



Петров Алексей Николаевич

**НЕЛИНЕЙНЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ С УДАЛЕННЫМ МОДУЛЯТОРОМ ПРИ
ПЕРЕДАЧЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ**

1.3.4. Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Шамрай Александр Валерьевич**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Шандаров Станислав Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» (НОНЛТ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Тер-Нерсесянц Егише Вавикович
кандидат технических наук, начальник научного отделения №6 "ВОЛОКНО" акционерного общества "Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Акционерное общество «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «26» декабря 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У 1.3.4.05 на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по адресу: 195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета www.spbstu.ru.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, д. 29.

Автореферат разослан «__» ноября 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.1.3.4.05
Кандидат физико-математических наук



А. В. Петров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Передача сверхширокополосных аналоговых сигналов по волоконно-оптическим линиям (ВОЛ) широко используется в различных системах радиофотоники. Одним из примеров является архитектура систем распределения радиочастотной несущей по оптическому волокну (RoF), которая широко применяется в стремительно развивающейся беспроводной мобильной связи (системах пятого 5G и шестого 6G поколения) [А.6, А.7]. Архитектура таких систем предполагает разветвленную сеть удаленных антенных терминалов с простой технической реализацией [А.2]. Это обуславливает необходимость исследования и разработки новых методов передачи аналоговых сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов по ВОЛ, которые позволяют максимально упростить удаленный терминал с электрооптическим модулятором и антенной, и сконцентрировать сложную энергопотребляющую СВЧ аппаратуру на центральном poste. При разработке новых методов основное внимание должно быть направлено на исследование и преодоление главных ограничивающих пропускную способность факторов, таких как низкая эффективность преобразования электрического сигнала в оптический сигнал и обратно, высокие шумы источников оптического излучения, нелинейные искажения передаваемых сигналов, а также проблемы доставки мощности питания до удаленных терминалов.

Таким образом, поиск новых методов передачи аналоговых СВЧ сигналов от удаленных источников по ВОЛ является актуальной научной задачей, решение которой имеет высокую значимость для систем телекоммуникаций, а также для менее массовой, но не менее важной области применения радиофотоники в радиоастрономии и военной специальной технике.

Цель работы

Целью работы является разработка новых методов передачи по ВОЛ сверхширокополосных аналоговых сигналов, формируемых удаленным модулятором.

Для достижения поставленной цели решались следующие **научные задачи**:

Определить влияние нелинейных и поляризационных эффектов в волоконно-оптической линии с удаленным модулятором на характеристики передачи сверхширокополосных аналоговых сигналов.

Разработать методы снижения уровня шумов в волоконно-оптической линии с удаленным модулятором до уровня дробового шума при использовании балансного детектирования.

Провести исследования влияния положения рабочей точки удаленного модулятора на коэффициент передачи, коэффициент шума, нелинейные искажения и динамический диапазон волоконно-оптической линии.

Исследовать возможность передачи по одномодовому оптическому волокну

дополнительного оптического излучения высокой мощности, используемого в целях обеспечения питания электронных схем, и его влияние на аналоговый СВЧ сигнал от удаленного модулятора.

Научная новизна:

- Впервые проведены исследования влияния нелинейных и поляризационных эффектов в ВОЛ с удаленным модулятором на ключевые характеристики передачи сверхширокополосных аналоговых сигналов (коэффициент передачи, коэффициент шума, динамический диапазон, свободный от нелинейных искажений).
- Предложены оригинальные методы доставки оптического излучения к удаленному электрооптическому модулятору и контроля его рабочей точки, обеспечивающие достижение характеристик передачи сверхширокополосных аналоговых сигналов близких к фундаментальному пределу дробового шума.
- Впервые выявлены условия работы субоктавного оптического модулятора на основе направленного ответвителя, обеспечивающие линейризацию передачи аналоговых СВЧ сигналов.
- Впервые продемонстрирована возможность передачи к удаленному модулятору дополнительного оптического излучения высокой мощности для питания электронных схем, не влияющая на СВЧ сигнал, передаваемый от модулятора.

Методология диссертационного исследования

Экспериментальные исследования проводились с использованием признанных современных методик и сертифицированного измерительного оборудования. Использовался системный подход к проведению экспериментальных и теоретических изысканий и анализу их результатов, позволивший комплексно изучить наблюдаемые эффекты.

Положения, выносимые на защиту

- Поляризационный фединг в волоконно-оптической линии на основе стандартного изотропного волокна, вызванный анизотропными свойствами удаленного модулятора, компенсируется при использовании двух одночастотных лазерных источников равной мощности с ортогональной линейной поляризацией, причем разность центральных частот линий излучения лазерных источников выбирается как компромисс между требованиями по минимизации нелинейных интермодуляционных искажений и отсутствием замираний из-за дисперсии групповых скоростей в оптическом волокне, а возникающие дополнительные поляризационно-зависимые шумы интенсивности имеют синфазный характер и могут быть подавлены балансным детектированием.
- В протяженной волоконно-оптической линии передачи аналоговых сигналов с удаленным модулятором предельные значения коэффициента передачи, коэффициента шума и динамического диапазона определяются предельной оптической мощностью узкополосного оптического излучения, доставляемой до модулятора, ограниченной пороговой мощностью вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюена.

- Амплитудный модулятор на основе волноводного направленного ответвителя имеет рабочую точку, соответствующую максимальному подавлению интермодуляционных членов третьего порядка, зависящую от амплитуды модулирующего сигнала, в которой обеспечивается линеаризация в субоктавном диапазоне частот.
- Излучение на длине волны 975 – 980 нм мощностью до 2 Вт при одновременной передаче к удаленному модулятору по одномодовому волокну вместе с излучением оптической несущей на длине волны 1530 – 1560 нм не ухудшает ключевые характеристики (коэффициент шума и динамический диапазон) передаваемого от удаленного модулятора сверхширокополосного аналогового сигнала.

Достоверность полученных результатов

Достоверность подтверждается соответствием результатов анализа литературных данных, теоретических расчетов и экспериментальных исследований, представленных в работе. Результаты, полученные при моделировании, соответствовали экспериментальным данным. Основные результаты исследований обсуждались на научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Практическая значимость работы:

- Экспериментально продемонстрированы методы доставки оптического излучения к удаленному анизотропному электрооптическому модулятору по оптическому волокну без сохранения поляризации.
- Разработаны методы стабилизации заданной рабочей точки удаленного модулятора, не требующие внешнего электрического питания.
- Продемонстрирована ВОЛ с удаленным модулятором с характеристиками близкими к фундаментальному пределу дробового шума.
- Экспериментально продемонстрирована линеаризация передачи СВЧ сигналов в субоктавном диапазоне частот с помощью выбора рабочей точки модулятора на основе направленного ответвителя.
- Экспериментально показана возможность передачи мощности по одномодовому оптическому волокну, позволяющая дистанционно запитать электронные схемы с потреблением до 500 мВт без снижения характеристик передачи ВОЛ СВЧ сигнала от удаленного модулятора.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что выявлены факторы, ограничивающие характеристики ВОЛ с удаленным модулятором и сделаны теоретические оценки достижимых параметров.

Проведен теоретический анализ использования в ВОЛ источника света на основе двух лазерных диодов с ортогональной поляризацией и сформулированы критерии выбора длин волн лазерных диодов.

Проведен теоретический анализ линеаризации передачи СВЧ сигнала с использованием модулятора на основе направленного ответвителя. Определены условия линеаризации и выявлена зависимость оптимальной рабочей точки модулятора от амплитуды сигнала.

Личный вклад диссертанта

Заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку теоретических моделей, методик экспериментальных исследований, проведение исследований, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и апробировались на следующих конференциях: Laser Optics 2014; Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2015); IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEEPolytech 2019, 2020); SPb Open 2015; International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (New2AN 2020).

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ. Из них 4 публикации в журналах из перечня ВАК, 7 публикаций в рецензируемых изданиях, входящих в базы Web of Science и/или Scopus.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков и 1 таблицу, список цитированной литературы представлен 113 наименованиями.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проводится обоснование актуальности темы работы, приведены цель и задачи диссертационного исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту и новизна полученных результатов.

В первой главе производится анализ существующих методов передачи аналоговых широкополосных сигналов по ВОЛ. Рассмотрены основные характеристики ВОЛ, а также нелинейные и поляризационные эффекты, возникающие при распространении сигнала по протяженным ВОЛ. Определены особенности ВОЛ с удаленным электрооптическим модулятором (ЭОМ), проанализированы существующие проблемы. Произведена постановка задач исследования. Сформулирована цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены поляризационные эффекты в ВОЛ с удаленным анизотропным ЭОМ.

Распространяясь по протяженной ВОЛ на основе волокна без сохранения поляризации линейно поляризованный свет испытывает преобразование поляризации, зависящее от внешних условий, что приводит к произвольному состоянию поляризации на противоположном конце линии, где расположен удаленный интегральный ЭОМ, являющийся поляризационно-зависимым устройством. Это обуславливает возникновение поляризационного фединга,

проявляющегося как изменение коэффициента передачи, замирания СВЧ сигнала и рост коэффициента шума [1].

Использование волокна с сохранением поляризации в случае протяженных линий с удаленным модулятором снижает характеристики передачи СВЧ сигналов, поскольку данный тип оптических волокон имеет значительно более высокие потери и более низкий порог вынужденного рассеяния Манделштама-Бриллюэна (ВРМБ).

Известный метод деполяризации лазерных источников, основанный на получении разности хода двух ортогональных поляризаций, превышающей длину когерентности лазера, использует отрезки двулучепреломляющего волокна с сохранением поляризации, длина которых определяется степенью когерентности лазерного излучения и может составлять несколько сотен метров для маломощных узкополосных лазерных диодов с распределенной обратной связью, что значительно удорожает и увеличивает габариты и потери такого деполяризатора.

Когерентное излучение в стандартном одномодовом волокне без сохранения поляризации меняет свое состояние поляризации при распространении, но сохраняет высокую степень поляризации на больших расстояниях.

Проведен анализ управления состоянием поляризации с использованием управляемых волновых пластинок с изменяющейся разницей собственных показателей преломления. Показано, что три управляемые волновые пластинки на одном конце стандартного одномодового волокна без сохранения поляризации длиной 1 км могут обеспечить стабильное непрерывное поддержание заданной линейной поляризации на другом конце. Экспериментально продемонстрирована работа такой системы с использованием активного контроллера поляризации на основе двулучепреломляющего волокна на пьезоэлектрических актуаторах. Разработанный на основе теоретического анализа алгоритм управления обеспечивал время реакции на внешнее воздействие порядка 1 секунды и точность поддержания максимального уровня выходной мощности 0,2%, без внесения дополнительных поляризационно-зависимых шумов [2].

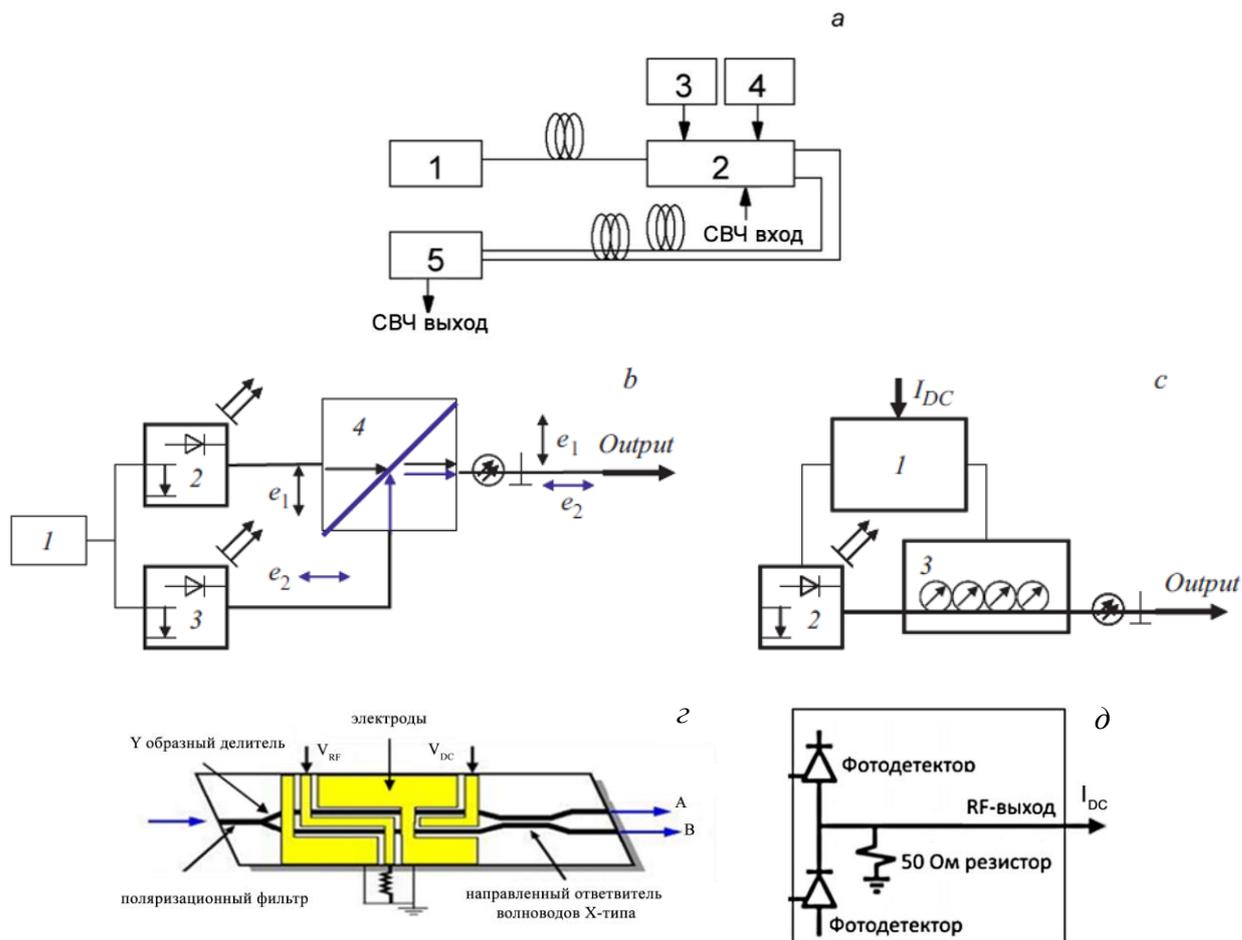


Рис. 1 (а) Структурная схема ВОЛ с удаленным модулятором Маха-Цендера с двойным выходом и балансным фотодетектором для подавления синфазных оптических шумов: 1 – Лазерный источник, 2 – удаленный ЭОМ, 3 – вход РЧ сигнала, 4 – система управления и стабилизации рабочей точки, 5 – балансный детектор. (б) – Квазидеполяризованный лазерный источник. 1 – драйвер управления лазерными диодами, 2, 3 – лазерные диоды, 4 – поляризационный сумматор/делитель; (в) Лазерный источник с активным контролем поляризации. 1 – электронная система управления, 2 – лазерный диод, 3 – управляемый контроллер поляризации. (г) Модулятор Маха-Цендера с двойным выходом (д) Балансный фотоприемник.

Был разработан и экспериментально продемонстрирован альтернативный метод создания и доставки квази-деполяризованного оптического излучения до внешнего модулятора с использованием двух независимых лазерных диодов с ортогональными линейными поляризациями (Рис. 1б). Проведен анализ влияния дисперсионных характеристик оптического волокна на передачу информационного сигнала, с учетом распространения двух спектральных линий от квази-деполяризованного источника оптического излучения [А.3]. Проведенный теоретический анализ показал, что существует предпочтительная разница частот между спектральными линиями излучения лазерных диодов, которая зависит от полосы частот передаваемых СВЧ сигналов и расстояния, на которое они передаются, позволяющая минимизировать количество спектральных компонент в полосе сигнала. Разность частот представляет собой компромисс между требованиями к

отсутствию нелинейных интермодуляционных членов (Рис. 2) и требованием минимальности фазового сдвига, вызванного дисперсией групповых скоростей в оптическом волокне.

В экспериментальных исследованиях использовались два телекоммуникационных лазерных диода с распределенной обратной связью с центральными частотами излучения, соответствующими соседним каналам ITU сетки длинноволнового мультиплексирования ($\Delta f = 100$ ГГц). Данная разность частот обеспечивает возможность передачи сигналов в полосе частот до 25 ГГц без попадания в полосу частот сигнала интермодуляционных искажений третьего порядка. Эксперименты показали, что для данной разности частот излучения не выявлено влияния дисперсии групповых скоростей в оптическом волокне и частотно зависимых характеристик отдельных компонентов, таких как электрооптический модулятор, делители оптической мощности и фотоприемники.

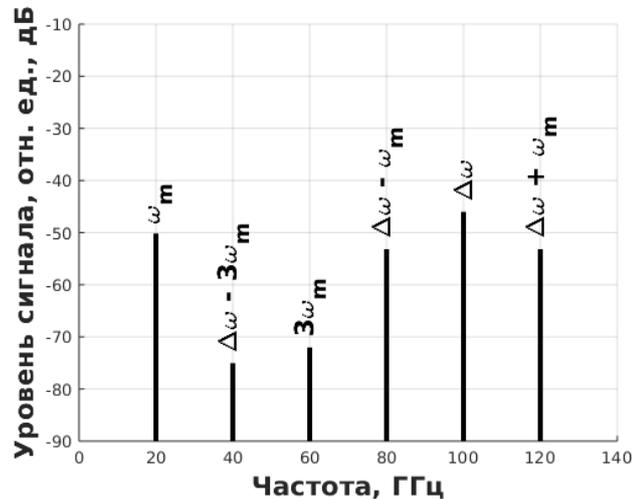


Рис. 2 Рассчитанный спектр сигнала амплитудной модуляции после квадратичного детектирования на фотоприемнике при частоте модулирующего СВЧ сигнала $\omega_m = 20$ ГГц. Используются два лазерных диода с разностью частот излучения $\Delta\omega = 100$ ГГц и модулятор Маха-Цендера ($V\pi = 5V$)

Обнаружен эффект увеличения спектральной плотности оптического шума при попадании ортогональных компонент поляризации квази-деполяризованного источника под углом 45 градусов к оптической оси подложки ЭОМ из ниобата лития (Рис. 3). Максимальный уровень спектральной плотности мощности шума превышал относительный шум интенсивности (RIN) одиночного лазера на 8 дБ для лазерных диодов с центральными частотами на соседних каналах ITU сетки.

Данный поляризационно-зависимый шум связан с интерференцией центральной линии излучения одного лазерного диода с остаточным излучением на подавленных боковых частотных составляющих другого лазерного диода, является синфазным и эффективно подавляется при балансном детектировании.

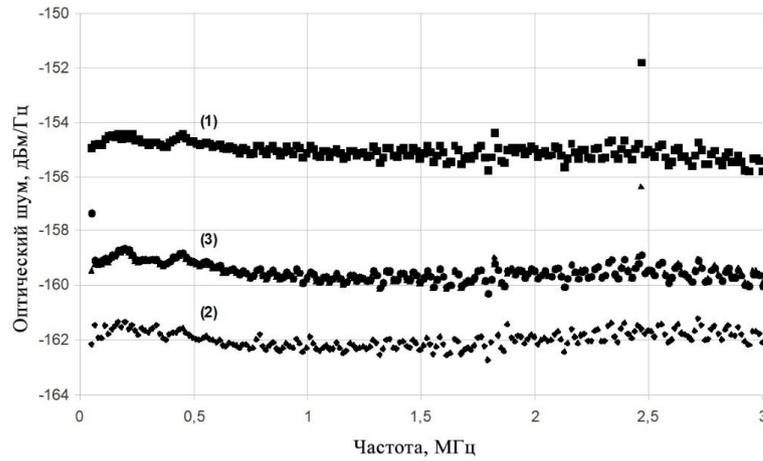


Рис. 3. Частотная зависимость плотности мощности шумов квазидеполаризованного оптического источника, 1 – вариант ориентации поляризационных компонентов под углом 45° к поверхности и оптической оси кристаллической подложки ЭОМ на основе ниобата лития; (2) – ось кристаллической подложки коллинеарна с одной из поляризационных компонентов; (3) – подавление поляризационно зависимого шума при использовании балансного детектирования.

В главе три представлены результаты исследований факторов, ограничивающих оптическую мощность в ВОЛ с удаленным модулятором. Проведен теоретический анализ, который показал, что в протяженной ВОЛ передачи аналоговых сигналов с удаленным модулятором предельные значения коэффициента передачи, коэффициента шума и динамического диапазона определяются предельной оптической мощностью узкополосного оптического излучения, доставляемой до модулятора.

Проанализировано влияние нелинейных эффектов при передаче аналогового информационного сигнала, а также при доставке оптической несущей к удаленному модулятору [А.4]. Выявлено, что главным ограничивающим фактором является ВРМБ (Рис. 4), а максимальная оптическая мощность на входе удаленного модулятора определяется порогом ВРМБ, описываемым следующим выражением [3]:

$$P_{\text{ВРМБ}} \approx \frac{21A_{\text{эфф}}}{g_{\text{В}}(f_{\text{В}}) \cdot L_{\text{эфф}}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь оптического волокна, $g_{\text{ВРМБ}}$ – максимальный бриллюэновский коэффициент усиления на центральной бриллюэновской частоте $f_{\text{ВРМБ}}$ и $L_{\text{эфф}}$ – эффективная длина оптического волокна. Эффективная площадь выражается через диаметр модового поля (MFD) – параметр волокна, указываемый в спецификации производителя.

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\pi(MFD)^2}{4} \quad (2)$$

Эффективная длина оптического волокна соотносится с физической длиной L как

$$L_{\text{эфф}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (3)$$

Для стандартного оптического волокна (SMF–28) на длине волны 1550 нм $MFD \approx 10,4$ мкм, соответственно $A_{эфф} \approx 85$ мкм², $g_{ВРМБ} \gg 3 \cdot 10^{-11}$ м/Вт, коэффициент затухания лазерного излучения $\alpha \approx 4,6 \cdot 10^{-5}$ м⁻¹.

В экспериментах с использованием ВОЛ длиной 1 км на основе волокна SMF–28, максимальная мощность каждой спектральной составляющей квазидеполяризованного лазерного источника на входе модулятора составляет около 80 мВт, что согласуется с теоретическими оценками на основе (1) – (3).

Выявлено, что поскольку оптическое волокно с сохранением поляризации имеет более низкий порог ВРМБ [4], по сравнению со стандартным одномодовым волокном без сохранения поляризации, использование волокна с сохранением поляризации для доставки излучения к удаленному модулятору снижает характеристики системы и нецелесообразно к использованию.

При превышении порога ВРМБ кроме ограничения мощности наблюдался рост шумов в интенсивности прошедшего излучения, который, по всей вероятности, был связан с попаданием рассеянного излучения в лазерный источник, поскольку данные шумы подавлялись при использовании оптического изолятора или циркулятора.

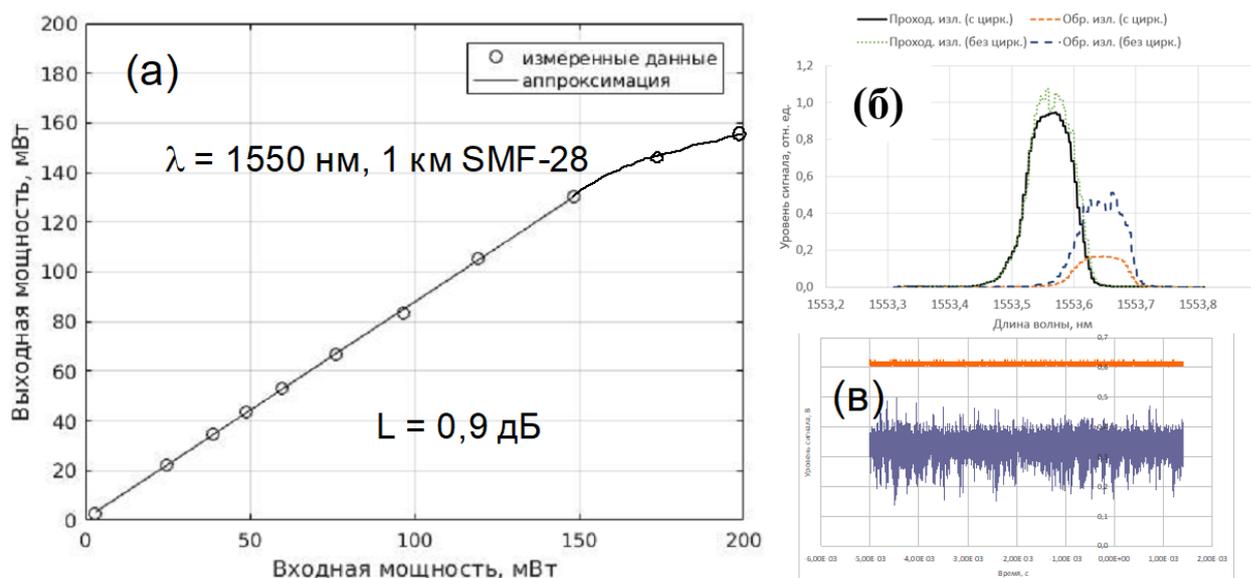


Рис. 4. Влияние ВРМБ на передачу сигналов по ВОЛ с удаленным модулятором: (а) зависимость мощности на входе удаленного модулятора от мощности квазидеполяризованного лазерного источника после прохождения 1 км одномодового оптического волокна SMF–28, (б) спектр прошедшего и отраженного излучения, сдвиг 11 ГГц соответствует частотному сдвигу ВРМБ, (в) рост шумов интенсивности при попадании отраженного излучения в лазерный источник.

Глава четыре посвящена теоретическому анализу предельных характеристик передачи аналоговых СВЧ сигналов по ВОЛ с удаленным модулятором Маха-Цендера и экспериментальной демонстрации возможности приближения коэффициента шума ВОЛ к теоретическим пределам. Фундаментальным ограничивающим фактором является квантовый предел дробового шума [5]

$$N_{sh}(f) = 2qI_{DC}R|H(f)|^2 \quad (4)$$

где q – заряд электрона, I_{DC} – постоянная составляющая тока фотоприемника, пропорциональная оптической мощности, R – сопротивление нагрузки (обычно 50 Ом), спектральная передаточная характеристика фотоприемника $H(f)$. В качестве основного параметра ВОЛ был выбран динамический диапазон свободный от нелинейных искажений $SFDR_3$, максимальное значение которого в пределе по дробовому шуму может быть оценено как

$$SFDR_3 = \left(\frac{2I_{DC}}{qB}\right)^{2/3} \quad (5)$$

$$SFDR_3[\text{dB} \cdot \text{Hz}^{-2/3}] = 107,3 + \frac{20}{3} \log(I_{DC}[\text{mA}])$$

где для выражения в децибельной форме частотная полоса выбрана равной $B = 1$ Гц. Данный комплексный параметр ограничен снизу уровнем шумов (N), а сверху нелинейными искажениями модулятора Маха-Цендера, имеющего косинусоидальную передаточную характеристику.

Для экспериментальной демонстрации возможности уменьшения шумов в ВОЛ с удаленным модулятором до уровня дробового шума при использовании разработанных методов доставки когерентного оптического излучения на удаленный модулятор Маха-Цендера с двойным выходом и подавления шумов лазерного источника при помощи балансного детектирования был решен целый ряд научных задач [А.11]. Был разработан и изготовлен балансный фотодетектор, а также методы выравнивания оптических путей при использовании балансного детектирования и методы тестирования эффективности подавления шумов при балансном детектировании, которая составила более 14 дБ в полосе частот 3 ГГц.

Были продемонстрированы высокие характеристики передачи аналоговых СВЧ сигналов (Рис. 5): коэффициент усиления около -6 дБ, коэффициент шума ниже 25 дБ и динамический диапазон свободный от нелинейных искажений – 117 дБ/Гц^{2/3}, определяемые максимальной мощностью оптического излучения, доставляемого до удаленного модулятора, которая была ограничена порогом ВРМБ.

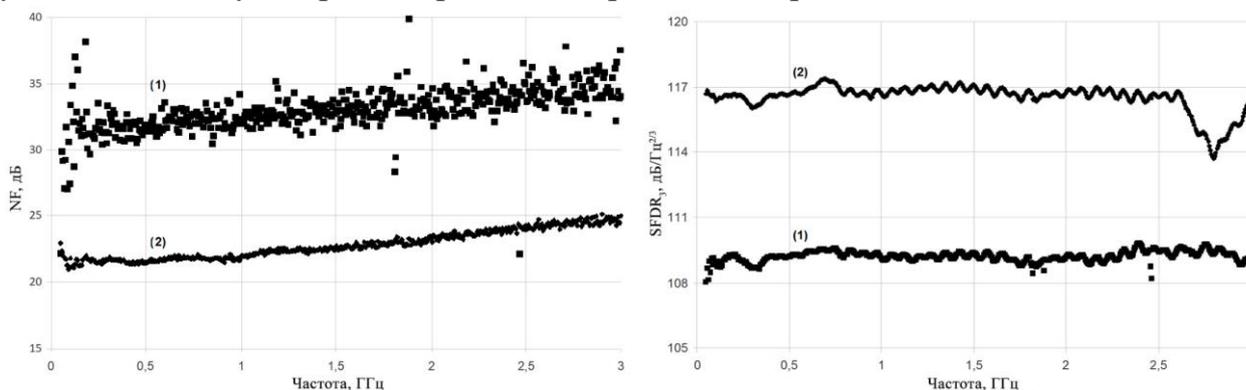


Рис. 5. Зависимость коэффициента шума (а) и динамического диапазона, свободного от нелинейных искажений (б) ВОЛ с удаленным модулятором от частоты при прямом (1) и балансном детектировании (2).

В главе пять рассмотрены эффекты влияния положения рабочей точки ЭОМ на основные характеристики ВОЛ.

Для ЭОМ Маха-Цендера изучено влияние положения рабочей точки на коэффициент передачи и нелинейные искажения в ВОЛ [А.1, А.8, А.9]. Продемонстрирована возможность увеличения коэффициента передачи до 5 дБ (относительно квадратурной рабочей точки) за счет смещения рабочей точки в сторону минимума пропускания в системе с эрбиевым усилителем мощности в режиме, близком к насыщению, сопровождаемая незначительным (0.5 %) ростом коэффициента нелинейных искажений.

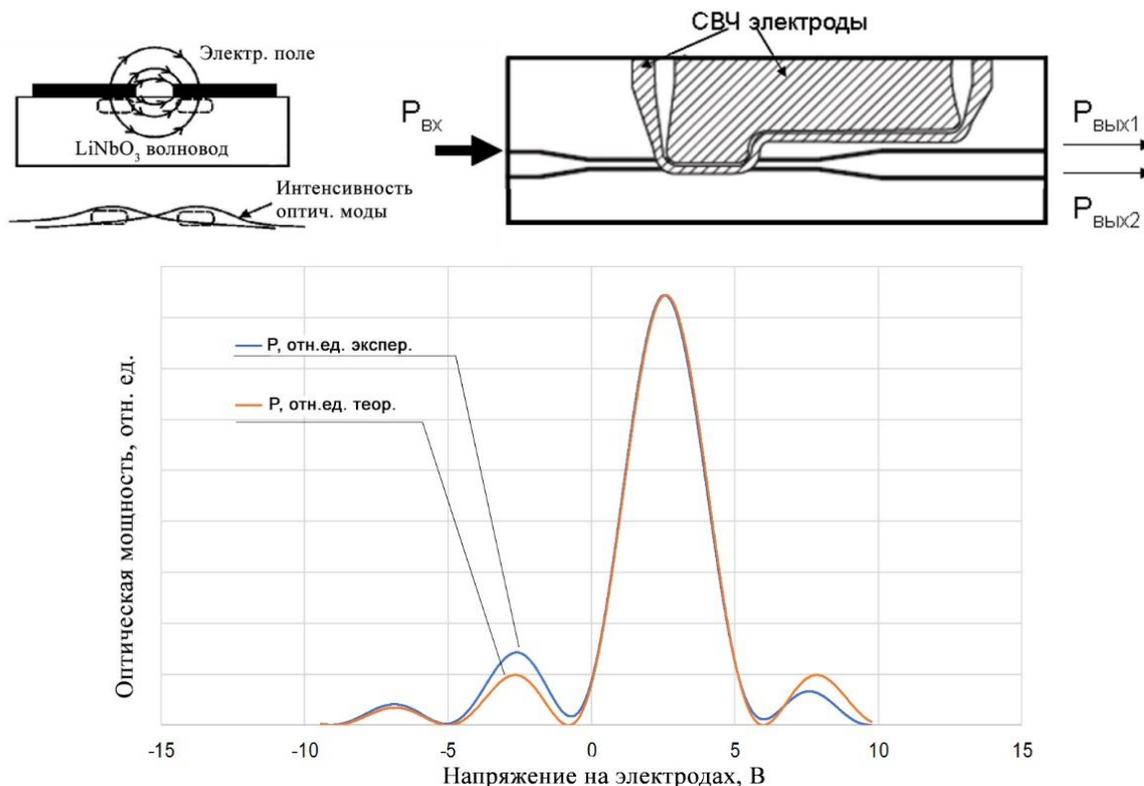


Рис. 6 Конфигурация ЭОМНО и его передаточная характеристика.

Рассмотрена конфигурация ЭОМ, основанная на оптическом направленном ответвителе (НО) или X – ответвителе. Показано, что сложный вид [6] передаточной функции (Рис. 6) позволяет использовать ЭОМ на НО как линейризованный модулятор и подавлять интермодуляционные искажения третьего порядка [А.10]. Теоретически показано, что предложенная схема и конфигурация электрооптического модулятора позволяет достичь динамического диапазона свободного от нелинейных искажений третьего порядка на уровне 120 дБ/Гц^{2/3}. Экспериментально продемонстрировано, что при напряжении смещения близком к рабочей точке, соответствующей подавлению третьей гармоники, наблюдается минимум интермодуляционных искажений третьего порядка, в котором отношение между основной спектральной составляющей и интермодуляционными составляющими падает почти на 20 дБ. Оценка точки пересечения третьего порядка ОПЗ в оптимальной рабочей точке превышает 12 дБм.

Выявлено, что рабочая точка, соответствующая подавлению интермодуляционных членов третьего порядка, зависит от амплитуды модулирующего сигнала (Рис. 7).

Результаты исследований могут быть использованы для построения алгоритмов стабилизации рабочей точки, позволяющих значительно улучшить характеристики ВОЛ с удаленными ЭОМ.

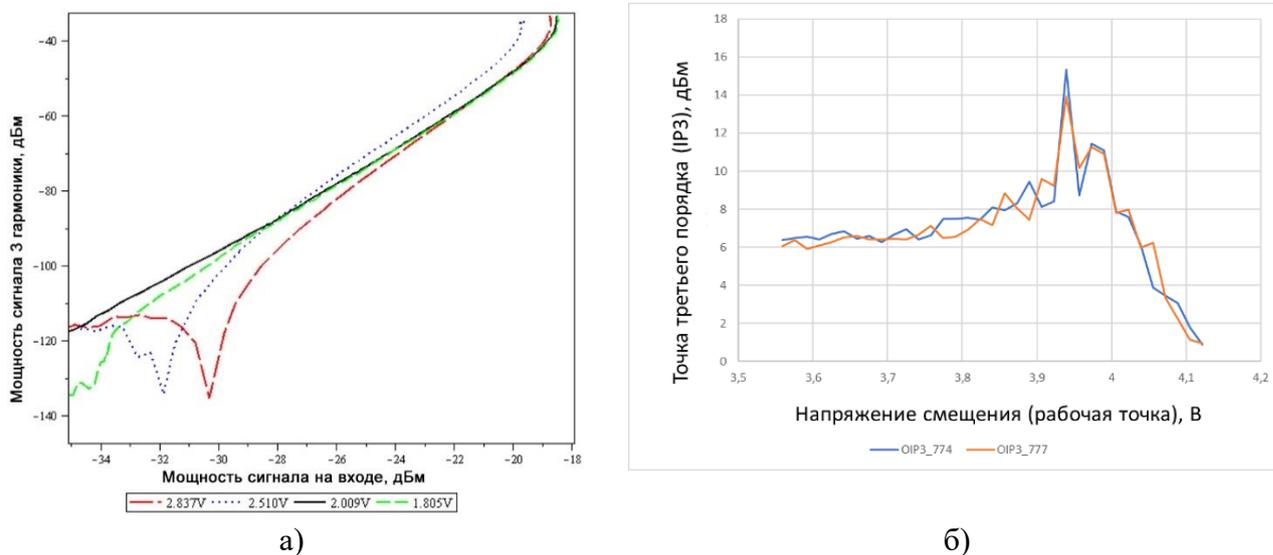


Рис.7. (а) Зависимости роста мощности третьей гармоники от мощности модулирующего сигнала для разных рабочих точек модулятора. (б) Зависимость точки пересечения интермодуляционных искажений третьего порядка от рабочей точки модулятора ЭОМНО (частота генераторов 775 и 776 МГц, мощность 7 дБм).

В последней **шестой** главе выполнен анализ и проведена экспериментальная демонстрация использования оптического волокна для одновременной доставки к удаленному модулятору несущей для передачи СВЧ сигналов и энергии для питания электронных схем [А.5].

Высокое сопротивление и низкий ток на низкочастотных электродах смещения электрооптического модулятора позволил разработать схему стабилизации рабочей точки с низким энергопотреблением и запитать ее от не используемой поляризационной компоненты квази-деполяризованного источника.

Продемонстрирована возможность совместной передачи в стандартном одномодовом волокне к удаленному модулятору оптической несущей для передачи информационного сигнала в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1530 – 1580 нм) и мощного излучения на длинах волн 970 – 980 нм для питания электроники с высоким потреблением, например, малошумящего усилителя СВЧ сигналов. Показано, что совместная передача к удаленному модулятору по одномодовому волокну оптического излучения мощностью до 2 Вт на длине волны 976 нм и оптической несущей на длине волны 1550 нм не ухудшает ключевые характеристики (коэффициент шума и динамический диапазон) передаваемого модулятором сверхширокополосного аналогового сигнала.

В заключении представлены основные результаты работы.

Проведен анализ эффектов распространения, таких как ВРМБ и дисперсии групповых скоростей, на характеристики ВОЛ передачи аналоговых СВЧ сигналов, использующей удаленный модулятор.

Выявлено, что доставка излучения оптической несущей к удаленному на большое расстояние модулятору с использованием волокна с сохранением поляризации затрудняется низким порогом ВРМБ для такого типа оптических волокон, ограничивающим коэффициент передачи и вызывающим дополнительные шумы.

Для доставки излучения оптической несущей к анизотропному, удаленному на большое расстояние модулятору по стандартному одномодовому волокну без сохранения поляризации были разработаны и экспериментально продемонстрированы методы компенсации поляризационного фединга.

Показано, что два независимых лазерных источника с ортогональными состояниями поляризации на входе могут использоваться как квази-деполяризованный источник, причем разность частот между линиями излучения лазерных источников выбирается на основе компромисса отсутствия интермодуляционных нелинейных искажений и замираний, вызванных дисперсией групповых скоростей.

Выявлено, что квази-деполяризованный источник имеет синфазный поляризационно-зависимый шум, который может быть эффективно подавлен при использовании балансного детектирования.

Разработаны оригинальные методы управления рабочей точкой удаленного ЭОМ. Разработана и изготовлена система управления рабочей точкой ЭОМ Маха – Цендера с двойным выходом, которая имеет высокую точность и низкое энергопотребление (менее 5 мВт), что позволило запитать ее от не используемой поляризационной компоненты предложенного квази-деполяризованного источника. Необходимая мощность оптического излучения на длине волны 1550 нм составляет 15 мВт. Используя разработанную систему стабилизации рабочей точки в экспериментах по подавлению шума и синфазных помех, была доказана её высокая точность, устойчивость к шумам на входе и низкий уровень дополнительных шумов и искажений в выходном сигнале модулятора.

Исследованы особенности передачи мощных оптических сигналов через оптические волокна и определены возможности передачи энергии по одномодовому волокну. Показана возможность передачи питания для удаленной электроники с потреблением до 300 мВт по одному оптическому волокну с оптической несущей, использующейся для передачи аналогового СВЧ сигнала, без ухудшения шумовых характеристик.

Для расширения динамического диапазона было использовано два типа специальных интегральных ЭОМ из ниобата лития: модулятор Маха-Цендера с двойным выходом и управляемый направленный ответвитель. Продемонстрировано подавление синфазной помехи и шумов интенсивности лазерного источника более

чем на 14 дБ в полосе частот 3 ГГц с использованием модулятора с двойным выходом и балансного детектирования. Продемонстрирована возможность подавления интермодуляционных искажений 3 порядка на 20 дБ путем задания требуемой рабочей точки модулятора на основе направленного ответвителя.

Выявлено, что рабочая точка модулятора на основе направленного ответвителя, соответствующая максимальному подавлению интермодуляционных искажений третьего порядка, зависит от амплитуды модулирующего сигнала.

Экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность создания волоконно-оптических линий с удаленным модулятором с характеристиками близкими к пределу дробового шума: коэффициентом шума менее 25 дБ и динамическим диапазоном свободным от нелинейных искажений третьего порядка более 117 дБ/Гц^{2/3}.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню ВАК:

- [A1] Петров, А.Н. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконнооптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора / А.В. Тронеv, В.В. Лебедев, И.В. Ильичев, Е.Н. Величко, А.В. Шамрай // Журнал технической физики. — 2015. — Т. 85. — № 5. — С. 131-136.
- [A2] Петров, А.Н. Определение координат источников радиочастотного излучения с использованием антенных систем с увеличенной базой между точками приёма / В.В. Лебедев, А.В. Шамрай // Радиотехника. — 2019. — Т. 83. — № 12. — С. 80-88.
- [A3] Лебедев, В.В. Сопоставление методов компенсации поляризационного фединга волоконно-оптических линий передачи аналоговых широкополосных сигналов по вносимым шумам и достижимому динамическому диапазону / А.Н. Петров, М.В. Парфенов, Е.Н. Величко, А.В. Шамрай // Журнал технической физики. — 2021. — Т. 91. — № 11. — С. 1738-1743.
- [A4] Петров, А.Н. Анализ влияния характеристик волоконно-оптических линий, соединяющих распределенные антенные устройства, на точность оценки параметров сигналов / С.В. Розов, А.В. Шамрай // Радиотехника. — 2020. — Т. 84. — № 12. — С. 62-71.

В журналах индексируемых в базах данных Scopus/WoS

- [A5] Petrov, A. System for stabilizing an operating point of a remote electro-optical modulator powered by optical fiber / A. Tronev, P. Agruzov, A. Shamrai, V. Sorotsky // Electronics. — 2020. — V. 9. — N. 11. — P. 1861-1-10.
- [A6] Petrov, A. Broad-band fiber optic link with a stand-alone remote external modulator for antenna remoting and 5G wireless network applications / E. Velichko, V. Lebedev, I. Pichev, P. Agruzov, M. Parfenov, A. Varlamov, A. Shamrai // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham. — 2019. — P. 727-733.
- [A7] Petrov, A. Radiophotonics module to increase the distance of the remote antenna // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). — 2019. — P. 348-350.

- [A8] Petrov, A. Influence of external electrooptical modulator biasing on gain and nonlinear distortions in analog fiber-optic links / I. Ilichev, P. Agruzov, V. Lebedev, E. Velichko, A. Shamray // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2014. — V. 541. — P. 012047.
- [A9] Petrov, A. Gain optimization of fiber optical link with an external electrooptical modulator and erbium doped fiber amplifier / A. Shamray, I. Ilichev, P. Agruzov, E. Velichko // *2014 International Conference Laser Optics*. — 2014. — P. 1.
- [A10] Petrov, A. Lithium niobate direction coupler modulator for linearization of analog optical signal transmission / V. Lebedev, P. Agruzov, I. Ilichev, A. Shamrai, L. Liokumovich, T. Kudryashova, V. Sorotsky // *2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. — 2020. — P. 80-84.
- [A11] Petrov, A., Dynamic range improvement of broad-band analog fiber optic links with special lithium niobate integrated optical modulators / M. Parfenov, V. Lebedev, I. Ilichev, P. Agruzov, A. Tronev, A. Shamrai // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. — 2020. — P. 357-363.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ming N. et al. Investigation of polarization-induced fading in fiber-optic interferometers with polarizer-based polarization diversity receivers // *Applied optics*. — 2006. — Vol. 45. — N. 11. — P. 2387-2390.
2. Kersey A. D., Marrone M. J., Dandridge A. Analysis of input-polarization-induced phase noise in interferometric fiber-optic sensors and its reduction using polarization scrambling // *Journal of lightwave technology*. — 1990. — Vol. 8. — N. 6. — P. 838-845.
3. Agrawal G., *Nonlinear Fiber Optics*, 5th edition, Academic Press (2013)
4. Williams D., Bao X., Chen L. Effects of polarization on stimulated Brillouin scattering in a birefringent optical fiber // *Photonics Research*. — 2014. — Vol. 2. — N 5. — P. 126-137.
5. Urick V. J., Williams K. J., McKinney J. D. *Fundamentals of microwave photonics*. — John Wiley & Sons, 2015
6. C. H. Cox III, *Analog optical link: Theory and practice*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2004.