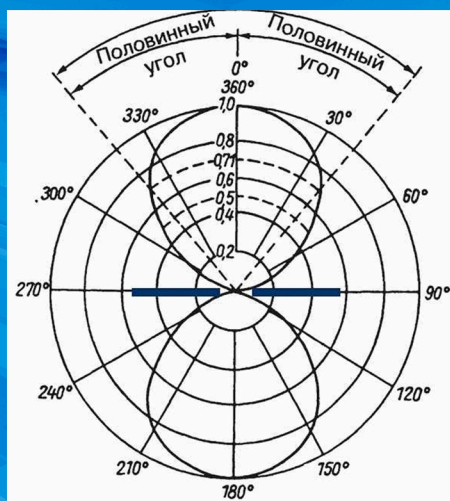




Современные проблемы радиофизики и радиотехники

Сборник докладов
Омского научного
семинара



Выпуск 12

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
РАДИОФИЗИКИ И РАДИОТЕХНИКИ**

Сборник докладов Омского научного семинара

Выпуск 12

Омск
2025

УДК 621.396+654.02+681.2
ББК 32.95+32.97
С56

Ответственный редактор *С. В. Кривальцевич*

С56 **Современные проблемы радиофизики и радиотехники :**
сборник докладов Омского научного семинара / отв. ред.
С. В. Кривальцевич. – Вып. 12. – Омск : ОНИИП, 2025. – 90 с.

ISBN 978-5-6052462-2-0

В сборник вошла часть докладов, сделанных участниками семинара на заседаниях в 2024–2025 гг.

В докладах освещены вопросы создания систем связи, моделирования радиосетей, разработки радиоэлектронных устройств и сигнально-кодовых конструкций, а также результаты радиофизических исследований в области формирования и распространения радиоволн.

Для студентов, аспирантов и преподавателей естественно-научных и технических специальностей высших учебных заведений, а также сотрудников учреждений РАН и предприятий радиоэлектронной отрасли.

УДК 621.396+654.02+681.2
ББК 32.95+32.97

ISBN 978-5-6052462-2-0

© АО «ОНИИП»,
© Авторы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Кривальцевич С. В.</i> Вступительное слово	4
<i>Воронцов А. М.</i> Определения относительных положений РЭС	7
<i>Кащенко И. Е.</i> Метод снижения пик-фактора OFDM-сигналов на основе компенсирующих импульсов	15
<i>Косарев Б. А., Туймитова М. Н., Шаньшин П. Ю., Калинин Г. Д.</i> Обоснование конструкции устройства для выявления феррорезонанса в силовом трансформаторе или реакторе	22
<i>Кучерук В. Е.</i> Использование многопоточности в решении задач радиофизики	26
<i>Кучерук В. Е.</i> Радиосеть мониторинга распространения слабых сигналов WSPRNet как инструмент для изучения ионосферы	30
<i>Любчик В.-А. В.</i> Прогнозирование возможности осуществления коротковолновой радиосвязи с использованием ЧВС	34
<i>Масленников А. Б., Кривальцевич П. С.</i> Расчёт параметров проходного рёберного изолятора	48
<i>Новикова А. В.</i> Обзор характеристик ресурсных спутников с установленными на борту радиолокаторами с синтезированной апертурой	54
<i>Новикова А. В.</i> О возможности оценки скорости ветра по данным спутниковых радиолокаторов	60
<i>Пуцькович А. А.</i> Об алгоритмах расчета оптимальных путей передачи информации в радиосети	68
<i>Пуцькович А. А.</i> Моделирование качества связи для ДКМВ-радиосети в Арктическом регионе России	76
<i>Шумилов Н. Н.</i> Анализ сетевого трафика в реальном времени	79

Вступительное слово

Омский научный семинар «Современные проблемы радиофизики и радиотехники» начал свою работу в январе 2010 года в Омском государственном университете им. Ф. М. Достоевского. Семинар проводится на базе кафедры радиофизики и радиоэлектроники, кафедры общей и экспериментальной физики ОмГУ им. Ф. М. Достоевского. Работа научного семинара поддерживается АО «ОНИИП», ведущим отраслевым НИИ в области систем радиосвязи, и Институтом радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, занимающимся поисковыми исследованиями способов интеллектуального управления конвергентными радиосистемами и в области создания электронной компонентной базы для таких систем.

Основными целями научного семинара являются:

- создание благоприятной среды для обмена опытом;
- обсуждение новых идей и подходов в радиофизике и радиотехнике;
- привлечение студентов, выпускников и молодых специалистов к научной, научно-технической и преподавательской деятельности в области радиофизики, радиотехники и электроники, а также смежных направлений исследований.

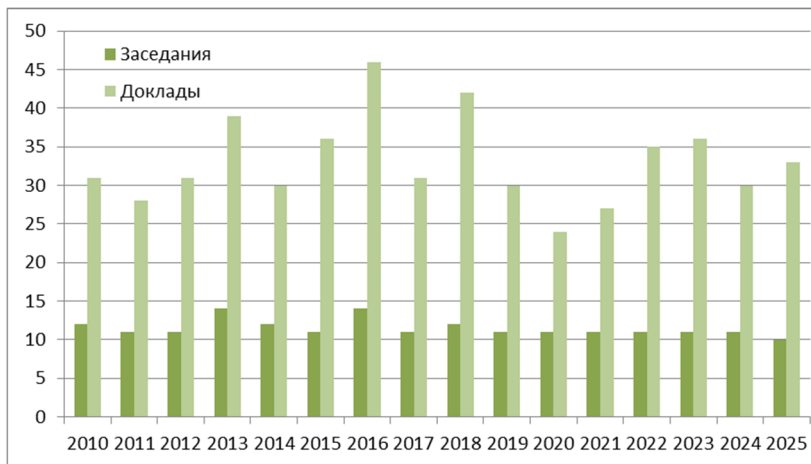
Работа семинара организована по следующим предметным секциям: «Радиофизическое зондирование»; «Антенно-фидерные устройства»; «Моделирование процессов и устройств»; «Цифровая обработка сигналов»; «Разработка, конструирование и производство аппаратуры»; «Техника СВЧ»; «Инженерная археология»; «Перспективные технологии в производстве РЭА».

Плановые заседания семинара неизменно проводятся в последнюю субботу каждого месяца (за исключением июля) с 11:30. Место проведения: пр. Мира, 55а (1-й корпус ОмГУ, ауд. 301).

Участниками и докладчиками научного семинара являются студенты, магистранты, аспиранты, преподаватели и научные сотрудники омских вузов и учреждений СПО, научные сотрудники и инженеры учреждений науки, специалисты и научные сотрудники радиоэлектронных предприятий Омска, учащиеся омских школ, а также представители других городов Российской Федерации.

На первом заседании семинара 30 января 2010 года было заслушано два доклада, а всего за 15 лет, с 2010 по 2024 гг., состоялось

174 заседания, на которых было представлено 496 докладов. Работа семинара продолжается и в 2025 году: на состоявшихся десяти заседаниях было заслушано 33 доклада.



Заседания и доклады семинара в 2010–2025 гг.

Организованы трансляции докладов и подключения докладчиков в дистанционном режиме, и теперь каждое заседание транслируется в сети «Интернет». Забота о сайте семинара (www.радиосеминар.рф) и трансляции заседаний лежит на Александре Леонидовиче Ворожцове и Алёне Олеговне Никифоровой. На сайте семинара, всегда можно ознакомиться с программой предстоящего заседания, отчетами о предыдущих заседаниях, новостями об омских конференциях и семинарах. С электронными версиями сборников также можно ознакомиться на сайте семинара.

Благодарим за поддержку семинара декана физического факультета ОмГУ им. Ф. М. Достоевского Марию Геннадьевну Потуданскую, заместителя начальника отдела АО «ОНИИП», старшего научного сотрудника Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН Дмитрия Евгеньевича Зачатейского, старшего научного сотрудника Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН Александра Сергеевича Яценко, доцента ОмГУ им. Ф. М. Достоевского Анатолия Александровича Ля-

хова, младшего научного сотрудника Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН Юрия Александровича Костычева, и конечно огромное спасибо всем докладчикам и участникам семинара.

В планах семинара расширить авторский состав докладчиков, а также привлечь слушателей из других городов.

Издание данного сборника, как и одиннадцати предыдущих, осуществлено благодаря поддержке генерального директора АО «ОНИИП» Владимира Александровича Березовского.

Приглашаем на наш семинар всех желающих поделиться результатами своих научных достижений и узнать про исследования и разработки омских ученых, преподавателей и инженеров.

С. В. Кривальцевич,
руководитель Омского научного семинара
«Современные проблемы радиофизики
и радиотехники»
kriser2002@mail.ru

А. М. Воронцов

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ РЭС

В статье рассматривается алгоритм организации сети в условиях отсутствия или искусственной подмены навигационных сигналов спутниковой навигации. Алгоритм может быть использован для систем с распределенными децентрализованными вычислительными модулями.

Ключевые слова: алгоритмы организации сетей, искусственная подмена, спутниковая навигация, децентрализованные системы, портативные радиосистемы.

Введение

В условиях угроз, связанных с отсутствием или искусственной подменой навигационных сигналов, возникает необходимость в разработке алгоритмов организации сетей. Алгоритмы обеспечивают радиообмен в системах с распределенными децентрализованными вычислительными модулями.

Описания алгоритма

Алгоритм основан на опросе окружения с использованием радиоканала. Станция-инициатор производит общий вызов на минимальной мощности, что позволяет станциям-слушателям зафиксировать уровень полученного сигнала и записать его в свою матрицу. После этого станции-слушатели передают информацию о уровне сигнала обратно на станцию-инициатор. В то же время станция-приемник продолжает слушать эфир, а станция-инициатор также отслеживает сигналы от других станций. После завершения обмена данными станция-инициатор отправляет сформированную матрицу обратно всем станциям-слушателям. В результате каждая станция получает информацию о расстоянии до других станций и угле их направления в относительной системе координат. Структурная схема представлена на рис. 1.

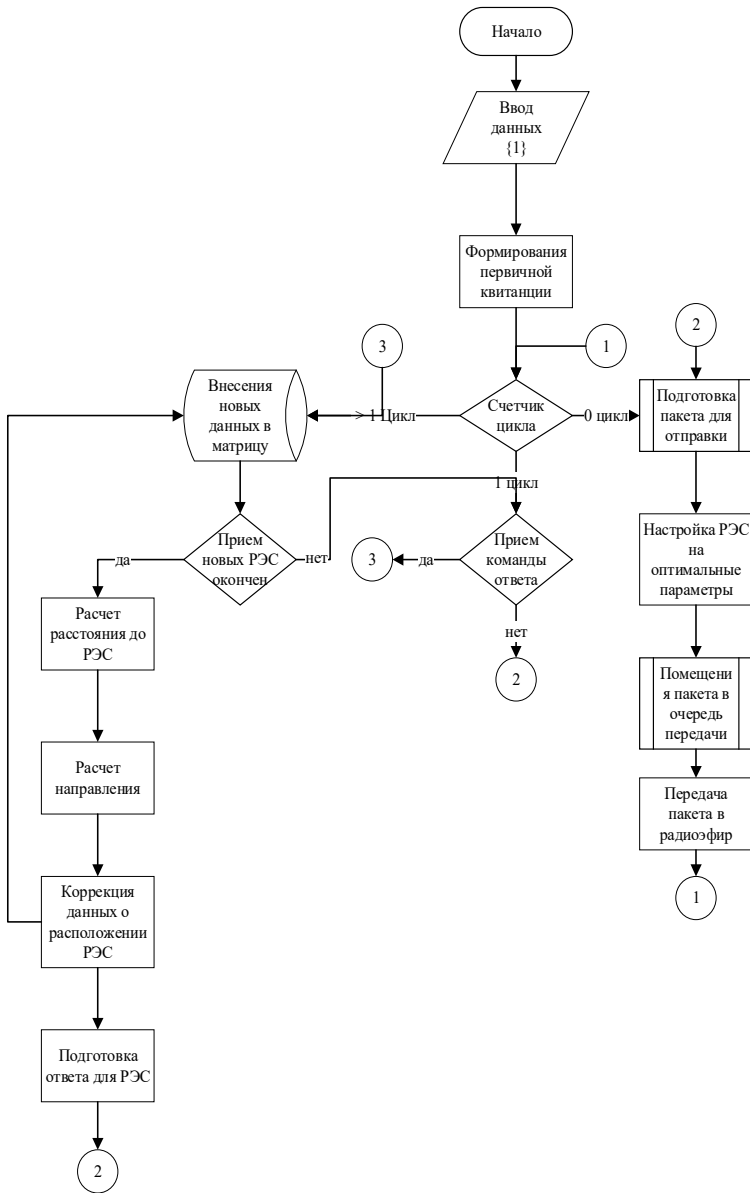


Рис. 1. Алгоритм опроса сети

В результате работы данного алгоритма формируется поочередно матрица положений радиостанций, которая описывает угол, на который станция отклонена по результатам полученных ответов от станций, принявших сигнал и отправивших ответ. На рис. 2 показана очередь ответов от принявшей радиостанции.

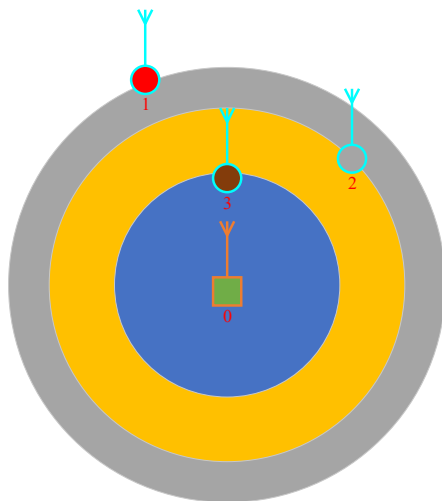


Рис. 2. Очередность РЭС

В случае, когда радиостанция подключается к уже сформировавшейся сети, очередность ответов определяется уровнем сигнала от минимальной радиостанции. Поочередный радиообмен в порядке увеличения уровня сигнала предоставляет достаточно информации от трех станций для определения относительного положения радиостанции.

S_i – уровень сигнала от i -й радиостанции, где $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Тогда порядок обмена можно описать следующим образом:

- уровень сигнала (1)

$$S_1 < S_2 < S_3 < \dots < S_n, \quad (1)$$

- порядок ответов (2)

$$R_i = f(S_i) \text{ для } i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где R_i – ответ от i -й радиостанции, а $f(S_i)$ – функция, определяющая порядок ответа в зависимости от уровня сигнала;

- определение относительного положения (3)

$$P = g(R1, R2, R3), \quad (3)$$

где P – относительное положение радиостанции, а g – функция, которая вычисляет положение на основе полученных ответов.

Если сеть еще не сформирована, станция отправляет ответ до тех пор, пока не подключится к сети и не получит ответ от еще одной станции. В этом случае радиостанция продолжает отправлять запросы до тех пор, пока не получит ответ от другой станции.

Матрица уровней сигналов

Для формирования матрицы уровней сигналов, полученных от различных станций, используется матрица, в которой есть N станций, каждая из которых фиксирует уровень сигнала от других станций. Размерность матрицы уровней сигналов S определяется $N \times N$, где строки матрицы S соответствуют станциям – инициаторам, столбцы матрицы S соответствуют станциям – слушателям, элементы матрицы S представляют уровень сигнала, полученного станцией i от станции j .

Безразмерная матрица приведена в формуле (4):

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2N} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \dots & S_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & S_{N3} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где S_{ij} – уровень сигнала, полученный станцией i от станции j .

Расчет дальности

Для вычисления расстояний на основе уровней сигналов за основу была взята формула, описывающая закон распространения радиоволн. Уровень сигнала в дБ можно выразить через расстояние с использованием следующей формулы [1]:

$$L = L_0 - 20 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(f) + K, \quad (5)$$

где L – уровень сигнала в дБ, полученный на приемной станции; L_0 – уровень сигнала на расстоянии 1 метра (дБ), d – расстояние до передающей станции (м), f – частота сигнала (Гц), K – корректирующий коэффициент, учитывающий потери в среде.

Для вычисления матрицы расстояний D размером $N \times N$, где каждый элемент D_{ij} представляет расстояние до станции j от станции i , была выведена следующая формула:

$$D_{ij} = 10^{\frac{L_0 - S_{ij} + 20 \log_{10}(f) - K}{20}}. \quad (6)$$

Расчет направления на станцию (триангуляция)

Для расчета направления используется распространенное уравнение по 3 и более радиусам определения станции. Для N известных станций с координатами (x_i, y_i) и расстояниями до искомой станции D_i уравнение для станции i (где $i = 1, 2, \dots, N$) можно записать следующим образом [2,3]:

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = D_i, \quad (7)$$

где (x, y) – координаты искомой станции. Это уравнение описывает окружность с центром в точке (x_i, y_i) и радиусом D_i .

Для нахождения координат искомой станции необходимо решить систему уравнений, состоящую из N таких уравнений. В виде примера разобран случай для 3 радиостанций:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = D_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = D_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = D_3^2 \\ \vdots \\ (x - x_N)^2 + (y - y_N)^2 = D_N^2 \end{cases} \quad (8)$$

После нахождения координат искомой станции (x, y) , можно определить направление к ней от каждой из известных станций. Направление можно выразить в виде угла θ относительно оси X:

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{y - y_i}{x - x_i}\right), \text{ для } i = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

В матричном виде для радиостанций относительно центральной станции матрица углов будет выглядеть следующим образом:

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \\ \theta_N \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Нахождения координат станции

Для нахождения координат искомой станции (x, y) на основе расстояний до известных станций и углов можно записать систему уравнений, где N известных станций с координатами (x_i, y_i) и расстояниями D_i до искомой станции, а также углами θ_i :

$$\begin{cases} x = x_N + D_N \cdot \cos(\theta_N) & (N) \\ y = y_N + D_N \cdot \sin(\theta_N) & (N) \end{cases} \quad (11)$$

В результате решения уравнений для всех радиостанций возможно определить их координаты. Рассчитанные матрицы модели показаны на рис. 4.

Оценочная позиция для станции 1: [9.10735966e+18 2.42463202e+19]
 Угол к целевой позиции от станции 1: 69.41290664058593 градусов
 Оценочная позиция для станции 2: [-2.880e+18 2.736e+19]
 Угол к целевой позиции от станции 2: 96.00900595749452 градусов
 Оценочная позиция для станции 3: [6.22735966e+18 -5.99367983e+18]
 Угол к целевой позиции от станции 3: -43.90457463229095 градусов

Таблица расстояний:

Идентификатор станции	Расстояния
0	1 {2: 42678705840.93418, 3: 75894663844.04117}
1	2 {1: 24000000000.00002, 3: 75894663844.04117}
2	3 {1: 24000000000.00002, 2: 42678705840.93418}

Таблица сигналов:

Идентификатор станции	Полученные сигналы
0	1 {2: 75, 3: 70}
1	2 {1: 80, 3: 70}
2	3 {1: 80, 2: 75}

Таблица углов и расстояний:

Станция	Станция связи	Угол (градусы)	Расстояние	Уровень сигнала	
0	1	2	69.412907	4.267871e+10	80
1	1	3	69.412907	7.589466e+10	80
2	2	1	96.009006	2.400000e+10	75
3	2	3	96.009006	7.589466e+10	75
4	3	1	-43.904575	2.400000e+10	70
5	3	2	-43.904575	4.267871e+10	70

Таблица координат:

Станция	Координата X	Координата Y
0	1	0
1	1	0
2	2	100
3	2	100
4	3	50
5	3	50

Рис. 3. Результат моделирования

Заключение

В статье рассмотрены алгоритмы организации сетей, радиообмена в условиях отсутствия или подмены навигационных сигналов. Представлено математическое описание и результат работы моделирования опроса сети с расчетом относительных положений станций, находящихся в зоне действия сети.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Pastebin. URL: <https://pastebin.com/NtyaTtM4>.

[2] *Никольский Б. А.* Основы теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы : уч. пособ. Самара, 2012.

[3] *Липатников В. А., Парфиров В. А., Петренко М. И.* Общая модель самоорганизующейся радиосвязи с мультиплексированием потоков // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2022 : сб. материалов международной научно-практической конференции (9–10 ноября, 2022 г.). СПб. : Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2022.

Воронцов Андрей Михайлович, сотрудник Омского научно-исследовательского института приборостроения, студент Омского государственного технического университета, amvorontsov@st.omgtu.ru.

И. Е. Кащенко

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА OFDM-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

Представлен метод снижения отношения пиковой мощности к средней мощности (пик-фактор) для OFDM-сигналов на основе итерационного алгоритма с использованием компенсирующих импульсов (Peak Cancellation CFR). Использование компенсирующих импульсов позволяет сохранить спектральную маску OFDM-сигналов, а также минимизировать влияние на модуль вектора ошибки (EVM) сигнала. Показана интеграция с трактом передачи и возможности аппаратной реализации представленного алгоритма.

Ключевые слова: OFDM, PAPR, снижение пик-фактора, компенсирующие импульсы, КИХ-фильтр, EVM, BER.

Введение

Технология OFDM обеспечивает высокую спектральную эффективность и устойчивость при распространении в многолучевых каналах связи, однако суперпозиция большого числа поднесущих приводит к высоким мгновенным значениям уровня огибающей сигнала. Это выражается в большом соотношении пиковой мощности к средней мощности (пик-фактор), что существенно ухудшает энергетическую эффективность передающего тракта и одновременно повышает требования к его линейности. Задача снижения пик-фактора при сохранении качества модуляции (EVM, BER) и соблюдении спектральной маски – одна из ключевых в современных широкополосных радиосистемах [1].

Одним из наиболее актуальных методов снижения пик-фактора является метод на основе компенсирующих импульсов. Данный метод не зависит от типа входных данных и не требует специализированной обработки на приёмной стороне. Основная идея метода состоит в том, что локально обнаруженные пики огибающей сигнала компенсируются за счёт специальным образом сформированных импульсов. Данный метод предполагает итеративную процедуру снижения пик-фактора и обеспечивает его существенное снижение без расширения спектральной маски сигнала.

Аналитическая модель OFDM-сигнала и параметры символа

Пусть передается один OFDM-символ с N_{fft} точками БПФ, из которых используется K активных поднесущих (остальные – виртуальные несущие и DC-нулевой). Нормированный к мощности базовый сигнал на интервале полезной части имеет вид суммы комплексных экспонент с QAM-сигналом X_k :

$$s[n] = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k \in S} X_k e^{j2\pi kn/N_{fft}}, n = 0, \dots, N_{fft} - 1, \quad (1)$$

где S – множество индексов активных поднесущих OFDM-сигнала.

Вставка циклического префикса (CP) длиной N_{cp} образует полный символ длиной $N_{sym} = N_{fft} + N_{cp}$ отсчетов. Для частоты дискретизации F_s длительности равны $T_u = N_{fft}/F_s$ (полезная) и $T_g = N_{cp}/F_s$ (защитный интервал), полный символ $T_s = T_u + T_{cp}$.

Шаг поднесущих OFDM равен $\Delta f = 1/T_u$, а ширина занятой полосы приблизительно равна $K\Delta f$. Для оценки эффективности предлагаемого метода снижения пик-фактора используются следующие параметры OFDM: $F_s = 307,2$ МГц, $N_{fft} = 2048$, $N_{cp} = N_{fft}/8$, $K = N_{fft} - N_{cp} - N_p - 1$, где $N_g = 128$ – защитные поднесущие по краям OFDM, $N_p = 33$ – пилоты; поднесущая на нулевой частоте исключена.

$$\Delta f = \frac{1}{T_u} = \frac{F_s}{N_{fft}}, BW = K \Delta f. \quad (2)$$

Передача пилотов и распределение данных и пилотов реализуются по равномерной ресурсной сетке с исключением центральной поднесущей [2]. Для снижения спектральных искажений применяется специализированная сглаживающая оконная функция, результирующая частота дискретизации формируется за счёт полуполосового КИХ-фильтра [3].

Аналитическое объяснение высокого пик-фактора в OFDM

Составляющие сигнала X_k являются независимыми (или слабо коррелированными) случайными величинами с нулевым средним

значением (QAM-модуляция). Тогда, согласно центральной предельной теореме, сумма большого числа гармонических составляющих сигнала приводит к тому, что вещественная и мнимая части $s[n]$ близки к гауссовому распределению $N(0, \sigma^2)$ [5]. Следовательно, модуль сигнала $r[n] = |s[n]|$ будет иметь распределение Релея, а мощность $z[n] = |s[n]|^2$ – экспоненциальное распределение.

$$pR(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/(2\sigma^2)}, r \geq 0, pZ(z) = \frac{1}{z} e^{-z/\bar{z}}, z \geq 0. \quad (3)$$

При нормировке на единичную среднюю мощность имеем $E|s[n]|^2 = 1$, $\sigma^2 = 1/2$ и среднее $z = 1$. Пик-фактор определяется максимумом по отсчётам внутри символа (с учётом передискретизации КИХ-фильтра в L -раз). При независимости отсчётов функция CCDF будет иметь пик-фактор:

$$\Pr\{PAPR > \gamma\} \approx 1 - (1 - e^{-\gamma})^{LN_{fft}}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что с ростом N_{fft} (и эффективного числа независимых выборок $L \cdot N_{fft}$) вероятность больших пиков возрастает. На рис. 1 представлена функция CCDF для OFDM.

Ожидаемый максимум мощности при единичной средней растёт как $E[\max z] \approx \ln(LN_{fft})$, поэтому пик-фактор увеличивается логарифмически со спектральной эффективностью, что является фундаментальной причиной высокого пик-фактора в OFDM.

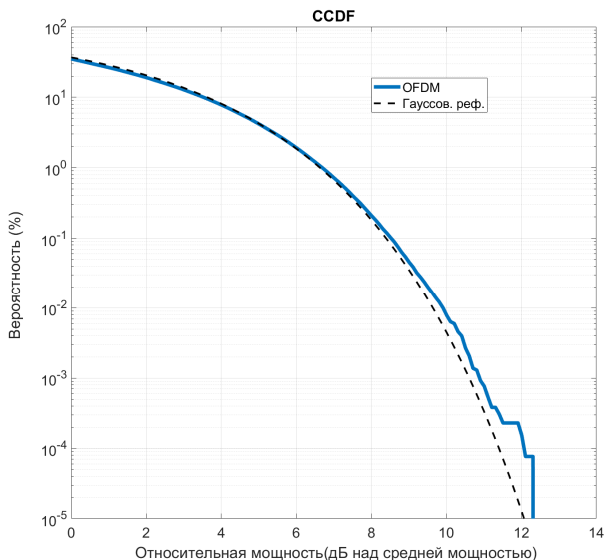


Рис. 1. Функция CCDF для OFDM

На практике это означает, что для сохранения линейности передающего тракта требуется значительное снижение средней мощности либо применение методов снижения пик-фактора, таких как PC-CFR, тон-резервация (TR), стохастические перестановки (SLM/PTS), мягкое клиппирование и других [4–7].

Метод снижения пик-фактора на основе компенсирующих импульсов

В методе, основанном на компенсирующих импульсах (PC-CFR), пороги для детектора превышения уровня вычисляются на основе оценки среднеквадратической амплитуды входного сигнала и сравнения с целевым уровнем. Например, при желаемом уровне пик-фактора $T = 7,5$ дБ целесообразно использовать 3–4 итерации с постепенным снижением пик-фактора:

$$PAPR = 10 \log_{10} \left(\frac{\max_n |s(n)|^2}{E[|s(n)|^2]} \right), T_i = \bar{A}^{(T+\Delta T)/20}. \quad (5)$$

Детектор пиков ищет локальные максимумы, превышающие T_i . Для каждого пика оценивается фаза φ и превышение амплитуды Δp . Далее формируется комплексная последовательность пиков $p[n] = \Delta p[n]e^{j\varphi}$, которая сворачивается с узкополосным фильтром $hi[n]$ и вычитается из исходного сигнала. На рис. 2 представлена структурная схема метода снижения пик-фактора на основе компенсирующих импульсов.

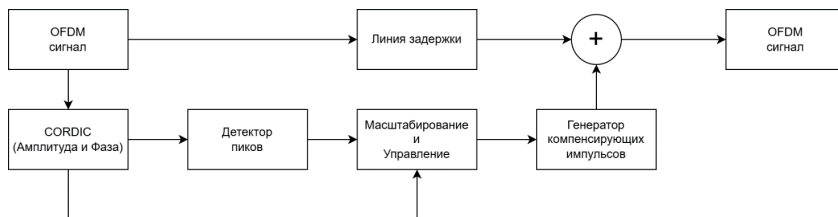


Рис. 2. Структурная схема метода снижения пик-фактора на основе компенсирующих импульсов

Итеративная обработка, в первую очередь, подавляет пики сигнала с высоким уровнем, затем на следующих итерациях компенсируются остаточные превышения целевого порога. Специальная форма АЧХ фильтра $hi[n]$ ограничивает спектр сигнала, минимизируя внеполосные искажения.

Синтез специализированного КИХ-фильтра может быть основан на sinc-функции с окном Чебышёва. Порядок N выбирается исходя из оптимального соотношения между селективностью и задержкой.

Оценка эффективности метода на основе компенсирующих импульсов

Для конфигурации OFDM сигнала со следующими параметрами: 256-QAM, $N_{fft} = 2048$, $N_{cp} = 1/8$, $BW \approx 56$ МГц с исходным пик-фактором ≈ 11 – 12 дБ. С тремя итерациями метод на основе компенсирующих импульсов позволяет достигать значений $\sim 7,5$ – $7,7$ дБ ($\Delta \approx 4$ дБ) при росте модуля вектора ошибки не более, чем на 2,2 %. На рис. 2 представлена функция CCDF OFDM при использовании метода на основе компенсирующих импульсов.

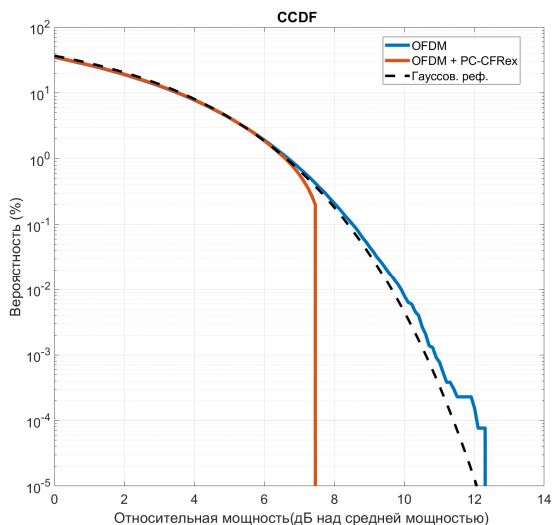


Рис. 3. Функция CCDF OFDM при использовании метода на основе компенсирующих импульсов

На практике возможно использование меньшего количества итераций для снижения пик-фактора до требуемого уровня. Настройка порогов пикового детектора позволяет минимизировать влияние метода на основе компенсирующих импульсов на спектральную маску сигнала.

Для аппаратной реализации возможно использование симметрии коэффициентов КИХ-фильтров для снижения вычислительных ресурсов.

Выводы

Высокий пик-фактор OFDM является следствием квазигауссового распределения отсчётов сигнала. Метод на основе компенсирующих импульсов, основанный на нескольких итерациях, обеспечивает существенное снижение пик-фактора сигнала при незначительном влиянии на модуль вектора ошибки EVM и несущественном искажении спектральной маски сигнала. Данный метод достаточно прост в реализации в сравнении с методами, основанными на изменении структуры сигнала.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Han S. H., Lee J. H.* An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission // *IEEE Wireless Communications*. 2005. Vol. 12, no. 2, pp. 56–65.
- [2] *Jiang T., Wu Y.* An overview: Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals // *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2008. Vol. 54, no. 2, pp. 257–268.
- [3] *Bäumel R. W., Fischer R. F. H., Huber J. B.* Reducing the PAPR of multicarrier modulation by selected mapping // *Electronics Letters*. 1996. Vol. 32, no. 22, pp. 2056–2057.
- [4] *Müller S. H., Huber J. B.* OFDM with reduced PAPR by optimum combination of partial transmit sequences // *Electronics Letters*. 1997. Vol. 33, no. 5, pp. 368–369.
- [5] *Ochiai H., Imai H.* On the distribution of the peak-to-average power ratio in OFDM signals // *IEEE Transactions on Communications*. 2001. Vol. 49, no. 2, pp. 282–289.
- [6] *Wunder G., Fischer R. F. H., Boche H., Litsyn S., No J.-S.* The PAPR problem in OFDM transmission: New directions for a long-standing problem // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013. Vol. 30, no. 6, pp. 130–144.
- [7] *Nee van R., Prasad R.* OFDM for Wireless Multimedia Communications. Artech House, 2000.

Кащенко Игорь Евгеньевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, radioseminar@радиосеминар.рф.

**Б. А. Косарев, М. Н. Туймитова, П. Ю. Шаньшин,
Г. Д. Калинин**

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ИЛИ РЕАКТОРЕ

В работе предложен принцип действия устройства для выявления феррорезонанса по изменению параметров виброускорения магнитопровода электрической машины. Параметры виброускорения контролируются при помощи акселерометра. Для исключения нагрева акселерометра токами Фуко его инерционная масса выполнена в виде пакета пластин, а корпус не содержит массивных металлических сборочных единиц. Рациональность исполнения инерционной массы в виде пакета пластин обоснована расчетом температуры акселерометра в условиях феррорезонанса.

Ключевые слова: феррорезонансный процесс, пьезоэлектрический акселерометр, магнитоэлектрические деформации, инерционная масса, пьезоэлектрическая пластина.

Введение

Аварийные режимы работы сети, возникающие при коротких замыканиях и вследствие неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики, могут послужить причиной образования и развития феррорезонансных процессов (ФП) с участием силовых трансформаторов и реакторов [1–3].

При возникновении феррорезонанса вибрация магнитопровода электрической машины и гармонические искажения напряжения и тока сети усиливаются мгновенно по сравнению с длительностью процесса нагрева электрооборудования выше допустимой температуры. Гармонические искажения напряжения и тока могут быть вызваны нелинейным характером нагрузки потребителя [4], поэтому рациональным способом выявления феррорезонансного процесса в силовых трансформаторах и реакторах представляется его детектирование через изменение величины вибрации магнитопровода.

Цель работы – создание устройства для выявления феррорезонансного процесса в силовых трансформаторах и реакторах через измерение величины вибрации магнитопровода.

Конструкция чувствительного элемента

При возникновении ФП вибрация насыщенного сердечника значительно усиливается, магнитный поток выходит за пределы магнитопровода, а его номинальная температура начинает повышаться. В этой связи чувствительный элемент устройства для регистрации ФП должен иметь рабочий диапазон температуры выше $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также не нагреваться вихревыми токами.

Для решения поставленных задач предлагается следующая конструкция чувствительного элемента устройства (рис. 1).

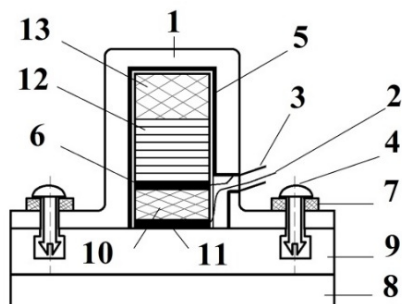


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента устройства [5]:
1 – крышка корпуса; 2 – сигнальная жила экранированного кабеля;
3 – экран экранированного кабеля; 4 – защелка с фиксатором;
5 – тонкопленочная металлизация; 6 – отрицательный электрод пьезоэлектрической пластины; 7 – шайба; 8 – магнитная платформа;
9 – основание корпуса; 10 – пьезоэлектрическая пластина; 11 – положительный электрод пьезоэлектрической пластины; 12 – инерционная масса; 13 – резиновая прокладка (упругий элемент)

Для уменьшения нагрева чувствительный элемент не содержит массивных металлических деталей (крышка, основание корпуса, защелки выполнены из термостойкого пластика). Исключением является инерционная масса 12, однако масса выполнена из набора листов электротехнической стали, что значительно снижает нагрев по сравнению с использованием типичной монолитной металлической инерционной массы в акселерометре. Магнитная платформа 8 выполнена из материала с высокой температурой Кюри.

Переходный процесс нагрева инерционной массы может быть рассчитан согласно следующим выражениям [6]:

$$T = T_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + T_{\text{у}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1)$$

$$\tau = \frac{c}{-k \cdot S + \alpha \cdot P_0}, \quad (2)$$

$$T_{\text{у}} = \frac{P_0 + k \cdot S \cdot T_0}{-k \cdot S + \alpha \cdot P_0}, \quad (3)$$

где $T_{\text{нач}}$ – начальная температура инерционной массы, $T_{\text{у}}$ – установившаяся температура инерционной массы, c – удельная теплоемкость материала инерционной массы, k – суммарный коэффициент теплоотдачи, S – площадь полной поверхности инерционной массы, α – температурный коэффициент удельного сопротивления, P_0 – мощность нагрева инерционной массы, T_0 – температура окружающего пространства.

Согласно формулам (1)–(3), для монолитного исполнения инерционной массы 12 ее температура увеличится на 60,2 °С, а для шихтованного исполнения массы изменение температуры пренебрежимо мало.

Выводы

По результатам исследований предложена конструкция устройства для детектирования феррорезонансного процесса при больших значениях напряженности магнитного поля и повышенной температуре. Принятые технические решения позволяют уменьшить нагрев чувствительного элемента устройства токами Фуко за счет исключения массивных металлических сборочных единиц и исполнения инерционной массы в виде пакета склеенных между собой листов металла с высоким удельным электрическим сопротивлением.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Косарев Б. А., Кривальцевич С. В., Кошук Г. А., Охотников А. А., Федоров В. К.* Феррорезонансные процессы в системе электроснабжения КВ-радиоцентра с распределенной генерацией // Актуальные вопросы энергетики. 2022. Т. 4, № 1. С. 32–38.
- [2] *Mork B. A.* Understanding and Dealing with Ferroresonance // Minnesota Power Systems Conference. 2006. P. 1–10.
- [3] *Valverde V., Mazon A. J., Zamora I., Buigues G.* Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2011. Vol. 1. P. 465–471.
- [4] *Боярская Н. П., Довгун В. П.* Гармонический анализ процессов в электрических сетях с нелинейными нагрузками // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 135–141.
- [5] Патент 2829713 Рос. Федерация, G01P 15/0907 (2024.08); G01P 1/006 (2024.08); G01P 1/023 (2024.08). Устройство для измерения виброускорений, возникающих в электроустановках / Косарев Б. А. № 2023127624 ; заявл. 27.10.2023 ; опубл. 05.11.2024.
- [6] Электрические и электронные аппараты : учебник и практикум для вузов / под ред. П. А. Курбатова. М. : ЮРАЙТ, 2016. 440 с.

Косарев Борис Андреевич, старший научный сотрудник Института радиопроизводства и физической электроники ОНЦ СО РАН, доцент Омского технического государственного университета, VorisK_88@mail.ru.

Туймитова Мадина Наильевна, техник Института радиопроизводства и физической электроники ОНЦ СО РАН, mtuymitova@mail.ru.

Шаньшин Павел Юрьевич, магистрант Омского технического государственного университета, radioseminar@радиосеминар.рф.

Калинин Григорий Дмитриевич, магистрант Омского технического государственного университета, grgrjklmn@gmail.com.

В. Е. Кучерук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПОТОЧНОСТИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАДИОФИЗИКИ

Доклад посвящен применению многопоточности в задачах обработки сигналов. Рассмотрены ключевые проблемы: гонки данных, взаимоблокировки и накладные расходы. Особое внимание уделено оптимизации для систем реального времени. Приведены практические рекомендации по разработке высокопроизводительных решений в радиофизике.

Ключевые слова: многопоточность, обработка сигналов, радиофизика, оптимизация, реальное время, C++/Qt.

Введение

Современные задачи радиофизики, связанные с обработкой, генерацией и модуляцией сигналов, предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам. Обработка сигналов в реальном времени, синтез сложных форм волн и цифровая модуляция требуют значительных вычислительных мощностей. Часто используемые однопоточные алгоритмы зачастую не позволяют эффективно использовать возможности современного многоядерного оборудования, что приводит к увеличению стоимости используемого оборудования. [4]

В связи с этим актуальной задачей становится оптимизация вычислений за счёт многопоточного программирования. Распараллеливание таких операций, как быстрое преобразование Фурье (БПФ), цифровая фильтрация, генерация и модуляция сигналов, позволяет значительно ускорить обработку данных и снизить нагрузку на процессор. Однако внедрение многопоточности сопряжено с рядом проблем: гонкой данных, необходимостью синхронизации потоков и эффективным распределением вычислительной нагрузки. Избежание данных проблем требует соответствующего подхода к планировке структуры разрабатываемых программ [1,2].

В данном докладе рассматриваются практические аспекты применения многопоточности в задачах радиофизики, включая реализацию параллельных алгоритмов на C++ в среде Qt Creator.

Применение многопоточности в задачах обработки, генерации и модуляции сигналов позволяет значительно ускорить вычисления, при этом может возникнуть ряд фундаментальных проблем.

1. Основные сложности.

1.1. Гонки данных.

Проблема: несколько потоков одновременно изменяют общие данные (например, буфер сигнала), вызывая ошибки.

Пример: искажение спектра при параллельной записи результатов БПФ.

Решение: использование мьютексов (`std::mutex`, `QMutex`) [3].

1.2. Взаимоблокировки.

Проблема: два или более потока бесконечно ожидают освобождения ресурсов, заблокированных друг другом.

Решение: фиксированный порядок блокировки мьютексов [3].

1.3. Неравномерная нагрузка на потоки.

Проблема: одни потоки завершают работу раньше других, что приводит к простоею ядер CPU.

Пример: при параллельной обработке сигнала разной длины (например, из-за неравномерного разделения данных).

Решение: динамическое распределение задач (пул потоков, `QThreadPool`) [3]; оптимальное распределение нагрузки на потоки на моменте планирования программы.

2. Специфичные проблемы обработки сигналов.

2.1. Задержки в реальном времени.

Проблема: обработка сигналов часто требует строгого соблюдения временных ограничений. Блокировки и синхронизация добавляют задержки.

Решение: раздельная обработка независимых блоков данных [3].

2.2. Накладные расходы.

Проблема: частое создание и уничтожение потоков (например, для каждого пакета данных) снижает производительность.

Решение: пул потоков (`QThreadPool` в `Qt`) [3]; асинхронные операции (`std::async`) [3].

3. Рекомендации.

- Используйте профилирование для выявления узких мест.
- Для простых операций применяйте атомарные переменные вместо мьютексов.

- По возможности упрощаете алгоритмы, объединяйте простые алгоритмы в более тяжёлые, чтобы равномерно распределять нагрузку на потоки.

- В задачах с высокой частотой дискретизации используйте конвейерную обработку данных.

Таким образом, многопоточность ускоряет обработку сигналов, но требует аккуратной реализации. Ключевые задачи здесь – избегать гонок данных, минимизировать блокировки и оптимизировать управление потоками.

Многопоточное программирование представляет собой мощный инструмент для оптимизации задач обработки, генерации и модуляции сигналов, позволяющий существенно повысить производительность вычислительных систем. Однако его эффективное применение сопряжено с рядом существенных проблем, требующих внимательного рассмотрения.

Выводы

Как показано в докладе, основные сложности при реализации многопоточных решений включают:

- проблему гонки данных при одновременном доступе к общим ресурсам;
- риск возникновения взаимоблокировок;
- дополнительные задержки при синхронизации;
- значительные расходы производительности при частом создании потоков.

Для радиофизических задач, особенно работающих в режиме реального времени, критически важными становятся:

- применение специализированных подходов (мьютексов);
- оптимизация управления потоками (использование пулов потоков);
- тщательное профилирование производительности;
- планировка распределения нагрузок на этапе проектирования программ.

Реализация этих методов позволяет достичь значительного ускорения обработки сигналов при сохранении стабильности работы системы. Особенно эффективными оказываются конвейерные архитектуры и разделение данных и их обработчиков на независимые блоки.

Таким образом, несмотря на существующие сложности, грамотное применение многопоточных технологий открывает новые возможности для создания высокопроизводительных систем обработки сигналов, отвечающих современным требованиям радиофизики.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Уильямс Э.* C++. Практика многопоточного программирования. СПб. : Питер, 2020. 640 с.

[2] *Филисов Д. А.* Стратегии оптимизации для высоконагруженных приложений: повышение общей производительности // Вестник науки. 2023. № 7 (64).

[3] Технологии и методы программирования : уч. пособие для вузов / И. Г. Гниденко [и др.]. М. : Изд-во Юрайт, 2022. 235 с.

[4] *Сассман А., Смелянский М., Дубей П.* Жемчужины высокопроизводительного параллелизма. Т. 2 : Многоядерные подходы к программированию. 2015. 592 с.

Кучерук Владислав Евгеньевич, студент Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского, radioseminar@радиосеминар.рф.

В. Е. Кучерук

РАДИОСЕТЬ МОНИТОРИНГА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ WSPRNET КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Описана радиолюбительская радиосеть мониторинга распространения слабых сигналов WSPRnet, изучен и описан алгоритм работы приём/передачи. Показано, что данная сеть может использоваться для изучения особенностей распространения КВ-радиоволн.

Ключевые слова: КВ-радиосвязь, ДКМВ, распространение радиоволн, радиосеть, WSPR, WSPRnet.

Современные технологии радиосвязи активно развиваются, включая внедрение сетевых принципов организации в коротковолновом (КВ) диапазоне. Однако построение радиосетей в КВ-диапазоне сопряжено с рядом сложностей, обусловленных нестабильностью ионосферы. Такие факторы, как неоднородности электронной концентрации, перемещающиеся ионосферные возмущения и другие существенно затрудняют прогнозирование условий распространения радиосигналов, особенно на многоскачковых трассах. [4]

Особую актуальность эти вопросы приобретают при организации радиосетей, где важно обеспечить связь с удаленными корреспондентами, работающими на малых мощностях. В таких случаях нерегулярные механизмы распространения радиоволн могут стать ключевым фактором успешной коммуникации. Однако проведение масштабных натуральных экспериментов для изучения этих процессов требует значительных ресурсов из-за проблем охвата больших территорий и длительных временных интервалов.

В связи с этим использование уже существующих радиолюбительских сетей, таких как WSPRNet, представляется перспективным подходом для изучения ионосферы и особенностей распространения слабых сигналов. В данном докладе будут рассмотрены возможности WSPRNet как инструмента для изучения ионосферы и анализа механизмов распространения слабых сигналов.

Сеть WSPRNet представляет собой глобальную систему мониторинга, основанную на участии добровольцев, преимущественно радиолюбителей. Участники сети создают точки приема, передачи

или комбинированные узлы, которые отправляют и принимают специальные зондирующие сигналы. Данные со всех узлов собираются на сервере и публикуются в открытом доступе на сайте wspnnet.org. WSPRNet функционирует как сеть маломощных радиомаяков, передающих элементарные сообщения, которые принимаются, декодируются и регистрируются участниками сети.

В качестве иллюстрации географии сети приведем все связи за 10 минут на 11:30 UTC от 19.03.2017 (см. рис. 1).

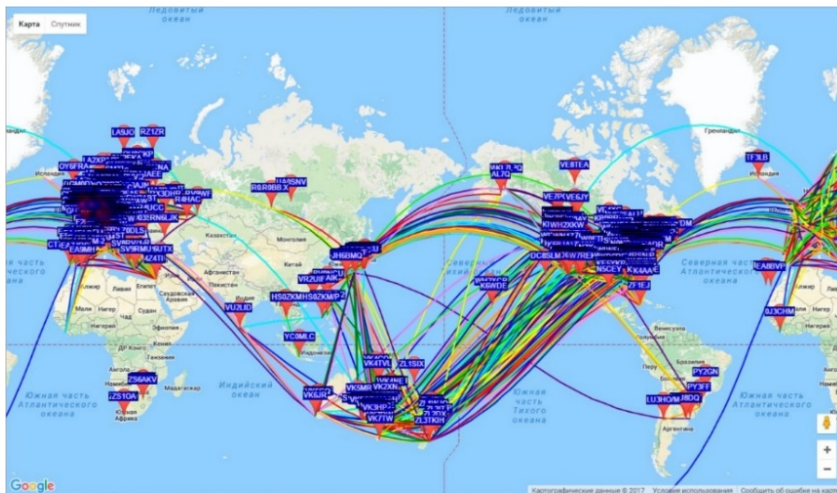


Рис. 1. Окно web-интерфейса, отображающее активных корреспондентов сети WSPRnet и все связи за 10 мин [1]

На приемной стороне осуществляется декодирование сигнала и оценка соотношения сигнал/шум. Таким образом, каждые 2 мин можно получать усредненные за 110,6 с оценки соотношения сигнал/шум с достаточно точной привязкой к местности корреспондентов радиосети. Результаты публикуются на сервере в виде рапортов, представленных рис. 2.

Timestamp	Call	MHz	SNR	Drift	Grid	Pwr	Reporter	RGrid	km	az
2017-03-19 10:08	JH6LAV	7.040110	-19	0	PM53fp	5	PY3FF	GF49ju	19595	22
2017-03-19 10:10	JA5NVN	7.040170	-20	0	PM74ec	5	PY3FF	GF49ju	19330	52
2017-03-19 10:04	PY3FF	7.040105	-18	0	GF49ju	5	JA5NVN	PM74ec	19330	311
2017-03-19 10:00	BH4BTZ	7.040085	-23	0	PM01	2	PY3FF	GF49ju	19253	279
2017-03-19 10:06	ZL3TKI	14.097105	-18	0	RE66hk	0.05	G4ZFFQ	IO90ir	19096	332
2017-03-19 09:54	ZL3TKI	14.097080	-20	0	RE66hk	0.05	GW1JFV	IO71lt	19081	350
2017-03-19 09:54	ZL3TKI	14.097103	-19	0	RE66hk	0.05	G6ZPV	IO81ol	19070	340
2017-03-19 10:24	CX8AT	14.097096	-24	0	GF15wc	5	JA5NVN	PM74ec	19049	268
2017-03-19 10:42	ZL3TKI	14.097082	-14	0	RE66hk	0.05	G3YSX	IO91wg	19000	330

Рис. 2. Фрагмент окна web-интерфейса, отображающий рапорты сети WSPRnet с сортировкой по дальности связи [1]

Работа сети охватывает широкий диапазон частот: от 136 кГц до 1296,5 МГц, с особым акцентом на КВ-диапазон. В каждом радиолюбительском диапазоне (160, 80, 60, 40, 30, 20, 17, 15, 12 и 10 м) используется фиксированный участок частот шириной 200 Гц. [2,3].

Работа сети строго синхронизирована по времени: каждые две минуты передающие узлы отправляют зондирующие сигналы длительностью 110,6 с. Эти сигналы содержат информацию о позывном корреспондента, его географических координатах (с точностью до 4 или 6 знаков) и заявленной мощности передатчика (от 1 мВт до 1 кВт). Всего в сигнале 162 символа, полезной информации, передаваемой в сигнале, 50 бит.

Сигнал формируется четырёх тоновой частотной модуляцией. Посредством свёртки 50 бит информации преобразуются в 162 бита сигнала. После данный сигнал накладывается на 162 бита синхросигнала. Таким образом, создаётся четырёх тоновый модулирующий сигнал в 162 символа. Длительность передачи каждого символа составляет 683 мс, что соответствует 1,46 бод скорости передачи. Нулевому тону соответствует частота 1500 Гц. Тоны разделены с шагом в 1,46 Гц. Далее данным модулирующим сигналом модулируется сигнал на частоте передачи [2].

Совокупность используемых методов позволяет актуальной версии ПО WSJT-X осуществлять прием сигналов при соотношении сигнал/шум до -33 дБ в полосе 2500 Гц. Следует отметить, что рапорты с подобными значениями регистрируются при работе на одно- и многоскачковых радиотрассах [1].

На приемной стороне сигналы декодируются, оценивается соотношение сигнал/шум, и формируются рапорты, которые публикуются на сервере. Это обеспечивает непрерывный поток данных, пригодных для анализа распространения радиоволн в реальном времени.

Также немалый интерес представляет сама возможность передачи сигналов на большие расстояния порядка тысяч километров с использованием мощностей менее 1 Вт [1].

Выводы

Таким образом, в результате проделанной работы было положено основание для дальнейших разработок и исследований этой области. В том числе разработок, связанных с использованием алгоритмов WSPR для передачи дальних сообщений на малых мощностях.

Сеть WSPRNet благодаря глобальному охвату и непрерывной работе позволяет получать достаточно точные и актуальные сведения о распространении радиоволн в различных условиях. Это особенно важно для исследований, связанных с нерегулярными механизмами распространения, которые играют ключевую роль при работе с малыми мощностями.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Антонов И. В., Пукса Д. О., Романов Ю. В. Радиосеть мониторинга распространения слабых сигналов WSPRnet и примеры работы в ней // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 3 (34). С. 7–18.

[2] Welcome to WSPR Live. URL: <https://wspr.live/#database-fields> (дата обращения: 06.03.2025).

[3] WSPRnet. URL: <http://wsprnet.org> (дата обращения: 06.03.2025).

[4] Минин В. А. Проблемы использования коротковолнового диапазона при построении радиосетей // Вестник Удмуртского университета. 2007. № 2.

Кучерук Владислав Евгеньевич, студент Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского, radioseminar@радиосеминар.рф.

В.-А. В. Любчик

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧВС

В докладе представлен краткий обзор программного комплекса «Радиосеть». Также приведены результаты проведенного вычислительного эксперимента по прогнозированию возможности КВ-радиосвязи в различных гео-, гелиофизических условиях с использованием ЧВС.

Ключевые слова: частотно-временные сигналы, коротковолновая радиосвязь, число Вольфа, отношение сигнал/шум, моделирование.

Введение

Использование частотно-временных матриц (частотно-временных сигналов – ЧВС) является одним из современных способов модуляции радиоволн, применяемых в системах радиосвязи. Данный способ модуляции позволяет повышать надежность радиосвязи в достаточно сложной помеховой обстановке [1].

На практике возможно использование различных ЧВС, обладающих, с одной стороны, различной помехоустойчивостью, а с другой – обеспечивающих информационный обмен с разной скоростью. Это позволяет применять различные комбинации ЧВС-сигналов в системах адаптивной радиосвязи [2].

Выбор ЧВС-сигналов для реализации данного вида модуляции в модуляторах/демодуляторах связанных радиосистем должен быть научно обоснован, для чего можно применять современные методы прогнозирования характеристик радиоканалов, основанных на компьютерных моделях [3].

Целью работы была постановка и проведение вычислительного эксперимента по прогнозированию возможности ведения коротковолновой радиосвязи в различных гео-, гелиофизических условиях с использованием частотно-временных сигналов.

Задачи необходимые для достижения заданной цели:

1. Определить критерии и условия для проведения вычислительного эксперимента.
2. Постановка вычислительного эксперимента.
3. Проведение вычислительного эксперимента.

4. Анализ полученных результатов на целесообразность использования предложенных сигналов при различных условиях в канале связи.

Таким образом объектом исследования стал коротковолновый радиоканал, в котором передаются ЧВС; предметом исследования – прогнозирование возможности обмена информацией в коротковолновом радиоканале в различных гео-, гелиофизических условиях [4].

Результаты проведенной работы представлены в данном докладе.

Критерии и условия для проведения вычислительного эксперимента

Критерием для принятия решения о возможности ведения радиосвязи было превышение расчетным значением отношения сигнал/шум (ОСШ) порогового, определенного в ходе выполненного ранее теоретического исследования.

В ходе предыдущих исследований были получены характеристики ЧВС, представленные в табл.1.

Таблица 1

Расчетные характеристики предложенных ЧВС

<i>Вид ЧВС</i>	<i>Время передачи 1 чипа, мкс</i>	<i>Инф-я скорость передачи, бит/с</i>	<i>Полоса 1 частотного элемента, Гц</i>	<i>Минимально допустимый ОСШ, дБ</i>
ЧВС-7	437,5	16000	2285	12
ЧВС-11	687,5	13090,9	1455	13
ЧВС-13	812,5	12307,7	1231	14
ЧВС-17	1062,5	11294,1	941	14
ЧВС-19	1181,5	10156,58	846	14

Расчетные значения полос частотных элементов являются входными параметрами для проведения дальнейших расчетов. Минимально допустимые значения ОСШ далее принимались в качестве пороговых, используемых при анализе полученных в вычислительном эксперименте данных.

Постановка задачи на проведение вычислительного эксперимента по прогнозированию параметров работы системы коротковолновой связи

Для проведения вычислительного эксперимента АО «ОНИИП» предоставило возможность использования лицензионной версии программного комплекса «Радиосеть»

ПК «Радиосеть» позволяет осуществлять работу с СУБД PostgreSQL и управляет расчетом различных характеристик линии связи с выводом результатов расчета на экран ПЭВМ. Компоненты программы через внешний интерфейс позволяют оператору осуществлять:

- запись, чтение, удаление и редактирование исходных параметров корреспондентов узлов связи, антенн, линий связи и других характеристик в базе данных;
- запись, чтение, редактирование и удаление результатов расчета траекторных и энергетических характеристик линии связи в базе данных;
- представлять результаты расчета в табличном виде.

Отображение базы данных узлов связи, корреспондентов и районов представлены на рис. 1.

Для настройки параметров расчета, таких как индекс солнечной активности, зависимость ОРЧ от МПЧ, число скачков на линии, список рабочих частот и т.д., используется окно основных настроек расчета, приведенное на рис. 2.

Программа «Радиост» версия 9.0

База данных узлов связи, корреспондентов и районов Основные параметры расчета Результаты расчета Карта мира

0% Запустить расчет

Добавить узел связи Удалить узел связи Удалить набор параметров узла связи

Номер	Название узла связи	Широта	Долгота	Антенна	Тип поверхности под антенной	Азимут, град.	Высота ант. м	Диаметр ант. м	Мощность ант. кВт	Полос. ант. МГц	Доп. потери дБ	Потери Фидера дБ	Потери в каб. дБ	Уровень приема дБм	Тип поверхности объекта	Тип заземл. обь.
1	Москва-1	55°45'0"С.Ш.	37°37'0"В.Д.	Логопериодическая антенна ЛПА (2-30 МГц)	Автоматический выбор	270	0	0	1	320	2	1	1	Приемо-передатчик	0	Дилект
9	Москва-2	55°45'0"С.Ш.	37°37'0"В.Д.	Логопериодическая антенна ЛПА (2-30 МГц)	Автоматический выбор	270	0	0	5	320	2	1	1	Приемо-передатчик	0	Дилект
11	Москва-3	55°45'0"С.Ш.	37°37'0"В.Д.	Логопериодическая антенна ЛПА (2-30 МГц)	Автоматический выбор	270	0	0	20	320	2	1	1	Приемо-передатчик	0	Дилект

Добавить корреспондента Удалить корреспондента Удалить набор параметров корреспондента

Номер	Название корреспондента	Широта	Долгота	Антенна	Тип поверхности под антенной	Азимут, град.	Высота ант. м	Диаметр ант. м	Мощность ант. кВт	Полос. ант. МГц	Доп. потери дБ	Потери Фидера дБ	Потери в каб. дБ	Уровень приема дБм	Тип поверхности объекта
1	Омск	55°0'0"С.Ш.	73°24'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.005	0.84	2	1.5	0	0	Диэлектрик
2	Омск-2	55°0'0"С.Ш.	73°24'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.01	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик
3	Омск-3	55°0'0"С.Ш.	73°24'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.025	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик
4	Омск-4	55°0'0"С.Ш.	73°24'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.05	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик
5	Калининград	54°43'0"С.Ш.	20°30'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.005	0.84	2	1.5	0	0	Диэлектрик
6	Владивосток-2	43°10'0"С.Ш.	131°56'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.05	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик
7	Владивосток-3	43°10'0"С.Ш.	131°56'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.01	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик
8	Владивосток-4	43°10'0"С.Ш.	131°56'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.025	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик
9	Калининград-2	54°43'0"С.Ш.	20°30'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.05	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик
10	Калининград-3	54°43'0"С.Ш.	20°30'0"В.Д.	Штырь (2-30 МГц)	Автоматический выбор	0	2.5	0	0.025	2.28	2	1.5	0	0	Диэлектрик

Добавить район Удалить район

Номер района	Название	Широта левого верхнего угла района	Долгота левого верхнего угла района	Широта правого нижнего угла района	Долгота правого нижнего угла района	Номер	Название	СКС	Направление	Категория трассности	Омск, от. дБм	Полос. ант. МГц	
1	Район №1	30°0'0"С.Ш.	60°0'0"В.Д.	10°0'0"С.Ш.	30°0'0"В.Д.	1	Радиogramма №1	ОФDM-64	2	Корреспондент №1	1	32	3
2	Район №2	10°0'0"С.Ш.	50°0'0"В.Д.	20°0'0"С.Ш.	80°0'0"В.Д.	2	Радиogramма №2	ОФDM-64	1	Корреспондент №1	3	32	3
3	Район №3	57°0'0"С.Ш.	37°0'0"В.Д.	53°0'0"С.Ш.	74°0'0"В.Д.	3	Радиogramма №3	ОФDM-64	0.5	Корреспондент №1	7	32	3
4	Радиogramма №4					4	Радиogramма №4	ОФDM-64	2	Корреспондент №2	5	32	3
5	Радиogramма №5					5	Радиogramма №5	ОФDM-64	0.5	Корреспондент №2	2	32	3
6	Радиogramма чист					6	Радиogramма чист	ОФDM-64	1	Омск	1	12	320
7	Радиogramма чист					7	Радиogramма чист	ОФDM-64	1	Омск	1	13	320
8	Радиogramма чист11-19					8	Радиogramма чист11-19	ОФDM-64	1	Омск	1	14	320

Рис. 1. База данных узлов связи, корреспондентов и районов

Программа «Радиост» версия 9.0

База данных узлов связи, корреспондентов и районов Основные параметры расчета Результаты расчета Карта мира

0% Запустить расчет

Добавить список Удалить список

Общий список рабочих частот (МГц)

Время неэквивалентное ОНТ в часик

Время начала сеанса связи (ч:мм)

Коэффициент ОНТ в долях от МПЧ

Длина канала связи (дБ)

Скорость распространения ОНТ в часик

Период с летнего времени на зимнее в часик

Расчет спорадического шума

Учитывать число скачков автоматическим

Число скачков на линии связи

Расчет индустриальных помех

Открытая местность

Расчет собственных шумов приемника

Собственные шумы приемника (дБ)

Расчет таежных помех

Расчет пугровых помех

Учет стационарных помех

Стационарные помехи (дБ)

Стандартное отклонение стационарных помех (дБ)

Таблица значений стационарных помех и их стандартных отклонений

Размер ячейки на которые разбит район (км)

Таблица списка рабочих частот

№	Название списка
1	150
2	1521
3	1536

апрель, 2025

дн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
14	11	1	2	3	4	5
15	7	8	9	10	11	12
16	14	15	16	17	18	19
17	21	22	23	24	25	26
18	28	29	30	1	2	3
19	5	6	7	8	9	10

Символьная активность

из модели ионосферы IRI

Задать вручную Rz

Задать вручную IG

Значение Rz = (IG) [150.00]

Рис. 2. Окно настроек основных параметров расчета

Также с помощью данного ПО можно решать задачи планирования и эксплуатации радиолиний протяженностью от 30 до 10000 км в диапазоне частот 2,0–30,0 МГц. Доступны следующие функции:

- Расчет траекторных и энергетических характеристик линий связи (рек МСЭ 533).
- Определение модовой и лучевой структуры поля в точке приема.
- Определение всех возможных траекторий распространения радиоволн, отраженных как от регулярных слоев, так и от спорадического слоя Es.
- Расчет энергетических характеристик: суммарное напряжение и отношение сигнал/шум приходящих сигналов.

Вывод результатов программы представляет собой таблицу, изображенную на рис. 3.

№	Радиопрограмма	Категория срочности	СКС	Отнош. с/ш	Объем, Мб	Время передачи	Узел связи	Направление	Антенна на передачу	Антенна на прием	МГц	ОРЧ	Частота, МГц	Уровень сигнала, дБ	Отнош. сигнал/шум, дБ	Протяж. км	Протокт км
2	Радиопрограмма мес7	1	OFDM-64	12.00	1.00	0.00	Москва-3	Омск	Логопериодическая антенна ЛПА	Штырь	12.76	10.21	10.20	50.19	51.67	2236.61	2236.61
3	Радиопрограмма мес8	1	OFDM-64	13.00	1.00	0.00	Москва-3	Омск	Логопериодическая антенна ЛПА	Штырь	12.76	10.21	10.20	50.19	51.67	2236.61	2236.61
4	Радиопрограмма мес1-19	1	OFDM-64	14.00	1.00	0.00	Москва-3	Омск	Логопериодическая антенна ЛПА	Штырь	12.76	10.21	10.20	50.19	51.67	2236.61	2236.61

№	Узел связи	Антенна узла связи	Направление	Антенна на прием	МГц	ОРЧ	Частота, МГц	Уровень сигнала, дБ	Отнош. сигнал/шум, дБ	Протяженность, км	Азимут на прием, град
1	Москва-3	Логопериодическая антенна ЛПА	Омск	Штырь	12.76	10.21	10.20	50.19	51.67	2236.61	77.17
2	Москва-2	Логопериодическая антенна ЛПА	Омск	Штырь	12.76	10.21	10.20	44.17	45.65	2236.61	77.17
3	Москва	Логопериодическая антенна ЛПА	Омск	Штырь	12.76	10.21	10.20	37.18	38.66	2236.61	77.17
1	Москва-3	Логопериодическая антенна ЛПА	Калининград	Штырь	9.44	7.55	7.60	66.02	55.06	1088.52	271.07
2	Москва-2	Логопериодическая антенна ЛПА	Калининград	Штырь	9.44	7.55	7.60	60.00	49.04	1088.52	271.07
3	Москва	Логопериодическая антенна ЛПА	Калининград	Штырь	9.44	7.55	7.60	53.01	42.05	1088.52	271.07
1	Москва-3	Логопериодическая антенна ЛПА	Владивосток	Штырь	17.45	13.96	14.00	20.63	27.47	6412.50	59.39
2	Москва-2	Логопериодическая антенна ЛПА	Владивосток	Штырь	17.45	13.96	14.00	14.61	21.45	6412.50	59.39
3	Москва	Логопериодическая антенна ЛПА	Владивосток	Штырь	17.45	13.96	14.00	7.62	14.46	6412.50	59.39

Рис. 3. Окно вывода результатов расчета

Для проведения вычислительного эксперимента были взяты три трассы: Москва-Омск (2236 км), Москва-Владивосток (6412 км), Москва-Калининград (1088 км).

В программной среде были заданы характеристики узлов связи и корреспондентов:

- мощности узла связи: 100 Вт, 1 кВт, 5 кВт.
- мощности корреспондентов: 1 Вт, 10 Вт, 25 Вт, 50 Вт.

- антенна узла связи: логопериодическая (ЛПА).
- антенна корреспондента: штыревая, высотой 2,5 м.
- полосы пропускания соответствуют значениям полос 1 частотного элемента ЧВС из табл. 1.

Для моделирования реального канала связи при постановке вычислительного эксперимента необходимо учитывать индекс солнечной активности и время суток, поэтому при расчетах были взяты разные моменты времени и три разных числа Вольфа.

Для определения рабочих диапазонов, совместно с вышеуказанными характеристиками, также учитывалось значение ОРЧ.

Используя предложенное ПО, необходимо провести моделирование работы систем связи между каждым узлом и корреспондентом в различных состояниях среды распространения радиоволн с целью оценить по полученным уровням ОСШ возможность проведения коротковолновой радиосвязи с использованием рассчитанных ранее ЧВС.

Состояние среды распространения определяется следующими входными параметрами модели радиоканала (дата сеанса связи в рамках данного эксперимента не внесет изменений в расчеты, т.к. индекс солнечной активно задается вручную):

- значение индекса солнечной активности – 50,100,150;
- время сеансов связи: 00:30, 10:30, 14:30, 19:30;
- координаты передатчика: 55°45′ С.Ш., 37°37′ В.Д.;
- координаты корреспондентов: Омск – 55°00′ С.Ш., 73°24′ В.Д., Калининград – 54°43′ С.Ш., 20°30′ В.Д., Владивосток – 43°10′ С.Ш., 131°56′ В.Д.

Дальности связи такие, что основной волной, которая донесет информацию, будет пространственная или ионосферная.

Проведение вычислительного эксперимента по прогнозированию параметров работы системы коротковолновой связи

Предоставленное ПО производит автоматический расчет значений ОРЧ и МПЧ, поэтому частота, на которой проводится сеанс связи, будет приближена к значению ОРЧ (80 % от МПЧ) и будет изменяться для каждого рассматриваемого случая.

Значения ОРЧ для заданного времени сеансов связи, трассы и числа Вольфа, полученные в программе, представлены в табл. 2–4.

Таблица 2

Значения ОРЧ для индекса солнечной активности 50, МГц

<i>Трасса</i>	<i>Время</i>			
	00:30	10:30	14:30	19:30
Москва-Омск	7,51	14,57	14,60	12,66
Москва-Калининград	5,69	10,33	10,70	8,85
Москва-Владивосток	9,59	19,13	18,57	12,43

Таблица 3

Значения ОРЧ для индекса солнечной активности 100, МГц

<i>Трасса</i>	<i>Время</i>			
	00:30	10:30	14:30	19:30
Москва-Омск	9,26	17,38	17,79	15,13
Москва-Калининград	6,86	11,03	11,43	10,55
Москва-Владивосток	12,28	23,22	21,99	15,17

Таблица 4

Значения ОРЧ для индекса солнечной активности 150, МГц

<i>Трасса</i>	<i>Время</i>			
	00:30	10:30	14:30	19:30
Москва-Омск	10,21	18,75	19,34	16,54
Москва-Калининград	7,55	11,68	12,10	11,60
Москва-Владивосток	13,96	25,66	23,68	16,82

Для расчета ОСШ при разных характеристиках в узел связи были помещены 3 передатчика разной мощности. Мощность передатчика для каждого узла представлена в табл. 5.

Характеристики узлов связи

<i>Название узла связи</i>	<i>Мощность передачи, кВт</i>	<i>Антенна</i>
Москва (М)	0,1	ЛПА
Москва-2 (М-2)	1	ЛПА
Москва-3 (М-3)	5	ЛПА

Названия корреспондентов соответствуют названию городов с нумерацией, аналогичной для узлов связи, где каждому номеру соответствует своя мощность приемника: 1–5 Вт, 2–10 Вт, 3–25 Вт, 4–50 Вт. Характеристики антенны не меняются.

Результаты расчета для заданных трасс и их анализ

При моделировании тип поверхности под антенной приемника и передатчика задается автоматически. В данной работе рассматривается односторонняя связь, поэтому в проведении расчетов в обратном направлении нет необходимости. Для удобства значение приближенные к 0 или имеющие отрицательные значения заменены прочерками. Результаты моделирования сеансов связи для трасс при разных типах подстилающей поверхности представлен в табл. 6–8.

Таблица 6

Значения ОСШ на трассах радиосвязи при разных числах Вольфа для передатчика М, дБ

ЧВС	Время											
	00:30			10:30			14:30			19:30		
	Число Вольфа											
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
<i>Москва-Омск</i>												
ЧВС-7	21,80	23,50	24,32	18,91	21,81	22,86	16,86	21,81	23,59	23,00	26,06	27,12
ЧВС-11	23,76	25,47	26,29	20,88	23,78	24,82	18,83	23,77	25,55	24,96	28,02	29,09
ЧВС-13	24,48	26,18	27,00	21,59	24,49	25,54	19,55	24,49	17,52	25,68	28,74	29,80
ЧВС-17	25,65	27,35	28,17	22,76	25,66	26,71	20,71	25,66	27,43	26,85	29,91	30,97
ЧВС-19	26,13	27,84	28,66	23,25	26,15	27,19	21,20	26,15	27,92	27,33	30,39	31,46
<i>Москва-Калининград</i>												
ЧВС-7	29,50	29,59	27,71	29,55	27,20	25,52	28,32	25,46	24,24	29,22	26,77	25,15
ЧВС-11	31,47	31,55	29,68	31,52	29,17	27,49	30,28	27,42	26,21	31,19	28,74	27,12
ЧВС-13	32,18	32,27	30,39	32,23	29,88	28,20	31,00	28,14	26,58	31,91	29,45	27,83
ЧВС-17	33,35	33,44	31,56	33,40	31,05	29,37	32,17	29,30	28,09	33,07	30,62	29,00
ЧВС-19	33,84	33,92	32,05	33,89	31,54	29,86	32,65	29,79	28,58	33,56	31,11	29,49
<i>Москва-Владивосток</i>												
ЧВС-7	-	-	-	-	-	3,03	1,09	3,03	2,94	3,44	4,34	3,03
ЧВС-11	-	1,84	2,09	-	2,66	5,00	3,06	5,00	4,90	5,40	6,31	4,99
ЧВС-13	1,59	2,56	2,80	-	3,37	5,71	3,77	5,71	5,62	6,12	7,02	5,71
ЧВС-17	2,75	3,72	3,97	-	4,54	6,88	4,94	6,88	6,79	7,29	8,19	6,87
ЧВС-19	3,24	4,21	4,46	-	5,03	7,37	5,43	7,37	7,27	7,78	8,68	7,36

Таблица 7

Значения ОСШ на трассах радиосвязи при разных числах Вольфа для передатчика М-2, дБ

ЧВС	Время											
	00:30			10:30			14:30			19:30		
	Число Вольфа											
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
<i>Москва-Омск</i>												
ЧВС-7	31,80	33,50	34,32	28,91	31,81	32,86	26,86	31,81	33,59	33,00	36,06	37,12
ЧВС-11	33,76	35,47	36,29	30,88	33,78	34,82	28,83	33,77	35,55	34,96	38,02	39,09
ЧВС-13	34,48	36,18	37,00	31,59	34,49	35,54	29,55	34,49	27,52	35,68	38,74	39,80
ЧВС-17	35,65	37,35	38,17	32,76	35,66	36,71	30,71	35,66	37,43	36,85	39,91	40,97
ЧВС-19	36,13	37,84	38,66	33,25	36,15	37,19	31,20	36,15	37,92	37,33	40,39	41,46
<i>Москва-Калининград</i>												
ЧВС-7	39,50	39,59	37,71	39,55	37,20	35,52	38,32	35,46	34,24	39,22	36,77	35,15
ЧВС-11	41,47	41,55	39,68	41,52	39,17	37,49	40,28	37,42	36,21	41,19	38,74	37,12
ЧВС-13	42,18	42,27	40,39	42,23	39,88	38,20	41,00	38,14	36,58	41,91	39,45	37,83
ЧВС-17	43,35	43,44	41,56	43,40	41,05	39,37	42,17	39,30	38,09	43,07	40,62	39,00
ЧВС-19	43,84	43,92	42,05	43,89	41,54	39,86	42,65	39,79	38,58	43,56	41,11	39,49
<i>Москва-Владивосток</i>												
ЧВС-7	8,91	9,88	10,12	5,89	10,69	13,03	11,09	13,03	12,94	13,44	14,34	13,03
ЧВС-11	10,87	11,84	12,09	7,86	12,66	15,00	13,06	15,00	14,90	15,40	16,31	14,99
ЧВС-13	11,59	12,56	12,80	8,57	13,37	15,71	13,77	15,71	15,62	16,12	17,02	15,71
ЧВС-17	12,75	13,72	13,97	9,74	14,54	16,88	14,94	16,88	16,79	17,29	18,19	16,87
ЧВС-19	13,24	14,21	14,46	10,23	15,03	17,37	15,43	17,37	17,27	17,78	18,68	17,36

Таблица 8

Значения ОСШ на трассах радиосвязи при разных числах Вольфа для передатчика М-3, дБ

ЧВС	Время											
	00:30			10:30			14:30			19:30		
	Число Вольфа											
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
<i>Москва-Омск</i>												
ЧВС-7	38,79	40,49	41,31	35,90	38,80	39,85	33,85	38,80	40,58	39,99	43,05	44,11
ЧВС-11	40,75	42,46	43,28	37,87	40,77	41,81	35,82	40,76	42,54	41,95	45,01	46,08
ЧВС-13	41,47	43,17	43,99	38,58	41,48	42,53	36,53	41,48	43,26	42,67	45,73	46,79
ЧВС-17	42,64	44,34	45,16	39,75	42,65	43,69	37,70	42,65	44,42	43,84	46,90	47,96
ЧВС-19	43,12	44,83	45,65	40,24	43,14	44,18	38,19	43,14	44,91	44,32	47,38	48,45
<i>Москва-Калининград</i>												
ЧВС-7	46,49	46,58	44,70	46,54	44,19	42,51	45,31	42,45	41,23	46,21	43,76	42,14
ЧВС-11	48,46	48,54	46,67	48,51	46,16	44,48	47,27	44,41	43,20	48,18	45,73	44,11
ЧВС-13	49,17	49,26	47,38	49,22	46,87	45,19	47,99	45,13	43,91	48,89	46,44	44,82
ЧВС-17	50,34	50,43	48,55	50,39	48,04	46,36	49,16	46,29	45,08	50,06	47,61	45,99
ЧВС-19	50,83	50,91	49,04	50,88	48,53	46,85	49,64	46,78	45,57	50,55	48,10	46,48
<i>Москва-Владивосток</i>												
ЧВС-7	15,90	16,87	17,11	12,88	17,68	20,02	18,08	20,02	19,93	20,43	21,33	20,02
ЧВС-11	17,86	18,83	19,08	14,85	19,65	21,99	20,05	21,99	21,89	22,39	23,30	21,98
ЧВС-13	18,58	19,55	19,79	15,56	20,36	22,70	20,76	22,70	22,61	23,11	24,01	22,70
ЧВС-17	19,74	20,71	20,96	16,73	21,53	23,87	21,93	23,87	23,78	24,28	25,18	23,86
ЧВС-19	20,23	21,20	21,45	17,22	22,02	24,36	22,42	24,36	24,26	24,77	25,67	24,35

В ходе проведенного вычислительного эксперимента в качестве полосы приема для корреспондента принималось значение полосы 1 частотного элемента из табл. 1 для соответствующего ЧВС. Такой подход позволяет оценить уровень ОСШ для каждого конкретного ЧВС в один и тот же момент времени при одинаковых условиях среды и местоположении приемника.

Выяснилось, что результирующее ОСШ для корреспондентов разной мощности для одного ЧВС при проведении расчетов в программе одинаковое, поэтому данные в таблице приводятся только для одного корреспондента.

Основываясь на результатах, полученных в рамках вычислительного эксперимента, можно оценить влияние индекса солнечной активности и времени суток на качество связи.

При индексе солнечной активности, равном 50, наблюдается снижение ОСШ, причем увеличение индекса на 50 каждый раз способствует увеличению ОСШ на 0,2–1,2 дБ. Такой разброс значений обусловлен большой выборкой эксперимента, вызванной разным значением мощностей и временем суток.

Передачик М-3 с мощностью 5 кВт в направлениях Москва-Омск и Москва-Калининград гарантировал передачу данных с помощью всех выбранных ЧВС при ОСШ не ниже 35дБ независимо от других факторов. Для трассы Москва-Владивосток результаты оказались хуже, но ни в одном из случаев не опустились ниже пороговых значений для своих ЧВС. Однако для ЧВС-7 значение ОСШ было близко к пороговому в 1 из 12 случаев.

Передачик М-2 с мощностью 1 кВт показал меньшую эффективность, что обусловлено его мощностью, но на трассе Москва-Омск значения ОСШ не опускались 26 дБ, на трассе Москва-Калининград значения ОСШ были не ниже 34 дБ, что обеспечивает использование всех выбранных ЧВС. На трассе Москва-Владивосток для каждого из ЧВС число благоприятных значений ОСШ следующее:

- ЧВС-7 – 6 из 12, преимущественно в 19:30.
- ЧВС-11 – 7 из 12, преимущественно в 14:30 и 19:30.
- ЧВС-13 – 6 из 12, преимущественно в 19:30.
- ЧВС-17 – 8 из 12, преимущественно в 10:30, 14:30 и 19:30.

- ЧВС-19 – 10 из 12, исключение составило время 00:30 и 10:30 при индексе солнечной активности в 50.

Для передатчика М с мощностью 100 Вт передача на трассе Москва-Владивосток оказалась невозможной, однако для направлений Москва-Омск и Москва-Калининград ограничений нет.

Заключение

При проведении вычислений на разных трассах, удалось определить уровни ОСШ в разных природных условиях. Чем короче трасса, тем лучше результат (кроме зоны молчания), исследуемые системы связи позволяют осуществлять сеансы связи на расстоянии свыше 2000 км, при переходе на трассу длиной выше 4000 км трасса становится много-скачковой, что снижает качество связи и накладывает ограничения на передатчики малой мощности.

Также были получены значения МПЧ и ОРЧ, знание которых позволяет использовать адаптацию по частоте излучения в условиях изменчивости окружающей среды и суточной динамики.

Поскольку радиостанции мощностью 5 и 1 кВт обеспечили достаточный уровень ОСШ, выбор ЧВС зависит от желаемой скорости передачи. Для радиостанции мощностью 1 кВт следует проводить адаптацию по используемым ЧВС и частоте. Наилучшая надежность оказалась у ЧВС 19, когда уровень ОСШ опустился ниже минимального только в 2 из 12 случаев при низком индексе солнечной активности. Остальные ЧВС следует использовать при необходимости более быстрой передачи данных, опираясь на состояние среды. ЧВС-7 обладают наибольшей скоростью, но на больших расстояниях работать с ними можно только в вечернее время. ЧВС-11, ЧВС-13 и ЧВС-17 мало отличаются между собой и выбор рабочего сигнала будет осуществляться в зависимости от условий среды в момент проведения вычислительного эксперимента.

Если мощность радиостанции составляет 100 Вт, то использовать указанные ЧВС на трассе Москва-Владивосток не представляется возможным. Для направлений Москва-Омск и Москва-Калининград ограничений нет.

По итогам проведенного эксперимента самые благоприятные условия передачи были при высоком индексе солнечной активности и временем сеанса 19:30. Самые сложные условия для осуществления сеанса связи возникают при индексе 50 и времени между 00:30 и 10:30.

Для каждой трассы формируются свои условия, поэтому при изменении каких-либо характеристик, местоположения узлов связи или корреспондентов, необходимо проводить новые вычислительные эксперименты, т.к. результат для трассы свыше 4000 км будет иметь новые ограничения и значения ОСШ.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Иванов В. И., Рябова Н. В., Шумаев В. В.* Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона. 1998. 204 с.

[2] Рекомендация МСЭ-R P.372-17.

[3] *Тихомиров А. В., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю., Михайлов В. Ю.* Прогнозирование параметров распространения радиоволн в условиях городской застройки при использовании низко расположенных антенн // Труды МАИ. Вып. № 97. 2017.

[4] *Hill D. A.* HF ground wave propagation over forested and built. NTIA report, 1982.

Любчик Влада-Александра Владиславовна, сотрудник Омского научно-исследовательского института приборостроения, инженер Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, студент Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского, radioseminar@радиосеминар.рф.

А. Б. Масленников, П. С. Кривальцевич

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОХОДНОГО РЁБЕРНОГО ИЗОЛЯТОРА

В данной работе рассматривается метод расчёта общего сопротивления изолятора рёберного типа. Такие изоляторы широко используются в электротехнике и энергетике для предотвращения утечек тока и повышения надежности работы оборудования. Целью исследования является разделение общего сопротивления на две составляющие: сопротивление колец и сопротивление рёбер.

Ключевые слова: изолятор, рёберный тип, сопротивление, электротехника, расчёт, кольца, рёбра, интегрирование, электрические характеристики, материалы.

Введение

Существует множество типов изоляторов: радиационно стойкие керамические изоляторы [1], проходные изоляторы для высоковольтных вводов трансформаторов [2], изоляторы на напряжение 3300 В для взрывозащищенного электрооборудования [3], проходные изоляторы рёберного типа. Такое разнообразие подчеркивает вариативность решений в области изоляции и защиты электрических систем.

Изоляторы рёберного типа используются в электротехнике, обеспечивая защиту от утечек тока и повышая надежность работы оборудования, а также на кораблях, где их встраивают в стены для предотвращения коротких замыканий и обеспечения безопасной работы электрических систем.

В данной работе рассматриваются методы расчёта общего сопротивления таких изоляторов, разделяя вычисления на две основные составляющие: сопротивление колец и сопротивление рёбер, что позволяет более глубоко понять их электрические характеристики в различных условиях эксплуатации.

В вычислениях мы не учитываем наклон рёбер и считаем их перпендикулярными основному диску изолятора. Это сделано для упрощения расчётов, пренебрежение наклона рёбер не сильно влияет на конечный результат вычислений.

Теоретические основы

Для расчёта сопротивления изолятора рёберного типа нужно узнать площадь поверхности изолятора. Чтобы упростить, разобьём общее поверхностное сопротивление на две части: сопротивление боковой поверхности рёбер и сопротивление поверхности колец. На рис. 1 представлена 3D-модель рёберного изолятора.

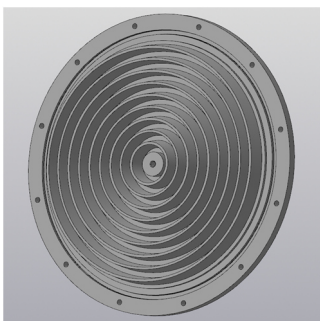


Рис. 1. 3D-модель изолятора

Определение сопротивления

Сопротивление изолятора можно рассматривать как сумму сопротивлений его частей. В нашем случае мы будем рассматривать два типа сопротивлений (рис. 2):

- сопротивление колец выступов и впадин, образованных изоляционным материалом;
- сопротивление боковой поверхности рёбер.

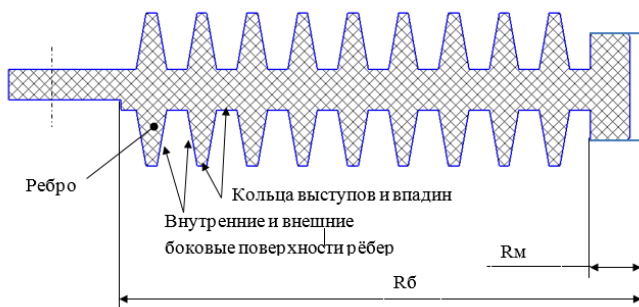


Рис. 2. Схема проходного рёберного изолятора

Расчёт суммарного сопротивления колец выступов и впадин

Поверхность выступов и впадин без учёта поверхности ребер составит сплошной круг с наружным радиусом до значения R_6 (рис. 3).

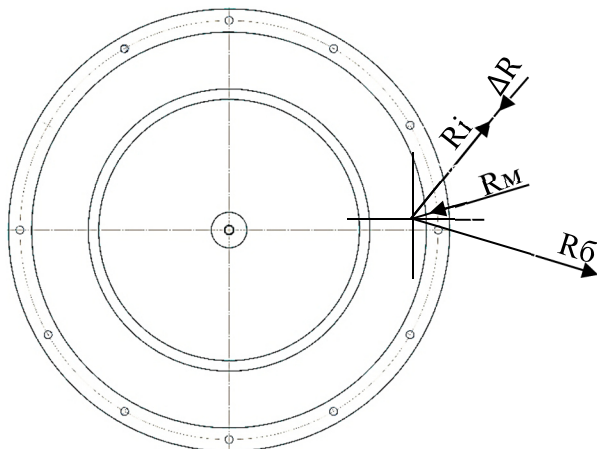


Рис. 3. Поверхность выступов и впадин без учёта поверхности ребер

Величины:

q (Ом) – поверхностное сопротивление одного квадрата поверхности изолятора (поверхностное сопротивление не зависит от выбранного значения ΔR , а только от марки материала изолятора и состояния его поверхности).

ΔR – сторона квадрата (приращение); Q_i – сопротивление R_i кольца толщиной ΔR ; $Q = \sum Q_i$ – поверхностное сопротивление круга в диаметре радиусов от R_m (малое) до R_6 (большое); n_i – количество квадратов со стороной ΔR по окружности R_i .

Поскольку сумма сопротивлений квадратов в кольце считается параллельным соединением, то формула расчёта Q_i выглядит так:

$$Q_i = \frac{q}{n_i}$$

Считаем n_i для кольца R_i :

$$n_i = \frac{2\pi R_i}{\Delta R}$$

Подставляем и упрощаем:

$$Q_i = \frac{q\Delta R}{2\pi R_i}.$$

Мы получили формулу расчёта сопротивления одного кольца, чтобы получить сопротивление всей поверхности кольца, нужно посчитать определённый интеграл, как последовательную сумму сопротивлений колец:

$$\dot{Q} = \sum Q_i = \int_{R_M}^{R_6} \frac{q}{2\pi R_i} * \Delta R = \frac{q}{2\pi} \int_{R_M}^{R_6} \frac{1}{R_i} * \Delta R = \frac{q}{2\pi} * (\ln R_6 - \ln R_M),$$

где $R_6=0,2$ м, $R_M=0,02$ м. В итоге $\dot{Q} \approx 0,3665q$.

Расчёт суммарного сопротивления боковых поверхностей рёбер

m_i – количество квадратов со стороной $\Delta R = 22$ мм на боковой поверхности ребра по окружностям R_i , внутренним и внешним радиусам боковых поверхностей ребер.

Здесь R_i – радиус окружности, i – боковой поверхности ребра высотой 22 мм.

$$m_i = \frac{2\pi R_i}{\Delta R} \quad \text{или} \quad m_i = \frac{2\pi R_i}{22}.$$

Потому что сумма сопротивлений квадратов по окружности боковой поверхности ребра считается параллельным соединением.

Q_{mi} – сопротивление i - боковой поверхности ребра:

$$Q_{mi} = \frac{q}{m_i} \quad \text{или} \quad Q_{mi} = \frac{22q}{2\pi R_i}.$$

Значения Q_{mi} в соответствии с R_i по чертежу конкретного изолятора XXXX.757525.011 представлены в таблице. Сопротивление всех рёбер $\dot{Q} = \sum Q_{mi} = 0,728 q$, общее сопротивление $Q = \dot{Q} + \dot{Q} = 1,095 q$.

Сопротивления боковой поверхности ребра

№	$R_i, \text{ мм}$	$Q_m \text{ (в Ом)}$
1	32	0,109 q
2	40	0,088 q
3	51,5	0,070 q
4	59,5	0,059 q
5	71,5	0,049 q
6	79,5	0,044 q
7	91	0,038 q
8	99	0,035 q
9	111	0,032 q
10	119	0,029 q
11	130,5	0,027 q
12	138,5	0,025 q
13	150,5	0,024 q
14	158,5	0,022 q
15	170	0,021 q
16	178	0,020 q
17	190	0,018 q
18	198	0,018 q

Выводы

В результате проведённого анализа и расчетов было установлено, что общее сопротивление изолятора рёберного типа составляет 1,095 q. Данный подход позволяет более точно оценить электрические характеристики изоляторов и их эффективность в различных условиях эксплуатации.

По таблице видна зависимость роста общего сопротивления Q от увеличения диаметра R_6 как габаритного размера изолятора, дальнейшее увеличение количества ребер практически не ведет к росту Q из-за логарифмической зависимости Q и обратной зависимости Q от R_i .

Увеличение общего сопротивления Q для повышения значения рабочего напряжения (соответственно, напряжения пробоя) достигается изначально выбором материала изолятора и методом обработки его поверхности.

Были проведены экспериментальные замеры поверхностного сопротивления q фторопластового изолятора XXXX.757525.011 и составили q = 12 кОм при влажности 100 % и конденсате морского

тумана на рабочей поверхности изолятора, что позволило на основании выше проведенных расчетов ввести пункт технических требований в паспорт конкретного изолятора ХХХХ.757525.011: «№ 5. Сопротивление изоляции между центральным контактом и точками крепления по периметру изолятора при влажности 100 % и конденсате морского тумана не менее 10 кОм».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Радиационно стойкие керамические изоляторы : монография. Часть II / Н. С. Костюков [и др.]. Благовещенск : изд-во АмГУ, 2014. 208 с.

[2] *Педро И. И., Машковцева М. Н.* Использование моделирования на проводящей бумаге для исследования электростатических полей при определении качества изоляции // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тезисы докладов XXI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. 2015. Т. 4. С. 287.

[3] *Руденко С. А., Варакута В. В., Гамий С. М.* Разработка изоляторов на напряжение 3300 В для взрывозащищенного электрооборудования // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. 2024. № 3 (66). С. 128–135.

Масленников Александр Борисович, сотрудник Омского научно-исследовательского института приборостроения, radioseminar@радиосеминар.рф.

Кривальцевич Павел Сергеевич, студент Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского, сотрудник Омского научно-исследовательского института приборостроения, radioseminar@радиосеминар.рф.

А. В. Новикова

ОБЗОР ХАРАКТЕРИСТИК РЕСУРСНЫХ СПУТНИКОВ С УСТАНОВЛЕННЫМИ НА БОРТУ РАДИОЛОКАТОРАМИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

В работе приведён результат анализа характеристик космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на предмет наличия на их борту радиолокаторов с синтезированной апертурой. Составлен перечень аппаратов, функционирующих на данный момент. Определены виды режима доступа к архиву радиолокационных снимков поверхности. Даны рекомендации по тематике применения данных.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, дистанционное зондирование Земли.

В современном мире, где устойчивое развитие и охрана окружающей среды становятся приоритетными задачами, дистанционный мониторинг состояния земной поверхности приобретает особую значимость. Одним из наиболее эффективных инструментов для решения этих задач являются радиолокационные спутники, которые предоставляют ценные данные о различных аспектах земной экосистемы. Эти устройства способны осуществлять наблюдение в любых погодных условиях и при любой видимости, что делает их незаменимыми для сбора информации о деградации земель, изменениях в растительном покрове, мониторинге стихийных бедствий и многих других явлениях.

Цель данной работы заключается в характеристике космических устройств радиолокационных спутников, данные которых могут быть использованы для дистанционного мониторинга состояния земной поверхности.

В процессе обзора проводился анализ характеристик искусственных спутников дистанционного зондирования Земли, с установленными на борту радиолокаторами с синтезированной апертурой, которые будут активны в течение 2024–2026 годов. В таблице представлен перечень космических аппаратов, удовлетворяющих указанному критерию.

Перечень космических аппаратов

№	Инструмент	Спутники	2024	2025	2026
1	SAR-P	BIOMASS		X	X
2	L band SAR (Ludi-Tance)	1) Ludi-Tance 1 1) Ludi-Tance 1 01B 3) Ludi-Tance 4 01A	X	X	X
3	PALSAR-3	ALOS-4 (DAICHI-4)	X	X	X
4	SAR-L	1) SAOCOM-1B 2) SAOCOM-2A 3) SAOCOM-2B	X	X	
5	SAR-L, SAR-S (NISAR)	NI-SAR		X	X
6	S-SAR	NovaSAR-S	X	X	
7	SAR-10	1) Kondor-FKA 1 2) Kondor-FKA 2	X	X	X
8	SAR-S	1) HJ-2E 2) HJ-2F	X	X	X
9	SAR RCM	RCM-1, 2, 3	X	X	X
10	SAR-C (GF-3)	1) GF-12 2) GF-12-02 3) GF-12-03 4) GF-12-04 5) CSAR-1 6) CSAR-2	X	X	X
11	SAR-C (RISAT)	1) EOS-04 2) RISAT-1B	X	X	X
12	SAR-C (Sentinel-1)	Sentinel-1C	X	X	X
	SAR-C (Sentinel-1)	Sentinel-1D		X	X

Перечень ресурсных спутников с установленными на борту радиолокаторами с синтезированной апертурой, активность которых будет приходиться на 2024–2026 года.

Поскольку организация режима доступа к данным, полученных ресурсными спутниками, определяется интересами кураторов программ дистанционного мониторинга, архивы радиолокационных снимков аппаратов, приведённых в таблице, могут быть закрытыми для рядового пользователя. Из приведённого перечня для дальнейшего анализа характеристик космических аппаратов были отобраны пять аппаратов, данные которых могут быть получены в режиме открытого доступа.

Спутник: BIOMASS (БИОМАССА)

Этот космический аппарат, внешний вид которого приведён на рис. 1, является частью программы Biomass реализуемой Европейским космическим агентством в проекте «Живая планета». Основной задачей миссии является точная количественная оценка лесной биомассы и определение площадей как лесных, так и обезлесенных территорий, включая границы затопленных лесов.

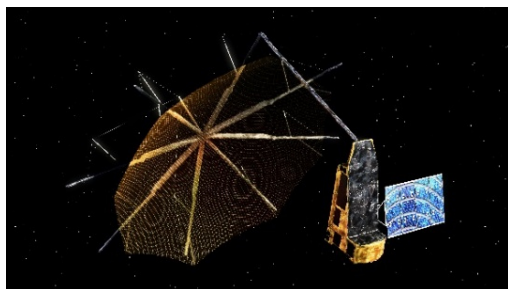


Рис. 1. Спутник: BIOMASS [1]

Радиолокатор аппарата Biomass функционирует в P-диапазоне с рабочей частотой 0,435 ГГц (70 см), благодаря чему зондирующий импульс способен проникать сквозь полог леса. Это позволит собирать информацию о различных частях лесного полога. Основным интерес для зондирования будут представлять стволы и ветви древостоя, как объекты хранящие большую часть углерода. Аппарат будет запущен на солнечно-синхронную орбиту на высоту 660 км. Для получения данных может потребоваться стандартная лицензия ESA [1].

Спутник: ALOS-4 (DAICHI-4)

«ALOS-4» – это искусственный спутник, запущенный на геосинхронную орбиту 1 июля 2024 года, являющийся продолжением ALOS-2. Радиолокатор функционирует в L-диапазоне с рабочей частотой 27–1,27 ГГц. Серия спутников ALOS разработана и эксплуатируется японским космическим агентством. На сайте OpenTopography после регистрации есть возможность скачать данные загруженные до 24 мая 2021 со спутника определенной местности.

Спутниковая программа: SATélite Argentino de Observación CON Microondas

Серия из четырех спутников аргентинского космического агентства CONAE включает две пары: SAOCOM-1 (два спутника) и SAOCOM-2 (два спутника) [2]. В рамках нашего рассмотрения мы сосредоточим внимание на: SAOCOM-1B, SAOCOM-2A, SAOCOM-2B.

Аппарат запущен на солнечно-синхронную орбиту. Основное оборудование – микроволновые радары L-диапазона и инфракрасные камеры, которые позволяют видеть сквозь облака и в ночное время. Рабочая частота спутников равна примерно 1,275 ГГц.

Возможность получения полного открытого доступа к спутниковой программе возможно на официальном сайте: Argentina.gob.ar. Каждый находящийся продукт на сайте включает в себя соответствующий «краткосрочный обзор» (предварительный просмотр изображения, автоматически генерируемый во время производства), географическое местоположение и уровень обработки.

Спутниковая программа: NovaSAR-S

NovaSAR-1 – это демонстрационный технологический спутник, предназначенный для проверки возможностей новой недорогой платформы SAR в S-диапазоне с рабочей частотой от 3,1 до 3,3 ГГц. Он обеспечивает передачу данных с высоты 580 км, находясь на солнечно-синхронной орбите. Внешний вид спутника приведен на рис. 2.

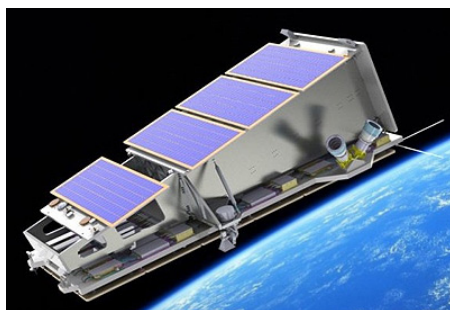


Рис. 2. Спутник NovaSAR- S [3]

Получить полный открытый доступ к спутниковой программе возможно на официальном сайте CSIRO. Для этого нужно пройти регистрацию и подтверждение администратора [4].

Спутниковая программа: Sentinel-1

Миссия основана на созвездии из двух идентичных спутников, летящих по одной орбите, но с разницей в 180° с целью оптимизации глобального покрытия и предоставления данных для Copernicus. Изображение космического аппарата Sentinel-1 представлено на рис. 3.



Рис. 3. Космический аппарат Sentinel-1 [5]

Для устранения временного дефицита в покрытии, вызванного неожиданным отключением спутника Sentinel-1B в 2022 году по техническим причинам, запуск Sentinel-1C в сочетании с спутником Sentinel-1A восстановит полную функциональность миссии как двухспутниковой группы. В 2025 году ожидается замена Sentinel-1A на Sentinel-1D [5].

Sentinel-1C и Sentinel-1D оснащены радиолокатором с синтезированной апертурой (С-диапазон), работающим на центральной частоте 5,405 ГГц, что соответствует длине волны примерно 5,55 см, и находятся на высоте 693 км.

Доступ к данным Sentinel-1 полностью бесплатен и предоставляется в архивном режиме на сайте NASA.

Заключение

В процессе обзора проводился анализ характеристик искусственных спутников дистанционного зондирования Земли с установленными на борту радиолокаторами с синтезированной апертурой, которые будут активны в течение 2024–2026 годов.

Ключевым аспектом данного обзора является оценка возможностей спутников по обнаружению изменений в земной поверхности, что делает их неоценимыми инструментами в мониторинге природных катастроф и экологических изменений. Анализ данных

спутников способствует не только научным изысканиям, но и формированию стратегий устойчивого развития и управления ресурсами в глобальном масштабе.

Эффективное применение информации, получаемой из радиолокационного мониторинга, не только поддерживает устойчивое развитие, но и содействует формированию целостного подхода к охране окружающей среды и предупреждению серьёзных последствий от нерационального использования ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ESA. Biomass mission. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/02/Biomass_mission.

[2] SAOCOM. URL: <https://saocom.invap.com.ar>.

[3] SSTL. NovaSAR Data Sheet. URL: <https://www.sstl.co.uk/getmedia/b315e056-f198-44d8-9ef4-f02fef9a3da1/NovaSAR-Datasheet.pdf>.

[4] ESA. Sentinel 1C fuelled ahead of liftoff. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Sentinel-1C_fuelled_ahead_of_liftoff.

Новикова Анастасия Владимировна, студент Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского, radioseminar@радиосеминар.рф.

А. В. Новикова

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ВЕТРА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ

В представленной работе рассматриваются возможности использования данных, полученных спутниковыми радиолокаторами с синтезированной апертурой для оценки скорости ветра в континентальной части суши. В процессе анализа данные, полученные космическим аппаратом Sentinel-1B с пространственным разрешением в 10 м. В результате проведённого статистического анализа данных была выявлена корреляционная зависимость между значениями удельной эффективной площади рассеяния и скоростью приземного ветра. Полученные результаты могут найти применение при тематическом картировании поверхности суши и оценке метеопаратов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, sentinel-1B, радиолокация, эффективная площадь рассеивания, корреляция.

В современном мире спутниковые системы дистанционного зондирования Земли играют ключевую роль в мониторинге природных процессов, чрезвычайных ситуаций и антропогенного воздействия. Одним из представителей таких систем является спутник Sentinel-1B, разработанный в рамках программы Copernicus Европейского космического агентства (ESA). Sentinel-1B оснащён радаром с синтезированной апертурой (SAR), что позволяет получать высококачественные изображения поверхности Земли независимо от погодных условий и времени суток [1–5].

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании влияния ветровых условий на радиолокационные характеристики водной поверхности на примере озера Эбейты. В частности, внимание сосредоточено на оценке того, насколько эффективно можно идентифицировать водоёмы по радиолокационным изображениям и как ветер влияет на значения эффективной площади рассеяния (ЭПП) – ключевого показателя отражающей способности поверхности

В процессе обзора проводилось экспериментальное исследование радиолокационных характеристик водной поверхности по данным спутника Sentinel-1B с установленным на борту радиолокатором с синтезированной апертурой (SAR). Анализ выполнялся на основе снимков озера Эбейты, полученных в период с июня по сентябрь 2021 года (рис. 1).

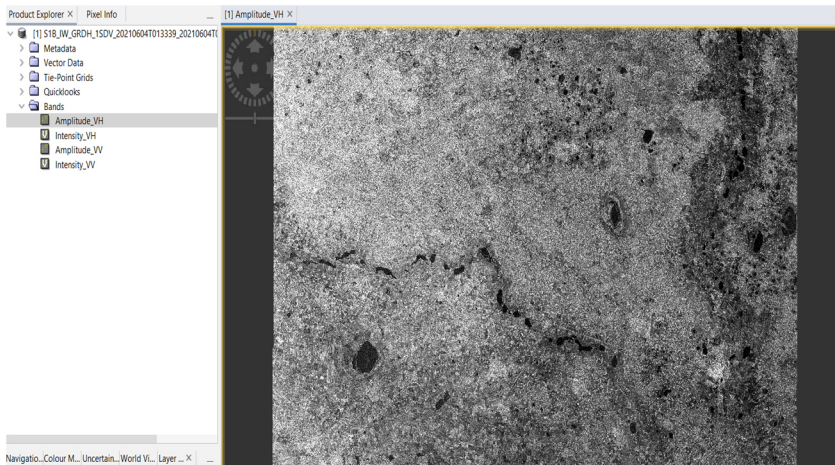


Рис. 1. Исходный радиолокационный снимок, загруженный в SNAP, включающий зону исследования – озеро, по которому проводился анализ ЭПП

Обработка данных велась в следующей последовательности:

1. Первичная подготовка данных.

В модуле Radar → Amplitude (VH) был выделен канал вертикальной передачи и горизонтального приёма сигнала (VH-поляризация) как наиболее чувствительный к структурным особенностям объекта.

С помощью инструмента Raster → Subset была выбрана интересующая часть изображения, то есть участок, соответствующий исследуемому объекту.

2. Радиометрическая калибровка.

Выполнена через модуль Radar → Radiometric → Calibrate с целью преобразования амплитудных значений в физически интерпретируемые значения коэффициента обратного рассеяния.

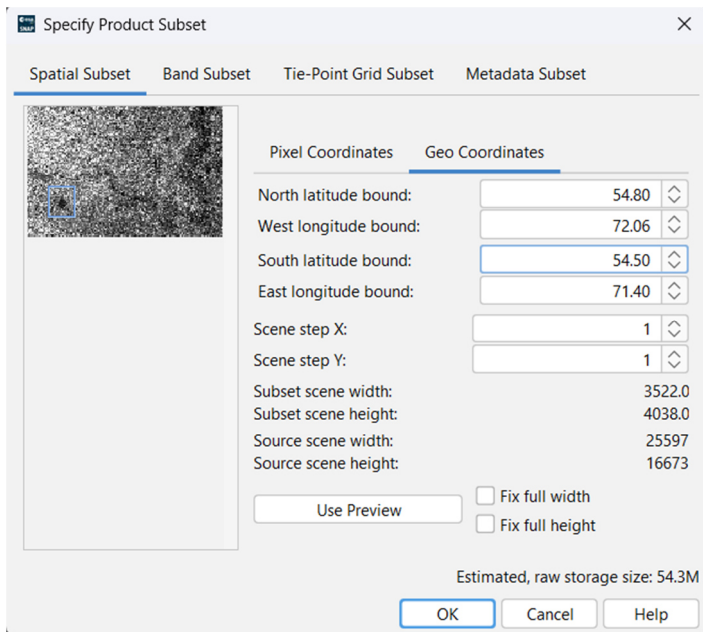


Рис. 2. Окно программного обеспечения SNAP, в котором вручную выбирается географическая область для дальнейшей обработки

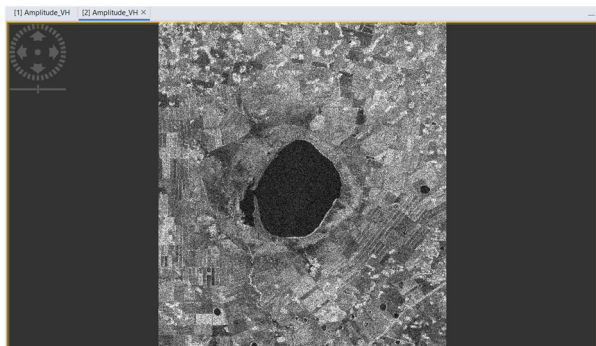


Рис. 3. Иллюстрация полученного результата после выбора области на снимке

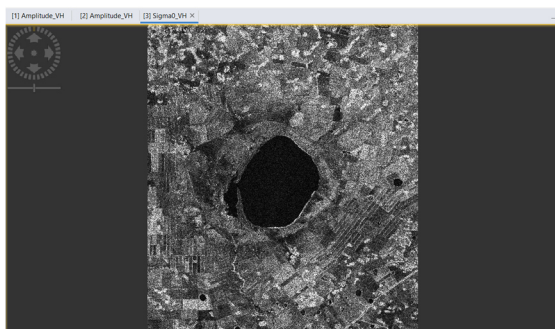


Рис. 4. Снимок интерфейса SNAP в момент применения функции калибровки, необходимой для получения физически интерпретируемых значений рассеяния

3. Геометрическая коррекция.

В разделе Radar → Geometric → Terrain Correction → Range-Doppler Terrain Correction была проведена коррекция геометрических искажений, вызванных рельефом местности. В ходе процедуры были активированы следующие параметры:

- Latitude and Longitude (для точного географического позиционирования).
- Incidence Angle from Ellipsoid (для расчёта угла падения сигнала).
- Local Incidence Angle (локальный угол падения сигнала на поверхность) (рис.5).

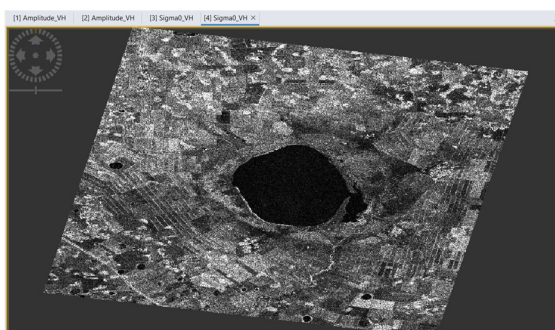


Рис. 5. Иллюстрация этапа коррекции рельефа, где активированы параметры географического положения и локального угла падения сигнала

4. Фильтрация шумов.

Применён спекл-фильтр (раздел Radar → Speckle Filtering → Single Product Speckle Filter), необходимый для подавления спекл-шумов, характерных для радиолокационных изображений (рис. 6).

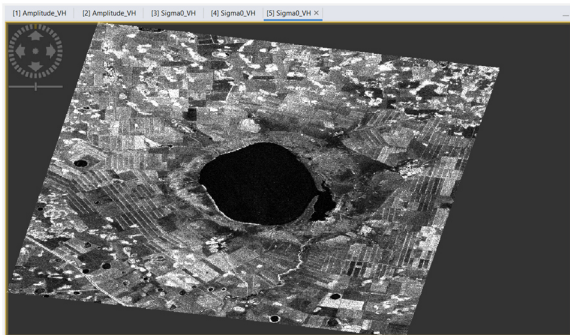


Рис. 6. Представляет этап устранения характерных «зернистых» шумов с помощью спекл-фильтра

После выполнения всех вышеперечисленных этапов была сформирована серия значений ЭПР (эффективной площади рассеяния) для выбранного объекта были сопоставлены с метеорологическими показателями (рис. 7), полученными за аналогичный период, и построены график зависимости ЭПР от скорости ветра в нужный период времени (рис. 8, 9).

Дата	Скорость ветра	Sigma0_VH (дБ)	Sigma0_VV (дБ)	localIncidence Angle (Угол локального совпадения)	incidence Angle From Ellipsoid (угол падения от Эллипсоида)
04.июн	7	-23,7183	-13,6023	33,59914	33,581
16.июн	4	-25,361	-19,9717	33,39545	33,37695
28.июн	4	-24,6088	-18,8345	33,39302	33,37451
10.июл	2	-23,6415	-24,0029	33,39117	33,37267
22.июл	3	-24,4613	-21,8601	33,59753	33,57938
03.авг	4	-24,6291	-19,6269	33,59845	33,5803
15.авг	2	-23,8108	-24,5983	33,39429	33,37578
27.авг	2	-24,9795	-24,5481	33,39274	33,37422
08.сен	3	-24,5504	-18,7083	33,39431	33,3758
20.сен	6	-24,1314	-11,0559	33,39171	33,37321

a

Дата	Скорость ветра	Sigma0_VH (дБ)	Sigma0_VV (дБ)	localIncidence Angle (Угол локального совпадения)	incidence Angle From Ellipsoid (угол падения от Эллипсоида)
11.июн	1	-24,5322	-23,3435	41,4419	41,42448
23.июн	4	-23,9407	-23,0541	41,44283	41,42541
05.июл	3	-23,2665	-23,8574	41,44728	41,42968
17.июл	2	-26,4154	-25,3459	41,6175	41,60076
10.авг	3	-23,9489	-18,8119	41,44548	41,42806
22.авг	3	-24,0296	-24,7806	41,44202	41,4246
03.сен	5	-24,76	-24,4657	41,44888	41,4313
15.сен	4	-24,4782	-23,9268	41,44906	41,43148

б

Рис. 7. Усредненные значения ЭПР и скорость ветра (а, б)

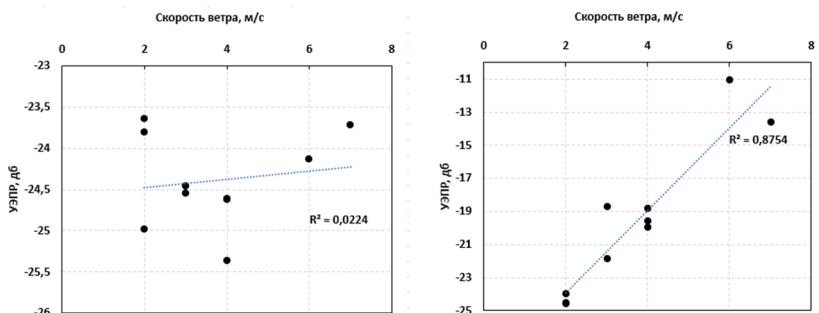


Рис. 8. Зависимость значения ЭПР от скорости ветра при угле падения, равном 33°

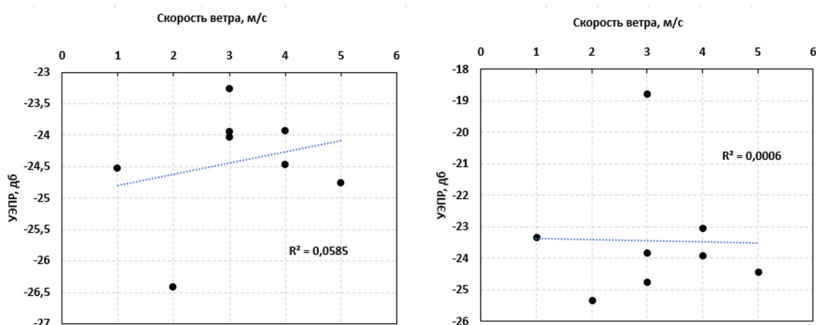


Рис. 9. Зависимость значения ЭПР от скорости ветра при угле падения, равном 41°

В рамках анализа радиолокационных характеристик поверхности водоёма было также рассчитано значение коэффициента детерминации. Он равен квадрату коэффициента корреляции (R) между интенсивностями обратного рассеяния в двух поляризационных каналах – Sigma0_VH (вертикальная передача/горизонтальный приём) и Sigma0_VV (вертикальная передача/вертикальный приём), выраженных в децибелах (дБ).

Полученные данные подтверждают, что поляризация VV даёт более стабильный сигнал при меньших углах падения. Здесь наблюдается незначительная положительная связь в VH-поляризации и практически отсутствие корреляции в VV-поляризации, что может свидетельствовать о более сложном взаимодействии радиоволн с поверхностью при большем угле падения.

Полученные значения демонстрируют, что характер взаимосвязи между поляризационными каналами зависит от угла падения сигнала, а также от состояния поверхности водоёма (включая влияние ветра, ряби, структуры отражения). На основании этих данных можно сделать вывод о чувствительности поляризационных компонентов SAR-сигнала к геометрическим и физическим условиям сцены наблюдения.

Заключение

В результате проведённого анализа данных была установлена корреляционная зависимость между скоростью ветра и уровнем УЭПР в режиме съёмки VV. Это может быть объяснено увеличением неровностей водной поверхности в вертикальном направлении (увеличением высоты волн) при росте скорости приводного ветра. Указанная зависимость обнаружена для данных, полученных под углом зондирования в 33° . Предположительно, это можно объяснить соотношением между направлением скорости ветра и азимутом угла под которым производилась съёмка.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Европейское космическое агентство. Sentinel Online. URL: <https://sentinels.copernicus.eu>.
- [2] Радиолокатор с синтезированной апертурой. Radartutorial.eu. URL: <https://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.ru.html>.

[3] ESA. Sentinel-1 User Guide.

URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>.

[4] Sentinel-1 Mission Overview.

URL: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/sentinel-1>.

[5] *Злотин Ю. Л.* Основы дистанционного зондирования Земли. М. : Наука, 2020. 354 с.

Новикова Анастасия Владимировна, студент Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского, radioseminar@радиосеминар.рф.

А. А. Пуцкович

ОБ АЛГОРИТМАХ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПУТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В РАДИОСЕТИ

Приведены обзоры алгоритмов, использующихся в расчетах. Разработано ПО и произведены расчеты оптимальных путей для радиосети различных масштабов с оценкой времени расчета.

Ключевые слова: радиосеть, генетический алгоритм, муравьиный алгоритм.

Радиосети играют важную роль в современных коммуникационных системах, особенно в условиях, где проводная инфраструктура недоступна или неэффективна. Одной из ключевых задач в радиосетях является определение оптимальных путей передачи информации, которые обеспечивают минимальное время передачи и, следовательно, высокую эффективность работы сети. В данной работе рассматриваются генетический и муравьиный алгоритмы на примере сети в [1], состоящей из 15 пунктов связи.

Таблица 1

Список поселений для Арктического региона России

№ пункта	Наименование	Координаты		Населённость
		Широта	Долгота	
1	Земля Франца-Иосифа	80,62	58,03	0
2	Белушья Губа (Новая Земля)	71,53	52,33	1972
3	Рогачёво (Новая Земля)	71,6	52,4	330
4	Ямальский район	70,2	72,5	0
5	Диксон (Краснодарский край)	73,5	80,5	319
6	Караул (Краснодарский край)	71,7	83,6	781
7	Усть-Авам (Краснодарский край)	71,12	92,82	339
8	Хатанга (Краснодарский край)	72,83	105,1	2645
9	Жилиндийский национальный наслег (Якутия)	70,13	113,1	0
10	Усть оленек (Якутия)	72,98	119,8	27
11	Кюсюр (Якутия)	70,68	127,4	1345
12	Усть-Куйга (Якутия)	70	135,6	668
13	Юкагир (Якутия)	71,77	139,8	128
14	Русское Устье (Якутия)	71,13	149,3	118
15	Остров Врангеля	70,98	178,5	0

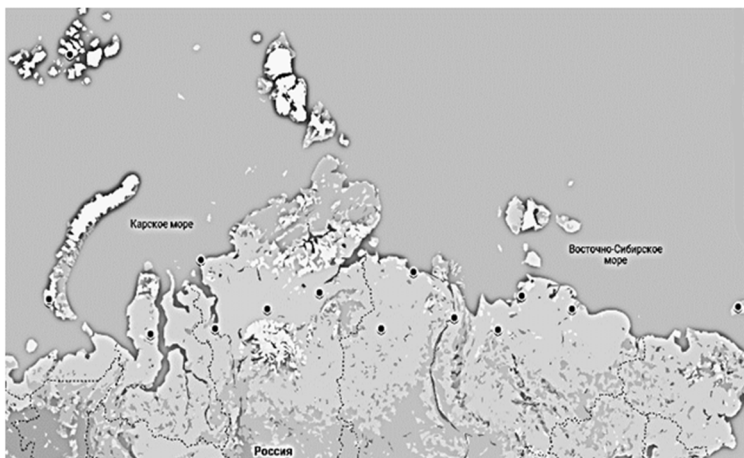


Рис. 1. *Расположение рассматриваемых населенных пунктов на карте*

В [1] представлены данные, такие как параметры антенн, условия солнечной активности, уровень радишумов и рабочие частоты, с помощью которых были рассчитаны средние отношения сигнал/шум. Далее, с использованием зависимостей скорости передачи информации от ОСШ [2], была произведена оценка скорости передачи данных между всеми узлами радиосети.

Таким образом, используя набор скоростей передачи, можно реализовать генетический и муравьиный алгоритмы, которые определяют оптимальные, то есть обеспечивающие максимальные скорости информационного обмена, маршруты передачи информации.

Генетические алгоритмы (ГА) представляют собой эволюционные методы оптимизации, в которых решения кодируются в виде хромосом, а процесс оптимизации моделируется через механизмы селекции, скрещивания и мутации. В контексте задачи оптимизации маршрутов в радиосетях ГА могут быть адаптированы следующим образом:

1) *Кодирование хромосом.* Каждая хромосома представляет собой маршрут, состоящий из последовательности узлов, через которые передается информация. Входные данные, такие как скорости передачи, используются для оценки качества каждого маршрута.

2) *Функция приспособленности.* Функция приспособленности определяется как суммарное время передачи информации по маршруту. Маршрут с минимальной суммой имеет наивысшую оценку.

3) *Операторы селекции.* Используется турнирный метод селекции, при котором несколько случайно выбранных хромосом сравниваются, и победитель (с наивысшей оценкой в функции приспособленности) переходит в следующее поколение.

4) *Операторы скрещивания.* Одноточечный кроссовер используется для создания новых маршрутов. Две родительские хромосомы разделяются на две части в одной случайно выбранной точке, и эти части обмениваются, чтобы сформировать два новых потомка.

5) *Операторы мутации.* Мутация производится путем случайного изменения одного или нескольких узлов в маршруте, что помогает избежать застревания в локальных минимумах.

Генетические алгоритмы находят широкое применение в различных областях. Их используют для решения задач оптимизации: обучения нейронных сетей, проектирования конструкций механизмов, составления расписаний, оптимизации структуры телекоммуникационных сетей, компоновки электронных элементов на платах, поиска оптимальной формы деталей и раскрой материалов. В качестве примера можно привести компанию «Schema» из Израиля, которая создала программное обеспечение Channeling. Этот продукт, основанный на генетических алгоритмах, оптимизирует работу сетей сотовой связи, подбирая наиболее эффективную частоту для каждого разговора [3].

Муравьиные алгоритмы (МА) вдохновлены поведением муравьев при поиске кратчайших путей и используют феромоны для обмена информацией между собой. В задаче оптимизации маршрутов в радиосетях, МА могут быть адаптированы следующим образом:

1) *Инициализация феромонов.* Начальные уровни феромонов распределяются равномерно по всем возможным связям между узлами. Феромоны могут быть инициализированы на основе предварительных оценок скорости передачи, чтобы ускорить сходимость алгоритма.

2) *Выбор пути.* Муравьи выбирают следующий узел на основе вероятности, которая зависит от уровня феромонов и эвристической информации (например, скорости передачи).

3) *Обновление феромонов.* Феромоны усиливаются на маршрутах, пройденных муравьями, пропорционально качеству маршрута (например, суммарной скорости передачи), они также подвергаются испарению, чтобы предотвратить преждевременную сходимость к локальным оптимальным решениям.

Одним из наиболее перспективных и широко используемых направлений применения муравьиных алгоритмов является транспортная логистика, которая включает в себя решение таких сложных задач, как задача коммивояжера и маршрутизация автотранспорта [4].

На языке C++ была написана программа, способная рассчитать оптимальные маршруты для выбранной радиосети. Она состоит из нескольких вызывных функций, включающих в себя алгоритмы для расчета оптимальных путей радиосети, создание случайной топографии радиосети и вывода информации результатов расчета, а также графа заранее заданной карты сети, ее блок-схема представлена ниже:

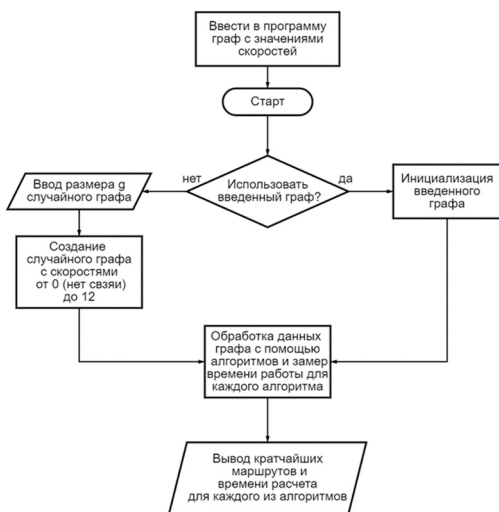


Рис. 2. Блок-схема программы

Для МА программа работает с значениями времени передачи, которые записываются в виде матрицы смежности и отправляются в функции алгоритмов, где обрабатываются с использованием таких параметров как количество муравьев, уровень влияния и коэффициент испарения феромонов, коэффициент влияния расстояния и количество итераций, после чего выводятся в отдельный текстовый документ «Test» в виде списка наибоыстрейших (оптимальных) маршрутов между пунктами. В ГА алгоритме программа работала с размером популяции, количестве поколений, шансом на скрещивание и мутацию.

Результаты моделирования для МА при следующих параметрах: количество муравьев равно 10, количество итераций в 5, коэффициент испарения феромона в 0,05, уровень его влияния в 0,01. Для ГА при следующих параметрах: размер популяции в 50, количество поколений 5, шанс на мутацию и скрещивание в 10 и 80 процентов соответственно. В итоге оба алгоритма выдают совпадающие с [1] данные, что подтверждает их работоспособность при заданных значениях.

Было подсчитано количество связей напрямую через 1 и 2 ретранслятора для трех условий, данные внесены в табл. 2:

Таблица 2

Количество транзитных узлов для оптимальных маршрутов

Условия	Вид связи		
	Напрямую	1 ретранслятор	2 ретранслятора
22 декабря	87 (83,1 %)	18 (16,9 %)	0
22 июня	53 (50,47 %)	46 (43,8 %)	6 (5,71 %)
22 марта	74 (70,47 %)	30 (28,57 %)	1 (0,95 %)

Для условия 1 около 83 % маршрутов действуют напрямую и около 16,9 % проходят через 2 и более транзитных узла, что соответствует литературным данным. Для условия 2 около 50,47 % маршрутов действуют напрямую и около 49,53 % проходят через 2 и более транзитных узла. По сравнению с условием 1 количество ретрансляций увеличилось на 32,7 %.

Из этих данных видно, что во многих случаях передать информацию при условии 1 можно и без ретранслятора. В условиях 2 и 3 же при большом поглощении в области D ионосферы необходимость в дополнительных маршрутах доставки информации растёт.

Наиболее часто используемые узлы – 4 (34 раза) и 9 (13 раз), из этого можно сделать вывод, что в этих узлах высокая нагрузка на инфраструктуру и, следовательно, необходимо увеличить количество/качество оборудования.

Для сравнения эффективности алгоритмов были взяты данные по алгоритму Дейкстры из [5] и случайно сгенерированные графы размером 15, 25, 50, 75, 100 и 150, с шансом в 7,5 % на отсутствие связи и диапазоном скоростей от 1 до 12.

Таблица 3

Время работы программы для различных алгоритмов

Размер графа	Время работы		
	Дейкстры	Муравьиный алгоритм	Генетический алгоритм
15	0,04 с	2,7 с	1,9 с
25	0,047 с	32,178 с	12,2 с
50	0,125 с	364,51 с	195,24 с
75	0,266 с	2467,1 с	1100,91 с
100	0,6 с	253,42 мин	143,54 мин
150	1,267 с	553,37 мин	341,23 мин

Из этих данных составлен график зависимости (рис. 3).

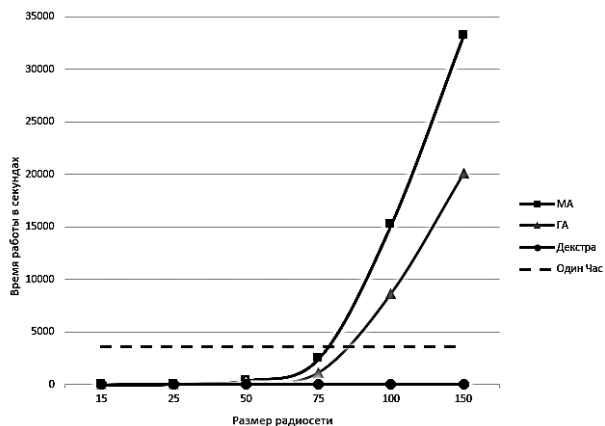


Рис. 3. График зависимости времени работы алгоритма от размера графа

Из графика видно, что при размере радиосети больше, чем 75, различие в скорости работы между алгоритмами становится очень значительным, так время работы муравьиного алгоритма больше генетического на 60–65 %, алгоритм Дейкстры значительного роста времени не получает.

Таким образом, исходя из необходимости расчета данных каждый час [6], можно сделать вывод, что при задаче поиска оптимального пути в радиосети размером более 75 алгоритм Дейкстры является наиболее предпочтительным выбором.

Выводы

Написано программное обеспечение, использующее различные алгоритмы для вычисления оптимальных маршрутов в радиосети. Приведены примеры использования алгоритмов, проведено сравнение скорости связи в промежутках с низкой и высокой солнечной активностью. Показана изменчивость маршрутов в карте радиосети под влиянием солнечной активности на ионосферную связь. Показано время работы алгоритмов при различных размерах радиосети. Показано, что при задаче поиска оптимального пути в радиосети использование алгоритма Дейкстры имеет большую целесообразность, чем другие рассмотренные алгоритмы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Моделирование ДКМВ-радиосети Арктического региона / П. А. Ашаева [и др.] // Современные проблемы радиофизики и радиотехники : сборник докладов Омского научного семинара / отв. ред. С.В. Кривальцевич. Вып. 9. Омск : ОНИИП, 2021. С. 8–15.
- [2] Пукса Д. О., Романов Ю. В. К вопросу о влиянии спектральной эффективности сигнала КВ-модемов на их энергетическую эффективность // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 1 (32). С. 7–16.
- [3] Сапунов Г. В. Система автоматического распознавания речевых команд для параллельных архитектур : дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2005. 129 с.
- [4] Кажаров А. А., Курейчик В. М. Муравьиные алгоритмы для решения транспортных задач // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 32–45.

[5] *Пуцыкович А. А.* Моделирование ДКМВ-радиосети // Современные проблемы радиофизики и радиотехники : сборник докладов Омского научного семинара / отв. ред. С.В. Кривальцевич. Вып. 11. Омск : ОНИИП, 2021. С. 36–45.

[6] *Шадр С. В.* Моделирование КВ радиосети Арктического региона. 2023. 33 с.

Пуцыкович Андрей Андреевич, студент Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского, radioseminar@radioseminar.pf.

А. А. Пуцкович

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА СВЯЗИ ДЛЯ ДКМВ-РАДИОСЕТИ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ

Приведены результаты моделирования ДКМВ-радиосети. Проведена оценка результатов исследования.

Ключевые слова: ДКМВ-диапазон, алгоритм Дейкстры, моделирование радиосвязи, качество связи.

Арктический регион России представляет собой уникальную зону с экстремальными климатическими условиями, где организация надежной радиосвязи является критически важной задачей. В предыдущих исследованиях [1] была продемонстрирована эффективность использования ДКМВ-диапазона для обеспечения связи в высоких широтах. Однако существующие модели не учитывали динамическое изменение параметров каналов связи, что ограничивало их практическую применимость.

Программная реализация модели выполнена на языке C++ с использованием стандарта C++17. Выбор данного языка обусловлен [2]:

- 1) Высокой производительностью при работе с графами.
- 2) Возможностью эффективной многопоточной обработки для имитации реального сетевого трафика.
- 3) Богатой стандартной библиотекой для работы с структурами данных.

Основу алгоритма составляет модифицированный алгоритм Дейкстры, адаптированный для работы с динамически изменяющимися параметрами связи, многопоточной обработкой передач и вероятностью потери пакетов. Данные потери имитируются через случайные события-помехи, учитывающие перегрузку каналов при одновременной передаче данных, изменение пропускной способности из-за атмосферных помех и временную недоступность маршрутов.

Структурно программная реализация состоит из следующих логических блоков:

1) Инициализация сети. На этом этапе создается карта соединений между узлами с заданными скоростями передачи, имитирующая реальную инфраструктуру ДКМВ-связи в Арктике.

2) Генерация трафика. Пакеты данных формируются последовательно для всех пар «источник-приемник», что позволяет равномерно протестировать все возможные маршруты.

3) Динамическое обновление. Регулярно изменяются такие параметры канала как скорость и доступность, что имитирует влияние внешних факторов.

4) Маршрутизация и передача. Для каждого пакета вычисляется оптимальный путь, после чего моделируется его передача с учетом возможных потерь.

5) Сбор статистики. Фиксируются метрики качества связи: количество созданных, отправленных и доставленных пакетов, процент не доставленных пакетов вследствие различных событий-помех.

Получилась блок-схема работы программы (см. рис.).

Программа моделирования позволила оценить влияние ключевых параметров на качество связи в ДКМВ-радиосети. Так, в сети из 15 узлов при времени работы в 10 минут и изменении сети каждую минуту была составлена таблица с вероятностью возникновения события-помехи, влияющей на качество связи и процент потерянных пакетов (см. табл.).



Блок-схема программы

Влияние параметров сети на качество связи

<i>Фактор</i>	<i>Вероятность, %</i>	<i>Потеряно пакетов, %</i>
Вероятность изменения скорости (день)	20	0,58
Вероятность обрыва соединения	2	2,37
Вероятность изменения скорости (ночь)	50	1,62
Вероятность обрыва соединения (высокая)	30	не более 5

Из полученных результатов можно сделать вывод, что основной вклад в потери пакетов вносит нестабильность каналов (разрывы), а не колебания скорости. Алгоритм Дейкстры эффективно адаптируется, удерживая потери на уровне 3–4 % даже при значительном количестве изменения маршрутов связи. Влияние суточных колебаний хоть и мешает работе сети, но ДКМВ-радиосеть способна обеспечить устойчивую связь в Арктическом регионе России.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Пуцыкович А. А.* Моделирование ДКМВ-радиосети // Современные проблемы радиофизики и радиотехники : сборник докладов Омского научного семинара / отв. ред. С. В. Кривальцевич – Вып. 11. Омск : ОНИИП, 2024. С. 36-45.

[2] *Рейзлин В. И.* Язык C++ и программирование на нём : учебное пособие. Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2021. 208 с.

Пуцыкович Андрей Андреевич, студент Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского, radioseminar@radioseminar.pf.

АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТРАФИКА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

*В докладе рассматриваются задачи и методы анализа сетевого трафика в реальном времени. Исследуется подход к созданию программно-аппаратных комплексов для пассивного мониторинга, обеспечивающего прозрачность контроля для сетевой инфраструктуры. Описывается архитектура решения на базе сетевого моста, а также реализация программного обеспечения с использованием библиотеки *libpcap* для захвата пакетов и анализа потоков данных.*

Ключевые слова: мониторинг сетевого трафика, анализ сетевого трафика, сетевой мост, NTA, libpcap.

Оперативный и точный мониторинг сетевого трафика – ключевой элемент обеспечения безопасности и эффективности корпоративных и промышленных сетей [1, 2]. Анализ проходящих данных позволяет выявлять аномалии, контролировать потребление ресурсов и предотвращать несанкционированные действия. В условиях, когда критически важные системы требуют высокой производительности и отказоустойчивости, особенно актуально применение специализированных программно-аппаратных комплексов для пассивного мониторинга, которые обеспечивают прозрачный контроль без вмешательства в существующую инфраструктуру.

Цель данной работы – создание автономного программно-аппаратного решения, способного осуществлять непрерывный мониторинг сетевого трафика в реальном времени. Разработка ориентирована на использование в ситуациях, где требуется контроль передачи данных без вмешательства в существующую сетевую инфраструктуру и без влияния на производительность каналов связи.

Разрабатываемое решение предназначено для установки в разрыв канала между двумя сегментами сети. Устройство осуществляет захват всего проходящего через него трафика, не вмешиваясь в содержимое пакетов и не влияя на их маршрутизацию. Такой подход обеспечивает полную прозрачность для участников сети и высокую надежность мониторинга.

Анализ сетевого трафика (Network Traffic Analysis, NTA) представляет собой комплексный процесс сбора, корреляции и глубокой обработки пакетов данных, передаваемых по сети [3]. NTA решает широкий круг задач: от диагностики и оптимизации работы сети до обнаружения и расследования инцидентов безопасности, включая попытки сканирования, фишинг и DoS-атаки [4].

Мониторинг является незаменимым инструментом для выявления «узких мест», которые могут негативно влиять на производительность приложений и сервисов. Анализируя данные, можно точно определить, что вызывает задержки: перегрузка сервера, проблемы с базой данных или недостаточная пропускная способность сети. Это позволяет оптимизировать использование ресурсов и улучшить общее качество обслуживания (QoS). Например, системы мониторинга помогают идентифицировать приложения или устройства, которые потребляют чрезмерный объем ресурсов, например, видеоконференции или облачные сервисы, что может приводить к снижению скорости для других пользователей [5].

Системы мониторинга предоставляют исчерпывающие данные для быстрой диагностики причин медленного обмена данными или обрывов связи. Они являются ключевым инструментом для выявления корневых причин инцидентов, будь то сбой оборудования или неоптимальная конфигурация [6].

Хотя в контексте мониторинга часто упоминается обнаружение «аномалий», это понятие имеет более широкое значение, чем просто выявление вредоносной активности. Любое отклонение от нормального, заранее установленного поведения сети является аномалией, которую система мониторинга фиксирует. Это может быть не только попытка атаки, но и неожиданно высокий рост трафика из-за популярности нового сервиса, «зацикленный» процесс на сервере или некорректная конфигурация оборудования.

Таким образом, механизм обнаружения нехарактерного поведения критически важен для операционной эффективности, поскольку он позволяет выявлять внеплановые нагрузки и реагировать на них, предотвращая проблемы с производительностью [7].

Сбор и анализ объективных данных о сетевом трафике за выбранные периоды дает прочную основу для стратегического планирования и проведения модернизации. Это позволяет принимать обоснованные решения о необходимости увеличения пропускной способности каналов, замене устаревшего оборудования или настройке балансировки нагрузки [8].

Функционирование разработанного комплекса основано на методе пассивного мониторинга. Этот подход принципиально отличается от активного мониторинга, который использует сгенерированный тестовый трафик для проверки доступности устройств и сервисов. Пассивный мониторинг, напротив, не оказывает никакого влияния на анализируемый трафик, поскольку он лишь «считывает данные из линии передачи». Эта характеристика является фундаментальным преимуществом, так как позволяет осуществлять непрерывный и надежный контроль без внесения каких-либо изменений в рабочую сеть и без риска нарушения ее производительности [9]

Сравнительный анализ видов мониторинга приведен в таблице.

Сравнительный анализ видов мониторинга

<i>Характеристика</i>	<i>Пассивный мониторинг</i>	<i>Активный мониторинг</i>
<i>Методология</i>	Анализ реального трафика	Генерация и отправка тестового трафика
<i>Влияние на сеть</i>	Отсутствует	Может создавать нагрузку и задержки
<i>Сценарии использования</i>	Непрерывный мониторинг, сбор долгосрочной статистики	Целевые проверки (пентестинг), аудит, проверка доступности
<i>Недостатки</i>	Не видит «бесшумные» устройства, не может самостоятельно принимать меры	Ресурсоемкий, может нарушать работу чувствительных систем
<i>Данные</i>	Реальные пользовательские данные и трафик	Синтетические пакеты и ответы от устройств
<i>Источники</i>	Зеркалирование портов, сетевой TAP	SNMP, WMI, ping, telnet, тестовые пакеты

Несмотря на очевидные преимущества, пассивный мониторинг имеет определенные ограничения. Он анализирует только существующий трафик и не может обнаружить устройства или уязвимости, если они не генерируют сетевую активность. Такие «сиротевшие активы» (orphaned assets) могут оставаться невидимыми для системы, пока не будут скомпрометированы, что делает пассивный подход недостаточным для полного аудита безопасности.

В то же время, активный мониторинг, который напрямую взаимодействует с устройствами, отправляя им тестовые запросы, идеально подходит для целевых проверок, таких как пентесты и аудит соответствия. Он предоставляет детальные данные, поступающие непосредственно от тестируемой системы.

Таким образом, наиболее эффективной стратегией является комбинация обоих подходов. Пассивный мониторинг обеспечивает непрерывное наблюдение и сбор исторической информации, в то время как активный используется для глубоких, целенаправленных проверок. Этот гибридный подход позволяет получить наиболее полную картину состояния сети [9].

Процесс анализа сетевого трафика начинается с этапа сбора данных. Для пассивного мониторинга существует два основных метода: зеркалирование портов (Port Mirroring), при котором коммутатор делает копию трафика с одного порта и пересылает ее на другой, и использование сетевого TAP (Test Access Point) – физического устройства, устанавливаемого в разрыв сетевого канала. Комплекс, разработанный в данной работе, по своей сути является программно-аппаратной реализацией второго метода, поскольку он функционирует в режиме сетевого моста, подключаясь между двумя сегментами сети для прозрачного захвата всего проходящего трафика [10]. Такой подход обеспечивает стопроцентную видимость трафика без какого-либо вмешательства в его содержимое или маршрутизацию.

Аппаратная часть комплекса построена на базе отечественной встраиваемой платформы с двумя сетевыми контроллерами Ethernet, что является ключевым требованием для организации логического моста (bridge) между двумя сетевыми сегментами. Устройство работает под управлением операционной системы Linux, которая обеспечивает гибкость и широкие возможности для низкоуровневого доступа к сетевым интерфейсам [10].

Сетевой мост – это устройство канального уровня (уровень 2 модели OSI), которое перенаправляет трафик между сетями на основе MAC-адресов. В контексте Linux мост представляет собой модуль ядра, который ведет себя как сетевой коммутатор, перенаправляя пакеты между подключенными к нему интерфейсами. Он автоматически строит таблицы MAC-адресов, запоминая, какой хост подключен к какому интерфейсу, и пересылает пакеты только в нужный сегмент. Такой подход позволяет разделить локальные сети на несколько сегментов, что значительно снижает количество коллизий и увеличивает общую пропускную способность, тем самым повышая производительность [10].

Для предотвращения сетевых петель, которые могут вызвать трафиковые «штормы», в Linux-мостах поддерживается протокол STP (Spanning Tree Protocol). При его активации мосты обмениваются служебными данными (BPDU) для выбора корневого моста и блокировки одного из интерфейсов, чтобы создать топологию без петель. Кроме того, современные версии ядра Linux поддерживают фильтрацию VLAN, что позволяет одному мосту работать с несколькими виртуальными локальными сетями, упрощая управление и конфигурацию [10].

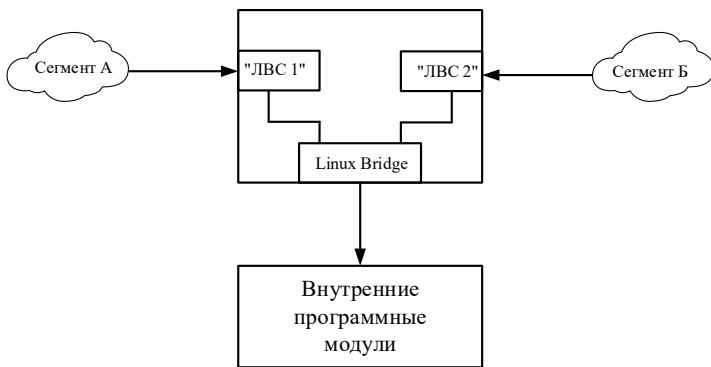


Рис. 1. *Функционирование программного обеспечения в режиме моста*

Программная часть комплекса реализована на языке C++ и представляет собой многопоточное приложение, обеспечивающее в реальном времени захват пакетов и измерение пропускной

способности. Основой для захвата трафика служит библиотека `libpcap`, предоставляющая низкоуровневый доступ к сетевым интерфейсам [11]. Она является унифицированным API для различных Unix-подобных систем, что позволяет создавать программы для захвата трафика без необходимости учитывать особенности каждой операционной системы.

Библиотека также поддерживает сохранение захваченных пакетов в файлы и их последующее чтение, что позволяет использовать один и тот же код для анализа как живого трафика, так и сохраненных данных. `Libpcap` предоставляет низкоуровневый доступ к сетевым интерфейсам и поддерживает фильтрацию, основанную на архитектуре `BSD Packet Filter (BPF)`. `BPF` позволяет выполнять фильтрацию пакетов непосредственно на уровне ядра, отбрасывая ненужный трафик до того, как он будет скопирован в пользовательское пространство для дальнейшей обработки. Это значительно снижает нагрузку на центральный процессор и повышает общую производительность системы, особенно в условиях высокой загрузки.

Кроме того, библиотека поддерживает сохранение захваченных пакетов в файлы и их последующее чтение, что позволяет использовать один и тот же код для анализа как живого трафика, так и сохраненных данных [11].

После захвата необработанные сетевые пакеты подвергаются детальной обработке, известной как глубокое инспектирование пакетов (`Deep Packet Inspection, DPI`). Этот процесс позволяет декодировать и анализировать пакеты на всех уровнях сетевой модели `OSI`, что дает возможность извлечь ценную информацию, выходящую за рамки базовых заголовков. Результатом `DPI` является преобразование сырых бинарных данных в читаемый формат, что позволяет сетевым администраторам и аналитикам понять поведение сети, использование приложений и ресурсов, а также выявить сетевые аномалии и уязвимости.

Системы, использующие `DPI`, предоставляют максимальную детализацию, необходимую для глубокого анализа кибербезопасности, в отличие от простых решений, основанных на метаданных [12].

Классификация сетевого трафика является одним из ключевых функциональных возможностей любого анализатора.

Комплекс, представленный в работе, определяет IP-адреса, порты и протоколы. Однако современные методы классификации выходят далеко за рамки этого базового уровня, предлагая более детализированный подход [1, 2].

Программная архитектура комплекса является многопоточной. Основная логика работы предполагает параллельное выполнение двух независимых потоков. Первый поток непрерывно захватывает пакеты с интерфейса моста, определяет их тип (IP, ARP, ICMP, TCP, UDP) и извлекает ключевые параметры (MAC-адреса, IP-адреса, порты) для формирования записей о сетевых потоках. Второй поток, работающий параллельно, в реальном времени измеряет общую пропускную способность сетевого моста.

Взаимодействие между потоками и доступ к общим структурам данных (хэш-таблице потоков и счетчикам статистики) организованы с использованием стандартных механизмов синхронизации C++ – мьютексов (`std::mutex`) и условных переменных (`std::condition_variable`). Это обеспечивает целостность и согласованность собираемой статистики в многопоточной среде, что критически важно для получения точных и надежных результатов.

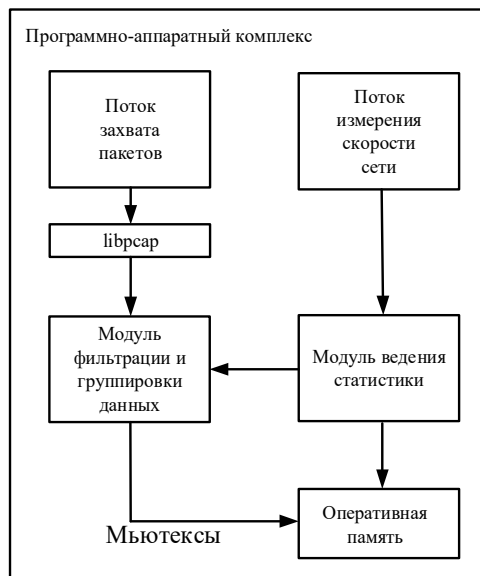


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения

Помимо базового захвата данных, комплекс решает ряд других задач. Он осуществляет классификацию сетевых потоков, ведет статистику по каждому из них и собирает данные о скорости передачи и объемах трафика в реальном времени. Для дальнейшей обработки и интеграции с другими системами комплекс поддерживает предоставление собранных показателей через простой HTTP-сервер в формате JSON, что значительно упрощает их последующую визуализацию и использование в более сложных аналитических системах.

Анализ сетевого трафика является критически важным инструментом для обеспечения информационной безопасности. Он позволяет выявлять подозрительные шаблоны или аномалии, что дает организациям возможность обнаруживать потенциальные угрозы до того, как произойдет серьезный инцидент. В частности, анализ трафика помогает выявить такие действия, как сканирование портов или DoS-атаки, которые создают необычные паттерны сетевой активности [4, 7].

Помимо обеспечения безопасности, анализ сетевого трафика играет жизненно важную роль в понимании производительности сети и ее оптимизации. Анализируя трафик, предприятия могут получить ценную информацию о текущем состоянии инфраструктуры. Выявление «узких мест», перегрузок или задержек позволяет системным администраторам и инженерам принимать обоснованные решения для оптимизации, например, планировать пропускную способность каналов или перераспределять ресурсы [5, 8].

Изучение моделей использования сети позволяет эффективно распределять ресурсы и предотвращать их нерациональное потребление, что в конечном итоге повышает общую производительность. Комплекс, способный собирать данные об объемах трафика и скорости передачи, предоставляет необходимую статистику для такого анализа [6].

Разработанный программно-аппаратный комплекс демонстрирует собой эффективное решение для контроля и детального анализа сетевого трафика. Его архитектура, основанная на пассивном мониторинге в режиме сетевого моста, обеспечивает надежный и прозрачный сбор данных, что является фундаментальным преимуществом для использования в критически важных корпоративных и промышленных сетях.

Комплекс не только надежно собирает данные, но и предоставляет мощные инструменты для их структурированной обработки. Это позволяет решать широкий спектр задач – от повышения кибербезопасности и обнаружения угроз, находящихся внутри периметра, до оптимизации производительности сети. Применение отечественной компонентной базы и свободно распространяемого программного обеспечения способствует снижению зависимости от зарубежных поставщиков, а использование открытых технологий, таких как `libpcap` и `Linux`, открывает широкие возможности для дальнейшего развития.

Внедрение подобных систем в эксплуатацию позволит системным администраторам и инженерам оперативно реагировать на инциденты, планировать пропускную способность и оптимизировать сетевую инфраструктуру с учетом реального трафика. Это позволит создать универсальную и адаптивную платформу, способную эффективно противостоять угрозам будущего и обеспечивать высокую надежность работы любой сетевой инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Олифер В. Г., Олифер Н. А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 6-е изд. СПб. : Питер, 2020.
- [2] *Kurose J., Ross K.* Computer Networking: A Top-Down Approach. 8th ed. Pearson, 2021.
- [3] *Paxson V.* Bro: A System for Detecting Network Intruders in Real Time // Proceedings of the 7th USENIX Security Symposium. 1999.
- [4] *Nadeau T. M., Gray K.* Practical Packet Analysis: Using Wireshark to Solve Real World Network Problems. No Starch Press, 2018.
- [5] *Kim H., Feamster N.* Improving Network Management with Software Defined Networking // IEEE Communications Magazine. 2013.
- [6] Методы и средства анализа сетевого трафика в реальном времени / S. Zuev [et al.] // Журнал сетевой безопасности. 2020.
- [7] *Sommer R., Paxson V.* Outside the Closed World: On Using Machine Learning For Network Intrusion Detection // IEEE Symposium on Security and Privacy. 2010.
- [8] *Claise B., Trammell B.* IP Flow Information Export (IPFIX). IETF RFC 7011.
- [9] *Stevens W. R.* TCP/IP. Подробное описание. Т. 1. Протоколы. М. : Вильямс, 2011.
- [10] Документация по настройке сетевых мостов в Linux. URL: <https://wiki.linuxfoundation.org/networking/bridge> (дата обращения: 29.08.2025).
- [11] Официальная документация библиотеки libpcap. URL: <https://www.tcpdump.org/manpages/pcap.3pcap.html> (дата обращения: 05.09.2025).
- [12] *Comer D. E.* Internetworking with TCP/IP. Vol. I, 6th ed. Prentice Hall, 2013.

Шумилов Никита Николаевич, сотрудник Омского научно-исследовательского института приборостроения, nikita-04@mail.ru

Научное издание

Современные проблемы радиофизики и радиотехники

*Сборник докладов
Омского научного семинара*

Выпуск 12

Ответственный редактор *С. В. Кривальцевич*

Доклады печатаются в соответствии с авторской редакцией.

Макет подготовлен в АО «ОНИИП»
Технический редактор *П. А. Бадамшина*
Дизайн обложки *А. Л. Ворожцов, С. Г. Машинская*

Подписано в печать 5.12.2025
Формат 60x84 1/16. Бумага типографская.
Усл. печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 5,9. Тираж 60 экз.
Отпечатано на полиграфической базе АО «ОНИИП»

644071, Омск, ул. Масленникова, 231

ISBN 978-5-6052462-2-0



9 785605 246220 >