

На правах рукописи



Степанов Иван Васильевич

**СНИЖЕНИЕ ШАГА ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО
АВТОГЕНЕРАТОРА С ЭЛЕМЕНТАМИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКИ**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2026

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникационных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» **Султанов Альберт Ханович**

Официальные оппоненты:

Драчев Владимир Прокопьевич, доктор физико-математических наук, директор центра инженерной физики автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

Дашков Михаил Викторович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой линий связи и измерений в технике связи федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 26 ноября 2026 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.479.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



А.М. Вульфин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для телекоммуникационных и радиолокационных систем требуются источники сверхвысокочастотных колебаний (СВЧ), обладающие низким уровнем фазового шума и возможностью перестройки частоты генерируемого колебания в широком диапазоне (порядка десятков гигагерц).

Оптоэлектронные осцилляторы (ОЭО), также известные как оптоэлектронные автогенераторы, способны генерировать СВЧ-колебания с низким уровнем фазового шума в широкой полосе частот, однако они обладают высоким шагом перестройки частоты генерируемого колебания. При этом уже продемонстрировано применение ОЭО в радарных и телекоммуникационных системах, а также в устройствах обработки сигналов. В свою очередь, традиционные генераторы СВЧ-колебаний на основе электронных компонентов зачастую используют умножение частоты низкочастотных сигналов, сгенерированных с использованием кварцевых резонаторов, либо генераторов поверхностных акустических волн. Однако в этом случае, из-за высокого коэффициента умножения частоты возникает проблема высокого уровня фазового шума сигнала на выходе. Другие варианты электронных генераторов СВЧ-колебаний, обладающих низким уровнем фазового шума, построены на основе арсенида галлия и обладают ограниченным диапазоном перестройки частоты. В результате, по сравнению с классическими СВЧ-генераторами ОЭО обеспечивают более низкий уровень фазового шума и высокую спектральную чистоту сигнала, также они обеспечивают значительно больший диапазон перестройки частоты (порядка нескольких десятков гигагерц).

Несмотря на наличие явных преимуществ ОЭО перед традиционными генераторами СВЧ-колебаний, последние обладают значительно меньшим шагом перестройки частоты (до 0,001 Гц), тогда как для ОЭО его значение составляет порядка десятков килогерц при значительном уменьшении диапазона перестройки частоты.

Степень разработанности темы. В ходе диссертационного исследования были использованы труды отечественных и зарубежных учёных. Среди отечественных учёных можно выделить работы Устинова А.Б., Таценко И.Ю., Никитина А.А. и Витько В.В., в которых приведено описание процесса автогенерации в оптоэлектронных генераторах и проведено исследование методов снижения джиттера. Среди зарубежных учёных можно выделить работы Яо С., Малеки Л., Хао Т., Танга Дж., Доменека Д., Жанга В., Яо Дж., Девгана П.С., Диля Дж., Прабху А. и др.

Стоит отметить, что существующие решения с низким значением шага перестройки частоты ОЭО (ниже 10 кГц) обеспечивают узкий диапазон её перестройки (до 1 ГГц). При этом современные стандарты сотовой связи предполагают применение несущих частот до 100 ГГц, соответственно, для будущих систем связи необходимы генераторы, обеспечивающие широкую полосу перестройки частоты.

Дальнейшее развитие оптоэлектронных генераторов связано с интегральной реализацией оптической части, что позволит снизить их габариты и энергопотребление, а также повысить надёжность. Помимо этого, интегральная реализация позволит расширить области применения ОЭО.

Таким образом, задача снижения шага перестройки частоты оптоэлектронных осцилляторов является актуальной, как с практической, так и с научной точки зрения.

С учётом вышеперечисленного, можно сформулировать **научную задачу**, которая заключается в снижении шага перестройки частоты ОЭО при сохранении широкого диапазона её перестройки.

Объект исследования. Процесс генерации сверхвысокочастотных колебаний методами радиофотоники.

Предмет исследования. Методы перестройки частоты оптоэлектронного осциллятора.

Цель исследования. Снижение шага перестройки частоты оптоэлектронных осцилляторов при сохранении широкого диапазона перестройки частоты.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель процесса перестройки частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора, учитывающую применение элементов интегральной фотоники в оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора.

2. Разработать метод перестройки частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора с использованием управления фазовым набегом в оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора без срыва процесса генерации при перестройке частоты.

3. Разработать методику структурной оптимизации конструкции оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора, учитывающую различные физические эффекты для изменения фазы оптического сигнала в интегральном оптическом волноводе.

4. Разработать структуру синтезатора сверхвысокочастотных колебаний, позволяющую упростить блок измерения и перестройки частоты оптоэлектронного осциллятора.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель процесса перестройки частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора, *основанного* на контроле фазового набег в его оптической части петли обратной связи, *отличающаяся* учётом применения элементов интегральной фотоники оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора, и *позволяющая* определить частоту сверхвысокочастотного колебания на выходе оптоэлектронного осциллятора и диапазон её перестройки, а также построить настроечную характеристику возбудителя сверхвысокочастотных колебаний.

2. Разработан метод перестройки частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора, *основанный* на изменении фазового набег в оптической части петли

обратной связи, *отличающийся* применением интегральной оптической линии задержки в ней, и *позволяющий* обеспечить перестройку частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора без срыва генерации.

3. Разработана методика структурной оптимизации конструкции оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора, *отличающаяся* учётом различных физических эффектов для изменения фазы оптического сигнала в интегральном оптическом волноводе, *позволяющая* снизить шаг перестройки частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора.

4. Предложена структура синтезатора сверхвысокочастотных колебаний, *основанная* на использовании оптоэлектронного осциллятора с элементами интегральной фотоники в его оптической части петли обратной связи, *отличающаяся* применением блока понижения частоты, *позволяющая* упростить структуру блока измерения частоты и её перестройки.

Теоретическая и практическая значимость. Предложены метод перестройки частоты ОЭО без срыва генерации, структурное решение, обеспечивающее снижение шага перестройки частоты ОЭО, а также разработана методика структурной оптимизации конструкции оптической части петли обратной связи ОЭО. С практической точки зрения снижение шага перестройки частоты ОЭО и упрощение блока измерения и управления его частотой позволит применять его в большем количестве телекоммуникационных устройств.

Методология и методы исследования. Результаты работы были получены с использованием математического аппарата теории связи, в частности были рассмотрены передаточные функции отдельных компонентов с учётом выполнения критерия Баркгаузена (условия баланса амплитуд и фаз). Помимо этого, были использованы методы численного моделирования, а именно: методы конечных разностей во временной области, конечной разности собственных мод, конечных элементов и аппарат матриц рассеяния.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса перестройки частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора, учитывающая применение элементов интегральной фотоники в оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора.

2. Метод перестройки частоты на выходе оптоэлектронного осциллятора с использованием управления фазовым набегом в оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора без срыва процесса генерации при перестройке частоты.

3. Методика структурной оптимизации конструкции оптической части петли обратной связи оптоэлектронного осциллятора, учитывающая различные физические эффекты для изменения фазы оптического сигнала в интегральном оптическом волноводе.

4. Структура синтезатора сверхвысокочастотных колебаний, позволяющая упростить блок измерения и перестройки частоты оптоэлектронного осциллятора.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации. Использованы известные теоретические положения, соответствие используемых

математических моделей реальным физическим процессам и численные методами, апробированные в других областях.

Апробация результатов. Основные теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: 1. Компьютерное проектирование в электронике (EDA Conference 2024), Минск, 2024. 2. XXII Международная научно-техническая конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях», Самара, 2024. 3. IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), Новосибирск, 2024. 4. XXIII Международная научно-техническая конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях», Уфа, 2025.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 4 в научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus (2 из них уровня Q1 и Q2), 5 публикаций в других изданиях. Получены 2 свидетельства на результат интеллектуальной деятельности: 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности. Результаты диссертационной работы соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.2.15. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: п. 1. Разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций. п. 2. Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций. п. 20. Разработка методов совмещения телекоммуникационных, измерительных и управляющих систем.

Личный вклад. Все основные результаты диссертационной работы – математические модели, структурные решения и численные модели, разработаны автором лично. Постановка цели и задач исследования осуществлялись автором самостоятельно. Публикации по теме диссертации были выполнены в соавторстве, однако основной материал был сформулирован автором диссертационной работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и 3 приложений. Общий объем составляет 99 страниц, в том числе основной текст 80 страниц, содержащий 46 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает в себя 134 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель работы, решаемые задачи и научная новизна, определяется теоретическая и практическая значимости выносимых на защиту результатов.

В первой главе приведён анализ существующих архитектур ОЭО и способов перестройки их частоты. Выделены основные компоненты,

обеспечивающие возможность перестройки частоты – электрический полосовой фильтр, лазер и микроволновый фотонный фильтр (МФФ). Выявлено, что электрический полосовой фильтр позволяет обеспечить малый шаг перестройки частоты ОЭО (до 10 Гц) в малом диапазоне частот (менее 1 ГГц), при этом лазер и МФФ обеспечивают широкий диапазон перестройки частоты (более 10 ГГц), однако минимальный шаг перестройки от 10 МГц. На основе представленного анализа были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе разработана математическая модель процесса перестройки частоты ОЭО с интегральной оптической частью (рисунок 1). Также рассмотрены возможные варианты реализации перестраиваемой линии задержки (ПЛЗ). При разработке математической модели были приняты следующие допущения:

- изменение АЧХ ПЛЗ не нарушает условие баланса амплитуд – снижение коэффициента передачи ПЛЗ компенсируется усилителем;
- фазочастотная характеристика всех компонентов ОЭО может быть представлена в виде линейных участков;
- ширина полосы оптического сигнала не влияет на вносимую временную задержку ПЛЗ, то есть оптический сигнал узкополосный.

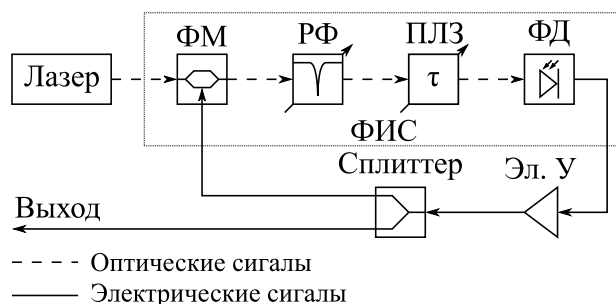


Рисунок 1 – Архитектура рассматриваемого ОЭО: ФМ – фазовый модулятор; РФ – режекторный фильтр; ПЛЗ – перестраиваемая линия задержки; ФД – фотодетектор; ФИС – фотонная интегральная схема; Эл. У – электронный усилитель

С учётом принятых допущений при наличии управления фазовым набегом в петле обратной связи ОЭО, то есть при использовании оптической ПЛЗ при отсутствии управляющего напряжения на её входах, условие баланса фаз будет выглядеть следующим образом:

$$\omega_k \cdot (\tau_0 + \tau_D) + \phi(\omega) + \phi_0 = 2k\pi,$$

где ω_k – угловая частота генерируемого колебания, τ_0 – значение временной задержки в петле обратной связи ОЭО без ПЛЗ, τ_D – временная задержка, вносимая ПЛЗ.

При отсутствии управляющего сигнала ПЛЗ также вносит временную задержку, поэтому общая временная задержка петли обратной связи без управляющих сигналов на ПЛЗ может быть обозначена как: $T_D = \tau_0 + \tau_D$. С учётом малых длин волноводов ФИС, соединяющих отдельные её компоненты можно пренебречь величиной $\phi(\omega)$. В свою очередь, значение ϕ_0 может быть принято равным нулю при работе с фазовым модулятором, так как он не требует постоянного напряжения смещения. Тогда при малом изменении времени

задержки в петле обратной связи $\Delta\tau$, должно произойти некое изменение частоты генерируемого колебания $\Delta\omega$:

$$(\omega_k + \Delta\omega) \cdot (T_D + \Delta\tau) = 2k\pi.$$

Так как $\omega = 2\pi f$ в обеих частях уравнения есть множитель 2π , который можно сократить:

$$(f_k + \Delta f) \cdot (T_D + \Delta\tau) = k.$$

После операции умножения и группировки слагаемых можно записать уравнение выше в следующем виде:

$$\Delta f \cdot (T_D + \Delta\tau) = k - f_k \cdot (T_D + \Delta\tau).$$

Тогда изменение частоты генерируемого колебания:

$$\Delta f = \frac{k}{T_D + \Delta\tau} - f_k.$$

С учётом того, что частота генерируемого колебания на выходе ОЭО обратно пропорциональна значению временной задержки контура ($f_k = k / T_D$):

$$\Delta f = \frac{k}{T_D + \Delta\tau} - \frac{k}{T_D} = \frac{kT_D - kT_D - k\Delta\tau}{T_D \cdot (T_D + \Delta\tau)} = -\frac{k}{T_D \cdot (T_D + \Delta\tau)} \Delta\tau.$$

Соответственно, настроечная характеристика ОЭО по изменению времени задержки будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\Delta f}{\Delta\tau} = -k \left(1 + \frac{\Delta\tau}{T_D} \right) = -k \left(1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_0 + \tau_D} \right).$$

С учётом принятых ранее допущений можно сделать вывод о том, что при изменении частоты ОЭО за счёт изменения фазового набег в петле его обратной связи не происходит перезапуск процесса генерации колебаний ввиду наличия энергии в контуре ОЭО, то есть условие баланса амплитуд не нарушается, а условие баланса фаз начинает выполняться на другой частоте. Соответственно, при изменении фазового набег происходит процесс изменения частоты генерируемого колебания на выходе ОЭО без срыва генерации.

В результате, метод перестройки частоты ОЭО, обеспечивающий её изменение без срыва процесса генерации, заключается в применении устройств для управления фазовым набегом в петле обратной связи ОЭО с возможностью непрерывного изменения фазового набег. Такое изменение фазового набег способны обеспечить отдельные варианты исполнения интегральных оптических линий задержки.

Также во второй главе рассмотрены варианты реализации ПЛЗ. Для интегральных оптических ПЛЗ на основе интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ), микрокольцевого резонатора (МКР) и волноводных брэгговских решёток продемонстрирована возможность непрерывной перестройки вносимой временной задержки. Это, в перспективе, позволяет обеспечить непрерывный шаг перестройки частоты ОЭО. Наиболее технологичными вариантами интегральных оптических ПЛЗ с точки зрения реализации являются ИМЦ и МКР.

В ПЛЗ на основе ИМЦ (рисунок 2) изменение величины вносимой временной задержки происходит за счёт изменения фазы в волноводах

перестраиваемых направленных ответвителей. Оно приводит к изменению соотношения коэффициентов передачи K , в случае подачи одинакового управляющего воздействия на оба направленных ответвителя величина временной задержки, вносимой ПЛЗ, определяется как:

$$\tau = \frac{K(K - \cos \Delta\varphi + K \cos \Delta\varphi)}{2K^2 \cos \Delta\varphi - 2K \cos \Delta\varphi - 2K + 2K^2 + 1} T + \tau_0,$$

где τ_0 – минимально возможное значение вносимой временной задержки ПЛЗ, $\Delta\varphi$ – разность фаз оптических сигналов, проходящих в самом длинном и самом коротком волноводах ИМЦ, T – разность времени прохождения оптических сигналов в этих волноводах.

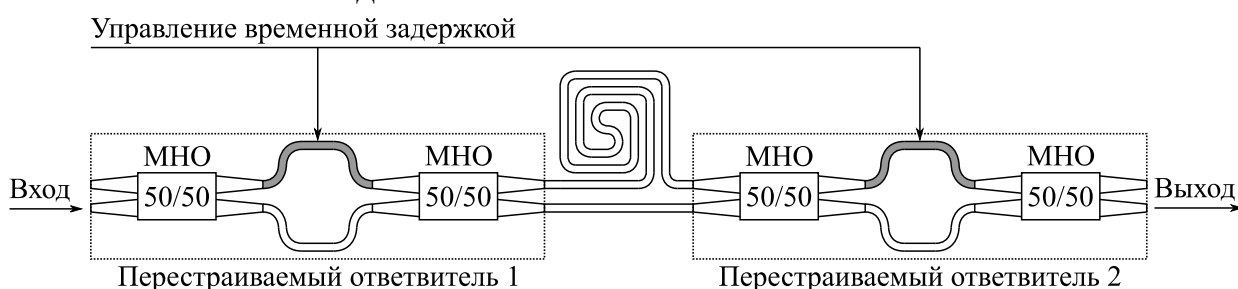


Рисунок 2 – ПЛЗ на основе ИМЦ: МНО – многомодовый направленный ответвитель

Значение разности фаз $\Delta\varphi$ может быть определено как:

$$\Delta\varphi(f_{\text{опт}}) = \frac{2\pi f_{\text{опт}} \Delta L}{c} + \phi,$$

где $f_{\text{опт}}$ – частота оптического сигнала, ΔL – разность длин волнопроводов небалансного ИМЦ, c – скорость света, ϕ – сдвиг фазы оптического сигнала в самом длинном волноводе.

Разность времени прохождения оптических сигналов определяется как:

$$T = \frac{n_g \Delta L}{c} = \frac{1}{FSR_{\text{ИМЦ}}},$$

где n_g – групповой показатель преломления волновода, $FSR_{\text{ИМЦ}}$ – разность частот между соседними максимумами амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) небалансного ИМЦ.

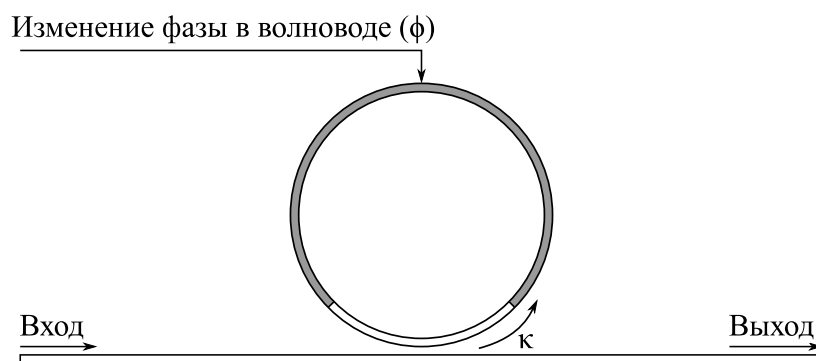


Рисунок 3 – ПЛЗ на основе МКР

В случае ПЛЗ на основе МКР (рисунок 3) величина вносимой временной задержки может быть описана как:

$$\tau(f_{\text{опт}}) = \frac{\kappa T_r}{2 - \kappa - 2\sqrt{1 - \kappa} \cos(2\pi f_{\text{опт}} T_r + \phi)},$$

где κ – коэффициент передачи из прямого волновода в кольцевой, ϕ – сдвиг фазы оптического сигнала в кольцевом волноводе, обусловленный управляющим воздействием. Величина T_r является временем прохождения оптического сигнала в кольцевом волноводе и определяется как:

$$T_r = \frac{2\pi R n_g}{c} = \frac{1}{FSR_{\text{МКР}}},$$

где R – радиус МКР, $FSR_{\text{МКР}}$ – разность частот между соседними минимумами АЧХ МКР.

В третьей главе представлены процесс и результаты численного моделирования отдельных компонентов фотонной интегральной схемы (ФИС) и ПЛЗ. Для моделирования были использованы методы конечных разностей собственных мод, разложения собственных мод, конечных элементов и аппарат матриц рассеяния. В качестве программного обеспечения был использован Ansys Lumerical. Все компоненты были рассчитаны для обобщённой платформы кремний-на-изоляторе.

В результате, разработаны численные модели ПЛЗ на основе ИМЦ и МКР, в которых для изменения фазы оптического сигнала применяются либо термооптический, либо электрооптический эффекты. В рамках системного моделирования ПЛЗ было выявлено, что для корректного учёта времени задержки необходимо использовать полуаналитический подход при его определении, то есть физические параметры ПЛЗ могут быть рассчитаны с использованием численных методов, а значение вносимой временной задержки – только аналитически. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

На основе данных численного моделирования рассчитаны зависимости времени задержки ПЛЗ от напряжения. Благодаря им и известным характеристикам применяемых эффектов была разработана методика структурной оптимизации конструкции оптической части петли обратной связи ОЭО. Разработанная методика структурной оптимизации может быть представлена в виде схемы, представленной на рисунке 5.

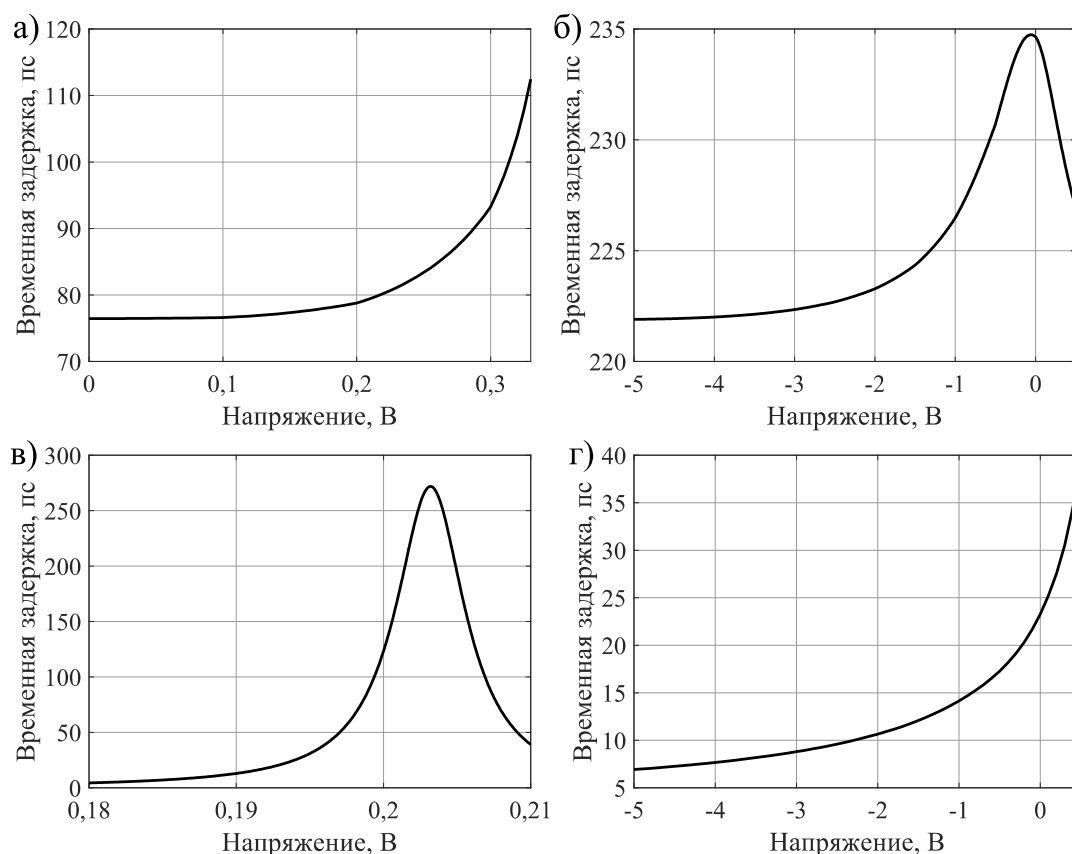


Рисунок 4 – Зависимости вносимой временной задержки для различных типов ПЛЗ: а) термооптической на основе ИМЦ, б) электрооптической на основе ИМЦ, в) термооптической на основе МКР, б) электрооптической на основе МКР



Рисунок 5 – Схема методики структурной оптимизации оптической части петли обратной связи ОЭО

В четвёртой главе представлены результаты численного моделирования зависимости частоты на выходе ОЭО от вносимой временной задержки и проведено сравнение результатов моделирования с расчётом на основе

разработанной математической модели. Также в рамках численного моделирования показана возможность перестройки частоты без срыва процесса генерации и представлено структурное решение, упрощающее процесс измерения и управления частотой сигнала на выходе ОЭО.

Зависимость частоты сигнала на выходе от величины вносимой временной задержки представлена на рисунке 6.

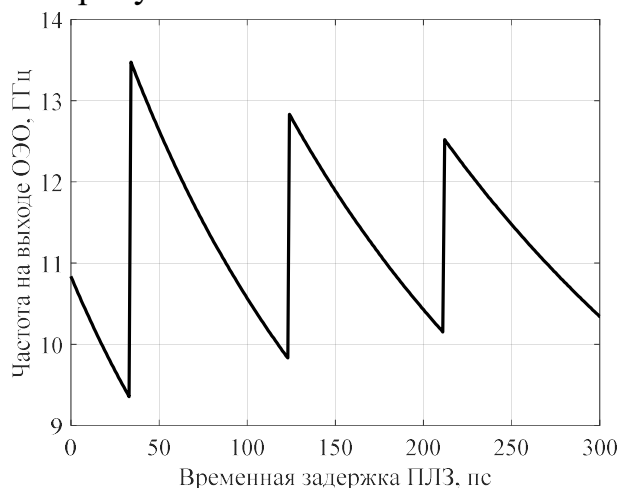


Рисунок 6 – Зависимость частоты сигнала на выходе ОЭО от вносимой временной задержки в петле обратной связи

Резкое изменение частоты ОЭО при отдельных значениях вносимой временной задержки обусловлено достижением фазового набега в контуре ОЭО, кратного 2π , с соответствующим ему изменением номера моды ОЭО k .

Для сравнения разработанной математической модели с результатами моделирования необходимо определить значения номера моды k и времени задержки сигнала в контуре ОЭО. Для этого была составлена система уравнений:

$$\begin{cases} f_0 = \frac{k}{T_D} \\ f_1 = \frac{k}{T_D + \Delta\tau} \end{cases},$$

где f_0 – частота ОЭО при начальном значении времени задержки T_D , f_1 – изменённое значение частоты ОЭО при изменении времени задержки на значение $\Delta\tau$. При значениях $\Delta\tau = 1$ пс, $f_0 = 13,476$ ГГц и $f_1 = 13,42$ ГГц (рисунок 6), время задержки сигнала T_D равно 239,6429 пс, а номер моды k равен 3,2294. Ввиду того, что при вычислении номер моды оказался дробным числом, было принято решение сравнить отклонения вычисленной частоты при целом и дробном k от результата моделирования (рисунок 7).

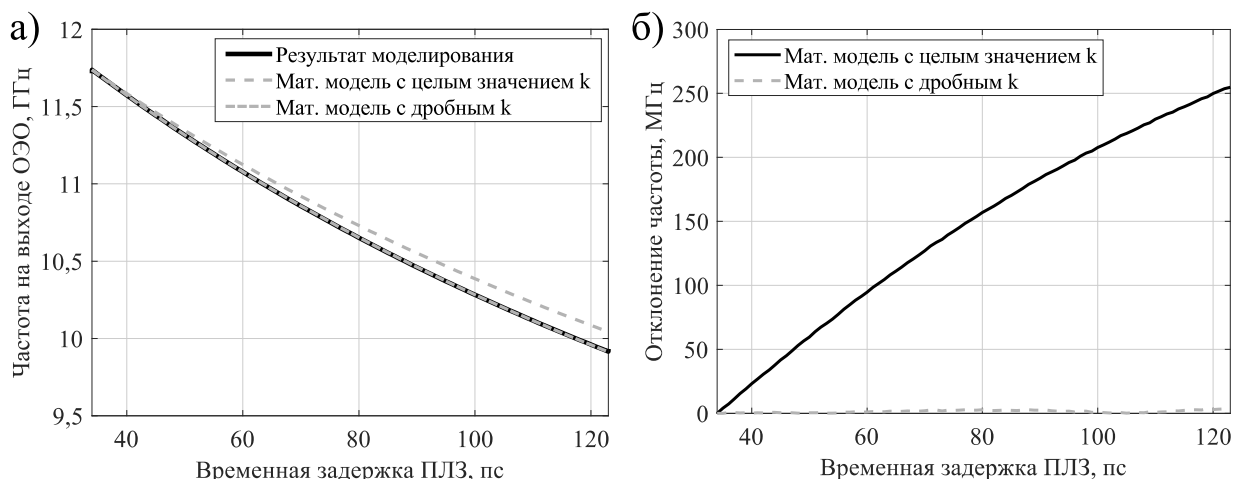


Рисунок 7 – Сравнение результатов численного моделирования и математической модели: а) зависимость частоты от вносимого времени задержки, б) отклонение расчётной частоты от результата моделирования при целом и дробном значениях k

Максимальное отклонение расчётной частоты от результата моделирования равно 254,8 МГц для целого значения k и 4,45 МГц – для дробного. Соответственно, можно сделать вывод о том, что дробное значение k в лучшей мере описывает частоту сигнала на выходе ОЭО. Это связано с тем, что целые значения описывают только пики частоты на рисунке 6 из-за дискретной природы собственных мод ОЭО. В результате, можно утверждать, что дробное значение k подходит для описания частоты сигнала в «промежуточном» состоянии, когда частота сигнала на выходе ОЭО не соответствует его собственным модам.

Для проверки возможности изменения частоты ОЭО без срыва генерации было произведено численное моделирование с использованием приближенной к реальной модели ПЛЗ. Временные диаграммы сигнала на выходе ОЭО показаны на рисунке 8. Спектры сигнала вычислялись для трёх временных промежутков: 1) от 0 до 5 мкс (напряжение на ПЛЗ –3 В); 2) от 5 до 5,2 мкс (промежуток полного перехода от –3 до 0 В); 3) от 5,2 до 5 мкс (напряжение на ПЛЗ 0 В).

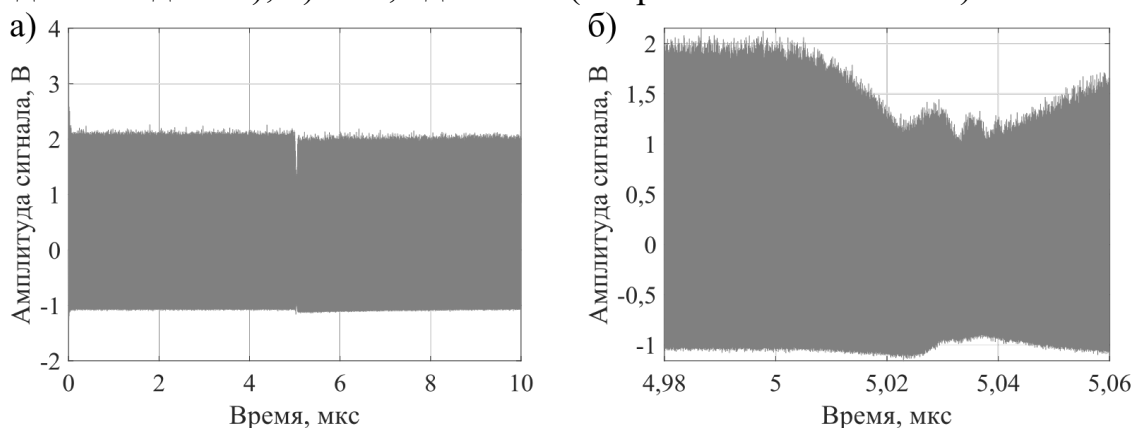


Рисунок 8 – Временные диаграммы сигнала на выходе ОЭО: а) за весь период моделирования; б) участок изменения частоты сигнала

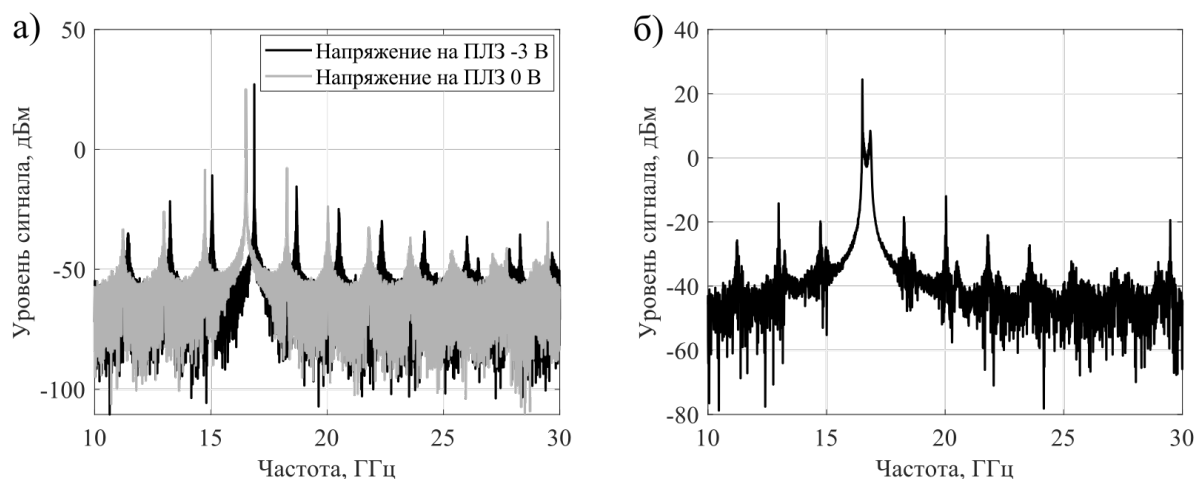


Рисунок 9 – Спектры сигнала на выходе ОЭО: а) для разных значений управляющего напряжения на ПЛЗ, б) при изменении амплитуды напряжения

В момент изменения напряжения, подаваемого на ПЛЗ, происходит плавное изменение частоты, что также подтверждает возможность перестройки частоты сигнала на выходе ОЭО без перезапуска процесса генерации.

Сигнал на выходе ОЭО обладает высокой частотой (от единиц до десятков гигагерц), и её измерение является сложной задачей. Для её решения можно использовать схему преобразования частоты, обеспечивающую понижение частоты. Схема понижения частоты состоит из синтезатора частоты (СЧ), преобразователя частоты (ПЧ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и контроллера (К) (рисунок 10). Схема работает следующим образом: СВЧ-колебание с выхода ОЭО поступает на ПЧ, где происходит его преобразование в колебание промежуточной частоты (ПрЧ), значение которой определяется как:

$$f_{\text{ПрЧ}} = |f_{\text{СЧ}} - f_{\text{ОЭО}}|,$$

где $f_{\text{ПрЧ}}$ – значение промежуточной частоты, $f_{\text{СЧ}}$ – значение частоты сигнала на выходе синтезатора частоты, $f_{\text{ОЭО}}$ – значение частоты сигнала на выходе ОЭО.

--- Оптические сигналы
 — Электрические сигналы

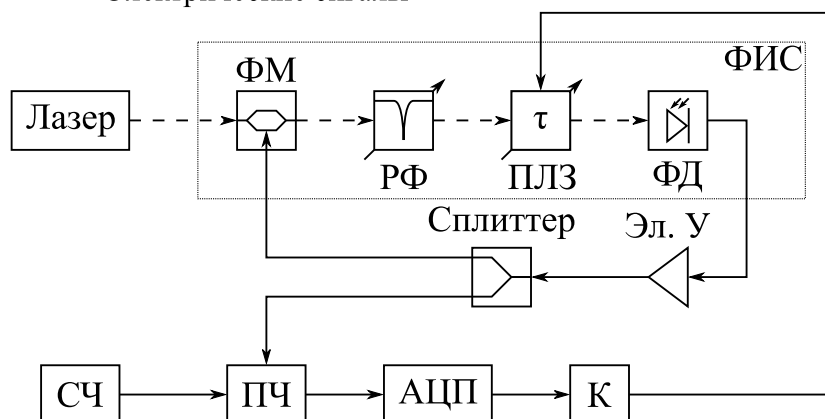


Рисунок 10 – ОЭО со схемой понижения частоты с возможностью подстройки частоты ОЭО

После этого на АЦП происходит процесс оцифровки сигнала. Полученное значение поступает на контроллер, где происходит вычисление значения $f_{\text{ПрЧ}}$ и её сравнение с заданным значением. В случае неравенства этих величин контроллер

генерирует управляющий сигнал для изменения величины вносимой временной задержки на ПЛЗ.

Также была произведена оценка экономической эффективности разработанной схемы с коммерчески доступными синтезаторами. Были выбраны микросхемы, обеспечивающие возможность измерения частоты ОЭО до 13 ГГц (значение частоты, полученное в рамках моделирования). В результате, стоимость одной микросхемы, обеспечивающей измерение частоты ОЭО, оказалась в 2,6 раза больше, чем микросхем генератора, управляемого напряжением, и синтезатора частоты с фазовой автоподстройкой частоты.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе были рассмотрены методы перестройки частоты сигнала на выходе ОЭО с целью снижения шага перестройки частоты ОЭО с использованием возможностей интегральной реализации его оптической части. В частности:

1. Разработана математическая модель процесса перестройки частоты на выходе ОЭО, учитывающая применение элементов интегральной фотоники в его оптической части петли обратной связи. Верификация математической модели производилась посредством численного моделирования. В его рамках было выявлено, что для дробных значений номера моды ОЭО максимальное отклонение вычисленного значения частоты сигнала на выходе ОЭО от результата моделирования равно 4,45 МГц. Представленное отклонение было получено для частоты сигнала 9,831 ГГц, то есть относительное отклонение частоты от результата моделирования составило 0,045%, что подтверждает возможность применения разработанной математической модели при разработке СВЧ-генераторов на основе ОЭО с интегральной оптической частью.

2. Разработан метод перестройки частоты на выходе ОЭО с использованием управления фазовым набегом в оптической части петли обратной связи ОЭО без срыва процесса генерации при перестройке частоты. Возможность перестройки частоты сигнала без срыва генерации продемонстрирована в рамках численного моделирования. Благодаря этому можно сделать вывод о том, что время перестройки частоты ограничивается временем изменения значения вносимой временной задержки ПЛЗ. То есть в зависимости от физического эффекта, используемого для изменения фазы оптического сигнала в волноводе, время изменения частоты на выходе ОЭО может быть снижено до 1 нс.

Помимо этого, в рамках численного моделирования получены значения крутизны настроечной характеристики ОЭО для различных видов ПЛЗ: 1) для термооптической ПЛЗ на основе ИМЦ – 2,77 ГГц/В; 2) для электрооптической ПЛЗ на основе ИМЦ – 462 МГц/В; 3) для термооптической ПЛЗ на основе МКР – 1601,6 ГГц/В; 4) для электрооптической ПЛЗ на основе МКР – 195,44 МГц/В.

3. Разработана методика структурной оптимизации конструкции оптической части петли обратной связи ОЭО, учитывающая различные физические эффекты для изменения фазы оптического сигнала в интегральном оптическом волноводе.

Приведены возможные параметры оптимизации и рассмотрены варианты их увеличения и уменьшения.

4. Разработана структура синтезатора сверхвысокочастотных колебаний, основанная на применении схемы понижения частоты, позволяющая упростить блок измерения и перестройки частоты ОЭО. При этом стоимость отдельных компонентов схемы измерения частоты ОЭО может быть снижена не менее чем в 2,6 раза.

5. Рассчитанные значения крутизны для электрооптических ПЛЗ сравнимы с ранее представленными ОЭО на базе устройств интегральной фотоники (620 МГц/В), при этом максимально достижимый диапазон перестройки частоты через фазовый набег составил 3,649 ГГц. Стоит отметить, что диапазон перестройки частоты ОЭО может быть увеличен за счёт изменения центральной частоты режекторного фильтра. Соответственно, представленная схема ОЭО может обеспечивать перестройку частоты в «тонком» (за счёт изменения фазового набега в петле обратной связи) и «грубом» (за счёт изменения центральной частоты режекторного фильтра) режимах работы. В итоге, минимально достижимый шаг перестройки частоты ОЭО с электрооптической ПЛЗ на основе МКР при использовании цифрового управления с помощью прецизионного 16-битного ЦАП равен 7,8 кГц, что примерно в 180 раз меньше чем у всех ранее представленных ОЭО с перестройкой частоты, реализованной оптическими методами.

Результаты диссертационного исследования приняты **к внедрению** в производственные процессы компании АО «БПО «Прогресс» г. Уфа, а также в учебные процессы ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и техники».

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшей работе планируется проведение экспериментальной верификации предложенной математической модели с оценкой характеристик ОЭО с интегральной оптической линией задержки в петле обратной связи, а также оценка влияния времени переходного процесса сигнала, поступающего на линию задержки, на перестройку частоты без срыва генерации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Перестройка частоты интегрального оптоэлектронного осциллятора на основе управляемой оптической линии задержки в петле обратной связи / В. В. Иванов, И. В. Степанов, Г. С. Воронков, А. В. Воронкова, Е. П. Грахова // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 12. – С. 158-169. – DOI: 10.18127/j00338486-202412-14.

2. Схема понижения частоты сенсорной системы на основе интегрального оптоэлектронного осциллятора / И. В. Степанов, В. В. Иванов, Г. С. Воронков, А. Х. Султанов // Инфокоммуникационные технологии. – 2025. – Т. 23, № 1(89). – С. 21-28. – DOI 10.18469/ikt.2025.23.1.02.

3. Моделирование оптоэлектронного осциллятора с участком оптического волокна в качестве линии задержки в его петле обратной связи / И. В. Степанов,

А. Х. Султанов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2026. – Т. 14, № 8(59). – DOI 10.26102/2310-6018/2026.59.8.008.

В журналах, индексируемых в международных базах WoS/Scopus

4. Voronkov G. S., Aleksakina Y. V., Ivanov V. V., Zakoyan A. G., Stepanov I. V., Grakhova E. P., Butt M. A., Kutluyarov R. V. Enhancing the performance of the photonic integrated sensing system by applying frequency interrogation // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13. – No. 1. – P. 193. – DOI: 10.3390/nano13010193.

5. Ivanov V. V., Stepanov I. V., Voronkov G. S., Kutluyarov R. V., Grakhova E. P. An Approach to Reduce Tuning Sensitivity in the PIC-Based Optoelectronic Oscillator by Controlling the Phase Shift in Its Feedback Loop // *Micromachines*. – 2024. – Vol. 16. – No. 1. – P. 32. – DOI: 10.3390/mi16010032.

Публикации, индексируемые в международной базе Scopus

6. Ivanov V. V., Stepanov I. V., Voronkov G. S., Voronkova A. V., Grakhova E. P. Optoelectronic oscillator frequency tuning based on loop-back control // *Optical Technologies for Telecommunications 2023*. – SPIE, 2024. – Vol. 13168. – P. 417-423. – DOI: 10.1117/12.3026503.

7. Ivanov V. V., Stepanov I. V., Aleksakina Y. V., Shaygardanova A. R., Khairtadinova A. D., Voronkov G. S. PIC-Based Continuous Frequency Tuning of the Optoelectronic Oscillator // *2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)*. – IEEE, 2024. – P. 570-573. – DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10804972.

В других изданиях

8. Частотный интеррогатор на основе фотонной интегральной схемы для оптических датчиков акустической эмиссии / В. В. Иванов, Г. С. Воронков, А. Г. Закоян, И. В. Степанов, А. В. Воронкова, Р. В. Кутлуяров, Е. П. Грахова // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2022. – Т. 27, № 6. – С. 73-81. – DOI: 10.18127/j5604128-202206-10.

9. Численное моделирование интегральных оптических линий задержки в программной среде Ansys Lumerical / И. В. Степанов // *Молодежный Вестник УГАТУ*. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 104-112. – DOI: 10.54708/22259309_2025_132104.

10. Моделирование элементов интегрального оптоэлектронного осциллятора с плавной перестройкой частоты на основе управления фазой в его петле обратной связи / Г. С. Воронков, И. В. Степанов, В. В. Иванов, Р. В. Кутлуяров, Е. П. Грахова // *Компьютерное проектирование в электронике*, Минск, 28 ноября 2024 года. – Минск: БГУИР, 2024. – С. 136-139.

11. Применение интегральной оптической линии задержки в петле обратной связи оптоэлектронного осциллятора в качестве чувствительного элемента сенсорной системы / В. В. Иванов, И. В. Степанов, Г. С. Воронков // VII научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2024 : Материалы XXII Международной научно-технической конференции, Самара, 06–08 ноября 2024 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. – С. 176-177.

12. Схема подстройки частоты оптоэлектронного осциллятора / И. В. Степанов, В. В. Иванов, Г. С. Воронков, А. Х. Султанов // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях : материалы XXVII и XXIII Международных научно-технических конференций, Уфа, 05–07 ноября 2025 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 447-448.

Регистрация результатов интеллектуальной деятельности

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661528 Российская Федерация. Программа для создания дизайна небалансного интерферометра Маха-Цендера с малой длиной дуг в среде KLayout : № 2023660668 : заявл. 24.05.2023 : опубл. 01.06.2023 / И. В. Степанов.

14. Патент на полезную модель № 235445 U1 Российская Федерация, МПК Н03В 17/00, Н04В 10/50. Оптоэлектронный генератор сверхвысокочастотных колебаний на основе фотонной интегральной схемы с оптической линией задержки : заявл. 04.03.2025 : опубл. 02.07.2025 / И. В. Степанов, В. В. Иванов, Г. С. Воронков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский университет науки и технологий".

Диссертант



И.В. Степанов