

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сотт: 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", 2023

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

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

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", 2023

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

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

- Кузнецов А.С., Козлов С.В.**
Тестирование применения информационного поля для навигации объектов **4**
- Бустугин А.Р., Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А., Киришина И.А.**
Увеличение эффективности обнаружения воздушных судов на догонных курсах в импульсно-доплеровских бортовых РЛС с малой высотой полета носителя **11**
- Гайнутдинов Т.А.**
Оценка влияния формы простого микрополоскового излучателя на его широкополосность **17**
- Уханов Е.В.**
Статистические характеристики сигнала на выходе оптимальной радиолокационной системы распознавания подвижных воздушных объектов **26**

СВЯЗЬ

- Редругина Н.М.**
Модели и методы вычисления задержек при предоставлении услуг пользователем на сервисных платформах сеансовых инфокоммуникационных услуг **32**

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

- Михайлов В.Ю., Мазепа Р.Б.**
Применение технологий когнитивного радио для информационной поддержки автобусных путешествий **39**

СВЯЗЬ

- Бужин И.Г., Деревянкин А.Ю., Антонова В.М., Перевалов А.П., Миронов Ю.Б.**
Сравнительный анализ REST и gRPC, используемых в системе мониторинга виртуализированной инфраструктуры коммуникационной сети **50**

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Kuznetsov A.S., Kozlov S.V.**
Testing the application of the information field for object navigation 4
- Bestugin A.R., Ryzhikov M.B., Novikova Y.A., Kirshina I.A.**
Increasing the effectiveness of aircraft detection on catch-up courses in pulse-Doppler airborne radars with a low carrier flight altitude 11
- Gainutdinov T.A.**
Evaluation of the effect of the shape of a simple microstrip radiator on its broadband 17
- Ukhanov E.V.**
Statistical characteristics of the signal at the output of the optimal radar system for identifying mobile air objects 26

COMMUNICATIONS

- Redrugina N.M.**
Models and methods for calculating delays in the provision of services by the user on the service platforms of session infocommunication services 32

PUBLICATIONS IN ENGLISH

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Mikhaylov V.Yu., Mazepa R.B.**
Application of cognitive radio technologies for bus travel in-formation support 39

COMMUNICATIONS

- Buzhin I.G., Derevyankin A.Yu., Antonova V.M., Perevalov A.P., Mironov Yu.B.**
Comparative analysis of the REST and gRPC used in the monitoring system of communication network virtualized infrastructure 50

T - C o m m

Telecommunications and transport
Volume 17. No. 4-2023

Release date: 28.04.2023

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 Dulkeyts

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*

Georgii A. Omel'yanov

Doctor of sciences, Universidad de Sonora, Department of Mathematics, Hermosillo, *Mexico*

Alexander G. Samoilov

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*

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАВИГАЦИИ ОБЪЕКТОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-4-10

Кузнецов Андрей Сергеевич,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ, г. Казань, Россия,
mossberg@bk.ru

Козлов Сергей Владимирович,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ, г. Казань, Россия,
skozlov68@yandex.ru

Manuscript received 12 March 2023;
Accepted 05 April 2023

Ключевые слова: информационное поле,
дальномерный метод определения координат,
корреляционный приём, кодовое разделение
каналов, прямое расширение спектра,
ультразвуковой частотный диапазон

В статье проведён анализ эффективности определения координат пассивных объектов по сигналам системы передачи информации, работающей в информационном поле. Под информационным полем понимается поле всех физических по природе сигналов (электрических, акустических, электромагнитных, оптических), существующих в определённой области пространства, потоки данных которых в реальном времени содержат информацию о характеристиках среды распространения и о взаимодействии с расположенными в этой области пространства объектами [1]. Информационное поле сформировано в пределах лаборатории в ультразвуковом диапазоне с помощью специально разработанного стенда, который передаёт информацию с использованием технологии кодового разделения каналов с прямым расширением спектра. В состав стенда входят устройства для приёма и передачи ультразвуковых сигналов, а также устройство обработки National Instruments, включающее ПК NI-PXIe-8311, систему сбора данных NI-PXI 7841r с ЦАП-АЦП и ПЛИС Virtex5-LX30, для которого разработаны блок-схемы алгоритмов и написан код на языке Verilog. Оконечная обработка реализована в среде MATLAB. При проведении тестирования и анализа эффективности применения информационного поля для навигации объектов осуществлялось определение координат объекта и разности значений системного времени и времени на объекте. Вычисление указанных величин производится методом наименьших квадратов. Также определены отклонения координат и указаны факторы, обуславливающие возникшие отклонения. Вычислены вероятностные характеристики и величины отклонений для проверки зависимости величины отклонения координат от дальности между передающим и приёмным устройствами.

Информация об авторах:

Кузнецов Андрей Сергеевич, ассистент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ", г. Казань, Россия
Козлов Сергей Владимирович, профессор, доцент, д.т.н., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ", г. Казань, Россия

Для цитирования:

Кузнецов А.С., Козлов С.В. Тестирование применения информационного поля для навигации объектов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 4-10.

For citation:

Kuznetsov A.S., Kozlov S.V. (2023) Testing the application of the information field for object navigation. *T-Comm*, vol. 17, no.4, pp. 4-10. (in Russian)

Введение

В настоящее время для передачи информации используются различные широкополосные сигналы. При распространении эти сигналы искажаются, взаимодействуя с разнородными объектами, средой, препятствиями и так далее. В результате этого сигналы на входе приёмных устройств несут информацию не только о передаваемых данных, но и об области пространства, в которой распространялся сигнал.

Совокупность этих сигналов в этой работе рассматривается как информационное поле, под которым понимается поле всех физических по природе сигналов (электрических, акустических, электромагнитных, оптических), существующих в определённой области пространства, потоки данных которых в реальном времени содержат информацию о характеристиках среды распространения и о взаимодействии с расположенными в этой области пространства объектами. Таким образом, информационное поле позволяет реализовать ряд дополнительных функций, расширяющих возможности радиотехнических систем передачи информации [2]. Возможна реализация таких сервисов, как позиционирование, постановка помех, целеуказание, локация и другие. В этой работе осуществляется исследование эффективности навигации объектов в информационном поле по сигналам систем передачи информации.

Обобщённая трактовка информационного поля и классификация объектов применительно к радиотехническим системам различного назначения рассмотрена в [3]. Из всего набора объектов далее будут рассматриваться только «свои» активные и пассивные объекты. Под «своими» будем понимать объекты, входящие в систему, в интересах которых она и функционирует. Под активными объектами будем понимать объекты, излучающие сигналы с уровнем выше уровня собственных шумов в частотном диапазоне формирования информационного поля, а под пассивными не излучающие таких сигналов [4].

Постановка задачи

Задачей является тестирование применения информационного поля для позиционирования объектов с помощью разработанного стенда, работающего в ультразвуковом диапазоне [5]. Стенд осуществляет приём сигналов информационного поля и позиционирование «своих» пассивных объектов в лаборатории кафедры площадью 15 м². Стенд представляет собой систему передачи данных, в которой существует 4 канала, разделённых последовательностями Уолша.

Первый канал является пилотным, служит для обнаружения сигналов активных объектов и определения задержки их распространения от активного до пассивного объекта.

Второй – канал синхронизации, по которому передается информация о системном времени. Для осуществления навигации объектов в сообщения канала синхронизации добавлено поле с координатами активного объекта (x_{n^A}, y_{n^A}) .

Два оставшихся канала используются для передачи трафика.

Тестовый стенд осуществляет передачу и приём сообщений, а также определение двумерных координат (x_n, y_n) «своих» пассивных объектов P_n , $n = \overline{1, N}$. Формирование информационного поля осуществляется N^A фиксированными

ми «своими» активными объектами P_{n^A} , $n^A = \overline{1, N^A}$ с координатами (x_{n^A}, y_{n^A}) .

Для передачи информации в системе используем широкополосные QPSK сигналы с прямым расширением спектра [6]. Для обеспечения однозначного измерения расстояния между объектами информационного поля в качестве расширяющей последовательности используется M-последовательность длиной 32767. При этом каждый активный объект должен обладать уникальным временным сдвигом M-последовательности $t_{n^A}^{offs}$. Для обеспечения необходимой дальности действия системы каждый информационный бит кодируется 128 чипами, каждый чип соответствует 40 отсчётам сигнала на несущей частоте. Таким образом, на один информационный бит приходится 5120 отсчётов.

Разрабатываемый стенд базируется на комплексе National Instruments, оснащённом ПК с ПО Labview (модуль NI-PXIe-8133), ПЛИС Virtex5-LX30 с ЦАП-АЦП (модуль NI-PXI-7841R) [7] и разработанными ультразвуковыми передатчиками и приёмниками на базе MA40S4S и MA40S4R [8] соответственно.

Определение координат объектов

Поскольку информационное поле формируется только в лаборатории, в пределах которой кривизной подстилающей поверхности можно пренебречь, то для определения координат объектов целесообразно использовать локальную (декартову) систему координат. Для определения координат объектов в лаборатории можно воспользоваться дальномерным или разностно-дальномерным методами, так как определение угловых координат в помещении затруднено.

Небольшие размеры лаборатории не позволяют получить достаточную базу, для точного определения координат разностно-дальномерным методом. Поэтому в работе определение координат объектов информационного поля будем осуществлять с использованием дальномерного метода.

Обозначим за $d(P_n, P_{n^A} | \{P_N\})$ измеренное расстояние от n -го пассивного объекта P_n до n^A -го активного объекта P_{n^A} .

Тогда координаты n -го пассивного объекта P_n определяются с помощью критерия минимума среднеквадратического отклонения [9]:

$$P_n = \arg \min_{P_n} \left(\sqrt{(x_{n^A} - x_n)^2 + (y_{n^A} - y_n)^2 - d(P_n, P_{n^A} | \{P_N\})} \right)^2, P_n = (x_n, y_n) \quad (1)$$

Следовательно, для решения задачи навигации необходимо определить дальности $d(P_n, P_{n^A} | \{P_N\})$.

Основной метод определения дальности до объекта основан на анализе времени задержки при распространении сигнала $\tau(P_n, P_{n^A} | \{P_N\})$ в предположении об известной постоянной скорости распространения волны в среде v_λ [10].

Поскольку сигнал модулируется M-последовательностью, то целесообразно использовать корреляционный метод приёма. Вид функции корреляции $R(t)$ принятого сигнала в точке P_n и опорного сигнала представлен на рисунке 1.

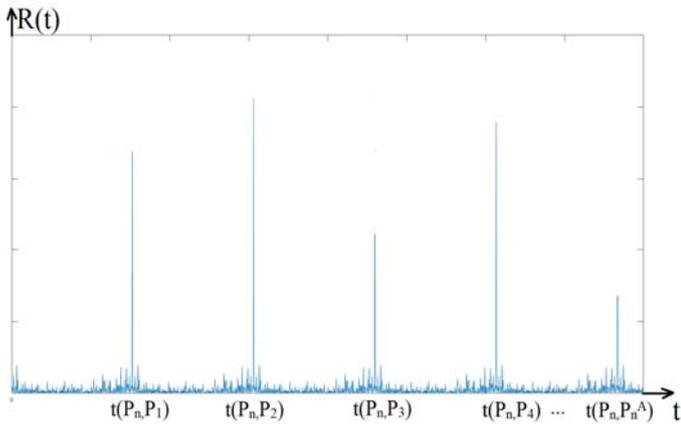


Рис. 1. Вид корреляционной функции в точке приёма

Важно отметить, что большой временной интервал между значениями $t(P_n, P_{n^A})$ на рисунке 1 объясняется тем, что время $t(P_n, P_{n^A})$ является суммой задержки распространения сигнала от n^A -го активного до n -го пассивного объекта $\tau(P_n, P_{n^A} | \{P_N\})$, значения времени начала передачи для n^A -го активного объекта $t_{n^A}^{Offs}$, разности значений системного времени и времени на n -м пассивном объекте $\Delta\tau_n$.

Полученные по результатам анализа корреляционной функции значение времени прихода сигнала $t(P_n, P_{n^A})$ и при декодировании передаваемой информации значение времени начала передачи n^A -го активного объекта $t_{n^A}^{Offs}$ и $\Delta\tau_n$ позволяют определить дальности $d(P_n, P_{n^A} | \{P_N\})$ как:

$$d(P_n, P_{n^A} | \{P_N\}) = v_\lambda \cdot (t(P_n, P_{n^A}) + \Delta\tau_n - t_{n^A}^{Offs}) \quad (2)$$

Искомые координаты (x_n, y_n) объекта определяются через систему уравнений (3), где каждое уравнение представляет собой уравнение окружности [11].

$$\begin{cases} \sqrt{X_{1n}^2 + Y_{1n}^2} = v_\lambda \cdot (t(P_n, P_{1^A}) + \Delta\tau_n - t_{1^A}^{Offs}) \\ \sqrt{X_{2n}^2 + Y_{2n}^2} = v_\lambda \cdot (t(P_n, P_{2^A}) + \Delta\tau_n - t_{2^A}^{Offs}) \\ \vdots \\ \sqrt{X_{n^A n}^2 + Y_{n^A n}^2} = v_\lambda \cdot (t(P_n, P_{n^A}) + \Delta\tau_n - t_{n^A}^{Offs}) \end{cases}, \quad (3)$$

где $X_{n^A n} = (x_{n^A} - x_n)^2$, $Y_{n^A n} = (y_{n^A} - y_n)^2$; $n^A = \overline{1, N^A}$.

Разработка тестового стенда

Для обеспечения навигации пассивных объектов в пространстве с использованием выражения (3) необходимо иметь, по крайней мере, три «своих» фиксированных активных объекта, которые формируют информационное поле [12]. Приём и анализ сигналов осуществляется «своим» подвижным пассивным объектом.

Для нахождения времени прихода сигнала и синхронного приёма данных были разработаны алгоритмы приёма и обработки информационного поля, приведённые на рисунке 2 и 3.

Алгоритмы работают с сигналами в дискретном времени, буквой l обозначается номер отсчёта. Корреляционный интеграл вычисляется на длине вектора сигнала $T(l)$ 5120 отсчётов. По корреляционному интегралу определяется значение времени прихода сигнала, обозначаемое как $l_{задМ}$.

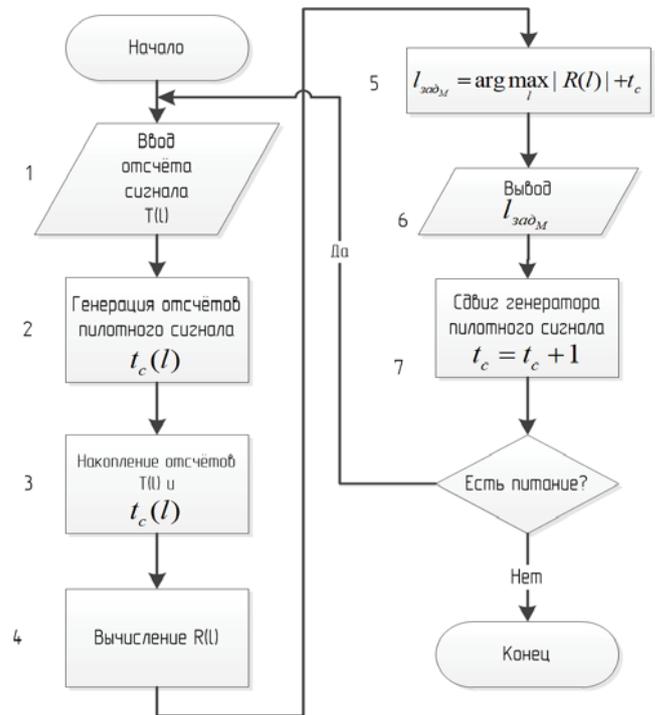


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска сигналов и определения времени задержки

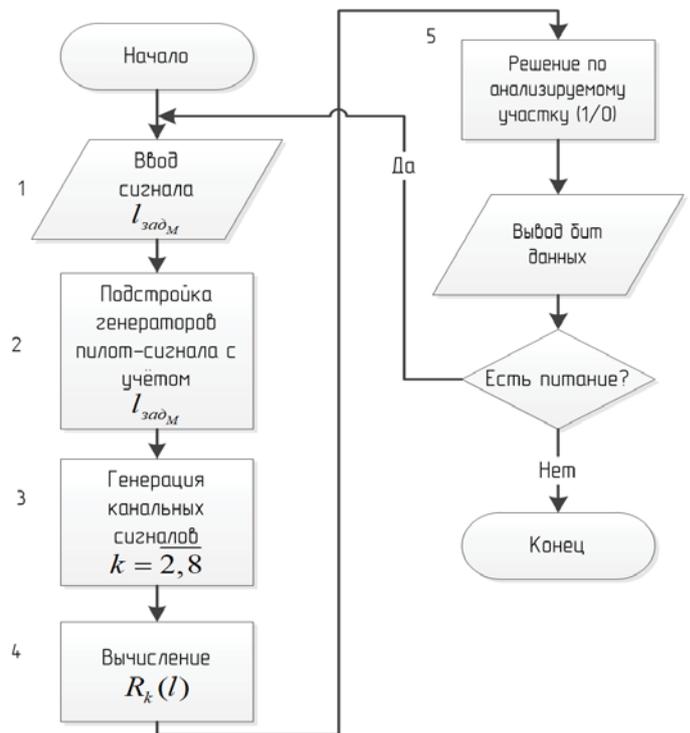


Рис. 3. Блок-схема алгоритма синхронного приёма данных

Работа приёмника реализована с помощью двух параллельно работающих алгоритмов, описывающих канал поиска (рис. 2) и канал синхронного приёма данных (рис. 3) [13].

Задачей канала поиска является обнаружение сигналов от всех активных объектов и определение задержек распространения с точностью до отсчёта сигнала. Стоит отметить, что в системах передачи информации с кодовым разделением каналов определение времени прихода сигнала служит для первичной синхронизации. В этой работе эта информация также используется для определения расстояния между активным и пассивным объектами по времени задержки.

Рассмотрим принцип работы канала поиска. При генерации отсчётов пилот-сигнала [14] по синфазным и квадратурным составляющим формируется набор векторов $\vec{s}_{I_{l-nl_0}}, \vec{s}_{Q_{l-nl_0}}$, состоящих из 128 чипов, т.е. 5120 отсчётов. Каждый из векторов задержан на величины отсчётов $n \cdot l_o$, где $n \in [0; 39]$. Вектора имеют вид:

$$\vec{s}_{I_{l-nl_0}} = (s_{I_{l-nl_0}}(0) \quad s_{I_{l-nl_0}}(1) \quad \dots \quad s_{I_{l-nl_0}}(5119))$$

$$\vec{s}_{Q_{l-nl_0}} = (s_{Q_{l-nl_0}}(0) \quad s_{Q_{l-nl_0}}(1) \quad \dots \quad s_{Q_{l-nl_0}}(5119))$$

В совокупности пилот-сигнал, в котором присутствуют вектора со всеми возможными задержками, представляется матрицей **S** (4), элементы матрицы **S** формируются в блоке 2, накапливаются в блоке 3 по блок-схеме на рисунке 2:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \vec{s}_{I_{l-0}} & \vec{s}_{I_{l-l_0}} & \vec{s}_{I_{l-2l_0}} & \dots & \vec{s}_{I_{l-39l_0}} \\ \vec{s}_{Q_{l-0}} & \vec{s}_{Q_{l-l_0}} & \vec{s}_{Q_{l-2l_0}} & \dots & \vec{s}_{Q_{l-39l_0}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Далее осуществляет вычисление корреляционных сумм для матрицы пилотных сигналов **S** и вектора принятого $\vec{T} = (T(0) \dots T(5119))$ на длине 128 чипов в блоке 4 по блок-схеме на рисунке 2. Матрица корреляционных сумм **K** имеет вид (5):

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \vec{s}_{I_{l-0}} \cdot \vec{T}^T & \vec{s}_{I_{l-l_0}} \cdot \vec{T}^T & \vec{s}_{I_{l-2l_0}} \cdot \vec{T}^T & \dots & \vec{s}_{I_{l-39l_0}} \cdot \vec{T}^T \\ \vec{s}_{Q_{l-0}} \cdot \vec{T}^T & \vec{s}_{Q_{l-l_0}} \cdot \vec{T}^T & \vec{s}_{Q_{l-2l_0}} \cdot \vec{T}^T & \dots & \vec{s}_{Q_{l-39l_0}} \cdot \vec{T}^T \end{pmatrix} \quad (5)$$

Время задержки сигнала определяется для сигнала с наибольшей мощностью. Вектор мощностей \vec{R} рассчитывается с помощью (6) также в блоке 4 по блок-схеме на рисунке 2:

$$\vec{R} = (K_{11}^2 + K_{21}^2 \quad K_{12}^2 + K_{22}^2 \quad K_{13}^2 + K_{23}^2 \quad \dots \quad K_{1_{40}}^2 + K_{2_{40}}^2). \quad (6)$$

В блоке 5 по блок-схеме на рисунке 2 по значению $\arg \max \vec{R}$ определяется задержка в пределах чипа, т.е. по индексу вектора.

Задержка распространения сигнала складывается из задержки сигнала в пределах чипа $\tau(P_n, P_{n^A})$ и задержки генератора пилотного сигнала $t_c(P_n, P_{n^A})$. Через каждые 128 чип

генератор пилотного сигнала задерживает выдачу на 1 чип, процедура снова повторяется.

Задачей канала синхронного приёма данных является демодуляция канальных сигналов. По данным на выходе канала синхронного приёма данных определяется $t_{n^A}^{Offs}$ и координаты активных объектов.

Таким образом использование двух служебных каналов (пилотного и синхронного) позволяет решать задачу позиционирования без затрат ресурсов каналов трафика.

Рассмотрим алгоритм работы канала синхронного приёма данных. Задачей канала является демодуляция принятых сигналов и декодирование данных по соответствующим каналам.

По информации о задержках распространения сигналов от активных объектов (блок 1 по блок-схеме на рисунке 3) в данном канале осуществляется подстройка генераторов пилот-сигнала (блок 2 по блок-схеме на рисунке 3), отличных от генераторов пилот-сигнала в канале поиска.

В блоке 3 по блок-схеме на рисунке 3 канальные сигналы, каждому из которых соответствует своя последовательность Уолша (формируются в блоке 3 по блок-схеме на рисунке 3), перемножаются на пилот-сигналы (для каждого активного объекта), полученная матрица перемножается на вектор входного сигнала (в блоке 4 по блок-схеме на рисунке 3). Полученные свёртки суммируются на длине 127 чип (в блоке 5 по блок-схеме на рисунке 3). По знаку суммы принимается решение о передаваемом символе (в блоке 5 по блок-схеме на рисунке 3). Для демодуляции всех информационных символов процедура повторяется.

Рассмотренные алгоритмы реализованы на интегральной микросхеме Xilinx Virtex5-LX30 посредством языка Verilog.

Выходными данными алгоритма являются значения временных задержек и демодулированные данные, по которым в среде Matlab осуществляется декодирование информационных символов с целью извлечения сведений о системном времени, координатах активного объекта и определение координат пассивного объекта.

Определение координат пассивного объекта и времени $\Delta\tau_n$ методом наименьших квадратов производится посредством реализации алгоритма решения нелинейной функции или системы выбранным методом. Функция для отыскания координат пассивного объекта на плоскости имеет вид (7)

$$f(x_n, y_n, \Delta\tau_n) = (d_{31} + v \cdot \Delta\tau_n - \sqrt{(x_n - x_{1^A})^2 + (y_n - y_{1^A})^2})^2 + (d_{32} + v \cdot \Delta\tau_n - \sqrt{(x_n - x_{2^A})^2 + (y_n - y_{2^A})^2})^2 + (d_{33} + v \cdot \Delta\tau_n - \sqrt{(x_n - x_{3^A})^2 + (y_n - y_{3^A})^2})^2 + (d_{34} + v \cdot \Delta\tau_n - \sqrt{(x_n - x_{4^A})^2 + (y_n - y_{4^A})^2})^2; \quad (7)$$

где x_{n^A}, y_{n^A} – координаты n-го активного объекта, x_n, y_n – координаты пассивного объекта, d_{3n} – экспериментально определённая дальность от n-го активного объекта до пассивного, которая определяется как $d_{3n} = v(t(P_n, P_{n^A}) - t_{n^A}^{Offs})$, v – скорость распространения волны.

При разработке плана размещения активных объектов максимальная площадь, в которой принимаются сигналы от четырёх передатчиков равна 1.092 м².

При проведении эксперимента были определены координаты пассивного объекта в трёх разных точках, в таблице 1 показаны величины отклонений рассчитанных значений дальностей и координат, определённых с помощью рулетки до каждого активного объекта и координат экспериментально измеренных.

Таблица 1

Результаты эксперимента при определении координат пассивного объекта при положении активных объектов в одной плоскости по высоте и трёх положениях приёмника в пространстве

		$ \Delta d $, см	Δx , см	Δy , см
I	1	0,33	2,46	1,94
	2	2,06		
	3	1,78		
	4	3,3		
II	1	2,13	1,84	0,83
	2	14,15		
	3	2,74		
	4	1,24		
III	1	7,75	0,77	3,45
	2	5,14		
	3	0,68		
	4	2		

Отклонения возникают из-за наличия двух факторов: фактор при определении координат и дальностей рулеткой (фактор прямого измерения) и фактор экспериментального измерения (посредством стенда).

Фактор прямого измерения обусловлен несоответствием модели помещения идеальной (прямоугольное помещение) и неровностью стен.

Фактор неточности экспериментального измерения обусловлен неучтёнными задержками распространения в канале: задержки при обработке ЦАП/АЦП и в прочих аппаратных узлах комплекса National Instruments. Этот фактор также обусловлен дискретностью отсчётов и шумом, который влияет на корреляционную характеристику, измерений. С учётом реальной корреляционной характеристики, которая в пределах максимума имеет ширину, равную 100 отсчётам, рассчитанные отклонения, приведённые в таблице 1, не превышают 40 отсчётов, т.е. отклонения при оценке максимума не превышают величину одного чипа и лежат в пределах корреляционного максимума. Для уменьшения погрешностей требуется применение следающего фильтра Калмана [15].

Для проверки зависимости величины отклонения от дальности проведён эксперимент в случае одного пассивного и одного активного объектов на дальностях – 5,345 м (максимально возможная в плане размещения двух объектов), 4,265 м, 3,28 м, 2,3 м, 1,79 м. Для каждой дальности проведено 50 измерений посредством обработки информации из генерируемого информационного поля, в таблицу 2 сведены результаты по математическому ожиданию выборок дальностей, их дисперсии, величина отклонения математического ожидания выборки дальностей от прямого измерения.

Таблица 2

Вероятностные характеристики и отклонение по дальности для выборок измерений дальности для разных расстояний между объектами

Характеристики \ Дальность	m_{Σ} , м	σ_{Σ} , м	$ \Delta d_{m\Delta} $, м
5,345 м	5,42	0,015	0,075
4,265 м	4,3282	0,0041	0,0632
3,28 м	3,3462	0,0037	0,0662
2,3 м	2,3694	0,0018	0,0694
1,79 м	1,8451	0,0018	0,0551

Из результатов эксперимента видно, что с увеличением дальности между объектами разность $|\Delta d_{m\Delta}|$ увеличивается на незначительную величину.

Заключение

В статье была разработана методика определения координат и их отклонений для пассивных объектов систем передачи информации, работающих в информационном поле, приведены алгоритмы работы блоков системы, влияющих на определение задержек распространения сигналов и координат пассивных объектов. На их основе проведён анализ эффективности определения координат пассивных объектов по сигналам системы передачи информации показавший, что отклонения при определении их координат не превышают 3,5 см.

Литература

1. Белов А.С., Козлов С.В., Спирина Е.А. и др. Информационное поле в задачах инфокоммуникаций // XX Международная научно-техническая конференция ПТИТ-2018, XVI Международная научно-техническая конференция ОТТ-2019. Уфа, 20-22 ноября 2018 г. Материалы конференции в 2-х томах. Уфа: Изд-во Уфимского государственного авиационного технического университета, 2018. Т. 1. С. 36-41.
2. Спирина Е.А., Чабдаров Ш.М. Распределение потоков информации систем, работающих в информационном поле // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 4 (44). С. 6-15. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.4.6
3. Построение абстрактной модели взаимодействия объектов в информационном поле. Синтез принципов и алгоритмов взаимодействия объектов специализированных программно-определяемых радиоэлектронных комплексов, работающих в информационном поле: отчет о НИР (промежуточ.): 43 / ФГАНУ ЦИТиС; рук. Попов В. А. М., 2017. 75 с. Исполн.: Чабдаров Ш.М., Козлов С.В., Спирина Е.А., Гайсин А.К., Ильин Г.И., Ильин А.Г., Лернер – № АААА-А17-117060610047-9.
4. Kang H., Joung J., Kim J., Kang J., & Cho Y.S. Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. IEEE Access, 2020, 1-1. doi:10.1109/access.2020.3023473
5. Кузнецов А.С., Козлов С.В. Применение информационного поля для навигации объектов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 3 (51). С. 31-40.
6. Козлов С.В. Новые смесевые подходы к проектированию радиоинтерфейса систем связи. Казань: ООО "Новое знание", 2014. 132 с.

7. National Instruments. R Series Intelligent DAQ – Data Acquisition and Control with Onboard Processing. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://datasheet.elcodis.com/pdf2/111/15/1111576/nirsci-7833r.pdf> (дата обращения: 24.11.2022).

8. MuRata. Ultrasonic Sensors. Application Manual. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.platan.ru/docs/pdf/murata-ultrasonic-sensors.pdf> (дата обращения: 24.11.2022).

9. Zhao Xiaoqiang, Zhang Pengbo, He Yafeng and Zhang Zhongkui, 2016. A New Combined Algorithm of Positioning Based on the LSM and Taylor Series. *Journal of Software Engineering*, 10: pp. 185-191.

10. Howell G.P., Morfey C.L. Speed of sound in air as a function of frequency and humidity // *J. Acoust. Soc. Am.* 1980.Vol. 65. No.5. P.1525-1527.

11. Akmaykin D.A., Bolelov E.A., Kozlov A.I., Lezhankin B.V., Svistuno A.E., Shatrakov Y.G. *Theoretical Foundations of Radar Location and Radio Navigation*. Springer Aerospace Technology. 2021. doi:10.1007/978-981-33-6514-8

12. Stefanski J. Asynchronous time difference of arrival (ATDOA) method. *Pervasive and Mobile Computing*, 23, 2015, pp. 80-88. doi:10.1016/j.pmcj.2014.10.008

13. Kay S.M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.

14. Tanner R., Woodard J. *WCDMA – Requirements and Practical Design*. – JohnWiley&Sons Ltd, 2004. 447 с.

15. Тухонов В.И., Харисов В.Н. *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.*

TESTING THE APPLICATION OF THE INFORMATION FIELD FOR OBJECT NAVIGATION

Andrey S. Kuznetsov, KNRTU-KAI, Kazan, Russia, mossberg@bk.ru

Sergey V. Kozlov, KNRTU-KAI, Kazan, Russi, skozlov68@yandex.ru

Abstract

The service of positioning subscribers of a system operating in the ultrasonic range, transmitting information in an information field, defined as a set of received all physical signals existing in a certain area of space, in which real-time data streams contain information about the characteristics of the propagation medium, about interactions and the location of objects, is considered. For testing, the system parameters of the service based on the technology of code separation of channels with direct spectrum expansion, information transmission, the area of space in which testing is carried out, devices for receiving and transmitting ultrasonic signals, equipment and software on which testing is carried out, the principle of correlation reception for measuring navigation parameters is defined, a system of equations is set determination of coordinates by the rangefinder method of navigation measurements and the method of least squares. A block diagram of algorithms implemented on the Virtex5-LX30 FPGA has been developed, the operation of the signal reception and processing stand in the information field and matrix expressions according to which individual nodes of the system algorithms work. The methodology of testing the navigation service is described, according to the results of the experiment, an analysis of the effectiveness of using the information field for navigation of subscribers by the values of deviations, and the factors causing them, of certain coordinates is carried out.

Keywords: information field, rangefinder method of navigation definitions, correlation reception, code channel separation, direct spectrum spreading, ultrasonic frequency range.

References

1. A.S. Belov, S.V. Kozlov, E.A. Spirina, etc. The information field in the tasks of infocommunications. *XX International Scientific and Technical Conference PTiTT-2018, XVI International Scientific and Technical Conference OT-2019*. Ufa, November 20-22, 2018. Conference materials in 2 volumes. Ufa: Publishing House of Ufa State Aviation Technical University, 2018. Vol. 1, pp. 36-41.
2. E.A. Spirina, Sh.M. Chabdarov. Distribution of information flows of systems operating in the information field. *Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Radio engineering and infocommunication systems*. 2019. No. 4 (44), pp. 6-15. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.4.6
3. V.A. Popov. Construction of an abstract model of interaction of objects in the information field. Synthesis of principles and algorithms of interaction of objects of specialized software-defined radio-electronic complexes operating in the information field: research report (interim.): 43. FGANU CITiS; Moscow, 2017. 75 p. Performed by: Chabdarov Sh.M., Kozlov S.V., Spirina E.A., Gaisin A.K., Ilyin G.I., Ilyin A.G., Lerner, no. AAAAA-A17-117060610047-9

4. H. Kang, J. Joung, J. Kim, J. Kang, Y.S. Cho. Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. *IEEE Access*, 2020, 1-1. doi:10.1109/access.2020.3023473
5. A.S. Kuznetsov, S.V. Kozlov. Application of the information field for object navigation. *Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Radio engineering and infocommunication systems*. 2021. No. 3 (51), pp. 31-40.
6. S.V. Kozlov. New mixed approaches to the design of the radio interface of communication systems. Kazan: LLC "New knowledge", 2014. 132 p.
7. National Instruments. R Series Intelligent DAQ - Data Acquisition and Control with Onboard Processing. [Electronic resource] - Access mode: <http://datasheet.elcodis.com/pdf2/111/15/1111576/nipci-7833r.pdf> (accessed: 11/24/2022)
8. MuRata. Ultrasonic Sensors. Application Manual. [Electronic resource] - Access mode: <https://www.platan.ru/docs/pdf/murata-ultrasonic-sensors.pdf> (accessed: 11/24/2022)
9. Zhao Xiaoqiang, Zhang Pengbo, He Yafeng and Zhang Zhongkui, 2016. A New Combined Algorithm of Positioning Based on the LSM and Taylor Series. *Journal of Software Engineering*, 10, pp. 185-191.
10. G.P. Howell, C.L. Morfey. Speed of sound in air as a function of frequency and humidity. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. Vol. 65. No.5, pp. 1525-1527.
11. D.A. Akmaykin, E.A. Bolelov, A.I. Kozlov, B.V. Lezhankin, A.E. Svistunov, Y.G. Shatrakov. Theoretical Foundations of Radar Location and Radio Navigation. *Springer Aerospace Technology*. 2021, doi:10.1007/978-981-33-6514-8
12. J. Stefanski. Asynchronous time difference of arrival (ATDOA) method. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, no. 23, pp. 80-88. doi:10.1016/j.pmcj.2014.10.008
13. S.M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
14. Tanner R., Woodard J. *WCDMA - Requirements and Practical Design*. JohnWiley&Sons Ltd, 2004. 447 p.
15. V. I. Tikhonov, V. N. Kharisov. *Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems : Textbook for radio engineering. special universities*. Moscow: Radio and Communications, 1991. 608 p.

Information about authors:

Andrey S.Kuznetsov, KNRTU-KAI, assistant, Kazan, Russia

Sergey V. Kozlov, KNRTU-KAI, professor, Kazan, Russia

организаторы:

RUSSIA SECTION ED/MTT/AES JOINT CHAPTER

RUSSIA SECTION CAS CHAPTER

INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS ASSOCIATION (IRIS)

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

“2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications”

SYNCHROINFO

28 – 30 июня 2023

г. Псков, Россия

All accepted and presented Papers following the conference will be submitted for inclusion into IEEE Xplore

Materials are available in English

<http://media-publisher.ru/en/conference/>

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ДОГОННЫХ КУРСАХ В ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКИХ БОРТОВЫХ РЛС С МАЛОЙ ВЫСОТОЙ ПОЛЕТА НОСИТЕЛЯ

Бестугин Александр Роальдович,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
freshguap@mail.ru

Рыжиков Максим Борисович,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
maxrmb@yandex.ru

Новикова Юлиана Александровна,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
nov-jliana@yandex.ru

Киршина Ирина Анатольевна,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
zlata@yandex.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-11-16

Manuscript received 12 March 2023;
Accepted 14 April 2023

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-19-00058

Ключевые слова: методы обнаружения, бортовая радиолокационная станция, фазированная антенная решетка, методика оценки дальности

Постановка проблемы. Эффективность решения задачи предупреждения о возможных столкновениях воздушных судов малой авиации или беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для освоения труднодоступных территорий, зависит от времени заблаговременного обнаружения случаев полетов с пересекающимися траекториями. В результате проведенного сравнительного анализа методов радиолокационного обнаружения с учетом различий сигнально-помеховой обстановки, характерной для бортовых импульсно-доплеровских РЛС для целей на догонных курсах, в вариантах исполнения: "Multiple Input - Multiple Output" (MIMO), с совместной апостериорной обработкой результатов (САОРИ) и в традиционной РЛС с активными или пассивными фазированными антенными решетками показано, что последние имеют энергетические преимущества. Поэтому для данной категории импульсно-доплеровских РЛС также предложена методика оценки максимальной дальности обнаружения на нескольких кадрах, позволяющая выбрать логику работы с ее увеличением. **Методы исследования.** В работе активно использовались математический аппарат теории антенных решеток и радиолокационного обнаружения при заданных требованиях к вероятностям правильного обнаружения, ложной тревоги и выбранной модели флуктуаций отражен-

ного полезного сигнала. **Цель.** Обосновать преимущества традиционного технического решения с фазированными антенными решетками для обнаружения на догонных курсах по сравнению с другими методами и выработать рекомендации по поиску условий, которые позволяют повысить дальность обнаружения. **Результаты.** Приведены результаты моделирования, показывающие улучшение условий радиолокационного обнаружения в бортовых РЛС с фазированными антенными решетками при нахождении спектра отраженного сигнала в области доплеровских частот, где расположен и спектр отраженного сигнала от земной поверхности по сравнению с методами пространственной обработки в РЛС MIMO и САОРИ. Разработана методика расчета дальности обнаружения на нескольких смежных кадрах и показано, что в этом случае достигается большая дальность по сравнению со случаем обнаружения на одном кадре. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы в малогабаритных бортовых импульсных РЛС маловысотных носителей с целью увеличения времени заблаговременного предупреждения о наличии на траектории полета других воздушных судов. Эта задача представляется особенно актуальной при полетах носителей РЛС в труднодоступных, осваиваемых территориях.

Информация об авторах:

Бестугин Александр Роальдович, д.т.н., профессор, директор института "Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Рыжиков Максим Борисович, к.т.н., доцент, кафедра "Радиотехнических и оптико-электронных комплексов", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Новикова Юлиана Александровна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра "Физики", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Киршина Ирина Анатольевна, к.э.н., доцент, "Кафедра конструирования и технологий электронных и лазерных средств", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Бестугин А.Р., Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А., Киршина И.А. Увеличение эффективности обнаружения воздушных судов на догонных курсах в импульсно-доплеровских бортовых РЛС с малой высотой полета носителя // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 11-16.

For citation:

Bestugin A.R., Ryzhikov M.B., Novikova Y.A., Kirshina I.A. (2023) Increasing the effectiveness of aircraft detection on catch-up courses in pulse-Doppler airborne radars with a low carrier flight altitude. *T-Comm*, vol. 17, no.4, pp. 11-16. (in Russian)

Введение. Постановка задачи исследования

С точки зрения различий условий обнаружения радиолокационных воздушных целей (ВЦ) на встречных курсах (в передней полусфере цели – в ППС) и на догонных курсах (в задней полусфере цели – в ЗПС) целесообразно предусмотреть поочередную смену серий кадров с приоритетом обнаружения ВЦ в ППС или в ЗПС, решая таким образом задачу всеракурсного обнаружения. Причиной различий является доплеровское смещение частоты отраженного сигнала от ВЦ на догонных курсах в область частот, которую занимают сигналы, возникающие вследствие переотражений от земной поверхности и приходящие по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны или по основному лучу. Данную ситуацию иллюстрирует рисунок 1.

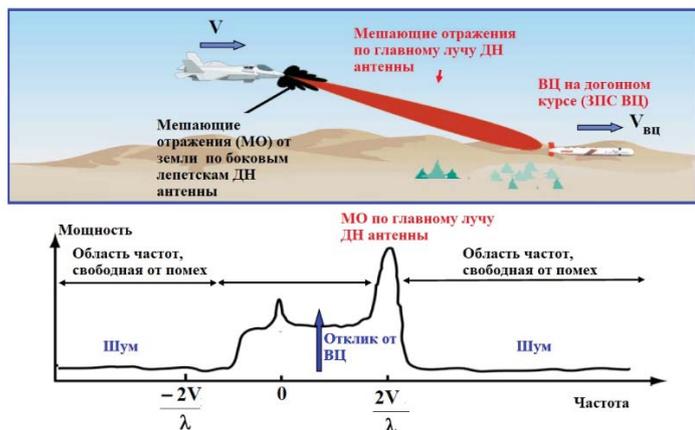


Рис. 1. Обнаружение ВЦ на догонных курсах с наличием отклика цели в той части спектра, которая занята переотражениями от земной поверхности

Достоинство кадров с высокой частотой повторения импульсов (ВЧПИ) – возможность дальнего радиолокационного обнаружения (за относительно малое время можно накопить большое число импульсов), достоинство кадров с со средней частотой повторения импульсов (СЧПИ) – меньший уровень накапливаемой мощности при переотражениях от земли и возможность обнаружения в области частот, в которой лежит спектр мешающих отражений, приходящих по боковым лепесткам диаграммы направленности (ДН) антенны [1].

Если взять за основу методику определения дальности, представленную в [1], то можно увидеть, что при одинаковой длительности импульса для кадров с ВЧПИ, на которых накапливается больше импульсов $N_{ппс}$ и для кадров с СЧПИ – с меньшим числом импульсов $N_{зпс}$ различие между дальностью в ППС $R_{ппс}$ и в ЗПС $R_{зпс}$ определяется через коэффициент влияния переотражений от земной поверхности $\alpha_{мо}$:

$$R_{зпс} = \frac{R_{ппс}}{\sqrt[4]{\alpha_{мо} (h, F_{чпи}, UBL) \frac{N_{ппс}}{N_{зпс}}}},$$

который в свою очередь зависит от высоты полета h , от уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН антенны UBL , значения частоты повторения импульсов $F_{чпи}$ для кадров с СЧПИ.

На основании открытых данных для бортовых РЛС X -диапазона длин волн [2]: «Копье-М» ($R_{ппс}=72$ км, $R_{зпс}=32$ км);

РЛС «БАРС» ($R_{ппс}=250$ км, $R_{зпс}=60$ км); РЛС «ЖУК-МСФЭ» ($R_{ппс}=250$ км, $R_{зпс}=60$ км) можно сделать вывод, что диапазон различий в дальностях обнаружения на встречных и догонных курсах составляет от 2,2 до 4. Это говорит о том, что требования к режиму обнаружения ВЦ на догонных курсах устанавливаются с привязкой к определенному диапазону высот полета носителя и с ориентацией на их уровень бокового излучения.

Различия в условиях обнаружения на догонных курсах характерны не только для случая применения антенн с отличающимся уровнем бокового излучения, но и при использовании разных методов обнаружения радиолокационных целей. Целью исследований был сравнительный анализ эффективности методов обнаружения ВЦ на догонных для бортовых РЛС, выполненных с использованием принципов Multiple Input Multiple Output (MIMO) с совместной апостериорной обработкой результатов измерений (САОРИ) по отношению к традиционному техническому решению с применением активных фазированных антенных решеток (АФАР). После получения результатов, подтверждающих эффективность обнаружения на догонных курсах с АФАР, оценивалась возможность улучшения дальности обнаружения при использовании логики поиска ВЦ на нескольких смежных кадрах просмотра зоны обзора.

1. Сравнение методов радиолокационного обнаружения

Теоретическим различиям между методами обнаружения в импульсно-доплеровских РЛС посвящены источники [3,4]. В [5,6] изложены теоретические основы функционирования, особенности формирования зондирующих и алгоритмы обработки приемных сигналов для РЛС MIMO и РЛС с САОРИ, в [6-8] для них более подробно рассматриваются задачи реализации обзора по угловым координатам и требования к антенным решеткам (АР). В работе [9] решена задача оптимизации цифровой ДН на прием.

Учитывая научно-технический задел, представленный в указанных источниках, под решениями для РЛС MIMO и САОРИ будем подразумевать те, в основе которых лежит излучение независимых зондирующих сигналов одним элементом АР. В основе данных методов лежит следующий принцип работы.

Каждая одиночная антенна (или смежная группа излучателей на раскрыве) излучает пространственно-независимые, ортогональные между собой сигналы (например, с частотным разделением). Так РЛС просматривает заданную зону обзора. В этом случае не происходит формирование диаграммы направленности в АР посредством создания соответствующего амплитудно-фазового распределения, отвечающим за ширину луча и определенный УБЛ.

Отдельный элемент АР или малая группа излучателей характеризуются широким диапазоном углов излучения, который должен охватывать все угловые направления в зоне обзора. Максимальный угловой сектор за время излучения пачки зондирующих сигналов соответствует ДН одного излучателя, которая определяется через длину волны, тип излучателя и геометрические размеры. В зарубежных публикациях о РЛС подобного типа, также часто можно встретить их под названием (Radar Impulse Aperture Synthesis, сокращенно RIAS) [3, 8].

При этом на прием реализуется цифровое диаграммообразование для получения отраженных сигналов с каждого из угловых направлений, которые были задействованы на излучение. Энергетические соотношения, которые характеризуют прием сигнала, отраженного от воздушного судна (ВС), осуществляющего полет относительно носителя РЛС на догонных курсах и обнаружение которого производится в частотной области на фоне аддитивной смеси из спектральной плотности мощности шумовой компоненты и соответствующего распределения по спектру мощности для переотражений от земной поверхности, приходящих по боковым лепесткам ДН можно найти в [1]. Рекомендации по выбору параметров зондирующих сигналов представлены в [10, 11].

Решение основного уравнения радиолокации для рассматриваемого случая требует оценки отношения мощности S , которая содержится в полезном (отраженном от ВС импульсе), к сумме мощности внутриприемного шума N и мощности переотражений от земной поверхности R . Представив его в следующем виде:

$$I = \frac{S}{N + R} = \frac{S}{N \left(1 + \frac{R}{N}\right)} \approx \frac{S}{N \alpha_{\text{МО}}}, \quad (1)$$

можно проанализировать, каким образом изменяется I при применении технологии зондирования МИМО в условиях маловысотного полета, когда $R \gg N$. Для этого оценим изменение сигнальной, помеховой и шумовой компоненты.

Во-первых, вместо традиционного (характерного для РЛС с ФАР/АФАР) импульса в РЛС МИМО используется короткий импульс, допустим уменьшенный от импульса традиционной РЛС в M – раз, поэтому (1) при $R \gg N$ трансформируется следующим образом

$$I = \frac{S}{MN + \frac{R}{M}} = \frac{\frac{S}{M}}{N + \frac{R}{M^2}} \approx \frac{\frac{S}{M}}{N \left(\frac{\alpha_{\text{МО}}}{M}\right)} = \frac{S}{N \alpha_{\text{МО}}}. \quad (2)$$

Во-вторых, наблюдается падение мощности помех, которое связано с пропорциональным уменьшением площади, участвующей в формировании соответствующего сигнала переотражений [1], но оно же сопровождается и падением мощности полезного сигнала. Поэтому с точки зрения изменения временных параметров зондирующего сигнала, условия обнаружения не улучшаются по сравнению с применением случая РЛС с ФАР/АФАР.

Излучение на передачу в РЛС МИМО в W^2 раз ниже, где $W = N_{\text{рлс}}/N_{\text{мимо}}$, где $N_{\text{мимо}}$ – число излучателей на передачу на секторе поверхности антенны МИМО РЛС, $N_{\text{рлс}}$ – число излучателей на всем раскрытие.

Оно же меньше и в сторону помехи от земли, но тут возникает существенное различие. В традиционной РЛС МИМО на излучение используется один парциальный, близкий к изотропному излучатель. В силу этого излучение в нижнюю полусферу существенно выше, так как в классической АР оно происходит в области боковых лепестков, характеризующихся УБЛ, который ниже коэффициента направленного действия на величину УВЛ [дБ].

Для маловысотного полета при требованиях обнаружения другого ВС на относительно малых дальностях, где необходимо избежать столкновения на догонном курсе, целесообразно рекомендовать достаточно низкий УБЛ. При этом, чтобы достичь аналогичного снижения мощности переотражений от земли в РЛС МИМО путем формирования цифровой диаграммы направленности на прием, УБЛ должен составить уже 2УБЛ , что неизменно приведет к падению усиления в направлении на максимум ДН, то есть ухудшит показатели обнаружения. В [9] анализируются результаты синтеза приемной цифровой ДН РЛС МИМО в случае приема каждым излучателем и при модернизации приема группами излучателей для уменьшения УБЛ и достижения максимальной энергетической эффективности. Результаты сравнения приемных ДН до и после оптимизации, а также исходной ФАР приведены на рисунке 2.

При сохранении ширины основного луча уровень боковых лепестков в классической МИМО антенне выше, что еще более усиливает наличие помех от земли. Максимальный уровень бокового излучения с оптимизированной приемной ДН в РЛС МИМО оказывается примерно на 10 дБ лучше, чем у классической ФАР, при этом если учесть что на излучение у нее УБЛ не менее минус 13,5 дБ, а в ФАР достигается УБЛ порядка минус 23 дБ, то из всей процедуры оптимизации удалось выиграть не более 0,5 дБ по уменьшению помех от земли.

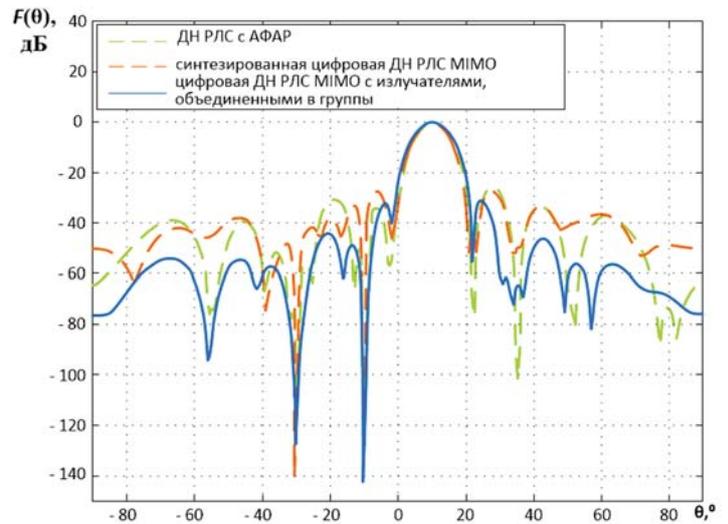


Рис. 2. Сравнение приемных диаграмм направленности РЛС МИМО, с оптимизацией параметров приема путем разбиения на подобласти в сравнении с классическим решением (при одинаковой ширине луча)

Фактически выигрыш по энергетике отсутствует, так как мощность излучаемого сигнала меньше. Поэтому применение РЛС типа МИМО или модифицированных МИМО с приемом сегментами антенного раскрытия при всей сложности реализации и обработки не улучшает условий обнаружения ВС на догонных курсах, но и приводит к уменьшению дальности обнаружения на встречных курсах на кадрах с СЧПИ.

Далее рассмотрим применение РЛС с САОРИ. Многочастотная РЛС САОРИ реализует многоканальное зондирование пространства набором простых узкополосных

сигналов разной частоты. При этом увеличение энергии сигнала для получения соответствующего энергетического потенциала, сравнимого с РЛС с ФАР, достигается путем увеличения длительности импульса для каждого отдельного излучателя.

Теперь, вместо традиционного (характерного для РЛС с ФАР/АФАР) импульса мы имеем длинный импульс, допустим увеличенный в Z раз, а на приемной стороне сохраняется необходимость широкополосного приема, так как также реализуется цифровое синтезирование ДН. Тогда (1) трансформируется к виду

$$I = \frac{SZ}{ZN + RZ} = \frac{S}{N\alpha_{\text{МО}}} \quad (3)$$

Как и в случае приема сигналов в РЛС МИМО при реализации цифровой ДН на приемной стороне, уровень боковых лепестков в РЛС САОРИ должен составить 2 UBL [дБ], что также приведет к падению усиления в максимуме ДН на ВЦ и ухудшит показатели ее обнаружения на догонных курсах. При типовом излучении и приеме с уровнем боковых лепестков порядка минус 23 дБ, в цифровой ДН САОРИ нужно реализовать УБЛ в минус 46 дБ.

Возьмем для примера амплитудное распределение на раскрыве антенны с Nz излучателями вида косинус в заданной степени s с пьедесталом h [12]

$$A[j] = h + (h-1) \left[\cos \left(\frac{j - \frac{(Nz-1)}{2} \pi}{\frac{(Nz-1)}{2}} \right) \right]^s,$$

при $h=0,1$ и $s=1$ получаем УБЛ, равный минус 23 дБ, а при оптимизированном амплитудном распределении $s \approx 3, h=0$, характерном для РЛС с САОРИ, достигается УБЛ, равный минус 46 дБ, см рис. 3. При этом основной луч ДН РЛС САОРИ имеет такой же уровень излучения, как ДН ФАР классической ФАР в области ее максимальных боковых лепестков, что говорит об отсутствии снижения уровня максимальной помехи с данных угловых направлений, в то время как КНД в сторону ВЦ уменьшается на 4,4 дБ, что говорит об общем падении соотношения I по сравнению с РЛС с классической ФАР/АФАР.

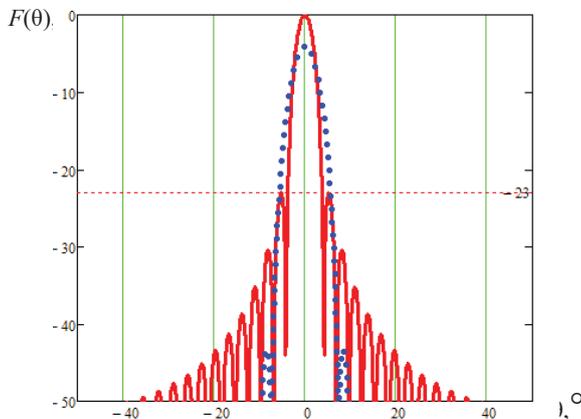


Рис. 3. Сравнение приемных ДН в классической ФАР (сплошная линия) и оптимизированной (точечная кривая) в РЛС САОРИ

Поэтому не рекомендуется использовать технологию РЛС САОРИ и МИМО с целью обнаружения на догонных курсах, поскольку они отличаются худшим показателем по отношению мощности полезного сигнала к мощности аддитивной смеси внутриприемного шума и мощности переотражений от земли.

2. Оценка улучшения дальности обнаружения при применении логики поиска цели на нескольких кадрах обзора

Увеличить дальность обнаружения как на встречных, так и на догонных курсах можно за счет применения методов обнаружения, известных как обнаружение на этапе сопровождения (то же, что с накоплением вероятности правильного обнаружения) [1].

Для расчета потенциальной дальности обнаружения в случае поиска ВЦ на смежных кадрах модифицируем универсальную методику расчета, применимую как для кадров с СЧПИ, так и для кадров с ВЧПИ. Оценить мощность полезного отраженного от ВЦ сигнала S , на входе приемника БРЛС в зависимости от дальности до нее R , можно по следующему соотношению [1]:

$$S(R) = \frac{P_{\text{имп}} \lambda^2 G^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_{\text{рлс}}} 10^{-0,1 l_{\text{атм}} R},$$

где $P_{\text{имп}}$ – мощность в импульсе, излучаемом с поверхности антенны; λ – длина волны; G – коэффициент усиления антенны; σ – эффективная площадь рассеяния ВЦ; $L_{\text{рлс}}$ – общие потери в РЛС; $l_{\text{атм}}$ – удельное двухстороннее затухание в атмосфере.

На основании [1] порог для обнаружения в спектральной области может быть вычислен следующим образом:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{ш}} \alpha_{\text{МО}} K_p / N_{\text{бпф}},$$

$P_{\text{ш}}$ – мощность шумов на входе приемника, которая рассчитывается по соотношениям, представленным в [13]; K_p – коэффициент различимости. Величина $\alpha_{\text{МО}}$ рассчитывается по формуле [10]:

$$\alpha_{\text{МО}} = 1 + \frac{\bar{P}_{\text{з.ф.}}}{P_{\text{ш}} / N_{\text{бпф}}},$$

где $N_{\text{бпф}}$ – база быстрого преобразования Фурье (БПФ); $\bar{P}_{\text{з.ф.}}$ – оценка средней мощности помехи от земной поверхности в пределах одного частотного фильтра [10].

Согласно [1], если значение $\alpha_{\text{МО}}$ оценивают при условии нахождения ВЦ на плоскости «дальность – доплеровская частота» вне областей альтиметровых высот, областей сильных мешающих отражений от земной поверхности и переотражений по основному лучу, то оно может быть выбрано из диапазона значений $\alpha_{\text{МО}} \in [3-5]$.

Коэффициент различимости при обнаружении ВЦ пачкой $N_{\text{имп}}$ когерентных импульсов может быть определен в соответствии с [1]:

$$K_p = \frac{q_{\text{ср}}}{N_{\text{имп}}}.$$

Среднее значение энергетического отношения сигнал/шум $q_{\text{ср}}$, в одном частотном фильтре и дискрете дальности определяется, исходя из требования обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения $P_{\text{по}}$, при определенной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, для случая приема отраженного сигнала, флуктуирующего по амплитуде со случайной начальной фазой. Для данного случая справедливо соотношение [13]:

$$q_{\text{ср}} = 2 \left(\frac{\ln(P_{\text{лт}})^{-1}}{\ln(P_{\text{по}})^{-1}} - 1 \right).$$

При таком подходе для обеспечения $P_{\text{по}} = 0,7$, $P_{\text{лт}} = 10^{-7}$ требуется отношение сигнал/шум $q_{\text{ср}}$ не менее 90. Для снижения порогового уровня при выполнении требований по заданным значениям $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$ и требуемой дальности постановки на сопровождение можно использовать принцип накопления вероятности правильного обнаружения и уменьшения вероятности ложной тревоги за счет n – кратного подтверждения наличия цели в n или в m – кадрах повторного обнаружения ВЦ. При таком подходе подтверждение наличия цели производится в ограниченном подтверждающем объеме – интервале угловых направлений $\Delta N_{\text{аз}}$, частотных фильтров $\Delta N_{\text{ф}}$ и дискретов дальности $\Delta N_{\text{д}}$. Из [1,13] получение оценки сниженной величины порога $q_{0\text{ср}}$ можно произвести по формулам:

$$q_{0\text{ср}} = 2 \left(\frac{\ln(F(n))^{-1} + \ln(\Delta N_{\text{аз}} \Delta N_{\text{ф}} \Delta N_{\text{д}})}{\ln(D(n))^{-1}} \right);$$

$$1 - (1 - D(n))^n = P_{\text{по}};$$

$$F(n) = \sqrt[n]{P_{\text{лт}}}.$$

Такой подход позволяет путем выбора критериев подтверждения («2» из «2», «3» из «3») снизить значение величины $q_{\text{ср}}$ до значения $q_{0\text{ср}}$ и получить более высокую оценку максимальной дальности обнаружения (на первом кадре в последовательности).

Снизить требования к вероятностям ложной тревоги и правильного обнаружения в элементе обнаружения можно и посредством n – кратного подтверждения наличия цели в m – кадрах повторного обнаружения ВЦ (n и m – целые числа, б/р, такие что $n \leq m$).

При использовании логики «2» из «3», «3» из «4» и т.п. требуемые вероятности правильного обнаружения $D(n)=P$ и ложной тревоги $F(n)=P^*$ находятся из уравнений:

$$\left(\sum_{k=n}^m C_m^k P^k (1-P)^{m-k} \right) - P_{\text{по}} = 0;$$

$$\left(\sum_{k=n}^m C_m^k (P^*)^k (1-P^*)^{m-k} \right) - P_{\text{лт}} = 0,$$

где C_m^k – число сочетаний. Начальное приближение к оценке дальности обнаружения $R_{\text{макс}}$ находится графическим методом как точка пересечения кривой, характеризующей падение отраженной от ВЦ мощности от дальности, и прямой, соответствующей установленному пороговому уровню.

Итоговую оценку дальности обнаружения на n -ом кадре можно найти по формуле:

$$R_{\text{обн}} = R_{\text{макс}} - n T_n N_{\text{имп}} K_{\text{обр}} V_{\text{сбл}} N_{\text{л}},$$

где T_n – период зондирующих импульсов; $K_{\text{обр}}$ – коэффициент запаса по времени, используемого для выполнения обработки радиолокационной информации, (больше единицы); $V_{\text{сбл}}$ – максимальная скорость сближения с целью; $N_{\text{л}}$ – число лучей в зоне обзора. Например, при подтверждающем объеме порядка $\Delta N_{\text{аз}} \Delta N_{\text{ф}} \Delta N_{\text{д}} \approx 140$ при использовании логики «2» из «2» дальность обнаружения вырастает на 20%.

Заключение

Результаты исследований показывают, что использование в бортовых импульсно-доплеровских РЛС антенн типа ФАР или АФАР в условиях полетов на малых высотах и обнаружении ВС на догонных курсах дает энергетический выигрыш в отношении мощности сигнала к мощности аддитивной смеси переотражений от земли и внутрприемного шума, по сравнению с использованием методов обнаружения САОРИ или ММО. Этот выигрыш может составлять до 5 дБ. Увеличить дальность обнаружения на всех ракурсах при использовании ФАР/АФАР можно за счет выбора логики обнаружения цели в нескольких смежных кадрах.

Литература

1. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Табарский Б.Г. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
2. Спасский Н. Энциклопедия «Оружие и технологии России. XXI век». Том 10. «Авиационное вооружение и авионика». М.: Оружие и технологии, 2005. 766 с.
3. Li J., Stoica P. Mimo Radar Signal Processing. New Jersey. John Wiley & Sons, 2009. 445 p.
4. Вовшин Б.М. Сверхширокополосная радиолокация воздушных объектов с безынерционным обзором пространства: дис. д-ра техн. наук. М., 2005. 418 с.
5. Вовшин Б.М., Иммореев И.Я. Влияние дисперсионных свойств ФАР на отношение сигнал/шум в РЛС с широкополосными сигналами // Радиотехника. 1985. № 7. С. 74-92.
6. Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 279 с.
7. Скосырев В.Н., Осипов М.Л. Особенности и свойства короткоимпульсной радиолокации // Вестник МГТУ им Н.Э. Баумана. 1991. № 4(37). С. 21-30.
8. Dorey J., Blanshard Y, Cristophe F. Le Project RIAS: une approche nouvelle du radar sursurveillance aeriennne // Coloque International Sur le Radar. Paris. April 1984. P. 505-510.
9. Hassanien A., Vorobyov S.A. Transmit/receive beamforming for MIMO radar with colocated antennas // 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009, pp. 2089-2092.
10. Ryzhikov M.B., Kovregin V.N., Novikova Y.A. Selection of Pulse Repetition Frequency in Radar for Flight Prediction to Detect Flight Trajectories of Small Aircraft and Unmanned Aerial Vehicles at Low Altitudes // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECOMF 2022 - Conference Proceedings, 2022. 5 p.
11. Рыжиков М.Б. Радиолокационное обнаружение в системах предупреждения о столкновении воздушных судов на догонных курсах // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 2. С. 24-28.
12. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера. 2012, 558 с.
13. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970, 560 с.

INCREASING THE EFFECTIVENESS OF AIRCRAFT DETECTION ON CATCH-UP COURSES IN PULSE-DOPPLER AIRBORNE RADARS WITH A LOW CARRIER FLIGHT ALTITUDE

Aleksandr R. Bestugin, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, freshguap@mail.ru

Maksim B. Ryzhikov, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, maxrmb@yandex.ru

Yuliana A. Novikova, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, Nov-Jliana@yandex.ru

Irina A. Kirshina, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, zlata@yandex.ru

This work was supported by the Russian Science Foundation under grant no № 22-19-00058

Abstract

Problem statement. The effectiveness of solving the problem of warning about possible collisions of small aircraft or unmanned aerial vehicles intended for the development of hard-to-reach territories depends on the time of early detection of another aircraft on intersecting trajectories. As a result of the comparative analysis of radar detection methods carried out in the article, taking into account the differences in the signal-interference situation characteristic of on-board pulse-Doppler radars for targets on catch-up courses in versions "multiple input - multiple output", "with joint a posteriori processing of results" and in traditional radar with active or passive phased antenna arrays have shown that the latter have energy advantages. Therefore, for this category of pulse-Doppler radars, a method for estimating the detection range on several frames is presented, which allows you to choose the logic of operation with an increase in the detection range. **Research methods.** The theory of antenna arrays and the theory of radar detection for pulse-Doppler radars were actively used in the work with the specified requirements for the probabilities of correct detection, false alarm and the selected model of fluctuations of the reflected useful signal. **Purpose.** To substantiate the advantages of technical solutions based on a traditional technical solution with phased antenna arrays for detection on catch-up courses and to develop recommendations for finding conditions that allow to increase the detection range. **Results.** The simulation results are presented, showing an improvement in the conditions for radar detection in onboard pulse-Doppler radars when finding the spectrum of the reflected radar signal in the Doppler frequency range, on which the spectrum of the reflected signal from the Earth's surface is superimposed when using radar with phased antenna arrays compared with spatial processing methods in MIMO and radars with joint a posteriori processing of results. A method for calculating the detection range on several adjacent frames has been developed and it is shown that in this case a longer range is achieved compared to the case of detection on a single frame. **Practical significance.** The results of the work can be used in small-sized onboard pulse radars of low-altitude carriers in order to increase the time of early warning of the presence of other aircraft on the flight path. This task seems to be especially relevant when flying radar carriers in hard-to-reach, developed territories.

Keywords: Detection methods, airborne radar, phased array antenna, range estimation technique

References

1. P.I. Dudnik, G.S. Kondratenkov, B.G. Tatarsky (2006). Aviation radar complexes and systems. VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, Moscow, Russia.
2. N. Spassky. (2005), Encyclopedia "Weapons and technologies of Russia. XXI century". Vol. 10. *Aviation armament and avionics, Weapons and Technologies*, Moscow, Russia.
3. J. Li, P. Stoica (2009), MIMO Radar Signal Processing, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
4. B.M. Vovshin (2005), Sverkhshirokopolosnaya radiolokatsiya vozdushnykh obyektov s bezynertsionnym obzorom prostranstva dis. d-ra tekhn. nauk [Ultra-wideband radar of aerial objects with an inertialess survey of space] Moscow, Russia.
5. B.M. Vovshin, I.Ya. Immoreyev (1985), Influence of dispersion properties of headlamps on the signal-to-noise ratio in radar with broadband signals, *Radiotekhnika*. No. 7, pp. 74-92.
6. V.V. Chapurskiy (2012), Selected problems of the theory of ultra-wideband radar systems. MGTU im. N.E. Baumana, Moscow, Russia.
7. V.N. Skosyrev, M.L. Osipov (1991), Features and properties of short-pulse radar, *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*, No.4. Vol. 37, pp. 21-30.
8. J. Dorey, Y. Blanshard, F. Cristophe (1984), Le Project RIAS: une approche nouvelle du radar sursurveillance aerienne, *Coloque International Sur le Radar*, pp. 505-510.
9. A. Hassanien, S.A. Vorobyov (2009), Transmit/receive beamforming for MIMO radar with colocated antennas. *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 2089-2092.
10. M.B. Ryzhikov, V.N. Kovregin, Y.A. Novikova (2022), Selection of Pulse Repetition Frequency in Radar for Flight Prediction to Detect Flight Trajectories of Small Aircraft and Unmanned Aerial Vehicles at Low Altitudes. *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, 5 p.
11. M.B. Ryzhikov (2013), Radar detection in aircraft collision warning systems on catch-up courses. *Successes of modern radio electronics*. No. 2, pp. 24-28.
12. R.S. Hansen, (2012), Phased antenna arrays, Moscow: Tekhnosfera.
13. Ya.D. Shirman (1970), Theoretical foundations of radar, Moscow: Soviet Radio.

Information about authors:

Aleksandr R. Bestugin, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Director of the Institute of "Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies", SUAI, St. Petersburg, Russia

Maksim B. Ryzhikov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Department "Radio-engineering and Fiber-optic Complexes", SUAI, St. Petersburg, Russia

Yuliana A. Novikova, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department "Physics", SUAI, St. Petersburg, Russia

Irina A. Kirshina, Ph.D. (Econ), Associate Professor, Department "Department of Design and Technologies of Electronic and Laser Devices", SUAI, St. Petersburg, Russia

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПРОСТОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ЕГО ШИРОКОПОЛОСНОСТЬ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-17-25

Manuscript received 11 March 2023;
Accepted 10 April 2023

Гайнутдинов Тимур Аншарович,
Московский технический университет связи и
информатики, Москва, Россия, tedia@mtuci.ru

Ключевые слова: форма микрополоскового
излучателя, КСВ, полоса согласования, точка
возбуждения, численная оптимизация

Микрополосковые антенны являются одними из самых распространенных типов антенн мобильных объектов. Компактность, легкость и конформность делает их применение удобным и по сути единственным решением быстро развивающейся индустрии беспроводных телекоммуникаций. Ключевым недостатком таких антенн является их узкополосность, присущая всем антеннам резонаторного типа, частным случаем которых являются микрополосковые антенны. В основном, узкополосность подобных антенн обусловлена ярко выраженной частотной зависимостью входного сопротивления, в следствие чего удовлетворительного качества естественного согласования удается достичь в частотной полосе, измеряемой в единицах процентов. В работе рассматриваются микрополосковые излучатели простой геометрии: прямоугольный, квадратный, ромбический, треугольный, круглый, эллиптический, расположенные на подложке фиксированной геометрии с одинаковым диэлектриком. Для каждой формы геометрии полоска производится численная оптимизация размеров полоска и положения точки возбуждения с целью получения максимальной полосы естественного согласования по КСВ не более 2 при подключении к 50-Омному фидеру. В качестве центральной частоты при проведении численных исследований выбрана частота 2 ГГц. Приводятся расчеты направленных характеристик наиболее удачных вариантов микрополосковых излучателей в пределах полосы согласования. Показано, что при данной геометрии и параметрах заполнения подложки, наиболее широкополосным является микрополосковый эллиптический излучатель, полоса согласования которого составляет от 1900 до 2100 МГц, т.е. +/- 5% от центральной частоты. Полученные результаты могут быть полезны как при проектировании микрополосковых антенных решеток, так и при построении микрополосковых многодиапазонных антенн, что особенно важно для систем мобильной связи новых поколений.

Информация об авторах:

Гайнутдинов Тимур Аншарович, к.т.н., доцент каф. ТЭДиА, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва Россия

Для цитирования:

Гайнутдинов Т.А. Оценка влияния формы простого микрополоскового излучателя на его широкополосность // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 17-25.

For citation:

Gainutdinov T.A. (2023) Evaluation of the effect of the shape of a simple microstrip radiator on its broadband. *T-Comm*, vol. 17, no.4, pp. 17-25. (in Russian)

Введение

В настоящее время микрополосковые антенны находят широкое применение в сфере телекоммуникаций за счет своих преимуществ: легкость и простота конструкции, способность создания поля круговой поляризации, возможность реализации многодиапазонных антенн, интеграция со схемой питания в антенных решетках, дешевизна и простота реализации. Но, несмотря на ряд преимуществ, присущих данным антеннам, главным их недостатком является узкополосность, обусловленная ярко выраженной резонансной частотной зависимостью входного сопротивления [1, 2].

Наиболее полно, теория и методы расчета с соответствующими практическими результатами развита для одномерных микрополосковых антенн, т.е. антенн, где форма полоска имеет одну четко выраженную меру, а именно узкую ленту (рис. 1) или щель, прорезанную в экране микрополосковой линии (рис. 2) [3]. Для подобных антенн известны [3, 4] оптимальные с точки зрения ширины полосы согласования геометрия полоска (щели) и зависимость полосы согласования от геометрии и параметров подложки.

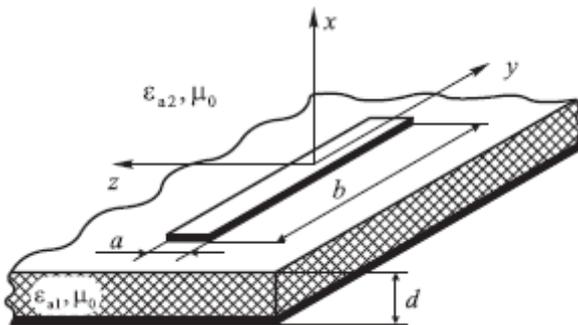


Рис. 1. Ленточный микрополосковый вибратор

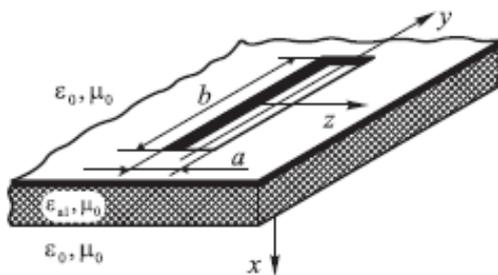


Рис. 2. Щелевой микрополосковый излучатель

Однако, переход к двумерной геометрии полоска (рис. 3а,б), приводит как к существенному усложнению методов расчета, так и к уменьшению практически полезной информации о достижимой полосе согласования подобных антенн при произвольной форме двумерного полоска.

На рисунке 3 приведена наиболее распространенная конструкция микрополоскового двумерного излучателя, а именно излучателя прямоугольной формы. Необходимо отметить, что первые сообщения об плоских двумерных излучателях относятся к 60-м годам XX-го века. Однако их практическое использование и начало всестороннего исследования характеристик связывается с именем Мунсона [5].

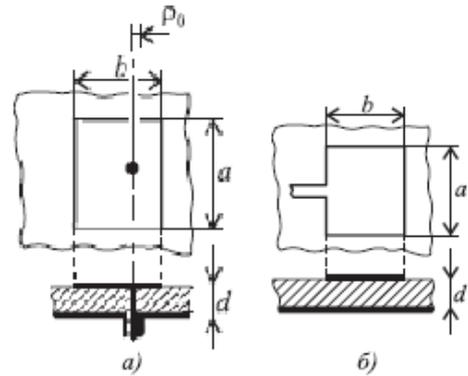


Рис. 3. Двумерный микрополосковый излучатель прямоугольной формы с питанием от коаксиальной линии (а) и питанием от микрополосковой линии (б)

Приведем формулы [6] для расчета размеров полоска и ширины полосы согласования по коэффициенту стоячей волны (КСВ) не хуже 2 для подобного микрополоскового излучателя

$$a = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}; b = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{r\phi}}} - 2\Delta, \tag{1}$$

где λ_0 – длина в свободном пространстве на центральной частоте f_0 , $\epsilon_{r\phi}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость подложки, равная

$$\epsilon_{r\phi} = \frac{\epsilon_{r1} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{r1} - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{d}{a}\right)^{-\frac{1}{2}}, \tag{2}$$

Δ – поправочный коэффициент, определяемый как

$$\Delta = 0.41d \frac{\epsilon_{r\phi} + 0.3(a/d) + 0.26}{\epsilon_{r\phi} - 0.26(a/d) + 0.81}, \tag{3}$$

Для определения полосы согласования по КСВ не хуже 2 может быть использована следующая приближенная формула

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \frac{3.77C_1 da}{\eta_{ns} \epsilon_{r1} \lambda_0 b}, \tag{4}$$

где $C_1 = 1 - 1/\epsilon_{r1} + 0.4/\epsilon_{r1}^2$,

$$\eta_{ns} = \frac{4C_1}{4C_1 + 3\pi k_0 d (1 - 1/\epsilon_{r1})^3}, k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

Система (1-4) справедлива для прямоугольной формы полоска, для других форм аналогичные формулы отсутствуют.

Учитывая широкую распространенность прямоугольных микрополосковых излучателей, приведем на рисунке 4 конкретную модель антенны, настроенную в резонанс на частоте 2.85 ГГц [7]. Данный излучатель входит в число тестовых примеров известного программного пакета расчета электродинамических структур FEKO [8].

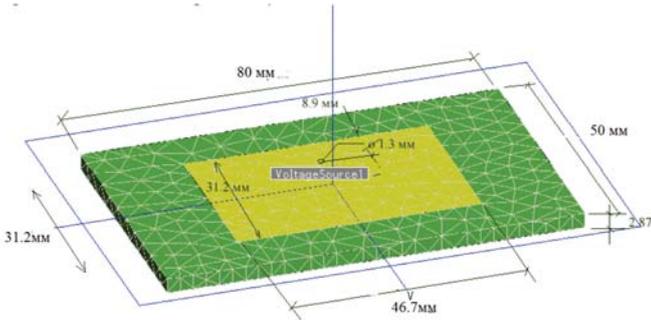


Рис. 4. Модель микрополоскового излучателя прямоугольной формы в пакете FEKO

Излучатель выглядит следующим образом: прямоугольная металлическая пластина размером 31.2 мм x 46.7 мм нанесена на диэлектрическую подложку (50 мм x 80 мм) толщиной 2.87 мм, с относительной диэлектрической постоянной 2.2. Планарная антенна запитывается с помощью соединителя SMA (диаметром 1.3 мм), расположенного на 8.9 мм от центра длинного края [7].

Поскольку частота 2.85 ГГц является не самой распространенной частотой в системах мобильной связи, был произведен пересчет размеров прямоугольного излучателя на резонансную частоту 2 ГГц. Для этого использовались стандартные приемы, вытекающие из принципа электродинамического подобия [1, 9]. В дальнейшем этот излучатель будем называть эталонным, и характеристики всех оптимизированных антенн будем сравнивать именно с этим излучателем. Размеры эталонного излучателя приведены на рисунке 5.

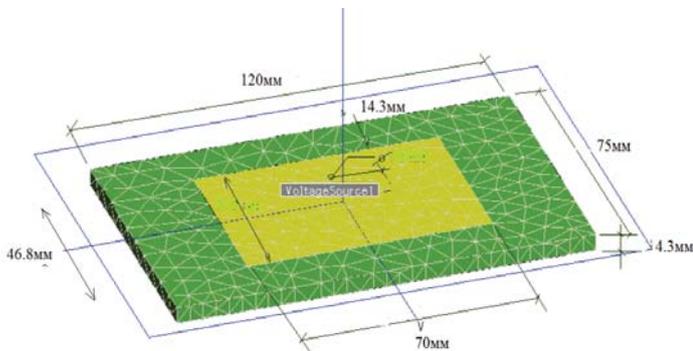


Рис. 5. Модель эталонного излучателя прямоугольной формы, настроенного в резонанс на частоте 2 ГГц

Эталонный излучатель выглядит следующим образом: прямоугольная металлическая пластина размером 46.8 мм x 70 мм нанесена на диэлектрическую подложку (75 мм x 120 мм) толщиной 4.3 мм, с относительной диэлектрической постоянной 2.2. Планарная антенна запитывается 50-Омным фидером в точке возбуждения, расположенной на 14.3 мм от центра длинного края.

График зависимости КСВ от частоты для эталонного излучателя приведен на рисунке 6.

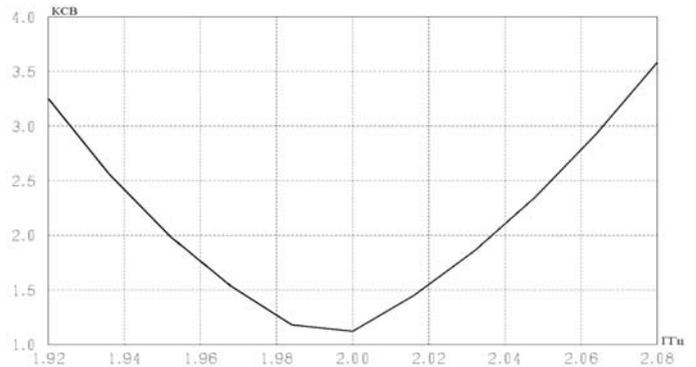


Рис. 6. График зависимости КСВ от частоты для эталонного излучателя

Как видно из этого графика полоса частот по КСВ не хуже 2 составляет от 1.95 до 2.038 ГГц, т.е. равняется 88 МГц или 4.8% от центральной частоты 2 ГГц. Если воспользоваться системой формул (1-4) для размеров эталонного излучателя и параметров подложки, тогда $\epsilon_{эф} = 2.07$ и полоса

согласования $\Delta f/f_0 = 0.057$ (5.7%), что достаточно близко к расчетным значениям.

На рисунке 7 приведен график зависимости КУ эталонной антенны по главной поляризации (вектор **E** параллелен узкой стороне пластины) в направлении нормали к пластине от частоты в пределах полосы согласования

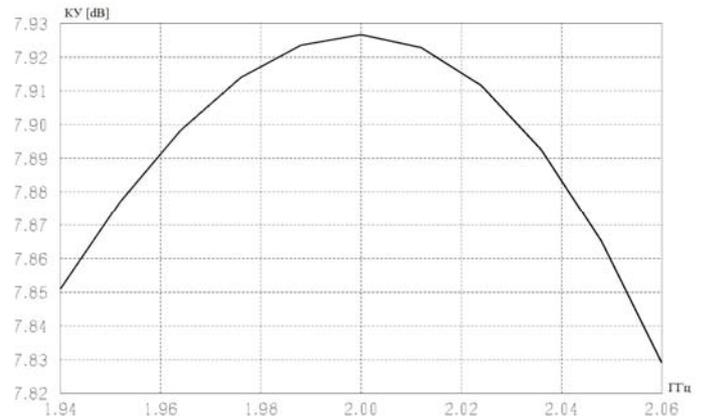


Рис. 7. Зависимость КУ от частоты для эталонной антенны

Как видно из этого графика, КУ эталонного излучателя в пределах полосы согласования практически не меняется и составляет 7.8-7.9 дБ.

Таким образом, эталонная микрополосковая антенна с прямоугольным излучателем имеет следующие параметры: длина подложки 120 мм ($1.15\lambda_d$), ширина подложки 75 мм ($0.72\lambda_d$), толщина подложки 4.3 мм ($0.041\lambda_d$), относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_{r1} = 2.2$, длина прямоугольного излучателя 70 мм ($0.67\lambda_d$), ширина прямоугольного излучателя 46.8 мм ($0.45\lambda_d$), где $\lambda_d = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{эф}} = 104.25$ мм. Эталонный излучатель имеет полосу согласования по КСВ не хуже 2 от 1.95 до 2.038 ГГц и обеспечивает КУ по линейной поляризации в пределах этой полосы не хуже 7.8 дБ.

Все дальнейшие результаты для оптимизированных антенн с прямоугольной формой облучателя будут сравниваться с аналогичными параметрами эталонного излучателя, причем размеры и параметры подложки будут одинаковыми во всех случаях и совпадающими с подложкой эталонной антенны.

Результаты исследований

Целью работы является исследование влияния формы двумерного полоскового излучателя на характеристики согласования микрополосковой антенны.

Первой антенной, для которой производились исследования, был микрополосковой излучатель квадратной формы. Задача ставилась следующим образом: необходимо найти размер стороны квадрата и положение точки возбуждения, при котором микрополосковый излучатель будет иметь наиболее широкую полосу согласования по КСВ не хуже 2 с центральной частотой 2 ГГц. Размеры и среда заполнения подложки, такие же как у эталонной антенны.

В ходе исследования широко использовались машинные методы оптимизации, которыми оснащен пакет прикладных программ FEKO. Базовым методом при оптимизации был выбран симплексный метод [7]. Такой метод обеспечивают наибольшую скорость оптимизации, однако результат сильно зависит от местоположения начальной точки. Оптимизация производилась на сетке частот от 1.95 до 2.05 ГГц, причем при получении неудовлетворительного результата сетка сужалась, а в случае положительного результата делалась попытка расширить сетку до получения максимально возможной. Размеры оптимального по ширине полосы согласования микрополоскового квадратного излучателя приведены на рисунке 8.

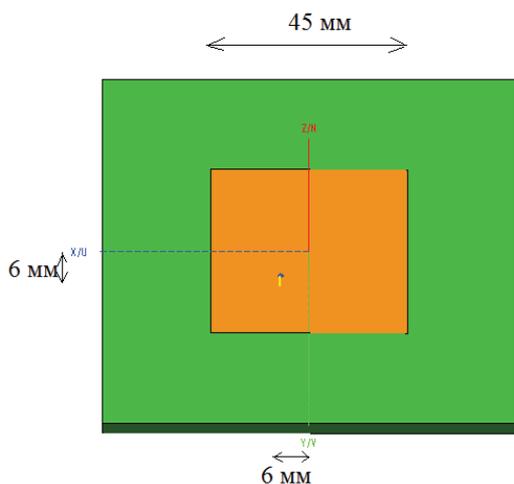


Рис. 8. Модель оптимального квадратного микрополоскового излучателя в пакете FEKO

Как видно из рисунка 8 размер стороны квадрата составил 45 мм, точка питания смещена относительно центра квадрата на 6 мм как по оси OX, так по оси OY.

График зависимости КСВ от частоты для квадратного излучателя приведен на рисунке 9. Из этого рисунка видно, что полоса частот по КСВ не хуже 2 составляет от 1.963 ГГц до 2.033 ГГц, т.е. равняется 70 МГц или 3.5% от центральной частоты 2 ГГц, что примерно на 37% хуже, чем у эталонного излучателя

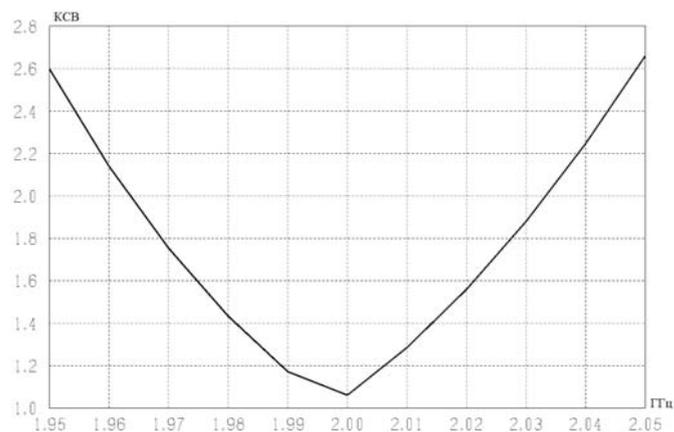


Рис. 9. График зависимости КСВ от частоты для квадратного излучателя

На рисунке 10 приведен график зависимости КУ квадратного излучателя в направлении нормали к пластине от частоты в пределах полосы согласования

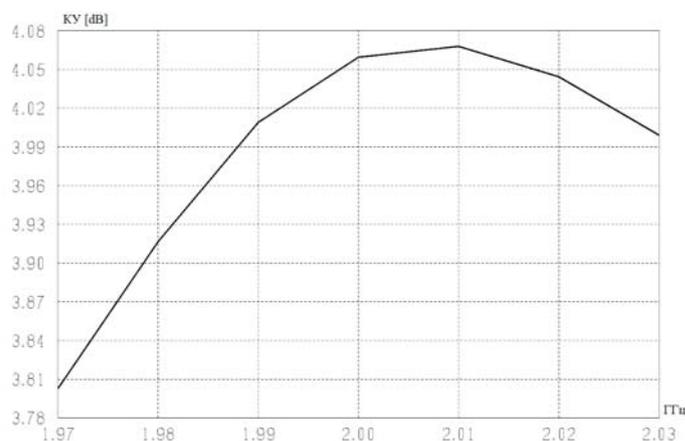


Рис. 10. Зависимость КУ от частоты для квадратного излучателя

Как видно из этого графика, КУ квадратного излучателя в пределах полосы согласования практически не меняется и составляет 3.8-4 дБ, т.е. существенно проигрывает эталонной антенне.

Таким образом, квадратный излучатель при таких же размерах и параметрах подложки, как у эталонного прямоугольного излучателя, имеет полосу согласования на 37% меньшую и сильно проигрывает в КУ.

Следующей антенной был ромбический излучатель. Теперь оптимизации подвергались сторона ромба, острый угол в основании ромба и положение точки возбуждения.

Параметры оптимального по ширине полосы согласования микрополоскового ромбического излучателя приведены на рисунке 11.

Как видно из рисунка 11 размер стороны ромба составил 42 мм, острый угол между сторонами ромба 66 градусов точка питания смещена относительно центра ромба на 22 мм по оси OX и на 5 мм по оси OY. График зависимости КСВ от частоты для оптимального ромбического излучателя приведен на рисунке 12.

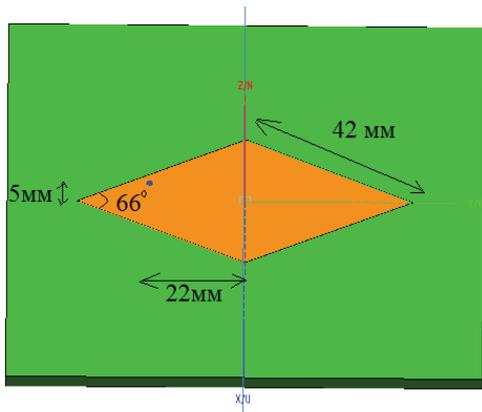


Рис. 11. Модель оптимального ромбического излучателя

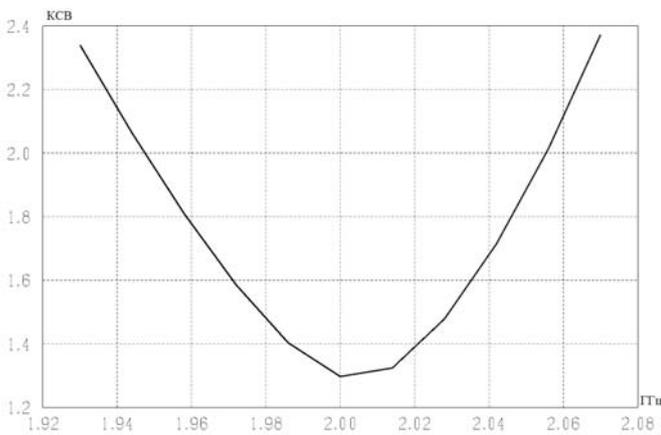


Рис. 12. График зависимости KСВ от частоты для оптимального ромбического излучателя

Из этого рисунка видно, что полоса частот по KСВ не хуже 2 составляет от 1.945 до 2.055 ГГц, т.е равняется 110 МГц или 5.5% от центральной частоты 2 ГГц, что примерно на 20% лучше, чем у эталонного излучателя. Таким образом, ромбический излучатель потенциально лучше согласовывается в полосе частот, имея при этом размеры существенно меньшие, чем эталонный прямоугольный излучатель.

Ключевым недостатком оптимального ромбического излучателя является крайне малое усиление. На рисунке 13 приведен график зависимости КУ от частоты для этого излучателя.

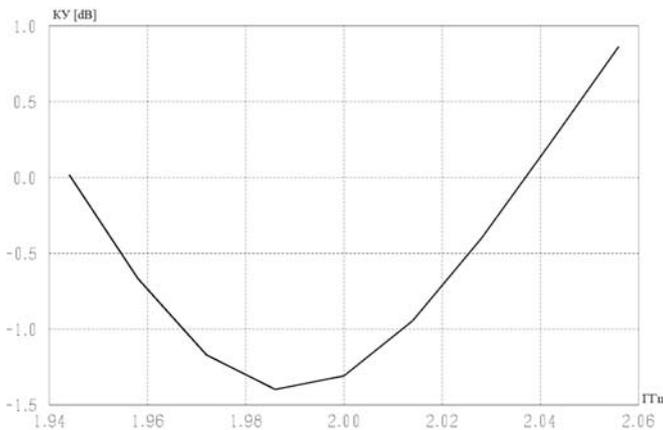


Рис. 13. Зависимость КУ от частоты для оптимального ромбического излучателя

КУ антенны меняется от -1.5 до 1 дБ, что конечно очень мало для микрополосковой антенны. Поэтому был проведен поиск параметров ромбических излучателей, обеспечивающих приемлемый КУ, т.е. КУ соизмеримый аналогом у эталонного прямоугольного излучателя, а при этом полоса согласования являлась уже опциональным параметром. Естественно, такой облучатель уже не является оптимальным в смысле ширины полосы согласования.

Геометрические размеры неоптимального по ширине полосы согласования с приемлемым КУ ромбического излучателя приведены на рисунке 14.

Как видно из рисунка 14 размер стороны ромба составил 61 мм, острый угол между сторонами ромба 62 градуса точка питания смещена относительно центра ромба на 18 мм по оси OX и на 11 мм по оси OY. График зависимости KСВ от частоты для неоптимального ромбического излучателя приведен на рисунке 15.

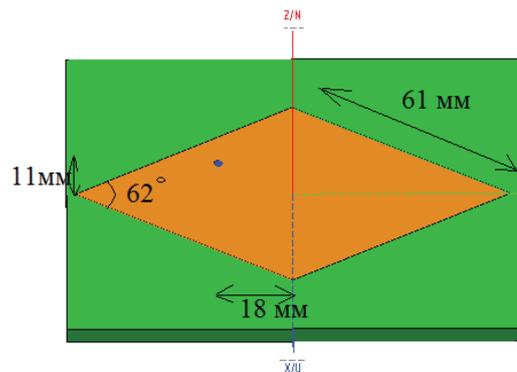


Рис. 14. Модель неоптимального ромбического излучателя

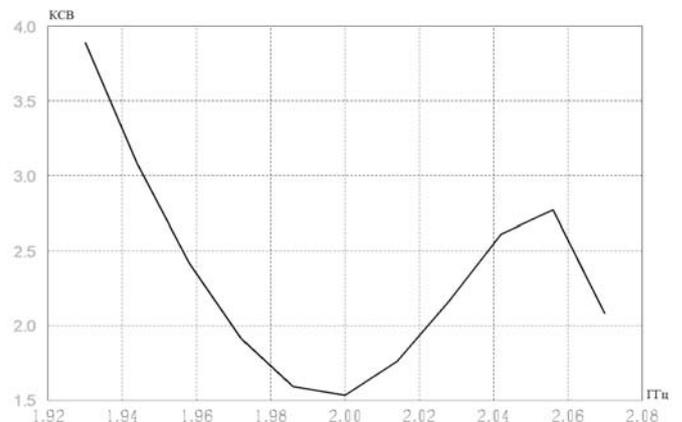


Рис. 15. График зависимости KСВ от частоты для неоптимального ромбического излучателя

Из этого рисунка видно, что полоса частот по KСВ не хуже 2 составляет от 1.97 до 2.02 ГГц, т.е равняется 50 МГц или 2.5% от центральной частоты 2 ГГц, что примерно на 48% хуже чем у эталонного излучателя.

На рисунке 16 приведен график зависимости КУ ромбического излучателя в направлении нормали к пластине от частоты в пределах полосы согласования.

Из этого графика видно, что КУ оптимального ромбического излучателя слабо меняется по частоте и составляет 7.05-7.4 дБ, что немного меньше, чем у эталонного излучателя, но намного больше, чем у оптимального по ширине полосы согласования ромбического излучателя.

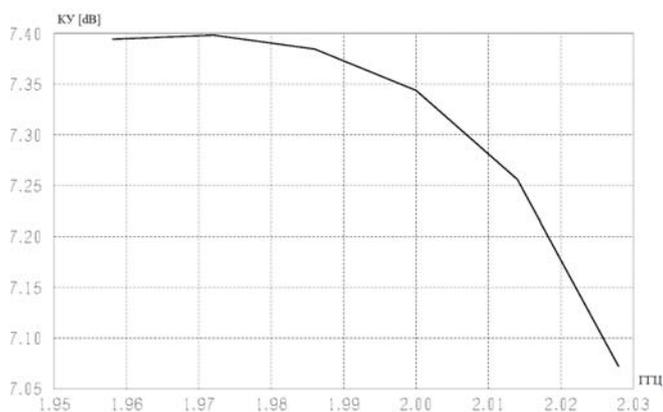


Рис. 16. Зависимость КУ от частоты для неоптимального ромбического излучателя

Таким образом, ромбический излучатель при таких же размерах и параметрах подложки, как у эталонного прямоугольного излучателя либо немного выигрывает в полосе согласования и сильно проигрывает в КУ, либо сильно проигрывает в полосе согласования и незначительно в КУ по сравнению с эталонным прямоугольным излучателем.

Следующей антенной был треугольный равносторонний излучатель. Оптимизации подвергались длина стороны треугольника и положения точки возбуждения

Размеры оптимального по ширине полосы согласования микрополоскового излучателя в виде равностороннего треугольника приведены на рисунке 17.

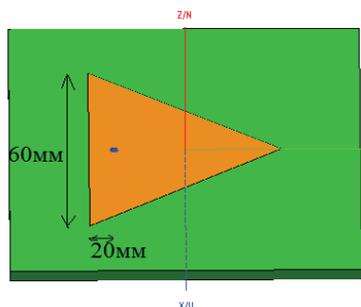


Рис. 17. Модель треугольного микрополоскового излучателя

Оптимальный по ширине полосы согласования равносторонний треугольный излучатель имеет длину стороны 60 мм, а точка возбуждения находится на медиане треугольника на расстоянии 20 мм от основания медианы.

График зависимости КСВ от частоты для треугольного излучателя приведен на рисунке 18.

Как следует из этого рисунка полоса частот по КСВ не хуже 2 составляет от 1.972 до 2.023 ГГц, т.е. равняется 51 МГц или 2.55% от центральной частоты 2 ГГц, что примерно на 47% хуже, чем у эталонного излучателя.

На рисунке 19 приведен график зависимости КУ от частоты для треугольного излучателя.

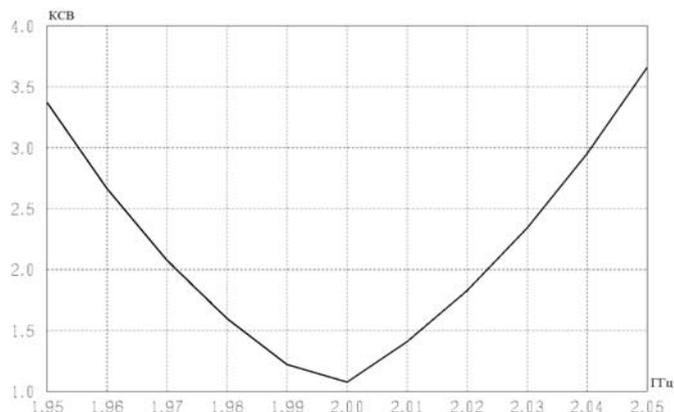


Рис. 18. График зависимости КСВ от частоты для треугольного излучателя

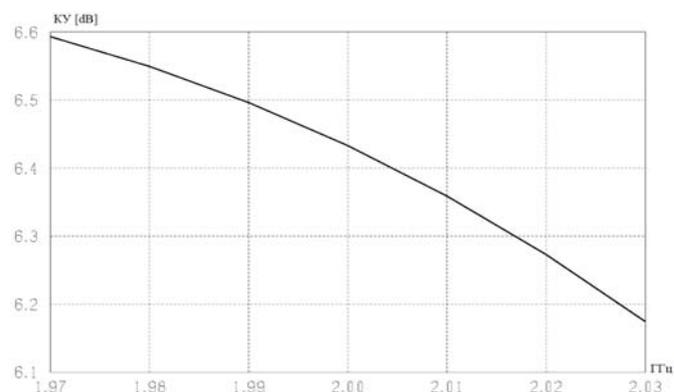


Рис. 19. Зависимость КУ от частоты для треугольного излучателя

Из этого графика видно, что КУ оптимального треугольного излучателя составляет 6.1-6.6 дБ, что меньше чем у эталонного излучателя.

Таким образом, треугольный излучатель сильно проигрывает в полосе согласования и существенно в КУ эталонному прямоугольному излучателю.

Перейдем теперь от плоских ломанных излучателей к плоским гладким излучателям.

Первым гладким излучателем был круглый излучатель, оптимизации подвергался радиус круга и положение точки возбуждения

Размеры оптимального по ширине полосы согласования круглого излучателя приведены на рисунке 20.

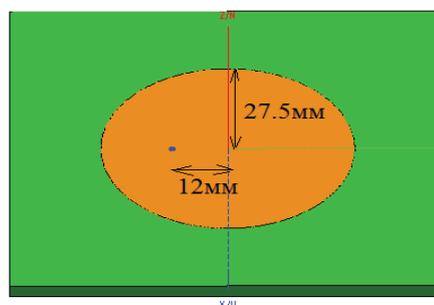


Рис. 20. Модель оптимального круглого излучателя

Оптимальный по ширине полосы согласования круглый излучатель имеет диаметр 55 мм, а точка возбуждения находится на расстоянии 12 мм от центра круга.

График зависимости КСВ от частоты для треугольного излучателя приведен на рисунке 21.

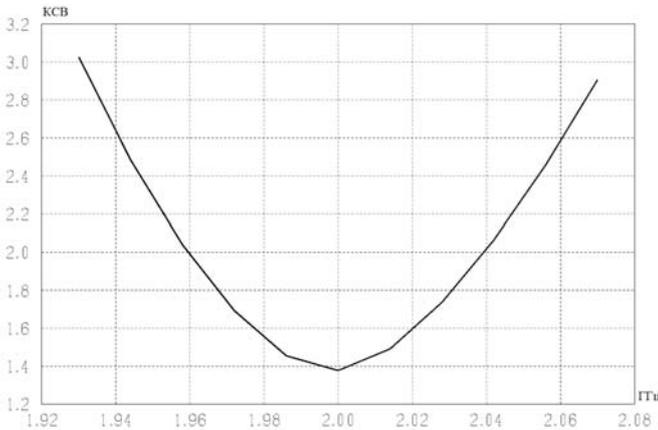


Рис. 21. График зависимости КСВ от частоты для круглого излучателя

Как следует из этого рисунка полоса частот по КСВ не хуже 2 составляет от 1.96 до 2.04 ГГц, т.е. равняется 80 МГц или 4% от центральной частоты 2 ГГц, что примерно на 17% хуже, чем у эталонного излучателя

На рисунке 22 приведен график зависимости КУ от частоты для круглого излучателя.

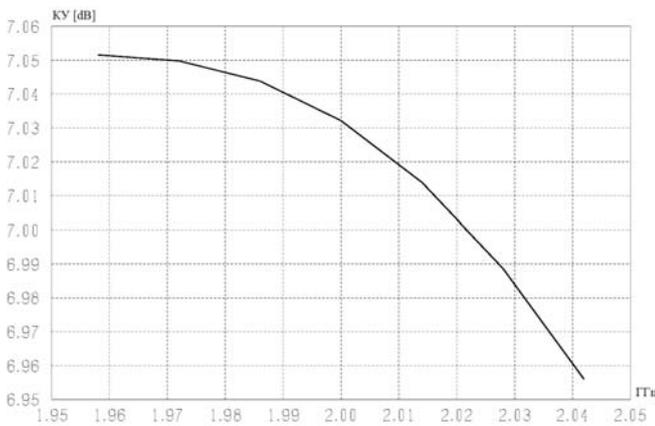


Рис. 22. Зависимость КУ от частоты для круглого излучателя

Из этого графика видно, что КУ оптимального круглого излучателя в пределах полосы согласования составляет 6.95-7.05 дБ, что немного меньше чем у эталонного излучателя.

Следующим облучателем был эллиптический излучатель, оптимизации подвергались длины большой и малой полуоси, а также положение точки возбуждения.

Размеры оптимального по ширине полосы согласования эллиптического излучателя приведены на рисунке 23.

Оптимальный по ширине полосы согласования эллиптический излучатель имеет размер большой полуоси 29.7 мм ($0.284\lambda_d$), размер меньшей полуоси 26 мм ($0.249\lambda_d$), точка возбуждения находится на расстоянии 21 мм ($0.201\lambda_d$) от центра эллипса вдоль большей полуоси и на расстоянии 12.5 мм ($0.12\lambda_d$) от центра эллипса вдоль меньшей полуоси.

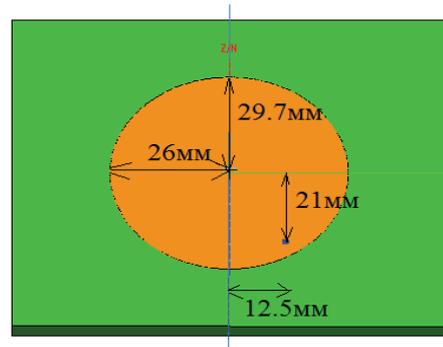


Рис. 23. Модель оптимального эллиптического излучателя

График зависимости КСВ от частоты для треугольного излучателя приведен на рисунке 24.

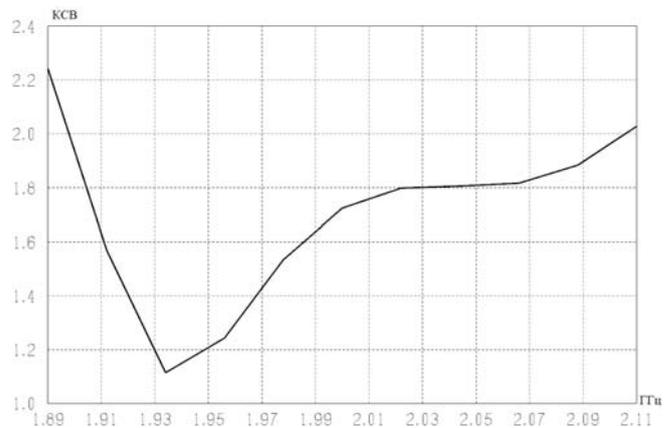


Рис. 24. График зависимости КСВ от частоты для эллиптического излучателя

Как следует из этого рисунка полоса частот по КСВ не хуже 2 составляет от 1.895 до 2.105 ГГц, т.е. равняется 210 МГц, или 10.5% от центральной частоты 2 ГГц, что больше чем в два раза больше, чем у эталонного излучателя.

Таким образом, эллиптическая форма полоска обеспечивает наибольшую полосу согласования среди всех рассмотренных до этого излучателей, включая эталонный прямоугольный, причем выигрыш по полосе весьма значителен.

На рисунке 25 приведен график зависимости КУ от частоты для эллиптического излучателя. Из этого рисунка видно, что в пределах широкой полосы согласования КУ меняется незначительно от 6.8 до 7.1 дБ, что примерно на 1 дБ хуже, чем у эталонного излучателя. На мой взгляд двукратное расширение полосы согласования вполне оправдывает потерю 1 дБ по коэффициенту усиления.

Также в ходе исследования были рассмотрены кольцевой и кольцевой-эллиптический излучатели, однако процесс оптимизации полосы согласования таких излучателей привел к вырождению подобных моделей в круглый и эллиптический вид, в силу чего полученные результаты по оптимизированным кольцевым полоскам не несут практического характера.

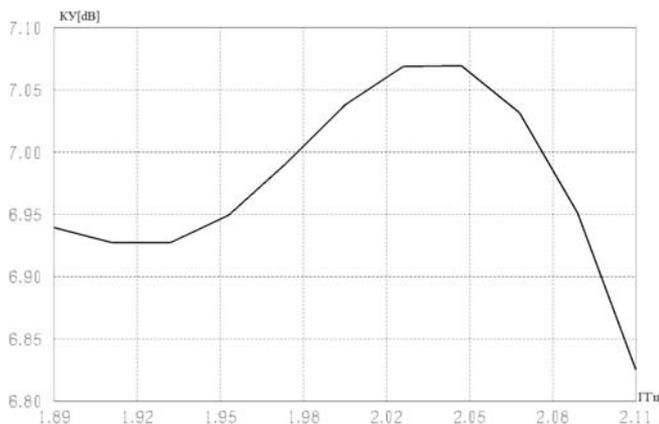


Рис. 25. Зависимость КУ от частоты для эллиптического излучателя

Заключение

В заключении статьи отметим, что форма полоска имеет ключевое значение для степени широкополосности излучателя, поэтому создание систем формул, аналогичных системе (1-4), для квадратного, круглого и эллиптического излучателя является весьма важной научно-практической задачей, которая ждет своего решения. Развитие технологий мобильной связи неизбежно ведет к ужесточению требований к рабочей полосе, а в системах мобильной связи будущих поколений и к рабочим полосам антенн абонентских устройств [10, 11], в силу чего создание многодиапазонных микрополосковых антенн становится все более актуальным и важным с практической точки зрения [12, 13]. Очевидным способом решения этой задачи является создание комплексной микрополосковой антенны, состоящей из набора излучателей, каждый из которых был бы оптимален для своего поддиапазона [14, 15].

Литература

1. Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г., под ред. Ерохина Г.А. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. М.: Горячая линия – Телеком 2007. 491 с.
2. Баранов С.А. Устройства СВЧ и антенны. М.: Горячая линия – Телеком 2019. 343 с.
3. Виноградов А.Ю., Кабетов Р.В., Сомов А.М. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны Учебное пособие М.: Горячая линия – Телеком 2016. 443 с.
4. Чебышев В.В. Микрополосковые антенны в многослойных средах. М.: Радиотехника, 2007. 160 с.
5. Munson R.D. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays // IEEE Trans. 1974. V. AP-22, № 1, pp. 74-78.
6. Modern Antenna Handbook. Edited by Constantine A. Balanis Wiley-Interscience 2008. 1704 p.
7. Банков С.Е., Курушин А.А. Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO. М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. 200 с.
8. <https://www.orcada.ru/product/altair/altair-feko.html>
9. Сазонов Д.М. Устройства СВЧ и антенны М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
10. Тонг Вэнь, Чжу Пэйин. Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. Москва. ДМК-Пресс, 2022. 624 с.
11. Бакулин М.Г. Кренделин В.Б. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020 № 2. С. 25-31.
12. Attaran M. The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, Feb. 2021, pp. 1-17.
13. Tiwari R., Sharma R., Dubey R. Microstrip patch antenna array design analysis for 5G communication applications // Smart Moves Journal Ijoscience, vol. 6, no. 5, pp. 1-5, 2020.
14. Кольцов Ю.В. Антенные решетки в эпоху 5G. Часть 2. Перспективные разработки // Антенны. 2022. № 6. С. 5-34.
15. Савочкин А.А., Нудьга А.А. Многодиапазонные антенны на основе фрактальных структур: М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2022. 125 с.

EVALUATION OF THE EFFECT OF THE SHAPE OF A SIMPLE MICROSTRIP RADIATOR ON ITS BROADBAND

Timur A. Gainutdinov, MTUCI, Moscow, Russia, tedia@mtuci.ru

Abstract

Microstrip antennas are one of the most common types of antennas for mobile objects. Compactness, lightness and conformity make their use convenient and in fact the only solution for the rapidly developing industry of wireless telecommunications. The key disadvantage of such antennas is their narrow bandwidth inherent in all resonator type antennas, microstrip antennas being a particular case. Basically, the narrowband nature of such antennas is due to a pronounced frequency dependence of the input impedance, as a result of which a satisfactory quality of natural matching can be achieved in a frequency band measured in units of percent. The paper considers microstrip radiators of simple geometry: rectangular, square, rhombic, triangular, round, elliptical, located on a substrate of fixed geometry with the same dielectric. For each shape of the strip geometry, numerical optimization of the strip dimensions and the position of the excitation point is performed in order to obtain the maximum bandwidth of natural matching in VSWR of no more than 2 when connected to a 50-ohm feeder. The frequency of 2 GHz was chosen as the central frequency in numerical studies. Calculations of the directional characteristics of the most successful variants of microstrip radiators within the matching band are given. It is shown that for a given geometry and parameters of filling the substrate, the most broadband is a microstrip elliptical radiator, the matching bandwidth of which is from 1900 to 2100 MHz, i.e. $\pm 5\%$ of the center frequency. The results obtained can be useful both in the design of microstrip antenna arrays and in the construction of microstrip multiband antennas, which is especially important for new generation mobile communication systems.

Keywords: shape of microstrip radiator, VSWR, matching band, excitation point, numerical optimization.

References

1. G.A. Erokhin, O.V. Chernyshev et al. Antenna Devices and Radio wave Propagation. Moscow: Hot Line Telecom, 2007. 491 p.
2. S.A. Baranov. SHF devices and antennas. Moscow: Hot Line Telecom, 2019. 343 p.
3. A.U. Vinogradov, R.V. Kabetov, A.M. Somov. SHF devices and small antennas. Moscow: Hot Line Telecom, 2016. 343 p.
4. V.V. Chebyshev. Microstrip antennas in multi-layer environments. Moscow: Radio engineering, 2007. 160 p.
5. R.D. Munson. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Trans.* 1974. Vol. AP-22, no. 1, pp. 74-78.
6. Modern Antenna Handbook. Edited by Constantine A. Balanis. Wiley-Interscience 2008. 1704 p.
7. S.E. Bankov, A.A. Kurushin. Workshop on the design of microwave structures using FEKO. Moscow: CJSC "NPP" RODNIK", 2009. 200 p.
8. <https://www.orcada.ru/product/altair/altair-feko.html>
9. D.M. Sazonov. SHF devices and antennas. Moscow: The higher school, 1988. 432 p.
10. Weng Tong, Peiyung Zhu. 6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence. Cambridge University Press, 2021. 490 p.
11. M.G. Bakulin, V.B. Kreyndelin. The problem of spectral efficiency and capacity increase in perspective 6G communication systems. *T-Comm*, 2020. No. 2, pp. 25-31.
12. M. Attaran. 'The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Feb. 2021, pp. 1-17.
13. R. Tiwari, R. Sharma, and R. Dubey. Microstrip patch antenna array design analysis for 5G communication applications. *Smart Moves Journal Ijoscience*, 2020, vol. 6, no. 5, pp. 1-5.
14. Yu.V. Koltsov. Antenna arrays in the 5G era. Part 2. Promising developments. *Antennas*, 2022. No. 6, pp. 5-34.
15. A.A. Savochkin, A.A. Nudga. Multiband antennas based on fractal structures: Moscow: INFRA-M, 2022. 125 p.

Information about author:

Timur A. Gainutdinov, Assistant professor, Cathedra of Technical Electrodynamics and Antennas, MTUCI, Moscow, Russia

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ ОПТИМАЛЬНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-26-31

Manuscript received 17 March 2023;
Accepted 12 April 2023

Уханов Евгений Валентинович,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, searif@yandex.ru

Ключевые слова: искусственный интеллект, статистическая теория, радиолокационный портрет, характеристики распознавания, плотность распределения распознавания, оптимальная система распознавания, сопоставление изображений

Данную работу можно рассматривать как продолжение статьи [1], либо как отдельные материалы, посвященные распознаванию подвижных воздушных объектов на основе теории проверки статистических гипотез. В дальнейшем, при изложении материалов данной статьи, будет использоваться терминология, предложенная в [1]. Актуальность данной статьи обусловлена событиями, происходящими на европейском континенте, указывающими на необходимость дальнейшего развития радиолокационных систем различного назначения и переходу от радиолокации к радиовидению [2], что позволит значительно повысить эффективность противовоздушной обороны и контроль воздушного пространства в целом. Построение радиолокационного портрета и дальнейшее автоматическое распознавание подвижных воздушных объектов, как элемент искусственного интеллекта, позволит исключить ошибки человеческого фактора, а также значительно сократить время принятия решения о необходимых мерах воздействия на обнаруженный летательный аппарат. Изучая находящиеся в свободном доступе научные труды различных ученых [3, 4, 5, 12] посвященных такому направлению исследования и развития искусственного интеллекта, как статистическая теория распознавания образов, можно отметить отсутствие такого важного элемента, как функция зависимости вероятности правильного распознавания от качества и зашумленности изображения. В рамках данной статьи будет предложен вариант решения данной задачи в виде математической модели. Так как в [1] рассматривается метод распознавания использующий коэффициент корреляции между текущим изображением $S_{ТИ}$ и эталонным $S_{ЭИ}$, а вероятность правильного распознавания оценивается с помощью критерия Неймана-Пирсона, предлагается построить графики зависимости вероятности правильного распознавания РПР от отношения энергии изображения E_I к спектральной плотности шумов ($R = 2E_I/N_0$), при заданной вероятности ложного распознавания $P_{лр}$. В дальнейшем, в представленной работе, данная зависимость будет называться характеристиками распознавания. Также будут рассмотрены графики, в данной работе называемые как плотность распределения вероятности распознавания.

Информация об авторе:

Уханов Евгений Валентинович, кандидат технических наук, кафедра "Безопасность телекоммуникаций", Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия

Для цитирования:

Уханов Е.В. Статистические характеристики сигнала на выходе оптимальной радиолокационной системы распознавания подвижных воздушных объектов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 26-31.

For citation:

Ukhanov E.V. Statistical characteristics of the signal at the output of the optimal radar system for identifying mobile air objects. T-Comm, vol. 17, no.4, pp. 26-31. (in Russian)

Введение

В любое время, а на период ведения боевых действий особенно, в воздушном пространстве можно наблюдать большое количество разнообразных летательных аппаратов различных размеров, с различными характеристиками, способами и скоростью перемещения. События 2022 года, развернувшиеся на европейском континенте, показали необходимость готовности к тому, что их количество и разнообразие будет только расти. Следовательно, на интеллектуальные способности операторов радиолокационных станций обнаружения, захвата, сопровождения и распознавания летательных аппаратов ложится очень большая нагрузка, которая имеет свои пределы. Снизить ее, а возможно и взять на себя часть функций, поможет искусственный интеллект, одним из основных аспектов которого является распознавание образов, в данном случае радиолокационных портретов подвижных воздушных целей. Это позволит оптимизировать целераспределение, целеуказание, адаптацию средств поражения с учетом характеристик конкретной цели, а в целом сократить время на принятие решения по воздействию на обнаруженную цель.

Помимо военной сферы процедура распознавания является активно развивающейся областью научных направлений и практических исследований, направленных на повышения качества жизни и эффективности принятия решений во всех сферах жизнедеятельности человека, это и распознавание речи, и распознавание конкретного человека в людском потоке и много другое [5, 9, 13, 14, 15].

Из теории радиолокационных систем [8] известно, что любая обработка сигналов для решения задач обнаружения, захвата, постановки на сопровождение, а также распознавания проходит на фоне шумов, уменьшающих вероятность правильного распознавания. Для оценки характеристик радиолокационных систем, формирующих радиолокационный портрет и использующих коэффициент корреляции между текущим изображением $S_{\text{ти}}$ и эталонным $S_{\text{эи}}$ [1], при решении задач распознавания подвижных объектов, предлагается использовать **характеристики распознавания**, которые представляют собой зависимость вероятности правильного распознавания $P_{\text{пр}}$ от отношения энергии изображения к спектральной плотности шумов ($R = 2E_i / N_o$), при заданной вероятности ложного распознавания $P_{\text{лр}}$.

По данным графикам, при заданных вероятностях $P_{\text{пр}}$ и $P_{\text{лр}}$ находится **требуемая** величина R , то есть отношение энергии изображения E_i на входе системы распознавания к спектральной плотности шумов, при которой обеспечивается получение заданной вероятности $P_{\text{пр}}$ при распознавании цели. Их математическая модель будет рассмотрена в данной работе.

Так как распознавание всегда проходит на фоне шумов, а в процессе распознавания предлагается использовать две статистические гипотезы: в каталоге, для распознаваемого объекта существует эталонное изображение $S_{\text{эи}} \neq 0$ (первая гипотеза), или оно отсутствует $S_{\text{эи}} = 0$ (вторая гипотеза), немаловажной характеристикой является **плотность распределения вероятности распознавания**.

В данной работе будут рассмотрены математические модели предложенных статистических характеристик.

Постановка задачи

Будем полагать, что бортовой РЛС обнаружен и поставлен на сопровождение неизвестный подвижный воздушный объект. За счет сверхширокополосного сигнала и режима синтетизирования апертуры антенны получен радиолокационный портрет данной цели $S_{\text{ти}}(\Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}})$ [1], который представим, как аддитивную смесь текущего изображения $I_{\text{ти}}(\Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}})$ и помех различного вида $n(\Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}})$, которые в данной работе будем обозначать, как **потери**:

$$S_{\text{ти}}(\Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}}) = I_{\text{ти}}(\Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}}) + n(\Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}}). \quad (1)$$

Для его идентификации реализуется алгоритм распознавания на основе сопоставления текущего изображения $S_{\text{ти}}$ и эталонного $S_{\text{эи}}$, из заранее сформированного каталога, использующий корреляционную метрику, а именно, коэффициент корреляции. Наличие шумов существенно усложняет задачу достижения заданной вероятности правильного распознавания $P_{\text{пр}}$, при заданной вероятности ложного распознавания $P_{\text{лр}}$. В данной ситуации целесообразно установить некоторый порог $y_{\text{пор}}$ и считать за признак распознавания только сигнал на выходе системы распознавания $y_{\text{вых}}$, который превышает данный порог. Для правильного выбора $y_{\text{пор}}$ целесообразно построить графики **характеристик распознавания** (по аналогии с функциям распределения случайного процесса) и графики **плотности распределения вероятности распознавания** (аналог плотности распределения случайного процесса).

Перед выполнением поставленной задачи примем некоторые допущения, касающиеся радиолокационного портрета, но не влияющие на качество полученного результата – рассматриваемое текущее изображение является цифровым, двумерным и бинарным (данное допущение также относится и к эталонному изображению).

Решение задачи построения функций распознавания и плотности распределения вероятности распознавания

Как отмечено выше, радиолокационное распознавание, реализующее алгоритм сопоставления текущего изображения $S_{\text{ти}}$ и эталонного $S_{\text{эи}}$, с расчетом коэффициента корреляции между ними, всегда проходит на фоне шумов различного происхождения $n(\Delta_{\text{аз}}, \Delta_{\text{ум}})$, не зависящих друг от друга. Следовательно, сигнал на выходе системы распознавания $y_{\text{вых}}$ также носит случайный характер, а общие потери могут быть описаны нормальным законом распределения.

Любой нормально распределенный случайный процесс характеризуется плотностью нормального распределения, которая в общем виде определяется выражением [10]:

$$N(x, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

где: x – значение случайной величины, a – среднее значение случайной величины, σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины.

И функцией распределения, которая в общем виде может быть записана как [10]:

$$F(x, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (3)$$

Рассмотрим упрощенную структурную схему идеальной системы распознавания, когда отсутствуют различные отклонения от оптимальной системы построения и обработки изображений, реализующую алгоритм расчета коэффициента корреляции между текущим изображением $S_{ТИ}$ и эталонным $S_{ЭИ}$ и представленную на рисунке 1. На один из входов «корреляционного устройства» (КУ) подается аддитивная смесь текущего изображения (ТИ) и шума. Отношение энергии изображения к шуму со спектральной плотностью $N_0/2$ определяется величиной $R = 2E_I / N_0$. На другой вход подается эталонное изображение (ЭИ). С выхода «корреляционного устройства» сигнал $y_{ВЫХ}$, пропорциональный уровню корреляции изображений, поступает на «пороговое устройство», позволяющее принять решение о распознавании цели, где сравнивается с сигналом $y_{ПОР}$, который определяется по заданным значениям $P_{ПР}$ и $P_{ЛР}$. На выходе идеальной системы распознавания возможны два варианта: цель распознана, при условии $y_{ВЫХ} \geq y_{ПОР}$ и цель не распознана, при условии $y_{ВЫХ} < y_{ПОР}$. При отклонении от идеальных условий возможны варианты, предложенные в [1].

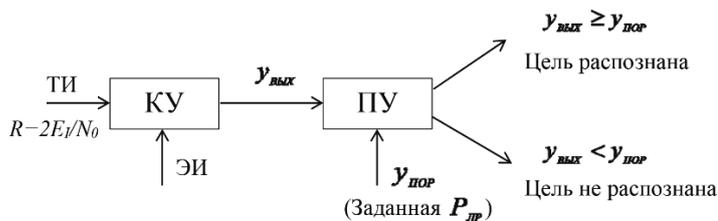


Рис. 1. Упрощенная структурная схема идеальной системы распознавания

Для определения величины $y_{ПОР}$ построим заданные в разделе «постановка задачи» графики *характеристик распознавания* и *плотности распределения вероятности распознавания*.

В соответствии с [8], статистические свойства выходного сигнала $y_{ВЫХ}$ системы распознавания полностью определяются статистическими свойствами шумового процесса $n(t)$. Так как процесс $n(t)$ гауссовский, а система распознавания является линейной, то и выходной сигнал $y_{ВЫХ}$ также является гауссовским.

Для построения графиков *характеристик распознавания* и *плотности распределения вероятности*

расознавания запишем выражения (2) и (3) применительно к сигналу на выходе системы распознавания $y_{ВЫХ}$.

В соответствии с (2), случайное значение $y_{ВЫХ}$ подчиненное гауссовскому (нормальному) закону распределения плотности вероятности будет определяться выражением:

$$p(y_{ВЫХ}) = \frac{1}{\sigma_{y_{ВЫХ}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y_{ВЫХ} - \bar{y}_{y_{ВЫХ}})^2}{2\sigma_{y_{ВЫХ}}^2}\right] \quad (4)$$

где: $\bar{y}_{y_{ВЫХ}}$ – среднее значение выходного сигнала $y_{ВЫХ}$, а $\sigma_{y_{ВЫХ}}^2$ – дисперсия выходного сигнала $y_{ВЫХ}$.

Для построения графика *плотности распределения вероятности распознавания*, запишем выражения для условной плотности распределения вероятностей $y_{ВЫХ}$ при условии, что на выходе только потери, а эталонного изображения нет $S_{ЭИ} = 0$, $p(y_{ВЫХ} / S_{ЭИ} = 0)$ и условную плотность распределения вероятностей $y_{ВЫХ}$ при наличии эталонного изображения $S_{ЭИ} \neq 0$, $p(y_{ВЫХ} / S_{ЭИ} \neq 0)$.

В соответствии с (4), условная плотность распределения вероятностей $y_{ВЫХ}$ при отсутствии эталонного изображения $p(y_{ВЫХ} / S_{ЭИ} = 0)$ будет определяться выражением:

$$p(y_{ВЫХ} / S_{ЭИ} = 0) = \frac{1}{\sigma_{y_{ВЫХ}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{y_{ВЫХ}^2}{2\sigma_{y_{ВЫХ}}^2}\right] \quad (5)$$

Условная плотность распределения вероятностей $y_{ВЫХ}$ при наличии эталонного изображения $p(y_{ВЫХ} / S_{ЭИ} \neq 0)$ будет определяться как:

$$p(y_{ВЫХ} / S_{ЭИ} \neq 0) = \frac{1}{\sigma_{y_{ВЫХ}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y_{ВЫХ} - aE_I)^2}{2\sigma_{y_{ВЫХ}}^2}\right] \quad (6)$$

Дисперсия выходного сигнала $\sigma_{y_{ВЫХ}}^2$ определяется значением средней мощности шума на выходе системы распознавания и может быть записана в виде:

$$\sigma_{y_{ВЫХ}}^2 = P_{SH_{ВЫХ}} = \frac{N_0 E_I}{2} \quad (7)$$

где E_I – энергия изображения, $N_0/2$ – спектральная плотность шумов на входе системы распознавания.

В начале данной статьи отмечено, что в качестве текущего изображения используется радиолокационный портрет обнаруженной цели, который образуется за счет формирования отраженного сигнала методом суммирования отражений от точечных участков, его преобразования и усиления, что сопровождается появлением шумов.

В соответствии с [1], спектральная плотность данных шумов определяется потерями, ухудшающими качество текущего изображения или искажающим его и, соответственно, негативным образом, влияющим на распознавание. К ним можно отнести: потери, связанные с уровнем шумов различного вида; потери на согласование частоты дискретизации входного сигнала цифровой системы обработки и сигнала

радиолокационного изображения; потери на обработку сигнала в процессоре, которые определяются весовой обработкой; потери на координатное согласование изображений, при нахождении коэффициента корреляции; потери в СВЧ тракте передатчика и приемника (волноводный тракт); потери при максимальных углах прокачки антенны и т.д.

Далее рассмотрим математические модели плотности распределения вероятности, на выходе устройства распознавания $y_{\text{вых}}$, для случаев $p(y_{\text{вых}} / S_{\text{эл}} = 0)$ и $p(y_{\text{вых}} / S_{\text{эл}} \neq 0)$ представленные на рисунке 2.

Видно, что они имеют одинаковую дисперсию, но распределение (6) смещено по оси $y_{\text{вых}}$ на величину, пропорциональную амплитуде сигнала a , следовательно, на величину, пропорциональную энергии сигнала E_I .

Для построения графика **характеристик распознавания** найдем вероятность правильного распознавания $P_{\text{пр}}$, проинтегрировав выражение (6) от уровня порога $y_{\text{пор}}$ до бесконечности:

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{\sigma_{y_{\text{вых}}} \sqrt{2\pi}} \int_{y_{\text{пор}}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(y_{\text{вых}} - aE_I)^2}{2\sigma_{y_{\text{вых}}}^2}\right] dy_{\text{вых}} \quad (8)$$

Математическая модель зависимости вероятности правильного распознавания $P_{\text{пр}}$ от отношения энергии изображения E_I к спектральной плотности шумов ($R = 2E_I / N_0$), при заданной вероятности ложного распознавания $P_{\text{лр}}$ представлена на рисунке 3.

Для вычисления выражений (6) - (8) нам необходимо определить энергию изображения E_I . В соответствии с [6], в непрерывном виде двумерное изображение определяется выражением:

$$I(x, y, \lambda, t) = \int_0^{\infty} f(x, y, \lambda, t) V(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

где $f(x, y, \lambda, t)$ – функция, описывающая распределение энергии источника светового излучения по пространственным координатам x, y , времени t и длины волны λ .

$V_s(\lambda)$ – спектральная чувствительность человеческого зрения.

В связи с тем, что за время процесса распознавания изображение не изменяется, переменная t может быть опущена. Также использование «компьютерного зрения», не зависящего от спектральной чувствительности человеческого зрения, позволяет записать $V_s(\lambda) = 1$.

На основании допущений, принятых для двумерного изображения, запишем в общем виде математическую модель текущего изображения в цифровом виде. В соответствии с [7]:

$$I_{\text{ци}}(\Delta x, \Delta y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(n\Delta x, m\Delta y) \delta(x - n\Delta x, y - m\Delta y), \quad (10)$$

где

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - n\Delta x, y - m\Delta y)$$

пространственно-дискретизирующая функция, состоящая из бесконечного числа δ – функций Дирака, заданных в узлах решетки с шагом $(\Delta x, \Delta y)$.

Тогда энергия двумерного цифрового текущего изображения может быть записана в виде:

$$E_I(\Delta x, \Delta y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} I^2(\Delta x, \Delta y). \quad (11)$$

В рамках данной статьи не предусмотрено построение точных графиков **характеристик распознавания** и **плотности распределения вероятности распознавания** нормально распределенной случайной величины $y_{\text{вых}}$, поэтому для их демонстрационного отображения с максимальным приближением воспользуемся, соответственно, операторами *normcdf* и *normpdf* из математического пакета прикладных программ Matlab [11]. На рисунках 2 и 3 представлены результаты моделирования.

На рисунке 2 представлены плотности распределения вероятности сигнала на выходе системы распознавания, определяемые выражениями (5) и (6). На рисунке 3 представлены характеристики распознавания для различных значений вероятности ложного распознавания $P_{\text{лр}}$.

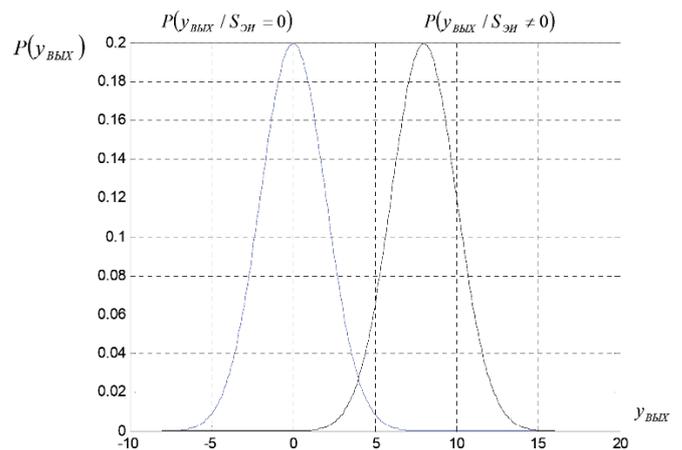


Рис. 2. Плотность распределения вероятности распознавания

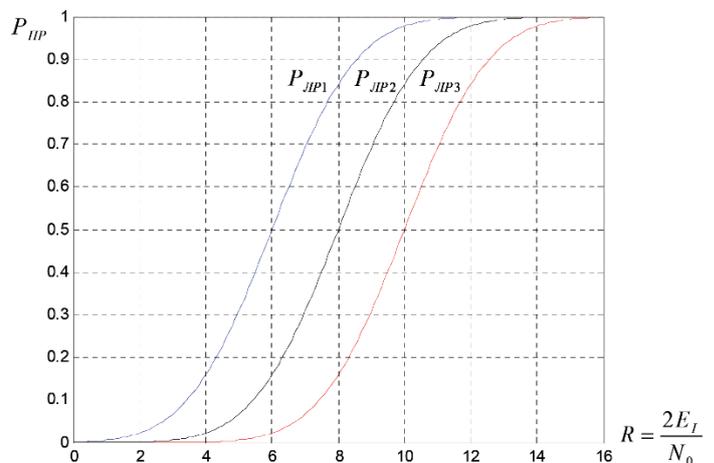


Рис. 3. Характеристики распознавания ($P_{\text{лр}1} > P_{\text{лр}2} > P_{\text{лр}3}$)

Заключение

В качестве вывода по данной работе можно отметить, что в результате представлены математические модели статистических характеристик, наиболее полно характеризующих систему распознавания. Для этого автор предлагает использовать **характеристики распознавания**, которые представляют собой зависимость вероятности правильного распознавания $P_{\text{пр}}$ от отношения энергии изображения к спектральной плотности шумов ($R = 2E_I / N_o$), при заданной вероятности ложного распознавания $P_{\text{лр}}$ и **плотность распределения вероятности распознавания** на выходе системы распознавания. В дальнейшем, данные характеристики будут использоваться для выбора порога в квазиоптимальных и «боевых» системах распознавания движущихся воздушных объектов.

В статье рассматривалась одноуровневая система распознавания подвижных воздушных объектов, не учитывающая особенности и параметры их движения. Следовательно, из анализа формулы (8) следует вывод, что для распознавания изображений с заданной вероятностью необходимо на входе системы распознавания иметь достаточную энергию текущего изображения E_I , а точнее, необходимо иметь требуемое отношение энергии изображения к спектральной плотности шума $R \geq R_o = 2E / N_o$.

По мнению автора, вероятность $P_{\text{пр}}$ не зависит ни от формы изображенного объекта, ни от способа формирования и обработки изображения. Единственным параметром изображения, от которого зависит вероятность правильного распознавания $P_{\text{пр}}$, является энергия изображения E (точнее, величина $R = 2E / N_o$).

Вероятность ложного распознавания зависит от спектральной плотности шумов на входе системы и от выбранной величины порога $y_{\text{пор}}$. При заданных значениях вероятности правильного распознавания $P_{\text{пр}}$ и ложного распознавания $P_{\text{лр}}$, которые выбираются, исходя из тактических требований и условий работы системы распознавания, можно однозначно определить необходимую величину порога $y_{\text{пор}}$.

Литература

1. Уханов Е.В. Решение задачи оптимального радиолокационного распознавания подвижных воздушных объектов на основе теории проверки статистических гипотез // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. №11. 2022.
2. Авиационные системы радиовидения, под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015.
3. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1977.
4. Чабан Л.Н. Теория и алгоритмы распознавания образов. Учебное пособие. Москва, 2004.
5. Лепский А.Е., Броневиц А.Г. Математические методы распознавания образов. Курс лекций. Таганрог: Издательство ТТИ ЮФО, 2009.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т.1, 2.
7. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. Учебное пособие. Санкт-Петербург: ГУ ИТМО, 2008.
8. Авиационные радиолокационные комплексы и системы, под ред. П.И. Дудника. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2015.
9. Мазуров Вл. Д. Математические методы распознавания образов. Учебное пособие 2-е издание, дополненное и переработанное. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2010.
10. Монсик В.Б. Основы теории вероятностей и математической статистики. Учебное пособие. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2004.
11. Плохотников К.Э., Николаенко В.Н. Теория вероятностей в пакете MATLAB. Учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2014.
12. Probabilistic Approaches for Pattern Recognition, Anil Rao (Based on slides from Andre Marquand) May 30, 2017.
13. Speech recognition, Steve Renals, COM326/COM646/COM678, February 1998.
14. Probabilistic Human Recognition from Video, Shaohua Zhou, Rama Chellappa, Center for Automation Research (CfAR) Department of Electrical and Computer Engineering University of Maryland, College Park, MD 20740, {shaohua, rama}@cfar.umd.edu.
15. Anusuya M.A., Katti S.K. Speech Recognition by Machine: A Review // (IJCSIS) International Journal of Computer Science and Information Security. Vol. 6. No. 3. 2009.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE SIGNAL AT THE OUTPUT OF THE OPTIMAL RADAR SYSTEM FOR IDENTIFYING MOBILE AIR OBJECTS

Evgenii V. Ukhanov, *Moscow technical university university of communications and informatics, Moscow, Russia, searif@yandex.ru*

Abstract

This work can be considered as a continuation of the article [1], or as separate materials devoted to the recognition of moving air objects based on the theory of testing statistical hypotheses. In the future, when presenting the materials of this article, the terminology proposed in [1] will be used. The relevance of this article is due to the events taking place on the European continent, indicating the need for further development of radar systems for various purposes and the transition from radar to radio vision [2], which will significantly improve the effectiveness of air defense and airspace control in general. The construction of a radar portrait and further automatic recognition of moving air objects, as an element of artificial intelligence, will eliminate human error, as well as significantly reduce the time it takes to make a decision on the necessary measures to influence the detected aircraft. Studying the freely available scientific works of various scientists [3, 4, 5, 12] devoted to such a direction of research and development of artificial intelligence as the statistical theory of pattern recognition, one can note the absence of such an important element as the function of the dependence of the probability of correct recognition on the quality and noise of the image. Within the framework of this article, a variant of solving this problem in the form of a mathematical model will be proposed. Since in [1] a recognition method is considered that uses the correlation coefficient between the current image and the reference one, and the probability of correct recognition is estimated using the Neumann-Pearson criterion, it is proposed to plot the dependence of the probability of correct recognition on the ratio of the image energy E_i to the spectral noise density ($R = 2E_i/N_0$), for a given false recognition probability. In the future, in the presented work, this dependence will be called recognition characteristics. Graphs will also be considered, in this paper referred to as the distribution density of the recognition probability.

Keywords: *artificial intelligence, statistical theory, radar portrait, recognition characteristics, recognition distribution density, optimal recognition system, image matching.*

References

1. E.V. Ukhanov. Solving the problem of optimal radar recognition of mobile aerial objects based on the theory of statistical hypothesis testing. T-Comm, No. 11. 2022.
2. Aviation radio vision systems, edited by G.S. Kondratenkov, Moscow, Radio Engineering, 2015.
3. A.L. Gorelik, V.A. Skriplin Recognition methods. Moscow: Higher School, 1977.
4. L.N. Chaban. Theory and algorithms of pattern recognition. Moscow: Study guide, 2004.
5. A.E. Lepsky, A.G. Bronevich. Mathematical methods of pattern recognition. A course of lectures. Taganrog: Publishing House TTI SFD, 2009.
6. W. Pratt. Digital image processing. Moscow: Mir, 1982, vol.1 2.
7. V.T. Fisenko, T.Y. Fisenko Computer processing and image recognition. Study guide. St. Petersburg, ITMO State University, 2008.
8. Aviation radar complexes and systems, edited by P.I. Dudnik, Moscow "VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky", 2015.
9. V.D. Mazurov. Mathematical methods of pattern recognition. The textbook is the 2nd edition, supplemented and revised. Yekaterinburg, Ural University Press, 2010.
10. V.B. Monsik. Fundamentals of probability theory and mathematical statistics. Study guide. Moscow, edition of the VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 2004.
11. K.E. Plokhotnikov, V.N. Nikolaenko. Probability theory in the MATLAB package. Textbook for universities. Moscow: Hotline – Telecom, 2014.
12. Probabilistic Approaches for Pattern Recognition, Anil Rao (Based on slides from Andre Marquand) May 30, 2017.
13. Speech recognition, Steve Renals, COM326/COM646/COM678, February 1998.
14. Probabilistic Human Recognition from Video, Shaohua Zhou, Rama Chellappa, Center for Automation Research (CfAR) Department of Electrical and Computer Engineering University of Maryland, College Park, MD 20740.
15. M.A. Anusuya, S.K. Katti. Speech Recognition by Machine: A Review, (IJCSIS) International Journal of Computer Science and Information Security. Vol. 6. No. 3, 2009.

Information about author:

Evgenii V. Ukhanov, *candidate of engineering sciences, sub-department "Telecommunications security", Moscow technical university university of communications and informatics, Moscow, Russia*

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЗАДЕРЖЕК ПРИ ПРЕДОСТАВЛЕНИИ УСЛУГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ НА СЕРВИСНЫХ ПЛАТФОРМАХ СЕАНСОВЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ УСЛУГ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-32-38

Manuscript received 16 March 2023;
Accepted 08 April 2023

Редругина Наталия Михайловна,
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
г. Санкт-Петербург, Россия,
redrugina.nm@spbgut.ru

Ключевые слова: пользовательские сеансы,
сети систем массового обслуживания (СeMO),
сети Джексона, качество предоставления услуг,
инфокоммуникационные услуги (ИКУ)

Целью данной статьи является разработка методов расчета качественных характеристик инфокоммуникационных услуг, рабочие нагрузки которых состоят из пользовательских сеансов. Область применения данных методов затрагивает разработку и сопровождение инфокоммуникационных многопользовательских сервисов, в части обеспечения высокого качества обслуживания пользователей. Рассматриваемые параметры качества обслуживания (QoS) определяют характеристики как системы в целом, так и отдельных элементов её архитектуры и для данного вида услуг качественными характеристиками являются время ожидания начала обслуживания пользовательской сессии, коэффициент загрузки серверного оборудования, количество пользовательских сессий одновременно поддерживаемые системой при её безошибочной эксплуатации. Многопользовательские сервисы рассматриваются с точки зрения теории массового обслуживания как сети систем массового обслуживания, с временем продолжительности пользовательского сеанса и временем поступления запросов на обслуживания игровыми сервисами, распределенными по экспоненциальному закону. Для оценки параметров моделей инфокоммуникационных многопользовательских услуг в качестве математического аппарата были выбраны сети Джексона, которые позволяют рассматривать необходимые нам системы вида $M/M/v$. В качестве апробации результатов был предложен математический анализ игровых многопользовательских сервисов, так как их популярность, а значит и поток пользователей на игровые сервера увеличивается с огромной скоростью. В качестве дополнительного инструмента оценки качественных характеристик рассматриваемых сеансовых моделей было предложено имитационное моделирование, которое позволяет оценить точность предложенного аналитического метода и провести анализ характеристик сложных систем с законами распределения времени отличных от экспоненциального, например длиннохвостых распределений (Вейбулла, Парето и т.д.)

Информация об авторах:

Редругина Наталия Михайловна, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, аспирант кафедры инфокоммуникационных систем СПбГУТ, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Редругина Н.М. Модели и методы вычисления задержек при предоставлении услуг пользователем на сервисных платформах сеансовых инфокоммуникационных услуг // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 32-38.

For citation:

Redrugina N.M. (2023) Models and methods for calculating delays in the provision of services by the user on the service platforms of session infocommunication services. *T-Comm*, vol. 17, no. 4, pp. 32-38. (in Russian)

Введение

Основные задачи моделирования сеансовых инфокоммуникационных систем заключаются в динамической подготовке, прогнозировании времени отклика и контроля поступлении запроса, позволяющие определять узкие места в системе и их смещение при изменении рабочей нагрузки, поступающей на web-сервис.

Необходимым этапом моделирования является формализация внешних инфокоммуникационных воздействий на функционирование и качество предоставления многокомпонентной инфокоммуникационной услуги как в целом, так и дифференцированное влияние на элементы её архитектуры. Так в [1] рассматриваются возможные последствия увеличения количества пользовательских обращений к web-сервисам, среди которых перегрузка серверов, как следствие достижения предела их пропускной способности.

В результате конечные пользователи получают оповещение об ошибке тайм-аута или пользователь самостоятельно прерывает запрос, не получив ответа по истечению определенного времени. Критичным это является для приложений электронной коммерции так как низкое качество предоставляемых услуг приводит к значительным потерям доходов.

Моделирование многопользовательских инфокоммуникационных сервисов призвано решить следующие задачи:

1. Расчет необходимого количества выделяемых ресурсов позволяющего обслуживать пиковую рабочую нагрузку.
2. Прогнозирование производительности, для определения временных характеристик сервиса при заданной рабочей нагрузке и определенной конфигурации аппаратно-программного обеспечения.
3. Определение архитектуры сервиса, позволяющей производить манипуляции с конфигурацией приложения, для достижения необходимого уровня качества обслуживания
4. Возможность управления пользовательскими запросами для оперативного влияния на качественные характеристики системы в режимах перегрузки.

Поступающая на пользовательские web-сервисы нагрузка представляет собой запросы на сеансы связи между клиентом и сервером, при этом каждый сеанс состоит из последовательностей транзакций с перерывами на ожидания действий пользователя. Инфокоммуникационные системы можно исследовать с точки зрения сеансового или транзакционного подхода.

В [2] понятие сеанс определяется как последовательность транзакций, которую выполнил пользователь на сервисе за определенный промежуток времени. Транзакция - любое отдельное взаимодействие пользователя с web-сервисом.

Авторы [3] утверждают, что сеанс является логической концепцией, относящейся к контексту, в котором пользователь подключается к серверу. Транзакция же в свою очередь это то, что пользователь совершает в текущем сеансе.

Транзакция в этом определении так же сохраняет свои свойства в том числе атомарность, и должна быть установлена на основе сеанса. Но автор так же вводит исключение, при котором транзакция может существовать и обособленно от пользовательского сеанса, системы с данными типами транзакций будут рассмотрены в следующей работе.

Так же в работе [1] сеансы определяются как временные и логически связанные последовательности запросов от конкретного пользователя.

Пользовательские сеансы сохраняют следующие свойства: целостность – гарантия обработки запросов в рамках сеанса, в котором они были созданы, идентификация – принадлежность запросов к сеансу должна гарантировать обработку одним и тем же внешним сервисом.

В данной работе будет разработан математический аппарат расчета качественных характеристик применимый для следующих типов сеансовых услуг:

1. Web-сервисы, такие как e-commerce, социальные сети, стриминговые платформы.
2. Игровые многопользовательские сервисы.
3. Функционирование беспроводной сети с учетом перемещения пользователей, точки беспроводного доступа.
4. Корпоративные облачные инфокоммуникационные системы
5. Цифровая медицина
6. Прочие

1. Подход к моделированию сеансовых инфокоммуникационных услуг

Для получения качественной оценки разрабатываемой инфокоммуникационной многопользовательской услуги, необходимо определить её входные характеристики. Начнем с того, что для разработки модели расчета обслуживаемой нагрузки на сеансовую модель системы, описывающую функционал представленных выше многопользовательских услуг, следует провести логическое разделение обслуживающих серверных ресурсов. Далее необходимо определить входные характеристики, такие как:

- Характеристики времени между поступлением запросов пользователей в систему.
- Вероятности перехода пользователей между узлами системы.
- Характеристики времени пребывания запросов пользователей в каждом узле системы.

Расчет общей продолжительности обслуживания сеанса пользователя на сервисе, как одной из временных характеристик, будет произведен далее.

1.1. Анализ источников для определения входных характеристик сеансовой услуги

В работах [4],[5] авторы проводят моделирование web-сервисов и многопользовательских игровых сервисов и выдвигают предположение о том, что переходы между состояниями системы, в том числе перемещение между серверами игровой логики описывается целью Маркова.

Авторы работы [6] при анализе входного трафика на многокомпонентный игровой сервис обосновали предположение что время между поступлением на любой игровой модуль может быть описано экспоненциальным распределением. Аналогичный вывод был получен в работе [5], где время между поступлением запросов пользователей в систему характеризуется экспоненциальным распределением, а длительность сессии - законом Парето.

Помимо этого, длиннохвостые распределения для определения длительности игровой сессии упоминаются в работах [7-8], в последней предложен метод решения проблем с синтезированием распределения Вейбулла, при аппроксимации

его совместным распределением трех случайных величин. Данный метод, и метод аппроксимации распределения Вейбулла гиперэкспоненциальным распределением [9] позволяет упрощать расчет «сложных» распределений для определения качественных характеристик системы.

Продолжительность пользовательского сеанса в [10] как на одном узле, так и в системе в целом согласуются с экспоненциальным распределением.

1.2. Обобщённая модель многопользовательского сервиса.

Разрабатываемая модель включает в себя M модулей, обслуживающих пользовательские сессии и обозначены они будут $S_1, S_2 \dots S_M$. Мы предполагаем использование математического аппарата сетей Джексона для расчета качественных характеристик сервиса, следовательно весь сервис следует рассматривать как сеть систем массового обслуживания (СМО). В работе [11] предложена дисциплина разделения процессоров в каждой очереди, так как это наиболее близко отображает политику планирования, используемую в большинстве операционных систем.

Следовательно, следует рассматривать каждый модуль как многоканальную систему массового обслуживания (СМО) с бесконечной очередью и принципом обслуживания FIFO (First - In - First - Out - «первым пришел - первым выходит»).

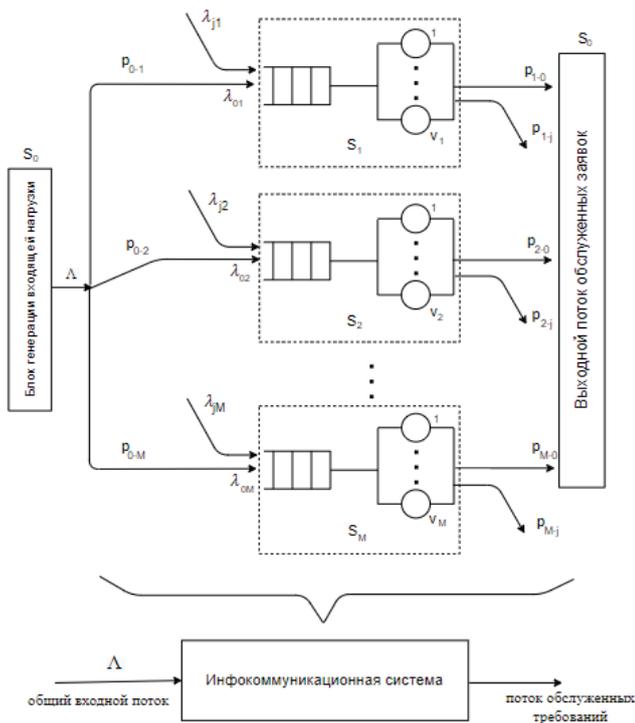


Рис. 1. Обобщенная модель многопользовательского сервиса

На рисунке 1 представлена разрабатываемая модель общего вида для многопользовательского сервиса. Она состоит из блока генерации входящей пользовательской нагрузки S_0 на обслуживание модулями системы, а также блока, в который поступают заявки после окончания обслуживания. Мы указываем на то, что нулевой блок не является частью сети систем

обслуживания запросов, поэтому он был введен как внешняя среда, взаимодействующая с системами.

Однако в ранее указанной работе [11], авторы предложили иной способ моделирования - замкнутую сеть систем массового обслуживания, с подсистемой моделирующей активные сессии приложения как показано на рис. 2. Сеансы моделируются с помощью системы массового обслуживания, которая генерирует запросы на систему. Предполагается что каждый сеанс занимает один сервер в S_0 , а время, проведенное в этом сервере, моделирует время размышления пользователя перед следующей активной сессией в сети обслуживания. Однако авторы так же признают, что для такой модели предполагается, что сеансы никогда не будут завершены, но на практике их количество будет меняться по мере завершения существующих и появления новых сеансов.

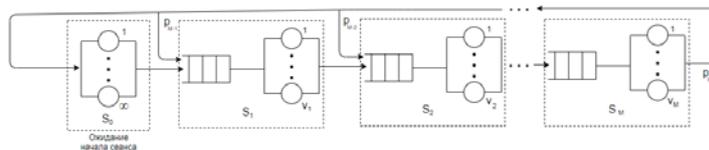


Рис. 2. Альтернативная модель обслуживания сервисов

Обозначенное на рисунке 1 архитектурное решение является более удобным для анализа и дальнейшей разработки математической модели, поэтому обращаться далее будем именно к нему.

Из подсистемы S_0 на обслуживающие приборы поступает общая входящая нагрузка с интенсивностью Λ , и далее она с определенной вероятностью попадает на одну из M систем. После поступления пользовательского запроса на один из узлов СМО, выделенный узел будет указан как S_i , происходит его обслуживание одним из свободных обслуживающих приборов из n_i возможных, с временем обслуживания $t_{обсл.i}$.

После обслуживания пользовательского запроса в СМО, перейти в другой узел с вероятностью p_{i-j} для продолжения обслуживания своей пользовательской сессии. Вероятность переходов из узла S_i в узел S_j , как и вероятность перехода из нулевого узла на один из узлов системы обработки запросов, для удобства могут быть заданы матрицей $M \times M$ вероятностей переходов $R = \|p_{ij}\|$, в случае системы из четырех узлов:

$$R = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix},$$

Она позволяет упростить расчет входной интенсивности, поступающий на каждый узел сети, рассчитываемый по теореме Джексона:

$$\lambda_i = \Lambda p_{0i} + \sum_{j=0}^M \lambda_j p_{ji} = \Lambda p_{0i} + \lambda_j R \tag{1}$$

Однако для рассмотрения открытой системы, не допускается бесконечная циркуляции пользовательских сессий в системе, из чего следует существование вероятности окончательного выхода из системы $p_{i-0} = 1 - \sum_{j=1}^M p_{i-j}$.

Мы рассматриваем непрерывные случайные переходы по узлам сети массового обслуживания с интенсивностями

переходов $\lambda_{\alpha\beta}$ из состояния $\alpha = (\alpha^1, \dots, \alpha^M)$ и $\beta = (\beta^1, \dots, \beta^M)$,

$$\lambda_i = \begin{cases} \mu_{0i} \doteq \lambda_i & \text{если } \beta - \alpha = e_i \\ \mu_{i0} \doteq \mu_i p_{i0} & \text{если } \beta - \alpha = -e_i \\ \mu_{ij} \doteq \mu_i p_{ij} & \text{если } \beta - \alpha = -e_i + e_j \end{cases} \quad (2)$$

1.3. Расчет характеристик системы

В [1] определено стационарное среднее время $T_{\text{сист.}}$ длительности пользовательской сессии в системе S , представленное в виде:

$$T_{\text{сист.}} = \sum_{i=1}^Y a_i u_i = \sum_{i=1}^Y a_i (w_i + t_{\text{обсл.}i}) \quad (3)$$

Где a_i - среднее число посещений пользователем i -го узла за все время пребывания в системе;

u_i - среднее время пребывания заявки в i -м узле;

w_i - среднее время ожидания обслуживания пользователя в i -м узле;

$t_{\text{обсл.}i}$ - среднее время получения пользователем услуги в i -м узле.

Определить значения коэффициентов a_i позволяет система уравнений баланса:

$$a_i = \sum_{j=1}^Y a_j \times p_{ji}, \quad i = \overline{1, Y}, \quad a_0 = 1 \quad (4)$$

Полученные данные позволяют определить интенсивности входных потоков узлов $\lambda_i = \Lambda \times a_i$, которые, в свою очередь, необходимы для оценки качества функционирования рассматриваемых инфокоммуникационных систем, за счет получения таких выходных характеристик как: коэффициенты загрузки узлов системы ρ_i , средняя длина очереди L_i и время ожидания на узлах системы w .

В сеансовых услугах одной из качественных характеристик определяющей уровень обслуживания пользователя является время ожидания обслуживания, для его расчета используем формулу Литтла:

$$\bar{W} = \frac{\bar{L}}{\lambda} \quad (5)$$

Как уже говорилось ранее вычисление качественных характеристик возможно в стационарном состоянии системы, когда $A < v$, где $A = \lambda/\mu$.

Средняя длина очереди равна:

$$\bar{L} = \sum_{k=v+1}^{\infty} (k - v) * [k] = \frac{A \times v}{(v - A)^2} \times P_v \quad (6)$$

где P_v - вероятность состояния задана выражением:

$$P_v = \frac{A^v}{v!} P_0 \quad (7)$$

где P_0 - вероятность отсутствия заявок в системе определяется выражением:

$$P_0^{-1} = \sum_{x=0}^v \frac{A^x}{x!} + \frac{A^v}{v!} \times \frac{A}{v - A} \quad (8)$$

Коэффициент загрузки узла i при известной входной интенсивности на данный узел, рассчитывается выражением:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i t_{\text{обсл.}i}}{v_i} \quad (9)$$

Условие стационарного состояния системы $\rho_i < 1$ - гарантирует отсутствие перегрузки в системе.

2. Математическое моделирование частных архитектур игровых сервисов

В данном разделе будет проведено аналитическое и имитационное моделирование многопользовательского игрового сервиса, концептуально схожего с представленным в работе [5]. На рисунке представлена марковская модель ролевого многопользовательского сервиса с переходом между состояниями игрового процесса, с привязкой к ресурсам локации.

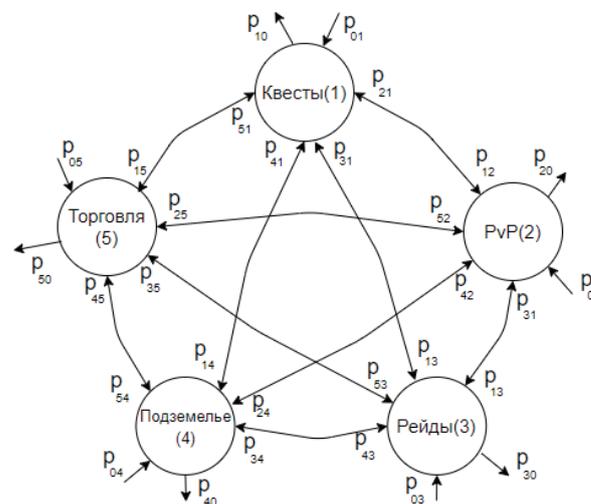


Рис. 3. Обобщенная модель переходов в игровом процессе MMORPG

При разработке и эксплуатации многопользовательских сервисов, как уже говорилось ранее может возникнуть событие, приводящее к высокой входной нагрузке на весь сервис. Это в свою очередь чревато появлением высоконагруженных узлов и потерей качества пользовательского обслуживания. Главным условием стабильной работы системы это отсутствие перегрузки контролируемое параметром коэффициента загрузки узла i : $\rho_i = \frac{\lambda_i * \mu_i}{v_i}$, который не должен достигать единицы.

Перегрузка влияет на работоспособность всей системы, но для рационального использования серверных ресурсов следует более избирательно подходить к поиску высоконагруженных узлов. Из чего следует что расчет качественных характеристик сервиса необходимо производить с дифференцированием расчетов для каждой СМО в отдельности.

На рисунке 4 изображена система массового обслуживания пользователей, использующих ресурсы локаций для прохождения игровых квестов.

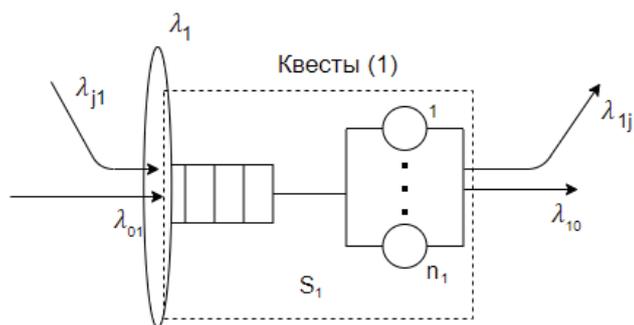


Рис. 4. модель отдельной СМО рассматриваемого сервиса

Для расчета интенсивности входного потока λ_1 на конкретную систему S_i необходимо использовать выражение (1), для матрицы включающую пять узлов системы с учетом внешнего поступления (нулевого узла). Расчет интенсивности входного потока будет включать в себя решение системы уравнений для всех узлов:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \Lambda * p_{01} + \lambda_2 * p_{21} + \lambda_3 * p_{31} + \lambda_4 * p_{41} + \lambda_5 * p_{51} \\ \lambda_2 = \Lambda * p_{02} + \lambda_2 * p_{12} + \lambda_3 * p_{32} + \lambda_4 * p_{42} + \lambda_5 * p_{52} \\ \lambda_3 = \Lambda * p_{03} + \lambda_2 * p_{13} + \lambda_3 * p_{23} + \lambda_4 * p_{43} + \lambda_5 * p_{53} \\ \lambda_4 = \Lambda * p_{04} + \lambda_2 * p_{14} + \lambda_3 * p_{24} + \lambda_4 * p_{34} + \lambda_5 * p_{54} \\ \lambda_5 = \Lambda * p_{05} + \lambda_2 * p_{15} + \lambda_3 * p_{25} + \lambda_4 * p_{35} + \lambda_5 * p_{45} \end{cases}$$

В работе [12] нами было проведено математическое моделирование многопользовательского игрового сервиса с разделением ресурсов локаций, как сети систем массового обслуживания, состоящей из трех взаимосвязанных узлов. Моделирование позволило получить качественные характеристики сервиса и их зависимости: 1) от входящей нагрузки; 2) от изменения архитектуры взаимосвязей между узлами.

Чем сложнее и больше архитектура системы, тем выше трудозатраты направленные на её расчет. Однако бывают исключения такие как представленная в [13] модель многокомпонентной многопользовательской игры «Rockymud», которая поддерживает сеансы игроков в десяти тысячах комнат.

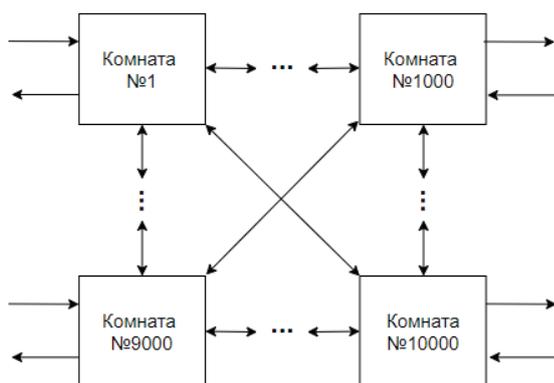


Рис. 5. Обобщенная модель переходов в многокомпонентном сервисе

Авторы работ по анализу данного игрового сервиса, описывают характер переходов внутри игрового процесса как равновероятный и не зависящий от идентификатора комнаты, которую пользователь посетил последней.

В случае если при анализе действий пользователя мы получаем информацию о среднем количестве комнат, которые он посетил за одну игровую сессию – N, расчет параметров системы выглядит следующим образом:

Вероятность окончания сессии при выходе из узла i :

$$p_{\text{вых.}i} = 1/N \tag{10}$$

С учетом особенностей рассматриваемых систем интенсивность посещений i -го узла, находится преобразованием выражения (1):

$$\lambda_i = \frac{\Lambda}{Y} + \sum_{j=0}^{Y-1} \frac{\lambda_j * (1 - p_{\text{вых.}j})}{Y - 1} \tag{11}$$

где Y – количество узлов обслуживания (комнат)

В частном случае игры, при равных вероятностях переходов между состояниями системы, интенсивность посещения i комнаты рассчитывается:

$$\lambda_i = \frac{\Lambda * N}{Y} \tag{12}$$

где Λ – общая интенсивность входящей нагрузки в СеМО; N – кол-во узлов (комнат) которые посетит пользователь.

Полученные результаты рисунке 7 согласуются с результатами имитационного моделирования для 5 узлов, модель которого представлена на рисунке 6.

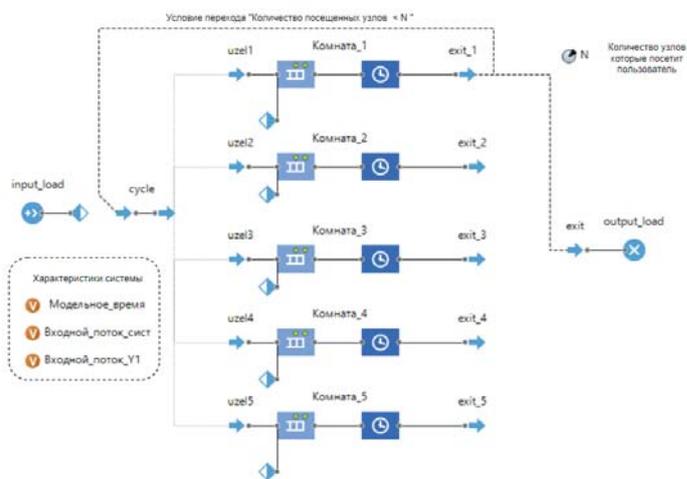


Рис. 6. Имитационная модель для 5 узлов (игровых комнат)

Данная имитационная модель включает в себя следующие блоки:

- Блок генерации запросов пользователей на обслуживание в СеМО, поступающих на систему с интенсивностью Λ .
- Блок распределения потока запросов на узлы системы, при первом посещении блока запросом распределяет поток на узлы с вероятностью p_{0i} , при повторном посещении запросом контролирует выполнение условия посещения пользователем «N» неповторяющихся узлов до того, как он покинет систему.
- Блок обслуживания пользовательских сессий, интенсивность обслуживания в каждом узле которого определена μ_i .
- Блок окончания пользовательского сеанса, выводит из системы запросы, у которых счетчик посещений узлов равен N.

На рисунке 7 с помощью имитационного моделирования получен график изменения коэффициента загрузки ρ_i всех пяти узлов при постепенном увеличении общей входной нагрузки Λ , при постоянных значениях μ_i и v_i .

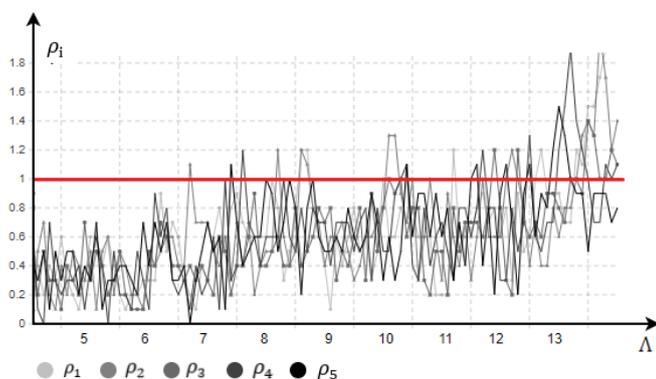


Рис. 7. График зависимости коэффициента загрузки от интенсивности Λ

Как видно из графика увеличение общей входной интенсивности влияет на коэффициент загрузки каждого узла, в момент, когда выполняется условие $\rho_i > 1$ происходит перегрузка системы. До ввода сервиса в эксплуатацию, необходимо проводить моделирование в целях прогнозирования перегрузки как системы в целом, так и отдельных элементов её архитектуры. Так же стоит проводить в качестве профилактического мер моделирование функционирующего сервиса, для постоянного анализа влияния продолжительного увеличения нагрузки как следствие растущей популярности сервиса, или фактор события (ивент, реклама, акция, обновление) который приводит к временному скачку загруженности сервиса.

Заключение

В данной работе был представлен математический аппарат сетей Джексона для расчета качественных характеристик сервисных платформ сеансовых инфокоммуникационных услуг.

Разработаны математические модели расчета частных архитектур игровых многопользовательских сервисов с системами типа М/М/ν, в том числе построена имитационная модель для оценки качественных характеристик системы.

Реализация математического решения возможна при комплексном анализе влияния внешних инфокоммуникационных

воздействий на систему как целостный объект и дифференцированное влияние на её архитектурные составляющие.

В дальнейших исследованиях предполагается создание математического аппарата расчета качественных характеристик пользовательского игрового трафика с учетом надежности систем, а также анализ моделей G/G/v с внедрением различных распределений в том числе уже упомянутых распределений Вейбулла и Парето, которыми описываются многие информационные системы.

Литература

1. Chen H., Mohapatra P. Overload control in QoS-aware web servers. Computer Networks. 2004. №42, pp. 119-133. DOI:10.1016/S1389-1286(03)00178-6.
2. Осипенков Я. Области действия в Google Analytics (2020) URL: <https://osipenkov.ru/scope-google-analytics> (Дата обращения: 19.01.2023)
3. Вархуус К., Херстамар Б.Э. Способ, система и устройство для проверки достоверности процесса транзакции. Пат № RU2644132C2. 2018.
4. Zheng Z., Lyu M. A Distributed Replication Strategy Evaluation and Selection Framework for Fault Tolerant Web Services. Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services, ICWS 2008, pp. 145-152 DOI: 10.1109/ICWS.2008.42.
5. Suznjevic M. Modelling of Network Traffic for Multiplayer Role-Playing Games based on User Behaviour. 2012.
6. Tarng P.-Y., Chen K.-T., Huang P. An analysis of WoW players' game hours, 2008, pp. 47-52. DOI: 10.1145/1517494.1517504.
7. Feldmann, Anja and Ward Whitt. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models // Proceedings of INFOCOM '97. Vol.3, pp. 1096-1104.
8. Svoboda P., Karner W., Rupp M. Traffic Analysis and Modeling for World of Warcraft // 2007 IEEE International Conference on Communications, Glasgow, UK, 2007, pp. 1612-1617, doi: 10.1109/ICC.2007.270
9. Feldmann A., Ward W. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models // Proceedings of INFOCOM '97. 1997, vol. 3, pp. 1096-1104.
10. Chen K.-T., Huang P., Lei C.-L. Game traffic analysis: an MMORPG perspective // Computer Networks. 2006. 50, pp. 3002-3023. DOI: 10.1016/j.comnet.2005.11.005.
11. Uргаonkar B., Pacifici, G., Shenoy P., Spreitzer M., Tantawi A. An analytical model for multi-tier internet services and its applications // Sigmetrics Performance Evaluation Review – SIGMETRICS, 2005, pp. 291-302. DOI: 10.1145/1071690.1064252.
12. Зарубин А.А., Редругина Н.М. Моделирование игровых многопользовательских сервисов // Вестник связи. 2020. № 8. С. 11-16.
13. Kwok M., Yeung G. Characterization of user behavior in a multiplayer online game. 2005, pp. 69-74. DOI: 10.1145/1178477.1178486.

MODELS AND METHODS FOR CALCULATING DELAYS IN THE PROVISION OF SERVICES BY THE USER ON THE SERVICE PLATFORMS OF SESSION INFOCOMMUNICATION SERVICES

Natalia M. Redrugina, *The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia,*
redrugina.nm@spbgut.ru

Abstract

The purpose of this article is to develop methods for calculating the qualitative characteristics of infocommunication services whose workloads consist of user sessions. The scope of application of these methods affects the development and maintenance of infocommunication multi-user services, in terms of ensuring a high quality of user service. The quality of service (QoS) parameters under consideration determine the characteristics of both the system as a whole and individual elements of its architecture, and for this type of service, the qualitative characteristics are the waiting time for the start of user session maintenance, the load factor of server equipment, the number of user sessions simultaneously supported by the system during its error-free operation. Multi-user services are considered from the point of view of queuing theory as a network of queuing systems, with the duration of the user session and the time of receipt of requests for services by gaming services distributed exponentially. To evaluate the parameters of the models of infocommunication multi-user services, Jackson networks were chosen as a mathematical apparatus, which allow us to consider the necessary systems of the type $M/M/v$. As an approbation of the results, a mathematical analysis of multi-user gaming services was proposed, since their popularity, and hence the flow of users to game servers, is increasing at a tremendous rate. As an additional tool for assessing the qualitative characteristics of the session models under consideration, simulation modeling was proposed, which allows us to evaluate the accuracy of the proposed analytical method and analyze the characteristics of complex systems with time distribution laws other than exponential, for example, long-tailed distributions (Weibull, Pareto, etc.).

Keywords: *user sessions, queuing system networks, Jackson networks, quality of service provision, infocommunication services.*

References

1. H. Chen, P. Mohapatra (2003). Overload control in QoS-aware web servers. *Computer Networks*, pp. 119-133. DOI:10.1016/S1389-1286(03)00178-6.
2. Y. Osipenkov. Scopes in Google Analytics (2020). URL: <https://osipenkov.ru/scope-google-analytics> (Accessed 19 January 2023).
3. K. Varhuus, B.E. Herstamar (2018). Method, system and device for checking validation of transaction process. Russia Pat № RU2644132C2.
4. Z. Zheng, M. Lyu (2008). A Distributed Replication Strategy Evaluation and Selection Framework for Fault Tolerant Web Services. *Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services, ICWS 2008*, pp. 145-152 DOI: 10.1109/ICWS.2008.42
5. M. Suznjevic (2012). Modelling of Network Traffic for Multiplayer Role-Playing Games based on User Behaviour.
6. P-Y. Tarnq, K-T.Chen, P. Huang (2008). An analysis of WoW players' game hours, pp. 47-52. DOI: 10.1145/1517494.1517504
7. Feldmann Anja and Ward Whitt. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models. *Proceedings of INFOCOM '97*, vol.3, pp. 1096-1104.
8. P. Svoboda, W. Karner, M. Rupp (2007). Traffic Analysis and Modeling for World of Warcraft. *2007 IEEE International Conference on Communications, Glasgow, UK*, pp. 1612-1617, doi: 10.1109/ICC.2007.270
9. A. Feldmann, W. Ward (1997). Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models. *Proceedings of INFOCOM '97* 3, pp. 1096-1104, vol. 3.
10. K-T. Chen, P. Huang, C-L. Lei (2006). Game traffic analysis: an MMORPG perspective. *Computer Networks*. No. 50, pp. 3002-3023. DOI: 10.1016/j.comnet.2005.11.005
11. B. Urgaonkar, G. Pacifici, P. Shenoy, M. Spreitzer, A. Tantawi (2005). An analytical model for multi-tier internet services and its applications. *Sigmetrics Performance Evaluation Review - SIGMETRICS*, pp. 291-302. DOI: 10.1145/1071690.1064252
12. A.A. Zarubin, N.M. Radrugina (2020). Modeling of multi-user gaming services. *Bulletin of Communications*. No. 8, pp. 11-16.
13. M. Kwok, G. Yeung (2005). Characterization of user behavior in a multi-player online game, pp. 69-74. DOI: 10.1145/1178477.1178486

Information about author:

Natalia M. Redrugina, *The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Postgraduate student of the Department of Infocommunication Systems, St. Petersburg, Russia*

APPLICATION OF COGNITIVE RADIO TECHNOLOGIES FOR BUS TRAVEL IN-FORMATION SUPPORT

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-39-49

Vladimir Yu. Mikhaylov,
Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russia, mihvj@yandex.ru

Roman B. Mazepa,
Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russia, mrb402@mail.ru

Manuscript received 17 March 2023;
Accepted 20 April 2023

Keywords: cognitive radio, FM radio, bus travels, information support, USRP, LabVIEW

Background: The current tasks of information support for bus travel are limited to general information about the trip and excursions, for example, in the form of the purpose and duration of the tour as a whole and individual trips to the objects of the tour, the plan and cost of excursions. During the main part of a sufficiently long trip, a qualified guide or accompanying person gives standard information about the history and sights of the points visited or passed on the route. On the way back to the place of permanent or temporary deployment, travelers are usually offered to watch a movie from the standard collection or just relax. The main problem here is the lack of functionality, flexibility and efficiency in the formation of information content, the limited channels for its delivery. One of the solutions to this problem is local radio broadcasting using a variety of information sources and the use of cognitive radio technologies for information delivery. It is understood that the preparation of information content can be performed in real time. The study of the effectiveness of this proposal is the purpose of this work. **Methods:** The substantiation of the possibility and effectiveness evaluation of the cognitive radio technologies application was carried out by devices prototyping using USRP devices in conjunction with the LabVIEW package. **Results:** the following tasks are solved: scanning the frequency range to determine the free area sufficient for high-quality reproduction and select desired information content; receiving and writing to a file of a radio signal digitized samples with a given quality; real-time rebroadcasting of found content in a selected section of the frequency range; file multimedia and speech content transmission in the selected section of the frequency range with a given quality using FM radio standard. **Conclusions:** The rich tuning and indication set of the developed prototypes allows using these also for educational and research purposes, including in distance educational mode.

Для цитирования:

Михайлов В.Ю., Мазепа Р.Б. Применение технологий когнитивного радио для информационной поддержки автобусных путешествий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 39-49.

For citation:

Mikhaylov V.Yu., Mazepa R.B. (2023) Application of cognitive radio technologies for bus travel in-fornation support. *T-Comm*, vol. 17, no.4, pp. 39-49.

1. Introduction

The creation of new systems of information interaction of migrating subscribers in various activity fields, using the principles of radio access, run into the problem of a shortage of the necessary frequency band.

Potentially, this problem can be solved by using cognitive radio technologies, which force the use of frequency bands that are dynamically released during the operation of other systems.

This publication presents an experimental justification for the possibility of building such a system using the existing database for the purposes of information support of tourist groups moving along a tourist route, as well as an evaluation of the effectiveness of such a solution. An original way of building a system based on the method of prototyping software and hardware devices using USRP devices together with the LabVIEW software package is proposed.

The publication represents the first step in a large comprehensive study of the prospects to use of cognitive radio technologies in order to increase the efficiency of using a scarce and expensive resource - the frequency band. Undoubtedly, this will require the creation and analysis of very complex mathematical models and testing of prototypes. In particular, the influence of the spectrum dynamics of complex signals on the possibilities of using the vacated frequency bands, and the evaluation of the scope and methods of possible use of these dynamically vacated frequency bands, require research. At the same time, the prototyping method is a completely justified and widely used research method, provided that the architecture, composition and components of the prototype are displayed as accurately as possible on real tasks of information interaction, and this is possible only on the basis of a reliable experimental justification of the principles and characteristics of the prototype components used.

This publication allows you to see how this idea can be implemented technically for the selected application. The results of the experimental study of this implementation convincingly demonstrate the possibility of preparing and adapting content to the schedule of tourist transport.

The stated tasks of information service for bus (and other) travel are divided into three subsets:

- search, collection, systematization of the required information content;
- substantiation and selection of competitive methods and delivering information content channels to the consumer, including in real time;
- substantiation and selection of the most effective methods and means of implementing the delivery of information content to consumers.

The analysis of sources showed that the tasks of the first subset are given the most attention.

Existing tourism technologies are intensively developing through the use of information technology. In the early stages of the formation of interest in tourist tours, modern multimedia technologies and communications are intensively used. In particular, virtual 3D tours using global satellite navigation tools allow tourists to remotely, but visually get acquainted with accommodation facilities, places of recreation and excursions [1]. Other multimedia technologies are also developing rapidly, such as audio tours and audio guides [2]. There are works devoted to automating the search, collection, storage, filtering and systematization of information to increase the flexibility and efficiency of its use by a specific consumer [3-5]. Of interest are studies

that consider information technology as a tool for understanding the world, allowing to solve the problems of economic security of tourism and most effectively meet the complex needs of tourism services [6].

The considered particular problems of the first subset and their solutions are undoubtedly interesting for the development of tourism and travel, however, the area and objects of information services considered in this paper make it necessary to look for solutions focused primarily on mobile consumers. At the same time, it is important to use existing sources of information content (broadcast networks, pre-prepared audio and sound file content), or information content generated in real time.

The second subset of information service tasks - substantiation and selection of competitive methods and channels for delivering information content to the consumer, including in real time - is associated with the use of digital or analog channels and relevant standards for delivering information content to consumers. In [7], to intermodal support of the tourists transportation, it is proposed to use mobile service platforms (Mobility Service Platforms), which allow using standard smartphones as client devices. In [8], the use of dedicated automotive ad-hoc networks (VANETs), as well as FM radio broadcast networks, for access to infotainment content is considered, which reduces the cost of distributing content and increases system scalability.

Analysis of sources, as expected, showed the advantage of using digital content delivery channels and their corresponding standards and protocols [9]. However, digital and analogue broadcast technologies coexist with their own advantages and disadvantages, which should be evaluated according to the conditions of their use in travel information processes. For example, digital channels can only be used if there is an appropriate digital infrastructure: mobile Internet, wireless network infrastructure (for example, wifi), etc. In addition, the use of ordinary, in particular, news content is possible only if the client devices support the appropriate protocols and standards. Despite all the advantages of digital channels, it is quite obvious that the infrastructure of the bus and other mobile travel under consideration does not allow for full compliance with the formulated requirements. Apparently, the most popular and accessible (at least on the Russian Federation location) channel for the distribution of universal and news content is analog FM broadcasting. An important factor is the fairly wide support for receiving an analog FM signal by popular mobile devices.

The third subset of information service tasks - substantiation and selection of the most effective methods and means to implement the delivery of information content to consumers - is aimed at creating and experimental testing of prototypes of software and hardware devices that economically and at the same time provide the travel industry with the necessary information content.

Existing technologies are able to expand the range of information services provided, including to mobile consumers. The space of mobile consumers is mainly provided by wireless networks using cognitive radio technologies (Cognitive Radio - CR). The reasons for the creation, application and development of CR technologies are based on the following factors:

- inaccessibility to use standard radio frequency channels;
- inefficiency of standard channel usage in time-frequency space.

A number of directions and applications of CR are described in [10, 11]. One concept is to share a known frequency resource,

and the other is to look for a free frequency resource to use in real time. This approach is called dynamic spectrum frequency assignment and helps reduce the cost of systems based on CR. The development of CR technologies has led to the emergence of a number of standards related to dynamic spectrum use, such as IEEE 802.22 [12]. The standard defines policies and procedures for sharing communications between primary and secondary users of a common spectral region.

The development of CR technologies and their practical application are associated with software-defined radio (SDR) technology. The modern application of SDR technologies is also aimed at reducing the cost characteristics of CR [13]. It is expected that the intelligence of CR systems will lead to their ability to find available frequency bands and adapt SDR parameters to changing characteristics of the frequency spectrum. In [14], the idea of using CR technologies in the tasks of providing information services is developed.

One of the most advanced SDR architectures is the Universal Software Radio Peripheral (USRP) by National Instruments. Its potential capabilities make it possible to develop software-controlled transceivers adapted to specific applications for efficient use of the spectrum [15 – 19].

One such application is the reuse of frequency channels allocated for FM radio by so-called secondary users with little degradation in EMC performance, similar to the sharing of frequency channels in GSM mobile telephony. The peculiarity of broadcast channels (radio or television) is that these channels are busy all the time, regardless of the user's actions. This raises the problem of rational construction and use of the broadcasting network [20]. A separate issue is related to the characteristics of the source of information and the functionality of secondary users.

In [21], a variant of building a prototype information system to provide a small community of people with important local information based on USRP and LabVIEW using the concept of CR is presented. The main goal of the proposed solution resonates with the goal of this work in terms of creating an economical solution for the broadcasting system.

In [22, 23], the problem of monitoring the content of an information source and the technical quality of programs in broadcast channels is considered. Content monitoring can be used to model and predict problem situations based on the collection, processing and analysis of information. A striking example of a source of such information is broadcast news programs. In [24], one of the variants of such solutions is presented in the form of a hardware-software complex based on USRP and LabVIEW, which allows real-time rebroadcasting of streaming content selected by an expert on a given and free frequency channel. This solution also satisfies the need to deliver certain information content to the end user over a radio channel over a long period of time (during a trip), during which the frequency plan of radio stations can change many times.

An important feature of information messages transmitted over radio broadcasting channels is that after a while the information message becomes inaccessible to listeners. This circumstance dictates the need for prompt storage of the most significant fragments of information messages of broadcast channels on a file medium. A variant of such a solution is presented in [24] in the form of a hardware-software complex based on USRP and LabVIEW. It can be directly used to store in an IQ sample file an RF signal containing desired content for later playback on the selected channel.

For information support of long trips and excursions, there is a need to broadcast pre-prepared information content to consumers. At the same time, it is also rational to use free sections of FM radio frequencies. There are solutions that broadcast sound files prepared in a certain format according to the FM radio standard at a selected frequency [25].

Summarizing the above, we can draw the following conclusions:

- FM radio broadcasting standards are advantageous to use for information support of bus (collective) trips due to the fact that users do not need specialized receiving devices – standard FM receivers are sufficient;
- the use of cognitive radio technologies in the FM radio bands is quite well developed and can be used to solve the tasks;
- there are basic of hardware and software solutions options to support the individual information tasks, in particular, saving, reproducing and retransmitting information content, however, all of them are diverse (heterogeneous) in their software and hardware implementation, which makes it difficult to use them together as part of a single complex;
- users need methods and tools that provide them with prompt access to information content of any type, as well as tools that automate the search for free channels for broadcasting with the necessary information content.

The review and analysis of sources showed that cognitive radio technologies themselves are designed to solve two main tasks:

- search for free and sufficient to ensure the required quality of the signal transmission section of the FM frequency range;
- transmission of a signal containing the required information content in the selected frequency section of the FM band.

In general, however, the development of software and hardware devices that support the implementation of the formulated information support tasks follows three directions.

The first of them is aimed at enabling the operation of radio receivers that are not fully compatible in terms of frequency range, for example, automobile, smartphone receivers, etc.

The purpose of the second direction is to retransmit the signal of the selected broadcast channel on a different frequency. Such a problem arises in the process of moving travelers from one region to another, when the selected channel follows a different frequency plan in regional broadcasting. In Table 1 for example, a fragment of frequency plans for FM radio in Moscow and St. Petersburg is shown.

Table 1

Fragment of FM radio frequency plans

Radio stations	Frequency, MHz	
	Moscow	St. Petersburg
Radio Rossii	66.44	66,3
Business FM	87.5	107,4
Retro FM	88.3	88
Yumor FM	88.7	88,9
AvtoRadio	90.3	88,4
Radio Sputnik	91.2	91,5

The implementation of such a function allows travelers to listen to a pre-selected channel (or a plurality of selected channels). As you can see, in this application, there is a need to quickly detect a free and compatible part of the frequency range.

Finally, the third direction aims to broadcast the prepared information content on the selected frequency of the FM radio

band. This content can be a previously recorded FM broadcast, as well as content chosen by the tour guide (such as an audio or music file). In the latter case, a software or firmware implementation of the corresponding modulator will be required. Note that a student can act as a traveler, and a lecture, presentation and other pre-prepared material can be used as content. In our opinion, this direction may be in demand in the current process of active use of distance forms of the educational process.

To solve the formulated tasks, the following set of tools is required:

- a tool to scan the selected frequency range (for example, the FM radio range) in order to select a free and sufficient, in terms of playback quality, part of the frequency range;
- a tool to scan the selected frequency band (for example, FM radio band) in order to select a channel with the desired information content;
- tools to perform, save and playback IQ-samples of the signal on the selected frequency of the FM radio band;
- a tool to quick (i.e. real-time) rebroadcasting of selected content in the specified frequency range;
- a tool to playback the multimedia content files in the FM radio standard in the selected frequency range;
- a tool to real-time transmit the speech information in the FM radio standard in the selected frequency range.

In particular, software and hardware solutions for scanning the selected frequency range using various types of USRP tools are quite fully considered in the sources [26-28].

An analysis of the existing solutions mentioned in the links above showed that all of the listed tools as a whole and individually can be implemented, however, they have a number of disadvantages and limitations, such as:

- lack of unity of software and hardware implementation, since they use different versions of the software development environment and equipment;
- they lack align information flows mechanisms, in particular, mechanisms to align the record, playback and retransmit streams of IQ-samples, necessary to ensure the continuity of playback, especially musical content;
- software components of well-known solutions practically do not use the full productivity of modern multi-core processors, thereby limiting the possibilities of computer processing of information.

Thus, one of the main tasks is to develop a set of virtual instruments, made in the same style, using the same development environment. A preliminary decision from this point of view is the choice of a compatible software development environment for virtual instruments, including version and release.

2. Materials and Methods

The goal and objectives of developing a hardware-software complex for prototyping information support tools stated in this paper can be achieved and solved only when using equipment that implements the principles of SDR and is supported by appropriate software. To date, there are, in our opinion, only two competitive options for such an implementation. Both options are similar in that they use a single hardware platform from Ettus Research, named as USRP. A feature of the current business process is that Ettus Research, owned by National Instruments (NI), is launching a number of self-branded off-the-shelf hardware products on the market that are partially compatible with similar NI products. At the same time, compatibility is achieved

only at the level of the hardware platform (boards), and is destroyed when interacting with the corresponding software platforms. Obviously, we are talking about drivers that provide an interface with the corresponding software. Unfortunately, the sources contain extremely conflicting information about the levels of such compatibility. The most reliable, in our opinion, is an indication of the complete incompatibility of drivers for two conditionally "compatible" branches of USRP devices - by Ettus Research and by NI. However, each line has its own ways of building software and hardware prototypes of radio devices.

The "native" line from Ettus Research is aimed at open solutions built on the Linux OS and GNU Radio software (<https://www.gnuradio.org/>). NI's commercial line of devices has a much broader range of device support along with their drivers. However, only Windows OS is supported, and only native hardware. Limited Linux support exists only for LabVIEW, which allows only limited simulation problems to be solved that do not meet the goals of this study.

Unfortunately, during one experimental study with the same (or similar) set of USRP devices, it is not possible to obtain a comparative characteristic of prototype implementations using both described lines. The reason is the incompatibility of the firmware of the respective devices.

Based on the foregoing, the USRP hardware platform, integrated with NI's proprietary LabVIEW simulation software package, turned out to be a practically uncontested choice. The range of USRP devices is quite wide, but not all types of devices meet the conditions for solving the problem, despite their performance and price. So, bearing in mind the frequency range in which wireless networks of modern standards operate (2.4 GHz, 5 GHz), the selection conditions allow the use of only the following types [10]: USRP-2900/2901, USRP-2943-2945, USRP-2953-2955 and USRP-2974. Devices starting with USRP-2943 are classified as RIO, which dramatically increases their complexity and cost. In fact, the USRP-2900/2901 devices, if they can solve the tasks set, are the main contenders for the role of the created hardware platform.

The economic factor does not allow using either a standard spectrum analyzer, or the option of using USRP 2920 devices and others given in [15] for spectrum analysis in order to identify a free area cannot be used. It is important that the claimed USRP 2900/2901 devices have a significant advantage over the USRP 2920 device in terms of carrier frequency tuning range. The maximum frequency at which the USRP 2900/2901 can operate is 6 GHz, which hypothetically allows these devices to be used to solve many wireless communication problems [16].

Further, as basic solutions, a set of virtual devices presented in [14] is considered. This type of solution is classic for the LabVIEW software platform. Its advantage is not only an external presentation (front panel), like the appearance of a real measuring instrument, but also an extremely effective way to implement both interaction with USRP devices and simulation of signal generation and processing. The latter is directly related to the original programming paradigm using its own graphical language G. We note two important features of this design method. The first is the high speed of creating a project through the use of a powerful object library and the visibility of the implementation process, which is extremely important not so much in scientific research as in the educational process. On the contrary, in experimental scientific research, the most important feature is performance, and it is supported in many ways. Among them are the traditional interfaces with the .NET standard libraries, the

file system, and other programming objects. But the main component, from our point of view, is the productive support for parallelism, which is one of the main features of the programming paradigm in LabVIEW. This topic requires special consideration and, of course, will be touched upon in future studies by the authors.

3. Results

3.1. Development of virtual instruments to scan the selected frequency range and make the spectral analysis

In [14], two virtual instruments are proposed, the first of which performs broadband scanning of the spectral range, and the second performs a detailed analysis of the spectrum. Both devices use the same device, but in different development environments. Broadband spectrum analysis is resource intensive, and as such, it was only possible to use the USRP 2901 in combination with the NI LabVIEW 2018 design environment. However, it was possible to implement detailed spectrum analysis in the more advanced (in terms of graphics) NI LabVIEW Communications Design Suite 2.0 environment. The reason for this is that LabVIEW Communications Design Suite 2.0 uses the graphics capabilities of the .NET platform for display, which requires additional computer resources. The found solution demonstrated the possibility of using the USRP 2901 device for the purposes of spectral analysis, however, it contradicts the requirement of the unity of software and hardware implementation formulated above.

Considering Microsoft's end of support for Windows 7, the minimum available version of LabVIEW Communications Design Suite is version 3.0. On the other hand, well-known and high-performance models built in the LabVIEW environment are also not competitive due to the limited support for the range of modern USRP devices. This means that the virtual instrument "WB Spectrum Example VIs (952012)" presented in [11] and described in [14] cannot be used further.

However, sufficiently accurate wideband analysis of the VHF and FM radio spectrum can be performed by the "Spectral Monitoring (Interactive)" virtual instrument, which is part of the LabVIEW NXG design environments versions 3.0 and 4.0.

Figure 1 shows the front panel of a virtual instrument that performs a broadband analysis of the spectral range relative to a selected center frequency. Note that when developing virtual instruments, we deviate from the traditional National Instruments front panel background, which is associated with the image of physical instrument panels.

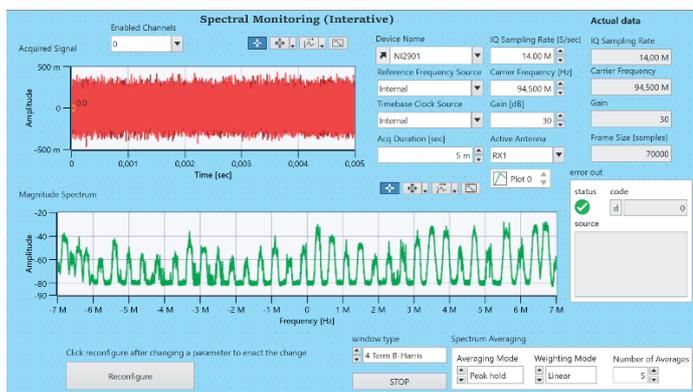


Figure 1. Wideband Spectrum Analysis VI front panel relative to selected center frequency

Instead, we use the concept of graphical association with VI functionality. For example, more clearly, from our point of view, the color separation of virtual instruments for recording a signal from virtual instruments for their playback.

To select the most promising section of the range, it is necessary to use a more accurate analyzer. Studies have shown that the virtual device described above (Figure 1) can be used in this role. A detailed analysis of the selected section of the spectrum is carried out by adjusting the center frequency (Carrier Frequency) and sampling rate (IQ Sampling Rate). Other VI settings are useful for experimental evaluation of the practically achievable characteristics of the software/hardware VI. And they are determined both by the characteristics of the computer component of the VI, and by the characteristics of the USRP device. The latter may have different characteristics that differ from passport data.

Note that the device is able to apply new settings in the current session, i.e. without restart. On Figure 2-4 shows the spectrum of the unused section of the range with a center frequency of 90.55 MHz, although such sections, as can be seen from Figure 1, you can choose quite a lot.

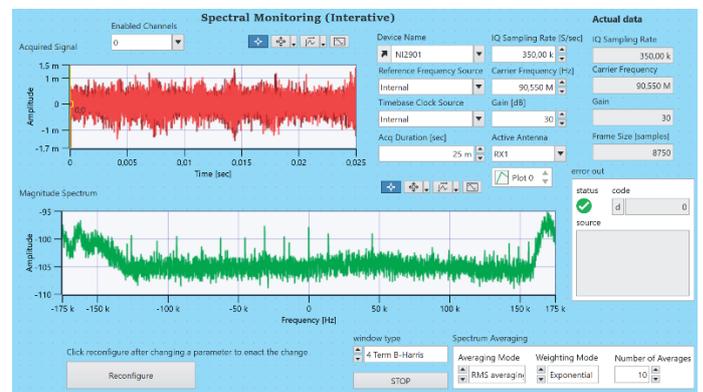


Figure 2. Spectrum shape of radio signal samples obtained with a sampling rate of 350 kHz

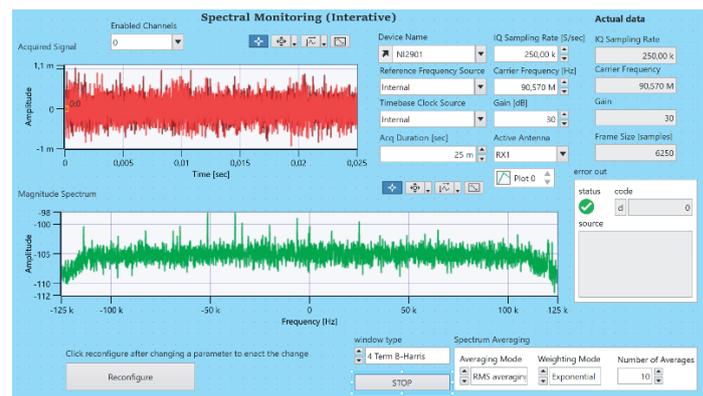


Figure 3. Spectrum shape of radio signal samples obtained with a sampling rate of 250 kHz

The spectrum shown in Figure 2 has an estimated value and is used to make a final decision on the possibility of using a free frequency section and its characteristics.

It was taken at a sampling rate of 350 kS/sec and clearly shows that the limiting sampling rate is 250 kS/sec and the center frequency should be increased by 20 kHz. The spectrum of this frequency section is shown in Figure 3.

The choice of the sampling frequency is critical to achieve minimum crosstalk while ensuring a sufficiently high quality of the broadcast signal of the selected radio station, as well as minimizing the overhead during transmission, in particular, minimizing the size of the file containing the recording of the IQ samples of the broadcast signal.

3.2. Development of virtual instruments to record, playback and retranslate the radio signals

The second object of development are virtual devices designed to record IQ-samples of the radio signal to a file and then play it back from the file at the selected frequency of the FM radio band. All the virtual instruments necessary for this have been developed and described in [14]. For completeness and convenience of perception, below (Fig. 4, 5) are the front panels of these devices.

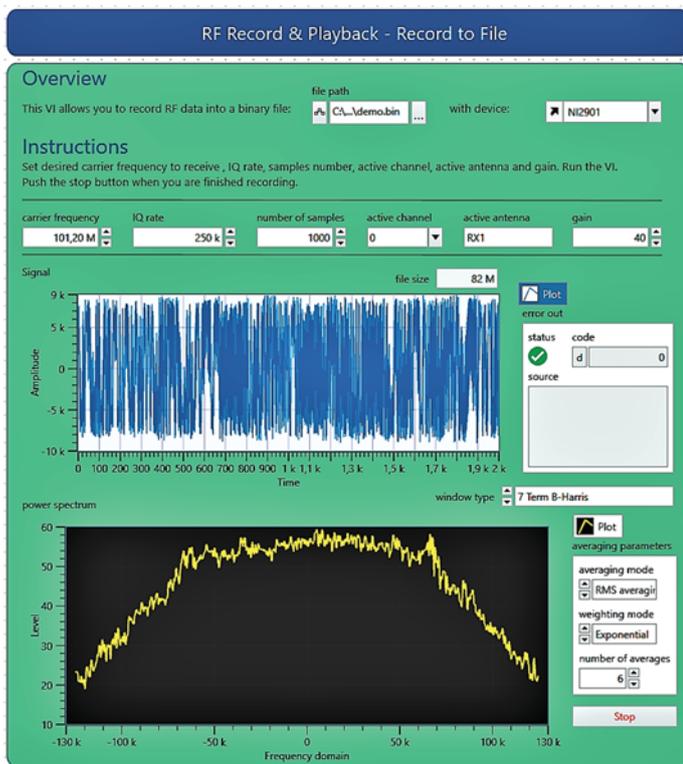


Figure 4. Virtual instrument to record the radio signal IQ-samples to a file

A distinctive feature of these devices is the ability to use both channels of transceivers present in the USRP 2901 devices. This feature was later used to develop the repeater VI.

The device also described in [14] was chosen as a prototype of the virtual repeater device. The control part of the front panel of this device is shown in Figure 6. Another interesting feature of the virtual instrument is the automatic configuration of the instrument to the connected USRP device. Note that the main property of the device is the ability to interactively re-tune it to another station, which allows you to smoothly, without acoustic artifacts, listen to the stream of broadcast broadcasting programs.

The disadvantage of the developed device is the lack of clarity (automation) of the choice of the broadcast channel and monitoring of the peak signal level. The property is also useful to design the conventional digital receivers, since, as a rule, in devices of wide application it is often impossible to select a channel whose signal level is below the threshold level chosen by the receiver designers.

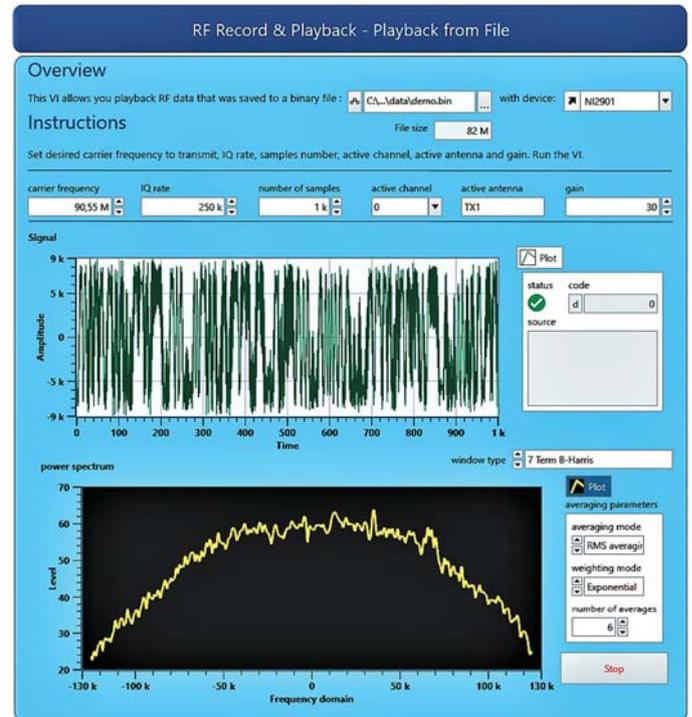


Figure 5. Virtual device to playback the IQ-samples from a file

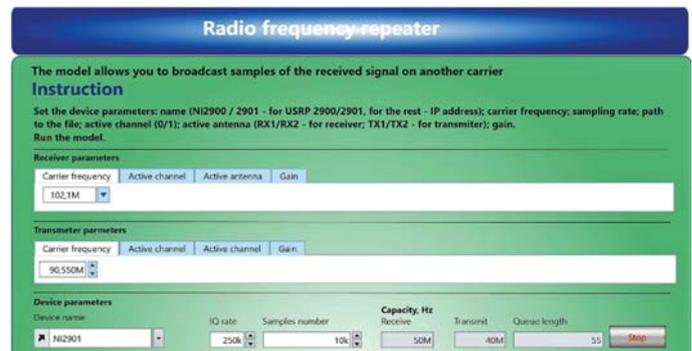


Figure 6. The control part of the front panel of the prototype of the virtual device-repeater

The main part of the front panel of the modified virtual instrument-repeater is shown in Figure 7.

We list a number of key features of this implementation. Firstly, it is the convenience of operational management of the choice of content source. At the same time, the association between the stations name and the broadcasting frequency is not lost – the device contains a linear scale of broadcasting frequencies, which can be used independently. The second feature, as mentioned above, is the ability to monitor the peak signal level.

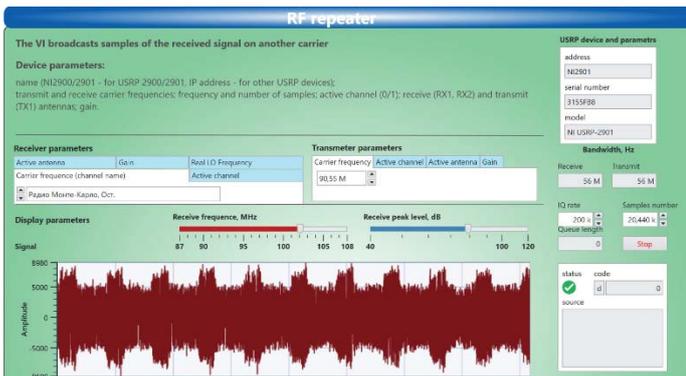


Figure 7. The main part of the front panel of the modified virtual instrument-repeater

This "seamless" switching is implemented by LabVIEW software, more precisely, by a queuing mechanism that allows signal samples to be written to and read from the queue asynchronously for playback by another channel of the USRP 2901 device. Of course, the queue parameters must be consistent with the type of signal samples, but they must simultaneously correspond to the technical capabilities of the computer that implements the software part of the complex. One of the indication elements of this correspondence is placed on the front panel of the device.

3.3. Development of virtual instruments to playback the file multimedia content and transmit the voice information using the FM radio standard

The general basis to create the virtual instruments are similar solutions, in particular, those described in [25]. Analogues are not complete solutions; therefore, they required significant processing. The created virtual instruments are equipped with the necessary settings that allow you to select the source of the acoustic signal, control the quality of the broadcast signal by selecting the sampling frequency, frequency modulation parameters and broadcast frequency. On Figure 8 shows the front panel of a virtual instrument that provides signal transmission, the source of which is a microphone.

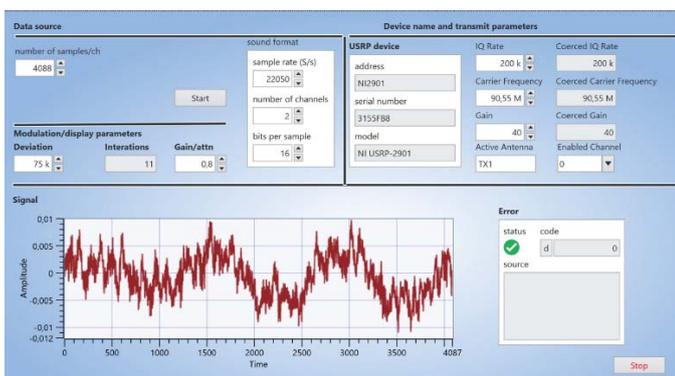


Figure 8. The part of the front panel of the virtual instrument-transmitter, the signal source of which is a microphone

The signal source for the virtual instrument shown in Figure 9 is a prepared multimedia (for example, music) file. Note that this instrument is capable of resampling (up- or down-sampling) while optimizing the quality of the transmitted content and the size of the source file.

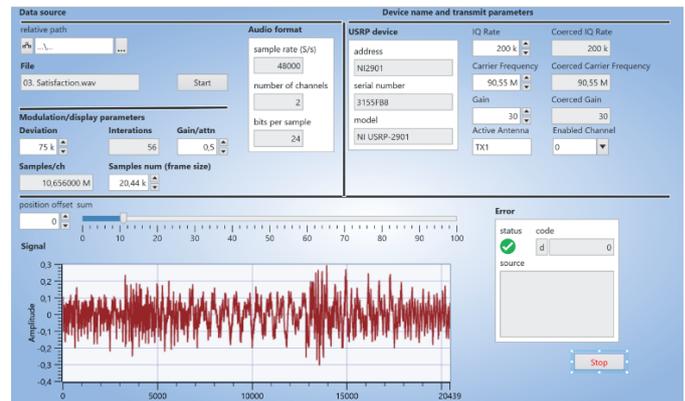


Figure 9. The part of the front panel of the virtual instrument-transmitter, the signal source of which is a file music content

4. Discussion

The given parameters of the virtual instrument to scan the frequency range shown in Fig. 1 match the capabilities of the NI USRP 2901 device. It is important that the device is dual channel. We also note that the performance of the complex depends very much on the selected computer equipment, the characteristics of the interface for interaction with USRP devices, the number and type of displayed parameters. Particularly demanding for computer equipment are tasks that require spectral analysis of a signal in a wide frequency band.

In the NI USRP 2901 device, the USB interface is most often criticized instead of the 1 Gbps Ethernet interface in the USRP 2920 devices and other more advanced and expensive devices. At the moment, there is no clear information about the conditions under which you can expect to achieve the maximum throughput of the USB version 3.0 interface - 5 Gbps. Of course, this is due to certain technical difficulties, however, work in this direction continues. In particular, D-Link announces the release of a new DUB-E250 USB-C 2.5G Ethernet adapter (Consumer Electronics Show 2021 - CES 2021), providing 2.5 times the bandwidth compared to 1 Gbps Ethernet.

We did not have the opportunity to experimentally test the capabilities and characteristics of this device together with the USRP 2901 device as part of a hardware-software system, however, undoubtedly, it is worth being critical of the claimed shortcomings of the modern USB interface in relation to at least the 1 Gbps Ethernet interface. In this regard, one of the most interesting tasks of studying the potential characteristics of this type of hardware and software systems is the experimental verification and comparison of the performance characteristics of USB interfaces versions 3.0, 3.1, 1 Gbps and 10 Gbps Ethernet. This, however, is beyond the scope of this work. We only note that the difference in the implementations of the USB interfaces in modern computers (both desktop and mobile) that participated in the experimental studies of the authors demonstrated a very strong influence of this factor on the performance of hardware and software systems of this type.

Of course, full optimization of the complex is impossible, and the best available solution for experimental research at the moment turned out to be a computer with the following main characteristics: Intel Core i7 processor; 16 GB RAM and disk memory on a PCIe SSD.

Comparative estimates: objective – based on the analysis of the spectra presented in Figures 2, 3, and subjective – based on listening to the recorded signal samples - showed that the choice of sampling frequencies above 200 kHz does not lead to a noticeable increase in the playback quality, but significantly increases the recorded files size. The experiment showed that the created virtual instruments provide the needs for solving the stated range of tasks of cognitive radio.

It is useful to compare estimates of the required bandwidth of the frequency modulated signal obtained analytically and experimentally. The most well-known method of analytical evaluation is the Carson rule, one of the forms of which looks like this:

$$B = 2F_m(1 + \beta) \quad (1)$$

where

B – bandwidth of the frequency modulated signal;

F_m – modulating harmonic frequency;

$\beta = \frac{\Delta F}{F_m}$ – modulation index, где ΔF – frequency deviation.

tion.

The real modulating signal is not harmonic, however, by replacing F_m in (1) to the maximum frequency F_{\max} in the spectrum of the real modulating signal, you can get a refined value of the required frequency band:

$$B = 2F_{\max}(1 + \beta) \quad (2)$$

For the content in question, it is generally accepted that $F_{\max} = 15$ kHz, and in accordance with FM radio standards, the recommended frequency deviation value is $\Delta F = 75$ kHz, from which we obtain an estimate of the signal bandwidth $B = 180$ kHz, which is usually rounded up to 200 kHz with a margin. This estimate determines the choice of sampling rate and is in good agreement with the prototyping results described above. In [29], a similar comparison of estimates was made, but the simulation model was used in the experiment, which, however, had almost no effect on the result of the comparison.

Note that in the developed virtual instruments, the “Sample rate” parameter is chosen somewhat higher than the value sufficient for their reliable operation. This is due to the fact that according to the rules of practical application of the sampling theorem conclusions, the modulating signal with information content must be subjected to high-quality low-frequency filtering with a cutoff frequency F_{\max} . This is usually done in conjunction with the “upsampling” and “downsampling” procedures to improve the filtering quality. In the developed prototypes, these procedures are omitted for simplicity.

The practice of operating modern analog receivers shows that manufacturers control the quality of signal reception in different ways. One of the control parameters is the threshold signal level, which determines the specified reception quality. The developed virtual repeater device (Figure 7) has the ability to evaluate the threshold level of reliable reception used by the manufacturer, on the one hand, and ensure station detection, on the other hand. The last circumstance, from the standpoint of CR, is important for making a reliable decision about the presence of a free frequency part. This property can also be useful for the design of conventional digital receivers, since, as a rule, in devices of wide application it is often impossible to select a

channel whose signal level is below the threshold level chosen by the receiver designers.

5. Conclusions

1. A number of applied tasks of cognitive radio are considered, aimed at expanding the functionality of information support for bus travel and tourism in general, as well as at achieving efficiency and flexibility in delivering various information content to travelers. These applied tasks impose special requirements on the methods and means of their implementation. The analysis of the requirements for the functional composition and characteristics of the software and hardware environment that implements the applications of cognitive radio technologies is carried out. The use of the USRP architecture and the LabVIEW software environment to solve a number of applied problems of cognitive radio is substantiated. In order to reduce the cost of systems, the USRP 2901 device, the youngest of the NI USRP device line, was selected for implementation.

In fact, the conducted research significantly expands the field of practical application of this type of devices, which is one of the main results of the work.

2. It is shown that in order to solve the considered CR problems, it is necessary to solve the following problems:

- perform a scan of the selected frequency range in order to determine the least loaded and sufficient, in terms of playback quality, part of the frequency range;
- perform a scan of the selected frequency range (for example, the FM radio range) in order to select a channel with the desired information content;
- perform reception, processing and writing to a file of digitized samples of a radio signal at a selected frequency with a given quality;
- perform real-time rebroadcasting of the selected content in the specified frequency range without quality loss;
- transfer file multimedia content in the FM radio standard in the selected frequency range with the specified quality;
- perform real-time transmission of speech information in the FM radio standard in the selected frequency range with the specified quality.

3. A set of virtual instruments has been developed that operate in a unified software and hardware environment (LabVIEW-USRP), which provides a systematic solution of current and future applied problems of cognitive radio. A feature of the developed virtual instruments is a rich variety of settings and indication parameters, which allows them to be used for educational and research purposes, including in the context of a distance educational process.

References

1. Hoadjli A., Kazar O., Rezeg K. A layered design approach for mobile tourism. *ICIT 2017 - 8th International Conference on Information Technology*. 2017, pp. 110-115.
2. Matveevskaya A.S., Nesterova I.E., Pogodina V.L., Tarakanova T.S., Evseev V.V. Technologies of Tourism in the Modern Urban Environment. *International Journal Of Civil Engineering And Technology, IAEME Publication*, 2018, vol. 9, no. 10, pp. 1566-1574.
3. Antonyuk N., Shakhovska N., Medykovskyy M.O. (eds). Online Tourism System Development for Searching and Planning Trips with User's Requirements., *Advances in Intelligent Systems and Computing IV*. CSIT 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1080. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_55

4. K. A. Achmad, L. E. Nugroho, A. Diunaedi, Widyawan. Context Based- Tourism Recommender System: Towards Tourists' Context-Sensitive Preference Conceptual Model. *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, 2018, pp. 1-6.
5. S. S. Arote, R. L. Paikrao, A Modified Approach Towards Personalized Travel Recommendation System Using Sentiment Analysis. *2018 International Conference on Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT)*, 2018, pp. 203-207, doi: 10.1109/ICACCT.2018.8529327.
6. D. Andreyeva, S. Bogolyubova, V. Bogolyubov, A. Malinin. Digital solutions as a key element in improvement of levels of economic security and attractiveness of tourist destinations. *Proceedings of the 2nd International Scientific Conference on Innovations in Digital Economy: SPBPU IDE-2020* (2020), pp. 3444470.
7. C. Samsel, D. Thulke, M. C. Beutel, D. Kuck and K. Krempels. In-Car Intermodal Travel Assistance Using Mobility Service Platforms. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, pp. 800-805
8. C. Barberis and G. Malnati. Design and evaluation of a collaborative system for content diffusion and retrieval in vehicular networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, vol. 57, no. 1, pp. 105-112.
9. Varlamov, O. V. Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018*, Minsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 8456925.
10. Rita Mahajan, Deepak Bagai, Cognitive Radio Technology: Introduction and its Applications. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2016, vol. 12, Issue 9 (September 2016), pp.17-24.
11. A. Aziz, R. A and A. Adithya. Utilization of Spectrum holes for image transmission using LabVIEW on NI USRP. *2018 International Conference on Networking, Embedded and Wireless Systems (ICNEWS)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICNEWS.2018.8903987.
12. "IEEE Standard - Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Wireless Regional Area Networks-Specific requirements-Part 22: Cognitive Wireless RAN MAC and PHY specifications: Policies and Procedures for Operation in the Bands that Allow Spectrum Sharing where the Communications Devices May Opportunistically Operate in the Spectrum of Primary Service," IEEE Std 802.22-2019 (Revision of IEEE Std 802.22-2011), pp.1-1465, 5 May 2020.
13. J Baddour, Kareem & Dobre, Octavia & Oner, Menguc & Serpedin, Erchin & Spagnolini, Umberto. Special issue on Cognitive radio: The road for its second decade. *Physical Communication*. 2013, 9, pp. 145-147.
14. V. Y. Mikhaylov, R. B. Mazepa, Research of cognitive radio technology application cases in the tasks of providing information needs. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020*, Saint-Petersburg, P. 9131163
15. V. S. Muradi, R. K. Paithane, A. Ahmed, A. Pawar. Spectrum sensing in cognitive radio using Labview and NI USRP. *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2018, pp. 1316-1319.
16. M. Erić , M. Janjić. A solution to coexistence of OFDM and FH signals based on principles of cognitive radio implemented on USRP N210 platform. *2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2014, pp. 276-279.
17. E. Dobre, A. Marţian, C. Vlădeanu. USRP-based experimental platform for energy detection in cognitive radio systems. *2016 International Conference on Communications (COMM)*, 2016, pp. 185-188.
18. Zhe Huang, Weidong Wang, Yinghai Zhang. Design and implementation of cognitive radio hardware platform based on USRP. *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, 2011, pp. 160-164.
19. A. Martian, L. Petrica, O. Radu. Cognitive radio testing framework based on USRP. *2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2013, pp. 212-215.
20. A. Basgumus, M. Namdar, T. Tsiftsis. Broadcast cognitive radio with dirty paper coding over Nakagami-m fading channel. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2019. Vol. 19. No 1. P. 3-8.
21. M. Srilatha, S. Harini and T. Sushanth. Community Radio Using USRP 2920. *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, 2021, pp. 1-6.
22. A.M. Rembovsky, A.V. Ashikhmin, V.A Kozmin, S.M. Smol'skiy. *Television and Radio Broadcasting Monitoring, Signals and Communication Technology*, 2018, pp. 337-379.
23. Yuliya V. Ukhanova. The Expert Image of the Russian Civil Society. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, vol. 11, no. 4, 2018, pp. 202-216.
24. V. Y. Mikhaylov, R. B. Mazepa. USRP Devices Application for Modeling Signal-Like Interference in Wireless Networks. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2020, pp. 1-6.
25. Somanaidu, Utlapalli & Telagam, Nagarjuna & kk, Nehru & Nanjundan, Menakadevi. *USRP 2901 Based FM Transceiver with Large File Capabilities in Virtual and Remote Laboratory. International Journal of Online Engineering (iJOE)*. 2018. 14. 193. 10.3991/ijoe.v14i10.8283.
26. "Spectrum Monitoring With NI USRP", <https://www.ni.com/tutorial/13882/en/>, 2015 – 1/08/2022
27. "USRP Software Defined Radio Device Manual. USRP 2901", <https://www.ni.com/documentation/en/usrp-software-defined-radio-device/latest/usrp-2901/overview/#>, 2017 – 1/08/2022
28. R. M. Elshishtawy, A. S. T. Eldien, M. M. Fouda, A. H. Eldeib. Implementation of Multi-Channel Energy Detection Spectrum Sensing Technique in Cognitive Radio Networks Using LabVIEW on USRP-2942R. *2019 15th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*, 2019, pp. 1-6
29. Pieper, Ron. Laboratory and computer tests for Carson's FM bandwidth rule. 2001, pp. 145-149. 10.1109/SSST.2001.918507.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОГНИТИВНОГО РАДИО ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ АВТОБУСНЫХ ПУТЕШЕСТВИЙ

Михайлов Владимир Юрьевич, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия,
mihvj@yandex.ru

Мазепан Роман Богданович, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия,
mrb402@mail.ru

Аннотация

Цель работы. Текущие задачи информационного сопровождения автобусных путешествий ограничиваются общей информацией о путешествии и экскурсиях, например, в виде цели и продолжительности тура в целом и отдельных поездок к объектам тура, плана и стоимости экскурсий. Во время основной части достаточно длительной поездки квалифицированный гид или сопровождающее лицо дает стандартную информацию об истории и достопримечательностях посещаемых или проезжаемых пунктов маршрута. На обратном пути к месту постоянной или временной дислокации путешественникам, как правило, предлагается посмотреть фильм из стандартной коллекции или просто отдохнуть. Главная проблема здесь – недостаточная функциональность, гибкость и оперативность формирования информационного контента, ограниченность каналов его доставки. Одним из вариантов решения данной проблемы является локальное радиовещание с использованием разнообразных источников информации и применение технологий когнитивного радио для доставки информации. Подразумевается, что подготовка информационного контента может выполняться и в реальном времени. Исследование эффективности данного предложения является целью данной работы. Обоснование возможности и оценка эффективности применения технологий когнитивного радио выполнено методом прототипирования программно-аппаратных устройств с использованием устройств USRP совместно с программным комплексом LabVIEW. **Результаты работы.** Сформулированы и решены следующие задачи прототипирования: сканирование частотного диапазона для определения свободного участка, достаточного для качественного воспроизведения; сканирование частотного диапазона для выбора канала FM радио с искомым информационным контентом; прием и запись в файл оцифрованных выборок радиосигнала с заданным качеством; ретрансляция в реальном времени найденного контента в выбранном участке диапазона частот; передача файлового мультимедийного контента в стандарте FM радио в выбранном участке диапазона частот с заданным качеством; передача в реальном времени речевой информации в стандарте FM радио в выбранном участке диапазона частот с заданным качеством. Обосновано применение устройств USRP совместно с программным комплексом LabVIEW для решения ряда прикладных задач когнитивного радио. Обоснован выбор устройства NI USRP 2901 с целью снижения стоимости создаваемого прототипа. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения функциональности, гибкости и оперативности формирования и распространения информационного контента. В связи с этим, данная статья направлена на обоснование необходимости и возможности решения актуальных задач информационного обслуживания с применением технологий когнитивного радио. Для этого выполнен анализ проблем разработки устройств на основе парадигмы прототипирования; разработаны прототипы программно-аппаратных устройств для информационной поддержки автобусных путешествий; выполнена оценка эффективности предлагаемых решений; произведена экспериментальная проверка функциональности и качества разработанных прототипов. Материалы статьи, благодаря богатому набору параметров настройки и индикации разработанных прототипов программно-аппаратных устройств, позволяет использовать созданные виртуальные приборы не только для информационной поддержки любых путешествий, но и в учебно-исследовательских целях, в том числе, в условиях дистанционного образовательного процесса.

Ключевые слова: когнитивное радио, FM-радио, автобусные путешествия, информационная поддержка, USRP, LabVIEW.

Литература

1. A. Hoadji, O. Kazar, K. Rezeg. A layered design approach for mobile tourism. *ICIT 2017 - 8th International Conference on Information Technology*. 2017, pp. 110-115.
2. A. S. Matveevskaya, I. E. Nesterova, V. L. Pogodina, T. S. Tarakanova, V. V. Evseev. Technologies of tourism In the modern urban environment, *International Journal Of Civil Engineering And Technology, IAEME Publication*, 2018, vol. 9, no. 10, pp. 1566-1574.
3. N. Antonyuk, N. Shakhovska, M.O. Medykovskyy (eds). Online Tourism System Development for Searching and Planning Trips with User's Requirements., *Advances in Intelligent Systems and Computing IV. CSIT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1080. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_55
4. K. A. Achmad, L. E. Nugroho, A. Diunaedi, Widyawan. Context Based- Tourism Recommender System: Towards Tourists' Context-Sensitive Preference Conceptual Model, *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, 2018, pp. 1-6.
5. S. S. Arote, R. L. Paikrao, A Modified Approach Towards Personalized Travel Recommendation System Using Sentiment Analysis, *2018 International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT)*, 2018, pp. 203-207, doi: 10.1109/ICACCT.2018.8529327.
6. D. Andreyeva, S. Bogolyubova, V. Bogolyubov, A. Malinin. Digital solutions as a key element in improvement of levels of economic security and attractiveness of tourist destinations. *Proceedings of the 2nd International Scientific Conference on Innovations in Digital Economy: SPBPU IDE-2020 (2020)*. pp. 3444470.

7. C. Samsel, D. Thulke, M. C. Beutel, D. Kuck and K. Krempels. In-Car Intermodal Travel Assistance Using Mobility Service Platforms. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, pp. 800-805
8. C. Barberis and G. Malnati. Design and evaluation of a collaborative system for content diffusion and retrieval in vehicular networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, vol. 57, no. 1, pp. 105-112.
9. Varlamov, O. V. Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018, Minsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2018. P. 8456925.
10. Rita Mahajan, Deepak Bagai, Cognitive Radio Technology: Introduction and its Applications. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2016, vol. 12, Issue 9 (September 2016), pp. 17-24.
11. A. Aziz, R. A and A. Adithya. Utilization of Spectrum holes for image transmission using LabVIEW on NI USRP. *2018 International Conference on Networking, Embedded and Wireless Systems (ICNEWS)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICNEWS.2018.8903987.
12. "IEEE Standard - Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Wireless Regional Area Networks-Specific requirements-Part 22: Cognitive Wireless RAN MAC and PHY specifications: Policies and Procedures for Operation in the Bands that Allow Spectrum Sharing where the Communications Devices May Opportunistically Operate in the Spectrum of Primary Service," *IEEE Std 802.22-2019 (Revision of IEEE Std 802.22-2011)*, pp.1-1465, 5 May 2020.
13. J Baddour, Kareem & Dobre, Octavia & Oner, Menguc & Serpedin, Erchin & Spagnolini, Umberto. Special issue on Cognitive radio: The road for its second decade. *Physical Communication*. 2013, no. 9, pp. 145-147.
14. V. Y. Mikhaylov, R. B. Mazepa, Research of cognitive radio technology application cases in the tasks of providing information needs, *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020, Saint-Petersburg*, P. 9131163
15. V. S. Muradi, R. K. Paithane, A. Ahmed, A. Pawar. Spectrum sensing in cognitive radio using Labview and NI USRP. *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2018, pp. 1316-1319.
16. M. Eric, M. Janjic. A solution to coexistence of OFDM and FH signals based on principles of cognitive radio implemented on USRP N210 platform. *2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2014, pp. 276-279
17. E. Dobre, A. Mar?ian, C. Vi?deanu. USRP-based experimental platform for energy detection in cognitive radio systems. *2016 International Conference on Communications (COMM)*, 2016, pp. 185-188.
18. Zhe Huang, Weidong Wang, Yinghai Zhang. Design and implementation of cognitive radio hardware platform based on USRP. *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, 2011, pp. 160-164.
19. A. Martian, L. Petrica, O. Radu. Cognitive radio testing framework based on USRP. *2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2013, pp. 212-215.
20. A. Basgumus, M. Namdar, T. Tsiftsis. Broadcast cognitive radio with dirty paper coding over Nakagami-m fading channel. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2019. Vol. 19. No 1. P. 3-8
21. M. Srilatha, S. Harini and T. Sushanth. Community Radio Using USRP 2920. *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, 2021, pp. 1-6.
22. A.M. Rembovsky, A.V. Ashikhmin, V.A Kozmin, S.M. Smolskiy. Television and Radio Broadcasting Monitoring, *SIG-NALS AND COMMUNICATION TECHNOLOGY*, 2018, pp. 337-379
23. Yuliya V. Ukhanova, "The Expert Image of the Russian Civil Society", *ECONOMIC AND SOCIAL CHANGES: FACTS, TRENDS, FORECAST*, vol. 11, no. 4, 2018, pp. 202-216
24. V. Y. Mikhaylov, R. B. Mazepa. USRP Devices Application for Modeling Signal-Like Interference in Wireless Networks. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2020, pp. 1-6.
25. Somanaidu, Utlapalli & Telagam, Nagarjuna & kk, Nehru & Nanjundan, Menakadevi. USRP 2901 Based FM Transceiver with Large File Capabilities in Virtual and Remote Laboratory. *International Journal of Online Engineering (ijOE)*. 2018. 14. 193. 10.3991/ijoe.v14i10.8283.
26. "Spectrum Monitoring With NI USRP", <https://www.ni.com/tutorial/13882/en/>, 2015 - 1/08/2022
27. "USRP Software Defined Radio Device Manual. USRP 2901", <https://www.ni.com/documentation/en/usrp-software-defined-radio-device/latest/usrp-2901/overview/#>, 2017 - 1/08/2022
28. R. M. Elshishtawy, A. S. T. Eldien, M. M. Fouda, A. H. Eldeib. Implementation of Multi-Channel Energy Detection Spectrum Sensing Technique in Cognitive Radio Networks Using LabVIEW on USRP-2942R. *2019 15th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*, 2019, pp. 1-6
29. Pieper, Ron. Laboratory and computer tests for Carson's FM bandwidth rule. 2001, 145 - 149. 10.1109/SSST.2001.918507.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE REST AND GRPC USED IN THE MONITORING SYSTEM OF COMMUNICATION NETWORK VIRTUALIZED INFRASTRUCTURE

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-50-55

Igor G. Buzhin,
MTUCI, Moscow, Russia, i.g.buzhin@mtuci.ru

Aleksey Yu. Derevyankin,
MTUCI, Moscow, Russia, alexeyderevyankin@yahoo.com

Veronika M. Antonova,
MTUCI, Moscow, Russia, v.m.antonova@mtuci.ru

Aleksey P. Perevalov,
MTUCI, Moscow, Russia, a.p.perevalov@mtuci.ru

Yuriy B. Mironov,
MTUCI, Moscow, Russia, i.b.mironov@mtuci.ru

Manuscript received 16 March 2023;
Accepted 14 April 2023

Keywords: *microservice architecture, gRPC, REST, comparison, streaming*

The analysis of papers related to data transmission in the microservice architecture is made. A monolithic networking architecture typically refers to a large computing network with a single software code base in which all service tasks are combined. To change this architecture, it is necessary to update the entire stack through a single code base and create an updated version of the interface on the service side. This approach makes it difficult to handle updates and increases the time for launching new services. A microservice application consists of many interacting services that can be freely updated, replaced or moved around, which makes it fundamentally different from the monolithic approach. A table with the comparison of the gRPC framework and the REST architectural style according to several criteria is given; it shows similarities and differences of the technologies considered. The results are presented as histograms illustrating the difference between the gRPC and REST in the number of requests when small and big data are transferred. The difference in latency while using the gRPC for different transfer types is shown.

Для цитирования:

Бужин И.Г., Деревьянкин А.Ю., Антонова В.М., Перевалов А.П., Миронов Ю.Б. Сравнительный анализ REST и gRPC, используемых в системе мониторинга виртуализированной инфраструктуры коммуникационной сети // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 50-55.

For citation:

Buzhin I.G., Derevyankin A.Yu., Antonova V.M., Perevalov A.P., Mironov Yu.B. (2023) Comparative Analysis of the REST and gRPC Used in the Monitoring System of Communication Network Virtualized Infrastructure. *T-Comm*, vol. 17, no.4, pp. 50-55. (in Russian)

Introduction

The development of Next Generation Mobile Networks, the Internet of Things and cloud services has led to a shift from monolithic to microservice architectures. A monolithic networking architecture typically refers to a large computing network with a single software code base in which all service tasks are combined. To change this architecture, it is necessary to update the entire stack through a single code base and create an updated version of the interface on the service side. This approach makes it difficult to handle updates and increases the time for launching new services. A microservice application consists of many interacting services that can be freely updated, replaced or moved around, which makes it fundamentally different from the monolithic approach.

Due to the fact that computing virtual networks are constantly evolving, there is an increase in the requirements for network parameters. Such requirements may include: types of nodes and their technical complexity, the cost of development and the amount of equipment, the bandwidth of communication channels, etc. In order to get a high-performance computing network with high bandwidth, when developing such a network, it is necessary to choose between tools for its construction and network infrastructure development.

A huge need for the introduction of software-configurable networks (SDN, Software-Defined Network) into computer communication networks arose due to the need to improve the efficiency of managing network elements. Software-configurable networks are data transmission networks in which the network management layer is separated from the data transmission layer and implemented programmatically by separate elements. Thanks to SDN technology, it has become possible to create flexible elements of network infrastructure, so the introduction of this approach into a computer network gives an advantage over networks in which it does not exist. When we use traditional network architectures, it is necessary to allocate a huge amount of money for the purchase of physical network devices. In the case of using SDN technology, it is possible to replace elements of the computer network with software.

The main reasons for the shift are complexity and scalability of the application. Overloading the architecture of a monolithic application with additional components greatly limits the ability to enhance the applied solution. Moreover, if one component of a monolithic application fails, the entire system may fail [1].

Each service has its own functionality of the application in use. A microservice may have the function of processing data generated by other microservice, in this case both services must describe communication interfaces. One of the popular architectural styles of microservice interaction is the REST technology. Its detailed specifications are given in [2]:

- scalability of component interaction
- fault tolerance
- security
- generalization of the interfaces
- easy to upgrade.

RESTful services are characterized by HTTP methods using the protocol described in RFC2616 [7]. Developers usually apply GET and POST methods. There are also such widely used methods as PUT, DELETE, PATCH, OPTIONS, although HTTP can have any other method [3].

The REST supports several types of data serialization for transmission, e.g. JSON, XML, form-data. However, the most popular is JSON. The main reason for using this format is its simplicity and lightweight design. If compared to XML, JSON is easier to read since it does not contain numerous constructors and repeating components, thus it makes communication through the REST API faster and more efficient than for example through SOAP, which is based solely on XML [4].

However, for a number of purposes there is a technology that can be used to transfer data in a microservice architecture more efficiently. That is data transfer using the Remote Procedure Call (RPC) protocol.

The control system is an important part of the computer network, the tasks of which include maintaining the availability of nodes, initializing the network interaction configuration and administration, as well as analyzing the technical condition of devices and network connections. All the described tasks relate to components for telemetry and network configuration.

Network monitoring is usually understood as the constant collection of data on the functioning of a computer network to perform such functions as: searching for slow, faulty or, conversely, underloaded systems, as well as the main consumers of network resources, fulfilling SLA parameters (service level agreements) and the quality of the service provided (for example, on-demand delivery of audio, video or other content, delays in connecting distributed and integrated systems). Along with the technical aspects listed above, monitoring is also understood as the supervision of the operation of the network, in the sense of monitoring compliance with access policies, information exchange and routing. The collected data may reflect different aspects of the network functioning, depending on the purpose and objectives of monitoring. Both meanings of the term monitoring proposed above are close to each other and rely on the same technologies for collecting and analyzing information.

Telemetry determines the possibilities of observability. Observability should be understood as a property of the system that characterizes the fundamental possibility of determining the state of the system by its output parameters. At the same time, a system is observable if there is a one-to-one correspondence between the measured output parameters and the state parameters of the system.

The observability of a computer network includes three methods: collection and processing of parameters (metrics), logging of network events, and tracing of network devices. The process of collecting metrics consists in the accumulation of system parameters for the purpose of subsequent visualization of the processed data. Parameters are collected from intermediate or terminal devices (nodes) of the network. To generate a message with metrics and its subsequent transmission to the telemetry system, the device is supplemented by an agent. Services, additional containers, additions to the device firmware, etc. can perform the functions of an agent. The network node sends metrics to the agent using the established protocol at regular intervals. The agent processes the metrics and sends generated messages with metrics to the telemetry system.

Thus, a comparative analysis of the REST and gRPC technologies, an experimental comparison of time delays in REST and gRPC operation, and recommendations for the use of the REST and gRPC in monitoring systems for communication network virtualized infrastructure should be made.

Comparative Analysis of the REST and gRPC

At present, the most popular RPC framework is the gRPC [8]. The gRPC is a relatively new open-source RPC framework, its functionality was developed by Google staff. The gRPC provides high performance and secure connectivity between services, and supports different types of data streaming. High performance and transmission speed is ensured by the Protocol Buffers serialization protocol (protobuf) and by the HTTP/2 protocol used for data transmission [4].

The paradigm used by the gRPC framework is based on the utilization of the remote procedure call protocol. As opposed to the REST, RPC employs a function call between client and server but not an HTTP call. The client calls a remote procedure which is implemented on the server side. Having received the call from the client the server, in turn, carries out the called function and transmits the result to the client. In [5], the operating principle of the protocol is described.

The gRPC technology allows four types of transmission to be identified [6]:

1. Unary calls where the client sends a request to the server and receives one response back.
2. Server-side streaming calls where the client sends a request to the server and gets a stream to read a sequence of messages back. The client reads from the returned stream until there are no more messages from the server side.
3. Client-side streaming calls. With this type of transmission the client sends a stream of messages to the server, and a server, in turn, receives all the messages and returns its response as one message to the client.
4. Bidirectional (duplex) streaming calls where both sides send a stream of messages. The streams operate independently, so clients and servers can read and write in whatever order they like.

Using the RPC protocol for inter-service communication brings some advantages to any transmission system. One of the main advantages is abstracting the developer from many mechanisms related to network communication. The developer can instead focus on the functionality issues of the application being developed. In [4] provides some advantages of gRPC framework application:

1. Strong data serialization using the protobuf protocol. Protobuf allow defining messages consisting of the basic data types such as integer, string, or boolean, as well as more complex messages with multiple nested structures inside. It enables to define own enumerations or messages and use them as a reference in other messages. Strong serialization involves raising an exception by the library if the message is missing the required field.
2. The application of the HTTP/2 protocol for data transmission. This protocol is described in RFC 7540 [9]. The principal change between this version and the previous ones is that HTTP/2 is a binary-based protocol. Several logical streams are formed when the connection between devices is set up. Each stream consists of a number of messages. Lastly, each message is comprised of a set of small binary frames. Each frame contains a special identifier that can be used to alternate these frames during transmission and collect them at the other end. HTTP/2 supports asynchronous request processing – request and responses can be processed in parallel without blocking other messages, therefore messages in the queue do not wait for others to be processed. This process is also referred to as multiplexing. Together, the parallel streams

form a single constant TCP connection thereby reducing the waste of memory and processing power. Figure 1 shows the difference in request handling for the HTTP 1.1 and HTTP 2 versions of the protocol.

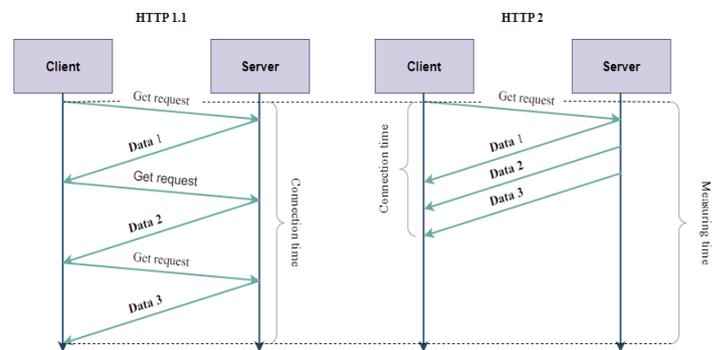


Fig. 1. Timing diagrams of request processing for the HTTP 1.1 and HTTP 2

3. The support of channel security mechanisms. The gRPC supports a variety of authentication techniques:

- The SSL/TLS can be used for the server authentication and encryption of the channel between the client and the server.
- Authentication based on JWT-tokens. The tokens are transmitted as metadata credentials over the channel protected by means of the SSL/TLS.
- The support of Application Layer Transport Security (or ALTS). This authentication transport encryption system is used in case services are running on Google cloud platform (GCP).

These authentication techniques are suitable for both internal service-to-service interaction and external API.

4. Transmitted data compression. The HTTP/2 employs HPACK compression that reduces the size of the transmitted frame header. The HTTP/1.1 utilizes gzip for data compression, and the message header is sent as a simple text without being compressed. The HPACK specification compares header metadata fields to previously transmitted header fields and compresses the header according to static and dynamic tables, which define the modifiability of one or another field.

5. Providing high performance. By means of protobuf serialization, HTTP/2 transmission protocol, HPACK compression, stream multiplexing, the gRPC provides the high performance. If compared to the REST, the gRPC can transmit and receive data much faster. Specific comparison results will be shown further in the paper.

6. Easy code generation for developing an API application. The gRPC provides tools for generating code for both the client and server sides according to proto files using the protoc utility. The service supports different programming languages, including Golang, C++, Java, Ruby, Python and more. The generated code provides functionality to set message parameters, marshaling/unmarshaling of messages, as well as to set up the connection between the client and the server. Moreover, the REST has tools for RESTful API description such as Swagger, Mashape, Apiary.

Table 1 below compares the technologies according to the criteria given above.

Table 1
Comparison of the gRPC and REST

Technology	gRPC	REST
Criteria		
Data serialization (basic)	Protobuf	JSON/XML
Data transmission protocol	HTTP/2, asynchronous frame transmission	HTTP/1.1
Safety tools	Supports SSL/TLS for connection security, various authentication and authorization mechanisms. In addition, security tools developed by Google are supported	Supports SSL/TLS for connection security, various authentication and authorization mechanisms. A wide range of options for establishing a secure connection link.
Transmitted data compression	HPACK, supports header compression	GZIP, header compression is not available
Performance	Faster than the REST when transferring massive data. If compared to the REST, it has insignificant performance advantage when low payload is conveyed.	Slower than the gRPC when transferring massive data. If compared to the gRPC, it has insignificant performance advantage when low payload is conveyed.
Code generation tools	Has built-in code generation tools. In most cases, system implementation is more complex and time-consuming.	Built-in code generation tools are not available. Swagger, Mashape, Apiary and more can be used. Many objectives can be achieved much more easily and quickly than using the gRPC.

The table shows that despite the higher performance and capacity of the gRPC, it is the REST technology that is preferable to be used for a certain number of tasks. The principal reasons for using the REST are its wide acceptance, support, and simplicity. However, a continuous stream of massive data is an example where a system implemented with the gRPC is more appropriate.

Experimental Comparison of Time Delays for the REST and gRPC in the Monitoring System of Communication Network Virtualized Infrastructure

In order to compare the gRPC and REST technologies, test measurements of the technologies were carried out during payload transfer. The measurements were made on a computing machine with the following parameters:

- CPU: Intel(R) Core (TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz 2.50 GHz
- RAM: 16 GB
- OS version: Ubuntu 20.04.5 LTS, amd64
- Golang version: 1.19.4
- gRPC: 1.51.0
- protobuf: v1.28.0.

Each application (client-side) ran in a docker container and transmitted the payload to an agent (server-side) using the pre-determined technology. The agent, in turn, took measurements and broadcast them to the monitoring tools as metrics. The conjunction of Grafana and Prometheus were used as the metrics monitoring and visualisation tools. For the docker container orchestration tools, a Kubernetes cluster was deployed by means of the local cluster startup tool called kind. The resulting data were analyzed and presented in graphs and histograms using gnuplot software. Figure 2 shows a sample diagram of the deployed cluster employed for taking test measurements.

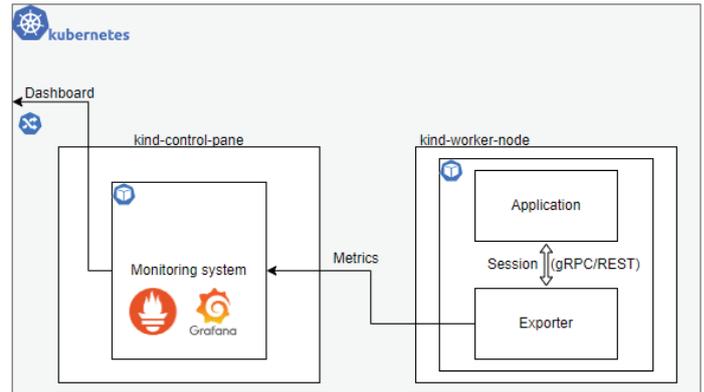


Fig. 2. A diagram of the test cluster stand

Goland was used as a programming language for developing the applications. The principal advantages of this programming language are its simplicity, speed and proper support with standard libraries.

The size of small data transmitted as payload can be considered negligible, while massive data were transferred with some optional payload of 437 kB added to them. This choice of the data size is not random but is due to the restriction imposed on the size of the data field in the gRPC. To measure the number of connections, an appropriate software counter has been defined. After each connection was completed, the counter was incremented by one. The time library built into the Go programming language was used to measure the latency of each connection.

Figure 3 shows the result of the experiment during which small and large data are conveyed between the client and the server. If small size information is transmitted as the payload, the amount of the data transmitted is slightly higher with the gRPC. In some cases the technologies can set up an equal number of connections.

When massive data are transferred, the number of calls increases by about 6 times. During the experiment, unary calls were used as a type of transmission. The comparison of the REST to different types of transmission in the gRPC is given further in the article.

As mentioned above, the gRPC has 4 types of transmission: unary calls, server/client stream calls and duplex stream calls. Figure 4 demonstrates the results of comparing the different gRPC transmission types to the REST. When checked, the latency of the server and client procedure calls appeared to be similar, therefore these types are merged into a single result. It is also worth considering that the call is regarded as completed when the side setting up the connection completes it.

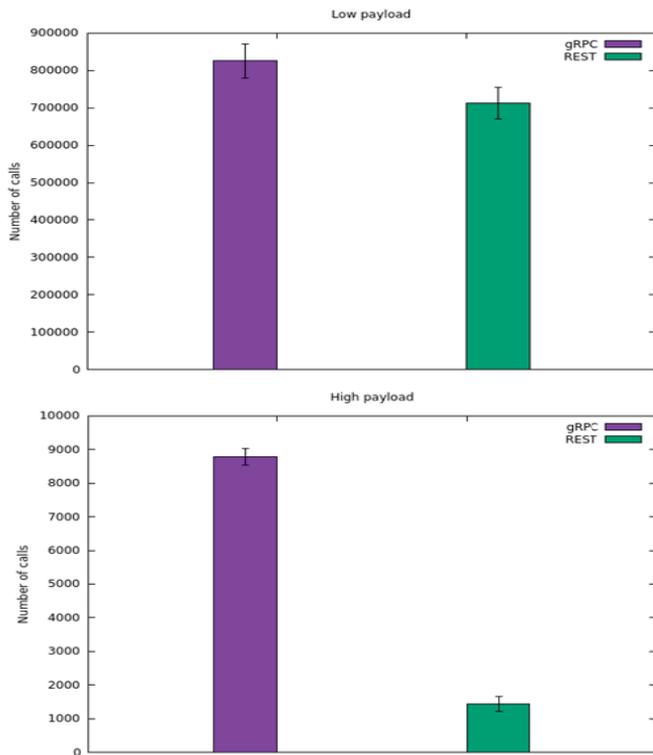


Fig. 3. Comparison of the number of completed connections between the application and the agent while transmitting small and big data in 60 seconds

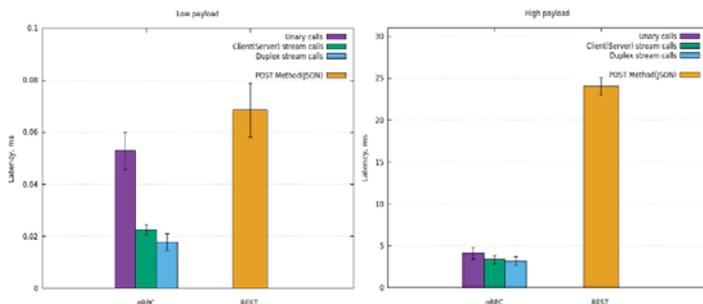


Fig. 4. Results of comparing the different gRPC transmission types to the REST (of 3 types of transmission) while transferring low and high payload

The results given above show that for small data transfers, there is a difference in delay between the REST's HTTP call and the gRPC's unary call, but after some REST API optimization it is possible to achieve closer values. In the case of streaming small data transfers, the latency is reduced for the two types of transfers. This fact can be explained as follows: in streaming, data is partitioned and transmitted asynchronously. When massive data are transmitted, the gRPC has the performance advantage of about 5 times higher for unary calls and about 7-8 times higher for streaming. It is worth noting that for bidirectional streaming, the payload of 437 kB was transmitted in both directions.

Conclusion

Thus, the comparison of data transmission technologies in the gRPC and REST microservice architecture allows us to infer that HTTP call techniques should be combined with remote procedure calls to build systems for transferring information

between services. Despite the growing popularity of the gRPC technology for data transfer, it is worth evaluating both its advantages and disadvantages, since this affects the quality of the developed system and the final resources consumption required for the system development.

Objectives necessitating high-performance transmission of massive data are recommended to be achieved by using one of the gRPC types of transferring. For implementing small data transmission systems or for implementing complex transmission systems, it is worth using the fully developed REST API.

References

1. Malichenko S. The Problem of Switching from Monolithic to Microservice Architectures. *Euroasian Scientific Journal*, no.5, 2022, pp. 1-13.
2. Fielding R.T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. *Dissertation, University of California, Irvine*, 2000.
3. Cheglakov A. Web-service composition based on REST architecture. *International scientific journal "Innovation Science"*, no.12-2, ISSN 2410-6070, 2016, pp. 118-120.
4. Michal Stefanic. Developing the guidelines for migration from RESTful microservices to gRPC. Masaryk University, Faculty of Informatics, Brno, 2021, pp.1-81.
5. The official site of Microsoft. RPC Operation. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/windows/win32/rpc/how-rpc-works> (Accessed December 15, 2022).
6. The official site of gRPC. Introduction to gRPC. Available at: <https://grpc.io/docs/what-is-grpc/introduction/> (Accessed December 15, 2022).
7. Fielding R. et al. RFC2616: Hypertext Transfer Protocol. HTTP/1.1. 1999.
8. Pourhabibi A. et al. Cerebros: Evading the RPC tax in datacenters. *MI-CRO-54: 54th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*. 2021, pp. 407-420.
9. Kosek M., Shreedhar T., Bajpai V. Beyond quic v1: A first look at recent transport layer IETF standardization efforts. *IEEE Communications Magazine*. 2021. Vol. 59. No. 4, pp. 24-29.
10. Buzhin I.G., Antonova V.M., Gaifutdinov E.A., Mironov Yu.B. (2022) Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies. *T-Comm*, vol. 16, no.12, pp. 40-45.
11. Vilalta R. et al. GRPC-based SDN control and telemetry for soft-failure detection of spectral/spacial superchannels. *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*. IET, 2019, pp. 1-4.
12. Vilalta R. et al. Telemetry-enabled cloud-native transport SDN controller for real-time monitoring of optical transponders using gNMI. *2020 European Conference on Optical Communications (ECOC)*. IEEE, 2020, pp. 1-4.
13. Sgambelluri A. et al. Open source implementation of OpenConfig telemetry-enabled NETCONF agent. *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2019, pp. 1-4.
14. Lui N., Hill J. H. A generalized approach to real-time, non-intrusive instrumentation and monitoring of standards-based distributed middleware. *Journal of Systems Architecture*. 2021. Vol. 117, pp. 102-181.
15. Muñoz R. et al. Dynamic Reconfiguration of WDM Virtual Network Topology over SDM Networks for Spatial Channel Failure Recovery with gRPC Telemetry. *2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2022, pp. 1-3.
16. Indrasiri K., Kuruppu D. gRPC: up and running: building cloud native applications with Go and Java for Docker and Kubernetes. O'Reilly Media, 2020.
17. Moseva M.S. (2022) About methods for collecting and analyzing traffic flow characteristics. *T-Comm*. Vol. 16, no.2, pp. 29-38.
18. Antonova V.M., Malikova E.E., Panov A.E., Spichek I.V., Malikov A.Y. Implementation of IoT technology for data monitoring via cloud services. *T-Comm*, 2021. Vol. 15, no.2, pp. 46-53.
19. Albab K. D. et al. SwitchV: automated SDN switch validation with P4 models. *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference*. 2022, pp. 365-379.
20. El Kholy M., El Fatatry A. Framework for interaction between databases and microservice architecture. *IT Professional*. 2019. Vol. 21. No. 5, pp. 57-63.
21. Vilalta R. et al. GRPC-based SDN control and telemetry for soft-failure detection of spectral/spacial superchannels. *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*. IET, 2019, pp. 1-4.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ REST И gRPC, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ВИРТУАЛИЗИРОВАННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Бужин Игорь Геннадьевич, МТУСИ, Москва, Россия, i.g.buzhin@mtuci.ru

Деревянкин Алексей Юрьевич, МТУСИ, Москва, Россия, alexeyderevyankin@yahoo.com

Антонова Вероника Михайловна, МТУСИ, Москва, Россия, v.m.antonova@mtuci.ru

Перевалов Алексей Павлович, МТУСИ, Москва, Россия, a.p.perevalov@mtuci.ru

Миронов Юрий Борисович, МТУСИ, Москва, Россия, i.b.mironov@mtuci.ru

Аннотация

Реализация концепции цифровой экономики Российской Федерации сопровождается возрастанием объемов и расширением функциональных возможностей предоставляемых сервисов, повышением требований к информационной безопасности информации, что, в свою очередь, влечет за собой усложнение механизмов управления систем и сетей связи. В связи с этим появилась необходимость отделения функции управления от функции передачи данных телекоммуникационного оборудования, что является основой технологии SDN/NFV. Несмотря на рост популярности технологии gRPC для передачи данных стоит оценивать, как достоинства, так и его недостатки, так как от этого зависит качество разработанной системы и итоговый расход ресурсов на разработку системы. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1. Проанализированы работы, затрагивающие тему передачи информации в микросервисной архитектуре; 2. Приведена таблица сравнения фреймворка gRPC и архитектурного стиля REST по нескольким критериям, показывающая сходства и различия анализируемых технологий; 3. Приведены результаты в виде гистограмм, показывающих разницу gRPC и REST по количеству запросов при передаче малых и больших данных; 4. Показана разница в задержке с использованием gRPC при разных типах передач. Разработанная методика может быть полезной для проведения исследовательских работ и на этапе проектирования сетей связи.

Ключевые слова: микросервисная архитектура, gRPC, REST, сравнение, потоковая передача.

Литература

1. Маличенко С. Проблемы перехода от монолитной к мультисервисной архитектуре // Euroasian Scientific Journal, № .5, 2022. С. 1-13.
2. Fielding R.T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures // Dissertation, University of California, Irvine, 2000.
3. Чеглаков А. Композиция WEB-сервисов на основе архитектуры REST // International scientific journal "Innovation Science", № 12-2, ISSN 2410-6070, 2016. С. 118-120.
4. Michal Stefanic. Developing the guidelines for migration from RESTful microservices to gRPC // Masaryk University, Faculty of Informatics, Brno, 2021, pp.1-81.
5. The official site of Microsoft. RPC Operation. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/windows/win32/rpc/how-rpc-works> (Accessed December 15, 2022).
6. The official site of gRPC. Introduction to gRPC. Available at: <https://grpc.io/docs/what-is-grpc/introduction/> (Accessed December 15, 2022).
7. Fielding R. et al. RFC2616: Hypertext Transfer Protocol-HTTP/1.1. 1999.
8. Pourhabibi A. et al. Cerebros: Evading the RPC tax in datacenters //MICRO-54: 54th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture. 2021, pp. 407-420.
9. Kosek M., Shreedhar T., Bajpai V. Beyond quic v1: A first look at recent transport layer ietf standardization efforts // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. -No. 4, pp. 24-29.
10. Buzhin I.G., Antonova V.M., Gaifutdinov E.A., Mironov Yu.B. (2022) Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. Т. 16, № 12. С. 40-45.
11. Vilalta R. et al. GRPC-based SDN control and telemetry for soft-failure detection of spectral/spacial superchannels //45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). IET, 2019, pp. 1-4.
12. Vilalta R. et al. Telemetry-enabled cloud-native transport SDN controller for real-time monitoring of optical transponders using gNMI // 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC). IEEE, 2020, pp. 1-4.
13. Sgambelluri A. et al. Open source implementation of OpenConfig telemetry-enabled NETCONF agent // 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2019, pp. 1-4.
14. Lui N., Hill J. H. A generalized approach to real-time, non-intrusive instrumentation and monitoring of standards-based distributed middleware // Journal of Systems Architecture. 2021. Т. 117, pp. 102-181.
15. Munoz R. et al. Dynamic Reconfiguration of WDM Virtual Network Topology over SDM Networks for Spatial Channel Failure Recovery with gRPC Telemetry // 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2022, pp. 1-3.
16. Indrasiri K., Kuruppu D. gRPC: up and running: building cloud native applications with Go and Java for Docker and Kubernetes. O'Reilly Media, 2020.
17. Moseva M.S. About methods for collecting and analyzing traffic flow characteristics. T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022. Т. 16. №2. С. 29-38.
18. Antonova V.M., Malikova E.E., Panov A.E., Spichek I.V., Malikov A.Y. Implementation of IoT technology for data monitoring via cloud services. T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. №2. С. 46-53.
19. Albab K. D. et al. SwitchV: automated SDN switch validation with P4 models // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. 2022. С. 365-379.
20. El Kholly M., El Fatatry A. Framework for interaction between databases and microservice architecture // IT Professional. 2019. Т. 21. №. 5. С. 57-63.
21. Vilalta R. et al. GRPC-based SDN control and telemetry for soft-failure detection of spectral/spacial superchannels // 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). IET, 2019. С. 1-4.

ORGANIZERS:

IRIS ASSOCIATION (INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS, VIENNA, AUSTRIA)
RUSSIA SECTION TEM/GRS/ITSS JOINT CHAPTER

INTERNATIONAL CONFERENCE

**«2023 International Conference
«Engineering Management of
Communication and Technology»
(EMCTECH)**

IEEE Conference

**16 – 18 October 2023
Vienna, Austria**

Conference will produce a publication.

All accepted and presented Papers following the conference will be submitted for inclusion into IEEE Xplore and will be submitted also for indexing in Scopus and Web of Science data bases

The papers which are discussed at the conference can be divided into the following chapters:

CHAPTER 1. TECHNOLOGY ADVANCEMENTS IN IOT DEVICES & ARTIFICIAL INTELLIGENCE

CHAPTER 2. TRANSPORT AND COLLECTIVE SYSTEMS: SMART CONTROL TECHNOLOGY IN TRANSPORTATION, BIOMEDICAL, FARMING AND CYBER PHYSICAL SYSTEMS (new opportunities using technology in biomedical, farming, transportation, and cyber physical systems)

CHAPTER 3. BROADCAST TECHNOLOGIES ADVANCEMENTS – RADIO, IP, CELLULAR, ON DEMAND, INTERACTIVE

CHAPTER 4. TECHNOLOGY ADVANCEMENTS IN WIRE AND OPTICAL COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS

CHAPTER 5. DIGITALIZATION PROCESS AND SECURITY MANAGEMENT IN DIGITAL SOCIETY AND INDUSTRY 4.0

CHAPTER 6. DIGITAL TRANSFORMATION AND DATA RISK MANAGEMENT IN ICT/TELECOMMUNICATION

CHAPTER 7. DEVELOPING PERSONAL SKILLS FOR LEADING INNOVATION INITIATIVES

CHAPTER 8. ENGINEERING TECHNOLOGY LEADING TO SOCIAL, POLITICAL AND ECONOMICAL CHANGE

Materials are available in English

<http://media-publisher.eu/conference-emctech/call-for-papers/>