

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук,

профессора Широкова Игоря Борисовича

на диссертационную работу Махмуда Хуссейна Ахмеда Махмуда на тему «Лазерная спутниковая система передачи радиосигналов на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией в условиях атмосферной турбулентности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», технические науки

Актуальность темы диссертационных исследований

Спутниковая связь обладает достоинствами, необходимыми для построения крупномасштабных телекоммуникационных сетей. Во-первых, используя спутник можно сформировать сетевую инфраструктуру, охватывающую большую территорию и не зависящую от состояния наземных каналов связи. Во-вторых, значительно снижаются затраты на эксплуатацию сети за счёт технологий доступа к ресурсу спутниковых ретрансляторов и доставки информации практически неограниченному числу потребителей.

Использование оптического излучения позволяет существенно расширить полосу частот для передачи информации и увеличить пропускную способность систем спутниковой связи. Благодаря малой длине волны для формирования диаграммы направленности излучаемой энергии в $1 \dots 4$ угловые секунды ($5 \dots 20$ мкрад) можно использовать оптические антенны с диаметрами всего $10 \dots 30$ см. Кроме того, высокая концентрация излучаемой энергии, обеспечиваемая маломощным передатчиком, снижает энергопотребление аппаратуры на спутнике. Узкая диаграмма направленности антенны обеспечивает практически полную помехозащищённость оптической линии связи, а также высокую пространственную развязку систем связи.

Технология передачи радиосигналов по оптическому каналу в свободном пространстве реализуется путём переноса радиосигнала на оптическое излучение. Для предотвращения замирания мощности радиосигналов на высокочастотных поднесущих, вызванного хроматической дисперсией в атмосфере, используется однополосная модуляция оптического излучения. Эффективность использования однополосной модуляции снижается, если спектральные составляющие сигнала находятся вблизи несущей частоты. Одним из направлений решения этой проблемы является генерация излучения с однополосной модуляцией методом фазового сдвига с использованием внешнего модулятора Маха-Цендера.

На качество спутниковой связи значительное влияние оказывают атмосферные явления.

Таким образом, Махмуд Хуссейн в диссертационном исследовании решает актуальную научную задачу, связанную с разработкой и исследованием лазерной системы спутниковой связи в условиях атмосферной турбулентности, обеспечивающей повышение пропускной способности за счёт формирования

однополосного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Соответствие темы и содержания диссертационной работы научной специальности 2.2.13

Тема и содержание диссертационной работы «Лазерная спутниковая система передачи радиосигналов на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией в условиях атмосферной турбулентности» соответствуют пункту 8 области исследований «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». Это следует из цели, научных положений, научной новизны и практической значимости диссертационных исследований, где подчёркивается, что алгоритмы формирования и гомодинного фотодетектирования оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией, обеспечивают повышение пропускной способности лазерной системы спутниковой.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, подтверждается строгостью применяемого математического аппарата, результатами вычислительного эксперимента.

Для доказательства присутствия в выходном сигнале станции спектральных составляющих радиосигнала на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией и формирования оптического излучения с одной боковой полосой использовано разложение Якоби-Ангера.

Использование высотной модели Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления в атмосфере для трассы Земля-спутник оправдано результатами натурных испытаний, описанных в литературе.

Для обоснования первого научного положения, выносимого на защиту, диссертант показывает необходимость использования:

- оптического диапазона для передачи информации на значительные расстояния с использованием спутников Земли;
- учёта и снижения влияния случайных изменений мощности излучения в атмосфере на параметры лазерных систем спутниковой связи;
- сигналов, закодированных в форматах модуляции высокого порядка;
- гомодинного приёма в оптических системах спутниковой связи для эффективной демодуляции сигналов, закодированных в форматах модуляции высокого порядка.

Обоснованность второго научного положения подтверждена предложением нового алгоритма генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Отличительной особенностью алгоритма является реализация на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера на кристалле в двухтактной конфигурации с постоянным напряжением смещения на всех плечах интерферометров со встроенным фазовращателем на $\pi/2$ и включением преобразования Гильберта радиосигнала.

Обоснованность третьего научного положения подтверждена результатами количественной оценки влияния 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. Количественная оценка дана на основе использования высотной модели Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник.

Наконец, для обоснования последнего научного положения, выносимого на защиту, диссертант показывает необходимость использования приёмника с гомодинным приёмом оптического излучения и последующим синхродинным приёмом уже радиосигналов на поднесущей частоте. 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.

Выводы и рекомендации, касающиеся увеличения пропускной способности лазерной системы спутниковой связи, обосновываются:

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

Таким образом, обоснованность и достоверность научных достижений, выводов и рекомендаций подтверждается адекватностью используемых моделей, корректным применением математического аппарата, результатами моделирования, положительными заключениями рецензентов на опубликованные в ведущих научных изданиях работы.

Научная новизна результатов диссертации

Диссертант научная новизна результатов сформулирована в 4-х позициях.

Оппонент согласен с первыми двумя позициями научной новизны работы «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.» и «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.».

Третья позиция научной новизны работы требует, по моему мнению, уточнения. Ведь в предлагаемой модели приёма в системе оптической связи в свободном пространстве реализуются последовательно два преобразования частоты. Вначале реализуется 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. Благодаря этому на выходах фотодиодов выделяются радиосигналы на поднесущей частоте. А вот благодаря применению последующего синхродинного метода приёмом формируется искомая последовательность бит. Поэтому эту позицию научной новизны работы целесообразно сформулировать в следующей редакции «Предложен алгоритм обработки принимаемого сигнала в системе оптической связи в свободном пространстве, последовательно реализующий когерентный гомодинный приём оптического излучения и синхродинный метод приёмом радиосигналы на поднесущей частоте. Гомодинный приём реализуется посредством балансного включения фотодетекторов с использованием четырёх оптических ответвителей с дополнительным фазовым сдвигом на $\pi/2$ для одного из разделённых сигналов гетеродина.».

Оппонент согласен с последней позицией научной новизны работы, касающейся разработки методики количественной оценки принимаемой мощности когерентного оптического излучения и вероятности ошибок бит после прохождения гауссовым лазерным лучом трассы Земля-спутник.

Значимость результатов для науки и практики

Практическая ценность проведённых исследований заключается в том, что 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 по сравнению с системой, формирующей оптическое излучение с двумя боковыми полосами для передачи радиосигнала на поднесущей частоте с амплитудной манипуляцией. Замечания в части количественной оценки увеличения скорости передачи данных будут даны позднее.

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

С практической точки зрения важна предложенная методика количественной оценки вероятности ошибок бит и интенсивности принимаемого спутником оптического излучения при различных высотах орбит, диаметрах и эффективности оптических телескопов.

Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа изложена на 143 страницах, состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Основное содержание *первой главы диссертации* составляет обоснование актуальности (повышение пропускной способности) и сущности общей научной задачи (разработка и исследование лазерной системы спутниковой связи в условиях атмосферной турбулентности), решаемой в диссертации, проводимое на базе анализа предмета исследования (формирование и гомодинное фото-детектирование однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией) под углом зрения практических потребностей дальнейшего развития науки в соответствующей предметной области и состояния разработки известного научно-методического аппарата, применимого в рассматриваемой области исследования.

Во *второй главе* предложена модель формирования однополосного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера. 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. Посредством спектрального анализа оптического сигнала на выходе передатчика с использованием разложения Якоби-Ангера доказано, что в выходном сигнале передающей станции присутствуют спектральные составляющие на поднесущей частоте. Получены асимптотические выражения для оценки энергетического уровня спектральных составляющих, соответствующие радиосигналам как на поднесущей частоте, так и на нулевой частоте.

В *третьей главе* предложены модели атмосферы для трассы Земля-спутник, которые позволяют количественно оценивать атмосферные потери из-за комбинированных детерминированных эффектов поглощения и рассеяния излучения, а также из-за высотных изменений структурной характеристики флуктуаций показателя преломления в атмосфере и из-за эффекта мерцания в турбулентной атмосфере для оптических систем. Предложена математическая модель для оценки влияния ошибки наведения на связь по восходящей линии от наземной станции к спутнику. Использование предложенных моделей для интенсивности принимаемого оптического излучения после прохождения трассы Земля-спутник позволило диссертанту количественно оценить снижение интенсивности принимаемого спутником оптического излучения при различных высотах орбит спутников, диаметрах и эффективности оптических телескопов с учётом воздействия эффектов турбулентной атмосферы и ошибок нацеливания антенн.

Последняя глава посвящена разработке и анализу когерентного гомодинного оптического приёмника, обеспечивающего значительное улучшение чувствительности приёма по сравнению с системами прямого фотодетектирования. В приёмнике реализована балансная схема фотодетектирования на 4-х ответвителях. Причём в одном из разделённых сигналов гетеродина вводится фазовый сдвиг $\pi/2$. Дан анализ конфигурации балансного фотодетектирования, где передаёт четыре оптических излучения на две пары фотодиодов, на выходах которых формируются разностные сигналы. Проанализирован процесс преобразования оптического излучения в электрический ток. Предложена на основе известных алгоритмов схема обработки радиосигнала с квадратурной фазовой манипуляцией в когерентном оптическом приёмнике.

Получены диаграммы созвездий синфазной и квадратурной составляющих радиосигнала с квадратурной фазовой манипуляцией при цифровой обработке сигнала в отсутствии и при наличии атмосферной турбулентности. Диаграммы дают наглядное представление о влиянии параметров атмосферного канала, ошибок наведения и диаметрах антенны приёмника при регистрации радиосигнала с квадратурной фазовой манипуляцией при предложенном алгоритме цифровой обработки сигналов в когерентном оптическом приёмнике.

Используя предложенную модель оптического приёмника, дана оценка влияния на вероятность ошибок бит атмосферной турбулентности на трассе Земля-спутник, высот орбит спутников, диаметров и коэффициентов передачи оптических телескопов, а также ошибок наведения антенны.

Показано, что система-прототип передачи информации посредством оптического излучения с двойной боковой полосой и с амплитудной манипуляцией радиосигналом на поднесущей частоте проигрывает предлагаемой системе по пропускной способности даже при существенно меньшей дальности связи для анализируемого восходящего канала.

Автореферат достаточно полно отражает содержание и основные положения представленной диссертационной работы.

Считаю, что в автореферат следовало бы включить зависимости вероятности ошибок бит от дальности связи для слабой и сильной турбулентности для системы-прототипа передачи информации посредством оптического излучения с двойной боковой полосой и с амплитудной манипуляцией радиосигналом на поднесущей частоте, которые представлены на рисунке 4.6 в диссертации. Они более значимы для понимания выигрыша от внедрения предлагаемых алгоритмов формирования и гомодинного фотодетектирования оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации.

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 технических наук, опубликовано 3 статьи. В изданиях, реферируемых в базе данных «SCOPUS», опубликовано 4 статьи. В реферируемых изданиях, учитываемых в РИНЦ, опубликовано 6 работ. Публикации соответствуют научной специальности, по которой выполнена диссертация. В публикациях изложены основные научные результаты диссертации.

Апробация работы.

Основные положения научной работы докладывались и обсуждались на 5 научно-технических конференциях, включая международную и 3 всероссийских.

К содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. Исходя из актуальности и цели исследований считаю, что сразу после обоснования использования оптического диапазона для передачи информации на значительные расстояния с использованием спутников Земли необходимо было бы более подробно раскрыть проблему повышения пропускной способности оптической связи в свободном пространстве.

2. Диссертантом получены асимптотические выражения для оценки энергетического уровня спектральных составляющих, соответствующие радиосигналам на поднесущей и на нулевой частотах. Однако методика их использования для проектирования лазерной системы спутниковой связи не раскрыто, что имело бы практическую ценность.

3. Диссертантом не раскрыто влияние параметров турбулентной атмосферы на фазу оптического излучения. При обосновании моделей атмосферы основное внимание сконцентрировано на интенсивность принимаемого оптического излучения. В то же время основная информация заключена в фазе оптического излучения.

4. Диссертант подчёркивает, что 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. Однако такое сравнение справедливо только при условии идентичности линий связи. Если обратиться к тексту, то анализ проведён для оптического излучения с двойной боковой полосой и амплитудной манипуляцией радиосигналом на поднесущей частоте для линии в свободном пространстве до 1 км при слабой и сильной атмосферной турбулентности. Ранее в главе 3 дальность спутникового канала передачи принимается до 900 км. Кроме того, сравнительный анализ предполагает равенство вероятностей ошибок бит.

5. В работе отсутствует оценка влияния на пропускную способность лазерной системы спутниковой связи атмосферной турбулентности на трассе Земля-спутник, высоты орбит спутников, диаметров и коэффициентов передачи оптических телескопов, а также ошибок наведения антенны. Ведь цель исследований сформулирована, как повышение пропускной способности лазерной системы спутниковой связи. Последнее не отвергает важность проведённых в диссертации исследований по оценке влияния 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.

Оценка диссертации в целом

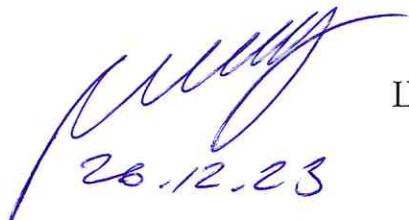
В целом, несмотря на указанные выше замечания, диссертационная работа Махмуда Хуссейна Ахмеда Махмуда производит положительное впечатление. Она является научным исследованием, посвящённым актуальной научной проблеме, содержит признаки научной новизны, обоснованность и достоверность научных достижений, выводов и рекомендаций.

Заключение

Считаю, что Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд достиг поставленной цели диссертационных исследований. Основные результаты проведённой работы отражают научную новизну и практическую значимость. Диссертация Махмуда Хуссейна Ахмеда «Лазерная спутниковая система передачи радиосигналов на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией в условиях атмосферной турбулентности» является завершённым научным трудом и удовлетворяет требованиям, установленным Положением «О присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет», предъявляемым к кандидатским диссертациям. В диссертации решены поставленные автором задачи, состоящие в разработке и исследовании лазерной системы спутниковой связи в условиях атмосферной турбулентности, обеспечивающей повышение пропускной способности за счёт формирования однополосного оптического излучения с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд заслуживает присуждения учёной степени кандидата

технических наук по научной специальности 2.2.13 — «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», технические науки.

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



26.12.23

Широков Игорь Борисович

e-mail: shirokov@sevsu.ru

тел. +7(8692)435-127

Адрес: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33, СевГУ.

Подпись Широкова Игоря Борисовича заверяю.
Первый проректор



Д.В. Грышук