

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Иванин А. Н.¹, Субботин Д. В.², Щербак К. П.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-93-101

Ключевые слова: радиофотоника, модель оптической линии передачи, спектры, модуляторы.

Аннотация

Цель работы состоит в исследовании эффективности радиофотонного переноса радиочастотного спектра, формируемого разнотипными средствами путем моделирования оптической линии передачи радиосигналов в программной среде OptiSystem.

Метод исследования: в работе применяется имитационное моделирование для формирования «цифрового двойника» в целях оценки спектральных и энергетических показателей передачи без необходимости физических экспериментов.

Результаты исследования: разработана модель радиофотонной системы и проведен имитационный эксперимент по исследованию совместной одновременной работы радиоизлучающих средств, использующих различные виды модуляции (ЧМ, QPSK). Проанализированы характеристики передаваемых сигналов (спектры, осциллограммы, качество сигнала). Сформированы направления дальнейших исследований.

Научная новизна: предложенная модель позволяет комплексно учитывать свойства лазера, модулятора, оптоволокна и фотоприемника для проектирования оптических линий связи с учетом использования внешнего модулятора (на основе интерферометра Маха-Цендера).

Введение

Современные беспроводные системы связи предъявляют все более высокие требования к пропускной способности и диапазону рабочих частот. Расширение радиочастотного диапазона приводит к необходимости устранения ряда противоречий, связанных с передачей сигналов на высоких частотах традиционными электронными средствами вследствие больших потерь и ограниченной полосы электроники. Радиофотонные системы (РФС) предлагают решение, перенося радиосигналы в оптический диапазон: световой сигнал модулируется высокочастотным радиосигналом и передается по оптоволокну с малыми потерями. Волоконно-оптические линии обладают существенно более низким затуханием и невосприимчивы к электромагнитным помехам по сравнению с электрическими кабелями. Это позволяет передавать радиочастотный спектр на большие расстояния без промежуточного усиления, обеспечивая широкую полосу и высокое качество сигнала. Кроме того, радиофотонные системы способны работать в широкой полосе частот, что позволяет

рассматривать их для реализации перспективных систем — от распределенных радиосетей до радиолокационных станций нового поколения [7]. Таким образом, развитие радиофотонных методов передачи радиосигналов актуально для дальнейшего расширения диапазона и повышения эффективности современных радиоэлектронных систем.

Форматы модуляции, рассматриваемые в работе

Для оценки работы радиофотонной линии рассмотрены два типа модулированных радиосигналов, наиболее часто применяемых при организации радиообмена в радиосетях: частотно-модулированный (ЧМ) и квадратурно-фазоманипулированный (QPSK) сигнал. Выбор обусловлен необходимостью работать как в цифровых, так и в аналоговых режимах работы на различных радиосредствах, в различных радиосетях. Ниже приведены математические описания этих сигналов:

Частотная модуляция (ЧМ). Частотно-модулированный сигнал характеризуется постоянной амплитудой и изменением мгновенной частоты несущей пропорционально

¹ Иванин Андрей Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры Военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ivanin-89@mail.ru

² Субботин Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, докторант кафедры Военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: d1sub@yandex.ru

³ Щербак Кирилл Павлович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры Военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи Военной академии связи им. С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kirillsherbak@gmail.com

сообщению. Например, синусоидальная ЧМ с девиацией Δf запишется как (1):

$$u_{FM}(t) = A_c \cos(\omega_c t + \beta \sin(\omega_m t)), \quad (1)$$

где $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$ – индекс частотной модуляции (отношение девиации частоты к частоте модулирующего сигнала).

Мгновенная угловая частота равна $\omega_c + \beta \omega_m \cos(\omega_m t)$. Спектр ЧМ содержит бесконечный ряд боковых компонентов на частотах $f_c \pm n f_m$ с коэффициентами Бесселя $J_n(\beta)$. В контексте радиофотонной линии прямое модулирование по интенсивности оптического сигнала ЧМ-колебанием несколько нетривиально, поскольку амплитуда радионесущей постоянна. Тем не менее, при подаче ЧМ-сигнала возникает эквивалент амплитудной модуляции оптического излучения на частоте несущей f_c – по сути, модулятор преобразует изменение фазы в изменение интенсивности при несбалансированном режиме. В предельном случае малого индекса ($\beta \ll 1$) выходной оптический сигнал будет содержать основную компоненту и первые боковые, пропорциональные β [2]. После детектирования фотодиод воспроизводит электрический ЧМ-сигнал с сохранением всей заложенной в вариациях частоты информации. Преимущество ЧМ – относительная устойчивость к амплитудным

шумам и нелинейностям тракта (так как полезная информация передается в фазе), однако для достоверной передачи требуется высокая линейность фазового отклика модулятора. В разработанной модели, для имитации передачи ЧМ-сигнала, на интерферометр Маха-Цандера (ИМЦ) подается несущая высокого порядка с небольшими фазовыми колебаниями (имитируя ЧМ), и производится сравнение сигнала на выходе фотодиода с исходным сигналом.

Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK). Информационные биты кодируются четырьмя дискретными фазовыми сдвигами несущей. На каждом символе (двоичном символе длиной 2 бита) сигнал принимает одну из четырех фаз: 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ (при стандартном кодировании бит) [6].

В работе рассматривается вариант, когда на вход модулятора Маха-Цандера (ИМЦ) поступает радионесущая, уже модулированная по фазе цифровым сообщением. Этот сигнал имеет постоянную огибающую и лишь фазовые скачки. Модулятор, работающий в линейном режиме, передает такой сигнал без амплитудных искажений – оптическая интенсивность остается практически постоянной, а все фазовые сдвиги преобразуются в небольшие изменения мощности из-за

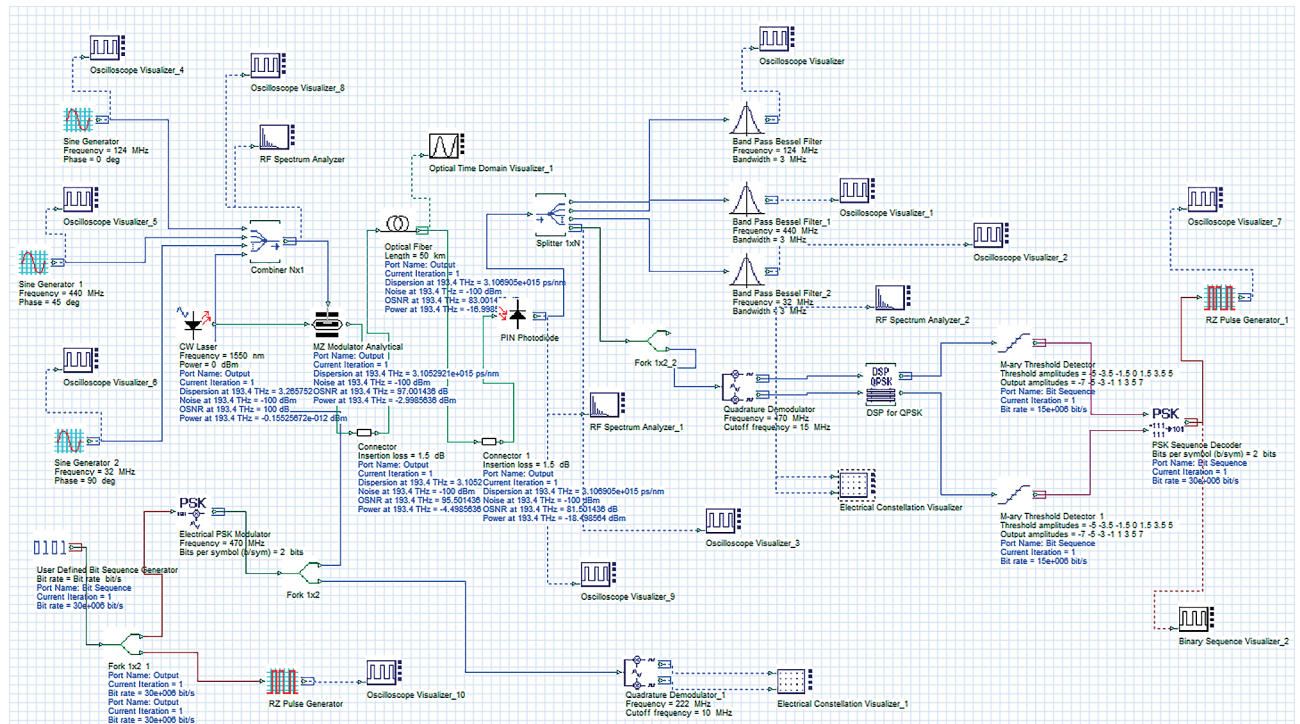


Рис. 1. Структурная схема модели RoF в OptiSystem

неидеального баланса. Тем не менее, при оптимальном смещении эти остаточные колебания минимальны, и фаза сигнала сохраняется. После фотодетектирования полученный электрический сигнал распознается с помощью DSP-процессора и декодируется при помощи QPSK-демодулятора и подается на средства визуализации для сравнения его с исходным сигналом.

Описание модели в OptiSystem

Для исследования разработана радиофотонной системы в среде **OptiSystem**. Структура модели представлена схемой радиофотонной системы (**Radio Over Fiber – RoF**), предназначенной для объединения радиочастотного спектра разнородных радиосредств с одновременным переносом радиочастотного спектра по оптическому волокну и его обратного преобразования и анализа на дальнем конце (рис. 1).

В таблице 1 перечислены основные компоненты и их параметры, используемые в модели.

Режим работы модели

На передающем конце для каждого типа модуляции предусмотрена отдельная часть модели с возможностью гибкого изменения параметров исследуемых сигналов. Лазер и волокно остаются неизменны во всех экспериментах. Предусмотрено, что в модели можно задавать длину волокна, уровень оптической мощности, наличие шумов (например, добавлять источник лазерного шума или шумовое окончание приемника). В работе основное внимание уделено идеализированным условиям, поэтому шум не рассматривался, а оценка качества определялась, в основном, искажениями и ослаблением сигнала.

Передающая часть модели представляет собой три генератора синусоидального сигнала, имитирующих передачу частотно-модулированного радиосигнала на разных несущих и PSK-модулятора, на вход которого подается заданная последовательность битов для имитации цифрового QPSK сигнала, после чего все сигналы через объединитель поступают

Таблица 1.

Компоненты, используемые в модели и их параметры

Компонент модели	Состав и параметры компонентов, используемых в модели
Источник лазерного излучения (<i>CW Laser</i>)	Длина волны 1550 нм; выходная мощность +0 дБм (1 мВт); спектральная ширина не учитывается (когерентный источник). Лазер работает в непрерывном режиме, модуляция внешняя.
Модулятор Маха-Цендера (<i>LiNbO₃ MZM</i>)	Полуволновое напряжение В; рабочая точка – середина передаточной характеристики; полоса модулятора 20 ГГц [5].
Генераторы синусоидальных импульсов (<i>Sine Generators</i>)	Имитация разных типов сигналов: ЧМ-сигнал с несущей частотой 124 МГц, ЧМ-сигнал с несущей частотой 32 МГц; ЧМ-сигнал с несущей частотой 420 МГц; QPSK-сигнал, модулированный заданной битовой последовательностью на частоте 470 МГц. Данные параметры выбраны так, чтобы продемонстрировать различие спектральных свойств и требований разных модуляций.
Оптическое волокно (<i>Optical Fiber</i>)	Длина 50 км, коэффициент затухания 0,2 дБ/км (на длине волны 1550 нм); дисперсия 16 пс/(нм·км), полное хроматическое расширение импульса для 20 км порядка 0,32 нм·пс; поляризационная дисперсия <0,1 пс/√км и не учитывается. Нелинейные эффекты не проявляются ввиду малой мощности входного сигнала и в модели не учитываются.
Оптический приемник	PIN-фотодиод с чувствительностью ~0,8 А/Вт, без внутреннего усиления. За фотодиодом установлен оптический фильтр (Band Pass Bessel Filter) для удаления высокочастотных компонентов вне полезного диапазона. с частотой среза, соответствующей настройке LC-контра радиоприемного средства и DSP-процессор для выделения информационной последовательности в случае QPSK.
Средства визуализации	RF Spectrum Analyzer для исследования спектрального состава радиосигнала до модуляции и после приема; Optical Spectrum Analyzer (OSA) для наблюдения оптического спектра на выходе модулятора и после прохождения волокна; Oscilloscope Visualizer для просмотра временных реализаций сигналов (осциллограмм);

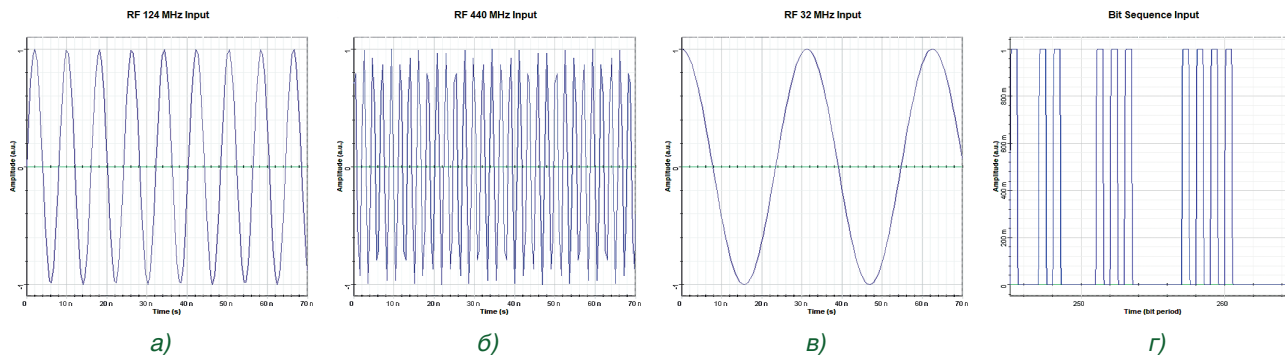


Рис. 2. Сигналы, подаваемые на вход модели:
а), б), в) – для частотной модуляции, г) – для цифрового сигнала с QPSK

на вход ИМЦ, который модулирует лазерный светодиод.

На каждом этапе предусмотрено отслеживание формы сигнала и его спектра. Форма входных сигналов представлена на рис. 2 а), б), в), г). Оптический спектр на выходе модулятора контролируется оптическим спектроанализатором (**optical spectrum analyzer – OSA**). После прохождения через волокно спектральная картина не претерпевает качественных изменений, лишь общая мощность спектра, представленного на рисунке 3 б) снижается на величину потерь. При этом дисперсионное расширение для данных параметров в спектральной области практически неразлично, что вполне объясняется малыми частотами передачи и небольшой длиной оптического волокна в моделируемой системе.

На приемном конце осуществляется фотодетектирование принятого оптического сигнала. В **OptiSystem** фотодиод моделируется как квадратичный детектор с указанной чувствительностью и спектром шумов. Преобразованный оптический сигнал поступает на три полосовых фильтра, имитирующих работу приемного тракта приемника радиосигнала и DSP процессор, для восстановления полученной битовой последовательности. Для оценки изменения формы сигналов и битовой последовательности, предусмотрены средства визуализации. Предполагается, что спектр радиосигнала после фотодетектора будет идентичен спектру генератора до модуляции (с поправкой на усиление/затухание). Форма выходного сигнала на осциллограмме должна совпадать с формой входного сигнала.

Таким образом, сконфигурированная модель позволяет наглядно проследить преобразование сигнала на каждом этапе из радиосигнала в оптический и обратно, а также

оценить спектральные и временные показатели на выходе системы.

Результаты моделирования

Спектральные характеристики. Моделирование подтвердило, что оптический спектр, сформированный на выходе модулятора, полностью отражает структуру модулирующего радиосигнала. На рис. 2 (а, б, в, г) показаны примеры подаваемых на вход ММЦ ЧМ модулированного и цифрового сигналов, на рис. 3 (а) показана форма объединенного радиосигнала, поступающего на вход ММЦ, а на рис. 3 (б) спектра радиосигнала при передаче объединенного сигнала QPSK (470 МГц) и трех сигналов на частотах 32 МГц, 124 МГц и 440 МГц.

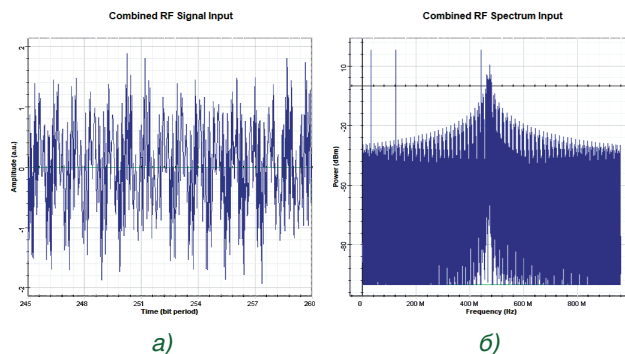


Рис. 3. Сигналы, полученные
а) на входе антенны радиопотонной системы;
б) спектр на выходе оптического модулятора

После прохождения 50 км волокна (рис. 4 а, б) относительное соотношение компонентов не изменилось, лишь абсолютный уровень снизился примерно на 20 дБ из-за потерь. Это демонстрирует, что за относительно короткую дистанцию и при отсутствии сильных дисперсионных эффектов оптический канал не вносит заметных частотных искажений. В случае

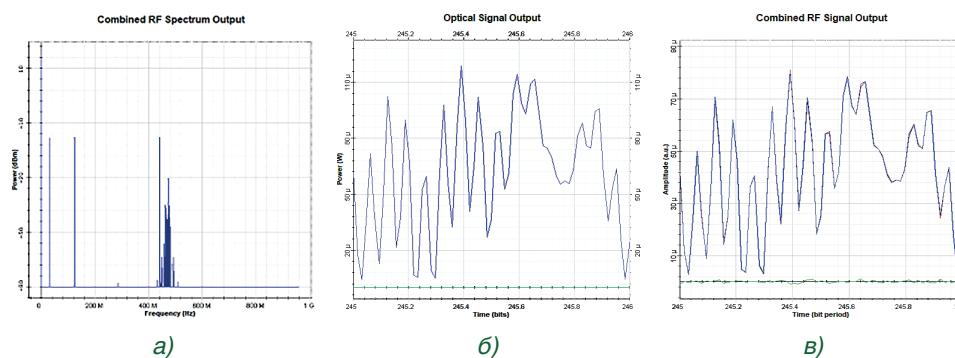


Рис. 4. Полученные сигналы
 а) спектр сигнала на входе приемного устройства,
 б) на входе фотоприемного устройства,
 в) на выходе антенны радиофотонной системы

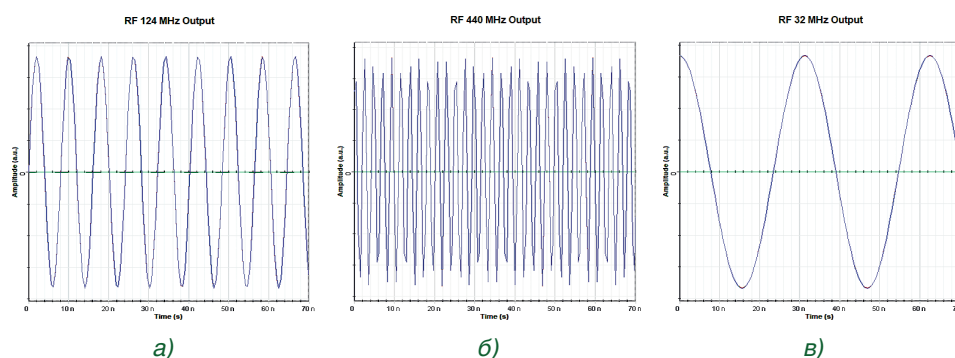


Рис. 5. Форма принятого ЧМ модулированного сигнала

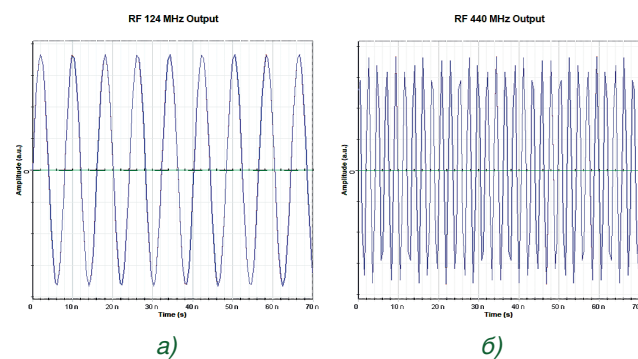


Рис. 6. QPSK а) сигнальное созвездие, б) цифровой сигнал

цифровой QPSK модуляции спектр (рис. 4 а) имеет вид широкой полосы шумообразного характера вокруг несущей. Его ширина примерно соответствует удвоенной символьной скорости. Это связано с тем, что внезапные фазовые сдвиги вносят высокочастотные компоненты в спектр. Волоконная линия не влияет на этот спектр существенно, хотя при значительно больших длинах могла бы проявиться селективная хроматическая дисперсия и уширение спектра.

После оптоэлектронного преобразования сигнал поступает на фильтры, обрезывающие

сигнал в соответствии с заданной частотой и имитирующие приемный тракт приемных устройств. В случае QPSK, полученный сигнал предварительно подавался на вход DSP процессора, восстанавливающего битовую последовательность. Отфильтрованный и восстановленный сигнал, представленный на рисунках 5 и 6 подается на средства визуализации.

Спектр и форма электрического радиосигнала, восстановленного на выходе фотодетектора, сравнивался со спектром и формой исходного сигнала, поданного на модулятор.

Во всех случаях наблюдалось почти полное совпадение. В случае ЧМ спектр на выходе также совпадает с исходным: набор гармоник девиации 5 МГц сохранился, что подтверждает пригодность линии для передачи частотной модуляции (оптический канал не вносит ограничений по фазе). Для QPSK после прямого детектирования полученный РФ-спектр аналогично представляет собой широкополосный сигнал вокруг 470 МГц, содержащий все модуляционные компоненты. Таким образом, **радиофотонный канал действует как прозрачный канал для спектра радиосигнала**, переносимый в оптическую область и обратно без потерь компонентов спектра. Небольшие нелинейные искажения (гармоники) могут возникать при высокой глубине модуляции, но при использовании параметров, рассматриваемых в работе, они минимальны.

Осциллограммы сигналов. На временных диаграммах, полученных осциллографом, хорошо прослеживается форма передаваемых сигналов до и после линии. Например, рис. 3 (а, б, в) показывает часть осциллограммы ЧМ-сигнала. Различить модуляцию сложно из-за постоянной амплитуды; однако косвенно она проявляется в виде слегка изменяющегося периода высокочастотного сигнала. Принятый сигнал (рис. 5 а, б, в) точно такой же по частоте и фазе, подтверждая, что фотонный канал не привнес дополнительных частотных дрейфов или фазовых шумов. В случае QPSK анализировать форму несущей на осциллограмме затруднительно, поэтому используется DSP процессор, который позволяет восстановить принятую битовую последовательность и сравнить ее с исходной.

Сравнение типов модуляции. Результаты моделирования показывают, что все четыре рассмотренных сигнала одновременно в разных форматах модуляции успешно транспортируются через радиофотонный канал. Стоит отметить, что частотная модуляция благодаря постоянной амплитуде достаточно устойчиво сохраняет информацию – даже при ослаблении сигнала величина девиации частоты сохраняется, и демодуляция на приемной стороне в идеале не зависит от абсолютного уровня мощности сигнала. В цифровом QPSK-сигнале анализ качества осуществляется по BER как отмечено, при отсутствии существенных искажений BER практически нулевой до тех пор, пока уровень сигнала не упадет до порога чувствительности. Характерный пример можно

видеть для линии протяженностью 100 км (см. рис. 6).

С точки зрения спектра, сигнал в частотной модуляции занимает относительно широкую (множество боковых) полосу, а QPSK – промежуточную (полоса определяется скоростью передачи данных). Для оптического канала это означает, что многополосный спектр ЧМ может сильнее пострадать от дисперсии при очень больших расстояниях, тогда как QPSK и другие цифровые схемы позволяют с помощью эквалаизации и кодирования частично компенсировать эффекты тракта, хотя требуют более сложного приемника. В целом результаты подтверждают, что радиофотонная линия способна гибко передавать как аналоговые, так и цифровые сигналы, а выбор модуляции определяется компромиссом между требуемой помехоустойчивостью, шириной занимаемой полосы и сложностью приемопередающей аппаратуры [2].

Заключение

В работе выполнено моделирование передачи радиочастотных сигналов по оптическому волокну с использованием технологий радиофотоники. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность радиофотонного подхода для транспортировки РФ-спектра. Основные выводы и достижения можно сформулировать следующим образом:

- **возможность переноса РЧ-сигналов без преобразования частоты.** Радиофотонная RoF-линия успешно передает радиосигналы диапазона порядка гигагерц на десятки километров, практически не искажая их спектральную структуру и временное содержание. Спектры и формы сигналов до и после 50-км оптоволоконного канала совпали, что подтверждает прозрачность оптического тракта для радиочастотной информации. Таким образом, оптическое волокно может выполнять роль радиочастотного фидера, обеспечивая удаленную подачу сигналов на антенные модули без использования тяжелой РЧ-коаксиальной инфраструктуры [1];
- **широкая полоса и низкие потери оптического канала.** Применение фотонного канала позволило охватить полосу в сотни МГц (ограниченную только возможностями модулятора и детектора), чего сложно достичь в электрическом тракте

на сопоставимое расстояние. Волоконные линии имеют затухание порядка 0,2 дБ/км, значительно меньшее, чем у РЧ-кабелей на микроволнах, поэтому в моделируемой линии не потребовалось никаких регенераторов или усилителей. Иммунитет к внешним электромагнитным воздействиям и грозovým разрядам является дополнительным плюсом оптоволоконна [1];

- **централизация и упрощение архитектуры.** Радиофотонный подход позволяет перенести сложность обработки сигнала в оптический диапазон и центральные узлы. Отдельные удаленные модули (Remote Antenna Units) могут содержать лишь оптоэлектронный преобразователь и антенну, тогда как все генераторы, модуляторы и демодуляторы сосредоточены в центре [5]. Это приводит к удешевлению и упрощению обслуживания распределенных систем [8];
- **сравнение методов модуляции.** В ходе работы подтверждено, что каждый формат модуляции имеет свои преимущества при передаче по RoF. ЧМ обладает естественной защитой от амплитудных помех и может быть предпочтителен для аналоговых систем (например, радиовещания), хотя расширяет спектр. Цифровой QPSK (как представитель сложных манипуляций) эффективен по спектру и допускает коррекцию ошибок, однако нуждается в более сложной приемной стороне.

Радиофотонный канал успешно поддерживает все эти виды сигналов, то есть является универсальным транспортом, что подтверждает его широкую применимость.

В целом, сделанное моделирование показало, что радиофотонная технология передачи радиочастот действительно обеспечивает высокое качество и гибкость, необходимых для современных и перспективных систем связи.

OptiSystem как инструмент моделирования позволил количественно оценить параметры передачи и убедиться в работоспособности схемы на основе реальных компонентных характеристик.

Перспективы и рекомендации

Результаты исследования подтверждают перспективность применения радиофотонных (Radio-over-Fiber) [9] линий в разнообразных областях – от беспроводных коммуникаций

до радаров. На основе проведенного анализа можно наметить следующие направления дальнейшего развития и внедрения радиофотонной технологии:

- **многоканальные системы и WDM.** Одно из ключевых преимуществ оптического спектра – возможность мультиплексирования по длине волны. В дальнейшем целесообразно исследовать схемы, где несколько радиосигналов разных диапазонов передаются по одной линии с использованием разных оптических несущих (технология WDM). Такой подход позволит существенно увеличить пропускную способность и гибкость системы, передавая множество независимых каналов параллельно [1]. Требуется внимания вопрос интермодуляционных помех между каналами при детектировании и стабильность длин волн лазеров. Моделирование с добавлением нескольких лазеров и частотных фильтров на приемной стороне – естественное продолжение данной работы;
- **расширение диапазона частот.** В модель заложена возможность повышения несущей частоты радиосигнала. Интерес представляет перенос миллиметровых волн (например, диапазон 30–100 ГГц) и даже терагерцевых сигналов через оптический канал. В радиофотонике известны методы генерации таких сигналов с умножением частоты с помощью нелинейных свойств ИМЦ. Перспективно изучить моделирование схем с двойным/тройным ИМЦ для фотумножения частоты и передач сверхвысокочастотных радиосигналов;
- **оптимизация линейности и шумовых характеристик.** Хотя базовая линия показала хорошую линейность, при одновременной передаче множества сигналов или при высоких индексах модуляции возникают нелинейные искажения (гармоники, интермодуляция). В дальнейшем необходимо разработать меры по линеаризации тракта – например, предуслаживания сигнала перед ИМЦ, применение схем с отрицательной обратной связью или использование специальных модуляторов (например, двух последовательно для компенсации неидеальной косинусной характеристики). Кроме того, стоит учесть шумы: добавить в модель лазерный фазовый шум, шум детектора и оценить достигнутый динамический

диапазон, коэффициент шума RoF-ссылки. Это позволит соотнести модель с реальными системами и определить ограничения по длине безрегистрационного участка и по минимальному входному сигналу;

- **интегральная радиофотоника.** Текущее моделирование основывалось на дискретных компонентах (отдельный лазер, волокно, модулятор). В перспективе ожидается переход к интегрированным фотонным схемам, где лазерный источник, модуляторы и фотодетекторы реализованы на едином кристалле (силиконовая фотоника, интегральные $LiNbO_3$ платформы). Интеграция позволит радикально уменьшить габариты и энергопотребление радиофотонных узлов [1], что важно для массового внедрения в сетях связи и датчиках. Перспективно провести моделирование с реальными параметрами интегральных модулей

(например, использовать OptiSystem совместно с моделями фотонных интегральных схем) и оценить их характеристики при переносе радиосигналов.

Наконец, можно отметить, что **радиофотонные методы становятся неотъемлемой частью конвергенции оптических и беспроводных сетей.** По мере удешевления оптических компонентов и развития фотонной интегральной базы радиофотоника будет все шире применяться на практике. Данное исследование на уровне моделирования ВАК подтверждает фундаментальную возможность и целесообразность такого объединения. В дальнейшем стоит продолжать исследования совместно с экспериментальными проверками, а также учитывать стандарты отрасли (например, новые рекомендации МСЭ по оптическому транспорту в 5G) для перехода от моделирования к реальным системам [2].

Литература

1. Podbregar, L.; Batagelj, B.; Blatnik, A.; Lavrič, A. Advances in and Applications of Microwave Photonics in Radar Systems: A Review. *Photonics*, 2025, 12(6), 529. DOI: 10.3390/photonics12060529 mdpi.commdpi.com.
2. Al-Raweshdi, H.; Komaki, S. (Eds.) *Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communication Networks*. Artech House, London, 2002 cdn.optiwave.com.
3. Johnny, J.; Shashidharan, S. Design and Simulation of a Radio Over Fiber System and its Performance Analysis. *Proceedings of IEEE OPNTDS*, 2012 DOI: 10.1109/ICUMT.2012.6459744.
4. Андреев В. А. (ред.) *Радиофотоника*. – М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.
5. Singh, R.; Sharma, D.; Anjali. Radio over Fiber Performance Analysis using Mach-Zehnder Modulator. *Int. J. Enhanced Research in Management & Computer Applications*, 2017, 6(6), 16–23.
6. Optiwave. *OptiSystem Optical Communication System – Getting Started*, Optiwave Systems Inc., 2015. (Документация программного обеспечения) optiwave.comoptiwave.com.
7. ITU-T Recommendation G.652 (11/2016). Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, ITU, 2016ftthfiber optic.com.
8. Sindhiya, A.; Dorathy, P. E. Performance of Digital Modulation Techniques on Millimeter Wave (5G) Radio over Fiber. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2022, 9(6), Pp. 2149–2153. www.irjet.net.
9. Thomas, V.; El-Hajjar, M.; Hanzo, L. Performance Improvement and Cost Reduction Techniques for Radio Over Fiber Communications. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2), DOI: 10.1109/COMST.2015.2394911.

MODELING OF RADIOFREQUENCY SPECTRUM TRANSPORT USING RADIOPHOTONIC TECHNOLOGY

Ivanin A. N.⁴, Subbotin D. V.⁵, Shcherbak K. P.⁶

Keywords: radio photonics, optical transmission line model, spectra, modulators.

4 Andrey N. Ivanin, Ph.D. of Technical Sciences, Professor of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical Wire and Optical Communications, Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: ivanin-89@mail.ru

5 Dmitry V. Subbotin, Ph.D. of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical Wire and Optical Communication of the Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: d1sub@yandex.ru

6 Kirill P. Shcherbak, Ph.D. of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Military Systems of Multichannel Electrical Conductive and Optical Communications, Military Academy of Communications named after S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: kirillshcherbak@gmail.com

Abstract

The aim of the work is to study the efficiency of radiophoton transfer of the radiofrequency spectrum, formed by different types of means by modeling the optical line of radio signal transmission in the OptiSystem software environment.

Research method: the paper uses simulation modeling to form a «digital twin» in order to assess the spectral and energy indicators of transmission without the need for physical experiments.

Results of the study: a model of a radiophotonic system was developed and a simulation experiment was carried out to study the joint simultaneous operation of radio-emitting means using various types of modulation (FM, QPSK). The characteristics of the transmitted signals (spectra, oscillograms, signal quality) were analyzed.

Scientific novelty: the proposed model allows to comprehensively take into account the properties of a laser, modulator, optical fiber and photodetector for the design of optical communication lines, taking into account the use of an external modulator (based on a Mach-Zehnder interferometer).

References

1. Podbregar, L.; Batagelj, B.; Blatnik, A.; Lavrič, A. Advances in and Applications of Microwave Photonics in Radar Systems: A Review. *Photonics*, 2025, 12(6), 529. DOI: 10.3390/photonics12060529. [mdpi.com](https://mdpi.com/mdpi.com)
2. Al-Raweshdi, H.; Komaki, S. (Eds.) *Radio Over Fiber Technologies for Mobile Communication Networks*. Artech House, London, 2002 cdn.optiwave.com.
3. Johnny, J.; Shashidharan, S. Design and Simulation of a Radio Over Fiber System and its Performance Analysis. *Proceedings of IEEE OPNTDS*, 2012 cdn.optiwave.com.
4. Andreev V. A. (red.) *Radiofotonika*. – M. 2001. – 574 s.
5. Singh, R.; Sharma, D.; Anjali. Radio over Fiber Performance Analysis using Mach–Zehnder Modulator. *Int. J. Enhanced Research in Management & Computer Applications*, 2017, 6(6), 16–23.
6. Optiwave. *OptiSystem Optical Communication System – Getting Started*, Optiwave Systems Inc., 2015. (Dokumentacija programmnogo obespechenija) optiwave.com.
7. ITU-T Recommendation G.652 (11/2016). Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, ITU, 2016 ftth.fiberoptic.com.
8. Sindhiya, A.; Dorathy, P. E. Performance of Digital Modulation Techniques on Millimeter Wave (5G) Radio over Fiber. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2022, 9(6), Pp. 2149–2153. www.irjet.net.
9. Thomas, V.; El-Hajjar, M.; Hanzo, L. Performance Improvement and Cost Reduction Techniques for Radio Over Fiber Communications. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2). DOI: 10.1109/COMST.2015.2394911.



The journal is registered by the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Communications.
Registration Certificate
PI № FS77-88069 от 16.08.2024

Editor-in-Chief

Vasily IVANOV, Ph.D, Ass. Professor, Moscow

Chairman of the Editorial Council

Alexander RUBIS, Ph.D., Moscow

Assistant Editor-in-Chief

Grigory MAKARENKO, Senior Research Fellow, Moscow

Editorial Board

Maxim PYLINSKY, Dr.Sc., Professor, Belarus
Gennady RYZHOV, Dr.Sc., Professor, Moscow
Yuri STARODUBTSEV, Dr.Sc., Professor, St. Petersburg
Evgeny KHARCHENKO, Ph.D., Professor, Moscow

Editorial board

Mikhail BUINEVICH, Dr.Sc., Professor, St. Petersburg
Evgeny GLUSHANKOV, Dr.Sc., Professor, St. Petersburg
Sergey IVANOV, Dr.Sc., St. Petersburg
Alexander KOZACHOK, Dr.Sc., Ass. Professor, Orel
Sergey KOROBKA, Dr.Sc., Moscow
Andrey KOSTOGRYZOV, Dr.Sc., Professor, Moscow
Sergey MAKARENKO, Dr.Sc., Professor, St. Petersburg
Alexey MARKOV, Dr.Sc., Ass. Professor, Moscow
Anatoly RYZHKOV, Dr.Sc., Professor, Moscow
Nikolay SAVISHCHENKO, Dr.Sc., Professor, St. Petersburg
Igor SIVAKOV, Dr.Sc., Moscow
Vladimir TSIMBAL, Dr.Sc., Professor, Serpukhov
Oleg FINKO, Dr.Sc., Professor, Krasnodar

Founder and publisher

Federal State Budgetary Institution
«16 Central Research and Testing Institute»
of the Ministry of Defense
of the Russian Federation

Signed to the press on 15/08/2025.
The total circulation is 120 copies. The price is free.

Postal address: 1st Rupasovsky lane, 1, 141006,
Mytishchi, Moscow region, Russia.

E-mail: editor.tis@yandex.ru. Tel.: +7 (995) 153-43-88.

The requirements for the manuscripts are posted
on the website: <https://telemil.ru/>

CONTENTS

INFORMATION CONFRONTATION IN THE MILITARY SPHERE

MODEL OF A CONTROL FOR ROBOTIC COMPLEXES OF SPECIAL-PURPOSE

Starodubtsev Yu. I., Lepeshkin O. M., Khudainnazarov Yu. K. 2

COUNTERACTING EXTERNAL INTRUSIONS IN THE INFORMATION AND COMPUTING NETWORK

Zadboev V. A., Abramova N. I., Moskalev V. S. 18

SYSTEM ANALYSIS AND SIMULATION OF COMBAT OPERATIONS

PROPOSALS FOR THE USE OF A STATISTICAL METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF THE FUNCTIONING OF COMMUNICATION AND AUTOMATION SYSTEMS INTEGRATED WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

Bogdanov A. V., Kazakevich E. V. 24

STRUCTURAL ANALYSIS OF CONTROLLABILITY FOR MILITARY OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Kanaev A. K., Subbotin D. V. 31

ANALYSIS OF THE NOISE IMMUNITY OF BINARY PSEUDORANDOM SIGNAL RECEPTION USING A Δ -LAYER OF INDISTINGUISHABILITY UNDER GAUSSIAN NOISE AND INCOHERENT INTENTIONAL INTERFERENCE

Sazonov V. V., Neguritsa A. O. 39

CREATION OF AN INTEGRATED INFORMATION SECURITY SYSTEM FOR A SPECIAL-PURPOSE INFOTELECOMMUNICATION SYSTEM

Filin A. V., Zaikin R. V. 48

MILITARY CONTROL, COMMUNICATIONS AND NAVIGATION SYSTEMS

ALGORITHMIC METHOD TO DETERMINE THE STAR SENSOR BASIS IN STELLAR-INERTIAL NAVIGATION SYSTEM BASIS

Kondrashkin G. V., Bolotnov A. S., Shkatov M. Y. 55

INFLUENCE OF CHANNELING EQUIPMENT ON THE FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO- ELECTRONIC MEANS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Lyashchuk M. Z., Vorobyov P. V., Abramova N. I. 67

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AIR TURBULENCE ON THE ANGLE OF ENTRY OF THE LASER BEAM TO THE RECEIVING NODE IN OPEN OPTICAL SYSTEMS OF ATMOSPHERIC COMMUNICATION

Asadov Kh. G., Mammadov A. M. 72

MATHEMATICAL MODEL OF A MULTISERVICE TRANSPORT COMMUNICATION NETWORK WITH JOINT BALANCING OF MULTIMEDIA TRAFFIC AND CHANNEL RESOURCE

Zizevsky V. A. 76

MILITARY ELECTRONICS, EQUIPMENT FOR MILITARY COMPLEXES

MODERN BIOMETRIC DATA PROTECTION SYSTEMS AND THEIR APPLICATION IN THE ARMED FORCES

Khomutovsky S. L., Shamaev V. A., Grigorenko A. G. 85

MODELING OF RADIOFREQUENCY SPECTRUM TRANSPORT USING RADIOPHOTONIC TECHNOLOGY

Ivanin A. N., Subbotin D. V., Shcherbak K. P. 93