

ISSN 2307-1303

Информационные Технологии и Телекоммуникации



Telecom IT Vol. 14, Iss. 1, 2026

Том 14, № 1, 2026

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

Информационные технологии и телекоммуникации

Том 14. № 1

Telecom IT

Vol. 14. Iss. 1

Санкт-Петербург

2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Editorial Board

Главный редактор *Editor-in-Chief*

Рабин А.В. (Санкт-Петербург)
Rabin A.V. (St. Petersburg)

Заместитель главного редактора

Deputy Editor-in-Chief

Владыко А.Г. (Санкт-Петербург)
Vladiko A.G. (St. Petersburg)

Бородулин Р.Ю. (Санкт-Петербург)
Borodulin R.Yu. (St. Petersburg)

Буйневич М.В. (Санкт-Петербург)
Buinevich M.V. (St. Petersburg)

Глушанков Е.И. (Санкт-Петербург)
Glushankov E.I. (St. Petersburg)

Калач А.В. (Воронеж)
Kalach A.V. (Voronezh)

Карташевский В.Г. (Самара)
Kartashevskiy V.G. (Samara)

Киричек Р.В. (Санкт-Петербург)
Kirichek R.V. (St. Petersburg)

Киричек Р.В. (Санкт-Петербург)
Kirichek R.V. (St. Petersburg)

Кучерявый А.Е. (Санкт-Петербург)
Kucheryavy A.E. (St. Petersburg)

Мырова Л.О. (Москва)
Mirova L.O. (Moscow)

Новиков С.Н. (Новосибирск)
Novikov S.N. (Novosibirsk)

Парамонов А.И. (Санкт-Петербург)
Paramonov A.I. (St. Petersburg)

Татарникова Т.М. (Санкт-Петербург)
Tatarnikova T.M. (St. Petersburg)

Тебуева Ф.Б. (Ставрополь)
Tebueva F.B. (Stavropol)

Филин В.А. (Санкт-Петербург)
Filin V.A. (St. Petersburg)

Фокин Г.А. (Санкт-Петербург)
Fokin G.A. (St. Petersburg)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Моделирование систем спутниковой
связи в пакете *Satellite Communication*
Toolbox: анализ бюджета канала
Тишков А. О., Фокин Г. А.

1 *Modeling of Satellite Communication
Systems in Satellite Communications
Toolbox: Link Budget Analysis
Tishkov A., Fokin G.*

Агентная система мониторинга
процессов для поведенческого анализа
и выявления аномальной активности
на рабочих станциях
Новикова Д. Д., Подвигин В. А.

22 *Agent-Based System for Process
Monitoring, Behavioral Analysis,
and Anomalous Activity Detection
on Workstations
Novikova D., Podvigin V.*

Анализ протоколов передачи данных
в задачах управления
промышленными роботами
**Белов М. А., Кузьмина Е. А.,
Филина Н. Р., Мутханна А. С. А.**

35 *Analysis of Communication Protocols
for Industrial Robot Control Systems
Belov M. A., Kuzmina E. A.,
Filina N. R., Muthanna A. S. A.*

Математическая модель формирования
квазистереопар при дуговом
перемещении телевизионной камеры
для оценки разнорысотности объектов
регулярной структуры
Сердюков П. С.

57 *Mathematical Model of Quasi Stereo Pair
Formation during Arc-Shaped Motion
of a Television Camera for Estimating
Height Differences in Objects with
a Regular Spatial Structure
Serdyukov P.*

Применение управляемых
мультиплексоров ввода / вывода ROADM
в DWDM-сетях
Былина М. С., Шевцова А. А.

68 *Application of Reconfigurable
Optical Add / Drop Multiplexers
in DWDM Networks
Bylina M., Shevtsova A.*

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР),
свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 75184 от 22 февраля 2019 г.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Адрес 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки,
учредителя: д. 61, литера А

Адрес редакции: 193232, Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, 22/1
Тел.: +7 (812) 326-31-63, доб. 20-22

E-mail: itt@sut.ru
Web: <http://ijitt.ru/>

УДК 621.396.94

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-1-21>

EDN: DQPSAM

Моделирование систем спутниковой связи в пакете Satellite Communication Toolbox: анализ бюджета канала

 Тишков А. О. ,  Фокин Г. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: проанализировать доступные в пакете расширения Satellite Communication Toolbox средства имитационного моделирования физических основ построения и функционирования систем спутниковой связи в целом и оценки бюджета канала в частности. **Целью** работы является создание основы для учебно-методического комплекса по изучению спутникового сегмента гибридных орбитально-наземных сетей связи. **Используемые методы:** обзор инструментов имитационного моделирования Satellite Communication Toolbox и их возможностей для анализа бюджета канала спутникового сегмента гибридных орбитально-наземных сетей связи. **Новизна:** в отличие от работ, посвященных исследованию бюджета канала, авторский подход заключается в формализации предложений по использованию инструментов имитационного моделирования Satellite Communication Toolbox при решении типовых практических задач оценки бюджета канала спутниковой связи для закрепления изученных физических основ на лабораторных и практических занятиях. **Результатом** настоящей работы является подготовка материалов по изучению бюджета канала спутниковой связи в учебно-методических целях. **Теоретическая / Практическая значимость** представленного материала заключается в совершенствовании учебно-методического комплекса по изучению принципов построения и особенностей функционирования современных и перспективных систем спутниковой связи.

Ключевые слова: Satellite Communications Toolbox, MATLAB, спутниковая связь, анализ бюджета канала спутниковой связи

Введение

Актуальность исследования определяется тем, что современные системы спутниковой связи активно развиваются и становятся важной частью мировой телекоммуникационной инфраструктуры. Увеличение числа низкоорбитальных спутников, рост скорости передачи данных и усложнение каналов связи делают необходимым точное моделирование распространения радиосигнала и расчет бюджета канала спутниковой линии связи. Удобные инструменты для таких задач

Библиографическая ссылка на статью:

Тишков А. О., Фокин Г. А. Моделирование систем спутниковой связи в пакете Satellite Communication Toolbox: анализ бюджета канала // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 1. С. 1–21. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-1-21. EDN: DQPSAM

Reference for citation:

Tishkov A., Fokin G. Modeling of Satellite Communication Systems in Satellite Communications Toolbox: Link Budget Analysis // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 1. PP. 1–21. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-1-21. EDN: DQPSAM

предоставляет пакет расширения Satellite Communication Toolbox¹. Его применение возможно при понимании физических основ, влияющих на работу спутникового канала. Данная статья является обзорной и систематизирует особенности моделирования в Satellite Communication Toolbox для проектирования спутниковых систем. Анализ актуального состояния проблемы функционирования сетей и систем спутниковой связи по открытым зарубежным источникам [1–5] показывает важность учета вопросов оценки бюджета радиолинии.

Целью данной работы является обзор пакета расширения Satellite Communication Toolbox на основе анализа области проектирования спутниковых систем. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести обзор физических основ спутниковой связи по материалам пакета расширения Satellite Communication Toolbox;
- 2) проанализировать факторы бюджета канала спутниковой связи, используемые в пакете расширения Satellite Communication Toolbox;
- 3) на основе анализа физических основ подготовить материалы для совершенствования учебно-методического комплекса по изучению принципов построения и особенностей функционирования современных и перспективных систем спутниковой связи.

Обзор физических основ спутниковой связи

Спутниковые радиолинии обеспечивают передачу и прием радиосигналов через спутники, вращающиеся вокруг Земли, для обеспечения связи. Радиосигналы, используемые для спутниковых каналов связи, распространяются в пределах прямой видимости и поэтому блокируются из-за кривизны земного шара. Задача спутников связи заключается в ретрансляции и усилении этих сигналов с помощью транспондеров, что позволяет осуществлять связь между географически удаленными точками. Связь может быть односторонней, как в случае спутников телевидения, или двусторонней, как у спутников, осуществляющих передачу интернет-трафика, теле-, радио- и навигационных сигналов.

На схеме, представленной на рисунке 1, показана простая односторонняя связь между земными станциями и спутником.

Спутниковая связь осуществляется в широком спектре частотных диапазонов – от 137 МГц для подвижной спутниковой службы до 18 ГГц для спутникового телевидения. Более высокие частотные диапазоны, как правило, обеспечивают доступ к большей полосе пропускания, но также в большей степени подвержены ухудшению качества сигнала из-за различных атмосферных факторов².

¹ Satellite Communication Toolbox. URL: <https://mathworks.com/products/satellite-communications.html> (Accessed 07.11.2025).

² Satellite Communication Toolbox. What Is Satellite Communications? URL: <https://mathworks.com/help/satcom/gs/what-is-satellite-communications.html> (Accessed 13.12.2025).

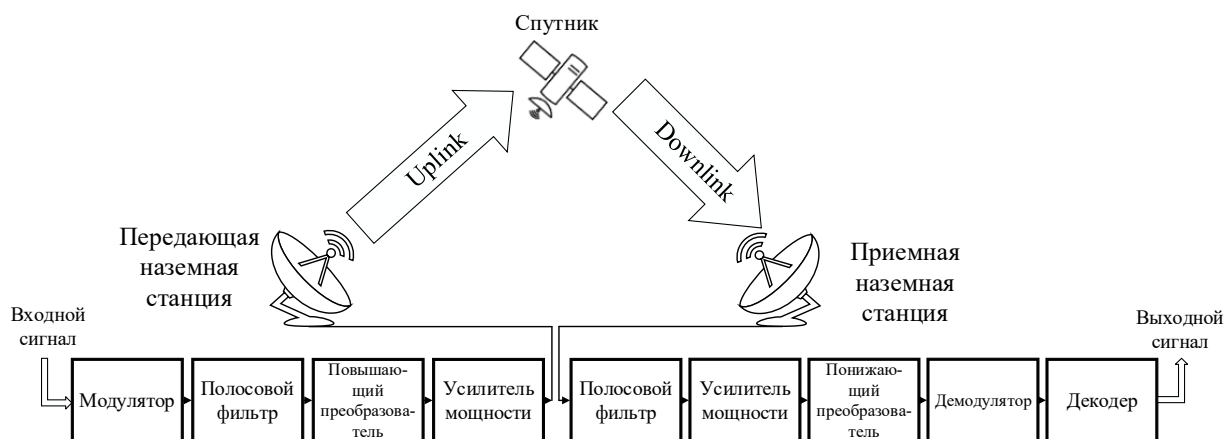


Рис. 1. Односторонняя связь между наземными станциями и спутником

Спутники связи располагаются на одном из основных типов орбит: геостационарная, средняя околоземная, низкая околоземная.

Геостационарная орбита – это круговая орбита на высоте 35 786 км от поверхности Земли. В течение многих лет системы спутниковой связи реализовывались именно на таких орбитах. Видимое положение геостационарного спутника в небе для наблюдателя с Земли не меняется, так как он вращается с той же угловой скоростью, что и Земля, и поэтому кажется неподвижным. Благодаря своему орбитальному положению системы спутниковой связи обеспечивают почти полное покрытие. Геостационарные спутники используются для прогнозирования погоды, спутникового телевидения, спутникового радио и других видов связи. Благодаря тому, что спутник и терминал пользователя неподвижны относительно друг друга, вариации временных задержек и эффекты Доплера в канале связи проявляются незначительно, однако геостационарные спутники имеют высокую задержку распространения сигнала, что создает проблемы для сервисов, чувствительных к ней. Среди главных преимуществ использования геостационарной орбиты – круглосуточная связь во всей зоне охвата и практически полное отсутствие частотных искажений, вызванных эффектом Доплера³.

Средняя околоземная (средневысотная) орбита находится в диапазоне от 2 000 до 35 786 км над Землей. Исторически среднеорбитальные спутники использовались для глобальной системы позиционирования и других навигационных систем. 32 спутника на средней околоземной орбите могут покрывать любую заданную точку на Земле в любое время суток. Для определения положения точки на Земле необходимо, чтобы четыре спутника одновременно были видны из этой конкретной точки на земной поверхности.

Низкая околоземная орбита находится в диапазоне от 160 до 2 000 км над Землей. В последние годы несколько провайдеров связи, таких как Starlink и Amazon Leo, запустили группировки низкоорбитальных спутников, поскольку они имеют гораздо меньшую задержку сигнала и лучше подходят для чувствительных ко времени приложений. Например, если геостационарному спутнику

³ Сомов А. М., Корнев С. Ф. Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 244 с. EDN: TIFKZH.

требуется 0,25 с на прохождение сигнала туда и обратно, то средневысотному – менее 0,1 с, а низкоорбитальному – всего 0,05 с. При этом один низкоорбитальный спутник покрывает гораздо меньшую площадь, чем геостационарный, что требует наличия множества аппаратов для достижения того же покрытия. Низкоорбитальные спутники применяются для передачи в реальном времени с малой задержкой (связь, мониторинг сигналов и научные исследования, такие как спутники наблюдения Земли, Международная космическая станция, космический телескоп «Хаббл») [6].

Анализ факторов бюджета канала спутниковой связи

Анализ бюджета линии связи является обязательным условием для проектирования системы спутниковой связи, так как он помогает количественно оценить производительность канала. Он включает в себя учет всех усиления и потерь мощности, которые испытывает радиочастотный сигнал в системе спутниковой связи⁴. Уравнение бюджета спутниковой линии связи, позволяющее корректно спроектировать канал, можно представить как:

$$P_{rx} = P_{tx} + G - L,$$

где P_{rx} – мощность на входе приемника (дБм); P_{tx} – передаваемая мощность (дБм); G – суммарное усиление приемной и передающей антенн (дБ); L – потери (дБ).

Для предварительной оценки эффективности системы вместо моделирования каналов связи прибегают к расчету баланса мощности. Чтобы гарантировать качественный прием сигнала с необходимым соотношением сигнал / шум, еще на этапе проектирования рассчитывают бюджет спутниковой линии, определяя требуемые параметры оборудования (рисунок 2).

Пакет расширения Satellite Communication Toolbox включает приложение Satellite Link Budget Analyzer⁵ для выполнения статического и динамического анализа бюджета спутниковой линии связи. Проектирование спутниковых систем связи подвержено влиянию множества факторов, которые можно разделить на три основные категории.

К *параметрам приемопередающего тракта* относятся характеристики, определяющие энергетический потенциал линии связи: эффективную изотропно-излучаемую мощность передатчика, потери в фидерных трактах как на передающей, так и на приемной стороне, отношение коэффициента усиления приемной антенны к шумовой температуре, а также запас по энергетике линии, обеспечиваемый выходным усилителем мощности высокочастотного усилителя на передающей стороне.

⁴ Satellite Communication Toolbox. Satellite Link Budget. URL: <https://mathworks.com/help/satcom/gsatellite-link-budget.html> (Accessed 21.01.2026).

⁵ Satellite Communications Toolbox. Satellite Link Budget Analyzer. URL: <https://www.mathworks.com/help/satcom/ref/satellitelinkbudgetanalyzer-app.html> (Accessed 07.02.2026).

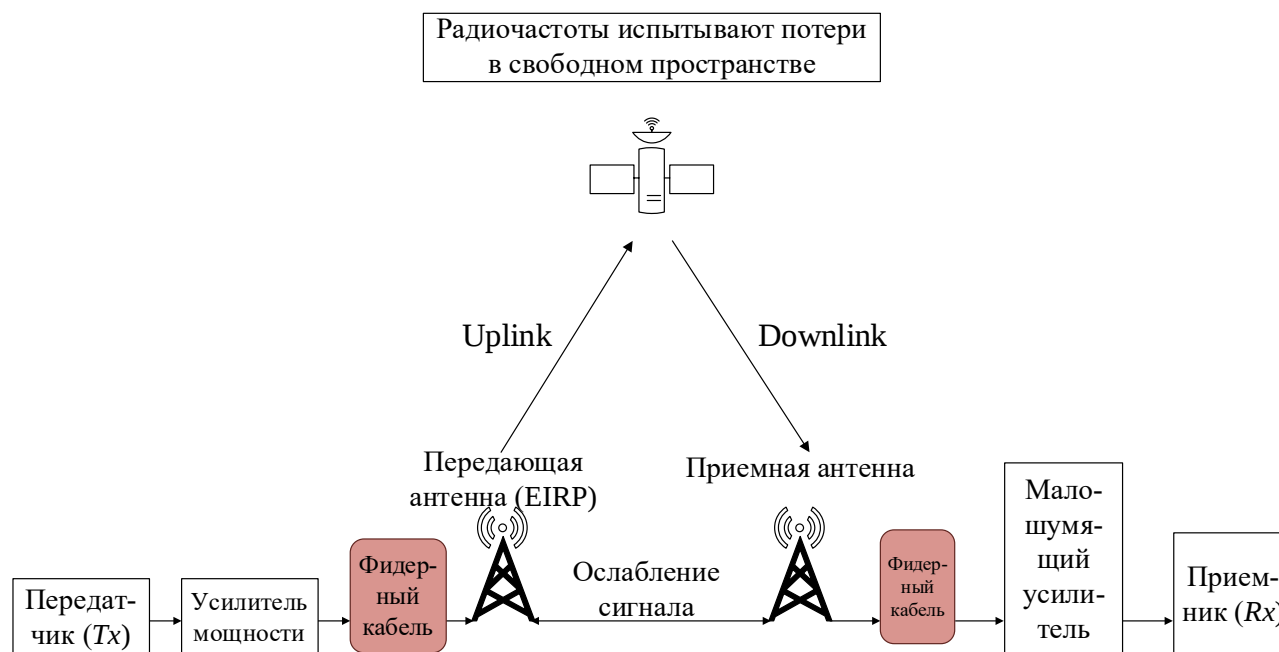


Рис. 2. Схема радиолинии спутниковой связи

В состав *потерь в свободном пространстве* включены следующие составляющие: потери из-за рассогласования поляризации, шумовая температура приемной антенны, а также затухание сигнала в атмосфере, преимущественно обусловленное осадками и газами.

Категория *спутник* включает потери из-за интерференции от соседних каналов, расстояние между несущими спутника, параметры спутника (такие, как орбитальные элементы) и параметры несущей.

На схеме, представленной на рисунке 3, показаны основные факторы, влияющие на проектирование канала. Рассмотрим их более подробно [7].

1. *Эффективная изотропно-излучаемая мощность* (ЭИИМ / EIRP, аббр. от англ. Equivalent Isotropically Radiated Power) – это мощность, которую необходимо излучать изотропной антенне, чтобы создать в направлении максимального усиления реальной антенны эквивалентную плотность потока мощности.

ЭИИМ представляет собой общую мощность, излучаемую антенной передатчика, умноженную на коэффициент усиления этой антенны:

$$EIRP = P_t \cdot G_t,$$

где P_t – общая мощность, излучаемая антенной передатчика; G_t – коэффициент усиления антенны.

Если выразить ЭИИМ в децибелах, формула принимает следующий вид:

$$EIRP = P_t + G_t,$$

где $EIRP$ и P_t измеряются в дБм, а G_t – в дБи.



Рис. 3. Факторы расчета канала спутниковой связи

ЭИИМ позволяет сравнивать различные излучатели независимо от их типа, размера или формы. С учетом различных потерь, например в фидере и свободном пространстве, формула принимает вид:

$$EIRP = P_t + G_t - L_f - L_p,$$

где L_f – потери в фидере (дБ); L_p – потери в свободном пространстве (дБ).

Ниже представлены двухмерные диаграммы направленности изотропной антенны для всех азимутов при угле места 0° (рисунок 4а) и спиральной антенны с основным, задним и боковыми лепестками (рисунок 4б).

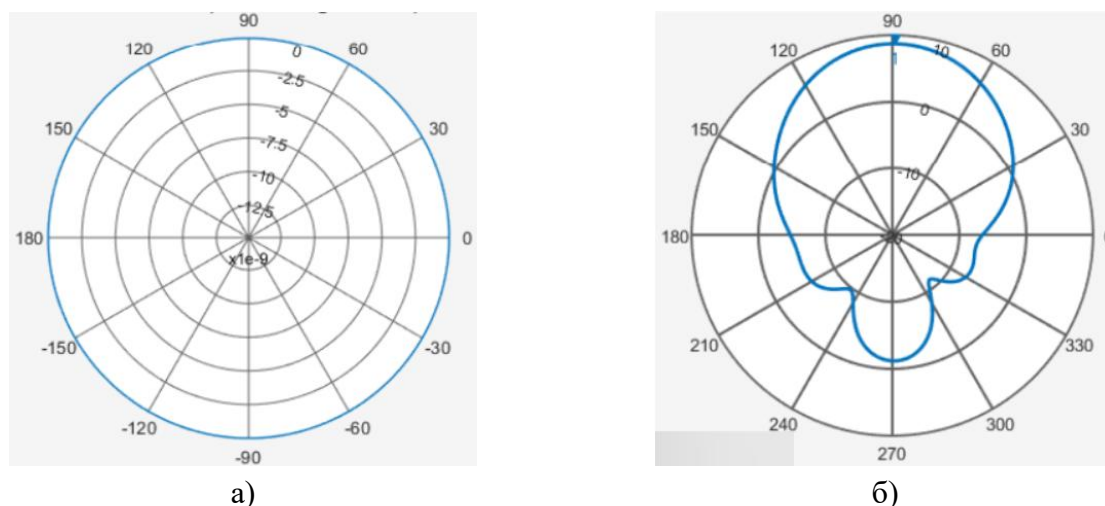


Рис. 4. Двухмерная диаграмма направленности изотропной (а) и спиральной антенн (б)

2. Под *потерями в фидере* понимаются суммарные потери сигнала в тракте между антенной и конечным оборудованием (приемником или передатчиком). Уровень принятого сигнала может быть крайне мал, так как он чувствителен к воздействию шума. По этой причине во входном каскаде приемника принимаются специальные меры, чтобы максимально снизить уровень шума, пока сигнал не будет достаточно усилен.

3. *Потери в свободном пространстве* (FSPL, аббр. от англ. Free Space Path Loss) относятся к рассеиванию сигнала в пространстве, что приводит к ослаблению мощности сигнала. Этот показатель рассчитывается с помощью формулы передачи Фрииса, соответственно уровень потерь пропорционален квадрату частоты сигнала и квадрату расстояния до источника.

В случае изотропной антенны, диаграмма направленности которой представляет собой сферу, поток излучаемой мощности равномерно перераспределяется по мере удаления от источника. Так как площадь сферы пропорциональна квадрату ее радиуса, интенсивность электромагнитного излучения сигнала в свободном пространстве убывает обратно пропорционально квадрату пройденного пути (рисунок 5).

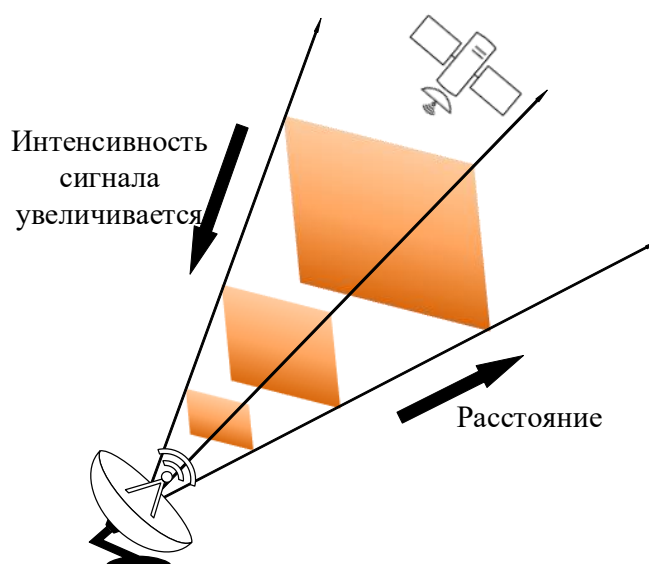


Рис. 5. Зависимость интенсивности сигнала от расстояния по закону обратных квадратов

Интенсивность сигнала определяется как:

$$I = \frac{P_t}{4\pi d^2},$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м).

Мощность приемной антенны рассчитывается по следующей формуле:

$$P_r = I \cdot A_{eff},$$

где A_{eff} – эффективная площадь приемной антенны, определяемая как:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi},$$

где λ – длина волны передаваемого сигнала.

Подставляя I и A_{eff} , получим:

$$P_r = \left(\frac{P_t}{4\pi d^2} \right) \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right).$$

Таким образом, итоговые потери в свободном пространстве рассчитываются по формуле:

$$FSPL(L_p) = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2.$$

4. *Поляризационные потери* (PL, аббр. от англ. Polarization Loss) передающей и приемной антенн приводят к потере электромагнитной мощности. Свойство плоских электромагнитных волн в свободном пространстве заключается в том, что направления векторов электрического и магнитного полей ортогональны направлению их распространения.

Антенна, используемая для приема поляризованных электромагнитных волн, достигает своей максимальной выходной мощности, когда ее поляризация совпадает с поляризацией электромагнитного поля. В противном случае возникает потеря из-за поляризационного рассогласования, что может привести к ухудшению качества связи. Поляризация может быть линейной, круговой или эллиптической в зависимости от формы, описываемой вектором электрического поля.

Когда сигналы проходят через ионосферу, может возникнуть ортогональная составляющая поляризации, что приводит к деполяризации. Количественно оценить влияние этого явления можно с помощью двух следующих параметров:

– *кросс-поляризационная избирательность* (XPD, аббр. от англ. Cross-Polarization Discrimination) представляет собой отношение мощности, принятой на ожидаемой поляризации, к мощности, принятой на ортогональной поляризации в точке приема, когда волна передается с заданной поляризацией, и зависит как от характеристик антенны, так и от среды распространения;

– *кросс-поляризационная развязка* (XPI, аббр. от англ. Cross-Polarization Isolation) представляет собой отношение поляризованной мощности в данном приемнике к кросс-поляризованной мощности в том же приемнике, когда две радиоволны передаются с одинаковой мощностью и ортогональной поляризацией.

5. *Потери наведения*. Если антенна (передающая или приемная) направлена неидеально, существует возможность потери сигнала. Правильное согласование ориентации между антеннами земной станции и спутника обеспечивает максимальное усиление. Несогласованность может возникать как на спутнике, так и на земной станции. Отклонение, связанное со спутником, должно учитываться при

его проектировании, тогда как отклонение, связанное с земной станцией, представляет собой потери из-за неточного наведения антенны и обычно составляет менее 1 дБ. Пример настройки максимального усиления представлен на рисунке 6.

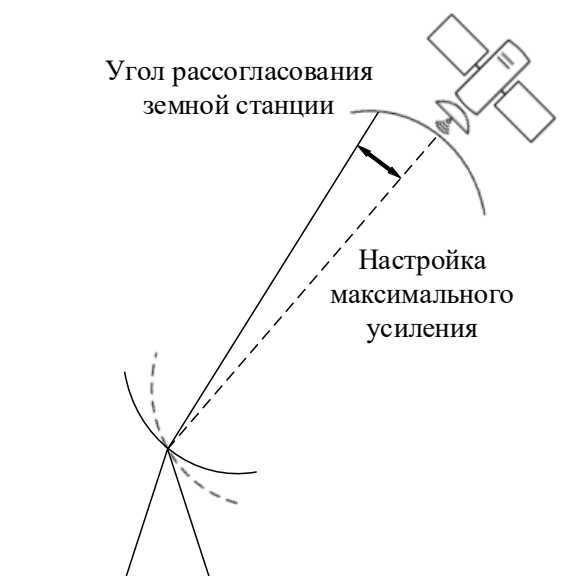


Рис. 6. Схема настройки максимального усиления антенны при угловом рассогласовании

6. *Шумовая температура антенны* представляет собой уровень шума, создаваемого антенной в конкретных условиях окружающей среды. Данная величина не является физической температурой антенны. Общая шумовая температура антенны главным образом зависит от шумовых температур неба и земли.

Шумовая температура неба состоит из двух основных компонентов: атмосферного и фонового излучения. Поскольку верхние слои атмосферы являются поглощающей средой, шум неба увеличивается с ростом угла места. Шумовая температура земли вносит основной вклад в шум антенны, принимаемый через боковые лепестки. Шумовая температура земли возрастает с уменьшением угла места, так как увеличивается количество боковых лепестков, направленных на землю. Остронаправленная антенна с глубокой диаграммой направленности улавливает меньше шума земли при низких углах места, чем антенна с мелкой диаграммой. Факторы шумовой температуры антенны изображены на рисунке 7.

7. *Добротность приемника* (коэффициент G/T) – отношение усиления антенны к шумовой температуре – является показателем качества, используемым для характеристики производительности антенны (где G – коэффициент усиления приемной антенны; T – эффективная температура приемной системы или шумовая температура системы, объединяющая как шумовую температуру антенны, так и температуру малошумящего усилителя; G_{ant} – усиление антенны), и рассчитывается следующим образом:

$$G/T = G_{ant} - 10 \log_{10} T.$$

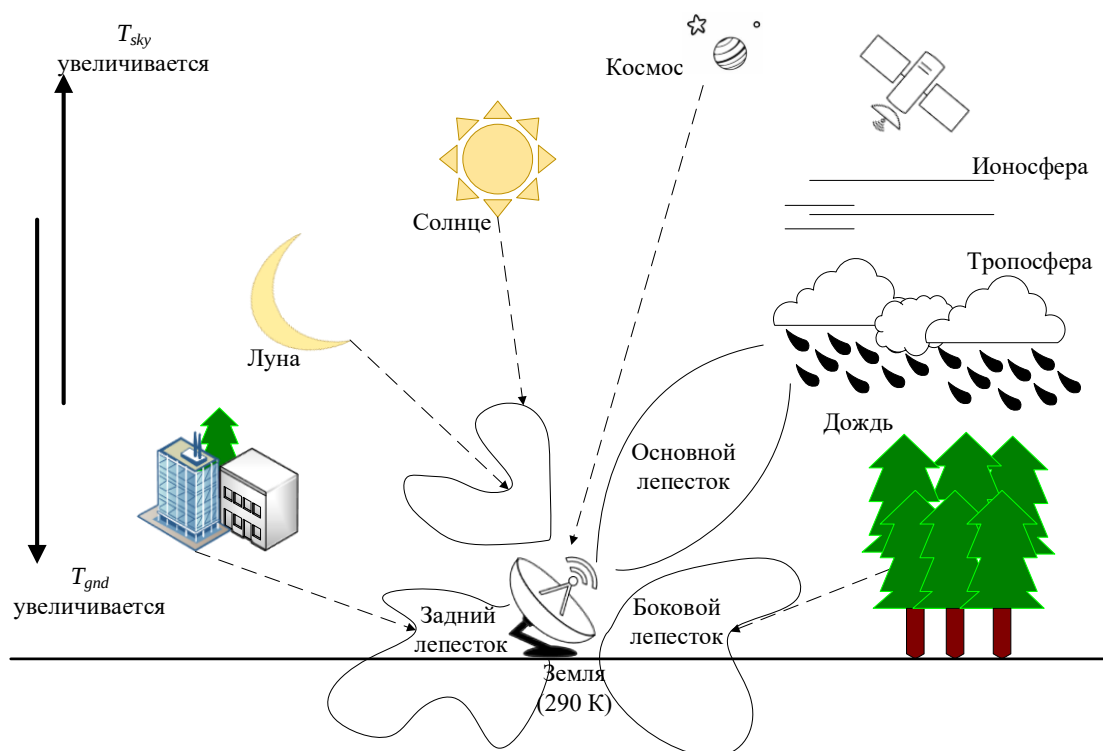


Рис. 7. Влияние окружающей среды на шумовую температуру антенны

8. *Снижение уровня мощности на усилителе.* Когда на вход усилителя мощности подается сигнал, происходит его усиление, в процессе которого генерируются нежелательные составляющие интермодуляции. Когда усилитель работает в линейной области, эти интермодуляционные составляющие не создают помех основным сигналам. Однако по мере приближения усилителя к точке насыщения и входа в нелинейную область работы интерференция усиливается, и эти интермодуляционные составляющие начинают создавать помехи основному сигналу, снижая качество выходного сигнала. Относительное снижение мощности может применяться либо на входе, либо на выходе усилителя.

9. *Помехи соседнего канала (ACI, аббр. от англ. Adjacent Channel Interference)* – интерференция, характеризующаяся нежелательными сигналами, поступающими из других частотных каналов, или энергией, привносимой в рассматриваемый канал. Возможность помех определяется модуляционным спектральным сглаживанием, а также шириной и формой основного спектрального лепестка сигналов.

10. *Атмосферные потери.* Осадки ослабляют радиоволны за счет рассеяния и поглощения энергии волны. Потери из-за дождя усиливаются с ростом частоты и более выражены в Ку-диапазоне по сравнению с С-диапазоном. Ослабление для горизонтальной поляризации значительно больше, чем для вертикальной. В Рекомендации Международного союза электросвязи Р.618 представлены методы прогнозирования различных параметров атмосферного распространения радиоволн, необходимые при планировании сетей связи «Земля – космос»⁶.

11. *Информация о спутнике* (орбитальная позиция, значение принимаемой добротности G/T , полученное от операторов спутниковой связи, и плотность

⁶ Recommendation P.618-14 // ITU. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en> (Accessed 05.02.2026).

мощности потока насыщения) помогает эффективно рассчитать бюджет линии спутниковой связи.

12. *Информация о несущей*, необходимая для анализа бюджета канала в обоих направлениях, включает: коэффициенты битовых ошибок (BER, аббр. от англ. Bit Error Rate) и спада, скорости кода и передачи данных, тип модуляции.

Расчет бюджета канала спутниковой связи

Целью проектирования спутниковой радиолинии является обеспечение возможности установления надежного канала связи между радиопередатчиком и соответствующим ему приемником⁷. Качество связи обычно оценивается по отношению мощности принимаемого несущего сигнала C к спектральной плотности шума N_0 , выраженному как $\frac{C}{N_0}$.

Определение мощности несущего сигнала как мощности на входе приемника рассчитывается по формуле:

$$C = P_R;$$
$$C = \left(\frac{P_T G_T}{L_T L_{FT}} \right) \left(\frac{1}{L_p} \right) \left(\frac{G_R}{L_R L_{FR} L_{Pol}} \right), \quad (1)$$

где P_T – мощность передатчика (Вт); G_T – коэффициент усиления передающей антенны; L_T – потери наведения передающей антенны; L_{FT} – потери в фидере между передатчиком и антенной на передающей стороне; L_p – потери при распространении, включающие потери в свободном пространстве и атмосферные затухания; G_R – коэффициент усиления приемной антенны; L_p – потери наведения приемной антенны; L_{FR} – потери в фидере между приемником и антенной на приемной стороне; L_{Pol} – потери за счет поляризационного рассогласования. Все потери и коэффициенты усиления указаны в линейном масштабе.

Определение спектральной плотности шума N_0 как произведения постоянной Больцмана k , равной $1,38 \times 10^{-23}$ (Дж/К) и шумовой температуры T_s , включающей шумы, генерируемые антенной и фидером, а также шум приемника, определяется выражением:

$$N_0 = kT_s. \quad (2)$$

Шумовая температура вычисляется по формуле:

$$T_s = T_{ant} + T_r,$$

где T_{ant} – температура, характеризующая мощность электромагнитного излучения, принимаемого антенной; T_r – температура, включающая шум самого приемника.

⁷ Satellite Communications Toolbox. Getting Started Guide. Math-Works. URL: https://mathworks.com/help/pdf_doc/satcom/satcom_gs.pdf (Accessed 06.02.2026).

В свою очередь, T_{ant} определяется выражением:

$$T_{ant} = T_{sky} + T_{gnd},$$

где T_{sky} – шумовая температура неба; T_{gnd} – шумовая температура земли.

С использованием выражений (1), (2) расчет отношения $\frac{C}{N_0}$ выполняется так:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_R}{N_0} = \left(\frac{P_T G_T G_R}{L_T L_{FT} L_P L_R L_{FR} L_{Pol}} \right) \cdot \left(\frac{1}{k T_S} \right) = \left(\frac{P_T G_T}{L_T L_{FT}} \right) \left(\frac{1}{L_P} \right) \left(\frac{G_R}{L_R L_{FR} L_{Pol}} \right) \left(\frac{1}{T_S} \right) \left(\frac{1}{k} \right).$$

Отношение $\frac{C}{N_0}$, выраженное в Гц, можно рассчитать так:

$$\frac{C}{N_0} = EIRP \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{G}{T} \cdot \frac{1}{k}.$$

Отношение $\frac{C}{N_0}$, выраженное в дБ, рассчитывается, следующим образом:

$$\begin{aligned} (C/N_0)_{дБ} &= 10 \log_{10}(C/N_0) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_T G_T}{L_T L_{FT}} \right) \left(\frac{1}{L_P} \right) \left(\frac{G_R}{L_R L_{FR} L_{Pol}} \cdot \frac{1}{T_S} \right) \left(\frac{1}{k} \right) = \\ &= P_T + G_T + G_R - L_T - L_{FT} - L_P - L_R - L_{FR} - L_{Pol} - 10 \log_{10} T_S - 10 \log_{10} k = \\ &= P_T + G_T + G_R - L_{Tx} - L_P - L_{Rx} - 10 \log_{10} T_S - 10 \log_{10} k, \end{aligned}$$

где L_{Tx} , L_{Rx} – сумма всех потерь на выходе передатчика и приемника (дБ), соответственно.

Важным фактором при проектировании спутниковой линии связи является ее энергетический резерв. Для облегчения вычисления пределов рабочего диапазона и энергетического резерва M следует различать требуемое $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{треб}}$ и принятое отношение $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{прин}}$ энергии бита к спектральной плотности шума, необходимое для получения заданной метрики BER. Через нее обычно выражаются заданные требования к достоверности передачи данных, которым должна соответствовать разрабатываемая линия связи. Для достижения требуемого значения BER в выбранной схеме модуляции необходимо корректно задать $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{треб}}$ и рассчитать $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{прин}}$:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{прин}} = \frac{C}{N_0} - 10 \log_{10}(R) - 60;$$

где R – пользовательская скорость передачи данных (Мбит/с).

Разность в децибелах между $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{прин}}$ и $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{треб}}$ дает энергетический резерв линии связи: $M = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{прин}} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{треб}}$.

Обзор приложения Satellite Communication Toolbox

Для реализации методики расчета бюджета канала спутниковой связи в пакете расширения Satellite Communication Toolbox предусмотрено приложение Satellite Link Budget Analyzer, представляющее собой графическую среду. Основное назначение приложения заключается в автоматизированном расчете параметров канала и их визуализации⁸. На рисунке 8 изображен интерфейс приложения Satellite Link Budget Analyzer; оно поддерживает два режима⁹:

- статический анализ (Static Link Budget Analyzer), при котором параметры системы считаются постоянными;
- анализ с учетом динамических сценариев (Time-Varying Budget Analyzer), в котором параметры канала изменяются во времени.

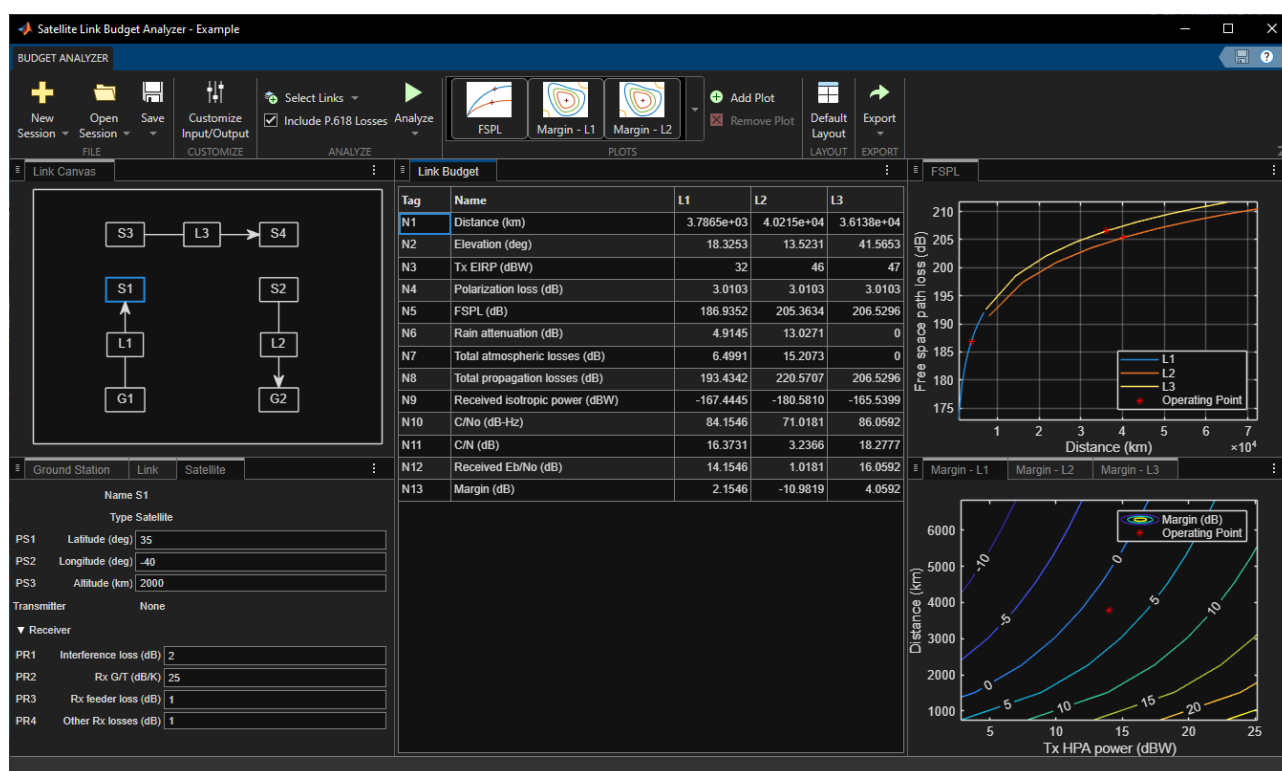


Рис. 8. Интерфейс приложения Satellite Link Budget Analyzer

В режиме статического анализа пользователь формирует модель спутникового канала путем добавления в рабочую область элементов передающей и приемной сторон (наземная станция, спутник и канал связи, соединяющий данные устройства), расположенных на вкладках Ground Station, Satellite, Link. На вкладке Link Canvas по умолчанию расположены три типа линии связи (рисунок 9):

- L1: Восходящая (Uplink) – от наземной станции G1 к спутнику S1;
- L2: Нисходящая (Downlink) – от спутника S2 к наземной станции G2;
- L3: Межспутниковая (Crosslink) – от спутника S3 к спутнику S4.

⁸ Satellite Communications Toolbox. Satellite Link Budget Analyzer. URL: <https://www.mathworks.com/help/satcom/ref/satellitelinkbudgetanalyzer-app.html> (Accessed 07.02.2026).

⁹ Satellite Communication Toolbox. Get Started with Satellite Link Budget Analyzer App. URL: <https://mathworks.com/help/satcom/gs/get-started-with-satellite-link-budget-app.html> (Accessed 07.02.2026).

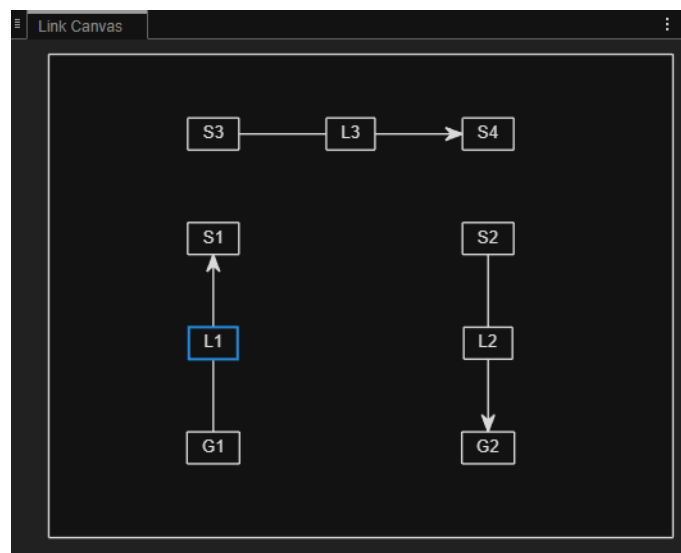


Рис. 9. Конфигурация вкладки Link Canvas

Для каждого элемента задаются соответствующие параметры: мощность передатчика, коэффициент усиления антенн, рабочая частота, полоса пропускания и шумовые характеристики приемника и др. (рисунок 10).

Link			Ground Station			Satellite		
Name L1			Name G1			Name S1		
Type Link			Type Ground Station			Type Satellite		
From G1			PG1 Latitude (deg) 42.3			PS1 Latitude (deg) 35		
To S1			PG2 Longitude (deg) -71.35			PS2 Longitude (deg) -40		
PL1 Frequency (GHz) 14			PG3 Altitude (m) 20			PS3 Altitude (km) 2000		
PL2 Bandwidth (MHz) 6			▼ Transmitter			Transmitter None		
PL3 Bit rate (Mbps) 10			PT1 Tx feeder loss (dB) 2			▼ Receiver		
PL4 Required Eb/No (dB) 10			PT2 Other Tx losses (dB) 3			PR1 Interference loss (dB) 2		
PL5 Polarization mismatch (deg) 45			PT3 Tx HPA power (dBW) 14			PR2 Rx G/T (dB/K) 25		
PL6 Implementation loss (dB) 2			PT4 Tx HPA OBO (dB) 6			PR3 Rx feeder loss (dB) 1		
PL7 Antenna mispointing loss (dB) 1			PT5 Tx antenna gain (dBi) 30			PR4 Other Rx losses (dB) 1		
PL8 Radome loss (dB) 1			Receiver None					

Рис. 10. Параметры, установленные на вкладках Ground Station, Satellite, Link

Приложение поддерживает анализ каналов спутниковой связи с помощью модели потерь при распространении радиоволн, описанной в упомянутой ранее рекомендации Р.618; к конфигурации рассчитываемых параметров добавляются также атмосферные потери, потери при распространении радиоволн. После установки параметров оно автоматически выполняет расчет (вкладка Link Budget) бюджета канала спутниковой связи.

Основными результатами анализа и оценки являются:

- расстояние между передатчиком и приемником (Distance);
- угол места (Elevation);
- эквивалентная изотропно излучаемая мощность ($T_x EIRP$);
- поляризационные потери (Polarization Loss);
- потери в свободном пространстве (FSPL);
- дождевые потери (Rain Attenuation);

- атмосферные потери (Total Atmospheric Losses);
- потери при распространении радиоволн (Total Propagation Losses);
- принятая изотропная мощность (Received Isotropic Power);
- отношение средней мощности принимаемого несущего сигнала к спектральной плотности шума ($\frac{C}{N_0}$);
- отношение сигнал/шум ($\frac{C}{N}$);
- отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума ($\frac{E_b}{N_0}$);
- энергетический резерв линии связи (Link Margin).

Данные вычисления производятся согласно стандартным формулам расчета бюджета канала спутниковой связи, некоторые из них являются внутренними функциями самой среды MATLAB, однако параметры и формулы можно редактировать с помощью вкладки Customize Input / Output (рисунок 11).

Tag	Name	Unit	Formula
N1	Distance	km	satcom.internal.linkbudgetApp.computeDistance(PG1, PG2, PG3, PS1, PS2, PS3*1e3)
N2	Elevation	deg	satcom.internal.linkbudgetApp.computeElevation(PG1, PG2, PG3, PS1, PS2, PS3*1e3)
N3	Tx EIRP	dBW	PT3 - PT4 - PT1 - PT2 + PT5 - PL9
N4	Polarization loss	dB	20 * abs(log10(cosd(PL6)))
N5	FSPL	dB	fspl(N1 * 1e3, physconst('LightSpeed') / (PL1*1e9))
N6	Rain attenuation	dB	satcom.internal.linkbudgetApp.computeRainAttenuation(PL5, PG1, PG2, PG3, PL1, N2, PT5)
N7	Total atmospheric losses	dB	satcom.internal.linkbudgetApp.computeTotalAtmLosses(PL5, PG1, PG2, PG3, PL1, N2, PT5)
N8	Total propagation losses	dB	N5+N7
N9	Received isotropic power	dBW	N3 - N4 - N8 - PR1 - PL8
N10	C/No	dB-Hz	N9 + PR2 - 10*log10(physconst('Boltzmann')) - PR3 - PR4
N11	C/N	dB	N10 - 10*log10(PL2) - 60
N12	Received Eb/No	dB	N10 - 10*log10(PL3) - 60
N13	Margin	dB	N12 - PL4 - PL7

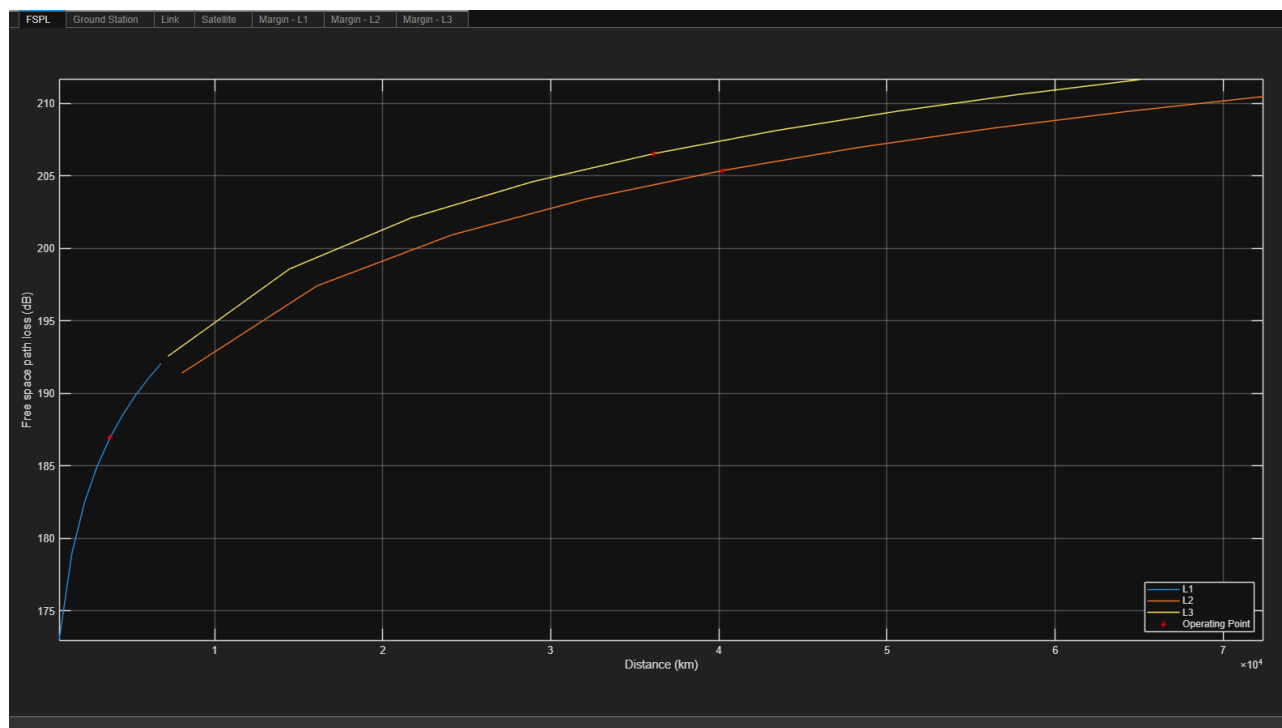
Рис. 11. Вкладка Customize Input / Output с используемыми формулами

В приложении Satellite Link Budget Analyzer по умолчанию можно отобразить два стандартных типа графиков:

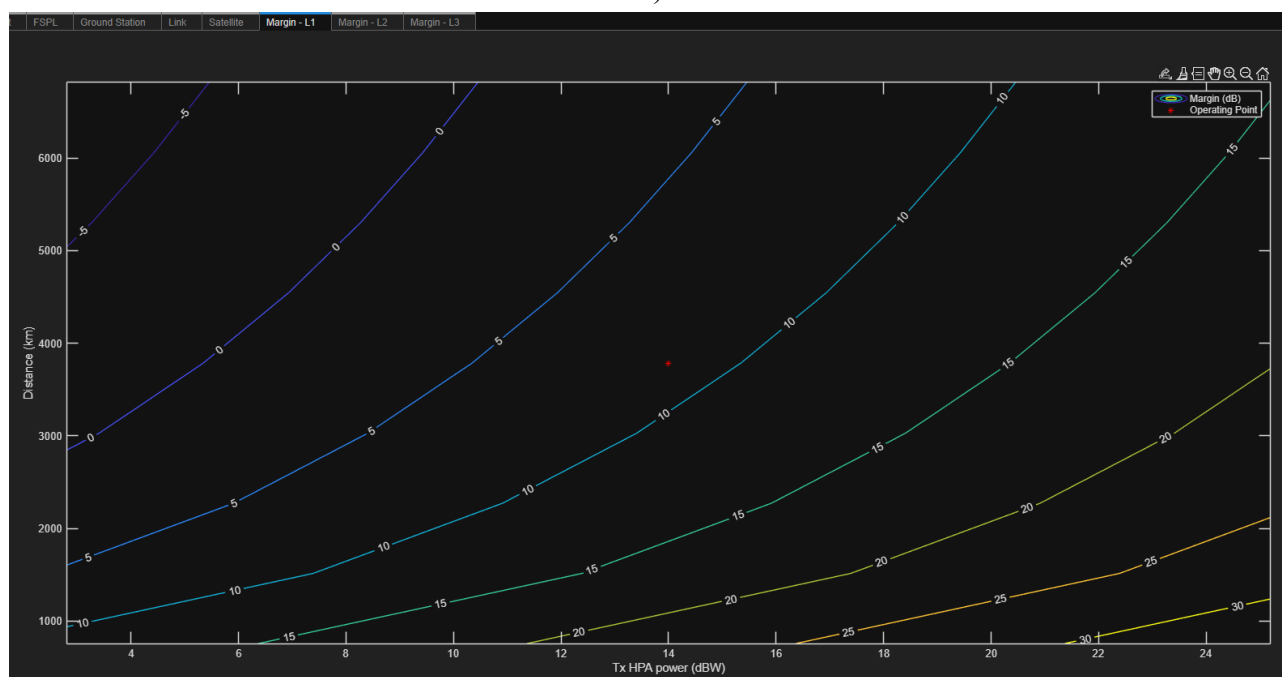
- потери в свободном пространстве;
- энергетический резерв линии связи.

Также оно позволяет создавать собственные графики для анализа бюджета канала спутниковой связи через кнопку Add Plot. Графики, отображающиеся по умолчанию, изображены на рисунке 12, результат анализа бюджета канала спутниковой связи – на рисунке 13.

Для анализа динамических спутниковых сценариев Satellite Link Budget Analyzer поддерживает интеграцию с объектами satelliteScenario, позволяющими моделировать орбитальное движение спутников, изменение расстояния до наземных станций и временную динамику видимости радиоволн.



a)



б)

Рис. 12. Графики из приложения Satellite Communication Toolbox, описывающие
а) потери в свободном пространстве; б) энергетический резерв линии связи

Пользователь может создать спутниковый сценарий в MATLAB, после чего выгрузить его в приложение¹⁰. Внедрение осуществляется либо напрямую

¹⁰ Satellite Communications Toolbox. Import Custom Scenario into Time-Varying Satellite Link Budget Analyzer. URL: <https://www.mathworks.com/help/satcom/ug/import-custom-scenario-in-satellite-link-budget-analyzer-app.html> (Accessed 10.02.2026).

из MATLAB, либо из файла с расширением «.mat». На рисунке 14 показан результат загрузки пользовательского сценария в Satellite Link Budget Analyzer.

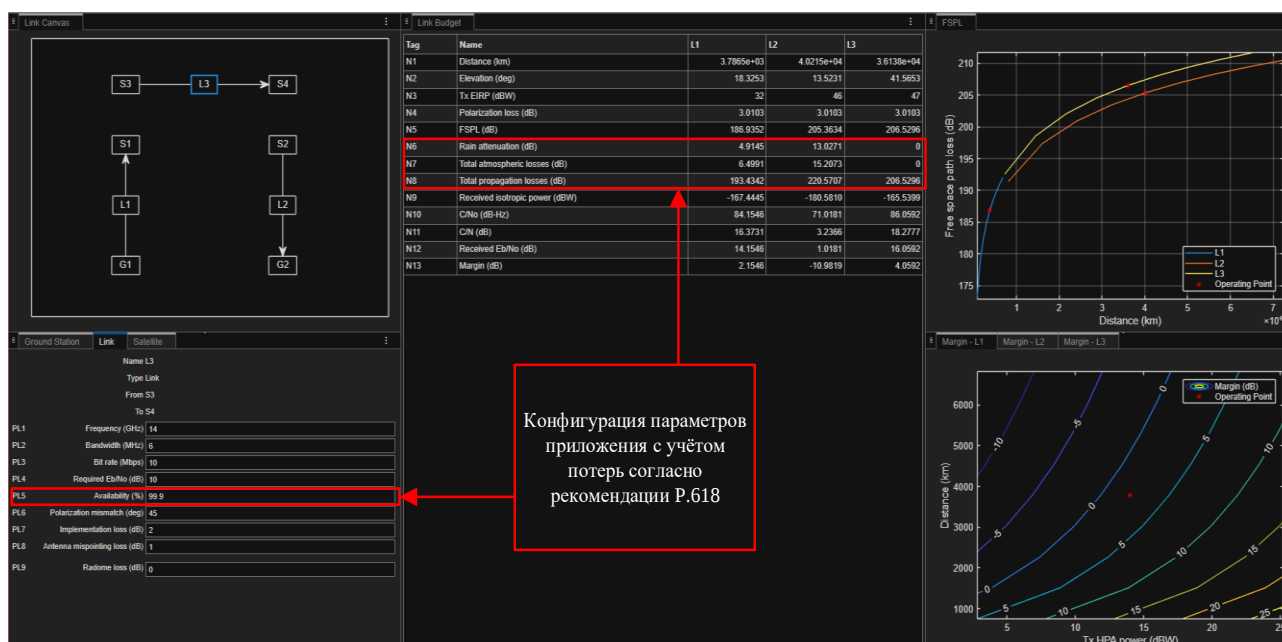


Рис. 13. Конфигурация используемых параметров

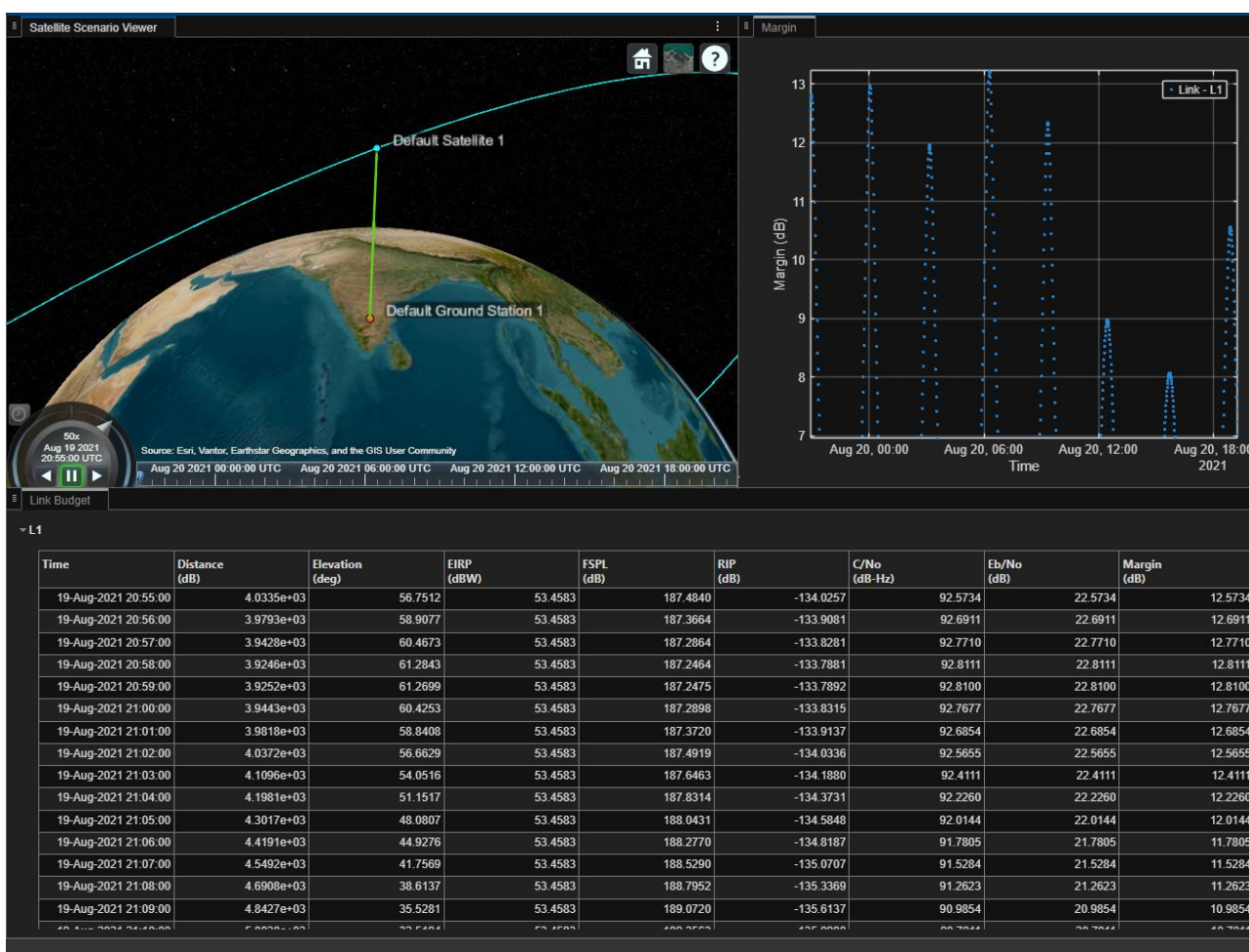


Рис. 14. Загрузка пользовательского спутникового сценария в приложение Satellite Link Budget Analyzer

После загрузки сценарий доступен для редактирования и анализа в графическом интерфейсе приложения. В режиме динамического анализа бюджет рассчитывается для каждого момента времени заданного интервала моделирования, что позволяет учитывать изменение геометрии канала связи, углов места и условий радиовидимости.

Заключение

В настоящей статье представлен обзор факторов, влияющих на бюджет канала спутниковой связи, описан порядок расчета самого бюджета. Проведен анализ ключевых факторов, влияющих на бюджет спутниковой линии связи. В рамках данного исследования были изучены физические основы пакета расширения Satellite Communication Toolbox, а также проанализированы возможности исследования бюджета радиолинии спутниковых систем связи в приложении Satellite Link Budget Analyzer.

Основным результатом данного исследования является графическая иллюстрация возможностей пакета расширения Satellite Communication Toolbox в лабораторных и практических работах для анализа динамических сценариев работы радиолиний спутниковой связи, а также численные инструменты научного обоснования количественных показателей для заданных режимов.

Литература

1. Al-Hraishawi H., Chougrani H., Kisseleff S., Lagunas E., Chatzinotas S. A Survey on Nongeostationary Satellite Systems: The Communication Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023. Vol. 25. Iss. 1. PP. 101–132. DOI: 10.1109/comst.2022.3197695. EDN: UUFWUD
2. Heo J., Sung S., Lee H., Hwang I., Hong D. MIMO Satellite Communication Systems: A Survey from the PHY Layer Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023 Vol. 25. Iss. 3. PP. 1543–1570. DOI: 10.1109/comst.2023.3294873. EDN: XDPGZP
3. Hwang Y., S.-M. Oh. Survey on Protocol Architectures for Cellular-based Low Earth Orbit Satellite Communications // Proceedings of the 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC, 11–13 October 2023, Jeju Island, Republic of Korea). 2023. PP. 1601–1603. DOI: 10.1109/ICTC58733.2023.10393800
4. Wang M., Nardin A., Ma R., Wang R., Dovis F., et al. Integrated Communication and Navigation Based on LEO Satellite Networks: A Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12. Iss. 22. PP. 46244–46268. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3601137
5. Bakhsh Z. M., Omid Y., Chen G., Kayhan F., Ma Y., et al. Multi-Satellite MIMO Systems for Direct Satellite-to-Device Communications: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2025. Vol. 27. Iss. 3. PP. 1536–1564. DOI: 10.1109/COMST.2024.3449430

6. Kruk S., Garcia-Martin P., Popescu M., Aussel B., Dillmann S., et al. The Impact of Satellite Trails on Hubble Space Telescope Observations // Nature Astronomy. 2023. Vol. 7. Iss. 3. P. 262–268. DOI: 10.1038/s41550-023-01903-3. EDN: QWVZNJ

7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: ИД «Вильямс», 2007. 1104 с.

**Статья поступила 06 марта 2026 г.
Одобрена после рецензирования 17 марта 2026 г.
Принята к публикации 04 мая 2026 г.**

Информация об авторах

Тишков Антон Олегович – ассистент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: tishkov.ao@sut.ru

Фокин Григорий Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: fokin.ga@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-1-21>
EDN: DQPSAM

Modeling of Satellite Communication Systems in Satellite Communications Toolbox: Link Budget Analysis

 A. Tishkov ,  G. Fokin

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. To analyze the simulation tools available in the Satellite Communication Toolbox expansion package for modeling the physical principles of the construction and operation of satellite communication systems in general and the link budget assessment in particular. The aim of the work is to prepare the groundwork for a training and methodological complex for studying the satellite segment of hybrid orbital-terrestrial communication networks. **Methods:** an overview of the simulation tools of the Satellite Communication Toolbox and their capabilities for studying the link budget of the satellite segment of hybrid orbital-terrestrial communication networks. **Novelty.** Unlike the works devoted to the study of the channel budget, the author's approach consists in the formalization of proposals for the use of the simulation tools of the Satellite Communication Toolbox in solving typical practical problems of estimating the satellite communication channel budget in order to consolidate the studied physical principles in laboratory and practical classes. **Results** of this work is the preparation of materials for studying the satellite communication channel budget for educational and methodological purposes. **Theoretical / Practical relevance:** the significance of the presented material lies in the improvement of the training and methodological complex for studying the principles of construction and functional features of modern and promising satellite communication systems.

Key words: Satellite Communications Toolbox, MATLAB, satellite communications, satellite link budget analysis

References

1. Al-Hraishawi H., Chougrani H., Kisseleff S., Lagunas E., Chatzinotas S. A Survey on Nongeostationary Satellite Systems: The Communication Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023. Vol. 25. Iss. 1. PP. 101–132. DOI: 10.1109/comst.2022.3197695. EDN: UUFWUD
2. Heo J., Sung S., Lee H., Hwang I., Hong D. MIMO Satellite Communication Systems: A Survey from the PHY Layer Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023 Vol. 25. Iss. 3. PP. 1543–1570. DOI: 10.1109/comst.2023.3294873. EDN: XDPGZP
3. Hwang Y., Oh S.-M. Survey on Protocol Architectures for Cellular-based Low Earth Orbit Satellite Communications // Proceedings of the 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC, 11–13 October 2023, Jeju Island, Republic of Korea). 2023. PP. 1601–1603. DOI: 10.1109/ICTC58733.2023.10393800
4. Wang M., Nardin A., Ma R., Wang R., Dovic F., et al. Integrated Communication and Navigation Based on LEO Satellite Networks: A Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12. Iss. 22. PP. 46244–46268. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3601137

5. Bakhsh Z. M., Omid Y., Chen G., Kayhan F., Ma Y., et al. Multi-Satellite MIMO Systems for Direct Satellite-to-Device Communications: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2025. Vol. 27. Iss. 3. PP. 1536–1564. DOI: 10.1109/COMST.2024.3449430

6. Kruk S., Garcia-Martin P., Popescu M., Aussel B., Dillmann S., et al. The Impact of Satellite Trails on Hubble Space Telescope Observations // Nature Astronomy. 2023. Vol. 7. Iss. 3. P. 262–268. DOI: 10.1038/s41550-023-01903-3. EDN: QWVZNJ

7. Sklar B. Digital Communication. Fundamentals and Application. Moscow: “Williams” Publ., 2007. 1104 p. (in Russian)

Information about Authors

Tishkov Anton – Assistant at the Department of Wireless Technologies and Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: tishkov.ao@sut.ru

Fokin Grigoriy – Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Wireless Technologies and Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: fokin.ga@sut.ru

УДК 004.056

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-22-34>

EDN: DIUDHK

Агентная система мониторинга процессов для поведенческого анализа и выявления аномальной активности на рабочих станциях

✉ Новикова Д. Д., Подвигин В. А.

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,
Москва, 119991, Российская Федерация

Постановка задачи. Значительная часть инцидентов информационной безопасности на рабочих станциях связана с запуском процессов, отклоняющихся от типичного поведения пользователей. Традиционные средства защиты, ориентированные на сигнатуры и сетевые события, не формируют поведенческий контекст выполнения приложений на конечных узлах, что затрудняет обнаружение редких процессов и нетипичных цепочек их порождения. **Целью работы** является повышение эффективности выявления отклонений в активности пользовательских процессов за счет разработки агентной системы мониторинга, обеспечивающей накопление истории выполнения процессов и анализ их типичности на уровне рабочих станций. **Используемые методы.** Решение задачи основано на агентно-серверной архитектуре, включающей сбор временных срезов состояния процессов, формирование сессий процессов, накопительное хранение данных и детерминированный анализ. Для выявления отклонений используются оценка редкости процессов на основе статистики их появления, анализ цепочек порождения «родитель – дочерний процесс» и правила выявления комбинированных отклонений без применения машинного обучения. Элементом **новизны** является детерминированный подход к поведенческому анализу процессов на рабочих станциях, основанный на сочетании накопительного хранилища сессий, справочников допустимых процессов и цепочек их порождения, а также централизованной серверной логики выявления отклонений. В отличие от существующих решений, анализ ориентирован на оценку типичности активности, а не на классификацию вредоносности. **Результат.** Разработан прототип для Windows, включающий клиентский агент и серверное приложение на базе FastAPI и SQLite. Система собирает и хранит историю выполнения процессов, выявляет редкие и нетипичные запуски, формирует оповещения. Функциональная валидация показала корректность реализованных правил аналитики и возможность формирования информативных сигналов о нетипичной активности. **Теоретическая / Практическая значимость:** предложенный подход позволяет формировать поведенческий контекст активности процессов на рабочих станциях и использовать его в качестве дополнительного источника данных для систем мониторинга и анализа безопасности, включая SIEM и SOC, повышая эффективность выявления новых и нетипичных сценариев работы пользователей.

Ключевые слова: мониторинг процессов, информационная безопасность, поведенческий анализ, агентная система, классификация приложений, пользовательская активность, аномальные процессы

Библиографическая ссылка на статью:

Новикова Д. Д., Подвигин В. А. Агентная система мониторинга процессов для поведенческого анализа и выявления аномальной активности на рабочих станциях // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 1. С. 22–34. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-22-34. EDN: DIUDHK

Reference for citation:

Novikova D., Podvigin V. Agent-Based System for Process Monitoring, Behavioral Analysis, and Anomalous Activity Detection on Workstations // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 1. PP. 22–34. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-22-34. EDN: DIUDHK

Введение

В корпоративных информационных системах значительная часть инцидентов информационной безопасности связана с поведением процессов на рабочих станциях пользователей. Использование несанкционированных и скрытых приложений, а также запуск вредоносных или нежелательных программ нередко остаются вне поля зрения традиционных средств защиты, ориентированных преимущественно на анализ сетевой активности и обобщенных показателей использования вычислительных ресурсов [1].

Классические системы мониторинга операционных систем (ОС), журналы событий и средства централизованного сбора телеметрии предоставляют информацию о фактах запуска процессов и использовании ресурсов, однако, как правило, не обеспечивают накопление и анализ полной истории выполнения процессов и их поведенческих характеристик. Современные системы класса SIEM (*аббр. от англ.* Security Information and Event Management – управление информацией и событиями безопасности) обеспечивают централизованный сбор, нормализацию и корреляцию событий безопасности из различных источников¹. Однако их эффективность во многом зависит от полноты и качества исходных данных, которые поступают с конечных узлов [2]. Это осложняет обнаружение редких запусков, нетипичных цепочек порождения процессов и отклонений от характерных профилей пользовательской активности [3].

Системы класса Sysmon в сочетании с платформами централизованного сбора и анализа системных данных (ELK Stack, Wazuh и др.) обеспечивают высокую детализацию событий на конечных узлах, регистрируя создание процессов, сетевые соединения и изменения в файловой системе [4], однако требуют значительных ресурсов на последующую обработку, корреляцию и интерпретацию данных. Системы мониторинга пользовательской активности (Staffcop, Kickidler и др.) ориентированы преимущественно на контроль продуктивности и действий пользователей², но практически не решают задачу выявления аномальных цепочек процессов и редких приложений. В связи с этим сохраняется потребность в простых агентных решениях, ориентированных на поведенческий анализ процессов, оценку их редкости и выявление нетипичных цепочек порождения.

Дополнительным фактором актуальности данной задачи является рост количества удаленных работников и пользовательских приложений, а также распространение практик теневых информационных технологий, при которых пользователи устанавливают и используют программное обеспечение (ПО) вне централизованного контроля. В таких условиях анализ только сетевых потоков или сигнатур вредоносного ПО оказывается недостаточным, а контроль на уровне конечных узлов требует более детального и контекстного подхода [5].

¹ Архитектура и компоненты SIEM-систем: комплексный подход к защите информации // SecurityLab. 05.06.2024. URL: <https://www.securitylab.ru/analytics/559520.php> (дата обращения 05.01.2026).

² ТОП-26 программ мониторинга и контроля работы сотрудников за компьютером 2024. Полный обзор // Хабр. 31.07.2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/751420> (дата обращения 10.03.2025).

Целью данной работы являются разработка и исследование агентной системы, собирающей данные о пользовательских процессах в определенные моменты времени и анализирующей их историю; для ее достижения решаются следующие задачи:

- организация сбора первичных данных о процессах на рабочих станциях;
- формирование хранилища событий, отражающего историю выполнения процессов;
- реализация методов аналитической обработки, направленных на обнаружение редких и потенциально аномальных процессов;
- визуализация результатов мониторинга и аналитики для специалистов по информационной безопасности.

В отличие от традиционных методов мониторинга, фиксирующих преимущественно отдельные события запуска или сводные показатели использования ресурсов, предлагаемый подход акцентирует внимание на формировании поведенческого контекста процессов и пользователей на основе собранной истории выполнения и анализа цепочек запуска процессов. Это позволяет оценивать, насколько активность является редкой и нетипичной для конкретных рабочих станций и отдельных пользователей, не прибегая при этом к сложным методам машинного обучения.

Методы исследования

В работе использован агентно-серверный подход к мониторингу активности процессов на рабочих станциях. Архитектура системы проектировалась с учетом разделения ответственности между компонентами: клиентский агент выполняет исключительно сбор первичных данных, серверная часть отвечает за хранение и аналитическую обработку, веб-интерфейс предназначен для визуализации результатов.

Ключевым принципом системы является использование периодических временных срезов состояния процессов в качестве основного формата данных для хранения и аналитической обработки. События запуска и завершения процессов применяются вспомогательно – для фиксации момента начала сессии процесса и корректного определения его жизненного цикла. Общая схема взаимодействия компонентов представлена на рисунке 1.

Клиентский агент написан на языке программирования Python и предназначен для работы в среде Windows. Сведения о процессах и системных метриках извлекаются штатными средствами ОС и с помощью специализированных библиотек.

Сбор данных осуществляется двумя взаимодополняющими способами.

1. Подписка на события запуска и завершения процессов, реализованная с использованием технологии Windows Management Instrumentation (WMI), позволяет фиксировать момент запуска процесса и корректно определять его принадлежность к конкретной сессии.

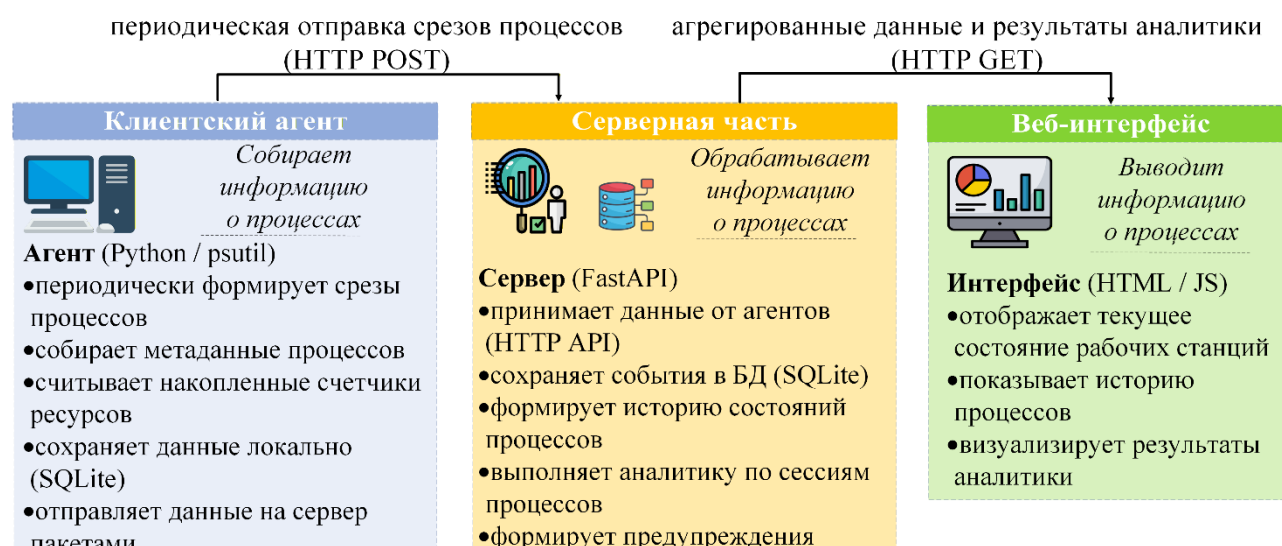


Рис. 1. Общая архитектура системы мониторинга активности процессов

2. Периодическое формирование срезов состояния каждого активного процесса происходит с заданным интервалом, агент считывает: идентификаторы процесса (PID) и родительского процесса (PPID); имя и путь к исполняемому файлу; имя учетной записи пользователя, под которым запущен процесс; время запуска процесса; текущее время снятия среза; накопленные значения счетчиков использования процессора и операций ввода / вывода; текущее потребление оперативной памяти; признаки сетевой активности.

Для получения этой информации используется библиотека psutil, предоставляющая удобный и безопасный доступ к системным метрикам без значительной нагрузки на систему³. Агент не занимается локальной аналитической обработкой и не классифицирует процессы по степени подозрительности, что снижает его ресурсоемкость и полностью исключает влияние логики анализа на рабочую станцию пользователя.

На случай временной недоступности сервера предусмотрено буферирование данных на стороне клиента. Сформированные срезы накапливаются в локальной базе данных SQLite в виде очереди событий; каждая запись помечается флагом успешной передачи. При сетевых сбоях или остановке серверного компонента данные продолжают накапливаться локально. После восстановления соединения агент автоматически досылает накопленные записи пакетами, что обеспечивает непрерывность истории мониторинга без потери данных.

Серверная часть системы реализована на Python с использованием фреймворка FastAPI, предназначенного для построения программного интерфейса (API, аббр. от англ. Application Programming Interface) в архитектурном стиле REST (аббр. от англ. Representational State Transfer – репрезентативная передача состояния) поверх протокола HTTP(S)⁴.

³ psutil documentation // psutil. URL: <https://psutil.readthedocs.io/stable> (Accessed 12.01.2026).

⁴ Руководство по веб-фреймворку FastAPI // METANIT.COM. URL: <https://metanit.com/python/fastapi> (дата обращения 12.01.2026).

В качестве подсистемы хранения данных используется встраиваемая реляционная база данных SQLite, что соответствует требованиям к простоте и автономности решения⁵. Все поступающие данные сохраняются в виде событий – временных срезов состояния процессов. Хранилище имеет накопительный характер: новые записи добавляются, ранее сохраненные не изменяются. Такой подход обеспечивает возможность последующего анализа поведения процессов во времени.

В качестве базовой аналитической единицы выступает сессия процесса, определяемая комбинацией имени компьютера, идентификатора процесса и времени его запуска. Это позволяет корректно рассматривать один и тот же процесс, присутствующий во множестве срезов, как единый логический запуск, избегая искажения статистики при подсчете количества процессов или оценке их редкости. На уровне рабочих станций и пользователей накопленные сессии агрегируются в поведенческие профили, содержащие информацию о частоте запуска приложений, типичных цепочках порождения процессов и характерных показателях использования ресурсов.

Аналитическая обработка данных осуществляется исключительно на сервере. В базе хранятся только исходные значения накопительных счетчиков (времени использования процессора, операций ввода / вывода и т. п.); производные показатели, например прирост потребления процессорного времени между соседними срезами (разностный показатель), рассчитываются непосредственно при выполнении аналитического запроса.

В работе реализованы следующие базовые методы аналитики.

Оценка редкости процессов основана на количестве уникальных сессий запуска исполняемых файлов (по хеш-сумме или пути к файлу). Процесс считается редким, если имеет низкую частоту появления в истории наблюдений конкретной рабочей станции или группы станций. Дополнительно процесс помечается как неизвестный, если отсутствует в справочнике процессов – в этом случае формируется оповещение, даже если частота запусков в истории высока. Такой подход позволяет выделять как статистически редкие, так и заведомо не доверенные запуски.

Анализ цепочек порождения процессов на базе отношений «родитель – дочерний процесс» позволяет выявить как нетипичную статистически редкую цепочку (отсутствующую в истории наблюдений или в справочнике доверенных цепочек, встречающуюся с низкой частотой, даже если отдельные процессы в ней известны), так и заведомо не доверенные сценарии запуска.

Правила анализа поведения процессов включают оценку аномального потребления процессорного времени, памяти, накопленных показателей операций чтения и записи данных на диск и сетевой активности без применения методов машинного обучения.

Выявление нетипичного времени запуска процессов (например, в нерабочие часы) и *проверка соответствия ролевой модели* (запуск непрофильного ПО на данной рабочей станции) расширяют базовые правила, обеспечивая дополнительный контекст для обнаружения аномалий.

⁵ Python и базы данных. Подключение к SQLite // METANIT.COM. URL: <https://metanit.com/python/database/1.1.php> (дата обращения 12.01.2026).

Параметры функционирования системы определяются конфигурацией серверной части. Критерием редкости процесса или цепочки запуска является наличие не более трех уникальных наблюдений за 14 суток. Формирование статистически достоверного временного профиля требует выборки объемом не менее 20 записей.

Пороговые значения ресурсных показателей задаются коэффициентами превышения базовой линии: для процессорного времени – в пять раз; для операций ввода / вывода – в 10 раз; для объема резидентной памяти – в три раза; для сетевой активности – в пять раз.

В текущей версии системы ролевая модель оперирует типами процессов; при этом точность идентификации напрямую зависит от полноты справочника приложений. Такой подход позволяет сохранять высокую производительность, оставляя возможность для детализации контроля на уровне отдельных программных продуктов в ходе настройки системы.

Результаты аналитики фиксируются в виде оповещений, содержащих информацию о процессе, рабочей станции, пользователе, типе отслеживаемой метрики и причине, по которой поведение было признано отклоняющимся от нормы. В зависимости от типа сработавшего правила оповещение может формироваться как по отдельной сессии процесса, так и по нетипичной цепочке его порождения. Для снижения шума и исключения повторяющихся сигналов предусмотрен механизм дедупликации оповещений по временным интервалам и контексту.

Веб-интерфейс системы создан с использованием HTML и JavaScript и предназначен для визуализации текущего состояния рабочих станций, запущенных процессов и результатов аналитики. Он получает агрегированные данные и оповещения от серверной части и не выполняет самостоятельных вычислений, что позволяет централизовать всю логику анализа на сервере.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Проведенные испытания позволили оценить применимость разработанного прототипа, проанализировать его ресурсоемкость и подтвердить корректность аналитической логики.

Экспериментальный стенд состоял из пяти узлов – четырех клиентских рабочих станций под управлением Windows 10 Pro 22H2 (x64) и одного сервера под управлением Windows 11 Pro 25H2 (x64). На всех устройствах работал агент мониторинга. Каждому узлу назначена одна из пяти ролей: разработчик, аналитик данных, бухгалтер, специалист по информационной безопасности и сервер.

На каждом узле стенда было установлено ПО, соответствующее его роли, в целом стенд включал в себя браузеры, текстовые редакторы, среды разработки, средства аналитики и визуализации данных, офисный пакет, инструменты сетевого анализа и информационной безопасности, утилиты управления базами данных и проектами. Каждое приложение отнесено к одному из типов процессов; для каждой роли определен перечень разрешенных типов.

Основные характеристики разработанного прототипа приведены в таблице 1. Полученные значения демонстрируют низкую ресурсоемкость клиентского агента и умеренную нагрузку на серверную часть, что позволяет использовать решение на рабочих станциях без заметного влияния на производительность.

Таблица 1. Основные характеристики прототипа агентной системы

Параметр	Значение	Примечание
Конфигурация узла стенда	Intel Core i5-4460 / 8 ГБ ОЗУ	Типовая конфигурация рабочей станции
Потребление процессора агентом, %	0–1	В режиме периодического сбора
Потребление процессора сервером, %	0–1	При обработке данных от пяти агентов
Потребление ОЗУ* агентом, МБ	14–22	По данным диспетчера задач Windows
Потребление ОЗУ сервером, МБ	45–60	По данным диспетчера задач Windows
Сетевая нагрузка (агент), Мбит/с	< 1	При передаче срезов
Объем генерируемых событий, событий / час	~ 1000	Суммарно для пяти рабочих станций
Время ответа сервера (API), мс	< 200	При одновременной нагрузке

*ОЗУ – оперативное запоминающее устройство (оперативная память).

Для проверки корректности реализованных правил аналитической обработки была проведена функциональная валидация системы на наборе контрольных сценариев. В отличие от количественной оценки чувствительности в данном случае проверяется соответствие фактической реакции системы заложенной логике обнаружения отклонений.

Контрольные сценарии отражают ключевые условия срабатывания правил редкости процессов и нетипичных цепочек их порождения, а также особенности их совместной работы и поведения при накоплении истории наблюдений. Результаты валидации приведены в таблице 2.

Результаты функциональной валидации подтверждают, что реализованные правила аналитики корректно отражают заложенную в систему логику выявления отклонений. Предупреждение формируется не как результат классификации, а как реакция на несоответствие наблюдаемой активности накопленному профилю или справочным данным.

Важно отметить, что в системе используется пороговая модель редкости. Это означает, что отсутствие процесса или цепочки в справочниках само по себе не гарантирует формирование оповещения. Предупреждение возникает только при одновременном выполнении условия новизны и малого числа наблюдений. По мере накопления истории соответствующие объекты могут перестать считаться редкими, и отдельные срабатывания по этому правилу прекращаются. При

этом отсутствие объекта в справочниках продолжает фиксироваться на уровне интерфейса мониторинга (в виде маркировки процесса как неизвестного), что позволяет специалисту по информационной безопасности сохранять видимость потенциально значимых отклонений даже после снижения частоты оповещений.

Таблица 2. Правила формирования предупреждений об аномальной активности процессов

Контрольный сценарий	Условия в текущей реализации	Реакция системы
Процесс отсутствует в справочнике и редко встречался на рабочей станции	Число наблюдений процесса не превышает установленный порог	Формируется предупреждение по признаку редкости; процесс помечается как неизвестный
Цепочка «родитель – дочерний процесс» ранее не наблюдалась	Число наблюдений цепочки не превышает установленный порог	Формируется предупреждение по признаку редкости цепочки
Одновременно редкий процесс и редкая цепочка его запуска	Выполняются оба условия редкости	Формируются оба предупреждения с признаком «комбинированная аномалия», повышается важность
Процесса или цепочки ранее не было в справочнике, но они часто наблюдаются	Число наблюдений превышает установленный порог	Предупреждение по редкости может не формироваться, хотя объект остается вне справочника
Типовая активность, соответствующая накопленной истории	Процесс и цепочка хорошо известны системе	Срабатывания по правилам редкости не ожидаются; возможны только предупреждения по другим критериям (нагрузка, поведение)

Комбинированные срабатывания представляют собой ситуацию одновременного выполнения условий редкости процесса и нетипичности цепочки его порождения. Такие предупреждения получают дополнительный признак и повышенный уровень важности, что позволяет выделять наиболее значимые отклонения.

Количественная оценка эффективности обнаружения потребовала проведения дополнительной серии контролируемых экспериментов на трех узлах стенда: рабочих станциях с ролями «бухгалтер» и «разработчик», а также на серверном узле. Следует оговориться, что системные исполняемые файлы Windows (в том числе cmd.exe и powershell.exe) исключаются из мониторинга на уровне агента по архитектурному решению для снижения фоновых шумов от служебных процессов ОС. В связи с этим тестирование цепочек порождения выполнялось на уровне пользовательских приложений.

Программа эксперимента охватила пять аномальных сценариев и семь проверок штатной активности. Аномальные сценарии включали: запуск нового процесса через нетипичную цепочку порождения (WINWORD.EXE → ProcessHacker.exe); запуск ранее не наблюдавшегося процесса (Process Hacker) без нетипичной цепочки; нарушение ролевой модели (запуск процесса типа

«утилита» на рабочей станции бухгалтера); запуск приложения в нетипичный час; аномальное потребление процессорного времени. Контроль штатной активности подразумевал типичную работу браузера, текстового редактора и табличного процессора на рабочей станции бухгалтера, среды разработки на рабочей станции разработчика, а также браузера и почтового клиента на серверном узле.

По результатам эксперимента (таблица 3) получены следующие значения метрик качества обнаружения точности (Precision), полноты (Recall) и F -меры (F_1):

$$TP = 5; TN = 5; FP = 1; FN = 0,$$

где TP (True Positive) – истинно положительный результат; TN (True Negative) – истинно отрицательный результат; FP (False Positive) – ложноположительный результат; FN (False Negative) – ложноотрицательный результат,

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{5}{6} \approx 0,833,$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{5}{5} = 1,000,$$

$$F_1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \approx 0,909.$$

Таблица 3. Результаты контролируемого эксперимента по оценке качества обнаружения

№	Сценарий	Узел	Ожидалось оповещение	Фактическое оповещение	Итог
1	Нетипичная цепочка «WINWORD.EXE → ProcessHacker.exe»	Бухгалтер	Да	Да	ТР
2	Новый процесс (ProcessHacker.exe)	Сервер	Да	Да	ТР
3	Нарушение ролевой модели	Бухгалтер	Да	Да	ТР
4	Нетипичное время запуска	Бухгалтер	Да	Да	ТР
5	Аномальное потребление процессора	Разработчик	Да	Да	ТР
6	Штатная работа: браузер, Word, Excel	Бухгалтер	Нет	Нет	TN
7	Штатная работа: VS Code, PyCharm	Разработчик	Нет	Нет	TN
8а	Штатная работа: браузер	Сервер	Нет	Нет	TN
8б	Штатная работа: Outlook	Сервер	Нет	Да	FP

Единственное ложное срабатывание (строка 8б) произошло на почтовом клиенте Outlook на серверном узле: приложение не значилось в справочнике процессов до начала эксперимента и ни разу не запускалось в подготовительный период. Система корректно идентифицировала его как неизвестный процесс и

сформировала оповещение. Данный случай иллюстрирует типичное поведение системы при неполном комплектовании справочника: в реальной эксплуатации подобные ситуации минимизируются в ходе первичной настройки и последующего расширения базы процессов.

Описанное поведение системы схематично показано на рисунке 2: число оповещений постепенно снижается по мере накопления истории наблюдений и стабилизируется на фоновом уровне.

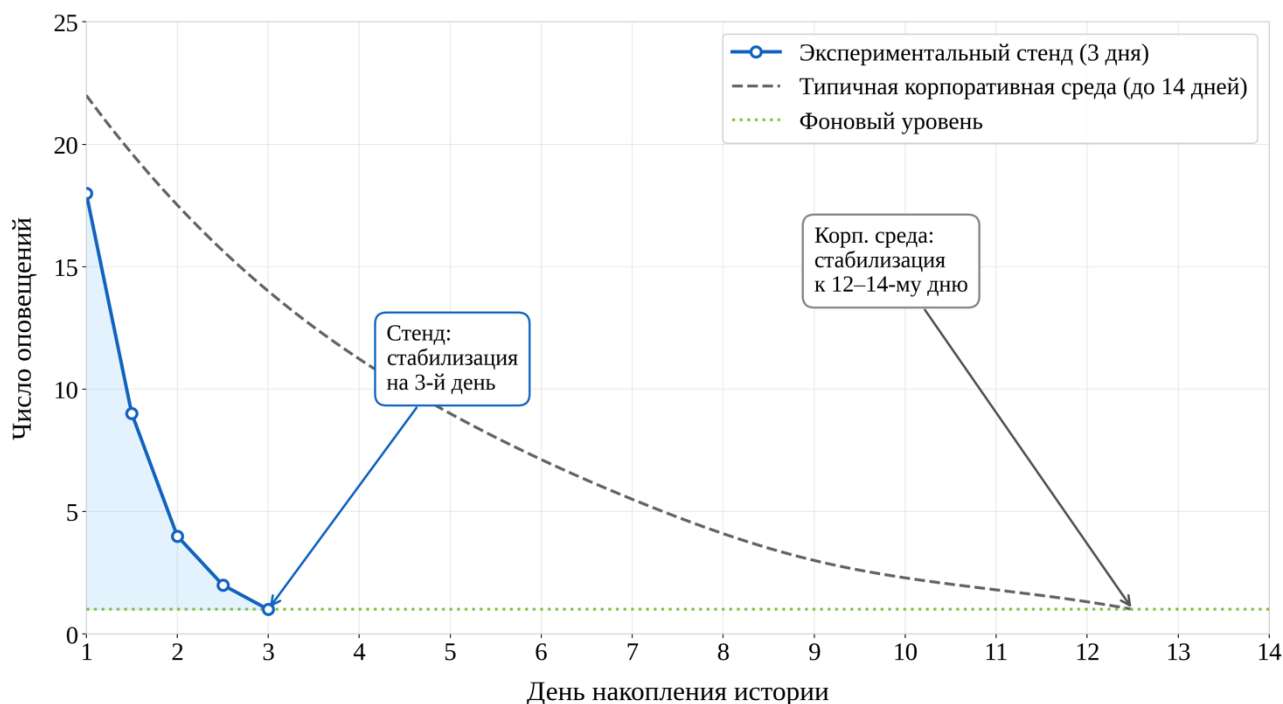


Рис. 1. Схема динамики числа оповещений в период накопления данных

На начальном этапе эксплуатации система фиксирует повышенное число оповещений — это ожидаемое поведение, обусловленное пороговой моделью редкости: большинство процессов еще не накопили достаточной истории наблюдений. По мере формирования последней количество оповещений снижается и стабилизируется на фоновом уровне, соответствующем действительно нетипичным событиям. На экспериментальном стенде с ограниченным составом ПО этот процесс занял около трех дней; в реальной корпоративной среде с более широким набором приложений период стабилизации может составлять от одной до двух недель.

Заключение

В статье рассмотрен подход к мониторингу пользовательских процессов на рабочих станциях, базирующийся на агентной схеме сбора данных: фиксации состояний системы в определенные моменты времени и анализе истории запуска приложений. В отличие от более сложных инструментов динамического анализа⁶, этот метод не использует механизмы, создающие значительную вычислительную

⁶ Malware analysis explained // CrowdStrike. URL: <https://www.crowdstrike.com/en-us/cybersecurity-101/malware/malware-analysis> (Accessed 16.03.2026).

нагрузку. Апробация на стенде из пяти рабочих станций под управлением Windows показала, что система работает незаметно для пользователей даже в периоды наиболее активного сбора данных.

Предлагаемый подход целесообразно рассматривать не как самостоятельное средство защиты, а как компонент системы мониторинга, формирующий дополнительный поведенческий контекст. Сформированные оповещения могут использоваться в составе систем класса SIEM и в работе специалистов центров мониторинга и реагирования в качестве источника дополнительной информации об активности на конечных узлах. Наличие сведений о редкости процесса и особенностях цепочки его порождения позволяет повысить приоритет отдельных событий и упростить их последующий анализ, снижая нагрузку на аналитиков.

В дальнейшем планируется углубить поведенческий анализ, обеспечить поддержку российских ОС и интегрировать разработанное решение с корпоративными системами централизованного управления. Перспективным направлением является более детальный анализ цепочек запуска с учетом параметров командной строки и обращений процессов к файловой системе, что позволит не только фиксировать нетипичные запуски, но и точнее оценивать их потенциальную опасность.

Литература

1. Николаенко В. Г., Васенева В. А., Зубарева Е. В., Рудикова М. Н. Система мониторинга событий операционной системы // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 5-2 (10). С. 63–65. EDN: YFTQFP
2. Аль-Тамими М., Хассан М. Б., Пазников А. А., Аль-Хайкани М. Н., Альбадрави Е. Б. Обзор систем обнаружения вторжений // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17. № 4. С. 30–41. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-30-41
3. Denysiuk D., Sochor T., Kapustian M., Kashtalian A., Savenko O. Methods for Detecting Software Implants in Corporate Networks // Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security (IntelITSIS'2024, March 28, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine). CEUR Workshop Proceedings. 2024. Vol. 3675. PP. 270–284.
4. Костиков Е. В. Методы анализа логов Sysmon для обнаружения киберугроз // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. №. 11. С. 25–34. EDN: BPEPSL
5. Portase R. M., Muntea A. M., Mermeze A., Colesa A., Sebestyen G. Detection Strategies for COM, WMI, and ALPC-Based Multi-Process Malware // Sensors. 2024. Vol. 24. Iss. 16. P. 5118. DOI: 10.3390/s24165118

Статья поступила 03 апреля 2026 г.
Одобрена после рецензирования 07 мая 2026 г.
Принята к публикации 28 мая 2026 г.

Информация об авторах

Новикова Дарья Дмитриевна – студент 4-го курса факультета комплексной безопасности ТЭК Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. E-mail: d.dy0nth@gmail.com

Подвигин Василий Александрович – преподаватель кафедры безопасности информационных технологий Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. E-mail: podvigin.v@gubkin.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-22-34>
EDN: DIUDHK

Agent-Based System for Process Monitoring, Behavioral Analysis, and Anomalous Activity Detection on Workstations

 D. Novikova ,  V. Podvigin

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
Moscow, 119991, Russian Federation

Problem statement. A significant share of information security incidents on workstations is associated with process execution that deviates from typical user behavior. Traditional protection tools focused on signatures and network events do not provide behavioral context at the endpoint level, which limits the detection of rare processes and atypical parent – child process chains. **The aim of the study** is to improve the effectiveness of detecting deviations in user process activity by developing an agent-based monitoring system that accumulates process execution history and evaluates its typicality on workstations. **Methods.** The solution is based on an agent – server architecture including periodic collection of process state snapshots, process session construction, accumulative storage, and rule-based server-side analysis. Detection relies on process rarity assessment based on occurrence frequency, analysis of parent–child process chains, and rule-based identification of combined deviations without using machine learning methods. **The novelty** lies in a rule-based approach to behavioral analysis of processes on workstations based on the combination of a cumulative session storage, catalogs of allowed processes and process chains, and centralized server-side deviation detection logic. In contrast to existing approaches, the analysis focuses on assessing activity typicality rather than classifying maliciousness. **Results.** A prototype system for the Windows operating system has been developed, including a lightweight client agent and a server application based on FastAPI and SQLite. The system collects and stores process execution history, detects rare and atypical process launches, and generates alerts. Functional validation confirmed the correctness of the implemented analytical rules and the ability to generate informative signals of atypical activity. **Practical significance.** The proposed approach enables the formation of behavioral context of process activity on workstations and can be used as an additional data source for security monitoring and analysis systems, including SIEM and SOC, improving the detection of new and atypical user activity scenarios.

Key words: process monitoring, information security, behavioral analysis, agent-based system, application classification, user activity, anomalous processes

References

1. Nikolaenko V., Vasenyova V., Zubareva E., Rudikova M. Monitoring System of the OS's Events // National Association of Scientists. PP. 63–65. (in Russian) EDN: YFTQFP
2. Al-Tameemi M., Hassan M. B., Paznikov A. A., Al-Khaykanee M. N., Albadrawi E. B. Review of Intrusion Detection Systems // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17. Iss. 4. PP. 30–41. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-30-41
3. Denysiuk D., Sochor T., Kapustian M., Kashtalian A., Savenko O. Methods for Detecting Software Implants in Corporate Networks // Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security (IntelITSIS'2024, March 28, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine). CEUR Workshop Proceedings. 2024. Vol. 3675. PP. 270–284.
4. Kostikov E. V. Sysmon Log Analysis Methods for Cyber Threat Detection // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Vol. 12. Iss. 11. PP. 25–34. (in Russian) EDN: BPEPSL
5. Portase R. M., Muntea A. M., Mermeze A., Colesa A., Sebestyen G. Detection Strategies for COM, WMI, and ALPC-Based Multi-Process Malware // Sensors. 2024. Vol. 24. Iss. 16. P. 5118. DOI: 10.3390/s24165118

Information about Authors

Novikova Darya – 4th Year Student of Faculty of Integrated Security of the Fuel and Energy Complex (Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)). E-mail: d.dy0nth@gmail.com

Podvigin Vasiliy – Lecturer at the Department of Information Technology Security (Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)). E-mail: podvigin.v@gubkin.ru

УДК 004.728.5:621.398

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-35-56>

EDN: YKGWDF

Анализ протоколов передачи данных в задачах управления промышленными роботами

 Белов М. А.,  Кузьмина Е. А.,  Филина Н. Р. ,  Мутханна А. С. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Развитие концепции промышленного Интернета вещей (IIoT) в рамках парадигмы «Индустрия 4.0» сопровождается увеличением числа подключенных устройств, ростом требований к скорости передачи данных и жесткими ограничениями по задержкам. В условиях реального времени даже миллисекундные задержки могут приводить к нарушению синхронизации роботизированных систем, остановке производственных линий и экономическим потерям. При этом широко используемые транспортные протоколы TCP и UDP имеют существенные ограничения: первый обеспечивает надежность ценой высокой задержки и значительного объема служебных данных, второй гарантирует минимальные задержки, но не поддерживает контроль доставки, что критично для производственных процессов. Таким образом, актуальной задачей становится поиск транспортного протокола, совмещающего надежность, низкую задержку и устойчивость к нестабильным каналам связи. **Цель работы** заключается в проведении сравнительного анализа транспортных протоколов TCP, UDP и QUIC в условиях, приближенных к промышленным сценариям, с последующей оценкой их производительности и метрики размера серии при обеспечении требований реального времени. **Методы.** В работе использованы инструментальный сетевой мониторинг Wireshark и разработанный программный комплекс на языке Python с библиотеками pyshark и matplotlib. Исследование охватывает анализ PCAP-файлов (файлов захвата сетевых пакетов), построение временных рядов, вычисление ключевых метрик (скорость передачи команд, доля потерь пакетов, размер серии команд) и их визуализацию. Элементами **новизны** являются: комплексное сопоставление трех транспортных протоколов применительно к задачам управления роботизированными манипуляторами, где критичны миллисекундные задержки; использование QUIC – относительно нового протокола, ранее не исследованного в прикладных сценариях IIoT; разработка программного инструмента, обеспечивающего автоматизированный анализ и классификацию сетевого трафика в промышленных условиях. **Результат:** эксперименты показали, что TCP обеспечивает нулевые потери, но неприемлемо низкую скорость передачи команд (0,58 команд/с); UDP демонстрирует на порядок большую скорость (5,8 команд/с), но при этом сопровождается потерями на уровне 3,88 %, что делает его непригодным для высокоточных операций; QUIC показывает наилучшие результаты: скорость 18,16 команд/с при потерях менее 1 % и трехкратное увеличение среднего размера серии команд. **Теоретическая значимость:** полученные результаты подтверждают перспективность применения протокола QUIC в сетях IIoT. Его использование позволяет не только обеспечить минимальные задержки и высокую надежность передачи данных, но и существенно снизить нагрузку на сеть за счет мультиплексиро-

Библиографическая ссылка на статью:

Белов М. А., Кузьмина Е. А., Филина Н. Р., Мутханна А. С. А. Анализ протоколов передачи данных в задачах управления промышленными роботами // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 1. С. 35–56. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-35-56. EDN: YKGWDF

Reference for citation:

Belov M. A., Kuzmina E. A., Filina N. R., Muthanna A. S. A. Analysis of Communication Protocols for Industrial Robot Control Systems // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 1. PP. 35–56. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-35-56. EDN: YKGWDF

вания потоков. *Практическая реализация* может быть связана с внедрением QUIC в системы управления робототехническими комплексами, сенсорными сетями и производственными линиями, что соответствует требованиям к масштабируемым и безопасным коммуникациям будущего поколения.

Ключевые слова: промышленный Интернет вещей, промышленная автоматизация, транспортный протокол, TCP, UDP, QUIC, робототехнические системы, низкая задержка, надежная передача данных, мультиплексирование потоков, защита данных

Введение

С развитием технологий «Индустрии 4.0» и активным внедрением промышленного Интернета вещей (IIoT, *аббр. от англ.* Industrial Internet of Things) актуализируются вопросы обеспечения стабильности, отказоустойчивости и эффективности сетевой коммуникации на производстве. IIoT представляет собой инфраструктуру, объединяющую киберфизические системы, датчики, исполнительные механизмы, контроллеры и интерфейсы «человек – машина» в единую сеть для реализации мониторинга и управления технологическими процессами в режиме реального времени.

В современных условиях ключевыми сетевыми требованиями в среде IIoT являются:

- сверхнизкая задержка передачи данных (1–10 мс для управления приводами в реальном времени);
- высокая пропускная способность при одновременной передаче управляющих и телеметрических потоков;
- гарантированная доставка и устойчивость к потере пакетов;
- интеграция механизмов криптографической защиты при передаче критически важных данных.

Наиболее распространенными решениями транспортного уровня в сетях IIoT остаются протокол управления передачей (TCP, *аббр. от англ.* Transmission Control Protocol) и протокол пользовательских дейтаграмм (UDP, *аббр. от англ.* User Datagram Protocol). TCP обеспечивает гарантированную доставку, однако характеризуется высокими задержками из-за механизмов подтверждения и повторных передач. В свою очередь, UDP минимизирует накладные расходы, но не проверяет целостность доставленных данных, что ограничивает его применение в высокоточных производственных процессах.

Для преодоления данных ограничений был разработан транспортный протокол нового поколения QUIC (*аббр. от англ.* Quick UDP Internet Connections – быстрые мультиплексированные соединения через UDP), стандартизированный IETF (*аббр. от англ.* Internet Engineering Task Force – Инженерный совет по развитию интернета) [1] и сочетающий механизмы восстановления потерь, мультиплексирование независимых потоков, встроенное шифрование на базе протокола Transport Layer Security (TLS 1.3) и ускоренное установление соединения (0-RTT). Данные архитектурные свойства делают его перспективным решением для промышленных приложений, чувствительных к скорости отклика и сохранности управляющих команд.

Таким образом, в отрасли складывается проблемная ситуация: существует острая необходимость в обеспечении отказоустойчивой, масштабируемой и безопасной передачи данных, однако традиционные протоколы не способны одновременно удовлетворить строгие требования к задержке, скорости и целостности доставки. Для разрешения данного противоречия в работе предложен экспериментальный подход, включающий сравнительный анализ протоколов TCP, UDP и QUIC в контексте управления промышленными робототехническими системами. Эксперименты выполнялись с использованием робота-манипулятора (PM) DOBOT Magician, а анализ сетевого трафика производился средствами Wireshark и разработанным программным модулем на Python, который обрабатывает PCAP-файлы и визуализирует конкретные метрики сетевого взаимодействия: пропускную способность, уровень потерь пакетов и размер серии команд b .

Результаты исследования позволяют объективно оценить применимость транспортных протоколов в системах IoT и определить оптимальное решение для повышения эффективности промышленных сетей. Полученные данные доказывают, что протокол QUIC обеспечивает наилучший баланс между скоростью, безопасностью и надежностью, выступая перспективным стандартом для коммуникационной инфраструктуры «Индустрии 4.0».

Постановка задачи

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Принятые обозначения

Обозначение	Содержание
СУ	система управления, формирующая и передающая управляющие команды
СС	совокупность активного сетевого оборудования и каналов передачи данных, обеспечивающих двустороннюю доставку пакетов управляющих команд и сигналов
PM	робот-манипулятор DOBOT Magician, исполнительная часть системы
S_{DC}	размер одной управляющей команды, байт
L	объем служебной информации (заголовки, метаданные), байт
b	размер серии, число команд в одном пакете
Ω_1, Ω_2	пространственные пределы допустимых координат манипулятора (внешняя и внутренняя сферы)
x, y, z	координаты рабочей точки манипулятора
r_1, r_2	радиусы внутренней и внешней сфер, мм

На вербальном уровне задача оптимизации и оценки передачи управляющих команд в исследовании декомпозируется следующим образом:

– формирование программно-аппаратного стенда с клиент-серверной архитектурой, позволяющей тестировать протоколы TCP, UDP, QUIC в контролируемой локальной сети и варьировать сетевые параметры (задержка, пропускная способность, вероятность потерь);

– определение допустимой рабочей области РМ через границы сфер Ω_1, Ω_2 и координат x, y, z ;

– организация передачи команд сериями размера b и формализация механизма подтверждения / повторной передачи (замкнутый цикл: СУ $\rightarrow$ пакет $b \rightarrow$ буфер РМ $\rightarrow$ подтверждение / выполнение $\rightarrow$ запрос следующего пакета или повтор при ошибке);

– экспериментальное исследование и сравнительная оценка эффективности передачи команд для каждого протокола по таким метрикам, как пропускная способность (команд в секунду), уровень потерь пакетов и размер серии команд b (среднее число команд на пакет).

На формальном уровне задача исследования имеет следующий вид.

Дано:

– множество компонентов экспериментального стенда: СУ, СС, РМ;

– транспортные протоколы TCP, UDP, QUIC, каждый с заданными параметрами: пропускная способность, задержка, вероятность потери пакета;

– рабочая область манипулятора, определяемая допустимыми координатами $x \in (-120, 320)$; $y \in (-300, 320)$; $z > 0$; радиусы внутренней и внешней сфер $r_1 = 180$ мм; $r_2 = 300$ мм;

– оператор передачи серии команд, обеспечивающий: формирование пакета из b команд, передачу через сетевой протокол (TCP, UDP или QUIC), подтверждение или повтор при ошибке исполнения команды.

Требуется оценить:

– влияние выбора транспортного протокола на средний размер серии команд и итоговую пропускную способность системы управления.

Фундаментальные принципы сетевого взаимодействия в ИИТ

Современные архитектуры ИИТ и технологии межмашинного взаимодействия базируются на распределенных вычислениях, включающих уровни физических устройств, периферии и облака. На уровне устройств располагаются датчики, исполнительные механизмы, промышленное оборудование и роботы, которые формируют телеметрию с помощью проводных (например, Modbus, Industrial Ethernet) и беспроводных интерфейсов (Wi-Fi, LoRa, 5G). Периферийные вычисления выполняют первичную фильтрацию и снижают нагрузку на облачные системы, разделяясь на три подуровня: дальний (Far Edge) обеспечивает мгновенную реакцию с миллисекундными задержками; средний (Mid Edge) занимается агрегацией данных с задержками в секунды; ближний (Near Edge) решает ресурсоемкие аналитические задачи [4].

Межмашинное взаимодействие в ИИТ реализуется через несколько моделей коммуникации: периодическая телеметрия, событийно-ориентированные сообщения и синхронизация по расписанию. Исследования характеристик трафика показывают наличие долгосрочных корреляций и самоподобия в промышленных телеметрических потоках. Так, оценки коэффициента Хёрста для трафика, генерируемого системами аддитивного производства, подтверждают его самоподобный

характер: для промышленной системы Trumpf TruPrint 1000 этот показатель составляет 0,83, а для системы 3D Systems ProJet 4500 достигает 0,96. Это указывает на выраженные временные корреляции и диктует необходимость внедрения механизмов управления очередями и динамического выделения полосы пропускания.

Свойства трафика ПоТ существенно отличаются от традиционного интернет-трафика в силу разнообразия источников и сценариев применения. Источники данных можно классифицировать на датчики и исполнительные механизмы, корпоративные бизнес-приложения, мультимедийные системы (например, видеонаблюдение) и внешние веб-сервисы. Эмпирические исследования показывают, что трафик от 3D Systems ProJet 4500 описывается гамма-распределением с параметрами $\alpha = 92,86$ и $\lambda = 50\,000$, что отражает изменчивость межпакетных интервалов. Потоки бизнес-приложений (например, 1С Bitrix) могут подчиняться распределению Вейбулла – Гнеденко с параметрами $\alpha = 36,85$; $c = 0,00019$. Платформы видеонаблюдения (например, Ivideon) демонстрируют характеристики трафика, описываемые гамма-распределением ($\alpha = 8,99$; $\lambda = 11\,111$) со средним межпакетным интервалом около 1,05 мс. В свою очередь, открытые веб-сервисы (например, метео-API Open Weather Maps) вносят низкоинтенсивный, но высоко вариативный трафик, подчиняющийся экспоненциальному закону распределения ($\lambda \approx 1112,82$; интервал 1,06 мс), что в совокупности усложняет прогнозирование нагрузки и контроль доступа [1].

Интероперабельность в таких сетях остается важнейшей проблемой из-за гетерогенности протоколов и форматов данных. Устаревшее оборудование на базе Modbus часто должно взаимодействовать с современными системами, использующими OPC UA или MQTT. Для этого предлагаются семантические шлюзы, обеспечивающие преобразование между протоколами и унификацию данных. На практике входящие пакеты Modbus TCP преобразуются во внутренний формат IICF (*аббр. от англ. Industrial Internet of Things Conversion Format*) для стандартизации структуры данных, после чего семантическое преобразование адаптирует форматы полезной нагрузки (например, трансляция между CSV, JSON и XML), а конечное преобразование конвертирует IICF в целевые прикладные протоколы, такие как CoAP или HTTP [2].

Киберфизические системы объединяют физические процессы с вычислительными моделями, интегрируя датчики, исполнительные механизмы, сетевую инфраструктуру и программное обеспечение в системы, которые воспринимают окружающую среду, анализируют данные и формируют управляющие воздействия с динамической обратной связью. Они применяются в различных отраслях – от промышленной автоматизации и транспорта до медицины и энергетики [3, 4]. Промышленный РМ является классическим примером такой системы: он получает управляющие команды по сети, обрабатывает обратную связь от датчиков в реальном времени и координирует свои действия с другими устройствами производственной линии.

Реализация CPS предъявляет строгие требования к синхронизации компонентов, из-за чего сетевые инфраструктуры ПоТ должны удовлетворять условиям, значительно превышающим возможности традиционных информационно-

технологических сетей. К ключевым сетевым требованиям относятся: сверхнизкая задержка (для управления приводами в реальном времени требуется 1–10 мс), достаточная пропускная способность, высокая надежность в условиях электромагнитных помех и нестабильного питания, масштабируемость до тысяч устройств и энергоэффективность для автономных узлов. Поскольку детерминированность поведения является фундаментальным условием корректного функционирования синхронизированных задач управления, технология TSN (*аббр. от англ. Time-Sensitive Networking* – сети с высокими требованиями к задержкам) стала ключевым решением для коммуникаций в реальном времени, обеспечивая ограниченные задержки и предсказуемую доставку в промышленных сценариях. Наряду с транспортными характеристиками, критически важной является комплексная защита инфраструктуры: стратегии обеспечения безопасности должны быть многоуровневыми и включать шифрование данных, аутентификацию устройств, сегментацию сети и управление жизненным циклом систем для минимизации киберугроз.

Требования масштабируемости и энергоэффективности стимулируют использование легковесных протоколов обмена сообщениями и энергосберегающих стратегий взаимодействия для устройств с ограниченными ресурсами. Главными ограничениями узлов IIoT остаются лимиты вычислительных мощностей, доступной энергии и скорости обработки данных. Для решения этих проблем применяются специализированные прикладные протоколы: например, MQTT, использующий легковесные заголовки для снижения энергопотребления, и CoAP, который целенаправленно функционирует поверх транспортного протокола UDP. Главная причина отказа от TCP на уровне таких устройств – стремление исключить избыточные издержки транспортного уровня и снизить потребление пропускной способности. Однако использование базового UDP для снижения нагрузки неизбежно ведет к пропорциональному снижению надежности доставки. Необходимость одновременно обеспечить минимальное энергопотребление и гарантированную доставку команд обуславливает актуальность поиска универсальных транспортных протоколов нового поколения [5].

Обзор связанных исследований

Эффективность QUIC научно подтверждается и непосредственно в задачах облачных систем управления, где контроллер отделен от физического объекта управления сетью. Сравнительный анализ производительности QUIC (HTTP/3) и TCP (HTTP/1.1) в публичных облаках и 5G-сетях доказал, что при высоких частотах опроса (например, с интервалом выборки 5 мс), когда сетевая задержка превышает этот интервал, QUIC однозначно превосходит традиционные решения. Мультиплексирование потоков устраняет критическую для TCP проблему межпоточной блокировки, гарантируя более короткие и предсказуемые задержки отклика, а также генерируя меньший служебный трафик на каждый запрос [6].

Экспериментальная оценка QUIC применительно к задачам реального времени показала, что датаграммный режим протокола, отключающий механизм повторной передачи, обеспечивает однонаправленную задержку, сопоставимую

с UDP. В частности, на физическом стенде с периодом передачи 10 мс порог надежности 99,9 % достигается при задержке менее 1 мс, что укладывается в нормативные требования для критических приложений реального времени. Данные метрики подтверждают, что протокол способен удовлетворить строгие требования высокоточных контуров управления РМ [7].

Анализ транспортных альтернатив для доставки команд в роботизированных системах

В рамках научно-исследовательских и прикладных разработок, проводимых в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, была создана экспериментальная архитектура для дистанционного управления РМ, основанная на использовании транспортного протокола TCP. Соответствующее решение реализовано в виде зарегистрированного программного обеспечения (свидетельство № 2024686344 от 07.11.2024) и отражено во вкладе Российской Федерации в рабочую группу ITU-T SG11 в рамках проекта Q.TSN.

Модельная сеть состоит из трех уровней: управляющий сервер, клиент (прокси-контроллер) и исполнительное устройство – РМ. Управляющие команды передаются сериями (в формате JSON-структур) по протоколу TCP, что позволяет обеспечить гарантированную доставку, контроль целостности данных и синхронность их выполнения. В рамках проводимого эксперимента использование подобной архитектуры направлено на достижение высокой точности реализации последовательных пространственных перемещений, что необходимо для корректной оценки базовых параметров контура управления манипулятором перед тестированием альтернативных протоколов.

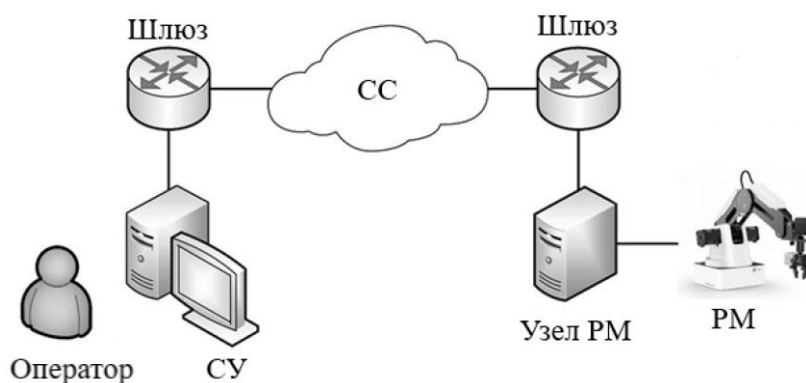


Рис. 1. Структура модельной сети сегмента РМ

Однако экспериментальная оценка выявила ряд фундаментальных ограничений TCP в сценариях высокочастотной передачи команд. Механизмы подтверждения доставки создают накопленные задержки, служебные заголовки занимают до 40–60 % от объема пакета, а увеличение сетевой нагрузки приводит к снижению стабильности, особенно в условиях эмуляции деградации параметров канала связи. При частотах отправки команд 10–20 Гц формируются оче-

реди, движения РМ теряют синхронизацию, возникают ошибки выполнения движений, что подтверждается протоколами измерений. Эти ограничения демонстрируют узость применения ТСР в распределенных системах управления реального времени и телеприсутствия.

Для преодоления выявленных ограничений в рамках эксперимента проводится разработка и оценка альтернативных протоколов UDP и QUIC. Первый из них обеспечивает минимальные задержки для приложений с высокой плотностью команд, а второй сочетает скорость UDP с надежностью ТСР, встроенным шифрованием и мультиплексированием потоков. Практическая реализация включает тестирование механизмов доставки команд, оптимизацию использования сетевых ресурсов и проведение сравнительной оценки по показателям пропускной способности, уровня потерь пакетов, размера серии команд и встроенной безопасности. На основе полученных данных формулируются рекомендации для эксплуатационных сценариев, таких как телеприсутствие и высокочастотное управление.

Платформа DOBOT поддерживает различные методы доставки команд, каждый из которых имеет различное соотношение задержки, надежности, масштабируемости и сложности интеграции. Традиционное последовательное соединение (COM через USB) обеспечивает минимальную задержку для локального управления, но архитектурно не масштабируется для распределенных систем. Сетевые решения прикладного уровня, такие как WebSocket, MQTT и REST API, позволяют организовать гибкое масштабируемое взаимодействие, однако их применение для высокочастотного управления роботизированными комплексами ограничено из-за вносимых задержек и отсутствия жестких временных гарантий доставки на транспортном уровне [8].

Сравнительный анализ доступных методов доставки команд для платформы DOBOT, представленный в таблице 2, наглядно демонстрирует компромиссы между различными методами доставки команд.

Таблица 2. Сравнение альтернативных методов доставки команд для платформы DOBOT

Метод доставки	Тип соединения	Задержка	Надежность доставки	Масштабируемость	Сложность внедрения
Serial COM	USB / UART	Низкая	Высокая	Отсутствует	Низкая
WebSocket API	TCP / WebSocket	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя
MQTT	TCP / MQTT	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя
REST API	HTTP	Высокая	Низкая	Средняя	Низкая
ROS	TCP / UDP (ROS Stack)	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
TCP	TCP / IP	Высокая	Высокая	Ограниченная	Условная
UDP	UDP / IP	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя
QUIC	UDP + TLS	Низкая	Высокая	Высокая	Средне-высокая

Хотя интеграция на основе протоколов прикладного уровня (MQTT, WebSocket) или профильных фреймворков (ROS) обеспечивает высокую масштабируемость, их зависимость от механизмов компенсации потерь на верхних уровнях и чувствительность к межпоточной блокировке приводят к непредсказуемым задержкам. В свою очередь, анализ на транспортном уровне ясно выявляет противоречие: классический TCP гарантирует надежность в ущерб оперативности, а базовый UDP минимизирует задержки ценой потери целостности данных.

Таким образом, ни один из рассмотренных подходов не является универсальным, что обуславливает необходимость прямой эмпирической оценки транспортных протоколов TCP, UDP и QUIC в тестовой среде DOBOT. Дальнейший анализ сосредоточен на объективных аппаратных метриках: скорости передачи команд, уровне потерь пакетов и достигаемом размере серии команд b .

Моделирование сетевого взаимодействия и управление роботизированным манипулятором

В рамках данного исследования была разработана архитектура программно-аппаратного стенда, предназначенная для передачи команд на РМ в контролируемой локальной сети. Основная цель системы заключается в обеспечении гибкости выбора транспортного уровня, возможности тестирования различных реализаций протоколов (TCP, UDP и QUIC) и получения репрезентативных экспериментальных данных в стандартизированных условиях.

Архитектура стенда состоит из двух персональных компьютеров (обозначаемых как PC#1 и PC#2) и РМ DOBOT Magician. Такое разделение обеспечивает клиент-серверную структуру, позволяя осуществлять удаленный доступ, симметричную обработку команд и четкое логическое разделение источника команд (сервер), промежуточного узла (клиент) и физического исполнителя (робот).

DOBOT Magician – компактный РМ с четырьмя степенями свободы, предназначенный для манипуляции объектами, взаимодействию с сенсорами и точному позиционированию (рисунок 2). Программируемость и стандартные интерфейсы (USB, UART) делают его пригодным для прикладного и экспериментального тестирования, включая оценку новых протоколов передачи команд.

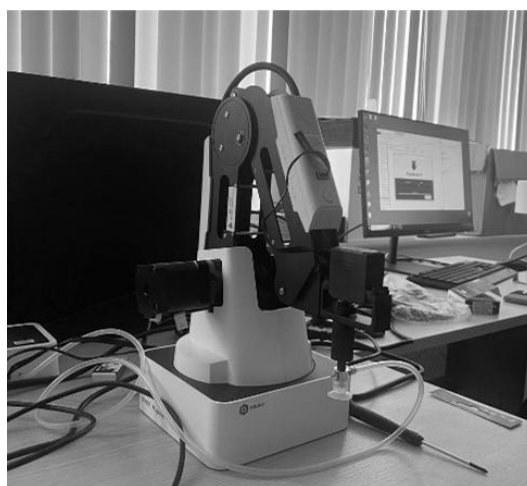


Рис. 2. РМ DOBOT Magician

В используемой конфигурации РМ имеет следующие характеристики:

- радиус рабочей области: 340 мм;
- количество осей: 4;
- точность: позиционирования – до 0,2 мм, повторяемости – до 0,02 мм;
- максимальная нагрузка: 500 г;
- конечные выключатели защищают РМ от повреждений при достижении им конечной точки в своем движении;
- подключение: через USB-порт;
- программное обеспечение: DOBOT Studio, DOBOT Blockly;
- питание внешнее: 100–240 В, 50/60 Гц;
- энергопотребление: 200 Вт;
- температурный режим работы: 10–60°.

Для проведения экспериментов был разработан программный комплекс на языке Python (версия 3.11). Выбор протокола обусловлен наличием стабильных библиотек взаимодействия с манипулятором через DOBOTAPI. Разработанное программное обеспечение реализует технологическую операцию типа «взять – переложить». В ходе работы манипулятор осуществлял непрерывное движение, базирующееся на потоковой генерации управляющих микрокоманд. В качестве опорного каркаса использовалась базовая траектория из 50 контрольных точек. Для обеспечения строгой методологической идентичности экспериментальных условий эта траектория была сгенерирована случайным образом в пределах допустимой рабочей области однократно до начала тестирования и сохранена в виде статического массива данных. Именно этот заранее сформированный эталонный набор координат загружался алгоритмом при тестировании каждого из оцениваемых транспортных протоколов. Таким образом, итоговое количество переданных команд за сеанс связи напрямую и объективно отражает пропускную способность протокола при непрерывном удержании управляющего потока.

Схема сетевой модели представлена на рисунке 3. В данной конфигурации РС#2 выступает сервером, иницирующим и координирующим передачу команд. Он подключается к Ethernet-коммутатору, обеспечивающему связь с клиентом (РС#1), который управляет манипулятором через USB. Такое разделение позволяет независимо изменять сетевые параметры, такие как задержка, пропускная способность и вероятность потери пакетов, моделируя различные условия сети.

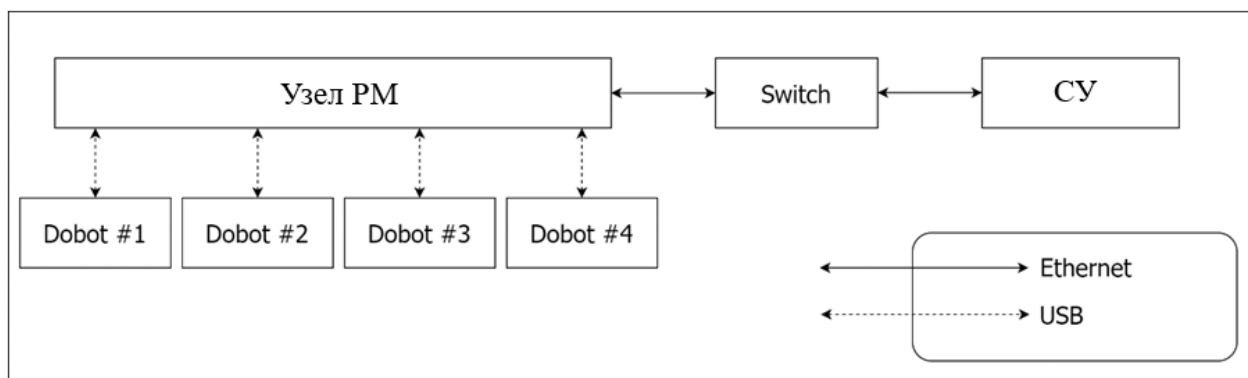


Рис. 3. Схема сетевой модели с участием DOBOT Magician

Выбор Ethernet обусловлен его широким распространением, предсказуемым поведением и возможностями мониторинга. Данная модель может масштабироваться до многопользовательских конфигураций с использованием Wi-Fi, 5G или VPN-каналов, однако настоящее исследование сосредоточено на стабильной проводной инфраструктуре.

Для генерации случайных координат была рассмотрена схема пределов перемещений манипулятора DOBOT Magician, которая представляет собой пространство, вычисляемое через разницу двух полусфер, включая ограничения передвижения самого манипулятора: из четырех полуплоскостей, изображенных на рисунке 4, в допустимые точки положения РМ входит любая комбинация x, y, z , находящаяся в пределах $x \in (-120, 320)$; $y \in (-300, 320)$; $z > 0$ и удовлетворяющая нижеописанным условиям.

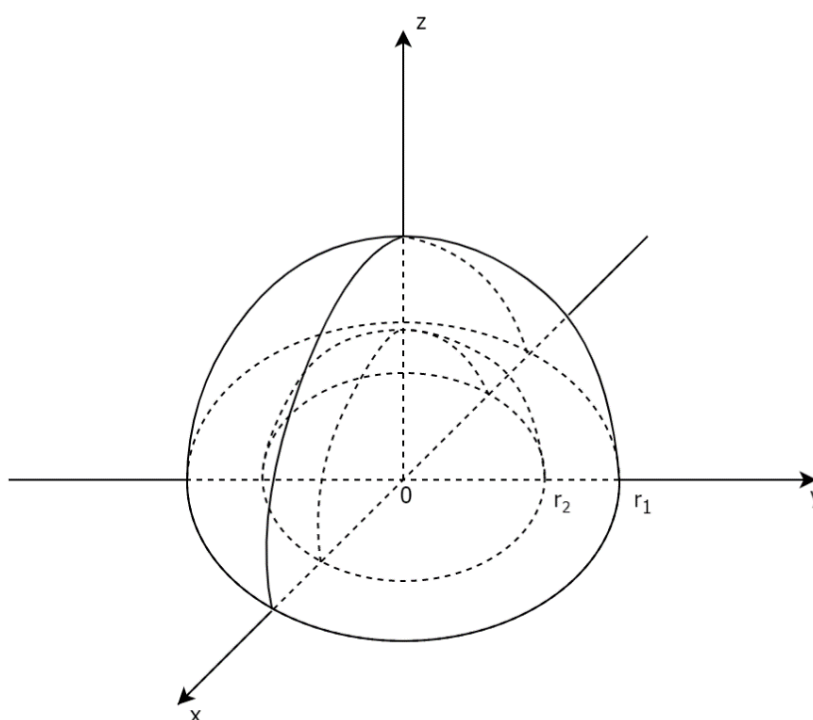


Рис. 4. Схема пределов перемещений DOBOT Magician

Условие включения сгенерированной координаты в массив допустимых точек можно выразить следующим образом:

$$r_1^2 < x^2 + y^2 + z^2 < r_2^2,$$

где $r_1 = 180$; $r_2 = 300$ – радиусы внутренней и внешней сфер соответственно, рассчитанные на основе известных координатных плоскостей манипулятора; x, y, z – координаты точки. Пусть сфера с радиусом r_1 обозначается как Ω_1 , а сфера с радиусом r_2 – как Ω_2 .

В таблице 3 представлен фрагмент массива сгенерированных управляющих команд. Каждая строка содержит пять параметров: пространственные координаты x, y, z , угол поворота захвата r и бинарный сигнал состояния вакуумного

захвата g . Таким образом, передаваемый пакет данных обеспечивает полную конфигурацию всех степеней свободы и исполнительных органов манипулятора в каждой точке траектории.

Таблица 3. Фрагмент полученных координат

$x; y; z; r; g$
151; 2; 136; 15; 0
173; -170; 42; 15; 0
198; 139; -13; 15; 0
178; 105; 97; 15; 0
187; 128; 5; 15; 0
...

В сценариях управления роботами передача команд от СУ к РМ осуществляется по каналу связи с ненулевой вероятностью ошибок. Вследствие этого возникает задача снижения избыточного трафика, обусловленного повторной передачей команд, при одновременном увеличении общей пропускной способности системы управления. Взаимодействие между СУ, СС и РМ организовано по модели замкнутого цикла (рисунок 5).

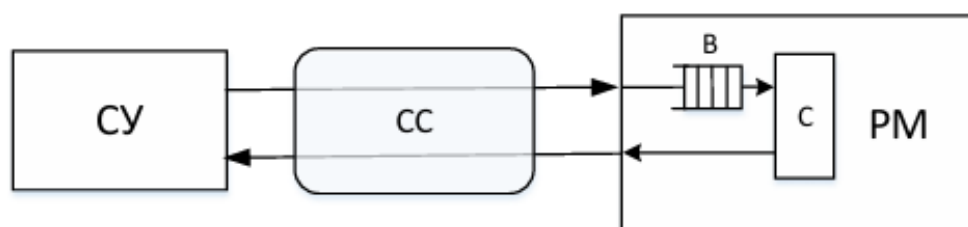


Рис. 5. Модель взаимодействия между СУ и РМ

Под СС в данном контексте понимается совокупность активного сетевого оборудования и каналов передачи данных, обеспечивающих двустороннюю доставку пакетов управляющих команд и сигналов подтверждения. Взаимодействие компонентов осуществляется по следующему алгоритму:

- 1) СУ формирует пакет из b команд и передает его в буфер РМ;
- 2) встроенный контроллер (С) РМ извлекает команды из буфера, после чего РМ подтверждает успешное получение пакета и последовательно выполняет команды;
- 3) после успешного выполнения пакета РМ запрашивает следующий набор команд;
- 4) в случае сбоя выполнения буфер очищается, и СУ повторно передает пакет.

Размер серии команд b в предложенной модели не является жестко заданной величиной. В ходе эксперимента алгоритм управления динамически адаптировал количество команд в одном отправляемом пакете в зависимости от успешности выполнения предыдущих операций (оценка рассинхронизации координат и потерь в сети). Таким образом, приводимые далее значения размера серии (например, 1,11 для TCP или 3,005 для QUIC) представляют собой не расчетные константы, а усредненные эмпирические показатели, к которым система автоматически сходилась в реальных сетевых условиях для каждого конкретного протокола.

Группировка нескольких команд в одну серию (пакет) позволяет существенно сократить долю служебной информации L в общем объеме сетевого трафика. Эффективность передачи напрямую зависит от обеспечиваемого транспортным протоколом размера серии b , соблюдая баланс между скоростью доставки и минимизацией служебного трафика. Данный подход целесообразен для использования в системах реального времени, где требуется регулярное управление исполнительными механизмами.

Тестирование и анализ результатов

Мониторинг и анализ сетевого трафика представляют собой ключевой этап оценки производительности коммуникационных протоколов. В качестве основного инструмента был выбран Wireshark.

Для автоматизации обработки данных, полученных с помощью Wireshark, была разработана специализированная программная система на Python 3.11. Основными задачами этого инструмента являются анализ файлов захвата пакетов (PCAP, *аббр. от англ.* Packet Capture), визуализация временных рядов и расчет ключевых показателей, таких как скорость передачи пакетов, коэффициент потерь пакетов и размер серии команд. Реализация основана на библиотеках `pyshark` и `matplotlib`, которые обеспечивают эффективные механизмы разбора PCAP-файлов и построения графических представлений.

Разработанная функция `parse_pcap` отвечает за извлечение данных и реализует потоковую обработку сетевых пакетов, устраняя необходимость загрузки всего файла в оперативную память. Этот подход особенно важен при работе с большими наборами данных, типичными для промышленных сетей, где генерируются тысячи пакетов в секунду. Алгоритм классифицирует трафик по протоколам (TCP, UDP, QUIC) и извлекает размер полезной нагрузки, что позволяет оценить средний размер серии команд.

Визуализация результатов выполняется с помощью метода `plot_time_series`, который отображает динамику соотношения команд и размеров пакетов в виде линейных графиков. Кроме того, программное обеспечение формирует сводные таблицы с общими статистическими показателями, такими как общее время передачи, количество пакетов и количество команд, что упрощает сравнительный анализ.

Разработанный инструмент автоматизирует процесс извлечения метрик из PCAP-файлов, исключая необходимость ручного разбора и визуальной фильтрации пакетов в интерфейсе Wireshark. Это существенно ускоряет сравнительный

анализ больших массивов сетевого трафика и минимизирует вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, при обработке данных. Кроме того, его функциональность может быть расширена за счет интеграции алгоритмов машинного обучения для прогнозирования аномалий в сети, что является перспективным направлением для дальнейших исследований.

Тестирование проводилось в контролируемых условиях, моделирующих реальные промышленные сценарии. В частности, для эмуляции помех вносилось искусственное затухание на уровне более 23 дБ, а высокая плотность соединений имитировалась путем параллельной рассылки данных на несколько целевых сетевых портов конечных устройств.

Критерии оценки включали:

- пропускную способность (количество команд в секунду);
- надежность (коэффициент потерь пакетов);
- размер серии команд b ;
- безопасность (наличие шифрования и аутентификации).

Каждый протокол тестировался в идентичных условиях для обеспечения объективного сравнения. Под идентичностью условий в данном случае понимается использование единого аппаратно-программного стенда, генерация одинаковой базовой траектории (50 контрольных точек) и фиксированные физические параметры сети. Наблюдаемые различия в итоговом количестве успешно переданных пакетов и команд за сеанс обусловлены исключительно внутренней архитектурой самих протоколов (наличием задержек квитирования, скоростью обработки очередей и эффективностью алгоритмов агрегации данных). Результаты фиксировались с помощью Wireshark и обрабатывались скриптом на Python, что позволило выполнить детальный статистический анализ и визуализировать динамику передачи.

Сравнительный анализ протоколов TCP, UDP и QUIC

Протокол TCP с установлением соединения обеспечивает гарантированную доставку данных с помощью механизмов подтверждения и повторной передачи потерянных пакетов. Однако механизмы подтверждения и повторной передачи порождают значительный объем служебного трафика. Как показано на рисунке 6, скорость передачи команд по TCP составила 0,58 команд/с, что значительно меньше, чем у UDP и QUIC. Низкая пропускная способность в основном обусловлена трехсторонним рукопожатием, буферизацией на стороне клиента и необходимостью синхронной обработки каждой команды.

Для оценки динамики трафика использовались графики ввода / вывода, отображающие интенсивность передачи пакетов в единицу времени (пакетов/с). Это позволяет визуализировать равномерность потока данных и выявить периоды простоя или перегрузки канала.

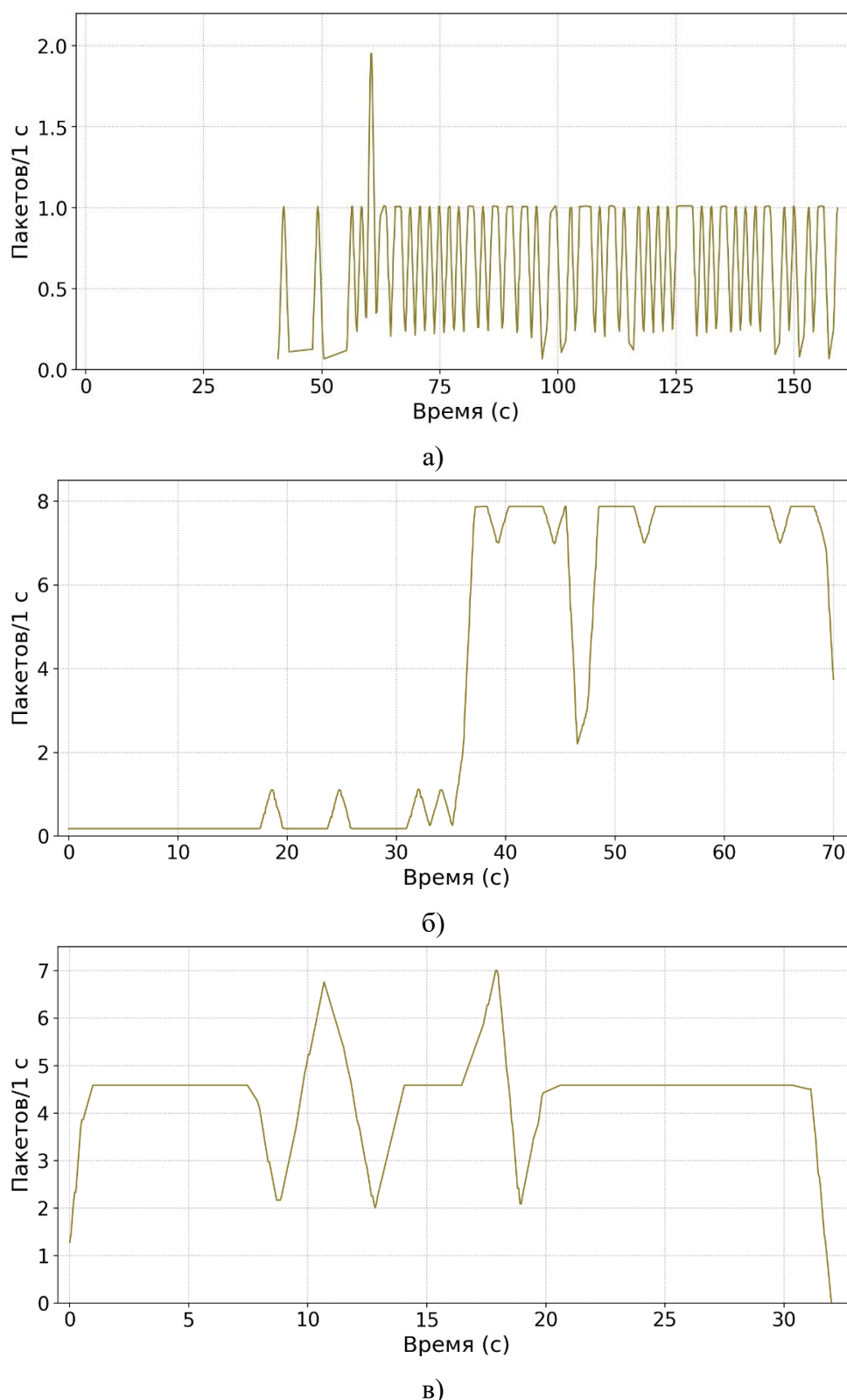


Рис. 6. График ввода / вывода для реализации TCP (а), UDP (б), QUIC (в)

График полезной нагрузки (рисунок 7а) демонстрирует малый размер серии: среднее значение составило 1,11 (размер пакетов варьировался от 1,0 до 5,0). Такая неэффективность объясняется относительно большим размером заголовка TCP (20 байт), что становится критичным при передаче коротких команд, типичных для управления роботом. Например, одна управляющая команда, включающая координаты x , y , z , угол поворота r и состояние захвата g , требует 77 байт

полезной нагрузки. При этом суммарный служебный трафик протоколов составляет значительную долю трафика, что подчеркивает необходимость оптимизации размера серии команд. Сводные результаты измерений для всех трех протоколов представлены в таблице 4.

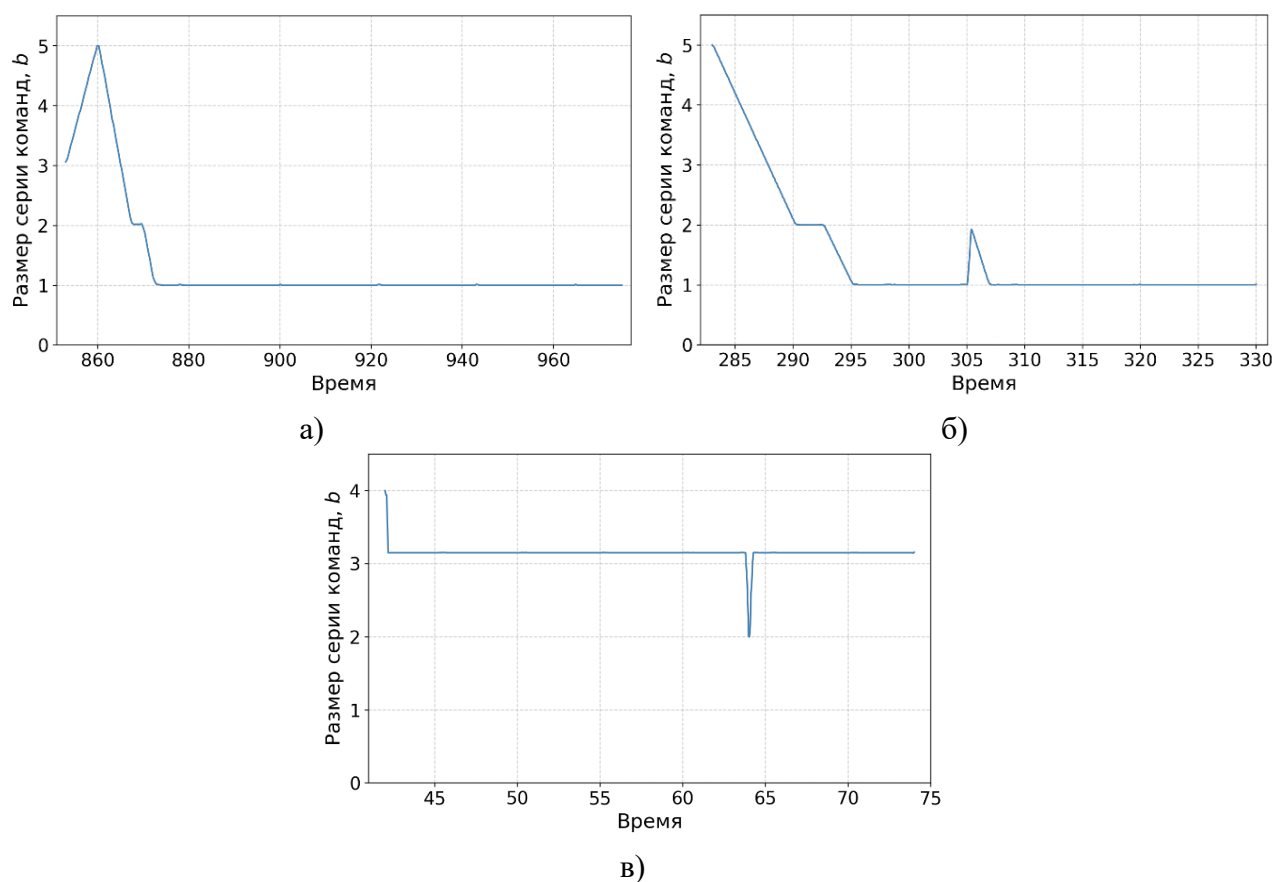


Рис. 7. График полезной нагрузки для реализации TCP (а), UDP (б), QUIC (в)

Таблица 4. Сравнительная статистика сетевого трафика для протоколов TCP, UDP, QUIC

Параметр	Значение		
	TCP	UDP	QUIC
Общее количество пакетов	59	247	193
Общее время, с	113,63	43,65	31,93
Средняя скорость передачи пакетов, пакетов/с	0,51	5,66	6
Общее количество команд	66	253	580
Средний размер серии команд b	1,11	1,02	3,005
Средняя скорость передачи команд, команд/с	0,58	5,8	18,16
Зафиксированный уровень потерь пакетов, %	—	3,88	< 1
Безопасность	—	—	TLS 1.3

Эксперимент также выявил проблему с очередями на стороне клиента. При высоких темпах генерации команд сервером задержки подтверждений приводят к буферизации на клиенте, увеличивая время отклика системы. В промышленных условиях такая задержка отклика может вызывать десинхронизацию производственных линий и аварийные остановки.

Протокол UDP в отличие от TCP исключает фазы установления соединения и подтверждений, что обеспечивает минимальную задержку. Скорость передачи команд по UDP достигла 5,66 команд/с, что в 10 раз превышает производительность TCP. Однако отсутствие встроенных механизмов восстановления потерянных пакетов оказалось существенным недостатком: уровень потерь пакетов составил 3,88 %, что неприемлемо для систем управления в реальном времени.

Резкие колебания на графике ввода / вывода (рисунок 6б) свидетельствуют о нестабильной работе канала. Например, между 15-й и 20-й секундами наблюдалось заметное падение скорости передачи из-за перегрузки сети. График полезной нагрузки (рисунок 7б) подтвердил малый размер серии со средним значением $b = 1,02$ (близко к показателям TCP).

UDP демонстрировал преимущества в сценариях с избыточным управлением, где потеря отдельных команд не критична. Например, при транспортировке объекта РМ может продолжать движение на основе последних полученных координат, игнорируя отсутствующие пакеты. Однако в высокоточных задачах, таких как лазерная гравировка, даже незначительная потеря данных приводит к дефектам на выходе.

Протокол QUIC показал наибольшую эффективность среди протестированных протоколов. Скорость передачи достигла 18,16 команд/с при уровне потерь пакетов менее 1 %, что объясняется использованием мультиплексирования потоков и адаптивных алгоритмов управления перегрузкой. График ввода / вывода (рисунок 6в) демонстрирует стабильную работу без резких просадок скорости передачи: это свидетельствует об эффективном восстановлении пакетов. Скорость передачи пакетов варьировалась от 4 до 7 пакетов/с, в среднем составляя 6 пакетов/с. Отсутствие сбоев пропускной способности подтверждает способность QUIC эффективно справляться с потерями.

График полезной нагрузки (рисунок 7в) показывает среднее значение 3,005 команд на пакет, что в три раза выше, чем у TCP. Это улучшение достигается за счет агрегирования данных из нескольких потоков в рамках одного соединения. Например, команды управления движением, телеметрия и диагностические данные могут передаваться одновременно, минимизируя служебный трафик протокола.

Ключевое преимущество QUIC заключается в интеграции TLS 1.3, обеспечивающей сквозное шифрование. Это исключает риск перехвата критически важных команд, таких как параметры движения или конфигурации оборудования. Кроме того, QUIC поддерживает миграцию соединений, позволяя роботам переключаться между точками доступа без прерывания сеансов связи.

Сравнительный анализ трех транспортных протоколов выявил их сильные и слабые стороны применительно к промышленным сценариям. TCP, несмотря на высокую надежность, продемонстрировал неприемлемо низкую пропускную способность и значительный объем служебного трафика, что делает его непригодным для систем реального времени. UDP обеспечивает высокую скорость передачи, однако отсутствие встроенных механизмов восстановления потерянных пакетов ограничивает его использование в критически важных приложениях.

Протокол QUIC, объединяющий преимущества UDP и TCP, показал наилучшие результаты по всем критериям оценки. Его возможности по мультиплексированию потоков данных, адаптации к сетевой динамике и встроенной безопасности делают его оптимальным выбором для промышленной автоматизации. Например, в системах управления конвейерными линиями QUIC обеспечивает синхронизацию десятков роботов с задержками менее 1 мс, что соответствует требованиям приложений тактильного интернета.

Интеграция QUIC в сети IIoT открывает широкие перспективы повышения эффективности и надежности производственных процессов. Одним из ключевых преимуществ протокола является минимальная задержка передачи. Механизм 0-RTT handshake (установление соединения без предварительного обмена пакетами) позволяет устанавливать соединения за один обмен пакетами, а мультиплексирование потоков обеспечивает параллельную передачу данных без межпоточной блокировки, существенно снижая задержки. Это особенно важно в приложениях, требующих высокой точности и оперативности, например при управлении роботизированными манипуляторами, где задержки даже в миллисекунды могут вызвать десинхронизацию или замедление производственного процесса.

Помимо снижения задержки, QUIC демонстрирует высокую устойчивость к нестабильным сетевым условиям, что делает его особенно подходящим для промышленных сред с сильными электромагнитными помехами. Заводы со сварочным оборудованием и тяжелой техникой часто создают сетевую нестабильность; тем не менее QUIC обеспечивает надежную доставку данных благодаря эффективным механизмам восстановления потерянных пакетов и поддержке динамической миграции соединений. Например, при автоматическом переключении устройства с Wi-Fi на 5G соединение сохраняется, и коммуникация продолжается без прерывания.

Энергоэффективность устройств также является важным фактором. В отличие от TCP, простой механизм управления перегрузкой в QUIC снижает вычислительные требования к периферийным устройствам, увеличивая автономность мобильных роботов, беспроводных сенсоров и промышленных модулей с батарейным питанием.

Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно решена научно-практическая задача повышения эффективности доставки команд для систем дистанционного управления промышленными РМ. Главной целью работы являлся поиск оптимального количества команд в серии b^* , обеспечивающего максимум целевой функции эффективности передачи данных и наивысшую пропускную способность канала связи в условиях IIoT.

Для достижения поставленной цели была разработана архитектура замкнутого цикла, в которой алгоритм управления непрерывно оценивал уровень рассинхронизации координат манипулятора и вероятность сетевых потерь, динамически

адаптируя размер отправляемой серии. Это позволило провести объективное эмпирическое сравнение транспортных протоколов TCP, UDP и QUIC в строго идентичных методологических условиях.

По результатам анализа сетевого трафика установлено следующее:

Во-первых, классические транспортные протоколы продемонстрировали низкую эффективность инкапсуляции данных. Для протокола UDP из-за отсутствия встроенных механизмов восстановления потерь на транспортном уровне доля утерянных пакетов составила 3,88 %, что вынудило алгоритм динамической адаптации снизить средний размер серии до одной команды на пакет для минимизации риска критической рассинхронизации. Протокол TCP обеспечил надежную доставку (0 % потерь), однако из-за проблемы межпоточной блокировки, буферизации на стороне клиента и высокого служебного трафика средний размер серии составил всего 1,11 команд на пакет, а итоговая пропускная способность упала до неприемлемых 0,58 команд/с.

Во-вторых, протокол QUIC показал самую высокую эффективность по сравнению с другими тестируемыми протоколами в сценариях высокоточного управления IoT. Благодаря механизмам независимого мультиплексирования потоков и асинхронного восстановления потерь, математический аппарат системы смог безопасно уплотнить полезную нагрузку, доведя средний размер серии до 3 команд на пакет.

В-третьих, использование QUIC гарантирует криптографическую безопасность контура управления за счет обязательной интеграции стандарта TLS 1.3, защищающего управляющие телеметрические данные от перехвата и злонамеренной модификации.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов доказано, что внедрение протокола QUIC совместно с математически обоснованным механизмом динамической адаптации размера серии является оптимальным решением для распределенных киберфизических систем и роботизированных производств концепции «Индустрия 4.0», требующих сверхнизких задержек, высокой пропускной способности и отказоустойчивости. Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию данного транспортного протокола с технологиями периферийных вычислений и сетями связи 6G.

Литература

1. Киричек Р. В., Кулик В. А. Исследование и генерация трафика промышленного Интернета Вещей // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 27–36. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-3-27-36. EDN: JQBTYU
2. Кулик В. А., Вахитов С. А., Киричек Р. В. Модель семантического преобразования пакетов для гетерогенного шлюза промышленного интернета вещей // Электросвязь. 2020. № 3. С. 49–54. DOI: 10.34832/ELSV.2020.4.3.007. EDN: ANXFTF
3. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges // Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC, 05–07 May 2008, Orlando, USA). 2008. PP. 363–369. DOI: 10.1109/ISORC.2008.25.

4. Rajkumar R., Lee I., Sha L., Stankovic J. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution // Proceedings of the 47th Design Automation Conference (13–18 June 2010, Anaheim, USA). 2010. PP. 731–736. DOI: 10.1145/1837274.1837461. EDN: OCIABJ
5. Rani D., Gill N. S. Review of Various IoT Standards and Communication Protocols // International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12. Iss. 5. PP. 647–657.
6. Peng H., Tärneberg W., Fitzgerald E., Kihl M. Performance Evaluation of QUIC Vs. TCP for Cloud Control Systems // Proceedings of the 31st International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM, 21–23 September 2023, Split, Croatia). 2023. DOI: 10.23919/SoftCOM58365.2023.10271592
7. Amet M., Thomas L., Song Y.-Q. A Performance Evaluation of QUIC in Real-Time Networks // Proceedings of the 32nd International Conference on Real-Time Networks and Systems (RTNS, 6–8 November 2024, Porto, Portugal). 2024. PP. 255–265. DOI: 10.1145/3696355.3699698
8. Silva D. R. C., Oliveira G. M. B., Silva I., Ferrari P., Sisinni E. Latency Evaluation for MQTT and WebSocket Protocols: An Industry 4.0 Perspective // IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC, 25–28 June 2018, Natal, Brazil). IEEE, 2018. PP. 1233–1238.

Статья поступила 8 октября 2025 г.
Одобрена после рецензирования 17 февраля 2026 г.
Принята к публикации 22 апреля 2026 г.

Информация об авторах

Белов Максим Алексеевич – студент 1-го курса института магистратуры (группа МСТ-2561) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: belov.ma@sut.ru

Кузьмина Екатерина Алексеевна – выпускник института магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: kuzmina.ea@sut.ru

Филина Надежда Романовна – аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: filina.nr@sut.ru

Мутханна Аммар Салех Али – доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: muthanna.asa@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-35-56>
EDN: YKGWDF

Analysis of Communication Protocols for Industrial Robot Control Systems

 M. A. Belov,  E. A. Kuzmina,  N. R. Filina ,  A. S. A. Muthanna

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. The development of the Industrial Internet of Things (IIoT) within the framework of the “Industry 4.0” paradigm is accompanied by an increase in the number of connected devices, growing demands for data transmission rate, and stringent latency constraints. In real-time control systems, even millisecond-level delays may lead to desynchronization of robotic mechanisms, production line interruptions, and economic losses. Widely used transport protocols, TCP and UDP, exhibit significant limitations: the former provides reliability at the cost of increased latency and overhead, while the latter ensures minimal delay without delivery control, which is critical for industrial processes. The purpose of this paper is to perform a comparative analysis of TCP, UDP, and QUIC transport protocols under conditions close to industrial scenarios and to evaluate their applicability for robotic control and reliable IIoT communications. **Methods.** Network analysis was conducted using the Wireshark packet analyzer and a custom-developed Python-based software complex incorporating the pyshark and matplotlib libraries. The study included PCAP file analysis, construction of time series, calculation of key metrics (command transmission rate, packet loss ratio, and command series size b), and their visualization. The elements of **novelty** consist in the comprehensive comparison of three transport protocols in the context of robotic manipulator control, where millisecond-level delays are critical; the application of QUIC, a relatively new protocol not previously examined in applied IIoT scenarios; and the development of a software tool enabling automated traffic analysis and classification in industrial environments. **Results.** Experimental results show that TCP provides zero packet loss but an unacceptably low command rate (0.58 commands/s). UDP achieves an order-of-magnitude higher rate (5.8 commands/s) but suffers from 3.88 % packet loss, rendering it unsuitable for high-precision operations. QUIC demonstrates the best performance: 18.16 commands/s with less than 1 % packet loss and a threefold increase in the average command series size b . **Theoretical relevance.** The obtained results confirm the prospects of using the QUIC protocol in IIoT industrial networks. Its adoption ensures minimal latency and high transmission reliability while significantly reducing network load through stream multiplexing. **Practical implementation** may involve integration of QUIC into robotic control systems, sensor networks, and production lines, aligning with the requirements for scalable and secure next-generation communications.

Key words: Industrial Internet of Things, transport protocol, TCP, UDP, QUIC, industrial robotics, latency, data transmission reliability, network efficiency

References

1. Kirichek R., Kulik V. Industrial Internet of Things Traffic Research and Generation // Proceedings of Telecommunication Universities. 2019. Vol. 5. Iss 3. PP. 27–36. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-3-27-36. EDN: JQBTYU
2. Kulik V. A., Vakhitov S. A., Kirichek R. V. Semantic Packet Conversion Model for Industrial Internet of Things Heterogeneous Gateway // Elektrosvyaz. 2020. Iss. 3. PP. 49–54. DOI: 10.34832/ELSV.2020.4.3.007. EDN: AHXFTF
3. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges // Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC, 05–07 May 2008, Orlando, USA). 2008. PP. 363–369. DOI: 10.1109/ISORC.2008.25.

4. Rajkumar R., Lee I., Sha L., Stankovic J. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution // Proceedings of the 47th Design Automation Conference (13–18 June 2010, Anaheim, USA). 2010. PP. 731–736. DOI: 10.1145/1837274.1837461. EDN: OCIABJ
5. Rani D., Gill N. S. Review of Various IoT Standards and Communication Protocols // International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12. Iss. 5. PP. 647–657.
6. Peng H., Tärneberg W., Fitzgerald E., Kihl M. Performance Evaluation of QUIC Vs. TCP for Cloud Control Systems // Proceedings of the 31st International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM, 21–23 September 2023, Split, Croatia). 2023. DOI: 10.23919/SoftCOM58365.2023.10271592
7. Amet M., Thomas L., Song Y.-Q. A Performance Evaluation of QUIC in Real-Time Networks // Proceedings of the 32nd International Conference on Real-Time Networks and Systems (RTNS, 6–8 November 2024, Porto, Portugal). 2024. PP. 255–265. DOI: 10.1145/3696355.3699698
8. Silva D. R. C., Oliveira G. M. B., Silva I., Ferrari P., Sisinni E. Latency Evaluation for MQTT and WebSocket Protocols: An Industry 4.0 Perspective // IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC, 25–28 June 2018, Natal, Brazil). IEEE, 2018. PP. 1233–1238.

Information about Authors

Belov Maksim – 1st Year Master’s Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: belov.ma@sut.ru

Kuzmina Ekaterina – Master of Science (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: kuzmina.ea@sut.ru

Filina Nadezhda – Postgraduate at the Department of Communication and Data Transmission (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: filina.nr@sut.ru

Muthanna Ammar – D. Sc. in Engineering, Professor at the Department of Communication and Data Transmission (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: muthanna.asa@sut.ru

УДК 621.397.3; 621.039.5

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67>

EDN: YTKENT

Математическая модель формирования квазистереопар при дуговом перемещении телевизионной камеры для оценки разновысотности объектов регулярной структуры

 Сердюков П. С.

Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,
Таганрог, 347922, Российская Федерация

Постановка задачи. Контроль разновысотности головок тепловыделяющих сборок атомных реакторов является критической операцией планово-предупредительного ремонта, от точности которой зависит безопасность эксплуатации ядерных установок. **Цель работы** – разработать математическую модель, обосновывающую применимость **метода** параллакс-сдвига для бесконтактного измерения разновысотности в условиях ограниченного рабочего пространства. Научная **новизна** исследования состоит в том, что на основе проективной модели телевизионной камеры на ПЗС-матрице и геометрии дугового перемещения выведены аналитические соотношения между диспаратностью центров проекций головок и их разновысотностью. **Результаты.** Получены количественные зависимости погрешности определения высоты от базиса, фокусного расстояния и точности локализации центров проекций. Установлено, что при базисе 12 мм, высоте подвеса 1200–1300 мм и субпиксельной оценке центра по контуру головки достигается погрешность 1,3–2,0 мм, что соответствует требованиям промышленного контроля (допуск 3 мм) и превосходит точность действующего контактного метода (5 мм). **Практическая значимость:** полученные зависимости позволяют обоснованно выбирать параметры системы на этапе проектирования.

Ключевые слова: параллакс-сдвиг, квазистереопара, тепловыделяющие сборки, математическая модель, диспаратность, разновысотность, ПЗС-матрица, фотограмметрия

Введение

Контроль разновысотности головок тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне реактора является обязательной операцией планово-предупредительного ремонта атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами. Отклонение положения головки ТВС от номинала более чем на 5 мм указывает на деформацию сборки и служит основанием для ее замены. Каждые сутки простоя реактора в период планово-предупредительного ремонта приносят

Библиографическая ссылка на статью:

Сердюков П. С. Математическая модель формирования квазистереопар при дуговом перемещении телевизионной камеры для оценки разновысотности объектов регулярной структуры // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 1. С. 57–67. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67. EDN: YTKENT

Reference for citation:

Serdyukov P. Mathematical Model of Quasi Stereo Pair Formation during Arc-Shaped Motion of a Television Camera for Estimating Height Differences in Objects with a Regular Spatial Structure // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 1. PP. 57–67. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67. EDN: YTKENT

убытки порядка 1 млн долларов США¹, что обуславливает жесткие требования к оперативности и точности измерений.

Действующий контактный метод предполагает применение специального приспособления с шестью датчиками перемещения, устанавливаемого на перегрузочную машину. Процедура позволяет одновременно проконтролировать семь из 163 ТВС, а суммарные временные затраты составляют до 24 часов. Ранее разработанные бесконтактные системы – в частности, система СТС-ПМ-100В² – основаны на видеиконных камерах с разрешением 500–625 телевизионных линий и требуют фиксации камеры в конкретных точках маршрута, что не позволяет использовать ее в режиме непрерывного видеопотока.

Перспективным направлением является применение метода параллакс-сдвига: одна телевизионная камера на ПЗС-матрице (*аббр. от* прибор с зарядовой связью), перемещаясь по дуге над активной зоной, формирует квазистереопары из последовательных кадров видеопотока, по которым определяется разновысотность ТВС [1, 2]. Метод не требует изменения штатного маршрута перегрузочной машины и установки дополнительной стереобазы. Однако для практической реализации необходимо строгое аналитическое обоснование связи между параметрами системы (фокусное расстояние, базис, высота подвеса) и достижимой точностью измерений, что и является предметом настоящей статьи.

Модель объекта и условия наблюдения

Объект исследования представляет собой группу из семи цилиндрических головок ТВС, расположенных в правильной гексагональной решетке: одна – в центре, шесть – по вершинам правильного шестиугольника. Внешний диаметр головки составляет 170 мм, межцентровое расстояние – 234 мм, вертикальное расстояние между рядами – 202,65 мм. В реакторе ВВЭР-1000 установлено 163 головки ТВС. Регулярность структуры является ключевым свойством: известный геометрический шаблон позволяет надежно идентифицировать объекты на изображении и устранять ложные срабатывания алгоритма [3]. Ранее для бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС применялись методы, основанные на реконструкции трехмерных изображений [4] и математических моделях телевизионной камеры [5]; настоящая работа развивает эти подходы применительно к методу параллакс-сдвига.

Камера установлена на штанге перегрузочной машины и перемещается по горизонтальной дуге на фиксированной высоте H над плоскостью головок ТВС (рисунок 1). Два последовательных положения камеры обозначены как ПТК1 и ПТК2; базис перемещения – B ; диспаратность – d . Диспаратность – это смещение центра проекции одного и того же объекта между двумя кадрами (в пикселях).

¹ Андрушечко С. А., Афров А. М., Васильев Б. Ю., Генералов В. Н., Косоуров К. Б. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М.: Логос, 2010. 604 с.

² Система телевизионная специальная СТС-ПМ-100В. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИТЦЯ.463432.005 ТО. СПб.: Фирма «Диаконт», 2000.

Оптическая ось направлена вертикально вниз. Радиус траектории составляет порядка 2000 мм. Съемка выполняется в режиме непрерывного видеопотока с частотой 25 кадров / с и шагом смещения между соседними кадрами 10–15 мм.

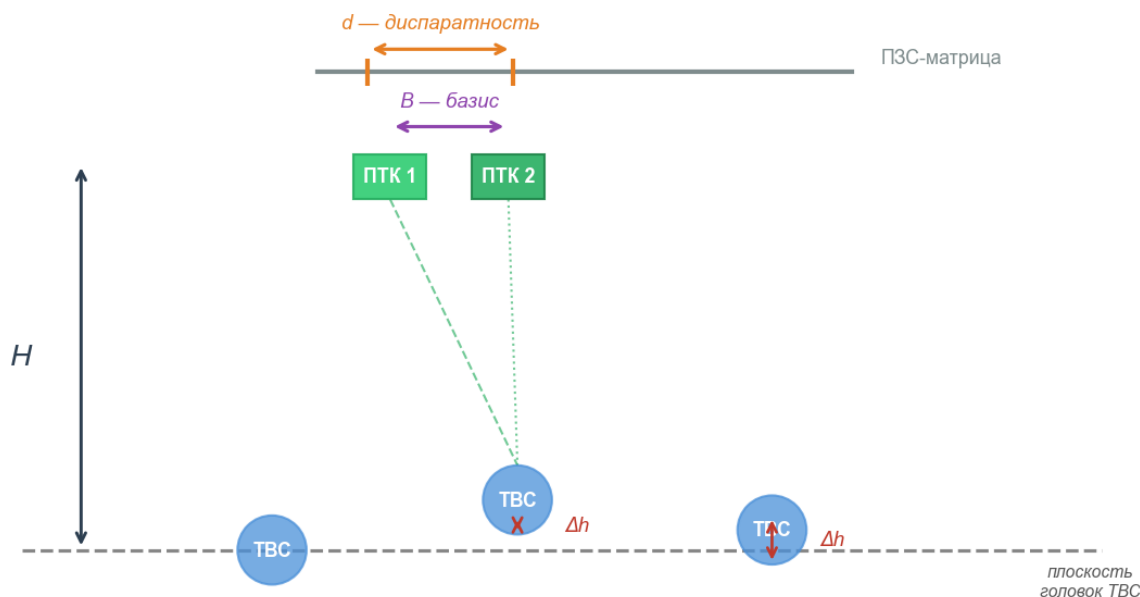


Рис. 1. Геометрическая схема формирования квазистереопары при дуговом перемещении телевизионной камеры над ячейкой ТВС

Математическая модель формирования квазистереопар

В основе модели лежит проективное преобразование трехмерных координат объектов в координаты изображения. Введем глобальную систему координат с началом в геометрическом центре центральной ТВС: ось OY – вертикально вверх, ось OZ – перпендикулярно плоскости головок. Собственная система координат привязана к оптическому центру камеры в каждом положении [6].

Пусть вектор $P = (X, Y, Z)^T$ – координаты точки объекта в глобальной системе координат, K – матрица внутренних параметров камеры:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & cx \\ 0 & f & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где f – фокусное расстояние (мм); s – размер пикселя (мм); cx , cy – координаты главной точки (пикс.).

Переход из глобальной системы координат в собственную описывается ортогональной матрицей поворота R и вектором трансляции t . В настоящей работе под R понимается ортогональная матрица поворота размера 3×3 , описывающая ориентацию камеры в пространстве; t – вектор трансляции размера 3×1 .

На практике реальный объектив вносит геометрические искажения: радиальную дисторсию $r_{иск} = r_{ист}(1 + k_1 r_{ист}^2 + k_2 r_{ист}^4)$ и тангенциальные члены (p_1 , p_2). Для получения неискаженных изображений перед вычислением диспаратности выполняется калибровка камеры по методу Чжана [7]: набор не менее 20 кадров

калибровочной шахматной доски позволяет определить матрицу K и коэффициенты дисторсии k_1, k_2, p_1, p_2 .

После калибровки каждый кадр видеопотока корректируется программно (функция `undistort`). Остаточная радиальная дисторсия после калибровки для фиксированного объектива $f = 8$ мм составляет не более 0,1–0,2 пикс. на краях кадра [7]. Вклад этой остаточной погрешности в диспаратность составляет: $\Delta d_{\text{дист}} \leq 0,2$ пикс., что вносит в ΔZ дополнительную составляющую $\Delta Z_{\text{дист}} \approx 1300 \cdot \frac{0,2}{15,9} \approx 16$ мм на краях – и менее 0,5 мм в центральной области кадра, где расположены головки ТВС. Таким образом, предварительная коррекция дисторсии является обязательным этапом обработки, обеспечивающим метрологическую корректность метода [6, 7]:

$$P_{\text{cam}} = R \cdot P + t.$$

Проекция точки на плоскость матрицы (пиксельные координаты x, y) рассчитывается по формулам:

$$x = f \frac{X_{\text{cam}}}{sZ_{\text{cam}}} + cx,$$

$$y = f \frac{Y_{\text{cam}}}{sZ_{\text{cam}}} + cy.$$

При дуговом перемещении камеры на угол $\Delta\varphi$ между двумя положениями (ПТК₁ и ПТК₂) базис (проекция дугового смещения на горизонтальную плоскость) составляет: $B \approx R_{\text{arc}} \cdot \Delta\varphi \approx 10\text{--}15$ мм при $\Delta\varphi \approx 0,3\text{--}0,5^\circ$ и $R_{\text{arc}} \approx 2000$ мм.

Анализ погрешности аппроксимации дугового перемещения

Полученное выражение для базиса строго справедливо для параллельных оптических осей и плоского (линейного) перемещения камеры. При дуговом движении истинный базис – хорда дуги: $B_{\text{хорда}} = 2R \cdot \sin(\Delta\varphi/2)$, тогда как в модели используется длина дуги: $B_{\text{дуга}} = R \cdot \Delta\varphi$.

Относительная погрешность такой замены составляет:

$$\frac{\delta B}{B} = \frac{B_{\text{дуга}} - B_{\text{хорда}}}{B_{\text{хорда}}} = \frac{\left[R \cdot \Delta\varphi - 2R \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right]}{\left[2R \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right]} \approx \frac{(\Delta\varphi)^2}{24}.$$

При рабочих параметрах шаг смещения 10–15 мм, $R = 2000$ мм $\rightarrow \Delta\varphi = \frac{15}{2000} = 0,0075$ рад. Тогда:

$$\frac{\delta B}{B} \approx \frac{(0,0075)^2}{24} \approx 2,3 \cdot 10^{-6} < 0,001 \, \%.$$

Таким образом, погрешность аппроксимации дугового базиса прямым при $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$ (рабочий диапазон) пренебрежимо мала по сравнению с основными источниками погрешности Δd . Оптическая ось направлена вертикально вниз в обоих положениях камеры, что обеспечивает выполнение условия параллельности осей, необходимого для корректного применения формулы (1). Поскольку $\Delta\varphi = \frac{B}{R}$ (в радианах), условие $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$ эквивалентно ограничению $\frac{B}{R} \leq 0,087 \approx 0,09$. Следовательно, область применимости модели определяется условием $\frac{B}{R} \leq 0,09$, при котором относительная погрешность аппроксимации $\frac{\delta B}{B} < 0,03 \, \%$. Параметры f, B, d, s введены в формуле (1).

Диспаратность d – переменная, связывающая высоту объекта Z с базисом и фокусным расстоянием по классической формуле триангуляции [3, 6]:

$$Z = \frac{f \cdot B}{d \cdot s}, \quad (1)$$

откуда выводится разновысотность ΔZ между двумя объектами как разность их Z -координат, определенных по соответствующим диспаратностям d_1 и d_2 .

Аналитическая оценка погрешности

Дифференцируя формулу (1) по каждому параметру, получаем методическую погрешность [8]:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta d}{d}. \quad (2)$$

При условии точной калибровки камеры ($\frac{\Delta f}{f} \ll 1$) и стабильной механики перемещения ($\frac{\Delta B}{B} \ll 1$) доминирующим источником погрешности является ошибка определения диспаратности Δd при типичных параметрах системы:

- $f = 800$ пикс. (соответствует ≈ 8 мм при $s = 0,01$ мм);
- $B = 12$ мм;
- $s = 0,00465$ мм (Hitachi KP-DE500R, ПЗС 768×576);
- $d = 15$ – 20 пикс. (типичная диспаратность при $H = 1300$ мм).

Ошибка в 1 пиксель без субпиксельной обработки при $d = 15,9$ пикс.: $\Delta Z = Z \cdot \frac{\Delta d}{d} = Z \cdot \frac{1}{15,9} \approx 0,063 \cdot Z \approx 81,8$ мм при $Z = 1300$ мм неприемлемо. Данная погрешность в 16 раз превышает допустимое отклонение 5 мм и делает метод непригодным для промышленного применения без субпиксельной обработки изображений.

После применения субпиксельной локализации Δd снижается до 0,1–0,2 пикс. [9]. При $d = 20$ пикс. и $\Delta d = 0,15$ пикс. $\Delta Z \approx Z \cdot \frac{0,15}{15,9} \approx 0,0094 \cdot Z \approx 12,3$ мм при $Z = 1300$ мм.

Расчетная погрешность при субпиксельной точности локализации 0,1–0,2 пикс. составляет для одной квазистереопары ≈ 8 –17 мм. Однако фактически достижимая точность $\pm 1,3$ –2,0 мм [10, 11] обеспечивается тремя механизмами:

а) субпиксельная оценка центра окружности по всем пикселям контура головки ТВС (~ 150 граничных пикселей) снижает эффективную погрешность диспаратности с $\Delta d = 0,15$ пикс. до $\Delta d_{\text{эфф}} \approx \frac{0,15}{\sqrt{150}} \approx 0,012$ –0,020 пикс.;

б) усреднение по 3–10 валидным квазистереопарам одного фрагмента сцены; статистическое усреднение по N независимым квазистереопарам снижает случайную составляющую погрешности в $\sqrt{N}$ раз.

в) использование априорной информации о правильной гексагональной решетке ТВС при контролируемом поиске центров. При $\Delta d_{\text{эфф}} = 0,017$ пикс. расчетная погрешность составляет: $\Delta Z = Z \cdot \frac{0,017}{15,9} \approx 1,4$ мм, что согласуется с экспериментальным результатом [10, 11].

Таблица 2 иллюстрирует зависимость расчетной погрешности от диспаратности для различных значений Δd .

Таблица 1. Погрешность ΔZ в зависимости от ошибки определения диспаратности

Δd , пикс.	d , пикс.	Z , мм	ΔZ , мм
1,0*	15,9	1300	81,8
0,5	15,9	1300	40,9
0,2	15,9	1300	16,4
0,15**	15,9	1300	12,3
0,1	15,9	1300	8,2
0,017***	15,9	1300	1,4

* без субпиксельной обработки (стандартная локализация центра с погрешностью $\pm 0,5$ пикс.);

** с субпиксельной локализацией центра (параболическая интерполяция яркости, $\Delta d \approx 0,15$ пикс.);

*** эффективная погрешность при субпиксельной оценке по всему контуру окружности головки тепло-выделяющей сборки (~ 150 граничных пикселей).

Верификация математической модели

Для оценки адекватности модели выполнено сравнение расчетных значений с экспериментальными данными, полученными в работе [10] при базисе 12 мм и высоте подвеса 1200–1300 мм (таблица 2).

Модель обеспечивает соответствие экспериментальным данным с отклонением не более 20 %, что приемлемо с учетом упрощений (пренебрежение виньетированием, шумом матрицы, влиянием среды). Экспериментально подтвержденная точность $\pm 1,3$ –2,0 мм соответствует расчетным оценкам при эффективной погрешности диспаратности $\Delta d_{\text{эфф}} \approx 0,017$ –0,020 пикс. [8, 10, 11].

Таблица 2. Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными

Параметр	Расчет (модель)	Эксперимент	Отклонение, %
Диспаратность d при $Z = 1300$ мм, пикс.	15,9	15–17	< 7
ΔZ при $\Delta d_{\text{эфф}} = 0,017$ пикс., мм	1,4	1,3	~ 8
ΔZ при $\Delta d_{\text{эфф}} = 0,020$ пикс., мм	1,6	2,0	~ 20
Оптимальный базис, мм	12	12	0

Геометрические ограничения и оптимальные параметры системы

Высота подвеса H определяет несколько ключевых характеристик системы. При малой высоте ($H < 800$ мм) угол обзора недостаточен для захвата всех семи ТВС ячейки, а перспективные искажения возрастают. При большой высоте ($H > 1500$ мм) диспаратность уменьшается пропорционально H^2 , что снижает чувствительность метода.

Из формулы (1) следует, что диспаратность $d = \frac{f \cdot B}{s \cdot Z}$, а $Z \approx H$ при вертикальном наблюдении. Таким образом, d обратно пропорциональна H . При фиксированных f , B , s оптимальная высота определяется из условия:

$$d_{\min} \leq \frac{f \cdot B}{s \cdot H} \leq d_{\max},$$

где $d_{\min} = 3$ пикс. (минимально надежный параллакс); $d_{\max} \approx 25$ пикс. (во избежание неоднозначности соответствия объектов).

При $f = 800$ пикс., $B = 12$ мм, $s = 0,00465$ мм:

$$H_{\text{opt}} \in \left[\frac{f \cdot B}{s \cdot d_{\max}}; \frac{f \cdot B}{s \cdot d_{\min}} \right] = [415 \text{ мм}; 3463 \text{ мм}].$$

Практически оптимальная высота выбирается в диапазоне 1000–1300 мм, где одновременно обеспечивается захват всей ячейки (7 ТВС) в поле зрения камеры и достаточная диспаратность 15–16 пикс. при базисе 12 мм. Это согласуется с экспериментальными результатами [10, 11]: при $H = 1300$ мм достигается точность $\pm 1,3$ мм. На рисунке 2 показана зависимость диспаратности от высоты подвеса при разных базисах, $f = 800$ пикс. и $d = \frac{f \cdot B}{H}$. Зеленым цветом выделен оптимальный диапазон $H = 1000$ –1300 мм; пунктиром – минимально надежная диспаратность 3 пикс.

Кратность формируемых квазистереопар при шести последовательных положениях камеры составляет $C(6, 2) = 15$ уникальных пар. Для повышения надежности используются только симметричные пары (ПТК₁–ПТК₆, ПТК₂–ПТК₅ и т. д.), у которых базисы эквидистантны, что снижает систематическую составляющую погрешности.

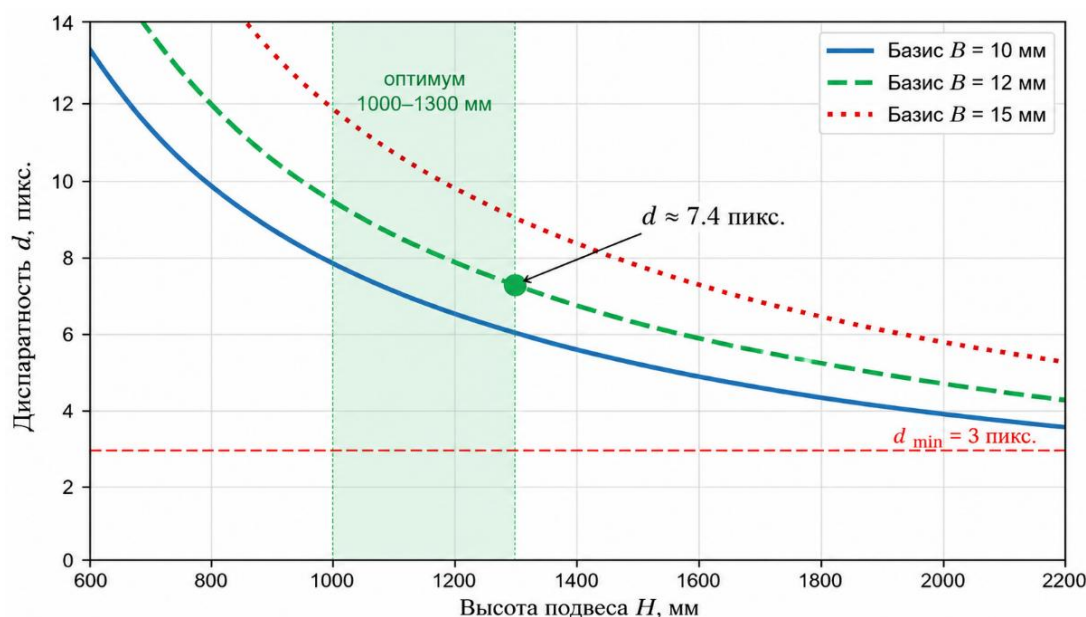


Рис. 2. Зависимость диспаратности от высоты подвеса

Заключение

В рамках настоящего исследования разработана математическая модель формирования квазистереопар при дуговом перемещении одной телевизионной камеры над объектами регулярной структуры. На основе проективной модели камеры получены аналитические соотношения между диспаратностью и разновысотностью объектов (1) [6], выполнен анализ погрешности (2) [8], показавший, что расчетная погрешность для одной квазистереопары при субпиксельной локализации ($\Delta d = 0,1\text{--}0,2$ пикс.) составляет 8–17 мм; при использовании субпиксельной оценки по всему контуру окружности головки ТВС ($\Delta d_{\text{эфф}} \approx 0,015\text{--}0,020$ пикс.) и усреднении по нескольким квазистереопарам расчетная погрешность снижается до 1,4–1,6 мм, что согласуется с экспериментальным результатом $\pm 1,3\text{--}2,0$ мм [6, 7]. Показано, что при оптимальных параметрах ($H = 1200\text{--}1300$ мм; $B = 12$ мм) достигаемая точность соответствует требованиям промышленного контроля ТВС (допуск 3 мм). Верифицирована погрешность аппроксимации дугового базиса длиной дуги ($\frac{\delta B}{B} < 0,001\%$ при $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$). Полученные зависимости позволяют обоснованно выбирать параметры телевизионной системы на этапе проектирования системы бесконтактного определения разновысотности.

Литература

1. Сердюков П. С., Румянцев К. Е. Метод параллакс-сдвига для бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС на основе видеопотока телевизионной камеры // Проектирование и технология электронных средств. 2025. № 4. С. 13–19. EDN: WTMLXG
2. Макеев В. В., Поваров В. П., Коробкин В. В., Лебедев О. В. Система бесконтактного определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок

в активной зоне реактора // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 16. С. 37–41.

3. Балабаев С. Л., Лозовская Е. Г., Румянцев К. Е. Оценка разновысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов на основе цифровой телевизионной системы на ПЗС-матрицах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8 (157). С. 227–241. EDN: STQRKT

4. Каляев И. А., Румянцев К. Е., Макеев В. В. Балабаев С. Л., Коробкин В. В. и др. Бесконтактный метод определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора на основе реконструкции трехмерных изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 3 (80). С. 126–131. EDN: KNOFEN

5. Lozovskaya E., Balabaev S., Rumyantsev K. The mathematical Model of the Recording Video Camera for the Height Measurement of the Regularly Situated Objects // Materiały X Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji “Strategiczne pytania światowej nauki – 2014” (Przemyśl, 07–15 lutego 2014). Przemyśl, 2014. S. 27–34.

6. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003. 670 p. DOI: 10.1017/CBO9780511811685

7. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22. Iss. 11. PP. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718

8. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Whittles Publishing, 2006. 510 p.

9. Сердюков П.С. Влияние субпиксельной локализации контуров на точность определения разновысотности ТВС методом параллакс-сдвига // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». Таганрог, 2026. (в печати)

10. Сердюков П. С., Румянцев К. Е. Исследование погрешностей бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига при дуговой траектории телевизионной камеры // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19. № 4. С. 92–109. DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN: YKYWJR

11. Сердюков П. С., Румянцев К. Е. Алгоритмическая обработка видеопотока и реализация метода параллакс-сдвига для бесконтактного контроля высоты объектов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2025. № 4 (168). С. 29–35. DOI: 10.52190/1729-6552_2025_4_29. EDN: MOYUQI

Статья поступила 12 мая 2026 г.

Одобрена после рецензирования 17 июня 2026 г.

Принята к публикации 25 июня 2026 г.

Информация об авторе

Сердюков Павел Сергеевич – соискатель ученой степени кандидата наук (Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета). E-mail: serdyukov-pavel@mail.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67>
EDN: YTKEHT

Mathematical Model of Quasi Stereo Pair Formation during Arc-Shaped Motion of a Television Camera for Estimating Height Differences in Objects with a Regular Spatial Structure

 P. Serdyukov

Institute of Radio Engineering Systems and Management of Southern Federal University,
Taganrog, 347922, Russian Federation

Problem statement. Height variation control of fuel assembly heads in nuclear reactor cores is a critical operation during scheduled maintenance, ensuring the safety of nuclear plant operation. **The aim of this paper** is to develop a mathematical model justifying the applicability of the parallax shift **method** for contactless height measurement in confined working conditions. **The scientific novelty.** Based on a projective model of a CCD television camera and the arc motion geometry, analytical relationships between the disparity of head projection centers and their height differences are derived. **Results.** Quantitative dependencies of the height measurement error on baseline, focal length, and center localization accuracy are obtained. It is established that with a baseline of 12 mm, suspension height of 1200–1300 mm, and sub-pixel estimation of the projection center along the fuel assembly head contour, a measurement error of 1.3–2.0 mm is achieved. This meets the requirements of industrial inspection (tolerance 3 mm) and surpasses the accuracy of the existing contact method (5 mm). **Practical significance.** The derived dependencies enable informed selection of system parameters at the design stage.

Key words: parallax shift, quasi-stereopair, fuel assemblies, mathematical model, disparity, height measurement, CCD sensor, photogrammetry

References

1. Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Parallax-Shift Method for Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Differences Using television Camera Video Stream // Electronic Design and Technology. 2025. Iss. 4. PP. 13–19. (in Russian) EDN: WTMLXG
2. Makeev V. V., Povarov V. P., Korobkin V. V., Lebedev O. V. System for the Non-Contact Determination of the Variability of Heat-Producing Grouting Heads in the Active Zone of the Reactor // News of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences. 2006. Iss. 16. PP. 37–41. (in Russian)
3. Balabaev S. L., Lozovskaya E. G., Rumyantsev K. E. Estimates of the Error in the Height of the Strict Geometric Order of Objects Based on Digital Television Systems on the CCD // Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2014. Iss. 8 (157). PP. 227–241. (in Russian) EDN: STQRKT
4. Kalyaev I. A., Rumyantsev K. E., Makeev V. V., Balabaev S. L., Korobkin V. V., et al. Noncontact Method of Evaluation of Different Altitude of Top Nozzle of Nuclear Reactor Based on Reconstruction of Three-Dimensional Images // Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2008. Iss. 3 (80). PP. 126–131. (in Russian) EDN: KNOFEN
5. Lozovskaya E., Balabaev S., Rumyantsev K. The mathematical Model of the Recording Video Camera for the Height Measurement of the Regularly Situated Objects //

Proceedings of the 10th International Scientific-Practical Conference “Strategic-Questions of World Science – 2014” (Przemysl, 07–February 15, 2014). Przemysl, 2014. PP. 27–34.

6. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. Cambridge University Press, 2003. 670 p. DOI: 10.1017/CBO9780511811685

7. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22. Iss. 11. PP. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718

8. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Whittles Publishing, 2006. 510 p.

9. Sredyukov P. S. Influence of Subpixel Localization of Contours on the Accuracy of Determination of the Degree of complexity of HSS by Parallax-Shift Method // XII All-Russian Scientific and Technical Conference “Fundamental and Applied Aspects of Computer Technologies and Information Security”. Taganrog, 2026. (in print, in Russian)

10. Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Investigation of Errors in Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Variations Using the Parallax-Shift Method with an Arc-Trajectory Television Camera // Vestnik SibGUTI. 2025. Vol. 19. Iss. 4. PP. 92–109. (in Russian) DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN: YKYWJR

11. Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Algorithmic Video Stream Processing and Implementation of the Parallax-Shift Method for Non-Contact Height Measurement of Objects // Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress. 2025. Iss. 4 (168). PP. 29–35. (in Russian) DOI: 10.52190/1729-6552_2025_4_29. EDN: MOYUQI

Information about Author

Serdyukov Pavel – PhD candidate (Institute of Radio Engineering Systems and Management of Southern Federal University). E-mail: serdyukov-pavel@mail.ru

УДК 621.39

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85>

EDN: MQPIJB

Применение управляемых мультиплексоров ввода / вывода ROADM в DWDM-сетях

Былина М. С., Шевцова А. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Актуальность. Современные оптические транспортные сети OTN-DWDM имеют сложные топологии, в которых между любыми двумя узлами существует более одного маршрута. Для гибкого управления сетью и обеспечения ее надежной и бесперебойной работы необходима динамическая оптическая маршрутизация спектральных каналов. Маршруты спектральных каналов в сети OTN-DWDM создаются с помощью оптических мультиплексоров ввода / вывода (OADM). Пассивные OADM на основе оптических фильтров не позволяют изменить маршрут без физической замены оборудования, поэтому в современных сетях применяются реконфигурируемые OADM (ROADM), позволяющие динамически перестраивать маршруты каналов. **Цель работы** – качественная оценка эффективности и целесообразности применения ROADM в сетях OTN-DWDM на основе сравнительного анализа их структурных схем и архитектур. **Результаты:** рассмотрены принципы работы и структурные схемы ROADM и их основных компонентов – спектрально-селективных переключателей (WSS) для сетей DWDM с использованием фиксированных и гибких сеток спектральных каналов, проведен сравнительный анализ архитектур ROADM (Colored, Colorless, Directionless, Contentionless, Broadcast-and-Select, Route-and-Select), даны рекомендации по выбору архитектуры ROADM для транспортной сети OTN-DWDM. **Практическая значимость:** предлагаемые рекомендации по выбору архитектуры ROADM могут быть использованы при проектировании и модернизации сетей OTN-DWDM для снижения эксплуатационных затрат и повышения устойчивости сети.

Ключевые слова: технология спектрального уплотнения DWDM, оптическая транспортная сеть OTN, управляемый оптический мультиплексор ввода / вывода ROADM, спектрально-селективный переключатель WSS, Colorless & Directionless & Contentionless ROADM, архитектура Broadcast-and-Select, архитектура Route-and-Select

Введение

Современные оптические транспортные сети строятся по стандарту OTN (аббр. от англ. Optical Transport Network) с применением технологии плотного спектрального мультиплексирования (DWDM, аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing), позволяющей вводить в оптическое волокно на передающей стороне и выводить из него на приемной стороне одновременно n оптических

Библиографическая ссылка на статью:

Былина М. С., Шевцова А. А. Применение управляемых мультиплексоров ввода / вывода ROADM в DWDM-сетях // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 1. С. 68–85. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85. EDN: MQPIJB

Reference for citation:

Bylina M., Shevtsova A. Application of Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexers in DWDM Networks // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 1. PP. 68–85. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85. EDN: MQPIJB

сигналов (спектральных каналов), сформированных на n оптических несущих с разными длинами волн: $\lambda_i (i = 0, 1, \dots, n - 1)$.

Основным отличием OTN от транспортных сетей предыдущего поколения является наличие оптического уровня, позволяющего управлять оптическими сигналами, не прибегая к преобразованию их в электрические и считыванию заголовков, в том числе осуществлять их маршрутизацию¹ [1, 2].

Маршрутизация оптических сигналов осуществляется оптическими мультиплексорами ввода / вывода (OADM, аббр. от англ. Optical Add / Drop Multiplexer), которые размещают в узлах сети. На рисунке 1 представлен фрагмент сети OTN / DWDM кольцевой топологии, в которой каждый узел соединен с двумя соседними, образуя замкнутый контур. OADM включаются в разрыв кольца, выполняя выделение, добавление и транзит оптических каналов.

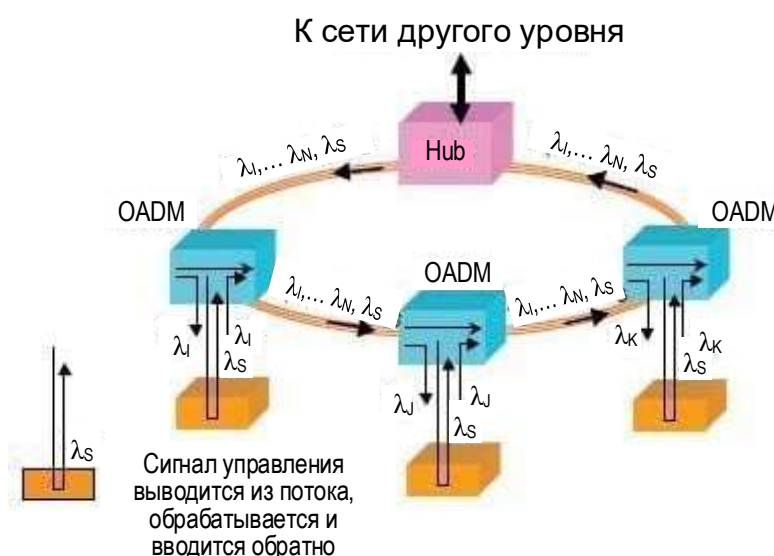


Рис. 1. Фрагмент сети OTN / DWDM кольцевой топологии

Фиксированные (пассивные) устройства (Fixed OADM, FOADM) не позволяют динамически перенастраивать маршруты каналов без физической замены оборудования, что ведет к высоким эксплуатационным затратам и нерациональному использованию спектрального ресурса. Для устранения этих недостатков были разработаны управляемые мультиплексоры ввода / вывода (Reconfigurable OADM, ROADM) [2–5].

Архитектура ROADM прошла путь от устройств с фиксированной привязкой портов к длинам волн (Colored) до современных бесцветных, всенаправленных и бесконфликтных (CDC, аббр. от англ. Colorless, Directionless and Contentionless) узлов с поддержкой гибкой частотной сетки. В данной работе представлен общий взгляд на развитие ROADM и их ключевых компонентов – спектрально-селективных переключателей (WSS, аббр. от англ. Wavelength Selection Switch), даны рекомендации по выбору архитектуры ROADM для транспортных сетей.

¹ Recommendation G.709/Y.1331. Interfaces for the optical transport network. 2020. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709> (дата обращения 11.04.2026).

Частотное планирование в сетях OTN с DWDM

Технология DWDM² допускает два варианта частотных планов – сетки с фиксированным канальным интервалом (Fixed Grid) и гибкие сетки с переменным канальным интервалом (Flexible Grid) (рисунок 2).

В частотном плане Fixed Grid канальный интервал $\Delta\nu$ между соседними спектральными каналами фиксирован и может составлять 12,5; 25; 50; 100; 200 или 400 ГГц. Наиболее часто используются значения 50 и 100 ГГц. Центральные частоты отдельных спектральных каналов получаются из соотношения: $\nu_i = \nu_0 + i \cdot \Delta\nu$, где $\nu_0 = 193,1$ ТГц – образующая частота; $i = \pm 1, \pm 2, \dots$

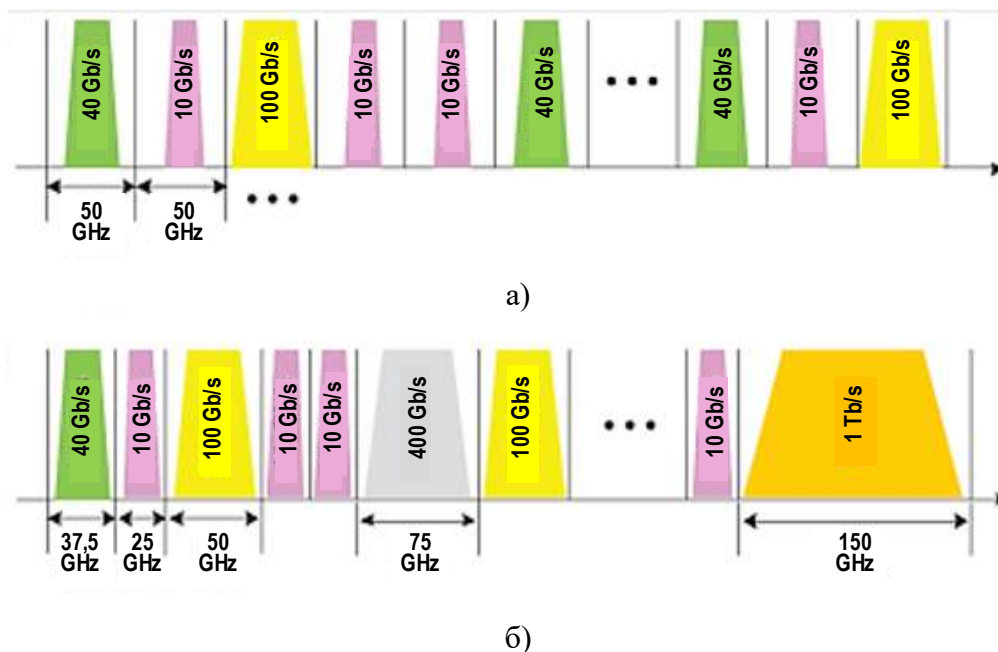


Рис. 2. Частотные планы DWDM: а) Fixed Grid; б) Flexible Grid

Основными достоинствами частотного плана Fixed Grid являются:

- низкая стоимость компонентов: мультиплексоры и WSS для Fixed Grid имеют значительно более простые конструкции, чем их аналоги для Flexible Grid;
- максимальная совместимость оборудования: большинство трансиверов, мультиплексоров, оптических усилителей и ROADMs, выпущенных за последние 20 лет, работают с планом Fixed Grid.

Однако из рисунка 2а видно, что при уплотнении потоков, имеющих разную скорость передачи (разную ширину спектра), некоторые каналные интервалы могут использоваться неэффективно. Эту проблему решает применение частотного плана Flexible Grid (рисунок 2б), в котором ширина канального интервала может различаться для разных каналов. Возможные центральные частоты спектральных каналов плана Flexible Grid получаются из образующей частоты ν_0 в соответствии с соотношением: $\nu_i = \nu_0 + i \cdot \Delta\nu_{flex}$, где $\Delta\nu_{flex} = 6,25$ ГГц, а минимальная ширина спектрального канала составляет 12,5 ГГц.

² Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. 2020. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1> (Accessed 11 April 2026).

Неуправляемые мультиплексоры ввода / вывода спектральных каналов

В сетях OTN/DWDM с использованием частотного плана Fixed Grid могут использоваться FOADM на основе [1–4, 6–8]:

- каскадного соединения интерференционных тонкопленочных фильтров (TFF, аббр. от англ. Thin-Film Filter) или волоконных брэгговских решеток (FBG, аббр. от англ. Fiber Bragg Grating) (рисунок 3);
- встречного включения двух интегрально-оптических мультиплексоров (Multiplexer, MUX) на массиве волноводов (AWG, аббр. от англ. Arrayed Waveguide Grating) (рисунок 4).

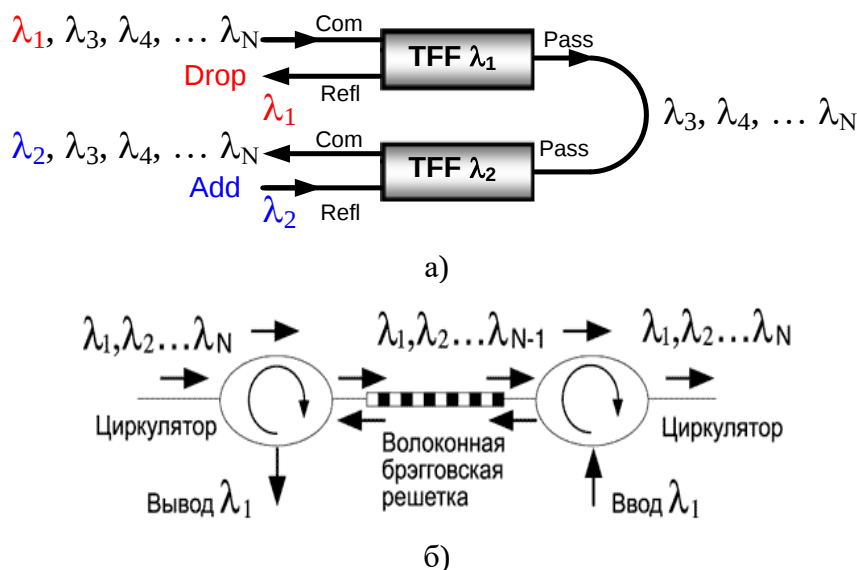


Рис. 3. Конструкции OADM для ввода / вывода одного спектрального канала на основе: а) TFF; б) FBG

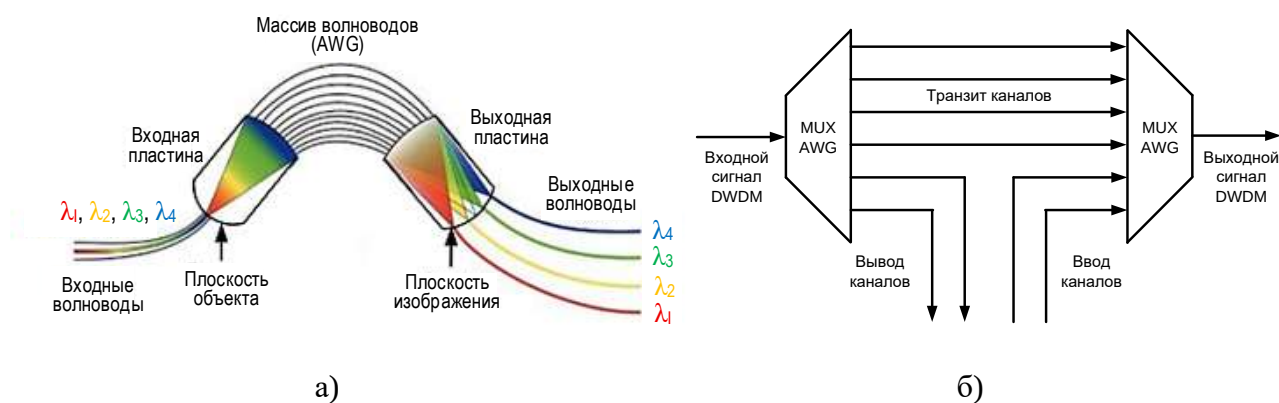


Рис. 4. MUX AWG (а) и OADM на основе встречного включения двух MUX AWG (б)

Достоинствами FOADM являются низкая стоимость компонентов и пассивность конструкции (нет необходимости в электропитании). Общим недостатком FOADM является жесткое закрепление длины волны за портом (фильтром). Перенастроить такой узел без физической замены фильтров невозможно.

Проектировать сеть с использованием FOADM целесообразно, если:

- сеть имеет фиксированную простую топологию, которую не предполагается менять в течение длительного периода времени;

– можно заранее определить, какие именно длины волн будут выделяться / добавляться в каждом узле;

– в узлах требуется выделять / добавлять небольшое число длин волн.

Более современным решением является применение ROADМ, в которых реализуется программно-настраиваемый режим работы каждого спектрального канала: ввод / вывод (add / drop) или транзит (pass / through).

Спектрально-селективные переключатели WSS

Для обеспечения таких возможностей необходимы WSS, выполняющие две основные функции: демультиплексирование входного группового сигнала DWDM на отдельные спектральные каналы и управляемое переключение каждого канала на любой из выходных портов без электрооптического преобразования [2–5, 9].

Для демультиплексирования спектральных каналов в WSS может использоваться дифракционная решетка или MUX AWG. Переключение каналов между выходными портами осуществляется матрицей коммутационных элементов, для создания которых чаще всего применяются две технологии:

– микроэлектромеханические системы (Microelectromechanical System, MEMS) подвижных зеркал для частотного плана Fixed Grid [2, 9–11];

– жидкие кристаллы на кремнии (Liquid Crystal on Silicon, LCoS) для частотного плана Flexible Grid [12–15].

На рисунке 5 представлен WSS с коммутационной матрицей подвижных зеркал MEMS. MEMS-коммутаторы обеспечивают низкие вносимые потери и высокую изоляцию каналов, однако их возможности ограничены при работе с частотными планами Flexible Grid [9–11].

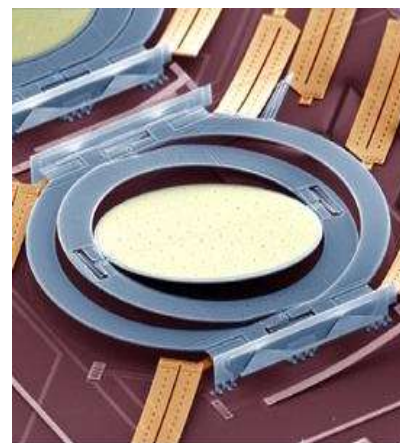
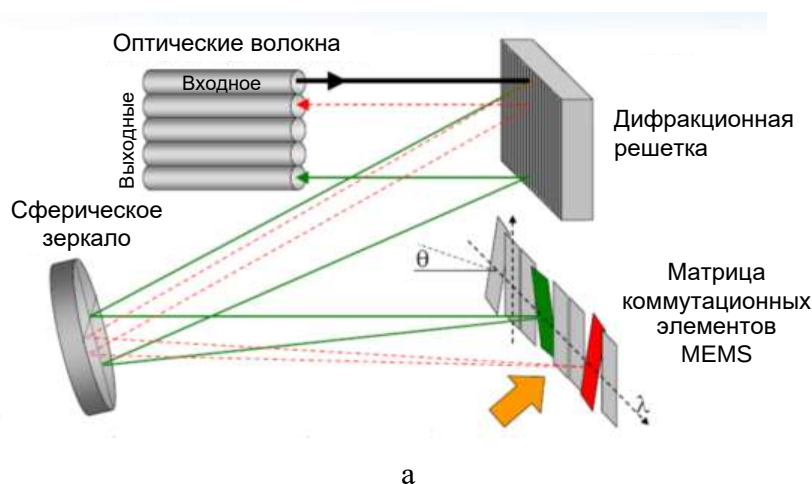


Рис. 5. WSS с коммутационной матрицей подвижных зеркал MEMS:
а) принцип работы; б) двухосевое подвижное зеркало

На рисунке 6 представлен WSS с коммутационной матрицей LCoS. Сигнал из входного оптического волокна коллимируется линзой и попадает на отражающую дифракционную решетку, которая разделяет его на отдельные спектральные каналы и направляет на матрицу LCoS, коммутационными элементами которой являются независимо управляемые жидкокристаллические пиксели,

модулирующие фазу падающего излучения. Такая матрица является по сути пространственным модулятором света. Излучение отдельного спектрального канала попадает одновременно на группу пикселей, образующих управляемую фазовую дифракционную решетку, которая отклоняет излучение на нужный угол, соответствующий выбранному выходному порту.

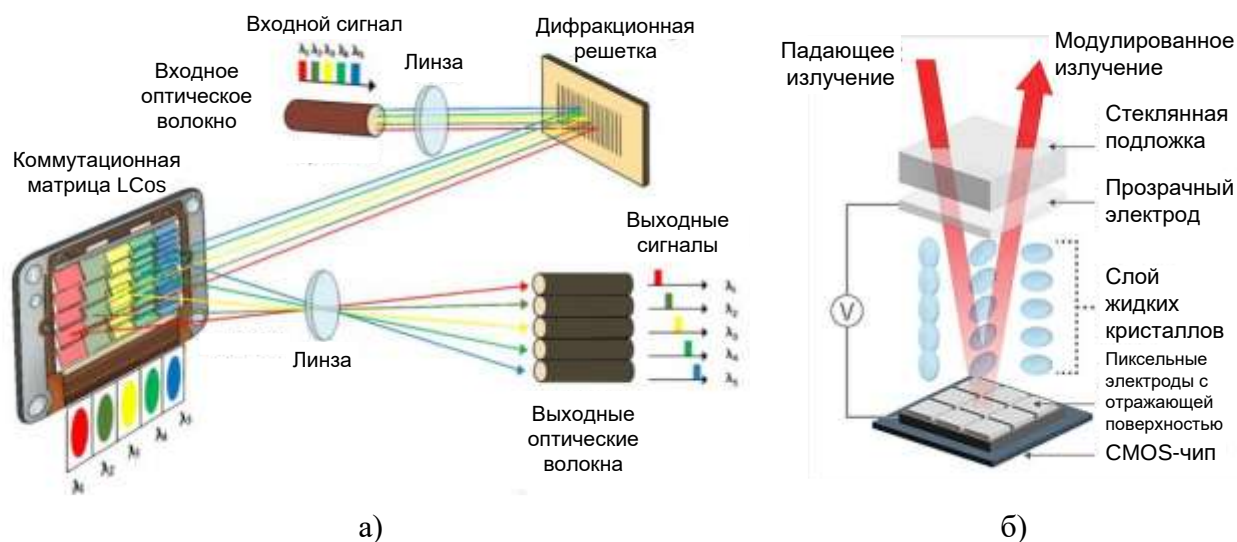


Рис. 6. WSS с коммутационной матрицей LCoS: а) принцип работы; б) структура матрицы

WSS с коммутационными матрицами LCoS, которые могут состоять из миллионов пикселей, широко используются в системах DWDM с гибкими частотными планами Flexible Grid. Главное свойство технологии WSS – бесцветность (Colorless), т. е. возможность направить излучение любой длины волны с входного порта на любой выходной порт. Именно это свойство лежит в основе эволюции ROADM от простейших цветных (Colored) узлов к гибким бесцветным, всенаправленным и бесконфликтным (CDC) архитектурам.

Broadcast-and-Select Colored & Directional ROADM

На рисунке 7 представлена структурная схема ROADM первого поколения [2, 5], в которую входят: оптические усилители на основе легированных эрбием волокон (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), MUX AWG, широкополосные оптические разветвители мощности (Power Splitter, PS) и управляемые оптические аттенюаторы (Variable Optical Attenuator, VOA). Данный узел ROADM связан с тремя другими узлами, расположенными в северном (North), западном (West) и восточном (East) направлениях. Оптический сигнал, входящий с одного из указанных направлений, после усиления в EDFA разделяется с помощью PS на N ослабленных копий, из которых используются только три по числу поддерживаемых направлений: одна копия направляется в блок ввода/вывода каналов своего направления, а две другие – в блоки ввода и транзита каналов двух других направлений. Выбор каналов для ввода, вывода и транзита осуществляется этими блоками. Такая архитектура называется Broadcast-and-Select (трансляция и выбор).

Вывод каналов. Проследим за сигналом, входящим с направления West. Одна его копия направляется на приемный демультиплексор AWG блока ввода /

вывода каналов West, где демультиплексируется на отдельные спектральные каналы, поступающие на входы приемников R трансиверов. В состав блока входят VOA. Управляя их затуханием, можно подавлять транзитные каналы, которые не должны выводиться в данном узле, а также регулировать уровни сигналов на входах приемников. Две другие копии поступают на WSS в блоках ввода и транзита каналов, расположенных в направлениях North и East.

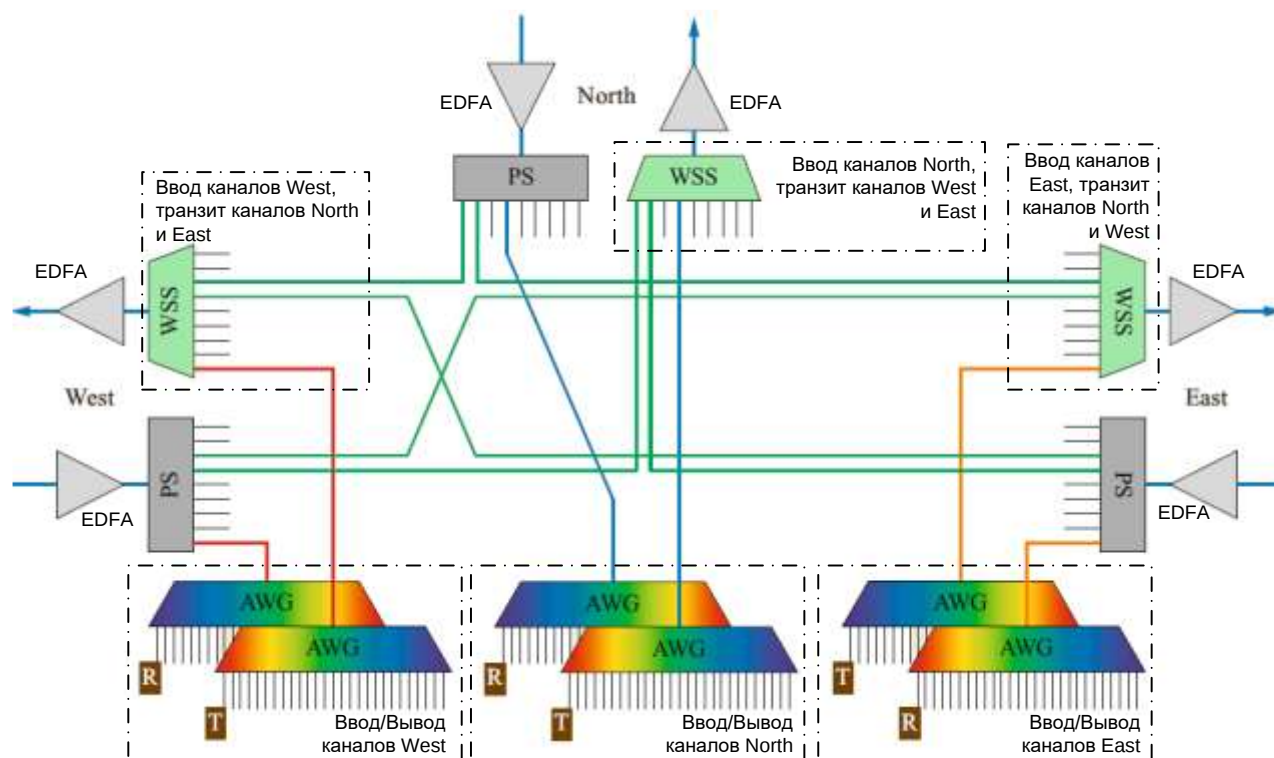


Рис. 7. Структурная схема Broadcast-and-Select Colored & Directional ROADM для узла с тремя направлениями

Ввод и транзит каналов. Рассмотрим работу WSS, формирующего исходящий в направлении West сигнал. На его входы поступают три сигнала:

- копии сигналов, входящих в ROADM с направлений North и East, содержащие каналы, которые можно пропустить транзитом;
- сигнал, состоящий из вводимых в направлении West каналов, который формируется в блоке ввода / вывода каналов West, содержащем передатчики T трансиверов, и объединяющий MUX AWG.

WSS объединяет транзитные и вводимые каналы в исходящий сигнал, подавляя при этом излучение каналов, которые выводятся в данном узле или проходят транзитом в других направлениях. Поскольку данный ROADM содержит MUX AWG, он является «цветным» (Colored), т. е. в нем имеется возможность динамически изменять набор вводимых и выводимых спектральных каналов, но для этого может потребоваться переключение трансиверов на другие порты ввода / вывода, так как каждый порт соотнесен со своей длиной волны.

В данном ROADM возможно также динамическое перенаправление транзитных каналов к разным узлам без физического вмешательства в инфраструктуру сети. Однако ввод каналов в исходящий сигнал каждого направления

осуществляется своим блоком ввода / вывода, т. е. переключение вводимого канала с одного направления на другое осуществляется вручную. Подобные ROADM называют «направленными» (Directional). Кроме того, использование MUX AWG жестко фиксирует частотный интервал между спектральными каналами, что исключает использование технологии Flex Grid.

Broadcast-and-Select Colorless & Directionless ROADM

Более современные ROADM представляют собой бесцветные (Colorless) и «всенаправленные» (Directionless) устройства (CD ROADM). Чтобы обеспечить «всенаправленность», все входящие и исходящие сигналы должны попадать на вход / выход каждого из направлений. Такой ROADM представлен на рисунке 8 [2, 5, 16, 17]. В отличие от устройства, изображенного на рисунке 7, в данном ROADM на каждый блок вывода каналов поступают копии входящих сигналов со всех направлений, а каждый блок ввода каналов отправляет копии вводимых сигналов на WSS всех направлений.

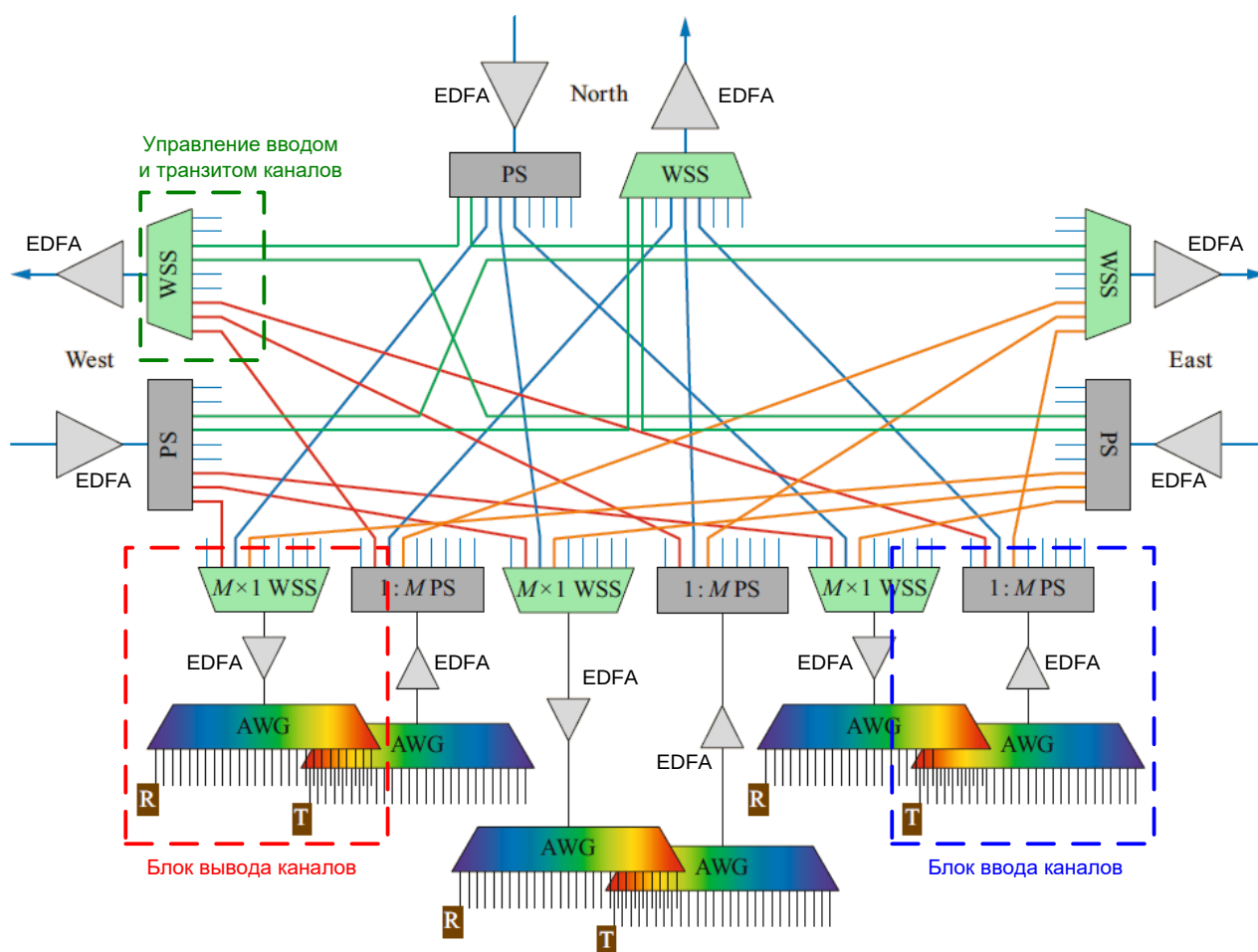


Рис. 8. Структурная схема Broadcast-and-Select CD ROADM для узла с тремя направлениями

Несмотря на то, что в блоках ввода и вывода каналов используются MUX AWG, данная схема обеспечивает бесцветность портов. Выводимые каналы отбираются бесцветными WSS $M \times 1$, а копии вводимых каналов создаются

неселективными $1 \times M \times PS$. Число портов M должно быть не меньше числа используемых направлений. В такой схеме обеспечивается принципиальная возможность осуществить для сигнала каждого спектрального канала любое необходимое действие: вывести его на приемное устройство, пропустить транзитом или ввести вместо него другой сигнал.

Для поддержки технологии Flexible Grid блоки ввода / вывода каналов не должны содержать MUX AWG. На рисунке 9 представлена структурная схема Colorless & Directionless ROADM, в которой вместо MUX AWG используются WSS $n \times 1$ и WSS $1 \times n$, выполняющие функции терминального мультиплексора и демультимплексора соответственно [2, 5, 16–20]. Число портов n в них должно быть не меньше числа используемых в сети спектральных каналов. Красными рамками показаны компоненты, относящиеся к блоку вывода, синими – к блоку ввода и транзита каналов.

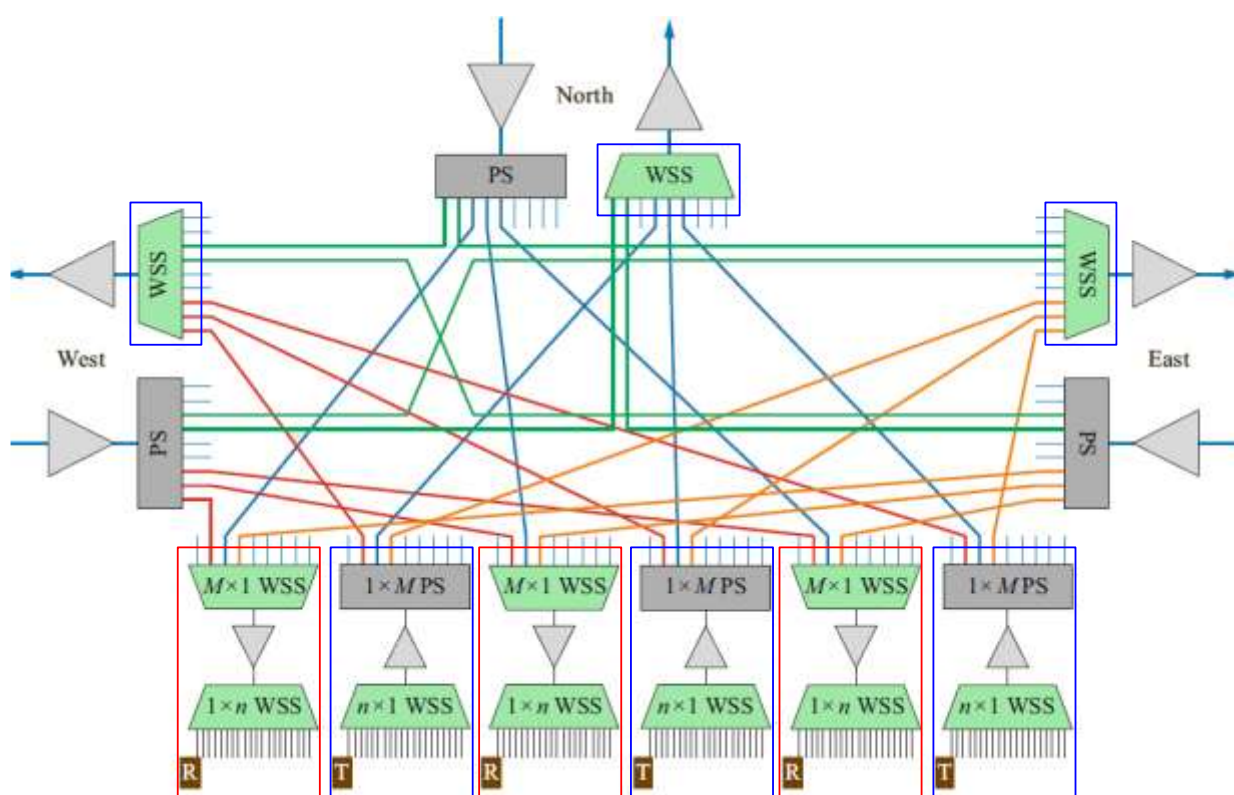


Рис. 9. Структурная схема Broadcast-and-Select CD ROADM для узла Flexible Grid с тремя направлениями

Route-and-Select Colorless & Directionless ROADM

Производительность ROADM с архитектурой Broadcast-and-Select быстро падает с увеличением числа направлений. В [2] для узлов с числом направлений восемь и более рекомендуется использовать архитектуру Route-and-Select (маршрутизация и выбор).

Структурная схема такого ROADM представлена на рисунке 10. Она отличается от схемы на рисунке 9 использованием WSS вместо PS [2, 16, 18, 19, 21]. Красными рамками обозначены компоненты, относящиеся к блоку вывода, синими – к блоку ввода каналов.

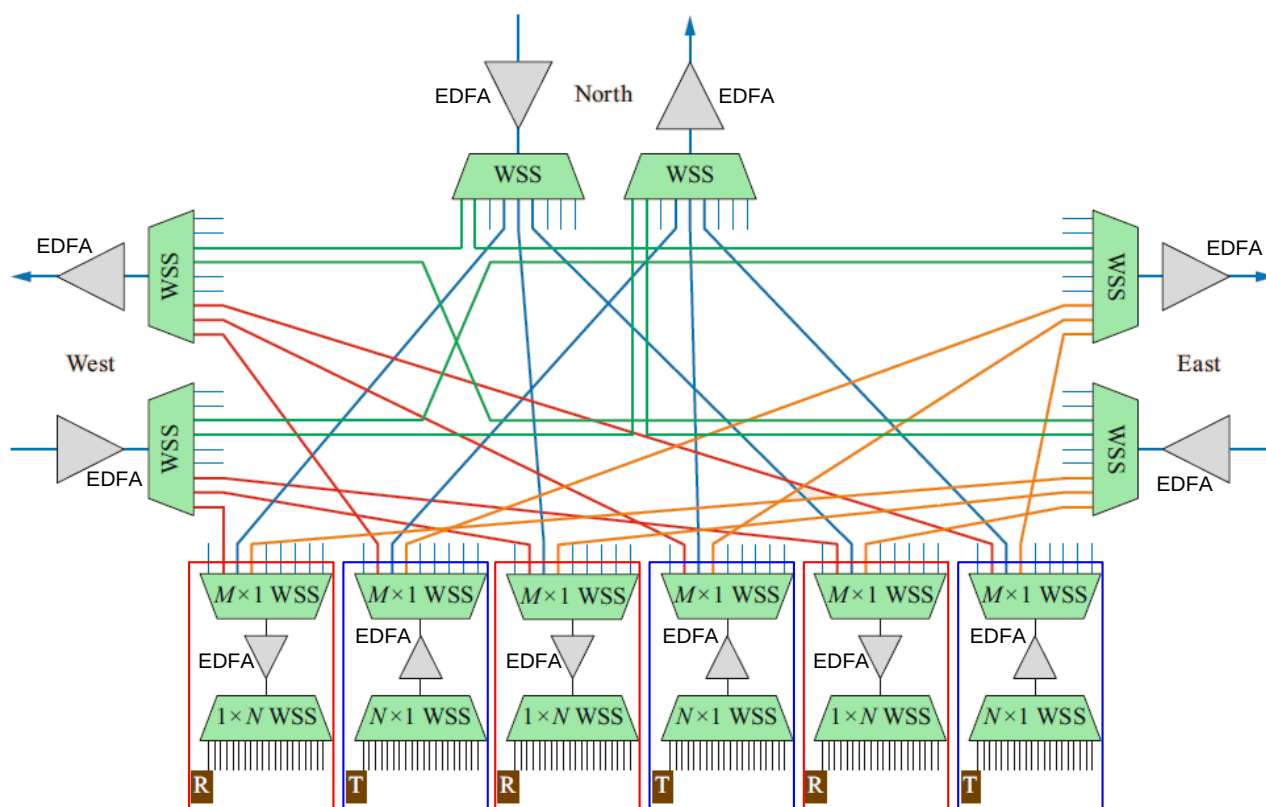
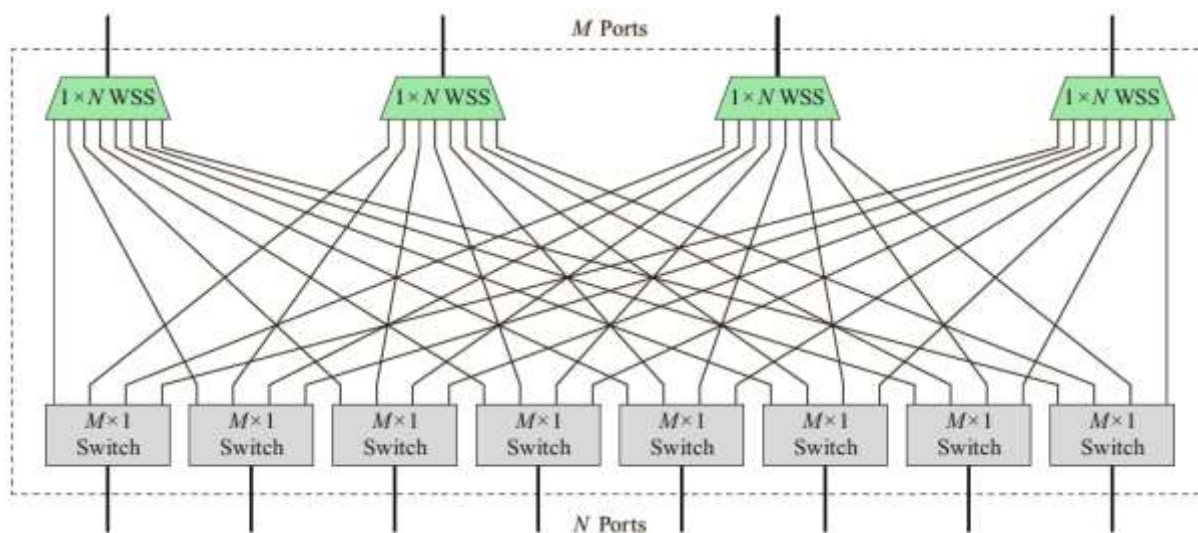


Рис. 10. Структурная схема Route-and-Select CD ROADM для узла Flexible Grid с тремя направлениями

Спектрально-селективные переключатели WSS $N \times M$

«Всенаправленность», реализованная в схемах на рисунках 8–10, привела к тому, что все устройства ввода и вывода каналов представляют собой единый блок, в котором присутствуют все вводимые и выводимые длины волн. В результате одна длина волны может быть использована для ввода / вывода только один раз и только в одном направлении. В таких узлах нельзя сформировать два канала, несущих разную информацию, но имеющих одну и ту же длину волны, даже если они предназначены для ввода в исходящие сигналы разных направлений. Такую возможность предоставляют ROADM нового поколения, которые кроме бесцветности и всенаправленности обладают свойством бесконфликтности (Contentionless). Для обеспечения бесконфликтности в ROADM используют для ввода / вывода каналов WSS $N \times M$ с несколькими входными и выходными портами.

WSS $N \times M$ (рисунок 11) содержат N неселективных переключателей $M \times 1$ Switch и M частотно-селективных переключателей WSS $1 \times N$ [2, 16, 22, 23]. Ввод / вывод канала осуществляется следующим образом. Излучение вводимого канала поступает на вход одного из переключателей $M \times 1$ Switch. Переключатель $M \times 1$ Switch направляет это излучение на WSS $1 \times N$ того из M направлений, в которое необходимо ввести данный канал. Выводимый канал отбирается частотно-селективным переключателем WSS $1 \times N$ и направляется им на нужный переключатель $M \times 1$ Switch.

Рис. 11. Структурная схема WSS $N \times M$

Такое устройство позволяет независимо перенаправлять сигнал любой длины волны с любого из M входных портов на любой из N выходных портов. При этом исключается ситуация направления двух сигналов одинаковой длины волны на один и тот же выходной порт.

Route-and-Select Colorless & Directionless & Contentionless ROADM

Последним достижением в развитии ROADM стала разработка бесконфликтных (Contentionless) устройств, в которых отсутствует ограничение на использование одинаковых длин волн на разных направлениях (рисунок 12) и сохраняются все преимущества бесцветности и всенаправленности. Такие Colorless & Directionless & Contentionless устройства называют CDC ROADM. [2, 16, 24].

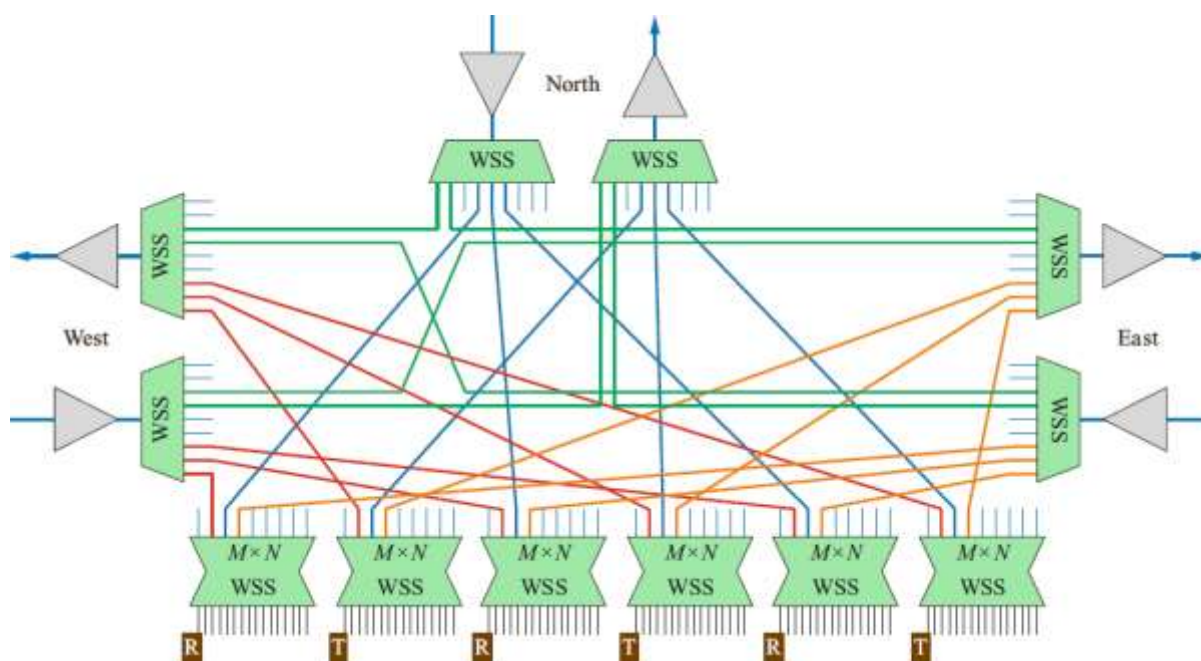


Рис. 12. Структурная схема Route-and-Select CDC ROADM для узла Flexible Grid с тремя направлениями

Рекомендации по выбору архитектуры ROADM

Выбор конкретной архитектуры узла ROADM для транспортной сети зависит от нескольких факторов. Основными критериями являются масштаб сети, число поддерживаемых направлений, тип частотного плана.

Необходимость использования архитектур CD и CDC ROADM, поддерживающих автоматическую перенастройку узла, связана с масштабом сети. В небольших корпоративных сетях, где изменения конфигурации происходят редко (не чаще нескольких раз в год), автоматизация этих изменений нецелесообразна. В городских сетях, где перенастройка может требоваться несколько раз в неделю, например, при перераспределении каналов между узлами или аварийных переключениях, автоматизация изменений может быть экономически оправданной. В крупных магистральных сетях с высокими требованиями к отказоустойчивости перенастройка может происходить ежедневно, и автоматизация необходима. Выбор между архитектурами Broadcast-and-Select и Route-and-Select зависит от числа направлений, поддерживаемых узлом ROADM. Обобщенные рекомендации по выбору архитектуры ROADM приведены в таблице 1.

Таблица 1. Рекомендации по выбору архитектуры ROADM

Масштаб сети	Число направлений	Необходимость перенастройки	Частотный план	Рекомендуемая архитектура
Небольшая или средняя	2–8	редко	Fixed Grid	Broadcast-and-Select Colored & Directional
Средняя	2–8	часто	Fixed Grid или Flexible Grid	Broadcast-and-Select Colorless & Directionless
Средняя	4–16	часто	Flexible Grid	Route-and-Select Colorless & Directionless
Крупная	8–16	часто	Flexible Grid	Route-and-Select Colorless & Directionless & Contentionless

Заключение

Развитие оптических транспортных сетей послужило толчком для эволюции ROADM, которые прошли путь от цветных и направленных устройств до современных бесцветных, всенаправленных и бесконфликтных решений. Каждый новый этап развития ROADM был обусловлен необходимостью преодоления конкретных ограничений:

- отказ от привязки портов к длинам волн (Colorless) и направлениям (Directionless) позволил осуществлять маршрутизацию сигналов на оптическом уровне без физического вмешательства в инфраструктуру;
- переход от архитектуры Broadcast-and-Select к Route-and-Select решил проблему масштабируемости, обеспечив эффективную работу узлов с большим числом направлений;
- обеспечение бесконфликтности (Contentionless) позволило повысить эффективность использования спектрального ресурса.

Однако применение современных CDC ROADMs с поддержкой Flexible Grid в оптических транспортных сетях не всегда оправдано. Выбор архитектуры ROADM для конкретного участка сети должен опираться на комплексную оценку ее масштаба, интенсивности изменений трафика, типа частотного плана. Для крупных магистральных сетей с высокой динамикой трафика для обеспечения гибкости, надежности и экономической эффективности необходимо внедрять CDC ROADMs, но для небольших сетей целесообразно использовать более простые решения.

Литература

1. Трешиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM-системы. М.: Техносфера, 2024. 476 с.
2. Springer Handbook of Optical Networks / Ed. by B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. J. Winzer, Y. Zhao. Cham: Springer, 2020. 1182 p. DOI: 10.1007/978-3-030-16250-4.
3. Kartalopoulos S. V. DWDM: Networks, Devices, and Technology. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. 487 p. DOI: 10.1109/9780470544440.
4. Chen Y.-K., Chang C. H., Yang Y. L., Kuo I. Y., Liang T. C. Mach-Zehnder Fiber-Grating-Based Fixed and Reconfigurable Multichannel Optical Add-Drop Multiplexers for DWDM Networks // Optics Communications. 1999. Vol. 169. Iss. 1–6. PP. 245–262. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00408-3. EDN: ADXUMB
5. Былина М. С., Глаголев С. Ф., Гоменица В. А., Фраз А. В., Цветков Д. А. и др. Принципы построения современных мультиплексоров ввода/вывода ROADM // Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024)» (27–28 февраля 2024 г., Санкт-Петербург): в 4 т. / под. ред. С. А. Брусиловского. Т. 1. СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 146–151. EDN: HLBNRG
6. Tachikawa Y., Inoue Y., Ishii M., Nozawa T. Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer with Loop-Back Optical Paths and Its Applications // Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14. Iss. 6. PP. 977–984. DOI: 10.1109/50.511597
7. Brückner V. Elements of Optical Networking: Basics and Practice of Glass Fiber Optical Data Communication. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. 251 p.
8. Dlamini P. P., Isoe G. M., Grattan K. T. V., Rahman A. B. M., Leitch A. W. R., et al. Fibre Bragg Grating Based All Optical OADM for Flexible Spectrum Channel Reservation to Minimize Optical Crosstalk in WDM Optical Communication Networks // Proceedings of Southern African Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC, Kwa-Zulu Natal, South Africa, 1–4 September 2019). Kwa-Zulu Natal, 2019. PP. 138–143.
9. Ma Y., Stewart L., Armstrong J., Clarke I. G., Baxter G. Recent Progress of Wavelength Selective Switch // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39. Iss. 4. PP. 896–903. DOI: 10.1109/JLT.2020.3022375. EDN: IQHYYS

10. Thakulsukanant K. MEMS Technology for Optical Switching // Walailak Journal of Science and Technology. 2013. Vol. 10. Iss. 1. PP. 9–18. DOI: 10.2004/wjst.v10i1.390
11. Liu A.-Q. Photonic MEMS Devices: Design, Fabrication and Control. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 483 p.
12. Frisken S., Baxter G., Abakoumov D., Zhou H., Clarke I., et al. Flexible and Grid-less Wavelength Selective Switch using LCOS Technology // Optical Fiber Communication Conference (OSA, 6–10 March 2011, Los Angeles, USA). 2011. DOI: 10.1364/OFC.2011.OTuM3
13. Optical Fiber Telecommunications. Vol. VIA. Components and Subsystems / Ed. by I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner. Amsterdam: Academic Press: Elsevier, 2013. 794 p.
14. Wang M., Zong L., Mao L., Marquez A., Ye Y., et al. LCoS SLM Study and Its Application in Wavelength Selective Switch // Photonics. 2017. Vol. 4. Iss. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/photonics4020022
15. Ji H., Shan Y., Mo Y. Chen Zh., Ma D. Optical Design of an LCoS-Based 1×10 WSS with High Coupling Efficiency and Compact Light Paths // Photonics. 2023. Vol. 10. Iss. 10. P. 1107. DOI: 10.3390/photonics10101107. EDN: CZEWMA
16. Handbook of Radio and Optical Networks Convergence / Ed. by T. Kawanishi. Singapore: Springer, 2024. 1723 p. DOI: 10.1007/978-981-97-2282-2
17. Way W. I., Ji P. N., Patel A. N. Wavelength Contention-Free via Optical Bypass within a Colorless and Directionless ROADM [Invited] // Journal of Optical Communications and Networking. 2013. Vol. 5. Iss. 10. PP. A220–A229. DOI: 10.1364/JOCN.5.00A220
18. Sakamaki Y., Kawai T., Fukutoku M. Next-generation Optical Switch Technologies for Realizing ROADM with More Flexible Functions // NTT Technical Review. 2014. Vol. 12. Iss. 1. PP. 37–41. DOI: 10.53829/ntr201401fa6
19. Jinno M., Sasaki R., Izumi T., Kitada M., Miyamura T., et al. Minimal-Hardware Colorless-Directionless ROADM Based on a Single Multi-Input-Port-WSS with Joint Switching // Journal of Optical Communications and Networking. 2026. Vol. 18. Iss. 3. PP. 195–205. DOI: 10.1364/jocn.580878. EDN: ELFAEM
20. Skorin-Kapov N., Pavón-Mariño P., Quagliotti M., Riccardi E., Napoli A., et al. A Broadcast-and-Select ROADM Architecture to Support Linear Hub-Ended Trees Using Point-to-Multipoint Coherent Transceivers [Invited] // Journal of Optical Communications and Networking. 2025. Vol. 17. Iss. 7. PP. C1–C10. DOI: 10.1364/JOCN.550101. EDN: OEJPKY
21. Yang R., Liu L., Yan S., Simeonidou D. A Programmable ROADM System for SDM/WDM Networks // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 9. P. 4195. DOI: 10.3390/app11094195. EDN: LZTQMC
22. Yamaguchi K., Ikuma Y., Nakajima M., Suzuki K., Itoh M., et al. $M \times N$ Wavelength Selective Switches Using Beam Splitting by Space Light Modulators // IEEE Photonics Journal. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 7901708. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2527705.

23. Ikeda K., Suzuki K., Konoike R., Kawashima H. Silicon Photonics Wavelength Selective Switch with Unlimited Free Spectral Range // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. Iss. 12. PP. 3268–3275. DOI: 10.1109/JLT.2020.2989379. EDN: TDAJWW

24. Фокин В. Г., Ибрагимов Р. З. Гибкие оптические сети: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2022. 252 с.

**Статья поступила 08 мая 2026 г.
Одобрена после рецензирования 27 мая 2026 г.
Принята к публикации 06 июля 2026 г.**

Информация об авторах

Былина Мария Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: Bylina.Maria@sut.ru

Шевцова Александра Андреевна – студент 3-го курса факультета инфокоммуникационных систем и сетей (группа ИКТО-38) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: shevtsova.aa@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-68-85>
EDN: MQPIJB

Application of Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexers in DWDM Networks

✉ M. Bylina, ✉ A. Shevtsova

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Saint-Petersburg, 193232, Russian Federation

Background. Modern OTN-DWDM optical transport networks have complex topologies, with more than one route between any two network nodes. Dynamic optical routing of spectral channels is required for flexible network management and to ensure reliable and uninterrupted operation. Spectral channel routes in OTN-DWDM networks are created using optical add / drop multiplexers (OADMs). Passive OADMs, based on optical filters, do not allow route changes without physical equipment replacement. Therefore, reconfigurable OADMs (ROADMs) are used in modern networks, enabling dynamic channel rerouting. **Purpose.** To qualitatively assess the effectiveness and feasibility of using ROADMs in OTN-DWDM networks based on a comparative analysis of their structural diagrams and architectures. **Results.** The operating principles and structural diagrams of ROADMs and their main components—wavelength-selective switches (WSS)—for DWDM networks using fixed and flexible spectral channel grids are examined. A comparative analysis of ROADM architectures (Colored, Colorless, Directionless, Contentionless, Broadcast-and-Select, Route-and-Select) is conducted. Recommendations for selecting a ROADM architecture for an OTN-DWDM transport network are provided. **Practical relevance.** The proposed recommendations for selecting a ROADM architecture can be used in the design and modernization of OTN-DWDM networks to reduce operating costs and improve network resilience.

Key words: dense wavelength division multiplexing DWDM, optical transport network OTN, reconfigurable optical add / drop multiplexer ROADM, wavelength-selective switch WSS, Colorless & Directionless & Contentionless ROADM, broadcast-and-select architecture, Route-and-Select architecture

References

1. Trechikov V. N., Listin V. N. DWDM-Systems. Moscow: Technosphere Publ., 2024. 476 pp. (in Russian)
2. Springer Handbook of Optical Networks / Ed. by B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. J. Winzer, Y. Zhao. Cham: Springer, 2020. 1182 p. DOI: 10.1007/978-3-030-16250-4.
3. Kartalopoulos S. V. DWDM: Networks, Devices, and Technology. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. 487 p. DOI: 10.1109/9780470544440.
4. Chen Y.-K., Chang C. H., Yang Y. L., Kuo I. Y., Liang T. C. Mach-Zehnder Fiber-Grating-Based Fixed and Reconfigurable Multichannel Optical Add-Drop Multiplexers for DWDM Networks // Optics Communications. 1999. Vol. 169. Iss. 1–6. PP. 245–262. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00408-3. EDN: ADXUMB
5. Bylina M., Glagolev S., Gomenitsa V., Fraz A., Tsvetkov D., et al. Principles of Construction of Modern Input/Output Multiplexers ROADM // Proceedings of the XIII of the International Scientific, Technical and Methodical Conference “International Conference on Advanced Infotelecommunications” (ICAIT, 27–28 February

2024, St. Petersburg, Russia) / Ed. by S. Brusilovsky. Vol. 1. St. Petersburg: SPbSUT, 2024. PP. 146–151. (in Russian) EDN: HLBNRG

6. Tachikawa Y., Inoue Y., Ishii M., Nozawa T. Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer with Loop-Back Optical Paths and Its Applications // *Journal of Lightwave Technology*. 1996. Vol. 14. Iss. 6. PP. 977–984. DOI: 10.1109/50.511597

7. Brückner V. Elements of Optical Networking: Basics and Practice of Glass Fiber Optical Data Communication. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. 251 p.

8. Dlamini P. P., Isoe G. M., Grattan K. T. V., Rahman A. B. M., Leitch A. W. R., et al. Fibre Bragg Grating Based All Optical OADM for Flexible Spectrum Channel Reservation to Minimize Optical Crosstalk in WDM Optical Communication Networks // *Proceedings of Southern African Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC, 1–4 September 2019, Kwa-Zulu Natal, South Africa)*. Kwa-Zulu Natal, 2019. PP. 138–143.

9. Ma Y., Stewart L., Armstrong J., Clarke I. G., Baxter G. Recent Progress of Wavelength Selective Switch // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. Vol. 39. Iss. 4. PP. 896–903. DOI: 10.1109/JLT.2020.3022375. EDN: IQHYYS

10. Thakulsukanant K. MEMS Technology for Optical Switching // *Walailak Journal of Science and Technology*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. PP. 9–18. DOI: 10.2004/wjst.v10i1.390

11. Liu A.-Q. Photonic MEMS Devices: Design, Fabrication and Control. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 483 p.

12. Frisken S., Baxter G., Abakoumov D., Zhou H., Clarke I., et al. Flexible and Grid-less Wavelength Selective Switch using LCOS Technology // *Optical Fiber Communication Conference (OSA, 6–10 March 2011, Los Angeles, USA)*. 2011. DOI: 10.1364/OFC.2011.OTuM3

13. Optical Fiber Telecommunications. Vol. VIA. Components and Subsystems / Ed. by I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner. Amsterdam: Academic Press: Elsevier, 2013. 794 p.

14. Wang M., Zong L., Mao L., Marquez A., Ye Y., et al. LCoS SLM Study and Its Application in Wavelength Selective Switch // *Photonics*. 2017. Vol. 4. Iss. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/photonics4020022

15. Ji H., Shan Y., Mo Y. Chen Zh., Ma D. Optical Design of an LCoS-Based 1×10 WSS with High Coupling Efficiency and Compact Light Paths // *Photonics*. 2023. Vol. 10. Iss. 10. P. 1107. DOI: 10.3390/photonics10101107. EDN: CZEWMA

16. Handbook of Radio and Optical Networks Convergence / Ed. by T. Kawanishi. Singapore: Springer, 2024. 1723 p. DOI: 10.1007/978-981-97-2282-2

17. Way W. I., Ji P. N., Patel A. N. Wavelength Contention-Free via Optical Bypass within a Colorless and Directionless ROADM [Invited] // *Journal of Optical Communications and Networking*. 2013. Vol. 5. Iss. 10. PP. A220–A229. DOI: 10.1364/JOCN.5.00A220

18. Sakamaki Y., Kawai T., Fukutoku M. Next-generation Optical Switch Technologies for Realizing ROADM with More Flexible Functions // *NTT Technical Review*. 2014. Vol. 12. Iss. 1. PP. 37–41. DOI: 10.53829/ntr201401fa6

19. Jinno M., Sasaki R., Izumi T., Kitada M., Miyamura T., et al. Minimal-Hardware Colorless-Directionless ROADM Based on a Single Multi-Input-Port-WSS with

Joint Switching // Journal of Optical Communications and Networking. 2026. Vol. 18. Iss. 3. PP. 195–205. DOI: 10.1364/jocn.580878. EDN: ELFAEM

20. Skorin-Kapov N., Pavón-Mariño P., Quagliotti M., Riccardi E., Napoli A., et al. A Broadcast-and-Select ROADM Architecture to Support Linear Hub-Ended Trees Using Point-to-Multipoint Coherent Transceivers [Invited] // Journal of Optical Communications and Networking. 2025. Vol. 17. Iss. 7. PP. C1–C10. DOI: 10.1364/JOCN.550101. EDN: OEJPKY

21. Yang R., Liu L., Yan S., Simeonidou D. A Programmable ROADM System for SDM/WDM Networks // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 9. P. 4195. DOI: 10.3390/app11094195. EDN: LZTQMC

22. Yamaguchi K., Ikuma Y., Nakajima M., Suzuki K., Itoh M., et al. $M \times N$ Wavelength Selective Switches Using Beam Splitting by Space Light Modulators // IEEE Photonics Journal. 2016. Vol. 8. Iss. 1. P. 7901708. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2527705.

23. Ikeda K., Suzuki K., Konoike R., Kawashima H. Silicon Photonics Wavelength Selective Switch with Unlimited Free Spectral Range // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38. Iss. 12. PP. 3268–3275. DOI: 10.1109/JLT.2020.2989379. EDN: TDAJWW

24. Fokin V. G., Ibragimov R. Z. Flexible Optical Networks: A Teaching Manual for Universities. St. Petersburg: Lan' Publ., 2022. 252 p. (in Russian)

Information about Authors

Bylina Maria – Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: Bylina.Maria@sut.ru

Shevtsova Alexandra – 3-rd-Year Student of Faculty of Infocommunication Networks and Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: shevtsova.aa@sut.ru

ДАТА ВЫХОДА В СВЕТ 06.07.2026

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**
Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**