

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 62-533.52

СКОРОХОДОВ
Роман Владиславович

**СИСТЕМЫ ГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМА В РАДИО И ОПТИЧЕСКОМ
ДИАПАЗОНАХ**

Автореферат
на соискание степени магистра
по специальности 1–45 80 01 Системы и сети инфокоммуникаций

Научный руководитель
Кандидат технических наук,
доцент
ТАРЧЕНКО Надежда
Владимировна

Минск 2022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время подавляющее большинство средств инфокоммуникаций являются цифровыми. Они обеспечивают обмен всеми видами информации.

Цифровые методы широко применяются в системах связи, при передаче сигналов телевидения в системах цифрового телевизионного наземного вещания, при передаче сигналов данных, что позволяет использовать для их передачи единую инфокоммуникационную платформу.

С их помощью можно обеспечить системы цифровой коммуникации надежнее и дешевле.

Многоуровневые форматы модуляции сочетают в себе высокую спектральную эффективность и устойчивость к воздействию дисперсии [1]. Эти достоинства многоуровневых форматов модуляции делают их перспективными при необходимости увеличения скорости передачи в действующих системах связи со спектральным уплотнением. Сочетание когерентного детектирования с цифровой обработкой сигналов позволяет достигнуть еще более высоких значений количества передаваемой информации на один символ. Когерентные оптические системы связи были предложены в 1970-е гг. [2] и в 1980-е начали интенсивно исследоваться, поскольку обеспечивают достижение квантового предела чувствительности приемников. Однако с появлением систем связи со спектральным уплотнением и оптическими усилителями научно-исследовательские работы в этом направлении были прерваны примерно на 20 лет.

После демонстрации в 2005 г. нового поколения приемников – цифровых когерентных приемников – повсеместный интерес к когерентным системам связи вновь возродился. Он обусловлен возможностями реализации в этих системах множества разнообразных многоуровневых форматов модуляции. Кроме того, цифровая обработка сигналов в электронной форме позволяет компенсировать искажения, связанные, например, с хроматической и поляризационно-модовой дисперсией. Существенным недостатком первых когерентных систем связи была их высокая поляризационная чувствительность [16]. Однако проблема была решена благодаря изобретению поляризационной диверсификации (*polarization diversity*). Более того, современные цифровые когерентные приемники позволяют удвоить скорость передачи информации за счет поляризационного уплотнения информации.

В настоящей работе рассмотрены принципы работы когерентных систем связи и гетеродинного приема, сегодняшний уровень их развития и перспективы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Тема диссертационной работы соответствует пункту 6 приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь №156 от 7 мая 2020 г. «*Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства*». Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в обосновании методов когерентного приема в радио и оптическом диапазонах, исследовании их характеристик, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является сравнительный анализ эффективности методов гетеродинного приема оптических сигналов.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

- 1 Выбор критериев эффективности инфокоммуникационных систем.
- 2 Анализ способов построения оптических приемников ВОСП по критерию чувствительности.
- 3 Математическое описание сигналов с фазовой и амплитудно-фазовой манипуляцией и их сравнение по критериям спектральной и энергетической эффективности.

Актуальность исследования обусловлена повсеместным использованием волоконно-оптических систем передачи, в том числе и со спектральным уплотнением. При постоянном увеличении пропускной способности ВОСП совершенствуются способы обработки оптического

сигнала в передающем и приемном оборудовании, и в процессе передачи по оптическому волокну. Совершенствование оптических технологий расширяет возможности реализации обработки сигналов на приемной стороне и требует оценки их эффективности.

Объектом исследования являются гетеродинные приемники оптических и радиосигналов

Предмет исследований – эффективность гетеродинных приемников оптических и радиосигналов

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 57-ой и 58-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2021-2022 гг.

Ключевые слова: когерентный прием, эффективность, оптическое гетеродинирование, модуляция.

Получены математические выражения для оценки эффективности когерентных оптических приемников при использовании различных видов модуляции

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 2 печатных работы, в том числе: 2 статьи в сборнике и материалах конференций, общим объемом 6 авторских листов

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка.

Общий объем диссертационной работы составляет 95 страниц, из них 65 страниц текста, 49 рисунков на 30 страницах, 5 таблиц на 6 страницах, список использованных библиографических источников (15 наименований на 83 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (2 наименование на 4 страницах), графический материал на 3 страницах.

Проверка на уникальность

Проведена экспертиза диссертации *Скороходова Романа Владиславовича «Системы гетеродинного приема в радио и оптическом диапазонах»* на корректность использования заимствованных материалов с

применением сетевого ресурса «Антиплагиат» (адрес доступа: <https://antiplagiat.ru>) в on-line режиме 25.04.2022 г. В результате проверки установлена корректность использования заимствованных материалов (оригинальность диссертационной работы составляет 62,84 %).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены принципы работы когерентных систем связи и гетеродинного приема, сегодняшний уровень их развития и перспективы.

В **общей характеристике работы** показана связь работы с приоритетными направлениями научных исследований, цель и задачи исследования, личный вклад соискателя ученой степени, апробация результатов диссертации.

В **первой главе** приведены критерии эффективности инфокоммуникационных систем, позволяющие определить предельные возможности и характеристики ВОСП:

1 Спектральная эффективность, позволяющая оценить увеличение пропускной способности при спектральном разделении каналов ВОСП, позволяет увеличивать пропускную способность в заданной полосе при уменьшении разноса между оптическими несущими.

2 Энергетическая эффективность, позволяющая сравнивать используемые виды модуляции с точки зрения требуемого отношения сигнал\шум.

3 Чувствительность приемников оптического излучения в зависимости от реализации метода приема.

Во второй главе:

1 Проведен анализ структурных схем приема оптического сигнала. Показано, что когерентные методы приема позволяют увеличить чувствительность оптического приемника.

2 Когерентные методы приема позволяют использовать высокоформатные виды модуляции, обеспечивают выигрыш в 10 – 15 дБ по сравнению с непосредственным детектированием.

В **третьей главе** были исследованы методы математического описания сигналов с фазовой и амплитудно-фазовой манипуляцией. Представлены спектральные характеристики сигналов ФМн и АФМ, рассмотрена спектральная плотность мощности при АФМ.

Было выявлено, что многоуровневые форматы модуляции позволяют увеличить скорость передачи информации в несколько раз в зависимости от емкости формата. Однако, чем выше формат модуляции, тем меньше

дальность передачи информации из-за увеличения чувствительности к шумам.

Проведено сравнение этих модуляций между собой по следующим критериям: спектральной и энергетической эффективности, что показывает:

1 Амплитудная модуляция существенно уступает фазовой и амплитудно-фазовой в энергетической эффективности. При сравнении *M-PSK* с *M-QAM* вторая превосходит по эффективности *M-PSK*, причем энергетический выигрыш *M-QAM* увеличивается с ростом уровней модуляции.

2 Фазовая манипуляция проигрывает по спектральной эффективности квадратурной амплитудной манипуляции. При недостаточной помехозащищенности канала связи приходится снижать кратность модуляции и повышать избыточность из-за увеличения доли символов корректирующего кодирования, при этом соответственно снижается пропускная способность и, как следствие, падает спектральная эффективность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжающийся рост потребностей в широкополосных услугах телекоммуникационной среды требует дальнейшего развития транспортных сетей связи на всех участках (магистральных, внутрizonовых, местных). Одним из первых этапов разработки и внедрения ВОСП является моделирование. Правильная модель позволит на стадии проектирования системы выявить сильные и слабые стороны, проверить сеть на гибкость, оценить устойчивость к изменениям исходных данных, которые могут возникнуть на стадии внедрения.

Существует большое количество методов и реализаций ВОСП, что показала проведенная классификация. Выделенные основные классификационные признаки, которые помогают определить объект исследования, позволяют описать любую проектируемую либо эксплуатируемую волоконно-оптическую систему передачи.

В работе описана математическая модель линейного тракта высокоскоростной ВОСП со спектральным разделением каналов, т.к. системы с данным видом уплотнения на современном этапе развития волоконно-оптических технологий получили широкое распространения.

Получены математические выражения для оценки ООСШ, выявлены компоненты ВОЛС, которые оказывают наибольшее влияние на результирующее ООСШ. Совершенствование элементной базы оптического

линейного тракта (оптические транспондеры, усилители, мультиплексоры и т.д.) требует постоянной оценки их влияния на системы передачи.

Полученные результаты помогут определить, какой выигрыш в ОСШ даст внедрение тех или иных решений, и сделать вывод, насколько целесообразным и эффективным будет их использование. Этот вопрос наиболее остро стоит на протяженных магистральных волоконно-оптических линиях связи.

Особое внимание уделено способам детектирования оптических сигналов, т.к. на сегодняшний день это область, в которой есть существенный резерв в развитии. Когерентные методы приема позволяют использовать высокоформатные виды модуляции, обеспечивают выигрыш в 10 – 15 дБ по сравнению с непосредственным детектированием, имеют малую чувствительность когерентного приема к нежелательному фоновому излучению. При достаточной мощности гетеродина когерентные методы приема позволяют достичь квантового предела детектирования оптического сигнала.

Недостатком когерентного приема является техническая сложность обеспечения согласования волновых фронтов и поляризаций на поверхности фотодиода принимаемого излучения и излучения гетеродина. В настоящее время для смешивания сигнала и гетеродина используются устройства интегральной оптики. Высокие требования предъявляются к стабильности частот и фаз несущих частот источника излучения и гетеродина.

Предложенная методика для расчета тракта высокоскоростной оптической системы передачи позволяет оценить вероятность ошибок в точке принятия решения при заданных условиях и характеристиках компонентов ВОСП.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Тезисы конференций

1–А. Скороходов, Р. В. Системы гетеродинного приема в радио и оптическом диапазонах / Скороходов Р. В. // 57-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР : тезисы докладов 57-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 19-23 апреля 2021 г. / редкол. : Н. В. Тарченко. – Минск : БГУИР, 2021. – С. 113–117.

2–А. Скороходов, Р. В. Анализ эффективности инфокоммуникационных систем / Скороходов Р. В. // 58-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР : тезисы

докладов 58-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 18-22 апреля 2022 г. / редкол. : Н. В. Тарченко. – Минск : БГУИР, 2022. – С. (принята к публикации).

Библиотека БГУИР