снижению стоимости изделия и его обслуживания при эксплуатации. При этом уровень температуры в ряде случаев является решающим фактором, ограничивающим эксплуатационные характеристики ЭП [20].

В литературе описаны примеры применения для анализа тепловых процессов в механических системах и в электронике отечественных и зарубежных программных комплексов (ПК), таких как ANSYS, SIGMA, COMSOL, STF-ElectronMod, [6; 7, 8; 22; 24].

Мы провели анализ возможностей применения зарубежных ПК для моделирования теплового поведения ЛГ, содержащих кольцевые лазерные датчики и набор электронных ПУ, и пришли к выводу, что рассмотренные ПК не могут быть в полной мере применены по следующим причинам.

Использование зарубежных ПК требует адаптации их к применяемым в России элементной базе и типовым конструкциям, а также к стандартам. В итоге высокая стоимость зарубежных ПК и время, затраченное на их адаптацию, заметно увеличат стоимость разработок и время их проведения. Применение ПК, не опробованных на подтверждение достоверности моделирования экспериментальными измерениями, недопустимо при проектировании ЛГ, устанавливаемых в том числе в навигационных системах самолетов, в которых отказ из-за ошибок проектирования может привести к гибели десятков людей.

Особые проблемы анализа тепловых процессов в ЭП возникают в случае сложных многослойных конструкций этажерочного и кассетного типов, содержащих большое количество ЭК. Российские конструкторы обычно для каждой мощной космической ракеты, выводящей на орбиту несколько геофизических и связных спутников, проектируют систему из совокупности сложных взаимосвязанных ЭП, которые включают в себя до 1 млн. ЭК с плотной компоновкой на печатных платах, работающих в широком температурном диапазоне.

Для теплового моделирования подобных сложных конструкций успешно применяется российская автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА, основанная на теории проектирования надежных ЭП [9]. Система АСОНИКА не уступает по возможностям зарубежным ПК [27].

В данной статье мы рассматриваем возможности теплового моделирования комплексных ЭП, к которым относятся ЛГ, содержащие в едином корпусе датчики угловых поворотов на основе кольцевых лазеров, а также электронику обеспечения их функционирования и обработки сигналов. Электроника ЛГ – это этажерочный набор электронных печатных

узлов (ПУ), которые представляют собой печатные платы (ПП) с установленными на них ЭК.

По перечисленным выше причинам мы выбрали для анализа теплового поведения ЛГ российскую систему АСОНИКА, которая много лет широко применяется на российских предприятиях, разрабатывающих сложные ЭП. Более чем 30-летний опыт использования системы АСОНИКА, в том числе для анализа многокомпонентной аппаратуры космических аппаратов, подтвердил достоверность и высокую точность получаемых при моделировании результатов, а также удобство пользования и меньшее по сравнению с другими ПК время, затрачиваемое на создание моделей [10, 11, 25]. Использование системы АСОНИКА позволяет реализовать современные методы проектирования ЭП, основанные на CALS-технологиях [27]. За прошедшие годы CALS-технологии получили широкое развитие при разработке и производстве инновационной продукции; по приведенным данным это позволило ускорить выполнение НИОКР на 30-40%, уменьшить стоимость продукции на 30%, а также в 9 раз сократить время на корректировку проектов для адаптации под новые задачи.

Это связано с возможностями CALS-технологий по применению автоматизированных систем в организации этапов проектирования и контроля на всех стадиях, позволяющих оперативно находить и исправлять дефекты, производить изменения в проекте, например, заменить ЭК от одного производителя на аналогичный от другого, без внесения существенных изменений в проект, получить новый уровень гибкости и приспособляемости производимого продукта, проверяя возможность его применения в разных системах и при различных условиях эксплуатации. Таким образом, подобные технологии с применением автоматизированных систем, среди которых АСОНИКА, обеспечивают минимизацию времени на разработку и постановку на производство новых образцов наукоемкой продукции.

В статье о проведенных ранее исследованиях по компьютерному моделированию трехосных ЛГ [22] описаны результаты механического моделирования только резонатора (датчика) трехосного моноблочного ЛГ без какой-либо электроники, выполнявшегося с целью определения его резонансных частот. В статье [1, 15] приведены результаты теплового моделирования только резонатора (датчика) одноосного ЛГ.

В нашей работе объект и объем исследований были другими – необходимо было провести тепловое моделирование трехосного ЛГ из трех датчиков с полным комплектом электронных блоков, надежная работа которых в широком температурном диапазоне в значительной мере определяет надежность всего прибора. Начало этих исследований отражено в статьях [12, 13, 14].

Базовые методы, которые мы используем при компьютерном моделировании с помощью системы АСОНИКА: метод электротепловых аналогий, метод поэтапного разукрупнения, метод конечных разностей, метод сеток, метод графов. Полезность подобных методов подтверждена в работах других ученых. Метод электротепловых аналогий дает возможность в случае трудностей с определением искомых параметров изучаемого процесса перейти к анализу другого процесса, который эквивалентен изучаемому, но свободен от его недостатков. Электротепловая аналогия основана на формальном сходстве математических описаний процессов

теплопроводности и электропроводности [18]. Важно еще, что инженеру-электронщику гораздо легче представить тепловые процессы, пользуясь привычными для него терминами, схожими с терминами электротехники. Полезным признан и используется нами метод поэтапного масштабирования («zooming»), описанный в статье [23], при котором анализ объекта моделирования происходит с последовательным увеличением степени дискретизации, то есть с ростом пространственного разрешения всего объекта или его частей, что обеспечивает повышение точности моделирования.

В данной статье детально описаны теоретические принципы и математический аппарат, которые используются при построении тепловых моделей трехосных ЛГ с электроникой, алгоритм и процесс построения тепловой модели, результаты моделирования ЛГ с помощью системы АСОНИКА, доработки прибора, необходимые для исключения тепловых перегрузок и обеспечения надежной работы прибора, а также экспериментальные проверки точности этого моделирования.

2. Особенности поведения ЛГ при тепловых воздействиях и цель данной работы

Трехосный малогабаритный ЛГ [19] имеет плотную компоновку. В общем внешнем кожухе размещены датчики таким образом, чтобы они обеспечивали измерения угловых перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а в свободных зонах предельно компактно установлены электронные ПУ. Такая плотная компоновка приводит к повышенному тепловыделению во внутреннем объеме ЛГ. Для обеспечения надежной работы ЛГ в широком диапазоне температур нужно проконтролировать отсутствие локальных перегревов и заметных градиентов температур в тепловых полях прибора. Единственным и эффективным способом проанализировать тепловое поведение ЛГ на этапе разработки прибора является тепловое моделирование. В данной работе была поставлена задача разработать метод, устанавливающий алгоритм полной последовательности компьютерного теплового моделирования ЛГ, и провести такое моделирование. Для этого необходимо на первом этапе в подсистеме АСОНИКА-Т отработать тепловую макромодель ЛГ для типовой конструкции, показанной на рисунке 1.

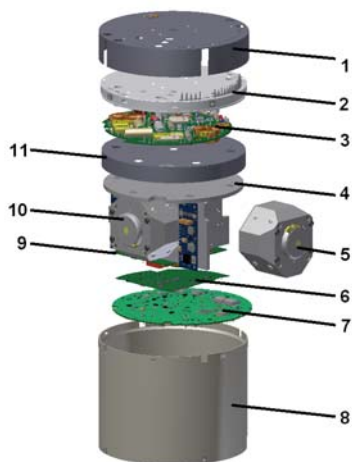


Рис. 1. Составные части компоновки лазерного гироскопа: 1 – крышка внешнего кожуха-экрана; 2 – диск с контактами-штырьками; 3, 6, 7, 9 – печатные узлы; 4 – несущий каркас; 5, 10 – датчики; 8 – внешний кожух-экран; 11 – внутренний экран

При построении тепловой модели требуется предусмотреть интерфейсную связь, с одной стороны, с программой электрического моделирования для передачи вычисленных мощностей тепловыделений в ЭК, а с другой стороны, с подсистемой АСОНИКА-ТМ, позволяющей на втором этапе теплового моделирования провести поэлементное моделирование всех ПУ, входящих в ЛГ. Такая последовательность моделирования даст возможность в конечном итоге получить на выходе подсистемы АСОНИКА-ТМ все реальные тепловые нагрузки на каждом ЭК.

3. Теоретические принципы и математический аппарат, которые используются при построении тепловых моделей лазерных гироскопов

3.1. Принцип унификации тепловых и электрических процессов на основе электротепловой аналогии и его использование при тепловом моделировании лазерных гироскопов с использованием ненаправленных графов

Тепловое моделирование ЛГ осуществляется с использованием принципа электротепловой аналогии.

Моделирование с использованием принципа электротепловой аналогии требует унификации топологических моделей на основе математических описаний разнородных физических процессов. Такая унификация приведена в таблице 1. Она позволяет сделать более понятной методику проведения анализа тепловых процессов в ЛГ и расчета выходных параметров модели – температур частей и компонентов ЛГ.

Таблица 1

Унификации разнородных физических процессов для учета их взаимосвязи

Унифицированные переменные и параметры моделей физических процессов	Электрическая модель	Тепловая модель
Переменная функциональная величина узла модели, φ	Электрический потенциал узла электрической схемы, φ	Температура изотермической области конструкции, T
Переменная функциональная величина ветви модели, ψ	Ток ветви электрической схемы, I	Тепловой поток между изотермическими областями (мощность тепловыделения), P_T
Диссипативный параметр ветви, α	Проводимость (разность потенциалов постоянна при постоянном токе), G_E	Тепловая проводимость (разность температур между изотермическими областями постоянна при постоянном тепловом потоке между ними), G_T
Консервативный параметр ветви (1-го рода), β	Емкость (разность потенциалов возрастает при постоянном токе), C_E	Тепловая емкость (разность температур между изотермическими областями возрастает при постоянном тепловом потоке между ними), C_T
Консервативный параметр ветви (2-го рода), γ	Индуктивность (ток возрастает при постоянной разности потенциалов), L_E	Тепловая индуктивность (конвективный тепловой поток возрастает в переходном процессе между изотермическими областями), L_T
$\alpha (\varphi_1 - \varphi_2) = \psi$	$G_E (\varphi_1 - \varphi_2) = I$	$G_T (T_1 - T_2) = P_T$

При тепловом моделировании ЛГ мы используем ненаправленные графы, которые позволяют построить структурную топологическую модель прибора в виде узлов, соответствующих частям и компонентам прибора, и показать связи между ними, иллюстрируя происходящие в приборе тепловые процессы. Метод графов используется также для последующего поэлементного анализа каждого печатного узла и построения виртуальной карты его теплового поля.

Унифицированные переменные функциональные величины и параметры электрических и тепловых моделей приведены в первом столбце таблицы 1. Функциональными величинами описываются, прежде всего, входные и выходные сигналы. Первые задаются перед или при моделировании, а вторые получаются в результате моделирования. Их связь между собой определяется структурой модели и значениями параметров ветвей графа.

Параметры ветвей часто являются постоянными величинами, но иногда могут быть и зависимыми от некоторых переменных величин φ и ψ .

Формулы, приведенные в нижней строке таблицы 1, иллюстрируют единообразие математических уравнений разнородных электрических и тепловых процессов и уравнения в унифицированной форме.

Важнейшими параметрами в данном рассмотрении будут температура, тепловой поток (мощность тепловыделения) и тепловая проводимость.

3.2. Этапы моделирования и математический аппарат, который используется при построении тепловых моделей лазерных гироскопов

В ЛГ, представленном на рис.1, присутствуют тепловые процессы между элементами конструкции в виде кондукции, конвекции и излучения.

Построение тепловой модели ЛГ, отражающей эти процессы, происходит в два этапа: 1-й этап – макромоделирование ЛГ с использованием подсистемы АСОНИКА-Т, 2-й этап поэлементное моделирование каждого ПУ ЛГ – с использованием подсистемы АСОНИКА-ТМ. Обе системы построены на основе уравнений классической теории теплообмена.

На первом этапе моделирования мы осуществляем макромоделирование ЛГ, разбивая его на условно изотермические объемы (части), которыми являются датчики ЛГ, все ПУ, элементы конструкции, воздушные полости внутри ЛГ. Исходные данные (чертежи, материалы элементов конструкции) вводятся в подсистему АСОНИКА-Т. Мощность тепловыделений каждого ПУ задается в подсистеме АСОНИКА-Т как сумма мощностей тепловыделения всех ЭК, расположенных на ПП, с использованием данных проведенного при проектировании принципиальных схем ПУ электрического моделирования (в нашем случае – с помощью программы PSpice). По данным о мощностях тепловыделения подсистема АСОНИКА-Т рассчитывает средние температуры частей ЛГ, в том числе каждого ПУ.

Приведем формулы, используемые в программах моделирования АСОНИКА-Т и АСОНИКА-ТМ для расчета тепловых проводимостей для различных видов теплообмена: кондукции, конвекции и излучения.

В общем случае тепловая проводимость G_T участка определяется как отношение теплового потока Q_T , протекающего

через данный участок, то есть мощности тепловыделения P_T к разности температур ΔT между концами этого участка:

$$G_T = \frac{P_T}{\Delta T}. \quad (1)$$

Тепловая проводимость кондукции G_{Tcd} участка с постоянным сечением S , имеющего длину L и коэффициент теплопроводности λ , определяется формулой:

$$G_{Tcd} = \frac{\lambda \cdot S}{L}. \quad (2)$$

Тепловая проводимость конвективной теплоотдачи равна

$$G_{Tcn} = \alpha_{cn} \cdot S, \quad (3)$$

где α_{cn} – коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности площадью S в окружающий воздух.

Тепловая проводимость излучения:

$$G_{Tr} = \frac{\varepsilon_{пр} \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – температуры противоположно расположенных и взаимно связанных излучательным теплообменом двух поверхностей площадью S ; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты обеих поверхностей; σ – коэффициент Стефана-Больцмана, характеризующий удельную энергетическую светимость абсолютно черного тела.

По аналогии с электрической проводимостью обратная величина тепловой проводимости участка, состоящего из нескольких участков, равна сумме обратных величин тепловых проводимостей отдельных участков.

Расчет суммарных проводимостей для каждой из выделенных частей ЛГ и определение температуры каждой части производится с помощью подсистемы АСОНИКА-Т.

На втором этапе тепловое моделирование осуществляется с использованием метода конечных разностей (МКР), который называют также методом сеток. В этом методе происходит замена непрерывной задачи математической физики ее дискретным аналогом – «разностной схемой», как это будет показано далее. Фактически область непрерывного изменения аргументов заменяется конечным набором точек – узлов, совокупность которых образует сетку. Такая сетка может быть рассмотрена как ненаправленный граф.

В ряде случаев при моделировании используется метод конечных элементов (МКЭ). Классический метод конечных элементов обычно требует построения сетки из большого числа элементов, в результате объем памяти компьютера оказывается недостаточным или вычисления будут слишком медленными и длительными [17].

Нужно отметить важное преимущество МКР по сравнению с МКЭ: МКР характеризуется относительной простотой решающего алгоритма и его программной реализации. По этим причинам мы используем тепловое моделирование на основе МКР.

На рисунке 2 приведен пример участка графа (сетки) для ПУ при наличии всех видов теплообмена.

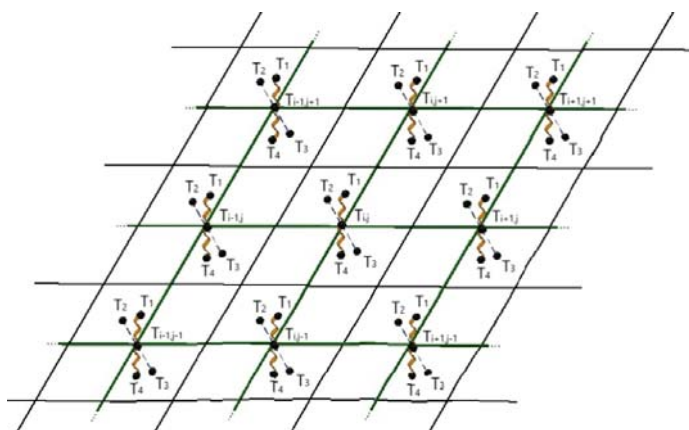


Рис. 2. Общий вид части тепловой модели печатного узла:
 T_{ij} , $T_{i-1,j}$, $T_{i+1,j}$, $T_{i,j-1}$, $T_{i,j+1}$ – температуры в узлах сетки, i и j – номера узлов сетки по осям x и y , T_1 , T_4 – температуры деталей конструкции ЛГ над и под печатным узлом; T_2 , T_3 – температуры воздуха над и под печатным узлом

В таблице 2 приводятся обозначения ветвей графа в зависимости от вида тепловой проводимости, соответствующей данной ветви.

Таблица 2

Тепловые процессы и их обозначения

Обозначение ветвей тепловой модели	Название вида теплового процесса
	Кондукция
	Излучение
	Контактный теплообмен
	Естественная конвекция

Граф в виде сетки строится по всей поверхности ПУ автоматически с помощью системы АСОНИКА-ТМ, при этом шаг сетки задается проектировщиком.

В вершинах графа при моделировании вычисляются температуры T_{ij} , соответствующие температурам ПП и ЭК в этих ячейках.

Покажем, как происходит построение тепловой модели ПУ ЛГ с использованием метода конечных разностей.

Построим топологическую тепловую модель ПУ, имея в виду, что по его площади тепловой поток, исходящий из ЭК, распространяется кондукцией, а с одной и второй сторон ПУ тепловой поток уходит в окружающий воздух путем конвекции, а также путем излучения на соседние к ПУ конструктивные части ЛГ.

Мощность потока тепловой энергии P_{cd} , передающейся посредством кондукции, определяется законом Фурье, который может быть представлен формулой:

$$P_{cd} = -\lambda S \nabla T, \quad (5)$$

где P_{cd} – мощность теплового потока за счет тепловыделения ЭК, расположенных на ПУ, λ – коэффициент теплопроводности, S – площадь, ∇ – оператор Лапласа, T – температура.

Для того, чтобы представить уравнение (5) в конечных разностях, нужно от непрерывного описания перейти к дискретному. Разделим ПУ на дискретные объемы $V_i = \Delta x \cdot \Delta y \cdot h$,

где Δx и Δy – размеры ячейки сетки по осям x и y , h – толщина ПП (обычно h существенно меньше Δx , Δy , поэтому теплообмен вдоль оси z мы не рассматриваем). Каждый объем считаем изотермическим, то есть в каждой точке объема температуру считаем одинаковой, в том числе в частях ЭК, размещенных на поверхности данного объема (в ячейке).

Теперь перейдем к дифференциальному уравнению теплопроводности Фурье в виде:

$$\lambda \nabla^2 T + p_{cd} = 0, \quad (6)$$

где p_{cd} – удельная тепловая мощность, выделяемая в ячейке ПУ за счет кондукции. Приведем это уравнение к конечно-разностной форме, заменив частные производные в $\nabla^2 T$ конечными разностями:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{\Delta^2 x}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}}{\Delta^2 y},$$

где i и j – номера узлов сетки по осям x и y .

После проведения ряда преобразований получим следующее выражение:

$$G_{Tcdi}(T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + G_{Tcdj}(T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) + P_{cdi,j} = 0, \quad (8)$$

где G_{Tcdi} – тепловая проводимость за счет кондукции между соседними ячейками сетки по оси x ;

$$G_{Tcdi} = \lambda \cdot h \cdot \Delta y / \Delta x;$$

G_{Tcdj} – тепловая проводимость за счет кондукции между соседними ячейками сетки по оси y ;

$$G_{Tcdj} = \lambda \cdot h \cdot \Delta x / \Delta y;$$

$P_{cdi,j}$ – тепловая мощность, выделяемая в ячейке сетки (параметр присутствует только при наличии в ячейке ЭК, выделяющих тепло).

Вид (8) имеет любое уравнение, входящее в систему уравнений для ячеек сетки (см. рис. 2). Эта система уравнений решается в подсистеме АСОНИКА-ТМ для кондуктивного теплообмена. Топологическая модель представляет собой двумерную сетку из тепловых проводимостей кондукции G_{Tcd} , расположенных между узлами сетки.

Кроме того, в ЛГ присутствуют конвективный и излучательный теплообмены. При подготовке тепловой сетки к расчету указываются также граничные условия теплообмена между поверхностями ПУ и окружающим воздухом, а также с соседними платами или со стенками корпуса и другими частями ЛГ. Тогда в тепловую модель ЛГ добавляются тепловые проводимости конвекции и излучения (G_{Tcn} и G_{Tr}).

Конвекция с поверхностями ПП и других частей ЛГ происходит в соответствии с уравнением Ньютона-Рихмана (в зарубежной терминологии – «законом охлаждения Ньютона»):

$$P_{cn} = G_{Tcn}(T_s - T_A), \quad (9)$$

где P_{cn} – мощность тепловыделения за счет кондукции, T_s – температура поверхности, T_A – температура окружающей среды.

Закон охлаждения Ньютона также может быть использован для определения количества тепла, выделенного за счет теплового излучения:

$$P_r = G_{Tr}(T_1 - T_2), \quad (10)$$

Все приведенные выше формулы являются основой для выполнения расчетов по программе АСОНИКА-ТМ.

Полученные на первом этапе моделирования данные используются на втором этапе для моделирования каждого ПУ в отдельности. А именно, при тепловом моделировании каждого ПУ мощности тепловыделений в каждом ЭК этого ПУ, совместно со средней его температурой, температурами воздуха с одной и другой стороны ПУ, а также температурами других конструктивных частей ЛГ позволяют получить с помощью программы АСОНИКА-ТМ температуры всех ЭК данного ПУ.

4. Алгоритм метода обеспечения режимов работы лазерных гироскопов в пределах допустимых тепловых нагрузок

При моделировании теплового поведения ЛГ одной из рассматриваемых характеристик является его устойчивость как к внешним тепловым воздействиям, так и к внутренним, возникающим за счет собственного тепловыделения в ЭК. Фактическое распределение теплового поля в ЛГ определяется совокупностью этих факторов. Особенно опасным является наличие локальных перегревов отдельных ЭК, расположенных на ПП, так как они могут привести к изменению параметров и/или отказу ЭК в процессе работы прибора. К сожалению, разработчики часто уделяют основное внимание достижению заданных параметров прибора, но пренебрегают тщательным анализом его теплового поведения.

Как было неоднократно подтверждено результатами применения системы АСОНИКА для анализа сложных многокомпонентных ЭП, тепловое моделирование с помощью этой системы создает возможность контроля тепловых нагрузок при проведении исследований работы ЭП, имитируя различные режимы рабочей эксплуатации, выдавая выходные данные по температурам как частей ЭП, так и всех ЭК в виде таблиц, в которых указаны также заданные и фактические коэффициенты тепловой нагрузки и дана оценка соответствия или превышения заданных значений. Вот почему система АСОНИКА была выбрана для моделирования теплового поведения ЛГ.

Принимая во внимание отмеченную важность влияния тепловых процессов на работоспособность ЭК, мы в данной работе разработали метод, устанавливающий алгоритм полной последовательности компьютерного теплового моделирования ЛГ (рис. 3).

В алгоритме отражен предложенный двухэтапный метод моделирования «сверху вниз» или метод разукрупнения (zooming): на первом этапе проводится макро моделирование ЛГ с анализом тепловых процессов в частях ЛГ, включая ПУ, а затем производится увеличение степени дискретизации анализа вплоть до определения температурных режимов каждого ЭК (рис.3). Коэффициент фактической тепловой нагрузки рассчитывается по следующей формуле:

$$k_i^T = T_i^{\Phi} / T_i^{TV}, \dots, i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

где T_i^{Φ} – температура i -го ЭК, которая определяется в результате расчета в подсистеме АСОНИКА-ТМ; T_i^{TV} – предельная допустимая температура ЭК по ТУ; n – количество ЭК. В соответствии с типичными требованиями коэффициенты фактических тепловых нагрузок должны быть не менее 0,8.

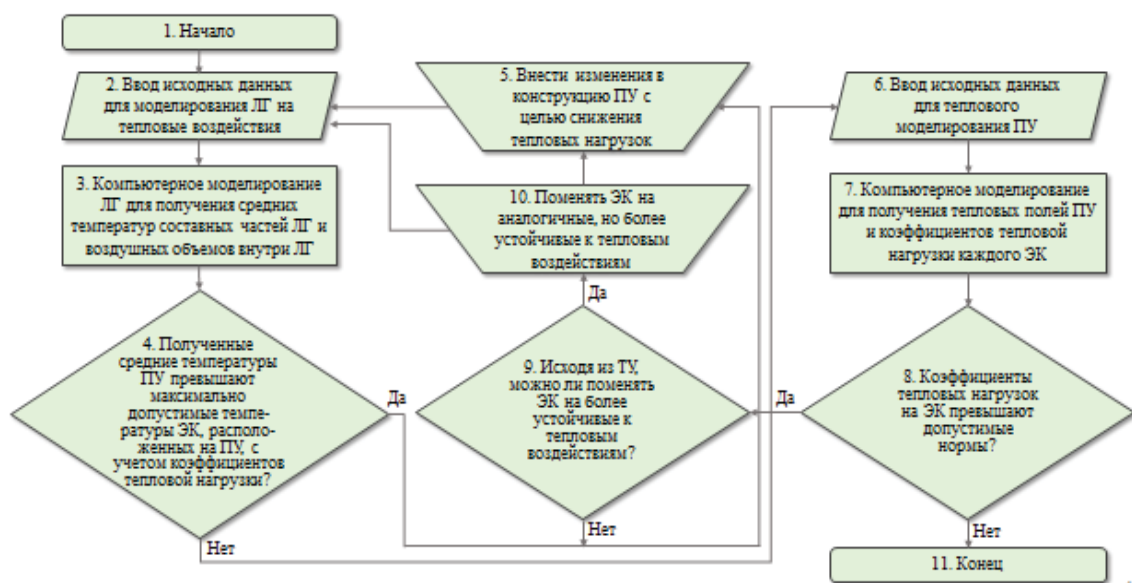


Рис. 3. Алгоритм метода обеспечения режимов работы лазерных гироскопов в пределах допустимых тепловых нагрузок, реализуемый с помощью подсистем АСОНИКА-Т (блоки 1-4) и АСОНИКА-ТМ (блоки 6-8, 11)

5. Процесс и результаты моделирования тепловых режимов в лазерном гироскопе

5.1. Тепловое макромоделирование лазерного гироскопа

При компьютерном моделировании ЛГ с помощью системы АСОНИКА был использован принцип разукрупнения или поэтапного масштабирования (zooming), при этом на первом этапе проводилось макро моделирование ЛГ. Как отмечено в разделе 2.2, на первом этапе моделирования прибор разбивается на условно изотермические части, а именно: датчики ЛГ (датчик X, датчик Y, датчик Z), все ПУ (ПУ цифрового блока и других электронных блоков ЛГ), элементы конструкции (крепежная система – «крестовина» из двух деталей, кожух-экран и др.), воздушные полости внутри ЛГ.

Тепловая макромодель ЛГ строилась в подсистеме АСНИКА-Т как модель тепловых потоков в виде ненаправленного графа. Узлы такого графа моделируют условно изотермические части ЛГ, ветви графа отображают тепловые потоки между этими частями. В подсистеме АСНИКА-Т предусмотрена возможность учета видов тепловых воздействий, имеющих в ЛГ, поэтому мы могли их смоделировать и построить ветви графа, соответствующие виду воздействий.

Подсистема АСНИКА-Т автоматически формирует модели типовых конструкций, а для нетиповых конструкций существует графический интерфейс, в котором проектировщик сам строит топологическую модель. При моделировании ЛГ мы использовали оба варианта, так как часть элементов конструкции ЛГ имеет типичную форму, а часть – нетипичную.

В процессе моделирования мы пользовались информацией о тепловых параметрах материалов конструктивных элементов ЛГ (теплопроводность, теплоемкость), взятой из баз данных подсистемы АСОНИКА-Т и технических условий.

Для пояснения процесса моделирования на рисунке 4 показан эскиз зоны внутреннего объема ЛГ, соответствующий фрагменту модели (нумерация элементов начинается с цифры 11, так как показанный фрагмент рассматривался в ряду других фрагментов).

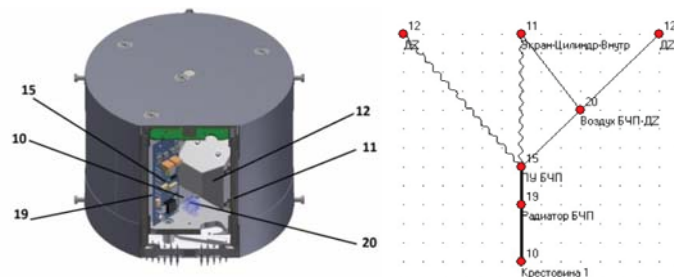


Рис. 4. Эскиз зоны внутреннего объема лазерного гироскопа и фрагмент его тепловой модели, где части прибора – узлы графа, соединенные ветвями с соответствующим видом теплопередачи: 10 – вертикальная часть несущего каркаса («крестовина 1»); 11 – внутренний цилиндрический экран; 12 – датчик оси Z (ДЗ); 15 – печатный узел блока частотной подставки (ПУ ЧЧП); 19 – радиатор блока частотной подставки (БЧП); 20 – воздушный зазор между ПУ ЧЧП и датчиком оси Z (ДЗ)

На рисунке 5 представлена полная модель тепловых процессов в ЛГ, построенная в подсистеме АСОНИКА-Т.

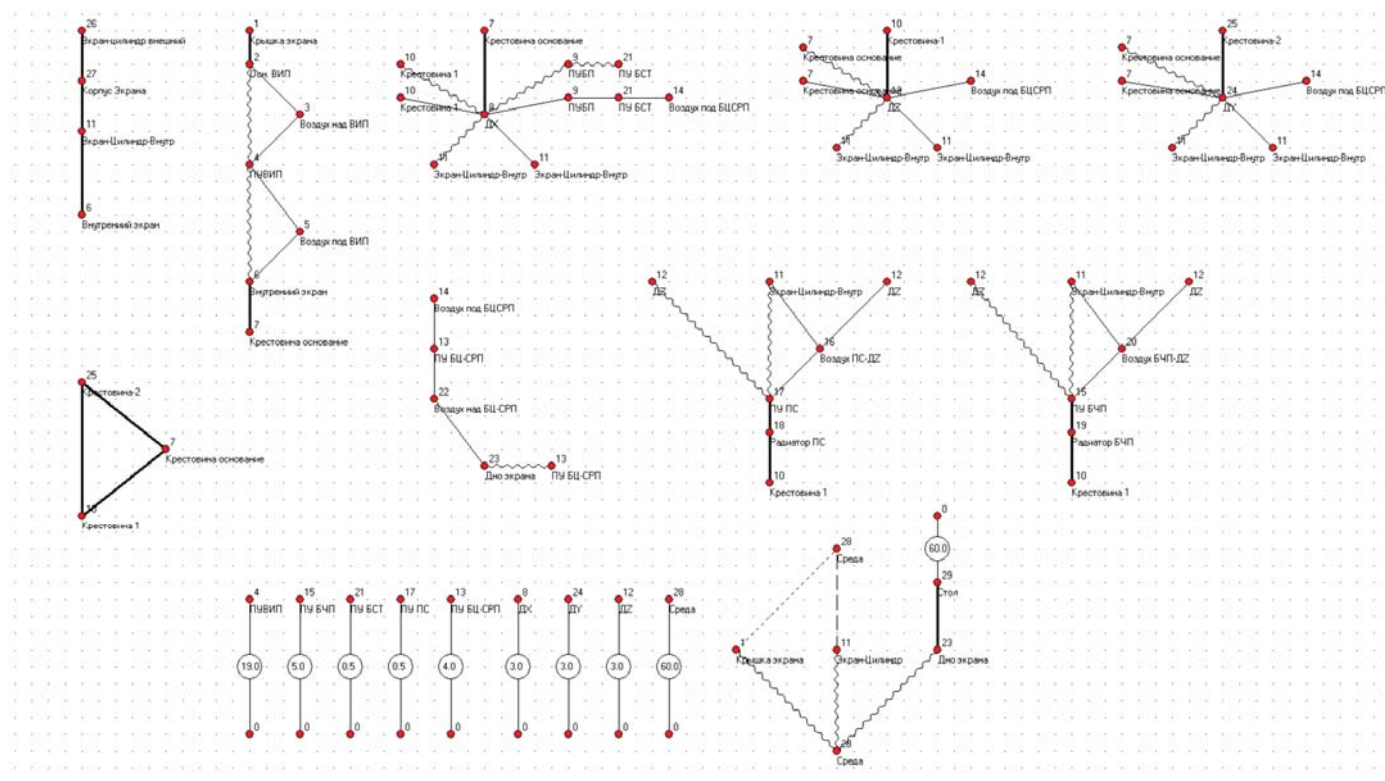


Рис. 5. Топологическая модель тепловых процессов в лазерном гироскопе, построенная с помощью подсистемы АСОНИКА-Т

В качестве входных данных мы вводили температуру окружающей среды, мощности тепловыделений датчиков и всех ПУ, просуммировав мощности тепловыделений расположенных на них ЭК, получаемые как результаты электрического моделирования принципиальной схемы ЛГ. В левом нижнем углу рисунка 5 показаны в виде источников ЭДС источники мощности тепловыделения, соответствующие каждому ПУ, окружающая среда моделируется в виде источника температуры с возможностью ее изменения в соответствии с реальными условиями эксплуатации.

Выходные данные – температуры частей конструкции, всех ПУ, датчиков.

Отметим, что топологическая модель, представленная на рисунке 5, разделена на части в целях упрощения и наглядности, поэтому ряд узлов дублируются. При расчетах в подсистеме АСОНИКА-Т их объединение происходит автоматически.

По результатам расчета выводятся данные в виде таблицы температур в узлах модели ЛГ. Таких узлов в нашей модели было 27. В самом неблагоприятном случае – при температуре окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$ температуры большинства частей ЛГ оказались в диапазоне от 70 до 80°C , но температуры двух ПУ достигли 92 и 94°C , что не превышает допустимые максимальные температуры установленных на них ЭК (причем с учетом коэффициента тепловой нагрузки), однако требует дальнейшего анализа температурных режимов каждого ЭК для оценки возможности его надежной работы при повышенной температуре.

5.2. Моделирование тепловых режимов в печатных узлах лазерного гироскопа

На втором этапе моделирования в соответствии с принципом разукрупнения (или zooming) мы перешли к моделированию каждого ПУ в отдельности с целью определения температур всех установленных на нем ЭК. При этом мы использовали подсистему АСОНИКА-ТМ, в которой автоматически строится сетка – ненаправленный граф на основе МКР (см. рис. 2).

Далее приводятся результаты моделирования одного из ПУ ЛГ – цифрового блока. Он является удачным выбором для иллюстрации результатов моделирования из-за большого количества установленных на нем ЭК: около 200 интегральных схем, транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов размещены с двух сторон ПП. На рисунке 6 приводится изображение теплового поля для ПУ этого блока.

Отметим, что резкие границы между этими элементами и окружающей зоной ПП обусловлены тем, что в подсистеме АСОНИКА-ТМ имеется возможность определения и индикации средней температуры каждого ЭК, что позволяет оценить соответствие требованиям по максимально допустимому коэффициенту тепловой нагрузки.

Как хорошо видно на рисунке 6, наиболее теплонагруженными являются ПЛИС D9 и диоды D7, D8. Несмотря на то, что по этим ЭК не зафиксировано превышение максимально допустимого коэффициента тепловой нагрузки, это требует внимательного рассмотрения особого внимания.

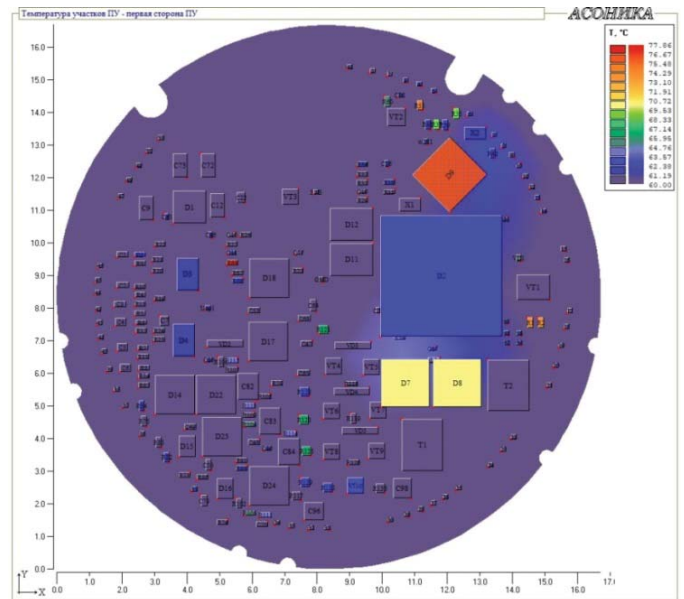


Рис. 6. Тепловое поле печатного узла ЛГ в подсистеме АСОНИКА-ТМ после моделирования тепловых процессов с индикацией температуры каждого ЭК

Среди всех ЭК этого ПУ превышение обнаружено у 5 резисторов (в диапазоне $0.85-0.88$), что составляет $1,4\%$ от общего количества ЭК.

Вместе с тем необходимо отметить, что при температуре внешней среды $+60^{\circ}\text{C}$ часть ЭК данного блока (примерно 10%) работают при повышенных температурах (до $+100^{\circ}\text{C}$), что, как известно, приводит к увеличению интенсивности отказов ЭК.

Подчеркнем, что еще более чувствительными к работе при повышенной температуре являются интегральные схемы, у которых повышение температуры с 20 до 80°C может привести к увеличению интенсивности отказов на порядок, как об этом написано в разделе 1. Избыточно теплонагруженным является важный ЭК цифрового блока – ПЛИС: при температуре внешней среды $+60^{\circ}\text{C}$ температура ПЛИС по результатам моделирования составляет около $+76^{\circ}\text{C}$, а по результатам натурного эксперимента (см. раздел 5.3) еще выше, а именно $+79^{\circ}\text{C}$, на что следует обратить особое внимание с учетом наблюдавшихся отказов этих интегральных схем.

Таким образом, при дальнейших разработках ЛГ с увеличенным временем непрерывной работы следует принять меры по снижению тепловых нагрузок на теплонагруженные ЭК.

5.3. Экспериментальная проверка результатов моделирования

С целью определения точности моделирования был поставлен ряд экспериментов, в которых на прибор была установлена совокупность датчиков измерения температуры. Термодатчики были расположены в 15 точках конструкции, соответствующих узлам (вершинам графа) в тепловой модели. В таблице 5 приводятся результаты для наиболее теплонагруженных деталей, ПУ, ПП, ЭК.

Таблица 5

**Сравнение результатов моделирования
с экспериментальными данными**

Название части конструкции, на которую установлен термодатчик	Температура, °C		Разность температур при моделировании и при эксперименте	Погрешность моделирования, %
	Результат моделирования	Результат измерения		
Микроконтроллер цифрового блока	81.88	78	3.88	5.0
ПЛИС на цифровом блоке	88.68	85.13	3.55	4.2
Печатная плата цифрового блока	80		2	2.56
Резистор на цифровом блоке	80		4	5.3
Нижняя плоскость корпуса	81	75	5.6	7.4
Основание ВПП	75.3	74.2	1.1	1.4
Транзистор стабилизатора тока	89.8	93	3.2	3.7
Воздух рядом с датчиком Z	82.2	84.1	1.9	2.26

В первую очередь мы размещали датчики в наиболее теплогруженых местах конструкции. Были проведены испытания, в которых прибор помещался в камеру теплота, где непрерывно работал на протяжении 120 мин при постоянной температуре в камере +60°C. Данные датчиков температур в точках конструкции при этом регистрировались в непрерывном режиме. В течение 120 мин температуры в точках измерения постоянно повышались, однако за период измерений не достигли установившихся значений. Для их определения была проведена экстраполяция, и таким образом определились температуры насыщения для каждой исследуемой точки.

При сравнении полученных в эксперименте результатов измерения температуры термодатчиками с результатами теплового моделирования с помощью системы АСОНИКА было установлено, что погрешность тепловой модели находится в пределах 1,4-7,4% (точность термодатчиков 0,5°C). Авторы статьи солидарны с мнением Президента Российской Федерации Владимира Владимировича Путина, подчеркивающего, что России «некогда приниживаться к теме, к проблеме» и нужно активно работать над развитием новых технологий.

[<https://riafan.ru/1194363-putin-prizval-aktivno-rabotat-nad-novymi-tehnologiyami> (Дата обращения: 12.07.2021)].

Заключение

1. Разработана методика и алгоритм построения тепловой модели ЛГ, обеспечивающие проведение компьютерного моделирования ЛГ в два этапа: 1-й этап – макромоделирование ЛГ с использованием подсистемы АСОНИКА-Т, 2-й этап – элементное моделирование каждого ПУ ЛГ – с использованием подсистемы АСОНИКА-ТМ.

2. Проведено компьютерное моделирование ЛГ по предложенной методике. При этом на 1-м этапе моделирования получены средние температуры частей и ПУ ЛГ, а

также воздушных полостей внутри ЛГ, на 2-м этапе – температуры на каждом ЭК.

3. Проведена оценка соответствия полученных коэффициентов тепловых нагрузок ЭК заданным предельно допустимым значениям 0,8. В результате моделирования с помощью системы АСОНИКА было обнаружено, что при температуре окружающей среды +60°C на печатном узле ЛГ имеются избыточно теплогруженные ЭК, у которых коэффициент тепловой нагрузки превышает 0,8. Также было установлено, что некоторые ЭК работают при повышенных температурах (до +100°C), что, как известно, приводит к увеличению интенсивности отказов. Таким образом, при дальнейших разработках ЛГ следует принять меры по снижению тепловых нагрузок на эти ЭК, что позволит повысить надежность и качество ЛГ.

4. В работе проверены работоспособность методики и алгоритма в процессе проектирования реального ЛГ и проведения оценки точности моделирования экспериментально с помощью термодатчиков, размещенных в 15 точках конструкции, соответствующих вершинам графа. При сравнении полученных в эксперименте результатов измерения температуры термодатчиками с результатами теплового моделирования с помощью системы АСОНИКА было установлено, что погрешность тепловой модели находится в пределах 1,0-7,8%.

5. Результатами работы подтверждено, что тепловое моделирование с помощью системы АСОНИКА создает возможность контроля тепловых нагрузок при проведении исследований работы ЛГ, имитируя различные режимы рабочей эксплуатации. Таким образом, используя моделирование, удастся сократить расходы на проведение многочисленных испытаний и доработки прибора, а значит повысить экономическую эффективность разработок и производства ЛГ. Дополнительный выигрыш в стоимости обеспечивает применение отечественной системы АСОНИКА вместо дорогостоящих и требующих адаптации к отечественной элементной базе и стандартам зарубежных компьютерных программ теплового моделирования.

6. Разработанная методика обладает хорошей универсальностью и может быть применена к виртуальному компьютерному моделированию с помощью системы АСОНИКА при проектировании сложных киберфизических приборов.

7. Продолжение исследований будет направлено на развитие применяемого метода моделирования, а также на определение экономических показателей повышения эффективности выполнения проектов по разработке новых приборов в случае применения автоматизированных систем моделирования.

Литература

1. Abatur V.V., Savelyev I.I.; Skopin C.A. Thermal model of Zeeman ring laser // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019), Prague, Czech Republic.
2. Aldham C. Five Common Misconceptions about Thermal Design. 2017. <https://thermalconference.com>.
3. Belov A., Soloveva T. Intellectual Ring Laser Quality Control System – Key Component of Ring Lasers Science-Based Production // 20th International Conference KES-2016 on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (York, England, September 4-7 2016). Procedia Computer Science: Vol. 96. Amsterdam: Elsevier B.V., pp. 456-464.

4. Belov A., Vnukov A., Soloveva T. Complex education program "Project Seminar" to meet today and tomorrow needs of fast developing optical-electronic industry // ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Red Hook, USA: IEEE Computer Society, pp. 1-7.
5. Cook B. Slashing PCB Design Cycle Time Using Real-time PCB Thermal Analysis Tools. 2017. <https://thermalconference.com>.
6. Cheng H.C., Yu C.Y., Chen W.H. An Effective Thermal-mechanical Modeling Methodology for Large-scale Area Array Typed Packages // Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2005, vol. 7, no. 1, pp. 1-17.
7. Chirkin M.V., Klimakov V.V., Ulitenko A.I., Molchanov A.V. Passive controlling of a temperature field inside strapdown inertial navigation system // Proceedings of 18th S-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, S-Pb, Russia, 30 May-1 June, 2011. pp. 122-124.
8. Kandalov P.I., Madera A.G. Mathematical and computing modeling of temperature fields in electronic modules // Proc 16th Intern. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). IEEE. Barcelona, Spain, October 6-8, 2010.
9. Kofanov Yu.N. Theoretical basement of designing, technology and reliability of radioelectronic devices. Moscow: Radio i svyaz. 1991. 360 p. (in Russian)
10. Kofanov Yu.N. Automated system ASONIKA in designing of radioelectronic devices. Moscow: MIEM NRU HSE. 2012. 58 p. (in Russian)
11. Kofanov Y.N., Sotnikova S.Y., Lemanskiy D. Method of computer modelling accuracy increase for electronic means based on interconnection of different physical processes proceeding, in: Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference. / Ed. by S. U. Uvaysov. Part 2. Moscow: HSE. 2014, pp. 616-620.
12. Kofanov Y.N., Vinokurov Y.A., Sotnikova S.Y. Optoelectronic Devices' Thermal Working Modes Providing Method // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019), Prague, Czech Republic. 2019.
13. Kuznetsov E. Kolbas Y., Kofanov Y., Kuznetsov N., Soloveva T. Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation // ICCES'2019 International Conference on Computational&Experimental Engineering and Sciences (Tokyo, Japan, 24-28 March, 2019). Conference Abstract. Co-sponsored by Tech Science Press, 2019. ID:5268.
14. Kuznetsov E., Kolbas Y., Kofanov Y., Kuznetsov N., Soloveva T. Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation. In: Okada H., Atluri S. (eds) Computational and Experimental Simulations in Engineering // ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science, vol 75. Springer, Cham. Pp.295-300.
15. Li Geng, Zhang Pengfei, Wei Guo, Xie, Yuanping, Yu Xudong, Long Xingwu. Multiple-Point Temperature Gradient Algorithm for Ring Laser Gyroscope Bias Compensation // Sensors (Basel). 2015 Dec; 15 (12): 29910-29922.
16. Li J., Ma Y., Xiyuan Ch. Error Modeling, Calibration, and Non-linear Interpolation Compensation Method of Ring Laser Gyroscope Inertial Navigation System // Abstract and Applied Analysis. Vol.2013, Hindawi Publishing Corp., Article ID 359675. 2013. Pp.1-7.
17. Liu D.S., Chen Y.W. (Application of a new infinite element method for free vibration analysis of thin plate with complicated shapes. In: Okada H., Atluri S. (eds) Computational and Experimental Simulations in Engineering // ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science, vol 75. Springer, Cham. 2020. Pp. 295-300.
18. Man L., Man E. Electro-thermal analogies for temperature calculation // Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). (Tratanska Lomnica, Slovakia, 11-15 May, 2011).IEEE. Pp. 358-362.
19. Lukyanov D., Filatov Yu., Golyaev Yu., Kuryatov V., Soloveva T. et al. 50th Anniversary of the Laser Gyro // 20th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2013, St. Petersburg. P. 36-49.
20. Madera A.G. The concept of mathematical and computer simulation of thermal processes in electronic systems // Software&Systems. №4 (112). 2015. Pp.79-86.
21. Miyazaki N., Ikeda T. Application of Computational Mechanics to Reliability Studies of Electronic Packaging. Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC X), Aug.21-23, 2006. Hainan, China. Tsinghua University Press&Springer.
22. Naveen S., Siva Rama Krishna A., Konayya D., Gupta M.K., Rambabu K. Modeling and Analysis of Monolithic Tri-Axial Ring Laser Gyro // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 3, issue 9. 2013. Pp.145-148.
23. Okada H., Liu C., Ninomiya T., Fukui Y., Kumazawa N. Analysis of particulate composite materials using an element overlay technique, CMES: Computer Modeling in Engineering&Sciences, vol.6. №4. 2004. Pp. 333-348.
24. Raja B., Praveenkumar V., Leelaprasad M., Manigandan P. Thermal Simulations of an Electronic System using Ansys Icepak // Int. Journal of Engineering Research and Applications, vol.5, issue 11, (Part-1). 2015. Pp.57-68.
25. Shalumov A.S., Kofanov Yu.N., Uvaysov S.U. et al. Automated system ASONIKA for modeling of physical processes in radioelectronic devices with considering of outer influences. Moscow: Radiotekhnika. 2013. 424 p. (in Russian)
26. Shafic S.I., Velez G., Toro C., Sanin C., Szczerbicki E. Designing Intelligent Factory: Conceptual Framework and Empirical Validation. ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Red Hook, USA: IEEE Computer Society. 2-17. Pp. 1801-1808.
27. Stroganov A., Zhadnov V., Polesskii S. Review of software complexes for reliability calculation of complicated technical systems // Components and technologies. № 5. 2007. Pp. 183-190.
28. Sukhanov V.O., Kukartsev V.V. Actuality of CALS-technologies application at the engineering enterprises of Russia // Actual problems of aviation and cosmonautics, volume 1, № 7. 2011. C. 466-467.
29. Udalov A.I. Thermal designing of radioelectronic devices. Moscow: MIREA. 2007. 211 p. (in Russian)
30. Yovanovich M.M. Four decade of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics // IEEE Trans. CPMT, 28. 2005. Pp. 182-206.

FEATURES OF THE USE OF COMPUTER MODELING TOOLS FOR IMPROVING THE MANUFACTURING PROCESSES OF LASER GYROSCOPES

Evgeny V. Kuznetsov, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh";
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia, bereg@niipolyus.ru

Dmitry N. Ermakov, Peoples' Friendship University of Russia;
JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia, dermakow@mail.ru

Oleg E. Samusenko, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia, samusenko@rudn.ru

Yuri D. Golyaev, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Tatyana I. Solovyeva, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh";
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Nikita E. Kuznetsov, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Abstract

The article discusses ways to improve the quality and economic efficiency of the development and production of complex innovative electronic devices, which include laser gyroscopes (LG). The problems that arise when ensuring reliable operation of the LG in a wide temperature range, associated with the dense layout of the device, are described. The theoretical principles and mathematical apparatus that are used in the construction of thermal models of triaxial LG with electronics are considered in detail. The developed algorithm for constructing a thermal model of the LG is presented, which provides for a step-by-step unbundling (zooming) procedure. The process of modeling LG using the ASONIKA system is described, the constructed thermal model of LG is presented, as well as the thermal field of one of the printed nodes of LG. The detected heat-loaded electronic components are indicated. The results of experimental verification of the simulation accuracy by means of real measurement of temperatures in the model nodes by thermal sensors are presented, which confirmed the reliability of thermal modeling using the ASONIKA system. It is emphasized that the cost of manufacturing and testing of LG is quite high. Therefore, the task of finding ways to reduce the cost at the stages of development and production of LG while ensuring the improvement of the quality and reliability of manufactured devices is extremely relevant. Accurate thermal modeling at the early stages of development is an effective way to solve this problem due to cost savings on testing and redesign, as well as due to the use of an inexpensive domestic computer modeling system ASONIKA.

Keywords: laser gyroscope, computer thermal modeling, electrothermal analogies method, step-by-step scaling (zooming) method, finite difference method, grid method, graph method.

References

1. V.V. Abaturon, I.I. Savelyev, C.A. Skopin (2019). Thermal model of Zeeman ring laser, *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019)*, Prague, Czech Republic.
2. C. Aldham (2017). Five Common Misconceptions about Thermal Design. <https://thermalconference.com>.
3. A. Belov, T. Soloveva (2016). Intellectual Ring Laser Quality Control System – Key Component of Ring Lasers Science-Based Production. *20th International Conference KES-2016 on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems* (York, England, September 4-7 2016). *Procedia Computer Science*: Vol. 96. Amsterdam: Elsevier B.V., pp. 456-464.
4. A. Belov, A. Vnukov, T. Soloveva (2017). Complex education program "Project Seminar" to meet today and tomorrow needs of fast developing optical-electronic industry. *ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology*. Red Hook, USA: IEEE Computer Society, pp. 1-7.
5. B. Cook (2017). Slashing PCB Design Cycle Time Using Real-time PCB Thermal Analysis Tools. <https://thermalconference.com>.
6. H.C. Cheng, C.Y. Yu, W.H. Chen (2005). An Effective Thermal-mechanical Modeling Methodology for Large-scale Area Array Typed Packages. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1-17.
7. M.V. Chirkin, V.V. Klimakov, A.I. Ulitenko, A.V. Molchanov (2011). Passive controlling of a temperature field inside strapdown inertial navigation system. *Proceedings of 18th S-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, S-Pb, Russia, 30 May-1 June, 2011. pp. 122-124.
8. P.I. Kandalov, A.G. Madera (2010). Mathematical and computing modeling of temperature fields in electronic modules. *Proc 16th Intern. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*. IEEE. Barcelona, Spain, October 6-8, 2010.
9. Yu.N. Kofanov (1991). Theoretical basement of designing, technology and reliability of radioelectronic devices. Moscow: Radio i svyaz. 360 p. (in Russian)
10. Yu.N. Kofanov (2012). Automated system ASONIKA in designing of radioelectronic devices. Moscow: MIEM NRU HSE. 58 p. (in Russian)
11. Y.N. Kofanov, S.Y. Sotnikova, D. Lemanskiy (2014). Method of computer modelling accuracy increase for electronic means based on interconnection of different physical processes proceeding, in: *Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference*. / Ed. by S. U. Uvaysov. Part 2. Moscow: HSE, pp. 616-620.
12. Y.N. Kofanov, Y.A. Vinokurov, S.Y. Sotnikova (2019). Optoelectronic Devices' Thermal Working Modes Providing Method. *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019)*, Prague, Czech Republic.
13. E. Kuznetsov, Y. Kolbas, Y. Kofanov, N. Kuznetsov, T. Soloveva (2019). Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation. *ICCES'2019 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences* (Tokyo, Japan, 24-28 March, 2019). Conference Abstract. Co-sponsored by Tech Science Press. ID:5268.
14. E. Kuznetsov, Y. Kolbas, Y. Kofanov, N. Kuznetsov, T. Soloveva (2020). Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation. In: Okada H., Atluri S. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering. ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science*, vol 75. Springer, Cham. P. 295-300.

15. Li Geng, Zhang Pengfei, Wei Guo, Xie Yuanping, Yu Xudong, Long Xingwu (2015). Multiple-Point Temperature Gradient Algorithm for Ring Laser Gyroscope Bias Compensation. *Sensors* (Basel). 2015 Dec; 15 (12): 29910-29922.
16. J. Li, Y. Ma, Ch. Xiyuan (2013). Error Modeling, Calibration, and Nonlinear Interpolation Compensation Method of Ring Laser Gyroscope Inertial Navigation System. *Abstract and Applied Analysis*. Vol. 2013, Hindawi Publishing Corp., Article ID 359675. P.1-7.
17. D.S. Liu, Y.W. Chen (2020). Application of a new infinite element method for free vibration analysis of thin plate with complicated shapes. In: Okada H., Atluri S. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering. ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science*, vol 75. Springer, Cham. P. 295-300.
18. L. Man, E. Man (2011). Electro-thermal analogies for temperature calculation. *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. (Tratanska Lomnica, Slovakia, 11-15 May, 2011). IEEE. P. 358-362.
19. D. Lukyanov, Yu. Filatov, Yu. Golyaev, V. Kuryatov, T. Soloveva, et al. (2013). 50th Anniversary of the Laser Gyro. *20th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2013*, St. Petersburg. P. 36-49.
20. A.G. Madera (2015). The concept of mathematical and computer simulation of thermal processes in electronic systems. *Software&Systems*. No.4 (112). Pp. 79-86.
21. N. Miyazaki, T. Ikeda (2006). Application of Computational Mechanics to Reliability Studies of Electronic Packaging. *Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC X)*, Aug.21-23, 2006. Hainan, China. Tsinghua University Press&Springer.
22. S. Naveen, A. Siva Rama Krishna, D. Konayya, M.K. Gupta K. Rambabu (2013). Modeling and Analysis of Monolithic Tri-Axial Ring Laser Gyro. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, issue 9. Pp. 145-148.
23. H. Okada, C. Liu, T. Ninomiya, Y. Fukui, N. Kumazawa (2004). Analysis of particulate composite materials using an element overlay technique, *CMES: Computer Modeling in Engineering&Sciences*, vol.6. No. 4. Pp. 333-348.
24. B. Raja, V. Praveenkumar, M. Leelaprasad, P. Manigandan (2015). Thermal Simulations of an Electronic System using Ansys Icepak. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, vol.5, issue 11, (Part-1). Pp. 57-68.
25. A.S. Shalumov, Yu.N.Kofanov, S.U. Uvaysov, et al. (2013). Automated system ASONIKA for modeling of physical processes in radioelectronic devices with considering of outer influences. Moscow: Radiotekhnika. 424 p. (in Russian)
26. S.I. Shafic, G. Velez, C.Toro, C. Sanin, E. Szczerbicki (2017). Designing Intelligent Factory: Conceptual Framework and Empirical Validation. *ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology*. Red Hook, USA: IEEE Computer Society. Pp. 1801-1808.
27. A. Stroganov, V. Zhadnov, S. Polesskii (2007). Review of software complexes for reliability calculation of complicated technical systems. *Components and technologies*. No. 5. Pp. 183-190.
28. V.O. Sukhanov, V.V. Kukartsev (2011). Actuality of CALS-technologies application at the engineering enterprises of Russia. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. Vol. 1. No. 7. Pp. 466-467.
29. A.I. Udalov (2007). Thermal designing of radioelectronic devices. Moscow: MIREA. 211 p. (in Russian).
30. M.M. Yovanovich (2005). Four decade of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics. *IEEE Trans. CPMT*, 28. Pp. 182-206.

Information about authors:

Evgeny V. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh"; Head of the Center of NTI "Photonics" of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Dmitry N. Ermakov, Doctor of Political Sciences, Doctor of Economics, Candidate of Historical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Master of Technical Sciences, Professor of the Department of Innovation Management in Industries of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia; Chief Researcher of the Scientific and Technical Department of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Oleg E. Samusenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Department of Innovation Management in Industries of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Yuri D. Golyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of IPK-470 of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Tatyana I. Solovyeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading researcher of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh"; Associate Professor of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Nikita E. Kuznetsov, postgraduate student of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ФАКТОРОВ РИСКА СОВЕРШЕНИЯ НАРУШЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМАРТФОНОВ ВО ВРЕМЯ ВОЖДЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-44-50

Поспелов Павел Иванович,*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, pospelov@madi.ru***Таташев Александр Геннадьевич,***Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, a-tatashev@yandex.ru***Трофименко Юрий Василевич,** *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, ecology@madi.ru***Яшина Марина Викторовна,** *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, yash-marina@yandex.ru***Manuscript received** 23 November 2021;
Accepted 10 December 2021*Работа выполнена при поддержке
Российского Фонда Фундаментальных
Исследований (РФФИ), грант № 20-01-00222***Ключевые слова:** безопасность дорожного движения, факторы риска, корреляционная связь, факторный статистический анализ.

Одним из наиболее распространенных совершаемых водителями видов нарушений правил движения является использование смартфона во время вождения. В Германии была разработана методика проведения на автодорогах наблюдений, в результате которых получены данные о частоте совершения водителями не разрешенных правилами движения действий с учетом влияния таких факторов, как возраст и пол водителя, тип автодороги – магистраль, внутригородская или сельская дорога, время суток, день недели, сезон года. Результаты наблюдений за связанными с отвлекающими от вождения вторичными действиями, проводившихся в 2019 году, и анализ этих результатов изложены в итоговом отчете, в одном из двух томов которого рассматривается вопрос об использовании водителями смартфонов и факторах, влияющих на частоту нарушений этого вида. В настоящей работе предложен использующий методы математической статистики подход к оценке корреляционной связи между рассматриваемыми факторами и частотой использования смартфонов.

Информация об авторах:**Поспелов Павел Иванович,** Зав. кафедрой изысканий и проектирования дорог, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия**Таташев Александр Геннадьевич,** Профессор кафедры высшей математики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия**Трофименко Юрий Василевич,** Зав. кафедрой техносферной безопасности, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия**Яшина Марина Викторовна,** Зав. кафедрой высшей математики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия**Для цитирования:**

Поспелов П.И., Таташев А.Г., Трофименко Ю.В., Яшина М.В. Подход к исследованию факторов риска совершения нарушений, связанных с использованием смартфонов во время вождения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 44-50.

For citation:

Pospelov P.I., Tatashev A.G., Trofimenko Yu.V., Yashina M.V. (2021) Investigation of risk factors for violations related to the use of smartphones while driving. T-Comm, vol. 15, no. 12, pp. 44-50. (in Russian)

1. Введение

Последние исследования показывают, что действия водителя, отвлекающие от непрерывного слежения за текущими событиями при вождении, являются источниками рисков дорожно-транспортных происшествий и становятся все более серьезной проблемой для разработчиков транспортной политики. Большинство исследований и акцентов в этой области связаны с типами отвлекающих действий водителей, в основном из-за растущего использования мобильных телефонов и других инфокоммуникационных технологий.

Тем не менее, степень проблемы отвлечения внимания водителя, в том числе созданная мобильными телефонами, и ее вклад в рискованное поведение водителей и дорожно-транспортные происшествия не очень хорошо известны даже в странах с высоким уровнем безопасности дорожного движения. Известно, что при разговоре по телефону внимание водителя рассеивается. Во время разговора объём внимания недостаточно для контроля за ситуацией на дороге. Управление транспортным средством происходит одной рукой. Причина опасности разговоров по мобильному телефону за рулём состоит в том, что водитель не сможет быстро среагировать при возникновении аварийной ситуации. Очень часто после произошедшего ДТП со смертельным исходом в автомобиле обнаруживают мобильный телефон с пришедшим сообщением. Разговоры по телефону, написание СМС, пользование другими девайсами за рулем – это причины рассеянного вождения. Отвлекаясь, человек может не заметить опасность и спровоцировать опасную ситуацию.

Исследования показали, когда водитель отводит взгляд от дороги на экран мобильного телефона при скорости 60 км/ч он проезжает «вслепую» 65 метров. Соответственно, чем выше скорость, тем больше «слепые» участки. Экран мобильного телефона плохо влияет на зрение. После яркого экрана, требуется время на то, чтобы зрачок перестроился для восприятия объектов вдаль, особенно в темное время. Все это ведет к нарушению концентрации внимания и становится невозможным вовремя заметить аварийную ситуацию на дороге.

Применение беспроводной гарнитуры в машине формирует у человека ложное чувство уверенности. Разговор по телефону негативным образом влияет на продуктивность вождения и внимания, даже если обе руки у водителя свободны. Разговоры по мобильному телефону во время вождения машины увеличивают вероятность аварии в четыре раза. Неважно, используется беспроводная гарнитура или обычный телефон.

В Германии Федеральным исследовательским институтом дорожного движения выпущен итоговый отчет [1] за 2019 год о результатах исследований факторов, влияющих на частоту совершения водителями таких нарушений во время вождения, как использование смартфонов, питье или принятие пищи, курение, поиск вещи, перекладка вещей, чистка, переодевание. Один из двух томов этого отчета почти полностью посвящен исследованию вопроса о частоте использования смартфонов во время вождения и о факторах, влияющих на частоту таких нарушений. Как отмечается в [1], хотя использование во время вождения смартфонов запрещено в Германии правилами дорожного движения, этот запрет часто игнорируется.

Для оценки риска, вызываемого этими нарушениями, важна информация об использовании смартфона во время вождения. Непрерывное наблюдение за поведением водителей показывает, оказывают ли действие кампании по убеждению или усиливающий контроль и наказание, и если оказывают, то какое это действие. Предполагается постоянно проводить исследование по разработанной методике и выпускать ежегодные отчеты о результатах исследований. Статистические данные о частоте нарушений, связанных с использованием смартфонов, собираются в результате наблюдений, проводимых на автодорогах различных типов по специально разработанной методике. Были созданы и подготовлены команды наблюдателей.

Наблюдения проводились в восьми регионах с таким расчетом, что статистические данные могли бы рассматриваться как достаточно репрезентативные для того, чтобы представлять общую ситуацию на автодорогах Германии. Итоговый отчет за 2019 год составлен на основе восьми отчетов, в которых приводятся результаты наблюдений по регионам и анализ этих наблюдений. В то же время в [1] отмечается, что для более надежных выводов необходимо продолжение проведения систематических наблюдений и получение большего по объему и более надежного набора статистических данных. В связи с этим основной задачей исследований 2019 года можно считать выработку методики проведения наблюдений и их анализа их результатов.

Во время наблюдений на автодороге, продолжительность которых равнялась трем часам, две команды из трех человек (наблюдатель и два помощника) дублировали для большей надежности сбор статистических данных (так называемое двойное наблюдение) на двух организуемых поблизости друг от друга стационарных пунктах наблюдений. Подготовка персонала, проводящего наблюдения, осуществлялась в соответствии с выработанной методикой. В [1] приводятся данные о частоте использования смартфонов в целом и таких видов использования смартфонов, как разговоры, набор текста, использование смартфона со свободными руками, использование смартфона с хотя бы одной занятой рукой и т. д. Такие нарушения как принятие пищи/питье и курение рассматриваются как нарушения, сопутствующие использованию смартфона. В качестве факторов, влияющих на частоту использования, рассматриваются, прежде всего, принадлежность водителя одной из трех выделенных возрастных категорий (до 25 лет, от 25 до 65 лет, старше 65 лет), пол водителя, тип дороги. Исследование влияния времени поездки на частоту нарушений затруднено тем, что наблюдения из-за плохой видимости не проводятся в темное время суток и в зимний сезон.

Наблюдения проводятся в основном в будние дни, хотя в двух регионах наблюдения проводились и в выходные дни. Проведение исследований в выходные дни требует большей продолжительности из-за меньшей интенсивности дорожного движения и больших затрат. В другом томе отчета приводятся данные по большему числу нарушений, представляющих собой отвлекающие от вождения вторичные действия, в частности, выделяются такие виды этих действий, как общение с попутчиками, чтение текстов, пользование интернетом, прослушивание радио, переодевание, взгляды по сторонам и т.д. При этом выделяются четыре возрастные категории (до 25 лет, от 25 до 45 лет, от 45 лет до 65 лет, от 65

лет). На основе результатов исследований вырабатываются рекомендации по мерам, направленным на снижение риска совершения нарушений, связанных с использованием смартфонов, и других вторичных действий, совершаемых во время вождения.

Результаты исследований могут использоваться, например, при проведении занятий в школах вождения, при проведении бесед с молодыми водителями (результаты исследований подтверждают ожидаемый факт, заключающийся в том, что водители возрастной категории до 25 лет наиболее часто используют смартфоны во время вождения) и т. д. При проведении такого рода бесед подчеркивается опасность совершения нарушений, связанных с использованием смартфонов. Эта опасность доказана в ряде проводившихся ранее исследований.

В [2] – [4] исследуются вопросы влияния психофизиологического типа и состояния водителей на характер их поведения. Этот характер может быть учтен при задании параметров соответствующей математической модели трафика.

Вопросы организации дорожного движения и математического моделирования трафика рассматривались в [5] – [10].

В [11] предложена методика оценки психофизиологических характеристик водителя с использованием игровых технологий. Оценивается время реакции и правильность ответов на специальный набор вопросов в зависимости от психофизиологического состояния, в котором находится водитель по его собственной оценке.

Проблемы обеспечения безопасности дорожного движения и экологии рассматривались в [12] – [18].

В [13] рассматривается назначение элементов систем помощи водителю. Обосновывается возможность оценки влияния этих систем на надежность водителя. При этом обосновании использовался имитационный стенд с рабочим местом городского автобуса, которое сопряжено с компьютерной моделью транспортного средства. При этом хорошо воспроизводятся реальные условия на маршруте.

В [14] рассматриваются методы повышения дорожной и экологической безопасности автотранспортного комплекса. Эти методы предусматривают развитие методологии объектов и технологий. Предусматривается также оценка надежности водителей, развитие методов мониторинга.

В [15] рассматриваются меры, разрабатываемые с целью снижения числа дорожно-транспортных происшествий, которые происходят из-за нарушений водителями режима труда и отдыха. Приводятся рекомендации, направленные на снижение усталости водителя, выполняющего междугородные или международные перевозки.

В [16] предложено рассматривать проявление чрезвычайной ситуации природного характера как реализацию дискретной случайной величины. Каждой реализации этой случайной величины соответствует размер с ущерба, наносимого объектами автотранспортной инфраструктуры. Предлагаемый в [16] метод основан на вероятностных моделях, содержащих параметры риска возникновения чрезвычайной ситуации.

В настоящей работе предлагается основанный на методах математической статистики подход, который позволяет, используя такие данные, как приводимые в [1] результаты наблюдений за использованием смартфона во время вождения, оценить силу влияния на частоту использования смартфонов

в целом или определенных видов использования смартфонов факторов, связанных с характеристиками водителя, типа дороги или времени поездки.

В разделе 2 излагаются результаты наблюдений, приводимые в [1], и описывается методика проведения этих наблюдений и анализа их результатов.

В разделе 3 изложен предлагаемый в настоящей работе подход статистического исследования силы влияния факторов на частоту нарушений, связанных с использованием смартфонов.

В разделе 4 приводятся примеры использования, изложенного в разделе 3 подхода.

2. Методика и результаты исследования факторов, влияющих на частоту использования смартфонов [1]

Для каждого водителя, поведение которого наблюдалось, регистрировали следующие варианты поведения и сведения о водителях.

- Отвлечения, обусловленные использованием смартфона.
- Разговор по телефону с устройством, оставляющим руки свободным, или при помощи пассажира, держащего телефон перед водителем.
- Разговор по телефону, который водитель держит рукой у уха или у рта с движущимися губами.
- Использование смартфона для набора текста таким образом, что смартфон виден в руке водителя.
- Использование прибора, расположенного в центральной области, (центральная консоль, смартфон, навигационное устройство).
- Использование смартфона таким образом, что его не видно, причем смартфон располагается ниже или около центральной консоли.
- Принятие пищи/питье.
- Курение.
- Пол (мужской/женский).
- Возраст (молодой – до 25 лет; средний – до 65 лет; старший 65 лет и выше).
- Только водитель или хотя бы с одним пассажиром.

Такие действия, как еда/питье и курение рассматриваются как действия, сопутствующие использованию смартфона. Чтобы результаты наблюдения удовлетворяли устанавливаемым требованиям, принимаются различные меры. Особое внимание уделялось подбору персонала, учебно-методическому материалу и возможности прямого контроля за использованием применяемых в проведении наблюдений персональных компьютеров.

При обработке полученных в результате наблюдений данные в первую очередь сортируются по их локализации (застроенная городская территория, сельские дороги, магистрали). Определяются доли отвлекающих от вождения действий: общее число использований смартфонов для набора текста; набор текста с занятой рукой; предполагаемый набор текста; общее число разговоров по телефону; разговоры по телефону при расположении телефона возле уха; разговор по телефону с комплектом на голове/руки свободы; еда/питье; курение.

В первую очередь производятся оценки суммарного числа нарушений. Затем производятся оценки и их сравнение по

типам дорог, по регионам (наблюдения проводились в восьми регионах и в итоговом отчете взят материал соответственно из восьми отчетов), по времени суток, по дням недели. В [1] отмечается, что для того, чтобы полученные результаты могли быть отнесены к дорожному движению Германии в целом, должна иметься уверенность в том, что полученные статистические данные отражают общую ситуацию, т.е. являются достаточно репрезентативными. Затем полученные в результате наблюдений данные сортируются по времени суток, дню недели, возрасту водителя, полу водителя, наличию или отсутствию пассажира.

Всего при проведении наблюдений за вторичными действиями водителями, связанных, прежде всего, с использованием во время вождения смартфонов, были получены данные, относящиеся к 145000 водителям. Как отмечается в [1], объем полученных данных может показаться небольшим, но показана методология исследований. Поведение каждого водителя наблюдалось на очень коротком (не более 5 секунд) случайном отрезке времени.

Получены следующие основные результаты:

3% водителей автомобилей используют смартфоны в произвольный момент времени;

2% набирают текст на смартфонах, имея хотя бы одну руку не на руле и взгляд вне дороги;

1% водителей говорят по телефону, причем около половины держат телефон у уха.

Молодые люди, особенно те, которые ведут автомобиль без пассажиров, набирают текст на смартфонах значительно чаще. Это особенно относится к вождению внутри застроенных территорий. Разговор по телефону, расположенному у уха, или разговор с помощью устройства, оставляющего свободными руки, являются относительно частыми. Мужчины и женщины подвержены этому сходным образом, причем мужчины говорят по телефону чаще, когда ведут автомобиль в одиночку в дневное время и на магистралях. Так как молодые женщины и особенно мужчины используют оба вида мобильной телефонной связи (посылка сообщений и разговоры) существенно чаще, они составляют группу, по отношению к которой требуется применение соответствующих мер, например, данной теме должно уделяться большое внимание в системах по вождению, а также целесообразно установление особого статуса начинающих водителей.

Результаты также показывают положительное влияние присутствия пассажиров. Это влияние могло бы быть усилено проведением бесед с пассажирами. Пассажиры, с одной стороны, могли бы либо прямо указывать водителям на недопустимость использования смартфонов во время вождения и, с другой стороны, могли бы брать связанные со смартфоном действия на себя. В [1] отмечается, что в виду опасности набора во время вождения текста на смартфоне, показанной в большом количестве исследований, необходимо уделять данной теме особое внимание. В будущем введение новых мер следовало бы сопровождать соответствующими оценками, получаемыми в результате непрерывных наблюдений за совершением водителями отвлекающих от вождения действий. 2019 год был первым годом проведения наблюдений за частотой использования водителями смартфонов и такие исследования предполагается проводить постоянно. Отмечается, что такие нарушения, как поездки с незакрепленным ремнем, регистрируются намного чаще,

чем использование смартфона. Но смартфон используется в течение короткого времени, а ремень безопасности закреплен или не закреплен во время всей поездки, так же как свет горит во время всей поездки или не горит. Поэтому имеет место существенная трудность в оценке количества поездок, в которых используется смартфон.

Чтобы увеличить объема получаемых в единицу времени статистических данных, для проведения наблюдений целесообразно выбирать время интенсивного движения. Наблюдения проводились в восьми регионах во вторник, среду и четверг в течение 3-часовых отрезков времени 7:00 – 10:00 и 10:30 – 13:30 с чередованием 55-минутных наблюдений и 5-минутных перерывов. Плохая видимость в темное время суток также является серьезным препятствием. При этом выглядит целесообразным ограничиться летними месяцами. Возникает проблема, как поступать, при сильном дожде или ярком солнечном свете. Результаты наблюдений при сильном дожде, при интенсивном солнечном свете, темноте, очень высокой или очень низкой температуре не могут быть признаны действительными.

Введенные категории нарушений, связанных с использованием смартфонов, и с сопутствующим вторичным действиям – еда/питье, курение, наблюдаются очень отчетливо. Большой проблемой является оценка возраста, причем эта проблема может лишь частично решаться дополнительной подготовкой, так как люди одного и того же возраста могут выглядеть весьма неодинаково. Была отмечена, например, ситуация, когда один из двух дублировавших друг друга наблюдателей заметно чаще относил водителей к возрастной категории, чем другой. Однако оказывается, что грубая оценка того, к какой из трех выделенных возрастных категорий относится водитель, в целом осуществима.

Проводились также наблюдения в конце недели. Было выяснено наличие в конце недели изменений в частоте использования смартфонов. Если целью исследования картины совершения водителями вторичных действий в течение недели, то нужно проводить и наблюдения и в конце недели. Такие наблюдения требуют значительных расходов (более длительное время наблюдений, более высокая стоимость). Наблюдения в выходные дни проводились в двух регионах в течение 3-часовых отрезков времени 9:30 – 12:30 и 13:00 – 16:00 также с чередованием 55-минутных наблюдений и 5-минутных перерывов. В конечном счете, это не выглядит необходимым для достижения основной цели наблюдений – получения с приемлемой точностью оценки частоты использования смартфонов. В предстоящие годы предусматривается исследование изменения частоты использования смартфонов по годам.

С целью более подробного изучения влияния таких факторов, как день недели или регион, следовало бы предусмотреть проведение дополнительных исследований, в которых сравнивались бы различные дни недели, времена суток, тип дороги внутри региона.

Как отмечается в [1], методика проведения наблюдений за использованием смартфонов во время вождения была предложена в [19] и затем дорабатывалась [20].

В соответствии с этой методикой проводится так называемое двойное наблюдение. Создаются две команды, состоящие из трех человек. Каждая команда организует стационарный пункт наблюдения. Продолжительность наблю-

дения – три часа. Наблюдательные пункты располагаются недалеко друг от друга так, что команды могут видеть одни и те же проезжающие автомобили. Впоследствии полученные двумя командами результаты сравниваются, что позволяет оценить надежность результатов. Команда состоит из наблюдателя и двух помощников. В процессе наблюдений члены команды могут меняться ролями. Наблюдатель сосредоточен на наблюдении за водителями проезжающих автомобилей. Информацию о каждом проезжающем автомобиле наблюдатель передает помощникам, которые независимо друг от друга регистрируют данные, используя персональный компьютер. Если помощник заметил проезжающий автомобиль, а наблюдатель не сообщает ему данные, то помощник может задать наблюдателю вопрос.

3. Подход к вычислению количественных характеристик оценки влияния различных факторов на частоту использования смартфонов во время вождения

В [1], [19], [20] не приводится описание подходов, относящихся к математической статистике, позволяющих получить количественную оценку влияния на частоту нарушений, связанных с использованием смартфона, таких факторов, как возраст водителя, пол водителя, тип дороги, время суток, регион.

Опишем подход, позволяющий вычислять такую количественную оценку, в виде статистического показателя, называемого коэффициентом детерминации [21].

Будем рассматривать в качестве результитивного признака частоту использования смартфона (или частоту определенного вида использования смартфона). В качестве факторных признаков рассматриваем качественные признаки, выражающие условия, которым удовлетворяет характеристика водителя, типа дороги, времени поездки. Например, таким признаком является возрастная категория, к которой относится водитель. Так как выделяются три возрастные категории, признак, в терминологии математической статистики, имеет три уровня (рис. 1).

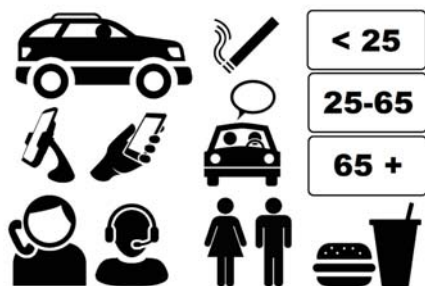


Рис. 1. Уровни наблюдаемых результативных и факторных признаков [1]

Предположим, что проведено n наблюдений (имеется выборка объема n). Число уровней результирующего признака равно m уровней. Пусть на j -м уровне проведено n_j наблюдений, $j = 1, \dots, m$. В результате наблюдений на j -м уровне получены следующие значения результирующего признака $x_{j1}, \dots, x_{jn_j}$, $j = 1, \dots, m$.

Групповая средняя определяется как:

$$\bar{x}_j = (1/n_j) \sum_{i=1}^m x_{jk}, j = 1, \dots, m,$$

а общая средняя как:

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} x_{jk}, j = 1, \dots, m.$$

Общая дисперсия:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2.$$

Факторная дисперсия:

$$\sigma_f^2 = \sum_{j=1}^m n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2.$$

Коэффициент детерминации η^2 определяется как отношение факторной дисперсии к общей. Если факторный признак полностью определяет величину результативного признака, то это означает, что величина результативного признака постоянна на фиксированном уровне. В этом случае значение результативного признака на одном и том же уровне всегда равно групповой средней для этого уровня и, следовательно, факторная дисперсия равна общей дисперсии, при этом коэффициент детерминации равен 1. Если факторный признак не оказывает никакого влияния на величину результативного признака, то теоретическое среднее значение результативного признака одинаково для всех уровней и отличие групповых средних от общей средней обусловлено только случайными отклонениями, а следовательно, только этими отклонениями может быть объяснено отличие коэффициента детерминации от нуля. В общем случае коэффициент детерминации принимает значения на отрезке $[0,1]$. Коэффициент детерминации можно понимать следующим образом: значение факторного признака на $\eta^2 \cdot 100$ процентов определяет значение результативного признака.

Квадратный корень из коэффициента детерминации называется эмпирическим корреляционным отношением, которое, таким образом, вычисляется по формуле:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma_f^2}{\sigma^2}}$$

4. Примеры вычисления количественных характеристик оценки влияния различных факторов на частоту использования смартфонов во время вождения

На основе приводимых в [1] данных о частоте использования смартфона (доля проезжающих автомобилей, для которых замечено использование смартфона водителем), полученных в результате наблюдений в Аахене и Брауншвейга, вычислены приводимые ниже значения групповых средних и коэффициента детерминации. Значение частоты использования смартфонов усредняется по результатам наблюдений двух наблюдателей.

Влияние типа дороги на частоту использования смартфона: дороги внутри застроенных территорий - групповая средняя $\bar{x}_1 = 0.0304$; сельские дороги - групповая средняя $\bar{x}_2 = 0.0182$; магистрали - групповая средняя $\bar{x}_1 = 0.0328$; коэффициент детерминации: $\eta^2 = 0.254$.

Влияние фактора региона на частоту использования смартфона: Аахен - групповая средняя $\bar{x}_1 = 0.0186$; Брауншвейг - групповая средняя $\bar{x}_2 = 0.0343$; коэффициент детерминации: $\eta^2 = 0.287$.

Влияние фактора времени суток на частоту использования смартфона: от 8 ч. 00 м. до 10 ч. 00 м. - групповая средняя $\bar{x}_1 = 0.0360$; от 10 ч. 00 м. до 14 ч. 00 м. - групповая средняя $\bar{x}_2 = 0.0163$; коэффициент детерминации: $\eta^2 = 0.663$.

Влияние фактора дня недели на частоту использования смартфона: вторник - групповая средняя $\bar{x}_1 = 0.0177$; среда - групповая средняя $\bar{x}_2 = 0.0222$; четверг - групповая средняя $\bar{x}_1 = 0.0377$; коэффициент детерминации: $\eta^2 = 0.583$.

Вычисления проводились на основе выборки, не являющейся репрезентативной. Большее значение групповой средней частоты использования смартфона для Брауншвейга может быть объяснено наличием в Брауншвейге наблюдателя, замечавшего значительно большее число нарушений, чем второй наблюдатель в Брауншвейге, при этом каждый из двух наблюдателей в Аахене замечали примерно столько нарушений, сколько наблюдатель, который замечал в Брауншвейге меньшее число нарушений, чем другой наблюдатель.

Заключение

В настоящей работе изложен подход, который позволяет использовать методы математической статистики при анализе результатов исследований таких, как описанные в [1] наблюдения, проводившиеся в Германии с целью оценки частоты совершения водителями нарушений, связанных с использованием смартфонов во время вождения. Статистическим показателем, вычисляемым в соответствии с предлагаемым нами подходом, является коэффициент детерминации, оценивающий тесноту связи факторного признака (например, возрастная категория, к которой относится водитель) и результативный признак (частота нарушения). Если значение коэффициента детерминации равно η^2 , то говорят, что значение факторного признака на $\eta^2 \cdot 100$ процентов определяет значение результативного признака.

Литература

1. Häufigkeit von Ablenkung bei Autofahren Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen // Mensch und Sicherheit, 2020, Heft M 297.
2. Яшина М.В., Таташев А.Г., Доткулова А.С. Функция состояния транспортного потока с учетом влияния человеческого фактора // Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Орел, 22-23 мая 2019 года. Изд-во: Орловский гос. ун-т им. И.С. Тургенева, 2019. С. 52-57.
3. Яшина М.В., Таташев А.Г., Доткулова А.С., Сусоев Н.П. Детерминированно-стохастическая модель трафика с вариацией психофизиологических свойств водителей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов, 2019, № 6. С. 74-79.
4. Yashina M.V., Tatashev A.G., Dotkulova A.S., Susoev N.P. Accounting psycho-physiological types of drivers in the deterministic-stochastic traffic model // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814008.
5. Pospelov P.I., Belova M.A., Kostsov A.V., A. G. Tatashev A.G., Yashina M.V. Technique of traffic flow evolution localization for calibration of deterministic-stochastic segregation model // 2019 Systems of

Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706766

6. Pospelov P., Kostsov A., Tatashev A., Yashina M. A mathematical model of traffic segregation on multilane road // Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 442-446. DOI:10.21533/pen.v7i1.384

7. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Susoev N.P. Optimization of regulation parameters for traffic scenario with dedicated public transport lane, 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261534.

8. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Duc Long., Susoev N.P. Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-change probabilities on multilane road before crossroad // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1-5.

9. Pospelov P.I., Le Duc Long, Tatashev A.G., Yashina M.V. Methodology of assessing the regulated crossing throughput with a dedicated lane for ground public transport based on a probabilistic model // 2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1159 012084.

10. Пospelov П.И., Ле Д.Л. Организация движения на нерегулируемом пересечении с выделенной полосой для наземного общественного транспорта // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 2021, №2(65). С. 88-95.

11. Dotkulova A.S., Yashina M.V., Trofimenko Y.V., Tatashev A.G. Attention driver evaluation in collective traffic behavior via gaming technology // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261531.

12. Трофименко Ю.В. Оценка вреда, наносимого окружающей среде автотранспортным комплексом региона// Вестник Московского автомобильно-дорожного технического института (государственного технического университета), 2009.Т. 17, №2. С. 97-103.

13. Трофименко Ю.В., Григорьева Т.Ю., Шашина Е.В. Транспортная система и надежность водителя // Автотранспортное предприятие, 2010, № 10. С. 16-19.

14. Трофименко Ю.В. Пути повышения экологической и дорожной безопасности автотранспортного комплекса России // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2010, т. 12, № 1 - 9, с. 2345-2349.

15. Трофименко Ю.В., Григорьева Т.Ю., Шашина Е.В. Меры по снижению усталости и стресса водителей при выполнении междугородных и международных перевозок // Автотранспортное предприятие, 2012, № 5.С. 9-11.

16. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Методика прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций природного характера на сети автомобильных дорог // Безопасность в техносфере, 2015, № 2 (март – апрель). С. 73-82.

17. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Риски природных катастроф на перспективной сети скоростных автомобильных дорог России. Наука и техника дорожной отрасли, 2017. Т. 79. №1. С. 38-43.

18. Trofimenko Yu., Komkov V., Trofimenko K. Forecast of energy consumption and greenhouse gas emissions // Transportation Research Procedia, 2020, vol. 50, pp. 698-707. DOI: 101016/ j.trpro.2020.10.082

19. Kathmann T., Scotti C., Huemer A.K., Mennecke M., Vollrath M. Konzept für eine Regelmäßige Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones bei Pkw-Fahrern, Schlussbericht zum FE 82.0670/2016 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, DTV-Verkehrconsult GmbH und Technische Universität Braunschweig, Aachen/Braunschweig, 2017.

20. Kathmann T., Johannes M., von Hermes T., Huemer A., Vollrath M. Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones durch Pkw-Fahrer 2019, Kompendium, DTV-Verkehrconsult GmbH und Technische Universität Braunschweig, Aachen/Braunschweig, 2019.

21. Елисеєва И.И., Юзбаєв М.М. Общая теория статистики. 5-е изд. М.: Финансы и статистика, 2006. 656 с.

INVESTIGATION OF RISK FACTORS FOR VIOLATIONS RELATED TO THE USE OF SMARTPHONES WHILE DRIVING

Pavel I. Pospelov, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, pospelov@madi.ru

Alexander G. Tatashev, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia,
a-tatashev@yandex.ru

Yuri V. Trofimenko, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, ecology@madi.ru

Marina V. Yashina, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia,
yash-marina@yandex.ru

Abstract

One of the most common traffic violations committed by drivers is using a smartphone while driving. In Germany, a methodology for conducting observations on roads was developed, as a result of which data was obtained on the frequency of actions by drivers not permitted by traffic rules, taking into account the influence of factors such as the age and gender of the driver, the type of road - a highway, an intracity or rural road, time of day, day weeks, season of the year. The 2019 survey and analysis of secondary distraction-related behaviors are summarized in a final report, one of two volumes of which addresses the issue of smartphone use by drivers and factors affecting the incidence of this type of violation. In this paper, we propose an approach using the methods of mathematical statistics to assess the correlation between the factors under consideration and the frequency of using smartphones.

Keywords: road safety, risk factors, correlation, factor statistical analysis.

References

1. Haufikeit von Anblenkung bei Autofahren Berichte der Bundesanstalt f?r Strassenwesen. Mensch und Sicherheit, 2020, Heft M 297.
2. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, A.S. Dotkulova (2019). Function of the state of the traffic flow taking into account the influence of the human factor. *Information technologies and innovations in transport. Materials of the 5th International Scientific and Practical Conference*. Oryol, May 22-23, 2019. Publishing house: Oryol State un-t them. I.S. Turgenev, 2019. P. 52-57.
3. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, A.S. Dotkulova, N.P. Susoev (2019). Deterministic-stochastic traffic model with a variation of the psychophysiological properties of drivers. *Systems of synchronization, signal generation and processing*, 2019, No. 6. P. 74-79.
4. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, A.S. Dotkulova, N.P. Susoev (2019). Accounting psycho-physiological types of drivers in the deterministic-stochastic traffic model. *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814008.
5. P.I. Pospelov, M.A. Belova, A.V. Kostsov, A.G. Tatashev, M.V. Yashina (2019). Technique of traffic flow evolution localization for calibration of deterministic-stochastic segregation model. *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706766
6. P. Pospelov, A. Kostsov, A. Tatashev, M. Yashina A (2019). mathematical model of traffic segregation on multilane road. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 442-446. DOI:10.21533/pen.v7i1.384
7. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, P.I. Pospelov, N.P. Susoev (2020). Optimization of regulation parameters for traffic scenario with dedicated public transport lane. *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261534.
8. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, P.I. Pospelov, Duc Long, N.P. Susoev (2021). Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-change probabilities on multilane road before crossroad. *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-5.
9. P.I. Pospelov, Le Duc Long, A.G. Tatashev, M.V. Yashina (2021). Methodology of assessing the regulated crossing throughput with a dedicated lane for ground public transport based on a probabilistic model. *2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1159 012084.
10. P.I. Pospelov, Le Duc Long (2021). Organization of traffic at an unregulated intersection with a dedicated lane for ground public transport. *Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI)*, 2021, No. 2 (65). P. 88-95.
11. A.S. Dotkulova, M.V. Yashina, Y.V. Trofimenko, A.G. Tatashev (2020). Attention driver evaluation in collective traffic behavior via gaming technology. *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261531.
12. Yu.V. Trofimenko (2009). Assessment of the harm caused to the environment by the regional motor transport complex. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Technical Institute (State Technical University)*, vol. 17, no. 2. P. 97-103.
13. Yu.V. Trofimenko, T.Yu. Grigorieva, E.V. Shashina (2010). Transport system and driver reliability. *Motor transport enterprise*. No. 10. P. 16-19.
14. Yu.V. Trofimenko (2010). Ways to improve the environmental and road safety of the motor transport complex in Russia. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 12, no. 1-9. P. 2345-2349.
15. Yu.V. Trofimenko, T.Yu. Grigorieva, E.V. Shashina (2012). Measures to reduce driver fatigue and stress when performing inter-city and international transport. *Avtotransportnoe predpriyatie*. No. 5. P. 9-11.
16. Yu.V. Trofimenko, A.N. Yakubovich (2015). Methodology for predicting the risks of natural emergencies on the road network. *Safety in Technosphere*. No. 2 (March - April). P. 73-82.
17. Yu.V. Trofimenko, A.N. Yakubovich (2017). Risks of natural disasters on a promising network of high-speed highways in Russia. *Science and technology of the road industry*. Vol. 79. No. 1. P. 38-43.
18. Yu. Trofimenko, V. Komkov, K. Trofimenko (2020). Forecast of energy consumption and greenhouse gase emissions. *Transportation Research Procedia*. Vol. 50, pp. 698-707. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.082
19. T. Kathmann, C. Scotti, A.K. Huemer, M. Mennecke, M. Vollrath (2017). Konzept fur eine Regelmssige Erhebung der Nutzungshafigkeit von Smartphones bei Pkw-Fahrern, Schlussbericht zum FE 82.0670/2016 im Auftrag der Bundesanstalt fur Strassenwesen, DTV-Verkehrconsult GmbH und Technische Universitat Braunschweig, Aachen/Braunschweig.
20. T. Kathmann, M. Johannes, T. von Hermes, A. Huemer, M. Vollrath (2019). Erhebung der Nutzungsh?figkeit von Smartphones durch Pkw-Fahrer, Kompendium, DTV-Verkehrconsult GmbH und Technische Universitat Braunschweig, Aachen/Braunschweig.
21. I.I. Eliseeva, M.M. Yuzbashev (2006). General theory of statistics. 5th ed. Moscow: Finance and Statistics. 656 p.

Information about authors:

Pavel I. Pospelov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Alexander G. Tatashev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Yuri V. Trofimenko, Moscow Automobile and Road Consstruction State Technical University, Moscow, Russia

Marina V. Yashina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

ГЛАВНОЕ

СОБЫТИЕ ОТРАСЛИ
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

24й НАЦИОНАЛЬНЫЙ ФОРУМ
ИНФОРМАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ

ИНФО ФОРУМ 2022



Здание Правительства Москвы
ул. Новый Арбат, 36

3-4
февраля

РОССИЯ В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ:
ПРЕОДОЛЕНИЕ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

infoforum.ru

PRACTICAL RESULTS AND PROSPECTS OF USING FIBER OPTICAL SENSORS OF ACOUSTIC EMISSION FOR DIAGNOSTING THE TECHNICAL CONDITION OF AIRCRAFT UNITS

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-52-61

Dmitry S. Koptev,
Southwest State University, Kursk, Russia,
d.s.koptev@mail.ru

Manuscript received 17 November 2021;
Accepted 15 December 2021

Ivan E. Mukhin,
Southwest State University, Kursk, Russia,
makskato121@yandex.ru

Keywords: acoustic emission, fiber-optic acoustic emission sensor (FOAES), Doppler effect, fiber-optic Bragg gratings (FOBG), inclined Bragg grating (IBG), partially inclined Bragg cell (PIBC)

Peripheral sensors for measuring aircraft parameters are an integral part of any system for diagnostics and forecasting of technical condition. Their principle of operation in relation to operation at aviation complexes is to convert mechanical, electromagnetic or light quantities into electrical ones for their subsequent processing. The process of radiation of disturbances propagating in the material caused by the dynamic local rearrangement of the structure of materials under the action of internal stresses leading to a change in the crystal lattice or the movement of micro- and / or macrodefects is called acoustic emission. So, the analysis of differences in the form of acoustic waves allows the classification of the type of deformation: crack or plastic deformation, which allows you to more accurately determine the current state of the airframe or diagnosed nodes. The principle of operation of such sensors is based on the effect of converting the linear dimensions of a Bragg cell, made on an optical fiber, into a change in the reflected wavelength. A necessary condition for obtaining correct results of measurements of stress states is the need for temperature compensation of the Bragg cells, which is achieved by introducing additional cells that are mechanically decoupled from the material being diagnosed and react only to the temperature component. The advantage of this method is the absence of the need for additional adjustment of the cells and their alignment, as well as the independence of measurements from the effects of electromagnetic radiation; the sensors are lightweight, vibration-resistant, and insensitive to electromagnetic fields. The article presents the practical results of using fiber-optic acoustic emission sensors for diagnosing the technical condition of critical components and assemblies of aircraft, as well as outlines the prospects for their deepest integration into a unified information and analytical system for diagnosing and predicting the technical state of aviation complexes. The developed technical solutions aimed at simplifying the methods of processing broadband acoustic emission signals, which make it possible to design acoustic emission sensors based on optical fiber, are structurally simpler and cheaper, with an increased signal-to-noise ratio, due to one conversion of an acoustic-optical signal into an electrical one.

Information about authors:

Dmitry S. Koptev, Senior Lecturer, Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russia

Ivan E. Mukhin, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russia

Для цитирования:

Коптев Д.С., Мухин И.Е. Практические результаты и перспективы использования волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии для диагностики технического состояния агрегатов летательных аппаратов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 52-61.

For citation:

Koptev D.S., Mukhin I.E. (2021) Practical results and prospects of using fiber optical sensors of acoustic emission for diagnosing the technical condition of aircraft units. *T-Comm*, vol. 15, no.12, pp. 52-61. (in Russian)

Introduction

In addition to strain gauges widely used in static tests, which have a relatively low reliability, currently intensive research is being carried out in the field of acoustic emission (AE) sensors based on optical fiber. For the successful implementation of the AE method in the control and diagnostics of products made of polymer composite materials (PCM), noise-immune devices and converters, software and methodological support and the creation of certain conditions for testing are required, due to the fact that AE in composite materials strongly depends on the radiation of the matrix, reinforcing filler, the relationship of the matrix and filler.

Materials and research methods

To select the type of AE sensor and build an optimal circuit of the measuring device, it is necessary to determine the minimum and maximum number of arising AE pulses, their energy and frequency range.

The level of interference signals affecting the AE sensor is significantly affected by the directivity characteristic of the AE sensor. From this, the following conclusions can be drawn [1]:

1) when using the AE method for detecting and recording the moment of nucleation (starting) or studying the kinetics of the development of cracks (defects), directional AE sensors are effective;

2) when using the AE method to study the destruction process in the entire volume of a structural material or product, non-directional AE sensors are most effective.

Taking into account the wide spectrum of AE signals (from 30 to 3000 kHz) and small amplitudes of sensor displacements from the AE signals (from 10^{-7} to 10^{-4} m), broadband and highly sensitive AE transducers are required. An important condition for the application of the AE method is the minimum level of the intrinsic noise of the transducer. The intrinsic noise of the AE piezoelectric transducers consists of breakdown noise, Barkhausen noise, mainly of cyclic polarization reversal noise. Also, an important condition is to minimize the influence of electrical and electromagnetic interference, so an increased noise immunity of the AE measuring transducers is required.

To minimize distortions of the AE signals, the natural resonance frequency of the AE sensor should be higher than the maximum transmission frequency of the receiving amplifying channel. The method of application of the AE method depends on the type of the AE transducer and the type of material or product being inspected.

It should be noted that the current regulatory documents are not aimed at controlling a specific type of product, which often hinders the use of the objectively unique capabilities of the AE control method.

A fiber-optic acoustic emission sensor (FOAES) is very suitable as an AE sensor, in particular based on the intra-fiber Doppler effect and fiber Bragg gratings (FOBG), the former belong to the category of non-directional AE sensors, and the latter are directional.

Diffraction fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings (FOBG) are based on the effect in which the wavelength of the reflected light peak is proportional to the measurement of the Bragg lattice pitch, which is determined by deformation and temperature. The amount of deformation of composite materials

is determined by the magnitude of the shift of the wavelength of the signal peak.

The shift of the peak of the FOBG wavelength λ_w occurs linearly (within the range of Hooke's law for quartz glass) and is directly proportional to the deformation [2]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_\alpha) \cdot \Delta\varepsilon, \quad (1)$$

where $\Delta\varepsilon$ – deformation, $\text{mk} \cdot 10^{-6}$;

ρ_α – the coefficient of photoelasticity (0.21 for SiO_2).

At $\lambda_w = 1.31 \mu\text{m}$ and a temperature of 20°C , the FOBG sensitivity is $1 \text{ pm} \cdot 10^{-6}$.

The strict dependence of the shift of the peak wavelength λ_w on deformation and temperature has the following form:

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left\{ \left[1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) \left[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12}) \right] \right] \varepsilon + \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn}{dT} \right)}{n} \right] \Delta T \right\}, \quad (2)$$

where P_{ij} – Pockels coefficients of the photoelastic tensor;

ν – number Poisson;

α – the coefficient of linear thermal expansion;

ΔT – temperature change;

n – the refractive index;

Λ – the step of the Bragg lattice.

Sensors based on FOBG are convenient in that their signal has a high signal-to-noise ratio, high sensitivity to deformations, they allow interrogating one fiber and multiplexing many fiber-optic sensors (up to 10 thousand pieces), and can have three-axis deformation sensitivity. For example, FOBG with multi-axis sensitivity is used to detect damage in composite pressure vessels.

Unlike FOBG, Doppler FOAES is non-directional. The use of several Doppler FOAESs, as shown in Figure 1, allows, by temporal processing, to combine the responses to the ultrasonic AE signal and form the radiation pattern of the Doppler FOAES system, as shown in Figure 2.

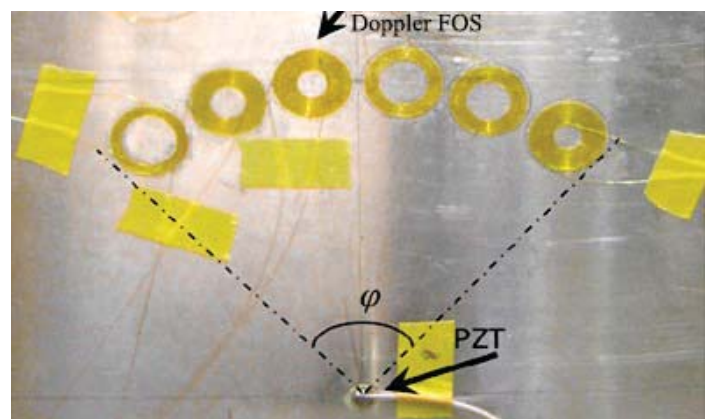


Figure 1. Array of Doppler FOAES on an aluminum plate

This figure shows a battery of optical fiber ring sensors. Each of them allows you to measure the acoustic wave caused by inhomogeneity or defect in the controlled sample (product). Using the results of several measurements will allow you to localize the location of the defect.

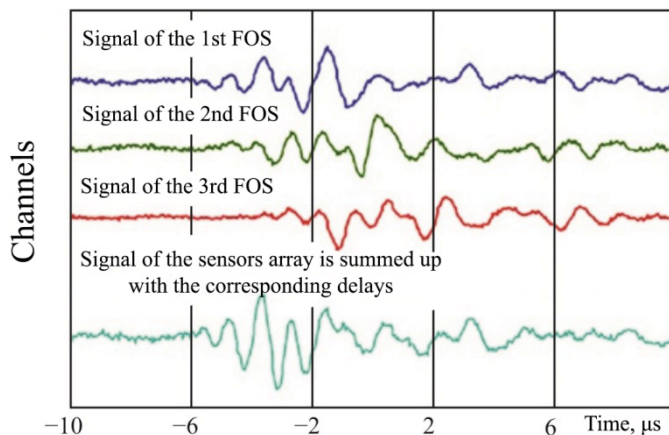


Figure 2. Combination (phasing) of FOAES signals during processing

In addition to accurately locating the defect, the use of signals from multiple fiber optic sensors can significantly increase the detection sensitivity of acoustic emission signals, as shown in the lower curve in Figure 2.

Monitoring of aircraft structures made of PCM is most effective using FOAES due to the natural properties of Doppler FOAES - compactness, noise immunity, broadband (without resonances from 10 kHz to 10 MHz) and high sensitivity with a dynamic range of up to 160 dB, a wide temperature range up to 500°C, high reproducibility parameters and their complete independence from the influence of temperature: temperature change does not affect the optical frequency of the intra-fiber signal.

The directional diagram of the FOAES based on the FOBG is determined by the ratio of the length of the Bragg grating and the length of the acoustic wave. If the FOBG length is much less than the acoustic wavelength, then the FOAES is practically omnidirectional, but if the FOBG length (in our case, from 5 to 25 mm) is greater than the acoustic wave, then directional properties appear. For FOBG, this is associated with the formation of an additional acoustic wave inside the quartz-fiber, which has a higher propagation velocity (about 3600 m/s) compared to the speed of the acoustic wave in the PCM. This leads to the addition of their effect at angles of about ± 30 degrees relative to the normal and the formation of a corresponding directional pattern (Fig. 3).

Using FOBG of different lengths and soundproof metallized coatings of the optical fiber, it is possible to create the required diagram of such FOAES.

As a result of the study of the materials considered, it follows that the most promising fiber-optic acoustic emission sensors (FOAES) are FOAES of the frequency type, based on the effect:

- modulation of the optical frequency of the reflection signal from the Bragg diffraction grating;
- modulation of the fiber laser radiation frequency;
- Intraluminal Doppler shift of the optical frequency under the action of acoustic waves.

Unlike a fiber Bragg grating, a Doppler fiber-optic acoustic emission sensor is non-directional. This property can be used to form the required radiation pattern when using several such sensors located at some distance from each other. Monitoring of aircraft structures with such sensors will make it possible to detect the beginning of the manifestation of irreversible deformations over a vast area that significantly exceeds the location of such sensors.

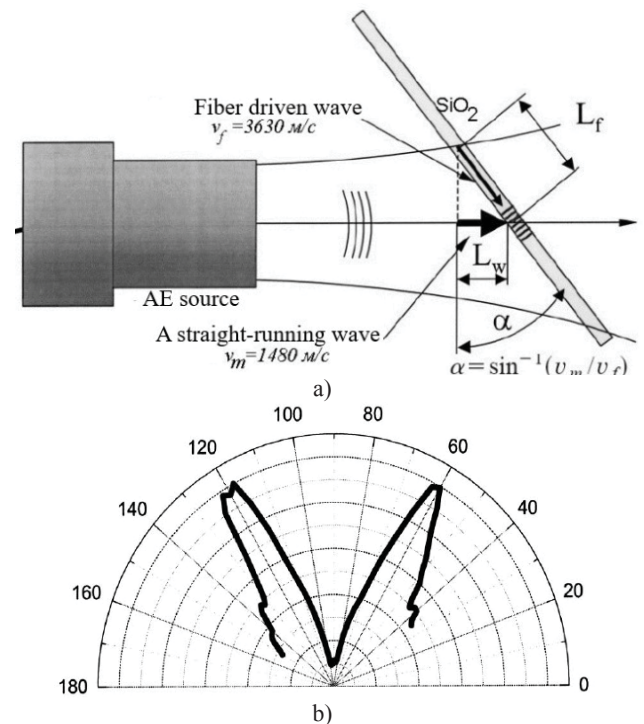


Figure 3. Directional diagrams of FOAES based on FOBG: a – geometry of angular interaction of FOBG with an acoustic wave; b – directional diagram of FOAES with angular geometry

The principle of operation of FOAES is based on the recently discovered intra-fiber Doppler effect [3], which consists in the fact that the frequency of the light wave f_0 radiation of a laser diode, passed through a bent optical fiber of length L , is shifted under the action of acoustic pressure. A fiber moves or vibrates at a speed dL/dt in an annular fiber Doppler element (Fig. 4) by the value f_d :

$$f_D = -\frac{n}{\lambda_0} \frac{dL}{dt}, \quad (3)$$

where n – the refractive index of the optical fiber; λ_0 – the wavelength of light in the fiber.

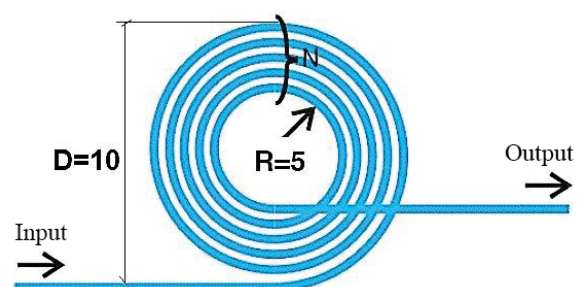


Figure 4. Configuration of the ring Doppler element

When the fiber is rolled into a ring and glued to the surface under study, the effect of detecting acoustic emission signals occurs. This effect is based on minor vibrations of the optical fiber ring from an acoustic wave, the appearance of the Doppler effect, and a change in the wavelength passing through the optical fiber ring of laser radiation, and this, in turn, is a sign of a defect in the material under study.

The Doppler shift of the optical frequency (Hz) in the annular element caused by deformations (movements) ε_x and ε_y is defined as

$$f_D = -\frac{N\pi R_a n_e}{\lambda_0}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) = -\frac{N\pi D_a n_e}{\lambda_0}(\varepsilon_x + \varepsilon_y), \quad (4)$$

where R_a – average radius of the fiber ring, mm; N – the number of fiber turns; n_e – equivalent refractive index.

Ring FOAES has no directional sensitivity. Nevertheless, if it is necessary to give it an appropriate directional pattern (for detecting and registering the moment of initiation or studying the kinetics of the development of cracks, defects), it can be U-shaped or elliptical, as shown in Figure 5.

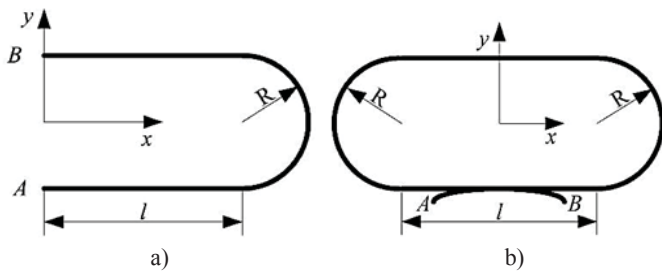


Figure 5. Doppler fiber sensor configurations: a – U-shaped; b – oblong elliptical

For such configurations, the Doppler frequency is determined by Equation 5

$$f_D = -\frac{N n_e}{\lambda_0}. \quad (5)$$

Figure 6 shows the functional diagram of the experimental FOAES.

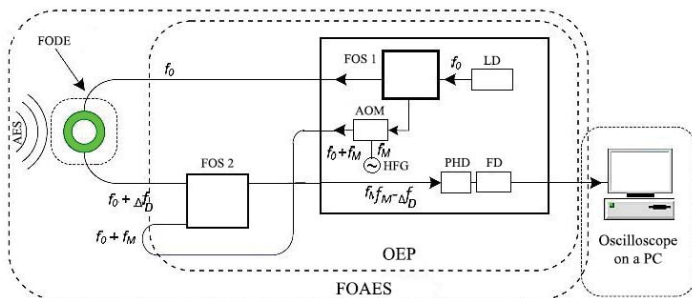


Figure 6. Functional diagram of the experimental FOAES: FODE – fiber-optic Doppler element; AOM – acousto-optic modulator; FOS – fiber optic splitter; LD – laser diode; HFG – high frequency generator; PHD – photodetector; FD – frequency detector; AES – acoustic emission signal

The Doppler shift frequency f_D (for example, 0.1 Hz ... 1 MHz) is extracted from the optical signal using acousto-optical heterodyning, shifting f_0 by a constant modulation value f_M (for example, 80 MHz), the formation of beats with a frequency $f_D + f_M$, optoelectronic conversion in a photodetector device and converting the frequency deviation f_D into the output signal U_{out} in the frequency detector.

Adhesive fastening of acoustic emission FOS on the surface of the AC is simple and technologically advanced. With this method of installing FOAES, it is necessary to manufacture a sensor optical cable (SOC) with a Young's modulus of the coating of at least 3 GPa and use an adhesive with an elastic modulus of at least 20 GPa after ultraviolet (UV) curing.

Experimental assessment of the technical characteristics of Doppler FOAES was carried out on test plates: aluminum and composite, as shown in Figures 7 and 8 [4].

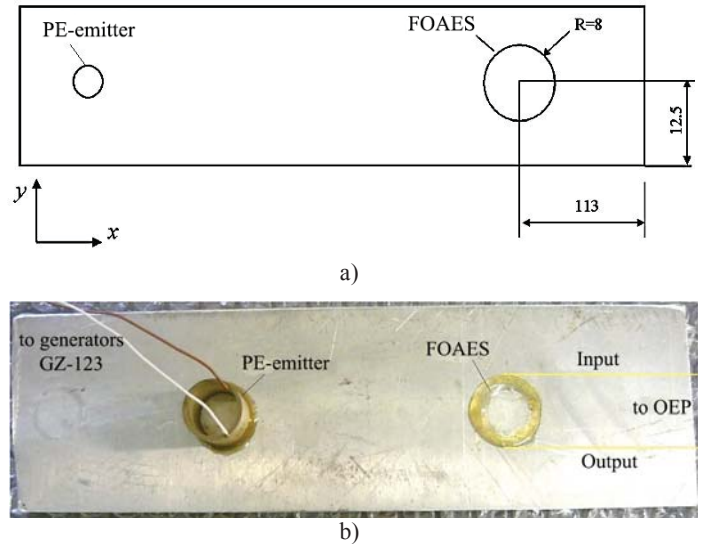


Figure 7. Test aluminum plate for FOAES: a – a diagram for studying the spectra of ultrasonic Lamb waves; b – a real setup for studying the spectra of ultrasonic Lamb waves



Figure 8. Test composite plate for FOAES

As equipment providing experiments with FOAES according to the scheme of Figure 7, we used: standard generators of the GZ-123 type for exciting piezoelectric emitters from 33 to 170 kHz, a G4-143 high-frequency generator for controlling an acousto-optic signal modulator with a frequency of 80 MHz, broadband amplifiers with an amplification band of up to 500 kHz and frequency detectors for the beat frequency range from 78 to 82 MHz, digital oscilloscopes of the DSO-250 type with built-in software that allows spectral analysis of AE signals using fast Fourier transform. This standard equipment was used to receive AE signals using FOAES Doppler sensors, process them, and display them on a computer screen.

To date, new technical solutions have been developed aimed at simplifying the methods of processing broadband acoustic emission signals, which make it possible to perform FOAES structurally easier and cheaper, with an increased signal-to-noise ratio, due to one conversion of an acoustic-optical signal into an electrical one.

With the help of laser shaping, an optical fiber is micronized, the microscopic image of which is shown in Figure 9.



Figure 9. Microscopic view of optical fiber microcontraction

An acousto-optic frequency shift, a key acousto-optic element, is implemented on the intra-fiber interaction of leaky optical modes: between the mode of the fundamental radiation of a laser diode with a frequency f_0 and a mode modulated with a frequency f_m , using a cone piezoelectric transducer 1 in a microconversion of an optical fiber, as shown in Figure 10.

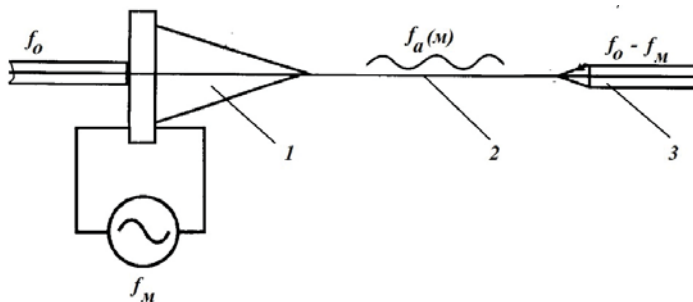


Figure 10. Functional diagram of an acousto-optic generator based on optical fiber micro-narrowing

The interaction of optical modes occurs in the section of the optical fiber 2, with a transverse size of about 10 microns. The frequency of optical radiation in the output fiber 3 ($f_0 - f_m$) is shifted by the modulation frequency f_m (for example, by 40 MHz).

The obvious advantages of such an acousto-optic frequency shift (heterodyne): compactness, the absence of adjustable optical collimators for input-output radiation, and an increased signal-to-noise ratio.

Results and their discussion

A study of the AE signals in the time domain, received by the FOAES and the piezoelectric sensor, was carried out. Sample results are shown in Figures 11 and 12.

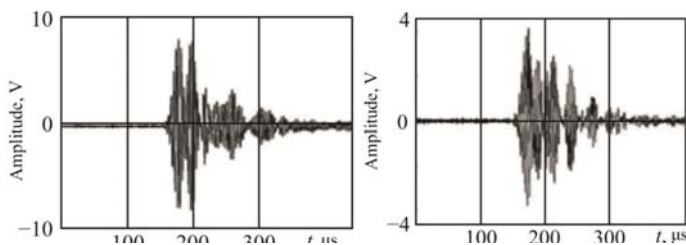


Figure 11. AE signals received by the piezoelectric sensor

Figure 11 shows the signals received by the receiver of acoustic emission signals at various levels of deformation of the internal structure of the material under study, the level of deformation is the smallest in the right figure.

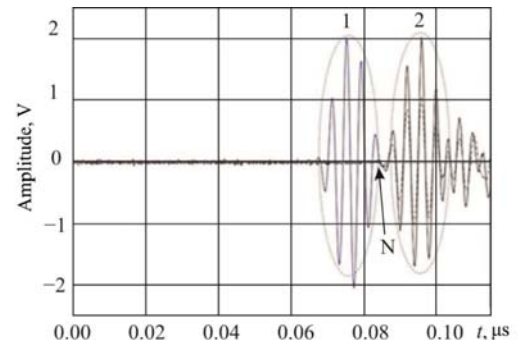


Figure 12. Observation of the FOAES responses to the excited AE signal

As shown in the results of [5], noisy AE signals (Fig. 12) were processed using various methods of digital median filtering, which is reflected in Figure 13.

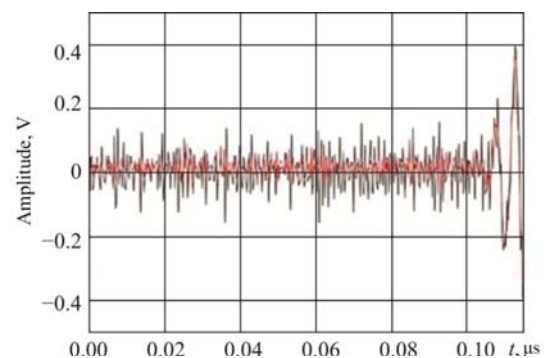


Figure 13. Processing of a noisy AE signal from FOAES

Typical time response and Fourier spectrum of Doppler FOAES acoustic emission from internal delamination of a tubular composite structure is shown in Figure 14.

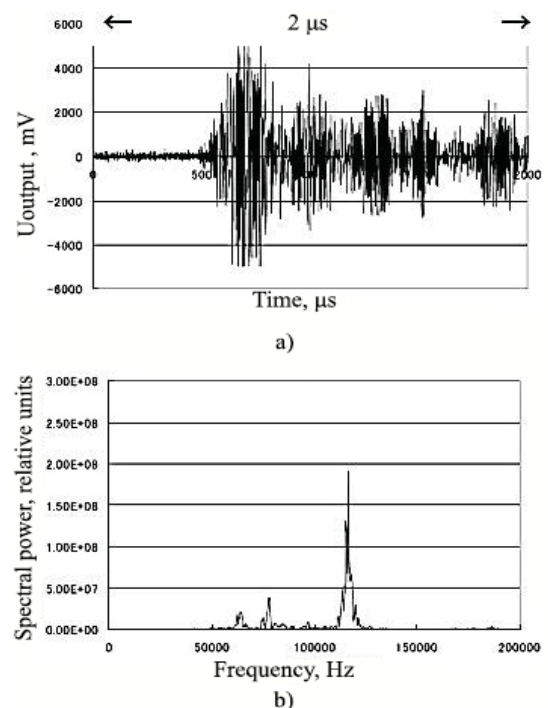


Figure 14. Time (a) and spectral (b) responses of the Doppler FOAES

The results of measuring the amplitude-frequency characteristics of the fiber and piezoelectric AE sensors are shown in Figure 15.

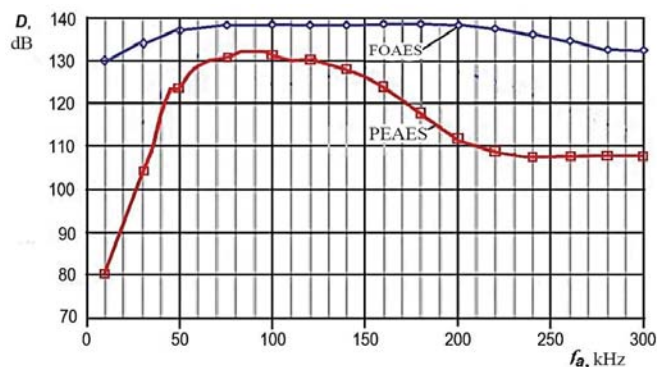


Figure 15. Amplitude-frequency characteristics of the Doppler (FOAE) and piezoelectric (PEAE) sensors

The measurements of the radiation patterns of the annular U-shaped and elliptical FOAES gave the results shown in Figure 16.

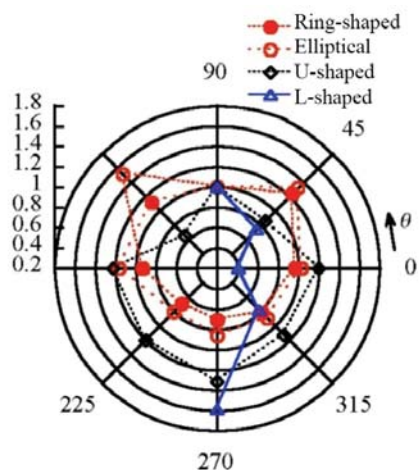


Figure 16. Directional diagrams of FOAES of various shapes

It is obvious that the annular FOAES has a practically non-directional spatial characteristic, and the other two easily manufactured forms have pronounced directional properties. The direction of 90° is taken as a unit in Figure 3.97.

The measurement results showed that:

1) a fiber-optic AE sensor based on the intra-light Doppler effect, fixed on the plate, recorded elastic vibrations in the plate wall, excited by piezoceramic transducers at frequencies f from 10 kHz to 300 kHz;

2) a decrease in the excitation level showed that the FOS sensitivity threshold (a distinguishable response to oscillations of the pipe wall $\varepsilon = 10^{-5} \text{ mln}^{-1}$) is at the level of $15 \mu\text{V}$;

3) the technical solutions incorporated in the investigated FOAES provide a positive dynamics of the transformation of the sensor nodes if it is necessary to increase the sensitivity to ultrasonic vibrations by increasing the length of the annular Doppler element from 10 to 50 m, which will increase the sensitivity by 5 times.

Currently, large-scale studies of the physical characteristics of Bragg gratings are underway, which make it possible to sig-

nificantly expand their application areas [6]. The spectral characteristics of fiber-optic Bragg gratings are resonant, but the wavelength-to-amplitude conversion function for their estimation in the resonance region either oscillates or has a rather flat or non-linear character. Therefore, to increase the measurement resolution, a FOBG with spectrum inhomogeneities or a FOBG with a special shape of the spectrum is synthesized to ensure linearization of the measurement characteristics. At present, FOBG with concave, triangular symmetric and asymmetric spectrum shapes are being actively developed in the structure of fiber-optic sensors.

The propagation of light in an optical fiber with a short-period and long-period Bragg cell is shown in Figure 17.

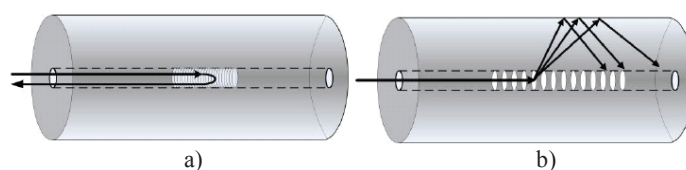


Figure 17. Propagation of light in an optical fiber:
a – with a low-period Bragg cell; b – with a long-period Bragg cell

For inclined Bragg grating (IBG), the light coupling mechanism can also be described using the ray tracing method as shown in Figure 18.

As can be seen from Figure 18, a, when the gratings are inclined at an angle less than 45° , the grating is able to connect the forward propagating mode of the core in the reverse propagating mode of the shell. At 45° , as in the unique case, the core mode will be coupled in the emission mode along the normal to the fiber axis (see Figure 18, b). At an angle tilt of more than 45° , both the ING and the partially inclined Bragg cell (PIBC) are able to connect the forward propagating mode of the nucleus into the progressively propagating mode of the shell, but of a higher order (see Fig. 18, c).

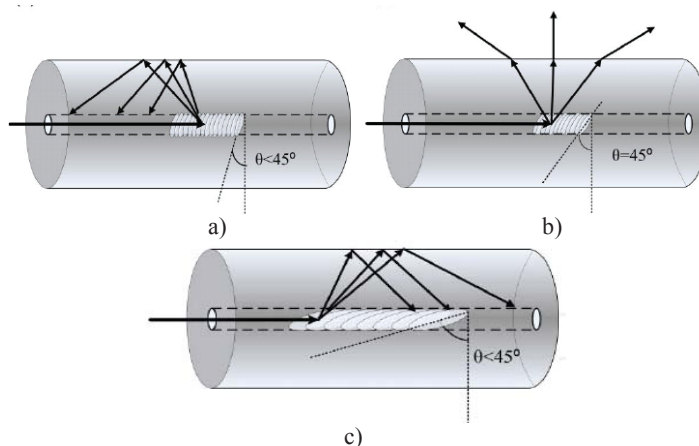


Figure 18. Explanation of the method of ray tracing in optical fiber:
a – the angle of inclination is less than 45° ; b – the angle of inclination is 45° ;
c – the angle of inclination is more than 45°

The phase matching condition of the IBG can be depicted in the vector plane, which is shown in Figure 19, where θ indicates the angle of inclination of the grating with respect to the fiber axis.

From Figure 3.100, a we can conclude that at this position of the angle, the slope is reduced to zero and the phase matching develops under standard FOBG conditions, from which the forward propagating mode was connected in an identical mode of the backward propagating mode through Bragg diffraction gratings. Figure 19,b shows a special case of 45° – IBG, which are able to connect from indicators perpendicular to the fiber axis or the direction of propagation of the incident beam. At the same time, Figure 19,c shows the mechanism of the incident light beam in the mode of excessively forward propagation, which is called the structure of the grating. Although the phase matching condition provides a very good approximation for interpreting the mode coupling mechanism within the IBG, this does not entail the polarization effect, which is actually one of the key properties of the IBG.

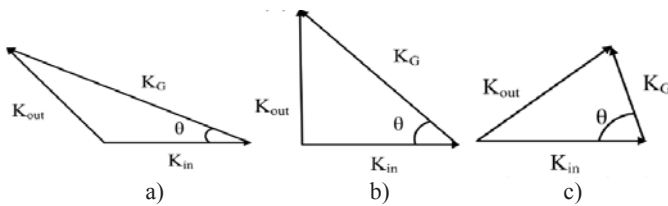


Figure 19. Vector description of phase matching conditions for ING with angles: a – $<45^\circ$; b – 45° ; c – $>45^\circ$

Due to the large slope of the induced asymmetry angle to the fiber geometry, the PIBC generates splitting-dependent polarization that shows pairs of vertices corresponding to two orthogonal polarization modes. In this way, the equivalent fast axis and slow axis can be defined similar to the traditional retention of polarization of the fiber structure, as shown in Figure 20.

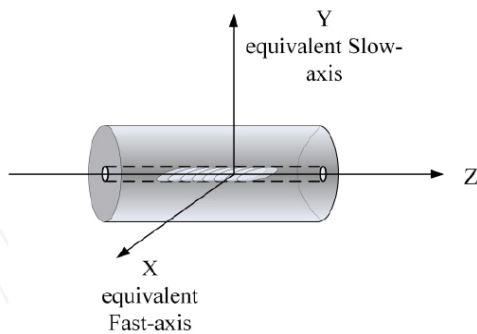


Figure 20. Schematic representation of the PIBC structure with two orthogonal polarization axes

It is this distinctive polarization mode of the splitting mechanism that makes the PIBC ideal as refractive load index sensors [7] and torsion sensors [8] based on the polarization property and using the intrinsic sensitivity of high order modes in the environment.

Partially tilted Bragg cells showed a low thermal sensitivity equal to $3.3 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ in the 1200 nm range [9]. Thermal sensitivity in the 1550 nm range is of interest for the use of optical sensors. The thermal sensitivity of the PIBC was examined by installing a Peltier grating onboard heat exchanger using a commercial temperature controller, controlling the change in the transmission spectrum with elevated temperature. We studied two pairs of the PIBC peak loss at about 1560 nm and 1610 nm separately.

Figure 21 shows the dependence of the shear wavelength of two paired loss peaks as the grating temperature increases from 20°C to 80°C in 10°C steps.

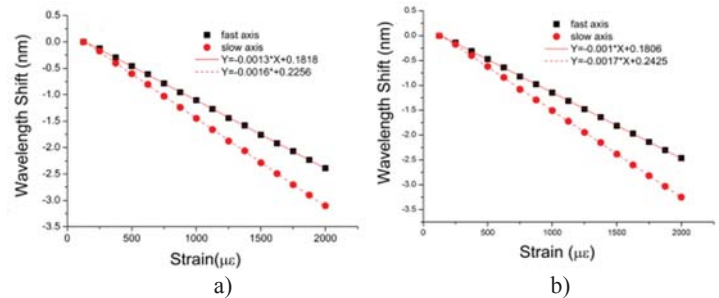


Figure 21. The wavelength of the shift of two paired peaks of losses of PIBC against temperature changes in the ranges around: a – 1560 nm; b – 1610 nm

Compared to conventional IBG [10], PIBC exhibits significantly lower sensitivity to temperature, so PIBC can be an ideal optical sensor without a mandatory temperature compensation circuit.

The properties of the PIBC, due to the change in the parameters during twisting, make it possible in the future to use them as sensors of rotations of nodes.

Since the polarization of the PIBC depends on the contact of the sensor with the polarized light, the polarization of the direction of the light will change if the fiber is twisted. The PIBC diagram of the torsion stress perception is shown in Figure 22.

One side of the PIBC is clamped in a metal block, and the other side of the PIBC is fed to the signal receiver through a fiber rotator. The length between the fiber clamp and the fiber rotator is L .

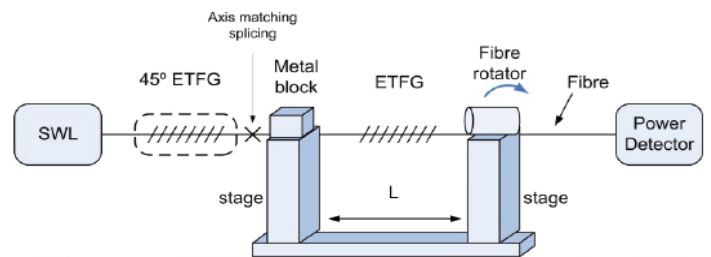


Figure 22. Schematic description of the experimental setup all-fiber lattice based on sensor rotation system:

SWL – laser source; Power Detector – power detector; stage – basic; 45° ETFG – fiber optic with 45° grids; Fibre – fiber optic; Fiber rotator – twisting the fiber

To eliminate axial deformation and bending effects of the optical fiber, apply a small amount of force to reduce the measurement error. Before starting to measure the bend, you need to make sure that the zero degree of rotation is normalized in such a state that the axis mode is fully excited by adjusting the PC. Then rotation was applied to the grating in a clockwise direction from 0° to 180° in 10° increments. The resulting evolution of the transmission spectra is shown in Figure 23. It clearly shows that when the PIBC is under bending, the strength of the fast axis modes increases, while the slow axis mode decreases. More importantly, the fast axis mode is reduced completely when the steering angle is 180° . Reverse changes were observed when

rotation was applied counterclockwise from 0° to 180° between fast axis and slow axis modes.

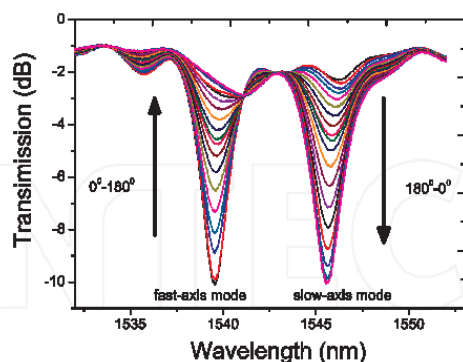


Figure 23. Resultant evolution of transmission spectra upon fiber twisting

The unusual properties of fiber can be applied to measure loads.

Taking a standard single-mode fiber with a cylindrical geometry for the experiment, when a shear force is applied to the y-axis, as shown in Figure 24, for a given compressive force F , the stresses in the x and y directions can be expressed as

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi DL} \text{ and } \sigma_y = \frac{6F}{\pi DL}, \quad (6)$$

where D – the fiber diameter; L – the length of the stress region; F – the force applied to the fiber.

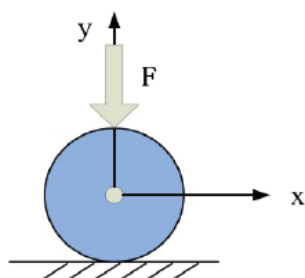


Figure 24. Cross-section of a fiber in a fixed x-y coordinate system with a transverse load applied along the y-axis

It should be noted that δ_x – tensile stress is positive, while δ_y – compression stress, which is negative, therefore $(\delta_x - \delta_y) > 0$ is always true. The photoelastic induced effect of a change in the refractive index in the region of the fiber core can be specified [11]:

$$\Delta n = n_x - n_y = (n_{x0} - n_{y0}) + (C_1 + C_2)(\delta_x - \delta_y), \quad (7)$$

where n_{x0} and n_{y0} – the effective refractive indices of the fiber without stress; C_1 and C_2 – optical voltage coefficients; the ratio $(C_1 - C_2) > 0$ is always true for silica fiber [12].

If the lateral load is applied in the slow axis in the CNBR, we will have $n_{x0} = n_f$ and $n_{y0} = n_s$, where n_f and n_s – refractive indices for a predetermined fast and slow axis of the PIBC. Consequently, the first term in equation (3.18) will be negative, which will lead to a decrease in birefringence Δn . In this situation, it is expected that the light coupling of the two orthogonal

polarized modes tends to be dependent on the external load. Conversely, if the lateral load is applied in the direction of the fast axis, we will have $n_{x0} = n_s$ and $n_{y0} = n_f$... Thus, we will have a positive value in the first term of equation (7), which will lead to an increase in birefringence Δn . In this case, the PIBC is able to provide decoupling of two orthogonal polarized modes.

In the experiment, a lateral load was applied on the slow axis of the PIBC from 0 to 2600 g with a step of 200 g. The evolution of the spectrum is shown in Figure 25.

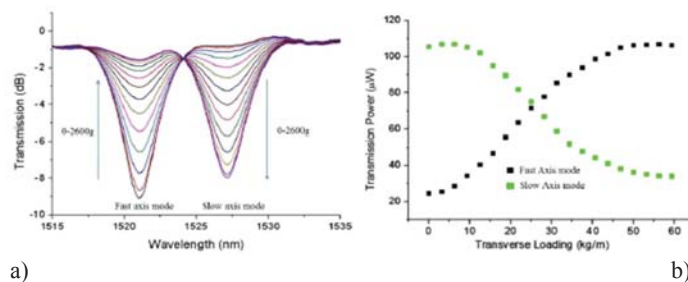


Figure 25. Transmission of the evolution of the spectrum of the PIBC (a) with a lateral load from 0 to 2600 g, applied on the slow axis of the PIBC and an auxiliary fiber, and the evolution of the power supply of the PIBC load sensor (b) using the power meter

Figure 25 clearly shows that with an increase in the weight of the load, the intensity of the fast axis mode increases, while in the slow axis mode it decreases. It is noted that when the load is applied to the fast axis of the PIBC, the spectrum does not evolve. This unique property can potentially serve as a vector load cell that is capable of not only measuring load amplitudes, but also identifying the direction of the load.

Conclusion

Based on the above, the following conclusions can be drawn: for the implementation of the tasks in the field of diagnostics of the technical condition of the airframe and the main mechanical assemblies, sensors with minimum weight and dimensions and power consumption should be used. These promising sensors include fiber-optic sensors with distributed Bragg cells, which make it possible to monitor the stress-strain states of the airframe and the main mechanical components. On the basis of such sensors, it is very promising to develop technical means that allow monitoring the dynamics of internal deformations of controlled units and assemblies in real time, based on measuring the spectrum of internal accelerations of loaded units of the airframe and main units, taking into account phase relationships.

The development of the method for diagnosing the stress-strain states of the airframe and the main units of aircraft complexes is a method based on the use of frequency-Doppler fiber-optic sensors having a significantly high signal-to-noise ratio with sufficient broadband with a spherical directional pattern.

The final diagnostics, carried out on the ground after the flight, is advisable to be carried out on the basis of eddy current sensors, which have a very large penetration depth for detecting hidden defects.

Fiber-optic Bragg sensors with an inclined array should be considered as promising areas of research in the field of creating new sensors with new physical properties. These sensors, with the unique polarization mode separation property, have featured

vector detection functions such as loading and twisting sensors. This makes it possible not only to measure the loading and twisting amplitudes, but also to determine the direction of the measured values.

References

1. W. Staszewski, C. Boller, G.R. Tomlinson (2004). Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing. New York: Wiley, 2004. 266 p.
2. G. Ya. Buimistryuk, V. Nikolaev (2012). New principles and technological possibilities of constructing fiber-optic hydroacoustic sensors and antennas. *Proceedings of the XI All-Russian. conf. «Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics»*. SPb. P. 344-352.
3. H. Guo, G. Xiao, N. Mrad (2011). Fiber optic sensors for structural health monitoring of aircraft platforms. *Sensors*. No 11. P. 3687-3075.
4. X. Chen, K. Zhou, L. Zhang et al. (2006). In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81 Tilted structure. *IEEE Photonics Technology Letters*. Vol. 18, No. 24. P. 2596-2598.
5. K.M. Zhou, L. Zhang, X.F. Chen et al. (2006). Low thermal sensitivity grating devices based on Ex-45 degrees tilting structure capable of forward-propagating cladding modes coupling. *J. Lightwave Technol.* Vol. 24, no. 12. P. 5087-5094.
6. S.W. James, R.P. Tatam (2003). Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and application. *Measurement Science and Technology*. Vol. 14. P. 49-R61.
7. N. Imoto (1980). Birefringence in Single-Mode Optical Fiber Due to Elliptical Core Deformation and Stress Anisotropy. *IEEE J. Quantum Elect.* Vol. 16, no. 11. P. 1267.
8. I. E. Mukhin (2014). The main directions of development of systems for diagnostics and prognostics of the technical condition of aircraft. *Materials of the VI scientific-practical conference «Flight data accumulators, predictive and diagnostic systems, on-board measurements»*. Kursk: JSC «Aviaavtomatika» named after V. V. Tarasov», pp. 35-37.
9. I.E. Mukhin (2014). The main directions of development of systems for diagnostics and prognostics of the technical state of aircraft. *Innovations*. No. 9. P. 110-113.
10. I.E. Mukhin, S.L. Seleznev, D.S. Koptev (2017). Directions and practical results of creating methods and means of diagnostics and prognostics of the state of the aviation complex «man-machine». *Izvestiya Yugo – Western State University*. Vol. 7. No. 3 (24). P. 46-58.
11. S. Arais, C.A. Moyer, K.W. Brown (1978). Determination of the ferromagnetic Curie temperature for $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ (Metglas 2826). *Physica Scripta*. Vol. 17. P. 543.
12. P.S. Popovic (2003). Hall effect devices. Second ed. CRC Press. P.42.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Коптев Дмитрий Сергеевич, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия, d.s.koptev@mail.ru
Мухин Иван Ефимович, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия, makskatol21@yandex.ru

Аннотация

Периферийные датчики для снятия параметров летательных аппаратов являются неотъемлемой частью любой системы диагностики и прогностики технического состояния. Их принцип работы применительно к эксплуатации на авиационных комплексах заключается в преобразовании механических, электромагнитных или световых величин в электрические для их последующей обработки. Процесс излучения распространяющихся в материале возмущений, вызванных динамической локальной перестройкой структуры материалов под действием внутренних напряжений, приводящих к изменению кристаллической решетки или движению микро- и/или макродефектов носит название акустической эмиссии. Так, анализ отличий в форме акустических волн позволяет осуществлять классификацию вида деформаций: трещина или пластическая деформация, что позволяет более точно определять текущее состояние планера или диагностируемых узлов. Принцип работы таких датчиков основан на эффекте преобразования линейных размеров ячейки Брэгга, выполненной на оптоволокне, в изменение отраженной длины волны. Необходимым условием получения корректных результатов измерений напряженных состояний является необходимость температурной компенсации ячеек Брэгга, что достигается введением дополнительных ячеек, механически развязанных от диагностируемого материала и реагирующих только на температурную составляющую. Достоинством этого метода является отсутствие необходимости дополнительной настройки ячеек и их юстировки, а также независимость измерений от воздействия электромагнитных излучений; датчики же обладают малой массой, устойчивы к вибрациям, нечувствительны к электромагнитным полям. В статье представлены практические результаты использования волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии для диагностики технического состояния ответственных узлов и агрегатов летательных аппаратов, а также изложены перспективы их наиболее глубокой интеграции в единую информационно-аналитическую систему диагностики и прогностики технического состояния авиационных комплексов. Представлены проработанные технические решения, направленные на упрощение способов обработки широкополосных акустоэмиссионных сигналов, которые позволяют выполнять датчики акустической эмиссии на основе оптоволокна конструктивно проще и дешевле, с повышенным отношением сигнал/шум, за счёт одного преобразования акустико-оптического сигнала в электрический.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, волоконно-оптический датчик акустической эмиссии (ВОДАЭ), эффект Доплера, волоконно-оптические решётки Брэгга (ВОБР), наклонная брэгговская решетка (НБР), частично наклоненная ячейка Брэгга (ЧНБР).

Литература

1. Staszewski W., Boller C., Tominson G. R. Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing. New York: Wiley, 2004. 266 p.
2. Буймистрюк Г.Я., Николаев В. Новые принципы и технологические возможности построения волоконно-оптических гидроакустических датчиков и антенн // Труды XI Всерос. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". СПб., 2012. С. 344-352.
3. Guo H., Xiao G., Mrad N. Fiber optic sensors for structural health monitoring of aircraft platforms // Sensors. 2011. No 11. P. 3687-3075.
4. Chen X., Zhou K., Zhang L. et al. In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81 Tilted structure // IEEE Photonics Technology Letters. 2006. Vol. 18, no. 24. P. 2596-2598.
5. Zhou K.M., Zhang L., Chen X.F. et al. Low thermal sensitivity grating devices based on Ex-45 degrees tilting structure capable of forward-propagating cladding modes coupling // J Lightwave Technol. 2006. Vol. 24, no. 12. P. 5087-5094.
6. James S.W., Tatam R.P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application // Measurement Science and Technology. 2003. Vol. 14. P. R49-R61.
7. Imoto N. Birefringence in Single-Mode Optical Fiber Due to Elliptical Core Deformation and Stress Anisotropy // IEEE J. Quantum Elect. 1980. Vol. 16, no. 11. P. 1267.
8. Мухин И.Е. Основные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния летательных аппаратов // Материалы VI научно-практической конференции "Накопители полетных данных, системы прогностики и диагностики, средства бортовых измерений". Курск: ОАО "Авиаавтоматика" имени В. В. Тарасова, 2014. С. 35-37.
9. Мухин И.Е. Основные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния летательных аппаратов // Инновации. №9. 2014. С. 110-113.
10. Мухин И.Е., Селезнев С.Л., Контев Д.С. Направления и практические результаты создания методов и средств диагностики и прогностики состояния авиационного комплекса "человек – машина" // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 7, №3(24). С. 46-58.
11. Aaraj S., Moyer C.A., Brown K.W. Determination of the ferromagnetic Curie temperature for Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆ (Metglas 2826) // Physica Scripta. 1978. Vol. 17, is. 5. P. 543.
12. R.S. Popovic. Hall effect devices. Second ed. CRC Press, 2003. 420 p.

Информация об авторах:

Контев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Мухин Иван Ефимович, д.т.н., с.н.с., профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

ORGANIZERS:

RUSSIAN (MOSCOW) IEEE CIRCUITS AND SYSTEMS (CAS04) CHAPTER
IEEE REGION 8, RUSSIAN SECTION CHAPTER, MTT/ED
INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS (IRIS)

INTERNATIONAL CONFERENCE

"2022 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications"

IEEE Conference Record #53456

From 15 to 17 March 2022, Moscow, Russia, Avia Plaza, Aviamotornaya str., 10/2

Conference will produce a publication
(IEEE Conference Publication Program (CPP)) – **IEEE Explore**,
Possibility of indexing in **Scopus** and **WoS**

Organising Committee:

111024, Moscow, Aviamotornaya, 8/1, office 323
Tel.: +7(926) 218-82-43, boardconf@media-publisher.ru
media-publisher.ru/en/2022-on-board

RISK FACTORS ANALYSIS OF DISTRACTION ACTIONS FROM DRIVING

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-62-71

Maria Yu. Karelina,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, karelina@madi.ru

Pavel I. Pospelov,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, pospelov@madi.ru

Alexander G. Tatashev,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, a-tatashev@yandex.ru

Alexey V. Terentyev,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia

Yuri V. Trofimenko,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, ecology@madi.ru

Marina V. Yashina,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, yash-marina@yandex.ru

Manuscript received 26 November 2021;
Accepted 10 December 2021

**The work is supported by the Russian
Foundation for Basic Research
(project No. RFBR 20-01-00222)**

Keywords: traffic models, road safety, risk factors,
correlation, factor statistical analysis

The issues related to the study of risk factors that are associated with the commission of non-driving actions by drivers, which are factors that increase the likelihood of a road traffic accident, are considered. Studies on the frequency of activities secondary to driving, associated risks and factors influencing the frequency of different types of such activities have been carried out in various countries. One of the most common traffic violations committed by drivers is using a smartphone while driving. The studies were carried out in the following ways: by interviewing, by observing the driver with a video camera installed inside the vehicle he is driving, and by observing passing vehicles from the outside. In this paper, we propose an approach using the methods of mathematical statistics to assess the correlation between side effects that distract from driving and factors that affect the frequency of such actions.

Information about authors:

Maria Yu. Karelina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Machines Parts and the Theory of Mechanisms, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Pavel I. Pospelov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Survey and Design of Roads, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Alexander G. Tatashev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Alexey V. Terentyev, Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Russia

Yuri V. Trofimenko, Head of the Department of Technosphere Safety, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Marina V. Yashina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Для цитирования:

Карелина М.Ю., Поспелов П.И., Таташев А.Г., Терентьев А.В., Трофименко Ю.В., Яшина М.В. Анализ факторов риска отвлекающих от вождения действий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 62-71.

For citation:

Karelina M.Yu., Pospelov P.I., Tatashev A.G., Terentyev A.V., Trofimenko Yu.V., Yashina M.V. (2021). Risk factors analysis of distraction actions from driving. T-Comm, vol. 15, no.12, pp. 62-71. (in Russian)

1. Introduction

As noted in [1], side effects that are not permitted by the road traffic regulations are a risk factor for road accidents. The frequency of such side effects is subject to constant research through interviews and observations.

One of the main causes of road traffic accidents is the driver's distraction caused by the commission of secondary actions [2], [3]. However, in order to better assess the risk of a road traffic accident, more accurate information is needed on the frequency of secondary actions and the degree of their danger [1] - [3]. Several country reports have been issued on the results of studies of the frequency of secondary actions, but there are differences between the frequency of types of secondary actions for different countries [4].

As noted in [1], the fundamental problem of research using surveys is that the quality of the data depends on the completeness and honesty of the respondents' answers are often subjective due to their susceptibility to inaccurate understanding of the concept of binary activity and memory errors. The question arises to what extent the data reflect real secondary activity. How much the driver can remember his secondary actions depends on the situation. Rare actions and actions perceived as stressful, such as talking on the phone, may be less remembered [3]. Rather rare actions and actions perceived as stressful, such as talking on the phone, may be remembered better than actions less exciting and more frequent, such as changing the radio channel, [3]. Observing the style of driving in the flow allows you to explore the problems associated with the peculiarities of human memory. Therefore, observation is used with the use of built-in data collection systems, for example, with the help of cameras located in the vehicle [5], [6] (naturalistic research of driving). However, naturalistic research allows one to see the driver's actions (for example, intense reflection) that are not visible from the outside, and gives an understanding that the driver is distracted. Another type of research into driving distractions is observations from stationary points located on highways during the observation period. Each method has its own advantages and disadvantages, complementing and testing each other.

Traffic safety and environmental issues were considered in [7] – [15].

In [16] – [19] the questions of influence of psychophysiological type and condition of drivers on the nature of their behavior are investigated. This nature can be taken into account when setting the parameters of the corresponding mathematical traffic model.

The issues of traffic management on sections of highways at road intersections and modeling of traffic flows on such sections were considered in [20] – [25].

This paper proposes an approach based on the methods of mathematical statistics that allows, using data such as those given in [1], [26], the results of studies on the use of a smartphone while driving, to assess the impact of factors related to driver characteristics such as road or travel time on the frequency of using smartphones in general or certain types of use.

Section 2-5 presents the results of studies on the frequency of side effects, the risk associated with these actions, and the factors influencing this frequency, given in [1], and describes the methodology for conducting these studies.

Section 6 describes the approach proposed in this work for the statistical study of the strength of the influence of factors on the frequency of side effects while driving.

Section 7 provides examples of the use of the approach outlined in Section 3.

2. Methodology and survey results

In [1], a methodology for conducting a survey of drivers in order to study the frequency of secondary actions is described. To obtain a representative sample, quotas were determined for four German cities (Braunschweig, Chemnitz, Mainz, Regensburg) in proportion to the number of license holders by sex and four age groups (under 25, 25 to 44, 45 to 64, 65 years) [27]. Surveys were conducted over 6 days from 8 am to 8 pm, in the city center or in shopping centers near highways and near car service centers. 1,072 drivers were interviewed about secondary actions they performed during the last 30 minutes of the trip. In addition, drivers assessed the level of danger and the degree of distraction when performing a secondary action, and also answered questions about their use of a mobile phone [28]. The survey lasted an average of 20 minutes. The following secondary actions were considered: a telephone conversation with a telephone in hand; hands-free telephone conversation; a set of text messages; reading text messages; use of the Internet; use of the navigation system; driving equipment (eg seat, mirror); internal devices (e.g. radio); communication with the passenger; spontaneous actions (self-talk, singing, intense reflection); hygiene; change of clothes (or glasses); food / drink; smoking; finding or moving things; cleaning; distraction to external vehicles.

According to poll results, about 88% named at least one secondary action in the last 30 minutes of their trip. On average, the driver named two actions. These results are consistent with those of other studies [3]. The propensity for secondary actions decreases with increasing age of the driver. Men are more prone to secondary actions. As an answer to the question about the most frequently performed secondary actions, the following were named: communication of drivers with passengers (80% of drivers); actions with vehicle equipment (55%); spontaneous actions (31%). The most frequently named actions by drivers during the last 30 minutes of the trip were named as follows: communication with at least one passenger (20%); spontaneous actions (10%); food / drink (9%); actions related to vehicle equipment (9%); hands-free phone calls (9%). In terms of age, drivers under 25 are significantly more likely to use their smartphones to compose text messages. No driver over 65 years of age reported such actions. Infrastructure (highway or city) also affects the frequency of secondary activities. Hands-free calls, conversations with passengers, food / drink are significantly more likely to occur on a highway than in an urban environment. In general, the subjective perception of the danger of performing secondary actions is rather weak, except for clearly distracting actions (reading and typing, searching or cleaning, distraction by external vehicles). Drivers who reported a mobile phone addiction were more likely to use the phone in the last 30 minutes of the trip than drivers who did not have a phone addiction. In addition, drivers who reported their cell phone addiction reported a higher number of violations that distracted them from driving.

However, when answering questions, memory distortion may occur, and when observing, the subjective sense of distraction is lacking. The purpose of the project described in [1] is an attempt

to provide a more accurate answer to the question of the frequency of driving distractions from driving in Germany. Another goal was to test the methods of interviewing and observation by comparing the results obtained using these methods.

The data from surveys and video surveillance were compared. Data on 76 drivers were analyzed. While good agreement was found between survey and observation results for conscious or infrequent activities (phone calls, reading / typing), there was relatively weak agreement for unconscious activities (operations with vehicle-related equipment; personal hygiene; changing clothes / points). The comparison shows that polling is a suitable method for investigating the frequency of conscious or infrequent secondary actions.

3. Methodology and results of naturalistic observation. Comparison with survey results

To assess the quality of the results obtained through surveys, sample results were compared with the results of naturalistic observation [1]. The experiments, conducted between March and August 2017, involved 94 drivers.

The behavior of the drivers was recorded for 3 days on two cameras installed in their vehicles – a camera for day and night observation. In order not to focus attention on the subject of secondary actions in a way that could reduce the frequency of such actions by drivers, drivers were misled about the purpose of the study. Comprehensive information about the true purpose of the study was provided to drivers at the end of the study. After the cameras were positioned, at least 30 minutes elapsed, the experimenter conducted a telephone survey. For technical reasons, video recordings of only 76 drivers could be used for the analysis. The survey results and video data were compared and analyzed.

In general, it is shown that the information provided in the surveys is in mediocre agreement with the results of naturalistic observation. Two types of errors are considered: the secondary action is visible in the video, but not mentioned in the survey; the secondary action is not visible in the video, but named in the survey. Analysis shows that video recordings usually show much more than what is called by drivers when interviewed, especially with regard to personal hygiene, clothing, objects related to vehicle equipment (mirror gel, radio, air conditioning). Such actions may not be remembered by drivers or perceived as secondary actions that distract from driving. When it comes to mobile phone use, there are only slightly more actions identified through video than identified by drivers. From this we can conclude that the actions related to the use of a mobile phone are very deliberate. However, the results indicate that there may be some overestimation of secondary actions. Some of the secondary actions called during interrogation are not visible in the video recordings (false alarm).

This especially applies to the types of operations with the internal equipment of the vehicle, to spontaneous involuntary actions and distraction to objects external to the driver's vehicle. One of the reasons for this may be that the video recording always refers to the last 30 minutes of the trip, and the driver can name his earlier actions. Mobile phone related activities such as searching for the phone without following a conversation or typing may take place. Such an action may not be realized or remembered. Since this action occurs quite often, it is expected that in the future it is planned to include in the survey question-

naire a separate question about finding a phone without its subsequent use.

In [1], it is concluded that naturalistic observation is a useful and low-cost method for investigating the frequency of deliberate or infrequent distractions from driving (for example, phone calls, reading or typing text messages). In addition, the survey has the advantage over naturalistic observation that it gives an idea of the driver's subjective perception of the degree of distraction and his risk [29].

However, survey data are less reliable for data on secondary activities that drivers do not consider as driving distractions. This, in particular, applies to the installation of equipment in the vehicle (air conditioning, radio, etc.), to actions related to changing clothes, finding things in the vehicle. These actions, which are probably performed quite unconsciously and often enough, are not often named, even if there is a corresponding question in the questionnaire. Thus, it turns out that survey results underestimate the frequency of such poorly conscious actions. Therefore, in relation to the results of each survey, there should be an understanding of how the survey data correspond to the actual frequency of certain distractions from driving.

Studies show that factors that are not perceived by drivers as distracting from driving can increase the risk of a road traffic accident to a greater extent, for example, according to [30], eating / drinking increases the risk of a road traffic accident by 1.6 times, and mobile phone calls – 1.3 times.

The influence on the frequency of secondary influences of various factors related to the personality of drivers – gender, age, and to the infrastructure in which the vehicle travels – is investigated. With regard to the use of mobile phones, it is shown that people who use a mobile phone and tend to use the phone continuously continue to use it, even while in traffic. Young people especially often use the phone, which is often confirmed by research results. Overall, the results show that a variety of factors influence the frequency of secondary actions.

4. Results of a study of the frequency of various types of distractions

In [1], the results of studies of secondary actions during driving are presented and analyzed.

According to [3], secondary actions play a role in the number of cases, ranging from 10% to 30% of all road traffic accidents, and in 40% of these cases spontaneous actions take place (for example, talking to oneself or singing). According to the survey results, car drivers (in the city) spent 30% of the trip duration with secondary actions. For truck drivers (on the highway) it even took 50% of the trip [3]. According to a survey in which 600 drivers of cars and trucks took part [31], about 20% of the duration of all trips was conducted with secondary actions. According to the survey [3], the most frequent secondary actions performed by drivers were the following: using equipment services in a vehicle (66%); interaction with fellow travelers (38%); spontaneous actions (36%), for example, talking to oneself, singing; distraction to outdoor objects (28%); food / drink (24%). In [32] the results of a survey (426 drivers) on secondary actions are also given. Briefly, the results of the survey can be summarized as follows: 92% of drivers were distracted by outdoor objects; 89% used indoor equipment such as a radio or air conditioner; 90% of drivers reported thinking about something unrelated while driving while driving; almost 85% of drivers an-

swered that they communicated with fellow travelers while driving; about 52% of drivers reported that they often eat or drink while driving; over 43% said they typed while driving; 32% of drivers called with their phone in hand, and 25% of drivers called with their hands free. According to the survey participants, what actions they consider to be distracting from driving: 80% considered talking on the phone as a distraction; in second place is smoking, which was considered a distraction by half of the survey participants; a little more than a third (30%) named spontaneous use of the vehicle's interior equipment as a distraction; composing or reading text messages was named by 20%, and food / drink – by 9% of the survey participants; communication with fellow travelers was mentioned by 8% of the respondents. Telephone conversations appear to be clearly visible secondary activities, while food / drink or interaction with passengers is less frequently named. Typing text messages was also perceived by survey participants as one of the most dangerous types of distractions.

As noted in [1], in Germany and in other countries, a large number of observations were made of the frequency of secondary actions by drivers. The behavior of the drivers was observed either from stationary points or with the help of a camera installed inside the vehicle, and then the resulting video was analyzed.

A UK observation [12] (10,984 drivers observed) from a stationary site on a two-lane highway showed that 17% of drivers were secondary activities. In accordance with the results of an earlier observation [33], 15% of drivers performed secondary actions. Companion interactions were reported in 8% of drivers and were the most frequently observed secondary effects. 2% of drivers were noticed using devices that are not related to driving, such as a mobile phone. About 2% of drivers were noticed smoking during the trip.

According to one of the more recent stationary observations (7979 drivers observed) in Iran, [34] the most frequent secondary activities were: interaction with fellow travelers (12%); use of non-driving devices including telephone (2%); use of devices related to driving (1%). As a result of another stationary observation (2015) [1], about 20% of the observed drivers from 6 English cities performed secondary actions. The data obtained were similar to those obtained in previous studies; interaction with fellow travelers was found for 11% of drivers; slightly more than 4% smoked during the trip; used non-driving devices 1% of drivers. A study in Alabama, USA, showed that the most common secondary activity was interaction with fellow travelers (54%); about 32% of drivers; 20% of drivers were distracted by objects outside; about 17% typed text messages or business documents on their phone. Research in Germany, reported in Ref. [35], focused on the frequency of mobile phone use. It found that 5% of drivers were text messages, which is more common than observed in other international studies; about 2% of drivers called while holding a phone in their hand; about 2% of drivers called with free hands.

In [36], data from naturalistic observation were analyzed and the proportion of time during which drivers performed non-driving activities was investigated.

The secondary action seen on the video for the longest time was the use of non-driving devices. Next in time was interacting with fellow travelers and then using non-driving devices such as a mobile phone. As noted in [1], the risk of road traffic accidents

is especially high for young drivers. In this regard, in [37], the results of naturalistic studies are presented, in which the data obtained in naturalistic observations are analyzed only in cases of road accidents with young drivers (from 16 to 19 years old). They found that at least 76% of the videos had at least one side effect. Telephone use was found to be the most frequent distraction performed in a road traffic accident, with the second most frequent secondary action resulting in a road traffic accident, which appeared to be distraction to external objects; in about 16% of cases, drivers interacted with fellow travelers.

According to a survey conducted in Germany [3], [37] 85% of drivers traveling with passengers communicated with them. Interaction with passengers is the most frequently performed secondary activity. At the same time, the likelihood of interaction with passengers when traveling on a highway is significantly higher than in urban traffic, which may be explained by a more complex transport situation in the city, where the driver is forced to concentrate more on traffic and, accordingly, has fewer resources to communicate with fellow travelers. In [38], data from naturalistic studies on the secondary actions of novice drivers were used. 58% of all video segments showed at least one secondary action performed by the driver; the most frequently performed secondary action was communication with fellow travelers (20% of all drivers); self-starting actions were observed in 17% of drivers; distraction to external objects was noticed in 12% of drivers; phone use was visible on 5% of the video segments. The following was noted in [1] Summarizing the results of various studies, it can be argued that the most frequently observed secondary action is interaction with fellow travelers. This type of side effects in various stationary observations ranges from 8% to 54%, and in naturalistic studies it is observed in about 20% of drivers. In surveys, this type of secondary action is named by 40-50% of the respondents. The use of non-driving devices such as a mobile phone is the second most common side effect in videotaped naturalistic exploration and stationary observation. In the survey, this type of secondary action is named most often (it is called from 40% to 70%).

5. Risk of road accidents due to distraction from driving

As noted in [1], using a mobile phone while driving is the most studied secondary activity. The main reason for this is the associated risk of a road traffic accident [39], [40]. Polls in Germany, Austria and Sweden showed that there was a slight decrease in the number of people talking on the phone from 59% in 2011 to 51% in 2016 [40], [41]. This, however, can be explained by the fact [1] that drivers have become more likely to write text messages.

The risk of a road traffic accident when using a mobile phone increases by an average of two to five times compared to when the phone is not in use [42]. It was found in [43], [44] that manual selection of a number on a mobile phone increases the risk by about three times. Other studies have shown that telephone use even increases the risk of a road traffic accident by four times [30], [45]. In some studies, however, opposite results were obtained, according to which the thesis about the negative effect of using the telephone was not supported, as was not confirmed in the naturalistic study, the results of which are presented in [46].

It is natural to assume that the risk depends primarily on the type of telephone use, since different types require different resources. This would be the difference between the risk of using

the phone with free hands and using it with at least one occupied hand. However, the literature review given in [39] shows that there is actually no difference between the risk of using the phone with hands free. This can be explained by the survey results given in [41]. It has been shown that even with a device allowing the use of a telephone with free hands, the eyes of drivers are averted from the road, which is critical for safety. Along with the visual component of finding a number on the phone, a mental distracting component also appears during a telephone conversation [47]. This additional stress on resources ultimately negatively affects important processes while driving. The negative influence of the visual search for a phone number is manifested due to the diversion of the gaze in an increase in the reaction by 0.5 seconds [48] – [50], in the deterioration of the driving process due to the weakening of control due to the weakening of control over the speed and direction of movement [51], in deterioration of the decision-making process [52], [53]. The results of naturalistic studies also show an increase in the reaction time during braking. Studies conducted in France [54] found that visual and manual interaction with a telephone begins primarily at a traffic light at which it is required to stop. Switching to green light interrupts this interaction.

According to a survey in Germany [42], approximately 20% of drivers write text messages on their mobile phones and 30% of drivers read messages, with these side effects being carried out primarily by young drivers, mostly men. Similar results were obtained from a survey conducted in 2010 in Austria. Here, 14% of drivers wrote messages on occasion and 32% read them. The fact that messages are written mainly by young drivers is especially dangerous because for this category the risk of a road accident is already increased.

As shown in [30], the use of navigation devices was a strong distraction at that time (2007). The research results presented in [56] showed that the use of electronic devices increases the risk of a road traffic accident by 6-7 times. It was possible to show [57] that the use of a visually hand-held navigation device is more distracting than a spoken device. The duration of gaze distraction when using a visual hand-held device as 50% of the duration of the trip [58]. Guided audio information reduces distraction.

When traveling, there is a need to use a number of devices with which the vehicle is equipped, such as, for example, a seat or mirror setting device, a radio or an air conditioner. According to data from [42], about 43% of drivers use a device to put on a belt, install a mirror or a seat. According to [5], controlling air conditioners causes distraction. This seemingly insignificant side effect leads to a waste of visual and mental resources, which ultimately increases the risk of a road traffic accident. In accordance with [42], control over the climate control increases the risk of a road traffic accident by 1.5 times.

Radio also has a negative impact on travel safety. Only listening to music appears to have no negative impact on travel safety [59].

For the frequency of secondary actions associated with personal hygiene and changing clothes, in [3], an estimate of 13% was obtained. In [42], a slightly lower value of the frequency of such actions was obtained: 6% of the respondents answered that while driving, they perform such actions as, for example, using cosmetics or shaving. Non-driving activities such as applying makeup or changing clothes lead to some aversion of the eyes or

some weakening of contact with the steering wheel [59], which increases the risk of road accidents.

According to the data cited in [45], 11% of drivers communicate with fellow travelers, and according to [44], even about a third of all drivers communicate with fellow travelers while driving. Conversation with fellow travelers does not cause any distraction of the eye and does not weaken the control of the steering wheel [59]. The data of naturalistic observation, the results of which are given in [5], show that there is a high risk of getting into a traffic accident if the trip is made alone – by one driver.

According to the survey results in [44], about a quarter of all drivers ate or drank during the trip. Thus, these non-driving activities are widespread. According to [30], these actions are more likely to lead to road traffic accidents than, for example, telephone conversations (according to [30], talking on the phone increases the risk of a road traffic accident by 1.3 times, and food / drink in 1.6 times). However, not all studies are consistent with this. Thus, according to the results [5], food / drink activities do not increase the risk of a road traffic accident.

The number of drivers who smoke while driving is 1% according to the data cited in [42] and 20% according to the data cited in [3]. It was shown in [59] that smoking increases the risk of road traffic accidents by 1.5 times. The duration of the distraction is increased by lighting and extinguishing the cigarette. The duration of holding a cigarette is approximately equal to the time the eyes are distracted while holding the phone.

Other distractions include working with animals in a motor vehicle and handling, and activities such as reading or writing.

6. An approach to calculating the quantitative characteristics of assessing the influence of various factors on the frequency of using smartphones while driving

In [1], [26], there is no description of approaches related to mathematical statistics that allow one to quantify the impact on the frequency of violations associated with the use of a smartphone, such factors as the driver's age, driver gender, road type, time of day, region.

Let us describe the approach that allows one to calculate such a quantitative estimate in the form of a statistical indicator called the coefficient of determination [56].

As an effective sign, we consider the frequency of secondary action (food / drink or smoking). As factor signs, we consider qualitative signs expressing the conditions that the driver's characteristic, type of road, and travel time satisfies. Since there are three age categories, the attribute, in the terminology of mathematical statistics, has three levels (Fig. 1).

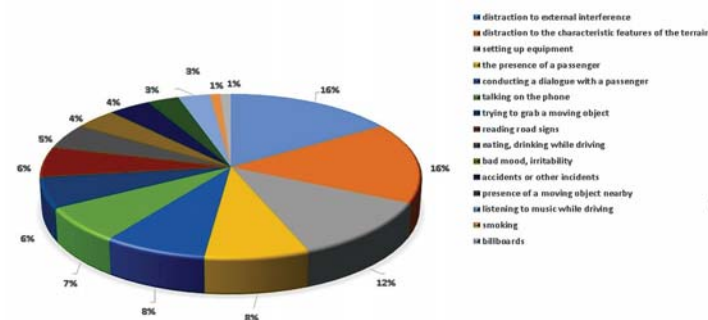


Figure 1. Levels of Observed Effective and Factor Signs [26]

Let's assume that there are n observations (there is a sample size n). The number of levels of the effective indicator is equal to m . Let a confidence j -th level conducted n_j observations $j = 1, \dots, m$. As a result of observations at the j -th level, the following values of the effective indicator were obtained $x_{j1}, \dots, x_{jn_j}, j = 1, \dots, m$.

The group average is defined as:

$$\bar{x}_j = (1/n_j) \sum_{i=1}^{n_j} x_{ji}, j = 1, \dots, m,$$

and the overall average as:

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} x_{ji}, j = 1, \dots, m.$$

Total variance:

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - \bar{x})^2.$$

Factorial variance:

$$\sigma_f^2 = \sum_{j=1}^m n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2.$$

The coefficient of determination is η^2 defined as the ratio of the factorial variance to the total. The coefficient of determination can be understood as follows: the value of the factor attribute in $\eta^2 \cdot 100$ percent determines the value of the effective attribute.

The square root of the coefficient of determination is called the empirical correlation ratio, which is thus calculated by the formula:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma_f^2}{\sigma^2}}$$

7. Examples of calculating quantitative characteristics of assessing the influence of various factors on the frequency of secondary actions

On the basis of the data on the frequency of side effects during driving given in [26], obtained as a result of observations in Aachen and Braunschweig, the values of the group averages and the coefficient of determination presented below were calculated. The frequency of smartphone use is averaged over the observations of two observers.

Influence of road type on the frequency of food / drink disturbance: intracity roads - group average $\bar{x}_1 = 0.0165$; suburban roads - group average $\bar{x}_2 = 0.0097$; highways - group average $\bar{x}_1 = 0.0081$; the coefficient of determination: $R^2 = 0.277$.

Influence of the factor of the region on the frequency of violations of the type of food / drink:

Aachen - group average $\bar{x}_1 = 0.0045$; Braunschweig - group average $\bar{x}_2 = 0.00179$; the coefficient of determination: $R^2 = 0.786$.

Influence of the time-of-day factor on the frequency of food / drink disturbances: from 8:00 am to 10:00 am - group average $\bar{x}_1 = 0.0045$; from 10:00 to 14:00 - group average $\bar{x}_2 = 0.0179$; the coefficient of determination: $R^2 = 0.296$.

Influence of the factor of the day of the week on the frequency of violation of the type of food / drink: Tuesday - group average $\bar{x}_1 = 0.0056$; Wednesday - group average $\bar{x}_2 = 0.0158$; Thursday - group average $\bar{x}_1 = 0.0131$; the coefficient of determination: $R^2 = 0.288$.

Influence of road type on smoking frequency: intracity roads - group average $\bar{x}_1 = 0.0148$; suburban roads - group average $\bar{x}_2 = 0.0081$; trunk - group average $\bar{x}_1 = 0.0081$ coefficient of determination: $R^2 = 0.155$.

Influence of the factor of the region on the frequency of smoking: Aachen - group average $\bar{x}_1 = 0.0104$; Braunschweig - group average $\bar{x}_2 = 0.01143$; the coefficient of determination: $R^2 = 0.024$.

Influence of the time-of-day factor on smoking frequency: from 8:00 to 10:00 am - group average $\bar{x}_1 = 0.0148$; from 10:00 to 14:00 - group average $\bar{x}_1 = 0.0104$; highways - group average $\bar{x}_2 = 0.01143$; the coefficient of determination: $R^2 = 0.024$.

Influence of the factor of the day of the week on the frequency of smoking: Tuesday - group average $\bar{x}_2 = 0.0081$; Wednesday - group average $\bar{x}_1 = 0.0328$; Thursday - group average $\bar{x}_1 = 0.0328$; the coefficient of determination: $R^2 = 0.155$.

Conclusion

This paper describes an approach that allows using the methods of mathematical statistics in the analysis of research results, such as the observations described in [1], [26], carried out in order to assess the frequency of side effects by drivers, their risk and the influence of various factors on the frequency of side effects. The statistical indicator, calculated in accordance with our proposed approach, is the coefficient of determination, which estimates the closeness of the relationship between the factor attribute (for example, the age category to which the driver belongs) and the effective attribute (frequency).

References

1. Häufigkeit von Ablenkung bei Autofahren Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Mensch und Sicherheit, 2020, Heft M 297.
2. M. Vollrath, J.F. Krems (2011). Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker. Kohlhammer Verlag.
3. A. Huemer, M. Vollrath (2012). Ablenkung durch fahrfremde Tätigkeit - Machbarkeitsstudie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Mensch und Sicherheit M225. Bremerhaven: Wierschaftsverlag NW.
4. J.F. Kubitzki, T. Vagner, V. Evert, R. Chaloupka-Risser (2018). Ablenkung und Straßenverkehr. Die Wegwendung der Straßenverkehr. Die Wegwendung der Straßenverkehrsteilnehmer vor ihre Aufgabe, sich regelkonform und sicher auf öffentlichen Wegen zu verhalten, ihre Ursachen, Gefahren und mögliche Maßnahmen. INFOS-POSITIONEN \ EMPFEHUNGEN Berlin Deutsche Gesellschaft für Verkehrspsychologie e. V.
5. S.J. Klauer, T.A. Dingus, V.L. Neale, J.D. Sudweeks, D.J. Ramsey (2006). The impact of driver inattention on near crash/crash risk. An

analysis using the 100-car naturalistic driving study data. Virginia Tech Transportation Institute.

6. R. Evenink, Y. Barnard, N. Baumann, X. Augros, F. Utesch (2014). UDRIVE: the European naturalistic driving study. In *Proceedings of Transport Research Arena*. IFSTTAR.

7. A.V. Terentyev (2015). Multi-criteria indicator of the quality of the car. *Bulletin of civil engineers*. St. Petersburg: SPbG ASU. 1 (48). P. 2001-2004.

8. M.Yu. Karelina, I.V. Arifullin, A.V. Terentyev (2018). Analytical determination of weight coefficients in multi-criteria assessment of the efficiency of vehicles. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Technical University (MADI)*, vol. 52, no. 1. P. 3-9.

9. Yu.V. Trofimenko (2009). Assessment of the harm caused to the environment by the regional motor transport complex. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Technical Institute (State Technical University)*, vol. 17, no. 2. P. 97-103.

10. Trofimenko Yu.V., A.N. Yakubovich (2017). Risks of natural disasters on a promising network of high-speed highways in Russia. *Science and technology of the road industry*, vol. 79, No. 1. P. 38-43.

11. Yu.Trofimenko, Komkov V., K. Trofimenko (2020). Forecast of energy consumption and greenhouse gas emissions. *Transportation Research Procedia*, vol. 50, pp. 698-707. Doi: 10.1016/j.trpro.2020.10.082

12. Yu.V. Trofimenko, T.Yu. Grigorieva, E.V. Shashina (2010). Transport system and driver reliability. *Motor transport enterprise*, no. 10. P. 16-19.

13. Yu.V. Trofimenko (2010). Ways to improve the environmental and road safety of the motor transport complex in Russia. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 12, no. 1-9. P. 2345-2349.

14. Yu.V. Trofimenko, T.Yu. Grigorieva, E.V. Shashina (2012). Measures to reduce driver fatigue and stress when performing intercity and international transport. *Avtotransportnoe predpriyatie*, no. 5. P. 9-11.

15. Yu.V. Trofimenko, A.N. Yakubovich (2015). Methods for predicting the risks of natural emergencies on the road network. *Safety in the technosphere*. No. 2 (March-April). P. 73-82.

16. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, A.S. Dotkulova (2019). Function of the state of the traffic flow taking into account the influence of the human factor. *Information technologies and innovations in transport. Materials of the 5th International Scientific and Practical Conference*. Oryol, May 22-23, 2019. Publishing house: Oryol State un-t them. I.S. Turgenev. P. 52-57.

17. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, A.S. Dotkulova, N.P. Susoev (2019). Deterministic-stochastic traffic model with a variation of the psychophysiological properties of drivers. *Systems of synchronization, signal generation and processing*, no. 6. P. 74-79.

18. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, A.S. Dotkulova, N.P. Susoev (2019). Accounting psycho-physiological types of drivers in the deterministic-stochastic traffic model. *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1-4. DOI: 10.1109 / SYNCHROINFO.2019.8814008.

19. A.S. Dotkulova, M.V. Yashina, Y.V. Trofimenko, A.G. Tatashev (2020). Attention driver evaluation in collective traffic behavior via gaming technology. *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109 / EMCTECH49634.2020.9261531.

20. P.I. Pospelov, M.A. Belova, A.V. Kostsov, A.G. Tatashev, M.V. Yashina (2019). Technique of traffic flow evolution localization for calibration of deterministic-stochastic segregation model. *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-5. DOI: 10.1109 / SOSG.2019.8706766

21. P. Pospelov, A. Kostsov, A. Tatashev, M. Yashina (2019). A mathematical model of traffic segregation on multilane road. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 442- 446. doi: 10.21533 / pen.v7i1.384

22. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, P.I. Pospelov, N.P. Susoev (2020). Optimization of regulation parameters for traffic scenario with dedicated public transport lane, *2020 International Conference on Engi-*

neering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109 / EMCTECH49634.2020.9261534.

23. M.V. Yashina, A.G. Tatashev, P.I. Pospelov, Duc Long., N.P. Susoev (2021). Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-change probabilities on multilane road before crossroad. *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-5.

24. P.I. Pospelov, Le Duc Long, A.G. Tatashev, M.V. Yashina (2021). Methodology of assessing the regulated crossing throughput with a dedicated lane for ground public transport based on a probabilistic model. *2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1159 012084.

25. P.I. Pospelov, Le D.L. (2021). Organization of traffic at an unregulated intersection with a dedicated lane for ground public transport. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*. No. 2 (65), p. 88-95.

27. Kraftfahrt-Bundesamt (2015). Bestand an allgemeinen Fahrerlaubnissen im ZFER am 1. Januar 2015 nach Geschlecht, Lebensalter und Fahrerlaubnisklassen. http://www.kba.de/DE/statistik/kraftfahrer/Fahrerlaubnisse/Fahrerlaubnis_bestand/_/fahrerlaubniski.html?nn=652036

28. S.P. Walsh, K.M. White, MCD Young R. (2010). Needing to connect: The effect of self and others on young people's involvement with their mobile phones. *Australian journal of Psychology*, vol. 62, no. 4, pp. 124-203.

29. T. Petzoldt, F. Utesch (2016). Trying to validate subjective reports with naturalistic driving – a case against questionnaires and surveys to quantify driving distraction. *European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems*, 30 June-1 July 2016, Loughborough UK.

30. K. Young, M. Regan, M. Hammer (2007). Driver distraction: A review of the literature. *Distrtacted driving*, pp. 379-405.

31. M.J. Sullman, F. Prat, D.K. Tasci (2015). A road study of driver distractions. *Traffic Injury Prevention*, vol. 16, no. 6, pp. 552-557. DOI: 10.1080 / 15389588.2014.980319

32. F. Prat, M.E. Gras, M. Planes, S. Font-Mayolas, M.J. Sullman (2017). Driving distractions an insight gained from roadside interviews on their prevalence and factors associated with driver distraction. *Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behavior*, vol. 45, pp. 194-207. DOI: 10.1016 / j.trf.2016.12.01

33. M.J. Sullman. An observational study of driver distraction in England. *Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behavior*, vol. 45, pp. 194-207. DOI: 10.1016 / j.trf.2012.01.01

34. J.I. Sabzevari, A.R. Nabipour, N. Khanjani, A.M. Tajkooh, M.J. Sullman. An observational study of secondary task engagement while driving on urban streets in Iran Safe Communities. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 96, pp. 56-63. DOI: 10.1016.j.aap.2016.07 / 020

35. M. Vollrath, A.K. Huemer, C. Teller, A. Likhacheva, J. Fricke (2016). Do German drivers use the smartphones safely? - Not really! *Accident Analysis and Prevention*, 96, pp. 29-33. DOI: 10.1016 / j.aap.2016.06.003

36. B. Metz, A. Landau, M. Just. Frequency of secondary tasks in driving-Results from naturalistic driving data. *Safety Science*, 68, pp. 195-203. DOI: 10.1016 / j.ssci.2014.04.002

37. C. Corney, K. Harald, D. McGehee. Using event-triggered naturalistic data to examine the prevalence of teen drive distractions in real-end crashes. *Journal of Safety Research*, 57, 47-52. DOI: 10.1016 / j.jsr.2016.03.010

38. P. Gershon, C. Zhu, S.G. Klauer, T. Dingus, B. Simons-Morton. Teen's distracted driver behavior. Prevalence and predictors. *Journal of Safety Research*, 63, pp. 157-161.

39. K. Lipovac, M. Derić, M. Tešić, Z. Andrić, B. Marić (2017). Mobile phone use while driving-listery review. *Transportation Research. Part F. Traffic Psychology and Behavior*, 47, pp. 132-142.

40. T.A. Dingus, F. Guo, S. Lee, J.F. Austin, M. Perez. Buchanan-King M., Hankey J. Driver crash risk factors and prevalence evaluation using and prevalence evaluation using naturalistic driving data. *Proceed-*

ing of the *Nature Academy of Sciences*, 113 (10), pp. 2636-2641. doi: 10.1073 / pnas.1513271113

41. J. Kubitzki, W. Fastenmeier (2016). Ablenkung durch moderne Informations und Kommunikationstechniken und Soziale bei Autofahren. Unterföhring: Allianz Deutschland AG.

42. J. Kubitzki (2011). Ablenkung in Straßenverkehr. Die unterschätzte Gefahr. München: Allianz Deutschland AG.

43. A. Huemer, M. Vollrath (2011). Driver secondary tasks in Germany: Using interviews to estimate prevalence. *Accident Analysis and Prevention*, 43, pp. 1703-1712. DOI: 10.1016 / j.aap.2011.03.029

44. A. Huemer, M. Vollrath (2012). Ablenkung durch fahrende Tätigkeiten-Machbarkeitsstudie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit M225. Bremerhaven. Wirtschaftsverlag NW.

45. S.P. Mcevoy, M.R. Stevenson, M. Wodwaard. Phone use and crashes while drivers in two Australian states. *The Medical Journal of Australia*, 185, pp. 630-634.

46. T. Victor, M. Dozza, J. Bärgrman, C.N. Boda, J. Engström, G. Markkula (2014). Analysis of naturalistic driving study data: safer glances. Driver inattention and crash risk.

47. S.M. Simons, A. Hicks, J.K. Caird. Safety-critical event risk associated with cell phone tasks as measured in naturalistic driving studies: a systematic review and metaanalysis. *Accident Analysis and Prevention*, 87, pp. 161-169. DOI: 10.1016 / j.aap.2015.11.015

48. E. Tvesten, M. Dozza (2014). Driving context and visual-manual phone tasks influence glance behavior in naturalistic driving. *Transportation Research. Part F: Traffic Physiology and Behavior*, vol. 26, pp. 258-272. DOI: 10.1016 / j.trf.2014.08.004

49. A.T. McCart, L.A. Hellinga, K.A. Bratiman. Cell phones and driving: review of research // *Traffic Injuring Prevention*, vol. 7, issue 2, pp. 89-106. DOI: 10.1080 / 15389580600651103

50. W.J. Horrey, C.D. Wickens (2006). Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Human factors*, 48 (1), pp. 196-205. DOI: 10.1518 / 001872006776412135

51. J.R. Sayer, J.M. Deboshire, C.A. (2007). Flanagan Naturalistic driving performance driving secondary tasks. *Proceedings of the 4th International Driving Symposium of Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, WA, Stevenson.

52. P. Green (1998). Visual and task demands of driver information systems. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Transportation Research Institute.

53. M.P. Reed, P.A. Green (1999). Comparison of driving performance on-road and a low-cost simulation using in a low-cost simulation using a concurrent telephone dialing task. *Ergonomics*, 42 (8), pp. 1015-1037. DOI: 10.1080 / 001401399185117

54. V. Huth, Y. Sanches, C. Brusque (2015). Drivers phone use at red traffic lights: A roadside observation study comparing calls and visual-manual interactions. *Accident Analysis and Prevention*, 74, pp. 42-48. DOI: 10.1016 / j.aap.2014.10.008

55. S. Box (2009). New data from Virginia Tech Transportation Institute provides insight into cell phone use and driving distraction.

56. I.I. Eliseeva, M.M. Yuzbashev (2006). General theory of statistics. 5th ed. Moscow: Finance and Statistics. 656 p.

57. L. Tijerina, E. Parmer, M.J. Goodman (1998). Driver workload assessment of route guidance system destination entry while driving. A test track study. *Proceedings of the 5th ITS World Congress*, pp. 12-16.

58. K.L. Young, M.A. Regan, J.D. Lee (2009). Measuring the effects of driver distraction: Direct driving performance methods and measures, pp. 85-105.

59. J. Stutts, J. Feagens, D. Reinfurt, E. Rodgman, C. Hamlett, K. Gish, L. Stapling (2005). Driver's exposure to distractions in their natural driving environment. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 37, no. 6, pp. 1093-1101. DOI: 10.1016 / j.aap.2005.06.007

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РИСКА ОТВЛЕКАЮЩИХ ОТ ВОЖДЕНИЯ ДЕЙСТВИЙ

Карелина Мария Юрьевна, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, karelina@madi.ru

Поспелов Павел Иванович, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, pospelov@madi.ru

Таташев Александр Геннадьевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, a-tatashev@yandex.ru

Терентьев Алексей Вячеславович, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Трофименко Юрий Василевич, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, ecology@madi.ru

Яшина Марина Викторовна, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, yash-marina@yandex.ru

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), грант № 20-01-00222

Аннотация

Рассматриваются вопросы, относящиеся к исследованию факторов риска, которые связаны с совершением водителями не относящихся к вождению действий, которые являются факторами, повышающих вероятность дорожно-транспортного происшествия. Исследования по частоте вторичных по отношению к вождению действий, связанному с ними рисками и факторам, влияющих на частоту различных видов таких действий проводились в различных странах. Одним из наиболее распространенных совершаемых водителями видов нарушений правил движения является использование смартфона во время вождения. Исследования проводились следующими способами: с помощью опроса, путем наблюдения за водителем с помощью видеокamеры, установленной внутри транспортного средства, которое он ведет, и с помощью наблюдения за проезжающими автотранспортными средствами извне. В настоящей работе предложен использующий методы математической статистики подход к оценке корреляционной связи между побочными действиями, отвлекающими от вождения, и факторами, влияющими на частоту таких действий.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, факторы риска, корреляционная связь, факторный статистический анализ.

Литература

1. Haufikeit von Anblenkung bei Autofahren Berichte der Bundesanstalt fur Strassenwesen // Mensch und Sicherheit, 2020, Heft M 297.
2. Vollrath M., Krems J.F. Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch fur Psychologen, Ingenieure und Informatiker. Kohlhammer Verlag, 2011.
3. Huemer A., Vollrath M. Ablenkung durch fahrfremde Tutigkeit - Machbarkeitsstudie. Berichte der Bundesanstalt fur Strassenwesen // Mensch und Sicherheit M225. Bremerhaven: Wierschaftsverlag NWV, 2012.
4. Kubitzki J.F., Vagner T., Evert V., Chaloupka-Risser R. Ablenkung und Strassenverkehr. Die Wegwendung der Strassenverkehr. Die Wegwendung der Strassenverkehrsteilnehmer vor ihre Aufgabe, sich regelkonform und sicher auf offentlichen Wegen zu verhalten, ihre Ursachen, Gefahren und mogliche Massnahmen // INFOS-POSITIONEN_EMPFENGEN. Berlin Deutsche Gesellschaft fur Verkehrspsychologie e. V., 2018.
5. Klauer S.J., Dingus T.A., Neale V.L., Sudweeks J.D., Ramsey D.J. The impact of driver inattention on near crash/crash risk. An analysis using the 100-car naturalistic driving study data // Virginia Tech Transportation Institute, 2006.
6. Evenink R., Barnard Y., Baumann N., Augros X., Utesch F. UDRIVE: the European naturalistic driving study. In Proceedings of Transport Research Arena. IFSTTAR, 2014.
7. Терентьев А.В. Многокритериальный показатель качества автомобиля // Вестник гражданских инженеров. Санкт-Петербург: СПбГ АСУ, 2015.-1 (48). С. 2001-2004.
8. Карелина М.Ю., Арифуллин И.В., Терентьев А.В., Аналитическое определение весовых коэффициентов при многокритериальной оценке эффективности автотранспортных средств // Вестник Московского автомобильно-дорожного технического университета (МАДИ), 2018, т. 52, №1. С. 3-9.
9. Трофименко Ю.В. Оценка вреда, наносимого окружающей среде автотранспортным комплексом региона // Вестник Московского автомобильно-дорожного технического института (государственного технического университета), 2009, т. 17, №2. С. 97-103.
10. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Риски природных катастроф на перспективной сети скоростных автомобильных дорог России. Наука и техника дорожной отрасли, 2017, т. 79, №1. С. 38-43.
11. Trofimenko Yu., Komkov V., Trofimenko K. Forecast of energy consumption and greenhouse gase emissions // Transportation Research Procedia, 2020, vol. 50, pp. 698-707. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.082
12. Трофименко Ю.В., Григорьева Т.Ю., Шашина Е.В. Транспортная система и надежность водителя // Автотранспортное предприятие, 2010, № 10. С. 16-19.
13. Трофименко Ю.В. Пути повышения экологической и дорожной безопасности автотранспортного комплекса России // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2010, т. 12, № 1-9. С. 2345-2349.
14. Трофименко Ю.В., Григорьева Т.Ю., Шашина Е.В. Меры по снижению усталости и стресса водителей при выполнении междугородных и международных перевозок // Автотранспортное предприятие, 2012, № 5. С. 9-11.
15. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Методика прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций природного характера на сети автомобильных дорог // Безопасность в техносфере, 2015, № 2 (март-апрель). С. 73-82.
16. Яшина М.В., Таташев А.Г., Доткулова А.С. Функция состояния транспортного потока с учетом влияния человеческого фактора // Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Орел, 22-23 мая 2019 года. Изд-во: Орловский гос. ун-т им. И.С. Тургенева, 2019. С. 52-57.
17. Яшина М.В., Таташев А.Г., Доткулова А.С., Сусоев Н.П. Детерминированно-стохастическая модель трафика с вариацией психофизиологических свойств водителей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов, 2019, № 6. С. 74-79.
18. Yashina M.V., Tatashev A.G., Dotkulova A.S., Susoev N.P. Accounting psycho-physiological types of drivers in the deterministic-stochastic traffic model // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814008.
19. Dotkulova A.S., Yashina M.V., Trofimenko Y.V., Tatashev A.G. Attention driver evaluation in collective traffic behavior via gaming technology // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261531.
20. Pospelov P.I., Belova M.A., Kostsov A.V., A. G. Tatashev A.G., Yashina M.V. Technique of traffic flow evolution localization for calibration of deterministic-stochastic segregation model // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706766
21. Pospelov P., Kostsov A., Tatashev A., Yashina M. A mathematical model of traffic segregation on multilane road // Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 442- 446. DOI:10.21533/pen.v7i1.384
22. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Susoev N.P. Optimization of regulation parameters for traffic scenario with dedicated public transport lane, 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261534.
23. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Duc Long, Susoev N.P. Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-change probabilities on multilane road before cross-road // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1-5.

24. Pospelov P.I., Le Duc Long, Tatashev A.G., Yashina M.V. Methodology of assessing the regulated crossing throughput with a dedicated lane for ground public transport based on a probabilistic model // 2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1159 012084.
25. Пospelов П.И., Ле Д.Л. Организация движения на нерегулируемом пересечении с выделенной полосой для наземного общественного транспорта // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 2021, №2(65). С. 88-95.
27. Kraftfahrt-Bundesamt (2015). Bestand an allgemeinen Fahrerlaubnissen im ZFER am 1. Januar 2015 nach Geschlecht, Lebensalter und Fahrerlaubnisklassen. http://www.kba.de/DE/statistik/kraftfahrer/Fahrerlaubnisse/Fahrerlaubnisbestand/11_2015_fe_b_geschlecht_alter_fahrerlaubnisklassen.html?nn=652036
28. Walsh S.P., White K.M., MCD Young R. Needing to connect: The effect of self and others on young people's involvement with their mobile phones. In: Australian journal of Psychology, 2010, vol. 62, № 4, pp. 124-203.
29. Petzoldt T., Utesch F. Trying to validate subjective reports with naturalistic driving - a case against questionnaires and surveys to quantify driving distraction. European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems, 30 June-1 July 2016, Loughborough UK, 2016.
30. Young K., Regan M., Hammer M. Driver distraction: A review of the literature. Distracted driving, 2007, pp. 379-405.
31. Sullman M.J., Prat F., Tasci D.K. A road study of driver distractions // Traffic Injury Prevention, 2015, vol. 16, № 6, pp. 552-557. DOI:10.1080/15389588.2014.980319
32. Prat F., Gras M.E., Planes M., Font-Mayolas S., Sullman M.J. Driving distractions an insight gained from roadside interviews on their prevalence and factors associated with driver distraction // Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behavior, 2017, vol. 45, pp. 194-207. DOI: 10.1016/j.trf.2016.12.01
33. Sullman M.J. An observational study of driver distraction in England // Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behavior, vol. 45, pp. 194-207. DOI: 10.1016/j.trf.2012.01.01
34. Sabzevari J.I., Nabipour A.R., Khanjani N., Tajkooh A.M., Sullman M.J. An observational study of secondary task engagement while driving on urban streets in Iran Safe Communities // Accident Analysis and Prevention, vol. 96, pp. 56-63. DOI: 10.1016/j.aap.2016.07.020
35. Vollrath M., Huemer A.K., Teller C., Likhacheva A., Fricke J. Do German drivers use the smartphones safely? - Not really! // Accident Analysis and Prevention, 2016, 96, pp. 29-33. DOI: 10.1016/j.aap.2016.06.003
36. Metz B., Landau A., Just M. Frequency of secondary tasks in driving-Results from naturalistic driving data // Safety Science, 68, pp. 195-203. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.04.002
37. Corney C., Harald K., McGehee D. Using event-triggered naturalistic data to examine the prevalence of teen drive distractions in real-end crashes // Journal of Safety Research, 57, 47-52. DOI: 10.1016/j.jsr.2016.03.010
38. Gershon P., Zhu C., Klauer S.G., Dingus T., Simons-Morton B. Teen's distracted driver behavior. Prevalence and predictors // Journal of Safety Research, 63, pp. 157-161.
39. Lipovac K., Deric M., Tesic M., Andric Z., Maric B. Mobile phone use while driving-listery review // Transportation Research. Part F: Traffic Psychology and Behavior, 2017, 47, pp. 132-142.
40. Dingus T.A., Guo F., Lee S., Austin J.F., Perez M., Buchanan-King M., Hankey J. Driver crash risk factors and prevalence evaluation using and prevalence evaluation using naturalistic driving data // Proceeding of the Nature Academy of Sciences, 113(10), pp. 2636-2641. DOI: 10.1073/pnas.1513271113
41. Kubitzki J., Fastenmeier W. Ablenkung durch moderne Informations und Kommunikationstechniken und Soziale bei Autofahrern. Unterfhring: Allianz Deutschland A.G., 2016.
42. Kubitzki J. Ablenkung in Strassenverkehr. Die unterschate Gefahr. M'nchen: Allianz Deutschland A.G., 2011.
43. Huemer A., Vollrath M. Driver secondary tasks in Germany: Using interviews to estimate prevalence // Accident Analysis and Prevention, 2011, 43, pp. 1703-1712. DOI: 10.1016/j.aap.2011.03.029
44. Huemer A., Vollrath M. Ablenkung durch fahrende Tatigkeiten - Machbarkeitsstudie. Berichte der Bundesanstalt fur Strassenwesen, Mensch und Sicherheit M225. Bremerhaven. Wirtschafstverlag NW 2012.
45. Mcevoy S.P., Stevenson M.R., Wodwaard M. Phone use and crashes while drivers in two Australien states // The Medical Journal of Australia, 185, pp. 630-634.
46. Victor T., Dozza M., Bargman J., Boda C.N., Engstrom J., Markkula G. Analysis of naturalistic driving study data: safer glances. Driver inattention and crash risk, 2014.
47. Simons S.M., Hicks A., Caird J.K. Safety-critical event risk associated with cell phone tasks as measured in naturalistic driving studies: a systematic review and metaanalysis // Accident Analysis and Prevention, 87, pp. 161-169. DOI: 10.1016/j.aap.2015.11.015
48. Tvesten E., Dozza M. Driving context and visual-manual phone tasks influence glance behavior in naturalistic driving // Transportation Research. Part F: Traffic Physiology and Behaviour, 2014, vol. 26, pp. 258-272. DOI: 10.1016/j.trf.2014.08.004
49. McCartt A.T., Hellinga L.A., Bratiman K.A. Cell phones and driving: review of research // Traffic Injuring Prevention, vol. 7, issue 2, pp. 89-106. DOI: 10.1080/15389580600651103
50. Horrey W.J., Wickens C.D. Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques // Human factors, 2006, 48(1), pp. 196-205. DOI: 10.1518/001872006776412135
51. Sayer J.R., Deboshire J.M., Flanagan C.A. Naturalistic driving performance driving secondary tasks // Proceedings of the 4th International Driving Symposium of Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, WA, Stevenson, 2007.
52. Green P. Visual and task demands of driver information systems. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Transportation Research Institute, 1998.
53. Reed M.P., Green P.A. Comparison of driving performance on-road and a low-cost simulation using in a low-cost simulation using a concurrent telephone dialing task // Ergonomics, 1999, 42(8), pp. 1015-1037. DOI:10.1080/001401399185117
54. Huth V., Sanches Y., Brusque C. Drivers phone use at red traffic lights: A roadside observation study comparing calls and visual-manual interactions // Accident Analysis and Prevention, 74, pp. 42-48, 2015. DOI: 10.1016/j.aap.2014.10.008
55. Box S. New data from Virginia Tech Transportation Institute provides insight into cell phone use and driving distraction, 2009.
56. Елусеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. 5-е изд. Москва: Финансы и статистика, 2006. 656 с.
57. Tijerina L., Parmer E., Goodman M.J. Driver workload assessment of route guidance system destination entry while driving. A test track study // Proceedings of the 5th ITS World Congress, 1998, pp. 12-16.
58. Young K.L., Regan M.A., Lee J.D. Measuring the effects of driver distraction: Direct driving performance methods and measures, 2009, pp. 85-105.
59. Stutts J., Feagans J., Reinfurt D., Rodgman E., Hamlett C., Gish K., Stapling L. Driver's exposure to distractions in their natural driving environment // Accident Analysis and Prevention, 2005, vol. 37, no. 6, pp. 1093-1101. DOI: 10.1016/j.aap.2005.06.007

Информация об авторах:

Карелина Мария Юрьевна, Зав. кафедрой деталей машин и теории механизмов, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Пospelов Павел Иванович, Зав. кафедрой изысканий и проектирования дорог, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Таташев Александр Геннадьевич, Профессор кафедры высшей математики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Терентьев Алексей Вячеславович, Доцент кафедры деталей машин и теории механизмов, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Трофименко Юрий Васильевич, Зав. кафедрой техноферной безопасности, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Яшина Марина Викторовна, Зав. кафедрой высшей математики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

CAR WHEEL MODELS USING THE DISTRIBUTIONS LAWS OF FORCES ON A CONTACT PATCH WITH THE ROAD SURFACE

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-72-80

Maria Yu. Karelina,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, karelina@madi.ru

Manuscript received 26 November 2021;
Accepted 16 December 2021

Alexey V. Terentyev,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, gr51@mail.ru

Gregory M. Rosenblatt,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, a-tatashev@yandex.ru

Vladimir B. Yashin,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia, hekkoki@gmail.com

Keywords: Tire model, brush model, dry friction,
contact patch

It is natural to consider the rolling dynamics of an automobile wheel when it interacts with the road surface. At the same time the most difficult and important task is to determine the force components applied to the wheel, such as the friction driving force, the drag force, the rolling and spinning resistance moments that occur in the contact spot from the side of the roadbed. The paper investigates the aspects of dry friction, rolling and sliding of an automobile wheel presented as a deformable body. In this case, it is of great importance to take into account the treads, which is reflected in the tire models. An important aspect is the study of the laws of distribution of normal stresses in the contact area. To solve practical issues of road transport, approaches based on the Magic Formula of Pacejka and calculation methods based on brush, ribbon and string models, in particular, the Brush model of Svendenius, are highlighted. The conditions of its applicability are obtained and justified.

Для цитирования:

Карелина М.Ю., Терентьев А.В., Розенблатт Г.М., Яшин В.Б. Модели автомобильного колеса, использующие законы распределения силовых воздействий в области контакта с дорожным покрытием // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 72-80.

For citation:

Karelina M.Yu., Terentyev A.V., Rosenblatt G.M., Yashin V.B. (2021). Car wheel models using the distributions laws of forces on a contact patch with the road surface. *T-Comm*, vol. 15, no.12, pp. 72-80. (in Russian)

Introduction

When modeling the rolling dynamics of a wheel, the most difficult and important task is to determine the force components applied to the wheel, such as: the driving friction force, the resistance force, the rolling and spinning resistance moments that occur in the contact spot from the side of the roadbed (for an automobile wheel) or from the side of the rail (if we are talking about a railway wheel). For example, it is known that the friction force (clutch) applied to the driving wheel of the vehicle (a moment from the engine is applied to it) is always directed forward in the direction of movement, and a similar force applied to the driven wheel is directed (as a rule) backwards and slows down the movement of the vehicle.

It is clear that the model of the point contact of the wheel with the road is overly simplified and does not correspond to the real practical tasks of studying the dynamics of motor vehicles. With stationary and rectilinear motion, such a model is quite acceptable. The first results in this direction in 1779 were obtained by Sh. Coulon that investigated rolling friction (Figure 1 shows a diagram of the Coulon's experiment).

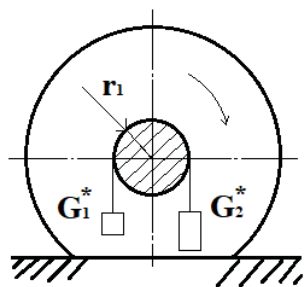


Figure 1. Coulon's scheme of rolling friction experience

Closer to reality is the model of a deformable wheel, which also contacts the deformable road in a certain area (multipoint contact). The O. Reynolds rod model is known [4], in which the wheel is represented as a set of elastic rods emanating from the common center of the wheel or thin disks on a single shaft. At any given time, the wheel contacts the road with several rods, and some rods slip while doing so, and some remain in constant contact. A similar effect occurs for the disk model.

For such models, O. Reynolds in 1876 drew attention to the effect of longitudinal pseudo-sliding, which consisted in the fact that *the path traveled by the center of the wheel of the vehicle (locomotive) DID NOT COINCIDE with the product of the angle of rotation of the wheel by its rolling radius*. Further, in 1925, motorists (Brulier) discovered the phenomenon of lateral pseudo-sliding (withdrawal), which consisted in changing the trajectory of the car under the action of lateral forces (for curved movements) in comparison with what should have been for a car with absolutely solid wheels. Finally, the rolling theory, which takes into account the effects of longitudinal and lateral pseudo-sliding in the case of a railway wheel, was developed in 1926-28 by F. Carter.

Thus, when the deformable wheel is rolling, coupling zones and sliding zones appear in its contact area. Similar (flat) models for continuous (distributed) contact were considered in the works of A. Y. Ishlinskiy. At the same time, the classical Coulon's model was used to calculate the friction force (the main

vector of tangential forces applied to the wheel), which was determined by the distribution of normal stresses in the contact area. Calculating the moments of distributed normal and tangential forces, A. Yu. Ishlinsky explained (both qualitatively and quantitatively) the origin of the moment of friction of rolling resistance. The main result of these studies is as follows. The rolling friction moment is determined by the distribution of normal reactions in the wheel contact area, and also depends on the accepted model for friction forces.

Further development of the dry friction model (for the wheel, in particular) was obtained in the works of N. E. Zhukovsky, M. A. Levin, N. A. Fufaev, Kontensu and V. F. Zhuravlev. In these works, dry friction models were developed based on the principle of summation (integration) of elementary friction forces, as well as their elementary moments. In addition, it is also necessary to consider various (theoretically and practically acceptable) laws of distribution of normal stresses in the contact area. It is these stresses that determine the elementary friction force of the Coulomb. In turn, the law of distribution of normal stresses is determined by the dynamics of vehicle movement (for example, this law depends on whether the vehicle is moving with acceleration or not). Thus, it turns out that the driving force of friction depends on the way the vehicle moves, and this dependence is mutual.

In the tasks of describing the dynamics of ground vehicles, great importance is given to non-holonomic dynamic systems. By the term "non-holonomic systems" we mean a class of nonlinear systems that cannot be coordinated by continuous time-invariant feedback, i.e., there are times when certain constraints are imposed on the state of the system (non-holonomic connections). These systems are controllable, but they cannot move in some directions instantly.

They belong to the class of nonlinear differential systems with non-integrable constraints on motion. Non-holonomic control systems resulting from the formalization of non-holonomic systems include control inputs, are nonlinear control tasks requiring nonlinear tuning. Non-holonomic control systems are being actively studied in connection with the development of robots, including mobile robots, wheeled vehicles and space robotics, etc. In the case of wheeled vehicles, kinematics and dynamics can be modeled based on the assumption that the wheels roll perfectly (Fig. 2).

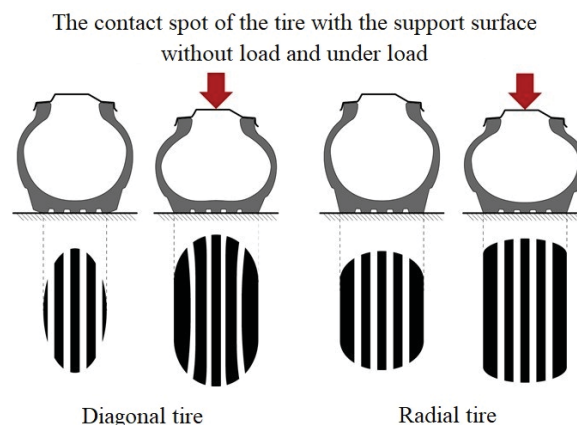


Figure 2. The contact spot of the tire with the support surface without load and under load

Typical limitations of wheeled vehicles are rolling, contact, such as rolling wheels on the ground without slipping, or sliding contact, such as skates sliding.

1. The spinning top model

For the most part, the spinning top was driven into rotation using a thin string previously wound on its shaft. Quickly pulling the string from the shaft of the spinning top, the latter was informed of rotation around the axis AA, 1 which lasted until the friction forces acting at the point

About the supports of the spinning top on any base, did not stop its movement. Many scientists of the world have taken up the study of the laws of motion of the spinning top. The famous English scientist I. Newton (1642-1727) and a member of the Russian Academy of Sciences L. Euler (1707-1783) also worked on this task. Euler in 1765 for the first time published the theory of motion of a solid body near a fixed point of its support and thereby created a theoretical basis for further in-depth study of the laws of motion of the spinning top. The works of French scientists J. Lagrange (1736-1813) and L. Poinso (1777-1859) greatly contributed to the further study and development of methods for the practical use of the properties of a rapidly rotating spinning top.

In 1886, the French Admiral Fleurieu proposed a new device – sextant – for measuring the geographical latitude of the ship's location during a storm, the basis of which was a rapidly rotating spinning top. The spinning top itself was made in the form of a cylindrical body B (Fig. 3), supported by a pointed hairpin at point N. During operation, the device was held by the handle R in an upright position. With the help of a hand pump, compressed air was pumped into it through the hose M, which hit the side surface of the spinning top with directed jets and caused it to rotate around the AAX axis. With the weight of the spinning top at 175 g, it was possible to inform it of rotation at a speed of about 3000 rpm. To ensure the rotation of the spinning top invariably in the horizontal plane, its center of gravity was positioned approximately 1 mm below the fulcrum. The spinning top, even when the handle deviated from the vertical position, continued to remain in the horizontal plane, providing an artificial horizon on the rocking ship.

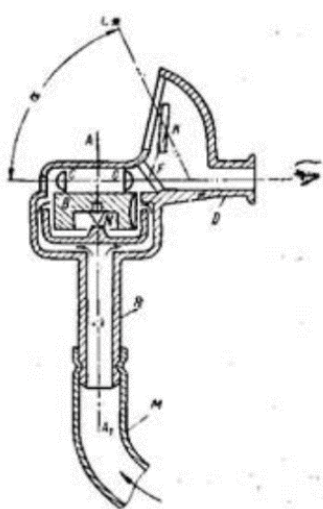


Figure 3. The spinning top model

For the convenience of fixing the horizon plane on the upper end surface of the spinning top, two plano-convex lenses C were fixed, on the flat surfaces of which thin strokes were applied, located parallel to the end surface of the spinning top. The distance between the lenses C corresponded to the focal length, as a result of which, when the spinning top was rotated, the strokes applied to the lenses for the eye observing through the eyepiece D of the device merged into one line. This feature fixed the position of the horizon plane, with respect to which the angle was measured, and the height of the luminary L, similar to how it was described above (Fig. 3).

For simultaneous observation of the artificial horizon line and the luminary, two mirrors A and K were installed in the device. To the turns of the mirror K, the beam coming from the luminary L was combined with the line of the artificial horizon. In this case, the magnitude of the angle α was determined by the angle of rotation of the mirror K. This device is considered to be the first invention in which a spinning top was used, in its shape and device not fundamentally different from ordinary spinning tops, which were widely used in everyday life.

Imagine a spinning top, for example, a thin brass disc (gear) mounted on a thin steel axle. The dynamics of such a spinning top generates the occurrence of precession, gyroscopic moment and other characteristics of the movement of the spinning top.

We introduce a unit vector $\mathbf{n}$, showing the direction of the axis of a symmetrical spinning top in space, i.e., coming from the origin of the coordinate system (from the center of mass) and directed along the axis of the spinning top (Fig. 4).

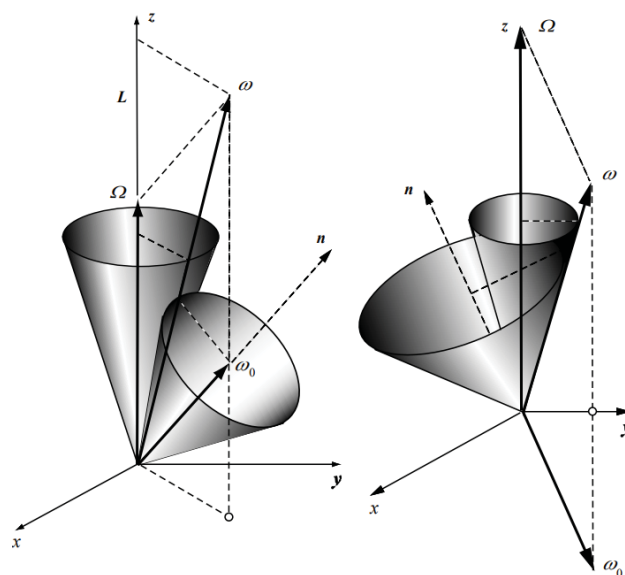


Figure 4. Geometric interpretation of the free precession of a symmetric spinning top

Let $\mathbf{M}$ – the moment of the pulse, and $\boldsymbol{\omega}$ – angular velocity vector. At each moment of time, all three vectors $\mathbf{M}$, $\boldsymbol{\omega}$ and $\mathbf{n}$ lie in the same plane, and when the body moves, their relative position remains unchanged. In the absence of moments of external forces, a plane containing vectors $\mathbf{M}$ and $\boldsymbol{\omega}$, rotates uniformly around the direction of the vector unchanged in space $\mathbf{n}$. In fact, the speed of the point of the spinning top axis that coincides with the end of the vector $\mathbf{n}$, expressed in terms of angular velocity by the formula

This means that at any moment the end of the vector n it moves perpendicular to the plane under consideration, dragging it along with the vectors lying in it n and ω . Thus, the entire plane rotates uniformly around L , and the vectors lying in it n and ω synchronously describe cones in space, the vertices of which lie at the origin. About this behavior of vectors n and ω they say they commit around L *regular precession*. It can be shown that the angular velocity of this precession Ω proportional to the moment of the pulse L and is inversely proportional to the central moment of inertia of the spinning top $I \perp$ relative to the transverse axis: $\Omega = L/I \perp$. Such a free precession of the axis of the spinning top, which occurs in the absence of external moments when the angular velocity does not coincide with the axis of the spinning top, is also called nutation. Note that the axis of the spinning top retains its direction in space (does not precess) if, during free rotation, the angular velocity is directed along the axis of the spinning top, i.e., in such cases nutation does not occur.

2. From gyroscope to multicomponent dry friction

As a result of experimental observations of the behavior of the Fleurieu gyroscope, which Contence conducted, he began his research, as he received evidence of unsatisfactory compliance with the theory. Theoretical predictions initially followed from the ideas about the interaction of the gyroscope support with the base axle either in the form of one-dimensional dry friction, or in the form of no slippage at the point of contact (non-holonomic formulation), or in the form of purely viscous friction.

Contensu noted [15] that the use of Coulomb's law to describe friction in the case of a combination of simple movements (sliding and rolling, sliding and twisting) should not be true. This is evidenced by simple and well-known experiments, for example, rotation around the vertical of a car wheel when rolling or the sliding of a polisher brush when it rotates. Although the contact zone of the rubbing bodies in the case of the Fleurieu gyroscope was negligible and many simply considered the contact point, Contensu called this zone a circle and considered Coulomb's law in differential form inside this circle so.

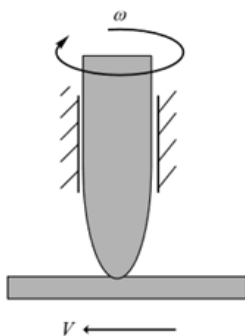


Figure 5. Rotating rod

We will consider a vertically rotating rod resting with a spherical end on a flat support moving at a constant speed (Fig. 5.). The contact area is a circle of radius ε , in which the normal voltage depends only on the distance ρ to the center of the circle: $\sigma(\rho)$ Relative sliding is carried out at a speed of v , the angular velocity of the spin is indicated by ω (Fig. 6).

Relative sliding speed v_c at a point having polar coordinates in the contact area ρ, θ it is expressed as follows:

$$v = (v - \omega \rho \sin \theta, \omega \rho \cos \theta).$$

The differential of the friction force directed against the relative velocity at this point, in accordance with Coulomb's law, has the form:

$$dF = -f \sigma(\rho) \frac{v_c}{|v_c|} ds.$$

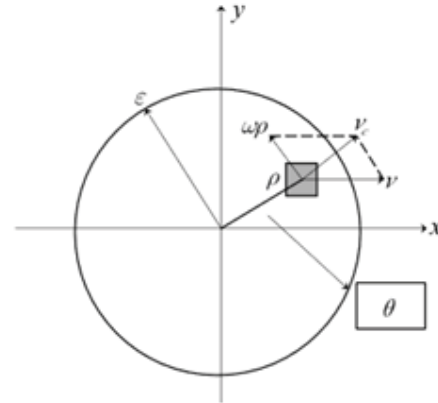


Figure 6. Contact area

The moment of this elementary force:

$$\begin{aligned} dM &= -|\rho \times dF| = -\rho_x dF_y + \rho_y dF_x \\ &= f \sigma(\rho) \rho (\rho \omega - v \sin \theta) \frac{ds}{|v_c|}. \end{aligned}$$

As a result, for the moment and force we get the following expressions:

$$\begin{aligned} M &= -f \int_0^\varepsilon \int_0^{2\pi} \frac{(\rho \omega - v \sin \theta) \sigma(\rho) \rho^2 d\rho d\theta}{\sqrt{\omega^2 \rho^2 - 2v\omega \rho \sin \theta + v^2}}, \\ F &= M = -f \int_0^\varepsilon \int_0^{2\pi} \frac{(v - \omega \rho \sin \theta, \omega \rho \cos \theta) \sigma(\rho) \rho^2 d\rho d\theta}{\sqrt{\omega^2 \rho^2 - 2v\omega \rho \sin \theta + v^2}}. \end{aligned}$$

Note that due to the symmetry, the expressions for the force relative to the x-axis of its component along the y-axis are zero.

Let's introduce the notation $u = \omega \varepsilon, r = \rho/\varepsilon$. Given these notations, we rewrite the expressions for the modulus of the moment and the modulus of the nonzero component of the force:

$$\begin{aligned} M(u, v) &= f \varepsilon^3 \int_0^1 r \sigma(r) \int_0^{2\pi} \frac{ur^2 - v r \sin \theta}{\sqrt{u^2 r^2 - 2uv r \sin \theta + v^2}} d\theta dr, \\ F(u, v) &= f \varepsilon^2 \int_0^1 r \sigma(r) \int_0^{2\pi} \frac{v - ur \sin \theta}{\sqrt{u^2 r^2 - 2uv r \sin \theta + v^2}} d\theta dr. \end{aligned}$$

Let us first consider as an example a point contact by Hertz. We assume that both contacting surfaces are locally spherical, then:

$$\sigma(r) = \frac{3N}{2\pi \varepsilon^2} \sqrt{1 - r^2}.$$

From the presented relations it follows that when $\varepsilon \rightarrow 0$ the moment of friction also tends to zero, and for this reason it was not even considered. As for the friction force, it has the form:

$$F(u, v) = f \frac{3fN}{2\pi} \int_0^1 r \sqrt{1 - r^2} \int_0^{2\pi} \frac{(v - ur \sin \theta) d\theta dr}{\sqrt{u^2 r^2 - 2uv r \sin \theta + v^2}}$$

Argument $u = \omega r$ has the order of smallness ε at the end ω . In a small area $|v| \leq |u|$ this function can be approximated by a tangent at zero, and outside of it by a horizontal line corresponding to the usual Coulon's law.

The obtained ratio allows us to draw a fundamentally important conclusion: in the case of point contact, the friction force does not have the form of the original Coulomb law, in particular, it is equal to zero identically by u : $F(0, u) \equiv 0$, ($u \neq 0$). That is, there is no resting friction force, if only the twisting takes place, no matter how small it may be. So, references to the law of dry friction to justify the absence of slippage when using a non-holonomic formulation of the problem of rolling some bodies by others, as is often done, are inappropriate.

The dependence of the friction force at a point on the spinning speed is very significant and there is no way to neglect it. In cases where researchers in problems with combined friction accept the condition of no slippage, they must either indicate by what physical forces it can be provided, or, realizing such a condition is approximate, talk about evaluating the accuracy of such an approximation. The term "absolutely rough surface" cannot be based on the idea of dry friction.

3. Rolling theory approaches

In addition to sliding friction, Sh. Coulon studied rolling friction, for which he created an experimental setup (Fig. 7) consisting of two parallel wooden bars on which a cylindrical wooden roller rolled. A moment proportional to the difference in the weights of the loads fixed at opposite ends of the rope was applied to the roller by means of a rope thrown over it. The results of experiments on this installation Coulomb expressed the widely used and currently used formula for the force overcoming the rolling resistance of the roller:

$$T = k \frac{Q}{r},$$

where Q – the weight of the roller together with the loads, r – radius of the rink, k – the proportionality coefficient having the dimension of length.

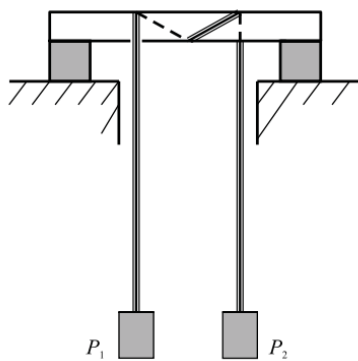


Figure 7. Coulon's experimental setup

Similarly, to the sliding friction law, in a more detailed entry, the rolling friction force has the form:

$$T = \begin{cases} k \frac{Q}{r} \operatorname{sgn} \omega, & \omega \neq 0, \\ \left[-k \frac{Q}{r}, k \frac{Q}{r} \right], & \omega = 0, \end{cases}$$

where ω represents the angular velocity of the roller. If there is no rolling, then the rolling force can take any value in the specified interval.

Rolling friction is a more complex phenomenon than sliding friction. In the case of sliding, the contact area is stationary relative to the sliding body, in the case of rolling, this area is movable both relative to the body and relative to the stationary surface. In addition, rolling cannot occur without sliding friction.

Let the center of the rink be carried away by force T , attached to its center, moving at a constant speed V (Fig. 8). It is required to find the law of changing the angle of rotation of the roller.

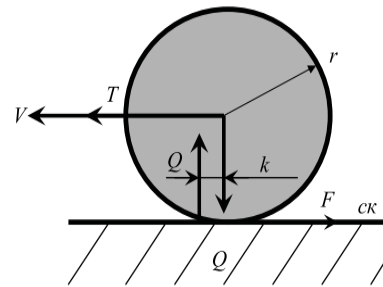


Figure 8. The scheme of the skating rink movement

Let's write down the equations of motion of the rink

$$mV = T - F_{cx} = T - fQ,$$

$$J\omega = -M_{kxx} + rF_{cx} = -kQ + rF_{cx}$$

(We assume for certainty that $\omega \geq 0, V - \omega r \geq 0$).

If the velocity of the center of mass is constant ($V \equiv 0$), that $T = fQ$ and the second equation of the written system takes the form:

$$J\dot{\omega} = (-k + fr)Q.$$

If $fr > k$ (sliding friction prevails over rolling friction), then the rotation of the roller accelerates until the slipping of the roller relative to the base stops. The sliding friction force becomes significant at the point of rupture: $Q < F_{cx} = k \frac{Q}{r} < fQ$.

If $fr < k$ (rolling friction prevails over sliding friction), then the rotation of the roller slows down, the limiting movement of the roller is translational, the sliding speed of the roller relative to the base is equal to the speed of the center of the rink. The rolling friction moment becomes significant at the point of rupture: $0 < M_{kxx} = fQr < kQ$.

If $fr = k$, then the angular velocity does not change its magnitude, both rolling and sliding take place in stationary mode.

It is known that mankind invented the wheel as a means of overcoming dry friction. In the case of rolling an absolutely rigid wheel on an absolutely rigid horizontal surface, there is really no friction, i.e., slippage. In reality, energy losses during rolling remain, although they become significantly less.

A significant contribution was made to the construction of a qualitative rolling theory in 1876. Osborne Reynolds, [4], who discovered the following experimental fact. It consists in. That the area of contact of elastic bodies during rolling is divided into areas of sliding (slipping) and adhesion (setting), Figure 9. At the same time, with an increase in the moving or braking moment, the area of the slip zone increases, and the area of the adhesion zone decreases.

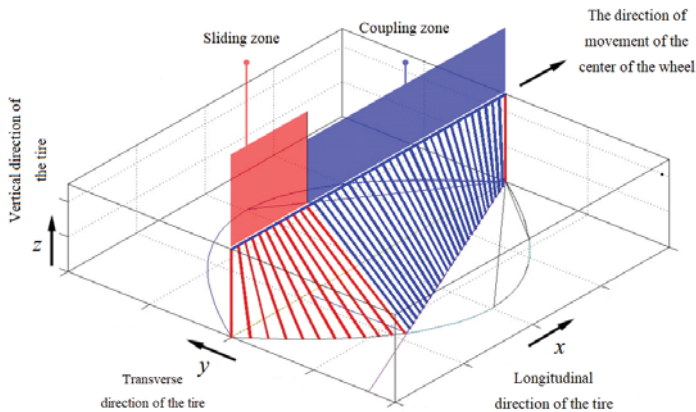


Figure 9. Diagram of zones in the tire contact spot with the road

This happens until the area of the coupling zone becomes zero and a complete slip occurs. The zones are characterized as follows. In the slip zone, the points of contact between the wheels and the road move relative to each other, and in the clutch zone these points are stationary relative to each other and the wheel is rolling.

4. Classical examples are Chaplygin's sleigh and the Appel mechanism

In [5], the problem of controlling the movement of three-wheeled robots with two driving and passive piano wheels is considered. The generated model is reduced to a system:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} - a\omega^2 - a\omega^2 + \sigma v + \gamma \sigma \omega &= p, \\ (j + \theta \sigma^2) \dot{\omega} + a v \omega - a a \omega^2 + \sigma \omega + \gamma \sigma v + \sigma \sigma v + \sigma \gamma \sigma \omega &= q + \sigma p \end{aligned} \quad (1)$$

Here are the parameters $j > 0$, $\theta > 0$ determined by the inertial mass characteristics of the system, a, σ set the position of the center of mass of the body relative to the wheels, $\sigma \geq 0$ – normalized viscous friction in wheel axles, $\gamma (|\gamma| < 1)$ – parameter that determines the asymmetry of friction, p, q – control of the longitudinal speed and rotation of the housing. It is assumed $a > 0$, since the reverse situation is equivalent to changing the sign of the speed.

The behavior of the system is investigated in the case when the control signals p, q permanent. Then the system (1) is autonomous and the use of the phase plane ω, v it is very convenient for studying movements at different parameter values.

Simple cases. At certain values of the parameters, equations (1) turn into equations of nonholonomic systems considered by the classics in the works.

Chaplygin's Sleigh. When $p = q = \sigma = \gamma = 0$ system (1) takes the form:

$$v^* - a\omega^2 = 0, \quad j\dot{\omega} + av\omega = 0, \quad (2)$$

coincides with the system obtained and studied by Chaplygin [11] and Karateodori [12], who studied the inertia motion along the horizontal plane of the "Chaplygin sleigh – a nonholonomic mechanical system representing a solid body resting on the plane with two "slippery" points and the point of the skate blade. The

position of the contact point of the skate corresponds to the middle of the segment connecting the attachment points of the wheels of the mobile robot. Stationary points $\omega_0 = 0, v_0 = \text{const}$ systems (2) fill the entire ordinate axis. It is obvious that the stationary points correspond to the robot's movements at a constant speed along straight line.

System (2) has an integral:

$$v^2 + j\omega^2 = \text{const},$$

which defines a family of ellipses ($j > 0$) – phase trajectories on the plane ω, v . When $a > 0$ the image point moves along a phase trajectory from bottom to top; hence, stationary points $v_0 < 0$ unstable, $v_0 > 0$ – stable. Thus, the movements of the robot with the center of mass of the body behind the wheels are unstable, in front – stable. The intersection of the phase trajectory of the abscissa axis corresponds to the point of return of the trajectory of the robot.

Appel Mechanism. When $q = \sigma = \gamma = 0$ system (1) takes the form:

$$v^* - a\omega^2 = p, \quad j\dot{\omega} + av\omega = 0. \quad (3)$$

These equations coincide with the equations obtained and studied by Appel [13] and later by Hamel [14] for a non-holonomic mechanical system, which differs from Chaplygin's sleigh in that it has a wheel instead of a skate, which is affected by a constant torque created by means of a load on a thread thrown over a block mounted on the body and wound on a pulley coaxial with the wheel. Here are some results of these works. If $p > 0$, then there are no stationary points; if $p < 0$, then we have two stationary points:

$$v_0 = 0, \quad \omega_0 = \pm \sqrt{-p/a}. \quad (4)$$

Autonomous equations (3), excluding time, can be reduced to the form

$$(p/\omega^2 + a)d(\omega^2) = -(a/j)d(v^2). \quad (5)$$

Equation (5) obviously has an integral

$$a\omega^2 + p \ln(\omega^2) + (a/j)v^2 = C,$$

where C – an arbitrary constant. Phase trajectories for the case $p < 0$ are shown in Fig. 10. The stationary points in this case are the centers. It can be seen that stationary motion (4) – the rotation of the body at a constant speed relative to a non-moving point – is realized under the condition that the moment p on the wheel balances the centrifugal force $a\omega^2$.

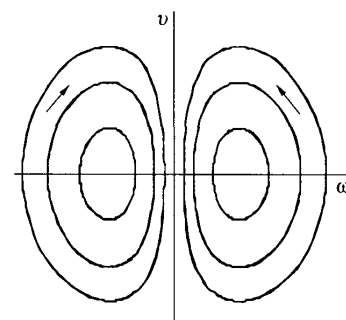


Figure 10. Phase trajectories of the "Appel Mechanism"

5. Connection of dry friction, rolling and contact spots

The forces acting on the tires of a ground vehicle determine the trajectory or path of the vehicle. These forces are limited by the friction of the contact spot between the tire and the road surface.

The ability to obtain information about the value of the coefficient of friction before using maximum tire forces can be a determining factor in preventing an accident or in significantly mitigating the severity of the situation. It is known that in practice all chassis safety is provided by systems such as electronic stability control and anti-lock braking system and more modern systems that mitigate the consequences of collisions by braking. The efficiency of such systems can be significantly improved if information about the current level of friction is sent to the control systems.

Tire modeling is an important step in the process of understanding and evaluating the friction and force components acting in the contact spot between the tire and the road. Research on tire characteristics and modeling of their dynamics has been actively conducted over the past 70 years. The level of detail in these models ranges from basic first-order local effects at the macroscopic scale to detailed high-level models at the microscopic scale, for example, described by finite element methods.

The classical representation of the dynamics of the wheel of a ground vehicle in modern engineering is a tire model that takes into account the phenomenon of force sliding in the contact spot on a macroscopic scale. Practical applications of complex theoretical models of mechanics require simplified, basic relations, so it is sufficient to consider stationary steady-state tire models where the parameters take constant values. Then the onboard sensors will not display fast stochastic and poorly controlled signals taken from the bus zones.

Another aspect related to the choice of a model is its models and, in particular, complexity in terms of the number of parameters. It is well known that excessive parameterization in models leads to a lack of convergence of model parameters or to incorrect modeling results. Due to the complexity of interaction and the presence of random factors of road infrastructure, this fact is especially evident in the problems of estimating friction parameters in real automobile traffic. Therefore, models with a minimal set of parameters describing the dynamics of the wheel have a high priority for technical applications.

Most adequate tire models are tied to the properties of power components that provide interaction with sliding and rolling forces. It is worth noting the dependence discovered by Bakker [9] and then developed by Pacejka [8], which is now commonly called the "magic formula".

The general form of the Magic Formula, given by Pacejka [8], [9], is:

$$y = D \sin\{C \arctan [Bx - E (\arctan (Bx))]\},$$

where B, C, D and E represent fitting constants and y is a force or moment resulting from a slip parameter x. The formula may be translated away from the origin of the x-y axes. The Magic Model became the basis for many variants.

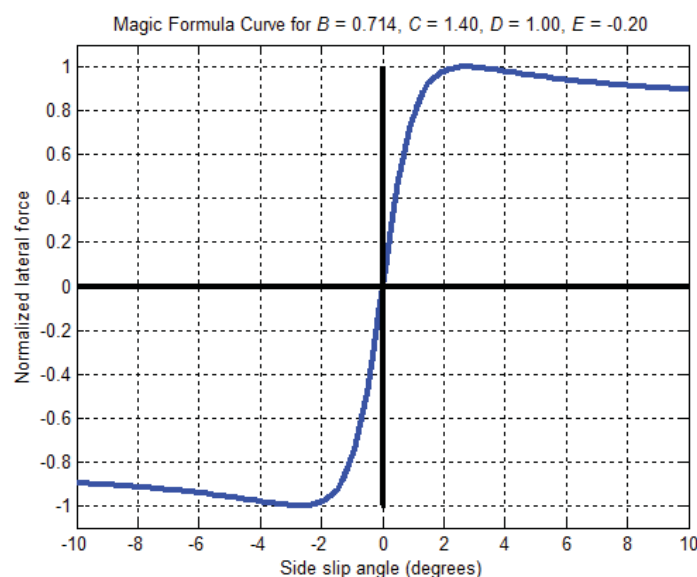


Figure 11. Pacejka's graph of function dependence from Magic Formula

An interesting application of this formula for the design of multi-wheeled mobile robots is proposed in [10].

The most productive for applications is the brush, brush model (Brush model), the advantages of which are that it allows you to describe the evolution of force components in the contact spot.

Swedish researchers, namely the well-known scientific group of Svendenius, [3], proposed a simple version of the model of a clean sliding brush (Brush model). This model has been confirmed by experiments on real data, and allows it to be adapted to different road surfaces and different types of tires.

The advantages of the brush model are that only some simple assumptions about the properties of the tire, the contact spot and the characteristics of the road surface are enough to formalize it.

We formulate standard assumptions that allow us to obtain a model that is completely determined by two parameters. The basic assumption is that the tire can be divided into an infinite number of bristles that deflect when in contact with the road surface. Each bristle stretches in the transverse direction, is considered to have an elastic reaction and deforms independently of other bristles. The spot of contact with the bristles is additionally illustrated in figure 12.

In addition, standard assumptions are introduced.

1. The vertical distribution of tire pressure is a parabolic function.
2. The friction force between the tire and the road is described by Coulomb friction, i.e., there is a pre-shear effect, etc.
3. The friction force is considered isotropic, i.e., the friction force is limited to a circle in the plane of the road.
4. The influence of the camber angle is not taken into account.

5. It is assumed that the tire frame is rigid, and it is assumed that all flexible movements occur in the bristle in the contact spot.

The road surface is considered flat and solid, i.e., no part of the road surface is moved or transported in a contact spot, for example, on snow-covered roads or gravel roads.

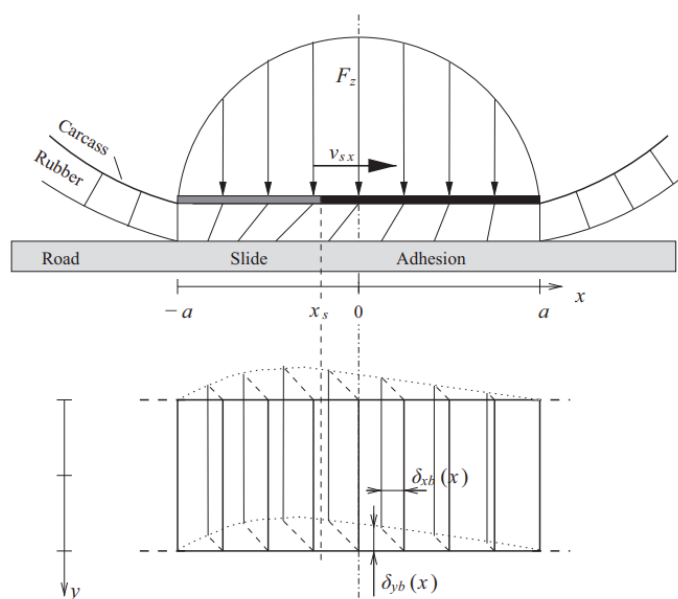


Figure 12. Scheme of brush model bristles in the contact spot

Note that Assumption 1 is standard, and the arguments in favor of this assumption are confirmed by experimental data. Moreover, it is valid both for the case of pure longitudinal sliding and for the case of pure lateral sliding.

Assumption 2 reduces the number of parameters, so that only one parameter related to friction is sufficient necessary.

Assumption 3 allows us to characterize the tire friction in both the longitudinal and transverse directions, and with one parameter. This is also a simplification of the tire model of a real ground vehicle, which should not have a frame and the same thread pattern in the longitudinal and transverse directions. The assumption made is a compromise between simplicity and accuracy.

Assumption 4 does not take into account the camber angle is also introduced to simplify the model, it is assumed that the camber angle is 0. If we do not make this assumption, we will also get an additional parameter.

Assumption 5 is the standard assumption for the brush approach and has higher confidence in the longitudinal direction. The assumption is not to include the rigidity of the frame also to minimize the number of parameters.

Assumption 6 on the road surface makes it possible to simplify the description of the interaction of the tire with the road with fewer parameters.

Conclusion

In this paper, we present an approach that allows us to analyze the processes of wheel dynamics during the movement of a ground vehicle. Comparisons of various elastic wheel models are carried out within the framework of the theory of multicompo-

nent dry friction. The ways of theory development for practical engineering applications are outlined.

References

1. V.V. Kozlov (2010). Lagranzheva mekhanika i sukhoe trenie [Lagrangian mechanics and dry friction]. *Nelineinaya dinamika* [Non-linear dynamics]. Vol. 6, No. 4, pp. 855-868.
2. A.A. Andronov, V.F. Zhuravlev (2010). Sukhoe trenie v zadachakh mekhaniki [Dry friction in problems of mechanics]. Moscow: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ.; Izhevsk: In-t komp'yut. issled. Publ. 184 p.
3. V.V. Andronov, V.F. Zhuravlev (2010). Dry friction in problems of mechanics. Moscow – Izhevsk: Research Center “Regular and Chaotic Dynamics”, Institute of Computer Research. 184 p.
4. J. Svendenius (2003). Tire Models for Use in Braking Applications. Department of Automatic Control Lund Institute of Technology. Lund, 2003. 95 p.
5. O. Rynolds (1876). On rolling friction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Vol. 166 (I). Pp. 155-174.
6. F. Bruzelius, M. Hjort, J. Svendenius (2014). Validation of a basic combined-slip tyre model for use in friction estimation applications. *Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering* 2014, Vol. 228(13). Pp. 1622-1629. DOI: 10.1177/0954407013511797.
7. V.M. Budanov, E.A. Devyanin. On the movement of wheeled robots. *Applied Mathematics and Mechanics*, 67 (2), pp. 244-244.
8. V.A. Koronotov (2018). Presentation of a new theory of rolling on the example of describing the movement of the driven wheel of a locomotive (car). *Modern technologies. System analysis. Modeling*, (1 (57)), pp. 49-59.
9. G. Rosenblat, V. Tishkin, V. Yashin (2020). Model of carriage movement on plane with dry friction forces. *iJOE*. Vol. 16, No. 8, pp. 85-89.
10. H.B. Pacejka (2012). Tire and vehicle dynamics. Besselink, Igo (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann. p. 165. ISBN 978-0-08-097016-5. OCLC 785829133.
11. E. Bakker, H.B. Pacejka, L. Lidner. (1989). A New Tire Model with Application in Vehicle Dynamics Studies. *Proc. 4th Int. Conf. Automotive Technologies, Monte Carlo*, SAE paper 890087.
12. A.P. Aliseichik, V.E. Pavlovsky (2010). Research methodology for dynamic comfort of movement of a multi-wheeled mobile robot. *M.V. Keldysh Institute preprints*. No. 84.27
13. S.A. Chaplygin (1911). On the theory of motion of nonholonomic systems, the reducing factor theorem. *Mathematical collection*. Vol. 28, no. 2, pp. 303-314.
14. C. Carathéodory (1933). Der schlitten. *ZAMM. Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 13(2), 71-76.
15. M.P. Appell (1911). Exemple de mouvement d'un point assujetti é une liaison exprimée par une relation non linéaire entre les composantes de la vitesse. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo* (1884-1940), 32(1), 48-50.
16. G. Hamel (1978). Theoretische Mechanik: Eine einheitliche Einführung in die gesamte Mechanik. 2nd ed. Berlin: Springer. 796 p.
17. P. Contensu (1967). The relationship between sliding friction and spinning friction and its consideration in the theory of the top. Gyroscopy problems. Moscow: Mir. Pp. 60-77.

МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА С ДОРОЖНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Карелина Мария Юрьевна, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, karelina@madi.ru

Терентьев Алексей Вячеславович, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Розенблатт Григорий Маркович, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, gr51@mail.ru

Яшин Владимир, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, hekkoki@gmail.com

Аннотация

Динамику качения автомобильного колеса естественно рассматривать при его взаимодействии с дорожным покрытием. При этом наиболее трудной и важной задачей является определение силовых компонентов, приложенных к колесу, таких как движущей силы трения, силы сопротивления, моментов сопротивления качению и верчению, которые возникают в пятне контакта со стороны полотна дороги. В работе исследованы аспекты сухого трения, качения и скольжения автомобильного колеса, представленного как деформируемое тело. В этом случае большое значение имеет учет протекторов, что отражается в моделях шин. Важным аспектом является изучение законов распределения нормальных напряжений в области контакта. Для решения практических вопросов автомобильного транспорта выделены подходы, основанные на Magic Formula Пасейки и методы расчетов, основанные на щеточных, ленточных и струнных моделях, в частности, Brush-модель Свендениуса. Получены и обоснованы условия ее применимости.

Ключевые слова: Модель шины, модель щетки, сухое трение, пятно контакта.

Литература

1. Козлов В.В. Лагранжева механика и сухое трение // Нелинейная динамика. 2010. Т. 6. № 4. С. 855-868.
2. Андронов А.А., Журавлев В.Ф. Сухое трение в задачах механики. М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2010. 184 с.
3. Svendenius J. Tire Models for Use in Braking Applications // Department of Automatic Control Lund Institute of Technology. Lund, 2003. 95 p.
4. Rynolds O. On rolling friction // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1876. Vol. 166 (I). Pp. 155-174.
5. Bruzelius F., Hjort M., Svendenius J. Validation of a basic combined-slip tyre model for use in friction estimation applications. Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering 2014, Vol. 228(13) 1622-1629. DOI: 10.1177/0954407013511797.
6. Буданов В.М., Деянин Е.А. О движении колесных роботов. Прикладная математика и механика, 67(2), 244-244.
7. Коронатов В.А. Представление новой теории качения на примере описания движения ведомого колеса локомотива (автомобиля). Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2018, (1 (57)). С. 49-59.
8. Rosenblat G., Tishkin V., Yashin V. Model of carriage movement on plane with dry friction forces. iJOE. Vol. 16, No. 8, 2020. С. 85-89.
9. Pacejka H.B. Tire and vehicle dynamics. Besselink, Igo (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann. 2012. 165 p. ISBN 978-0-08-097016-5. OCLC 785829133.
10. Bakker E., Pacejka H.B., Lidner L. A New Tire Model with Application in Vehicle Dynamics Studies. Proc. 4th Int. Conf. Automotive Technologies, Monte Carlo, 1989, SAE paper 890087, 1989.
11. Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Методика исследования динамической комфортабельности движения многоколесного мобильного робота // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 84. 27 с.
12. Чаплыгин С.А. К теории движения негोलомных систем, теорема о приводящем множителе // Математический сборник. 1911, Т.28, вып. 2. С. 303-314.
13. Carathodory C. Der schlitten. ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik, 1933. 13(2), 71-76.
14. Appell M.P. (1911). Exemple de mouvement d'un point assujetti une liaison exprime par une relation non lin?aire entre les composantes de la vitesse. Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo (1884-1940), 32(1), 48-50.
15. Hamel G. Theoretische Mechanik: Eine einheitliche Einf?uhrung in die gesamte Mechanik. 2nd ed. Berlin: Springer, 1978. 796 p.
16. Контенсу П. Связь между трением скольжения и трением верчения и ее учет в теории волчка. Проблемы гироскопии. М.: Мир 1967. С. 60-77.