

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд

ЛАЗЕРНАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ РАДИОСИГНАЛОВ НА
ПОДНЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЕ С КВАДРАТУРНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ
В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Таганрог - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности.

Научный
руководитель

Румянцев Константин Евгеньевич
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Широков Игорь Борисович
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
электронной техники ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет» (г. Севастополь)

Окорочков Александр Иванович
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент
кафедры «Радиоэлектронные и электротехнические
системы и комплексы» Института сферы обслуживания и
предпринимательства (филиал) ФГБОУ ВО «Донской
государственный технический университет» (г. Шахты)

Защита состоится «15» февраля 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.07 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», ауд. Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1324629/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.02.07
кандидат технических наук, доцент



Пилипенко А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Растёт спрос на применение лазерных технологий в спутниковой связи как по нисходящей линии космос-Земля, так и по восходящей линии Земля-космос. По сравнению с радиосвязью лазерная связь обеспечивает ряд преимуществ: компактные размеры телескопов и терминалов, низкое энергопотребление, значительное увеличение пропускной способности, отсутствие ограничений по частоте и отсутствие электромагнитных помех. Передача радиосигналов по оптическому каналу в свободном пространстве (FSO) считается новым подходом к проектированию беспроводных сетей и реализуется путём переноса радиосигнала (RF) на оптическое излучение.

Оптическая однополосная модуляция (OSSB) используется для предотвращения замирания мощности радиосигналов из-за хроматической дисперсии в атмосфере, а также для повышения спектральной эффективности систем, сочетающих передачу радиосигналов на поднесущей частоте (SCM) и волновое мультиплексирование. Оптический сигнал с одной боковой полосой генерируется путём подавления нежелательной боковой полосы с помощью одного из трех основных подходов, таких как метод Уивера, фильтрация боковой полосы и метод фазового сдвига. Перспективна генерация излучения с OSSB методом фазового сдвига с использованием внешнего модулятора Маха-Цендера (MZM) с двумя портами

Лазерная система спутниковой связи уязвима к атмосферным явлениям, неблагоприятным погодным условиям и атмосферной турбулентности. Влияние среды имеет решающее значение для качества лазерной связи. Лазерный луч из-за турбулентности может испытывать значительные флуктуации оптической мощности. Функция плотности вероятности принимаемой мощности важна для оценки затухания оптического сигнала и вероятности ошибок бит (BER).

Роль оптического приёмника заключается в выделении из оптического излучения радиосигнала и восстановлении данных, переданных через атмосферный канал. При когерентном приёме выделяется информация об амплитуде, фазе и частоте оптической волны. Путём объединения излучений гетеродина и сигнала реализуется оптический гетеродинный или гомодинный приём. Когерентные системы связи могут значительно улучшить чувствительность приёмника и увеличить пропускную способность передачи.

Цель исследований. Повышение пропускной способности лазерной системы спутниковой коммуникации посредством формирования и гомодинного фотодетектирования оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Объект исследований. Лазерная система спутниковой коммуникации.

Предмет исследований. Формирование и гомодинное фотодетектирование однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Общая научная задача: Разработка и исследование лазерной системы спутниковой коммуникации в условиях атмосферной турбулентности,

обеспечивающая повышение пропускной способности за счёт формирования однопольного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Частные задачи диссертационных исследований:

Выявление проблем организации высокоскоростной передачи радиосигналов посредством оптического канала спутниковой коммуникации. Обоснование актуальности, определение общей научной задачи и частных задач исследований.

Методы исследований. При выполнении работы использованы:

- методы генерации и модуляции для формирования радиосигналов на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией;
- методы спектрального анализа для выделения гармонических составляющих формируемого радиосигнала на поднесущей частоте;
- методы теории передачи, приёма и обработки оптических сигналов для обоснования структуры приёмной станции;
- численные методы для расчётов параметров лазерной системы спутниковой коммуникации;
- методы теории информации и кодирования для сжатия данных, оценки пригодности кода для конкретного применения и расчётов вероятности ошибок бит в лазерной системе спутниковой коммуникации;
- компьютерное моделирование на OPTISYSTEM версия 20 в среде MATLAB для оценки эффективности предложенных решений;

Основные положения, выносимые на защиту:

Положение 1. Актуальной проблемой для повышения пропускной способности лазерной системы спутниковой коммуникации является разработка и исследование алгоритма формирования и гомодинного фотодетектирования оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Положение 2. Предложенные алгоритм и структура когерентного оптического передатчика, отличающиеся от известных решений введением преобразования Гильберта в области радиочастот, обеспечивают генерацию оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Положение 3. Использование предложенных высотных моделей атмосферной турбулентности для принимаемого оптического излучения позволяет количественно оценить влияние на интенсивность принимаемого оптического излучения после прохождения трассы Земля-спутник высоты орбит спутников, диаметров и коэффициентов передачи оптических телескопов, а также эффектов турбулентной атмосферы и ошибок нацеливания антенн.

Положение 4. Использование предложенной модели оптического приёмника позволяет оценивать влияние на частоту ошибок бит системы атмосферной турбулентности на трассе Земля-спутник, высоты орбит спутников, диаметров и коэффициентов передачи оптических телескопов, а также ошибок наведения антенны.

К наиболее существенным новым научным результатам, полученным в результате диссертационных исследований, относятся:

- алгоритм формирования однополосного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией в когерентной оптической системе коммуникации;
- аналитические выражения для описания процесса формирования и спектрального анализа радиосигналов и оптического излучения на выходах функциональных устройств передающей станции;
- алгоритм обработки принимаемого сигнала в системе оптической связи в свободном пространстве, реализующий когерентный гомодинный приём;
- количественные соотношения для оценки влияния турбулентной атмосферы и ошибок нацеливания антенн на вероятности ошибок бит и интенсивность принимаемого оптического излучения эффектов;

Научная новизна работы заключается в следующем:

Предложен алгоритм генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией, отличающийся от известных алгоритмов реализацией на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера на кристалле из ниобата лития в двухтактной конфигурации с постоянным напряжением смещения на всех плечах интерферометров со встроенным фазовращателем на $\pi/2$ и включением преобразования Гильберта радиосигнала.

Впервые получены аналитические выражения для описания процесса формирования и спектрального анализа радиосигналов и оптического излучения на выходах функциональных устройств передающей станции на основе разработанной модели формирования оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Используя разложения Якоби-Ангера, доказано присутствие в выходном сигнале станции спектральных составляющих радиосигнала на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией и формирование оптического излучения с одной боковой полосой.

Предложен алгоритм обработки принимаемого сигнала в системе оптической связи в свободном пространстве, реализующий когерентный гомодинный приём посредством балансного включения фотодетекторов с использованием четырёх оптических ответвителей с дополнительным фазовым сдвигом на $\pi/2$ для одного из разделённых сигналов гетеродина.

Разработана методика количественной оценки принимаемой мощности когерентного оптического излучения и вероятности ошибок бит после прохождения гауссовым лазерным лучом трассы Земля-спутник. Методика основывается на обоснованных математических моделях атмосферных потерь из-за комбинированных детерминированных эффектов поглощения оптического излучения и рассеяния Рэлея и Ми, высотной модели Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления в атмосфере для трассы Земля-спутник. Методика учитывает воздействие эффектов сцинтилляции и мерцания в турбулентной атмосфере, а также дальность связи, ошибки нацеливания и диаметры антенн.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

Предложенные структуры передающей и приёмной станций с передачей однополосного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией увеличивают скорость передачи данных с 1 Гбит/с до 10 Гбит/с по сравнению с системой, формирующей оптическое излучение с двумя боковыми полосами для передачи радиосигнала на поднесущей частоте с амплитудной манипуляцией.

Получены асимптотические выражения для оценки энергетического уровня спектральных составляющих, соответствующих радиосигналам на поднесущей и нулевой частотах при формировании оптического излучения с одной боковой полосой.

Использование предложенных моделей для интенсивности оптического излучения после прохождения трассы Земля-спутник с учётом воздействия эффектов турбулентной атмосферы и ошибок нацеливания антенн позволяет количественно оценить снижение вероятности ошибок бит и интенсивности принимаемого спутником оптического излучения при различных высотах орбит, диаметрах и эффективности оптических телескопов. Уровни принимаемой мощности оптического излучения подтверждают возможность работы лазерной системы спутниковой связи при передаче данных на расстояние до 700 км при диаметрах передающего и приёмного телескопов 100 мм при отсутствии турбулентности в атмосфере. При диаметрах передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние до 800 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 900 км. Установлено, что из-за высотной турбулентности, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики показателя преломления для трассы Земля-спутник, дальность связи уменьшается с 900 до 700 км (на 30 %) при диаметрах передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 140 мм.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационных исследований, посвящённые разработке и исследованию лазерной системы спутниковой коммуникации, связаны с научным направлением кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем ЮФУ, что подтверждено актом о внедрении результатов работы от 19.09.2023 г.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается строгостью применяемого математического аппарата, результатами компьютерного моделирования на OPTISYSTEM версии 20 в среде MATLAB при оценке эффективности предложенных алгоритмов.

Апробация работы. Основные положения научной работы докладывались и обсуждались на 5 научно-технических конференциях:

12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, 19 - 21 October 2019, Huaqiao, Suzhou, China.

VI Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных, аспирантов, магистрантов и студентов «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности», 6-12 апреля 2020 г. Таганрог.

VII Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности», 5-11 апреля 2021 г. Таганрог.

I студенческая научно-практическая конференция «Тенденции развития естественных наук в современном информационном пространстве и их применение в агробиотехнологиях», 22 октября 2021 г. Грозный.

II Всероссийская научно-практическая конференция «Digital Era», 25 марта 2022 г. Грозный.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 13 научных работ. Из них в перечне рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации материалов диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора технических наук, опубликовано 3 статьи. В изданиях, реферируемых в базе данных «SCOPUS», опубликовано 4 статьи. В реферируемых изданиях, учитываемых в РИНЦ, опубликовано 6 работ.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует п.8 «Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем передачи информации, в том числе эфирных, радиорелейных и космических, с целью повышения их пропускной способности, помехоустойчивости и помехозащищённости» паспорта научной специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Личный вклад. Основные научные результаты, модель формирования оптического излучения с модуляцией радиосигналом, аналитические выражения для спектрального анализа, оценка влияния параметров атмосферного канала на радиосигнал, анализ результатов моделирования, приведённые в работе, получены автором лично.

Структура диссертационной работы. Диссертационное исследование написано на русском языке, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Полный объём диссертации составляет 143 страницы, включая 43 рисунка и 2 таблицы. Список используемой литературы включает 179 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определены объект, предмет и цель исследований, сформулирована научная задача, на решение которой направлена работа, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлены основные научные положения, выдвигаемые для защиты.

В первой главе обосновано использование оптического диапазона для передачи информации на значительные расстояния с использованием спутников Земли. Проанализированы проблемы передачи информации по атмосферным каналам. Обоснована технология оптической связи в свободном пространстве (FSO) для использования в атмосферном канале, свойства которого являются случайной функцией пространства и времени. Проанализировано влияние воздействия турбулентной атмосферы на спутниковые каналы коммуникаций. Доказана необходимость применения гибридного канала RF/FSO, где решается

проблема нехватки пропускной способности в RF-сетях. Показана актуальность исследований по оценке влияния хроматической дисперсии в лазерных системах. Обосновано применение когерентного приёма оптических сигналов с одной боковой полосой частот для снижения влияния хроматической дисперсии оптического излучения в среде распространения и для эффективной демодуляции сигналов, закодированных в форматах модуляции высокого порядка. Реализация в системе спутниковой связи гомодинного метода приёма оптических сигналов обеспечивает эффективную обработку и выделение сигналов, а также перенастройку в широком диапазоне частот, занимаемом многоканальными оптическими системами передачи со спектральным уплотнением. Выбор квадратурной фазовой манипуляции (QPSK, 4-QAM) радиосигналов на поднесущих частотах посредством оптического квадратурного I/Q-модулятора на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера обеспечивает высокую скорость передачи данных. Сформулированы предмет, цель и научная задача, с определением частных задач исследования.

Во второй главе предложена модель формирования однополосного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера на кристалле ниобата лития (рисунок 1).

При квадратурной фазовой манипуляции фаза радиосигнала на поднесущей частоте сигнала задаётся исходным символом (парой бит $S_{b0}(t)$). Причём в зависимости от символа фаза приобретает значение

$$\varphi_i = \left(i \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} \right); i = 1, 2, 3, 4. \quad (1)$$

Применяемая манипуляция кодирует два бита передаваемой информации одним символом. При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации.

Из исходного информационного цифрового потока данных (бит) $S_b(t)$ выделяется поток пар бит $S_{b0}(t)$. Сформулированный поток $S_{b0}(t)$ преобразуется в электронном кодирующем устройстве в синфазный $I(t) = I_i$ и квадратурный $Q(t) = Q_i$ поток символов в соответствии с принципами квадратурной фазовой манипуляции: $I_i = \cos \varphi_i$ и $Q_i = \sin \varphi_i$; $i = \overline{1, 4}$. Причём синфазный сигнал кодируется первыми, а квадратурный – вторыми битами пары.

При квадратурной фазовой манипуляции необходимы колебания $u_{G,I}(t)$ и $u_{G,Q}(t)$ с одинаковой поднесущей радиочастотой ω_{RF} , но сдвинутые по фазе на 90° . Это достигается использованием генератора синусоидальных сигналов поднесущей радиочастоты и электронного фазовращателя на $\varphi_E = \pi/2$ с коэффициентом передачи K_E .

Амплитуды радиосигналов на выходе электронных умножителей с коэффициентами передачи $K_{\times 1}$ и $K_{\times 2}$ постоянны. На выходе электронного аналогового сумматора с коэффициентом передачи K_+ формируется радиосигнал $u_{PM1}(t) = K_+[u_I(t) + u_Q(t)]$ для управления первым фазовым модулятором на оптическом интерферометре.

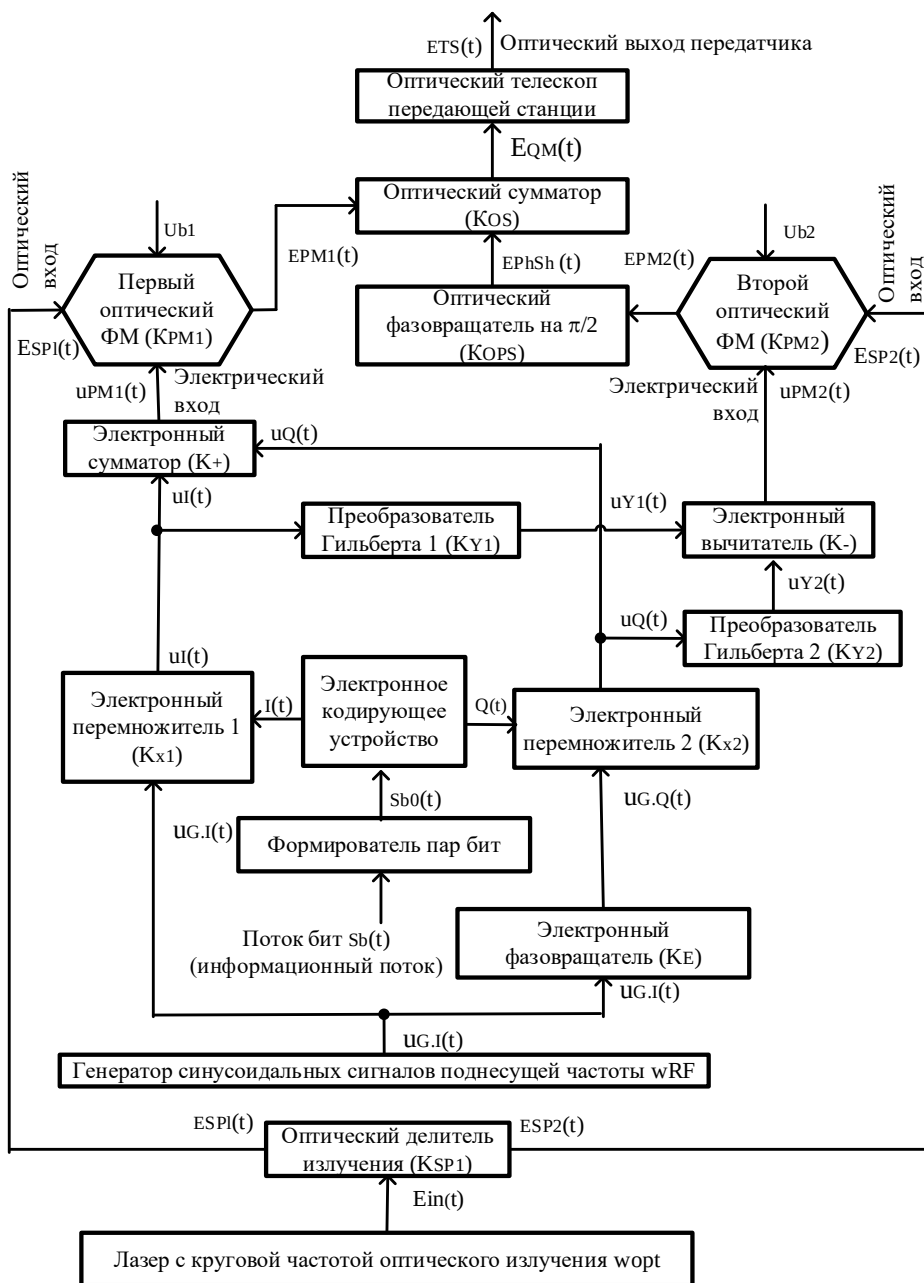


Рисунок 1- Модель передающей станции когерентной оптической системы передачи однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией

Для формирования сигнала с однополосной модуляцией используется преобразование Гильберта, осуществляющее поворот начальных фаз всех спектральных составляющих входного радиосигнала на угол $-\pi/2$. Следовательно, на выходах преобразователей Гильберта с коэффициентами передачи K_{Y1} и K_{Y2} формируются сигналы

$$u_{Y1}(t) = K_{Y1}K_{\times 1}U_G I_i \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}); u_{Y2}(t) = K_{Y2}K_{\times 2}K_E U_G Q_i \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}),$$

Для управления вторым фазовым модулятором на интерферометре Маха-Цендера на выходе электронного аналогового вычитателя с коэффициентом передачи K_- формируется радиосигнал $u_{PM2}(t) = K_-[u_{Y2}(t) - u_{Y1}(t)]$.

Лазерный источник генерирует непрерывное оптическое излучение с круговой частотой ω_{opt} , начальной фазой φ_{opt} и постоянной мощностью P_{opt} . Напряжённость электрического поля источника определяется формулой

$$\begin{aligned} E_{in}(t) &= \sqrt{P_{opt}} \cdot \cos(\omega_{opt}t + \varphi_{opt}) \\ &= \frac{\sqrt{P_{opt}}}{2} [\exp(j\omega_{opt}t + j\varphi_{opt}) + \exp(-j\omega_{opt}t - j\varphi_{opt})]. \end{aligned} \quad (2)$$

При идеальном делении $K_{SP1} = K_{SP2} = K_{SP} = 0,5$ на выходах оптического делителя с внутренними потерями γ_{SP} формируются два идентичных излучения

$$E_{SP1}(t) = E_{SP2}(t) = E_{SP}(t) = 0,5 \cdot 10^{-0,1 \cdot \gamma_{SP} [dB]} \cdot E_{in}(t),$$

Сигналы с выходов электронных аналоговых сумматора $u_{PM1}(t)$ и вычитателя $u_{PM2}(t)$ подаются на электрические информационные входы соответственно первого и второго оптических фазовых модуляторов в составе двухпортового модулятора Маха-Цендера. Если к управляющим электродам кристаллов приложены напряжения смещения $U_{b1} = U_{b2} = U_\pi/2$, то напряжённости выходных оптических волны интерферометров с коэффициентами передачи K_{MZM1} и K_{MZM2} определяются формулами

$$\begin{aligned} E_{PM1}(t) &= jK_{MZM1}E_{SP1}(t) \exp \left[j \frac{\pi}{U_\pi} K_+ K_{\times 1} U_G I_i \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] \rightarrow \\ &\leftarrow -j \frac{\pi}{U_\pi} K_+ K_{\times 2} K_E U_G Q_i \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_{PM2}(t) &= jK_{MZM2}E_{SP2}(t) \exp \left[j \frac{\pi}{U_\pi} K_- K_{Y1} K_{\times 1} U_G I_i \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] \\ &+ j \frac{\pi}{U_\pi} K_- K_{Y2} K_{\times 2} K_E U_G Q_i \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

После оптического фазовращателя на $\pi/2$ с коэффициентом передачи K_{OPS} формируется излучение с напряжённостью $E_{OPS}(t) = j \cdot K_{OPS} E_{PM2}(t)$ а на выходе телескопа с коэффициентом передачи K_{opt} - сигнал передающей станции $E_{TS}(t) = K_{opt} \cdot E_{QM}(t) = K_{opt} \cdot [E_{PM1}(t) + E_{OPS}(t)]$, Причём

$$\begin{aligned}
E_{TS}(t) = & j \cdot K_{opt} K_{MZM1} E_{SP1}(t) \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{+} K_{\times 1} U_G I_i \cos(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}) \right] \\
& \cdot \exp \left[-j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{+} K_{\times 2} K_E U_G Q_i \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}) \right] \rightarrow \\
& \leftarrow -K_{opt} K_{OPS} K_{MZM2} E_{SP2}(t) \\
& \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{-} K_{Y1} K_{\times 1} U_G I_i \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}) \right] \\
& \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{-} K_{Y2} K_{\times 2} K_E U_G Q_i \cos(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}) \right]. \tag{5}
\end{aligned}$$

Таким образом, проанализирован процесс формирования однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией с помощью двух параллельно включённых интерферометров Маха-Цендера. Получены соотношения, описывающие оптическое излучение и радиосигналы на выходе всех функциональных устройств оптического передатчика. Отличительная особенность математических соотношений состоит в том, что учтено присутствие постоянного напряжения смещения на плечах интерферометров.

Для спектрального анализа сигнала на выходе передатчика вводим обозначения $a_{11} = \pi K_{+} K_{\times 1} U_G / U_{\pi}$; $a_{12} = \pi K_{+} K_{\times 2} K_E U_G / U_{\pi}$; $a_{21} = \pi K_{-} K_{Y1} K_{\times 1} U_G / U_{\pi}$; $a_{22} = \pi K_{-} K_{Y2} K_{\times 2} K_E U_G / U_{\pi}$; $A_1 = K_{opt} K_{MZM1} E_{SP1}(t)$; $A_2 = K_{opt} K_{OPS} K_{MZM2} E_{SP2}(t)$, Тогда

$$\begin{aligned}
E_{TS}(t) = & j A_1 \exp[j a_{11} I_i \cos(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})] \cdot \exp[-j a_{12} Q_i \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})] \rightarrow \\
& \leftarrow -A_2 \exp[j a_{21} I_i \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})] \exp[j a_{22} Q_i \cos(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})].
\end{aligned}$$

Применив к формуле разложение Якоби–Ангера, находим

$$\begin{aligned}
E_{TS}(t) = & j \cdot A_1 \cdot \left\{ J_0(a_{11} I_i) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} j^n J_n(a_{11} I_i) \cdot \cos(n \cdot (\omega_{RF} t + \varphi_{RF})) \right\} \rightarrow \\
& \leftarrow \left\{ J_0(a_{12} Q_i) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(a_{12} Q_i) \cdot \cos(2m \cdot (\omega_{RF} t + \varphi_{RF})) \right\} \rightarrow \\
& \leftarrow -j \cdot 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m-1}(a_{12} Q_i) \cdot \sin[(2m-1) \cdot (\omega_{RF} t + \varphi_{RF})] \left\{ \right. \rightarrow \\
& \leftarrow -A_2 \left\{ J_0(a_{21} I_i) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(a_{21} I_i) \cdot \cos(2m \cdot (\omega_{RF} t + \varphi_{RF})) \right\} + \\
& \rightarrow \leftarrow +j \cdot 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m-1}(a_{21} I_i) \cdot \sin[(2m-1) \cdot (\omega_{RF} t + \varphi_{RF})] \left\{ \right. \rightarrow \\
& \leftarrow \left\{ J_0(a_{22} Q_i) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} j^n J_n(a_{22} Q_i) \cdot \cos(n(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})) \right\}. \tag{6}
\end{aligned}$$

Анализ выражения позволяет выделить спектральные составляющие с поднесущей частотой

$$\begin{aligned}
E_{TS}(t \ \omega_{RF}) = & \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) 2 \left\{ -A_1 J_0(a_{12}Q_i) J_1(a_{11}I_i) \right. \\
& + A_1 \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(a_{12}Q_i) [J_{2k-1}(a_{11}I_i) - J_{2k+1}(a_{11}I_i)] \right\} \rightarrow \\
& \leftarrow -jA_2 J_0(a_{21}I_i) \cdot J_1(a_{22}Q_i) \\
& - jA_2 \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(a_{21}I_i) \cdot [J_{2k-1}(a_{22}Q_i) - J_{2k+1}(a_{22}Q_i)] \right\} \left. \right\} + \rightarrow \\
& \leftarrow + \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) 2 \left\{ A_1 J_0(a_{11}I_i) \cdot J_1(a_{12}Q_i) + \rightarrow \right. \\
& \leftarrow + A_1 \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} J_{2k}(a_{11}I_i) [J_k(a_{12}Q_i) - J_{k+1}(a_{12}Q_i)] \right\} \rightarrow \\
& \leftarrow -jA_2 J_0(a_{22}Q_i) \cdot J_1(a_{21}I_i) \\
& + jA_2 \left(J_1(a_{21}I_i) J_2(a_{22}Q_i) \right. \\
& \left. + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} J_{2k+1}(a_{21}I_i) [J_{2k}(a_{22}Q_i) - J_{2k+2}(a_{22}Q_i)] \right) \left. \right\}. \tag{7}
\end{aligned}$$

Для функций Бесселя первого рода при малых аргументах и целых положительных показателях известны асимптотические приближения. Тогда при $a_{11} = a_{12} = a_{21} = a_{22} = a$ и $A_1 = A_2 = A$ находим

$$\begin{aligned}
\frac{E_{TS}(t \ \omega_{RF})}{A \cdot a} = & -I_i \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) + Q_i \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \rightarrow \\
& \leftarrow -jQ_i \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) - jI_i \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}),
\end{aligned}$$

Анализ выражения для сигнала на выходе передатчика $E_{TS}(t)$ позволяет выделить спектральные составляющие с нулевой радиочастотой

$$\begin{aligned}
E_{TS}(t \ 0) = & jA_1 J_0(a_{11}I_i) J_0(a_{12}Q_i) + j2A_1 \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(a_{11}I_i) J_{2k}(a_{12}Q_i) \right\} \rightarrow \\
& \leftarrow -A_2 J_0(a_{21}I_i) J_0(a_{22}Q_i) - 2A_2 \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(a_{21}I_i) J_{2k}(a_{22}Q_i) \right\}. \tag{8}
\end{aligned}$$

На рисунке 2 представлен спектр оптического излучения с одной боковой полосой, модулированное радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Важно, что спектральные составляющие соответствуют радиосигналам с квадратурной фазовой манипуляцией. Кроме того, формируется оптическое излучение с одной боковой полосой.

Таким образом, спектральный анализ оптического сигнала на выходе передатчика с использованием разложения Якоби–Ангера доказывает, что в выходном сигнале передающей станции присутствуют спектральные составляющие на поднесущей частоте. Получено асимптотическое выражение для оценки энергетического уровня спектральных составляющих,

соответствующие радиосигналам как на поднесущей частоте, так и на нулевой частоте.

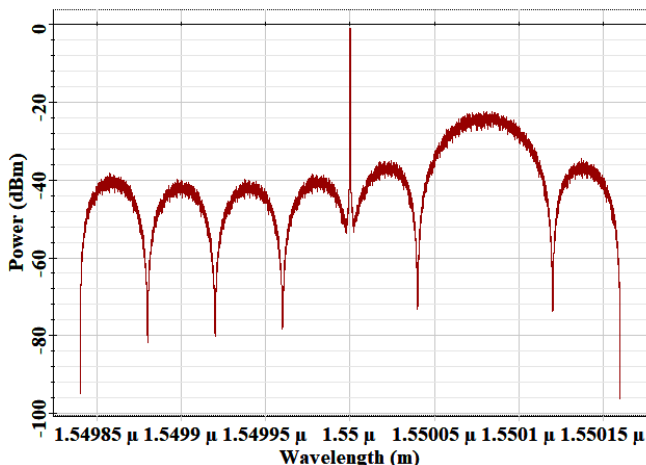


Рисунок 2 - Спектр оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией

В третьей главе предложена модель атмосферы для трассы Земля-спутник, которая позволяет количественно оценивать атмосферные потери из-за комбинированных детерминированных эффектов поглощения излучения и рассеяния Рэлея и Ми через фиксированные коэффициенты потерь для состояний замираний канала FSO с помощью закона Берса-Ламберта.

Обосновано применение модели гауссова пучка для анализа распространения когерентного гауссова лазерного луча. Выявлены возмущающие факторы для луча на трассе Земля-спутник в условиях турбулентности.

Предложена высотная модель Хафнагеля-Валли для описания структурной характеристики флуктуаций показателя преломления в атмосфере, а также математическая модель для оценки влияния ошибки наведения по восходящей линии от наземной станции к спутнику.

В качестве модели распределения интенсивности излучения при эффекте мерцания в турбулентной атмосфере для оптических систем выбрана гамма-гамма модель, которая справедлива как для крупномасштабных, так и для мелкомасштабных флуктуациях. Выбор модели основан на том, что она имеет валидность, охватывающую как режимы слабой, так и сильной турбулентности.

Наведение лазерного луча на движущийся объект является одним из самых сложных процессов для космической связи. Предложена математическая модель для оценки влияния ошибки наведения на связь по восходящей линии от наземной станции к спутнику. Для углов радиальной ошибки наведения передатчика θ_T и приёмника θ_R оптическая мощность на входе приёмника

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R \left(\frac{\pi D_T D_R}{4 \lambda_{opt} L} \right)^2 \exp \left[- \left(\frac{\pi D_T}{\lambda_{opt}} \right)^2 \theta_T^2 - \left(\frac{\pi D_R}{\lambda_{opt}} \right)^2 \theta_R^2 \right]. \quad (9)$$

определяется мощностью P_T оптического излучения передатчика, эффективностью оптических антенн передатчика η_T и приёмника η_R , коэффициентами усилением телескопов передатчика $G_T = (\pi D_T / \lambda_{opt})^2$ и приёмника $G_R = (\pi D_R / \lambda_{opt})^2$, расстоянием между станциями L .

Полученные соотношения позволяют получать количественную оценку влияния ошибок наведения на снижение интенсивности принимаемого спутником оптического излучения при различных орбитах спутников, диаметрах и эффективности оптических телескопов. Оценка дана для следующих параметров атмосферного канала: длина волны 1550 нм; мощность передатчика 1.99 дБм; диаметр антенны передатчика 100 мм; эффективности оптических антенн передатчика 0,8 и приёмника 0,8.

В соответствии с параметрами атмосферного канала на рисунке 3 показаны зависимости принимаемой мощности оптического излучения (в дБм) от протяжённости канала в отсутствие атмосферной турбулентности при трех углах ошибки наведения (0; 1 и 2 мкрад), и значениях диаметра антенны приёмника 100 (а) и 140 (б) мм. В отсутствие атмосферной турбулентности на дальности 350 км зарегистрирована оптическая мощность -37,73, -38,09 и -39,16 дБм, а на 700 км равна -43,75, -44,11 и -45,18 дБм при углах ошибки наведения 0, 1 и 2 мкрад. Диапазон передачи равен 500...900 км при диаметре антенны приёмника 140 мм.

Принимаемые мощности оптического излучения в спутниковой системе лазерной связи подтверждают передачу данных на расстояние до 700 км при диаметрах антенны передающего и приёмного телескопов 100 мм при отсутствии турбулентности в атмосфере. При диаметре антенны приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние до 800 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 900 км.

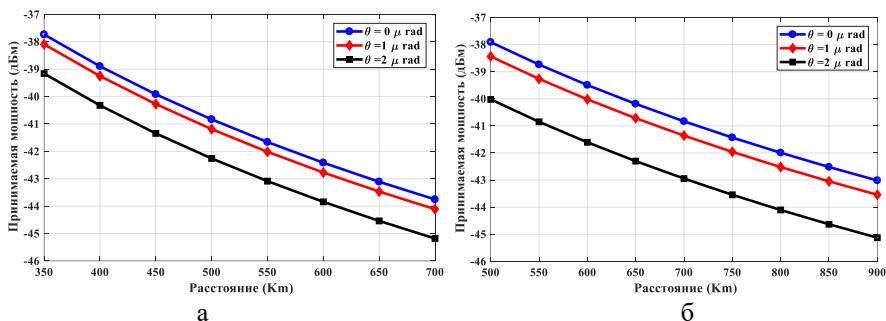


Рисунок 3 - Принимаемая мощность оптического излучения как функция протяжённости канала при отсутствии атмосферной турбулентности

На рисунке 4 представлены зависимости принимаемой оптической мощности (в дБм) от дальности канала при атмосферной турбулентности со структурным параметром показателя преломления $C_n^2 = 7.5885 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2/3}$ при трех

углах ошибки наведения (0; 1 и 2 мкрад) и значениях диаметра антенны приёмника 100 (а) и 140 (б) мм.

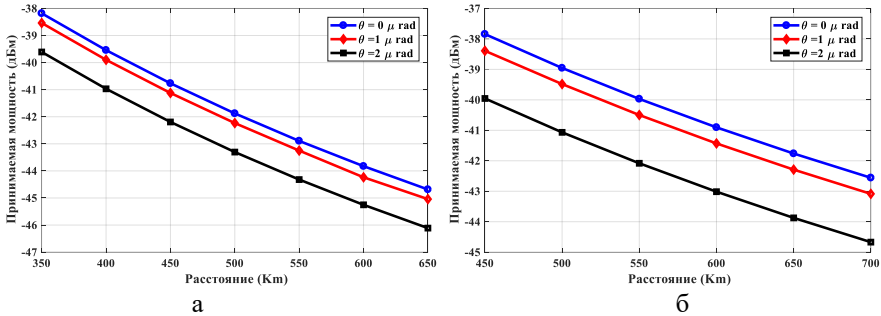


Рисунок 4 - Зависимость принимаемой оптической мощности от дальности канала при атмосферной турбулентности

Уровни принимаемой мощности оптического излучения после прохождения через атмосферу с высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для трассы Земля-спутник, подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние 350 ... 650 км при диаметрах передающего и приёмного телескопов 100 мм. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 700 км.

Сравнительный анализ графиков на рисунках 3 и 4 показывает, что из-за высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурного параметра показателя преломления для трассы Земля-спутник, дальность связи уменьшается с 900 до 700 км (на 30 %) при диаметре передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 140 мм.

В четвёртой главе обоснован выбор когерентного гомодинного оптического приёмника, обеспечивающего значительное улучшение чувствительности приёмника по сравнению с системами прямого фотодетектирования. Более того, когерентный приём сохраняет амплитуду и фазу сигнала, даёт возможность использовать цифровую обработку сигналов.

В когерентной системе использование балансной схеме фотодетектирования (рисунок 5) позволяет уменьшить шум электрического сигнала, а также максимально использовать мощность, оптического гетеродина. В балансной схеме используются 4 ответвителя. В одном из разделённых сигналов гетеродина вводится фазовый сдвиг $\pi/2$, что позволяет смешивать его с квадратурным членом E_s . В результате на фотодетекторы подаются сигналы

$$E_1 = (E_s + E_{LO})/2 \quad E_2 = (E_s - E_{LO})/2 \quad E_3 = (E_s + jE_{LO})/2 \quad E_4 = (E_s - jE_{LO})/2,$$

Синфазные E_1 и E_2 и квадратурные E_3 и E_4 сигналы посылаются на балансные фотодетекторы, которые преобразуют их оптическую мощность в электрические токи и выдают их разности

$$I_I = I_1 - I_2 = R\sqrt{P_s \cdot P_{LO}} \cdot \cos(\phi_s - \phi_{LO});$$

$$I_Q = I_3 - I_4 = R\sqrt{P_s \cdot P_{LO}} \cdot \sin(\phi_s - \phi_{LO}),$$

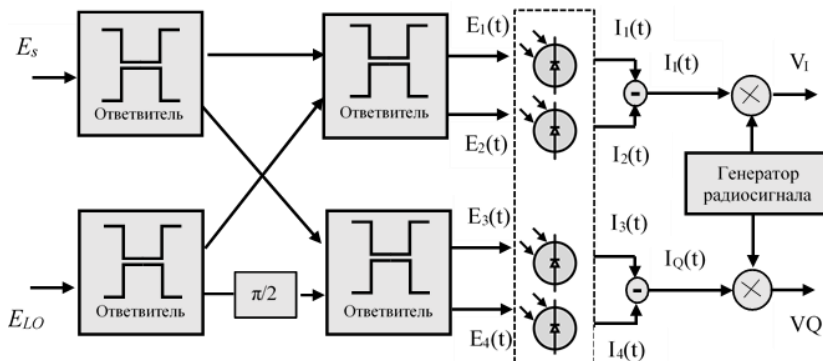


Рисунок 5 - Схема балансного фотодетектирования

Видно, что слабые принимаемые сигналы могут быть усилены за счёт мощности P_{LO} гетеродинного сигнала, что представляет одну из наиболее полезных характеристик когерентных приёмников.

Для восстановления закодированной в фазе информации существенно, что информация связана теперь с изменением интенсивности передаваемого поля. Для приёма используют быстродействующие р-и-п-фотодиоды, которые реагируют только на мгновенную мощность поля. Предложена на основе известных алгоритмов методика обработки радиосигнала с квадратурной фазовой манипуляцией в когерентном оптическом приёмнике. Схема обработки включает фильтрацию нижних частот Бесселя, передискретизацию, компенсацию QI, восстановление времени, адаптивный эквалайзер, оценку смещения частоты и оценку несущей фазы.

Получены диаграммы созвездий синфазной и квадратурной составляющих радиосигнала с QPSK при цифровой обработке сигнала (DSP) для высоты спутника 500 км в отсутствии и при наличии атмосферной турбулентности. В качестве иллюстрации на рисунке 6 даны диаграммы для трех углов ошибки наведения 1 (верхний), 2 (средний) и 3 мкрад (нижний ряд) при диаметрах антенн передатчика и приёмника 100 мм перед DSP (а), после адаптивного эквалайзера (б), после оценки смещения частоты (в), после оценки фазы несущей (г). Диаграммы дают наглядное представление о влиянии параметров атмосферного канала ($C_n^2 = 7,585 \times 10^{-19} \text{ м}^{-2/3}$), ошибок наведения и диаметрах антенны приёмника.

В оптических линиях связи в открытом космосе ошибки происходят из-за атмосферной турбулентности, угла ошибки наведения, расходимости и расширения луча.

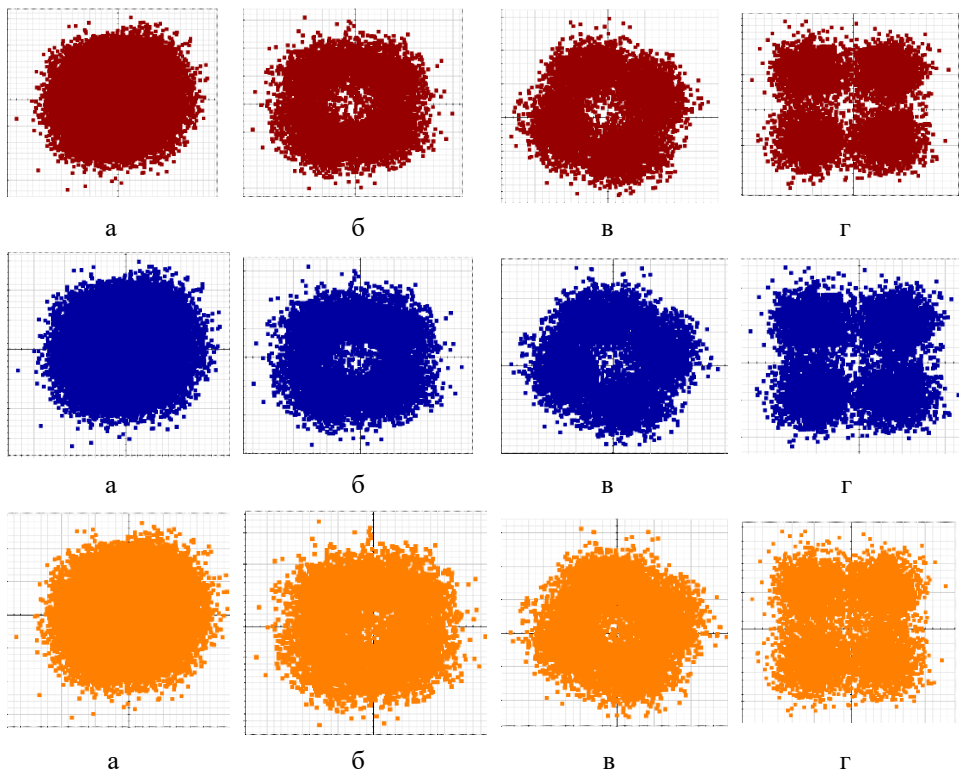


Рисунок 6 - Созвездия диаграмм при углах 1 (фиолетовый), 2 (синий) и 3 мкрад (оранжевый цвет). Диаметр антенны приёмника 100 мм

На рисунке 7 показано поведение вероятности ошибок бит в зависимости от угла ошибки наведения при передаче на 500 км лазерного сигнала между наземной станцией и спутник на основе высотной модели атмосферной турбулентности Хафнагеля-Валли.

На рисунке 8 показаны зависимости вероятности ошибок бит от дальности канала при отсутствии атмосферной турбулентности при трёх углах ошибки наведения, диаметре антенны передатчика 100 мм и диаметрах антенны приёмника 100 (а) и 140 (в) мм. Аналогичные зависимости представлены на рисунке 9 с учётом атмосферной турбулентности ($C_n^2 = 7,585 \times 10^{-19} \text{ м}^{-2/3}$).

Вероятности ошибок бит после прохождения через атмосферу с турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики показателя преломления для трассы Земля-спутник, подтверждают возможность передачи данных на 350...650 км при диаметрах антенн передающего и приёмного телескопов 100 мм. При диаметре антенны передающего 100 мм и приёмного 120 мм телескопов возможна передача данных на до 650 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность передачи до 700 км. Сравнительный анализ графиков на рисунках 8 – 9

показывает, что из-за высотной турбулентностью дальность связи уменьшается с 900 до 700 км (на 30 %) при диаметрах антенн передающего 100 мм и приёмного 140 мм телескопов.

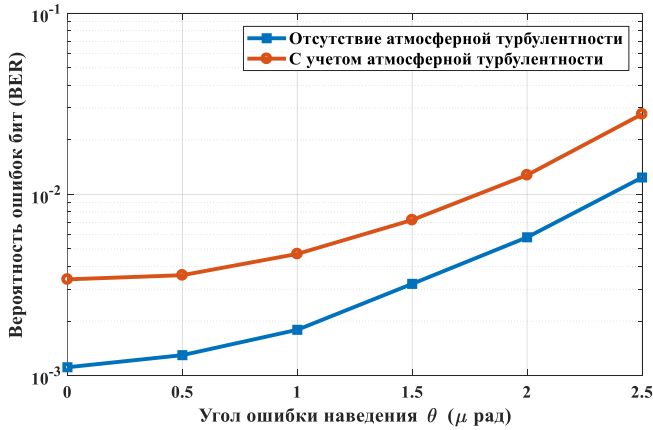


Рисунок 7 - Вероятность ошибок бит как функция углов ошибки наведения

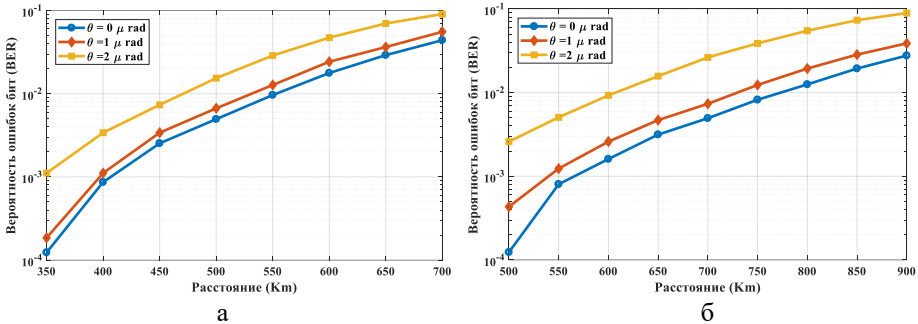


Рисунок 8 - Вероятность ошибок бит как функция протяжённости канала при отсутствии атмосферной турбулентности

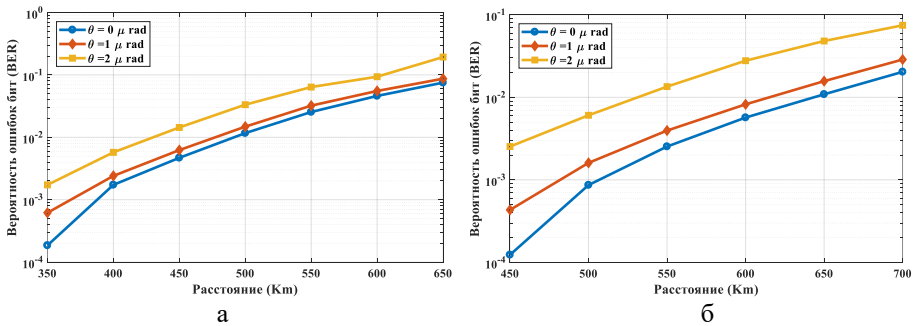


Рисунок 9 - Зависимость вероятности ошибок бит от дальности канала при атмосферной турбулентности

Проведённое моделирование параметров системы-прототип с передачей оптического излучения с двойной боковой полосой и амплитудной манипуляцией радиосигналом на поднесущей частоте показывает, что максимальное расстояние передачи вдоль поверхности Земли при слабой атмосферной турбулентности составляет 950 м при BER 8.613×10^{-9} и добротности 5,637. При сильной атмосферной турбулентности максимальное расстояние передачи составляет 850 м при BER 2.284×10^{-9} и добротности 5,862. Исследование системы передачи информации посредством оптического излучения с двойной боковой полосой и с амплитудной манипуляцией радиосигналом на поднесущей частоте показывают, что при близких вероятностях ошибок бит система-прототип проигрывает предлагаемой в диссертации системе в 10 раз по пропускной способности при существенно меньшей дальности связи для анализируемого восходящего канала.

В заключении подведены итоги диссертационных исследований, обосновано достижение поставленной цели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной задачи, связанной с разработкой и исследованием лазерной системы спутниковой коммуникации в условиях атмосферной турбулентности, обеспечивающей повышение пропускной способности за счёт формирования однополосного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Предложен алгоритм генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией, отличающийся от известных алгоритмов реализацией на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера на кристалле из ниобата лития в двухтактной конфигурации с постоянным напряжением смещения на всех плечах интерферометров со встроенным фазовращателем на $\pi/2$ и включением преобразования Гильберта радиосигнала.

Впервые получены аналитические выражения для описания процесса формирования и спектрального анализа радиосигналов и оптического излучения на выходах функциональных устройств передающей станции на основе разработанной модели формирования оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Используя разложения Якоби–Ангера, доказано присутствие в выходном сигнале станции спектральных составляющих радиосигнала на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией и формирование оптического излучения с одной боковой полосой. Получены асимптотические выражения для оценки энергетического уровня спектральных составляющих, соответствующих радиосигналам на поднесущей и нулевой частотах.

Предложен алгоритм обработки принимаемого сигнала в системе оптической связи в свободном пространстве, реализующий когерентный гомодинный приём посредством балансного включения фотодетекторов с использованием четырёх оптических ответвителей с дополнительным фазовым

сдвигом на $\pi/2$ для одного из разделённых сигналов лазерного гетеродина, отличающийся последующим синхродинным приёмом радиосигналов на поднесущей частоте. Предложенные структуры передающей и приёмной станций увеличивают скорость передачи данных с 1 Гбит/с до 10 Гбит/с по сравнению с системой, формирующей оптическое излучение с двумя боковыми полосами и амплитудной манипуляцией радиосигналом на поднесущей частоте.

Использование предложенных моделей для интенсивности принимаемого оптического излучения после прохождения трассы Земля-спутник с учётом воздействия эффектов турбулентной атмосферы и ошибок нацеливания антенн позволяет количественно оценить снижение вероятности ошибок бит и интенсивности принимаемого спутником оптического излучения при разных высотах орбит, диаметрах и эффективности оптических телескопов. Уровни принимаемой мощности оптического излучения подтверждают возможность работы лазерной системы спутниковой связи при передаче данных на расстояние до 700 км при диаметрах антенны передающего и приёмного телескопов 100 мм при отсутствии турбулентности в атмосфере. При диаметрах антенн передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние до 800 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 900 км. Установлено, что из-за высотной турбулентности, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, дальность связи уменьшается с 900 до 700 км (на 30 %) при диаметрах антенны передающего 100 мм и приёмного телескопа 140 мм.

Показано, что система-прототип передачи информации посредством оптического излучения с двойной боковой полосой и с амплитудной манипуляцией радиосигналом на поднесущей частоте при близких вероятностях ошибок бит проигрывает предлагаемой системе в 10 раз по пропускной способности даже при существенно меньшей протяжённости восходящего канала связи.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК РФ (на момент публикации)

1. Махмуд, Х. А. М. Анализ восходящего лазерного канала спутниковой коммуникации в условиях атмосферной турбулентности / Х. А. М. Махмуд, К. Е. Румянцев, А. Х. Ш. Аль-Бегат // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 4(234). – С. 174-191. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191. https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/838/1024
2. Махмуд, Х. А. М. Формирование однополосной квадратурной фазовой манипуляции радиосигналов на поднесущих частотах в когерентной оптической системе коммуникации / Х. А. М. Махмуд, К. Е. Румянцев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 5(229). – С. 209-220. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220. https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/713
3. Mahmood, H. A. Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing / amplitude shift keying / H. A. Mahmood, R. K. Rumyantsev, H. S. Al-Karawi // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – №

5(215). – С. 141-149. – DOI: 10.18522/2311-3103-2020-5-141-149. https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/400

В международных научных изданиях, индексируемых Scopus:

4. Mahmood, H. A. 40 Gbps Laguerre-Gaussian and Hermite-Gaussian Optical Mode Division Multiplexing for Radio over Fiber System / H. A. Mahmood // Journal of Optical Communications. – 2021. – Т. 42, № 4. – С. 689-692. – DOI 10.1515/joc-2018-0161. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/joc-2018-0161/html>

5. Mahmood, H. A. Effect of FBG Compensated Dispersion on SCM/ASK Radio over Fiber System / H. A. Mahmood, K. Y. Romyantsev // 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). – 2019. – Art. No 8966032 (p. 1-5). – DOI 10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8966032. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8966032>

6. Mahmood, H. A. Radio over fiber performance evaluation in optical communication system utilizing FBG under different DCF schemes for DPSK format / H. A. Mahmood, R. K. Ahmed // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – Т. 14, № 4. – С. 1130-1137. – DOI 10.36478/jeasci.2019.1130.1137. <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=jeasci.2019.1130.1137>

7. Ahmed, R. K. Performance analysis of PAM intensity modulation based on dispersion compensation fiber technique for optical transmission system / R. K. Ahmed, H. A. Mahmood // 2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences-3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES). – 2018. – С. 126-130. – DOI:10.1109/ISCES.2018.8340540. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8340540>

В прочих изданиях:

8. Махмуд, Х. А. М. Моделирование мультиплексирования поднесущих Найквиста для оптической системы передачи / Х. А. М. Махмуд, К. Е. Румянцев // II Всероссийская научно-практическая конференция «Digital Era», 25 марта 2022 г. – Грозный : ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», 2022. – С. 77-83. – DOI: 10.36684/59-2022-2-77-83. <https://storage.ucomplex.org/files/users/-1/c877f6153bfba5d.pdf?t=1699444054>

9. Махмуд, Х. А. М. Спектральный анализ системы передачи с мультиплексированием оптических поднесущих, использующей формат модуляции QPSK / Х. А. М. Махмуд // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности : VII Всероссийская научно-техническая конференция, 5–11 апреля 2021 : сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. – Таганрог, 2021. – С. 77-81. <https://clck.ru/36VL56>

10. Mahmood, H. A. DCF with FBG for dispersion compensation in optical fiber link at various bit rates using duobinary modulation format / H. A. Mahmood // Engineering and Technology Journal. – 2018. – Т. 36, № 5A. – С. 514-519. – DOI:10.30684/etj.36.5A.6. https://etj.uotechnology.edu.iq/article_175136.html

11. Mahmood, H. A. Fiber bragg grating and channel spacing effect in WDM radio over fiber system using DPSK modulation format / H. A. Mahmood, R. K. Ahmed // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Т. 7, №. 3.4. –

С. 218-222. – DOI 10.14419/ijet.v7i3.4.16779.
<https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/16779>

12. Ahmed, R. K. Performance evaluation of high data rate optical communication system utilizing FBG compensated dispersion schemes under different modulation techniques / R. K. Ahmed, H. A. Mahmood // Diyala Journal of Engineering Sciences. – 2017. – Т. 10, № 2. – С. 94-106. – DOI 10.24237/djes.2017.10209.
<https://djes.info/index.php/djes/article/view/213/192>

13. Махмуд, Х. А. М. Влияние диаметра апертуры приёмника в спутниковой системе когерентной оптической связи с мультиплексированием поднесущих Найквиста / Х. А. М. Махмуд, К. Е. Румянцев // I студенческая научно-практическая конференция «Тенденции развития естественных наук в современном информационном пространстве и их применение в агробιοтехнологиях», 22 октября 2021. – Грозный : ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», 2021. – С. 143-146. – DOI 10.36684/51-2021-1-143-146.
<https://storage.ucomplex.org/files/users/-1/8f47ec4ed32555dd.pdf?t=1699443768>

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд
ЛАЗЕРНАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ РАДИОСИГНАЛОВ
НА ПОДНЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЕ С КВАДРАТУРНОЙ ФАЗОВОЙ
МАНИПУЛЯЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук

Подписано в печать 27.11.2023 г.
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Тираж 100 экз.
Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 9253

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.