

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой РСС
_____ А.В. Фатеев
« ____ » _____ 2019 г.

**Методы и устройства радиофотоники
в системах радиосвязи**

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов направления 11.04.02

«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Разработчик
Профессор кафедры РСС, д.ф.-м.н..
_____ А. С. Задорин;
« ____ » _____ 2019 г.

Задорин А. С. Методы и устройства радиопотоники в системах радиосвязи. Методические указания по выполнению лабораторных работ: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 69 с.

Приводятся описания лабораторных работ по дисциплине «Методы и устройства радиопотоники в системах радиосвязи» для студентов-магистрантов направления 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

© Задорин А. С., 2019.

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Литература	8
Тема 1. Системы квантового распределения ключей (СКРК)	9
Краткие теоретические сведения	9
Основные принципы квантовой механики	9
Описание состояния квантовой частицы	10
Протоколы кодирования в системах КРК	11
Протокол BB84	11
Протокол B92	14
Поляризационное кодирование в системах КРК	15
Уровень ошибок в квантовом канале СКРК	17
Фотоприемное устройство СКРК	18
Программная модель фотоприемного устройства СКРК	23
Рекомендуемая литература	25
1. Лабораторная работа	27
Исследование С КРК на основе протокола BB84	27
Цель работы	27
Домашнее задание к работе	27
Описание программного обеспечения лабораторной работы	27
Лабораторное задание	31
Содержание отчета	32
Рекомендуемая литература	32
2. Лабораторная работа	33
Исследование С КРК на основе протокола B92	33
Цель работы	33
Домашнее задание к работе	33
Описание программного обеспечения лабораторной работы	33
Лабораторное задание	36
Содержание отчета	37
Рекомендуемая литература	37
Тема 2. Исследование оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона	38
Краткие теоретические сведения	38
Спектр шумов АГ	39
Фазовый шум	39
Закономерности изменения $S_{\phi}(f)$	39
Частотный шум	41
Амплитудный шум АГ	41
Оптоэлектронный автогенератор на ВО-ЛЗ	41
Диэлектрические резонаторы с азимутальными модами высокого порядка	43
Оптоэлектронный генератор на основе ДДР	46
Рекомендуемая литература	48
3. Лабораторная работа	50
Исследование влияния параметров оптоэлектронного автогенератора (ОЭАГ) с резонансной системой на основе оптического волокна (ОВ)	50
Цель работы	50
Домашнее задание к работе	50
Лабораторная имитационная модель ОЭАГ	50

Описание модели ОЭАГ-ОВ на платформе Simulink	51
Шумы ОЭАГ	53
Расчетная модель одноконтурного ОЭАГ	56
Лабораторное задание	59
Контрольные вопросы.....	59
Контрольные задачи.....	59
Рекомендуемая литература	60
4. Лабораторная работа	61
Исследование влияния параметров оптоэлектронного автогенератора с инжекционной синхронизацией	61
Цель работы	61
Расчетная модель инжекционно-синхронизированной схемы ОЭАГ.....	61
Лабораторное задание	63
Контрольные вопросы.....	63
Рекомендуемая литература	63
5. Лабораторная работа	65
Исследование влияния параметров оптоэлектронного автогенератора с резонансной системой на основе оптического микрорезонатора (ОМР).....	65
Цель работы	65
Расчетная модель схемы ОМР-ОЭАГ	65
Описание программного обеспечения лабораторной работы.....	65
Лабораторное задание	68
Контрольные вопросы.....	68
Контрольные задачи.....	68
Рекомендуемая литература.....	69

Введение

Радиофотоника (РФ) (Microwave Photonics - MWP) представляет собой междисциплинарную научно-техническую область знаний, охватывающую традиционные направления радиоэлектроники, СВЧ-оптоэлектроники, интегральной и волновой оптики и ряда других областей науки, в рамках которой проводятся исследования взаимодействия оптического излучения и радиочастотного сигнала для построения широкополосных систем приема, передачи и обработки информации, устойчивым к электромагнитным помехам, с низкими потерями и искажениями [1]

Направление радиофотоника в последние десятилетия широко внедряются в такие важных отрасли промышленности как телекоммуникации, системы радиосвязи, радиолокация и радиоэлектронная борьба. Указанные инновации значительно превышает любую из развивающихся в настоящее время областей естественных знаний [1].

В современном понимании *фотоника* означает обширную область знаний, в которой изучаются разнообразные явления, связанные с оптическим излучением (светом). Одним из новых направлений фотоники является сверхвысокочастотная *оптоэлектроника*, появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники. В развитие СВЧ-оптоэлектроники в нашей стране получил распространение новый термин «радиофотоника» (РФ), охватывающий более широкую область знаний. Основные объекты исследования РФ: полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ-диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, а также узлы и модули на основе их сочетания между собой и со сверхскоростной цифровой и аналоговой компонентной базой микроэлектроники.

Цели и задачи РФ: исследование и разработка сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в радиодиапазоне и их применение в различных оптических и радиотехнических системах передачи информации, а также активных приборов и устройств формирования и обработки сигналов радиочастотного диапазона с использованием оптических и оптоэлектронных средств.

К фундаментальным преимуществам радиофотонной технологии, позволяющим совершенствовать характеристики радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона, можно отнести следующие [1].

Базирующиеся на фундаментальных свойствах носителей информации: фотон - безмассовая элементарная частица, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Это обеспечивает:

- повышенное быстродействие (до десятков фемтосекунд),
- расширенную полосу пропускания (до терагерцевого диапазона).

В результате улучшаются тактико-технические показатели традиционных узлов формирования и обработки СВЧ-сигналов: генератора, преобразователя частоты, линии задержки, фильтра и т.д.

Базирующиеся на свойствах среды распространения: кварцевое оптическое волокно:

1. малые потери при передаче ($<0,2$ дБ/км) и независимость их от частоты модуляции в радиочастотном диапазоне;
2. расширенная рабочая полоса частот (до 15 ТГц);
3. высокие массогабаритные характеристики;
4. нечувствительность к электромагнитным наводкам: улучшение электромагнитной совместимости внутри системы;

В результате улучшаются тактико-технические показатели и характеристики передачи радиоэлектронных систем (РЭС).

Принципиальным недостатком использования радиофотонной технологии в РЭС является необходимость операций прямого и обратного преобразований в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала. Тем не менее их влияние в значительной степени компенсируется за счет малых собственных потерь в волокне.

Использование вышеуказанных фундаментальных достоинств обеспечивает конкретные практические преимущества, приводящие к возможности улучшения тактико-технических характеристик РЭС.

В литературе используются следующие определения для фотонного и радиофотонного устройств [1].

Фотонное устройство - обособленный функциональный узел, структура которого содержит исключительно элементы оптического диапазона.

Радиофотонное устройство - обособленный функциональный узел, структура которого содержит элементы радио- и оптического диапазонов.

С этих позиций компонентную базу радиофотоники и строящиеся на их основе функциональные элементы и устройства можно разделить на пять типов. А именно приборы и элементы с прямым взаимодействием СВЧ- и оптического излучений, которые включают:

5. оптико-электрический преобразователь, типа полупроводникового фотодиода;
6. электрооптический преобразователь, типа полупроводникового лазера;
7. датчик СВЧ-сигнала с оптическим управлением, типа оптоэлектронного генератора СВЧ-сигналов;

8. преобразователь оптического сигнала, типа оптического модулятора;
9. преобразователь СВЧ-сигнала, коэффициент усиления которого регулируется оптическим сигналом, оптоэлектронная схема задержки, оптоэлектронный смеситель.

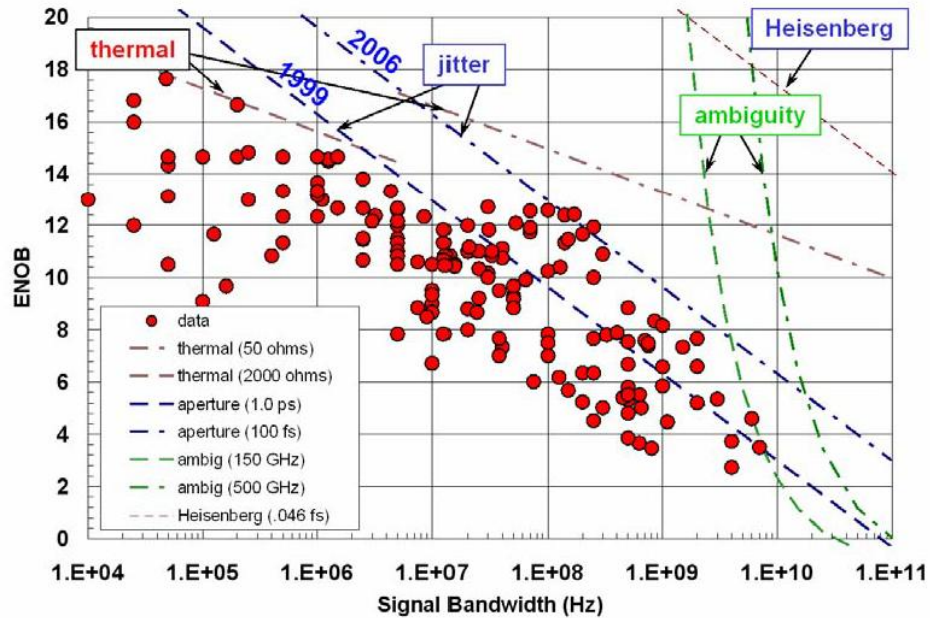


Рис.1. Эффективное число битов электронных АЦП как функция частоты аналогового входного сигнала [R. H. Walden, IEEE J. Sel. Areas Commun. vol. 17, no. 4, 1999]

Общая отличительная черта всех вышеперечисленных приборов и функциональных элементов заключается в работе в С (1530—1565 нм) и/или L (1565—1625 нм) спектральных диапазонах по классификации МСЭ-Т. Основными причинами такого выбора являются самые низкие потери в кварцевом волокне и самая широкая рабочая спектральная полоса, что, например, позволяет эффективно заменить обычно применяемый в АФАР набор переключаемых линий задержек на базе большого числа СВЧ-линий передачи на многоволновую передачу со спектральным разделением каналов по одной общей волоконно-оптической линии. Также только в указанных диапазонах существует уникальная возможность компенсации потерь за счет экономичных и высокотехнологичных волоконных усилителей. Устройства данного типа, основанные на чисто оптическом взаимодействии, появились в процессе развития волоконно-оптических систем и также могут быть эффективно применены в радиофотонной аппаратуре. К ним относятся: преобразователь оптического сигнала с оптической накачкой, например эрбиевый, рамановский и бриллюэновский волоконные усилители, датчик оптического сигнала с оптической накачкой, например эрбиевый волоконный генератор.

Проблематика радиотонных устройств

Отсутствие оцифровки сигналов в радиотонных ИС

- В настоящее время большинство РФИС работают в аналоговом режиме. Из-за этого они накапливают ошибки по мере увеличения количества устройств. Это приводит к значительному ухудшению качества сигнала и требует регенерации сигналов (см.рис.1).
- В некоторых перспективных применениях, таких как сверхширокополосная связь и радары высокого разрешения, использование цифровой обработки сигнала является ключевым требованием.
- Только цифровая обработка сигналов в них обеспечивает существенное улучшение характеристик приборов и возможность быстрого изменения функциональных возможностей.
- Ограничивающим фактором к использованию цифровой обработки сигнала
- обычно является быстроедействие и компактность электронных (CMOS) АЦП

Ключевая задача в разработке радиотонных систем

Переход от аналоговых к цифровым сигналам является ключевой задачей радиотоники на ближайшие годы.

Целью настоящего пособия, предназначенного для организации практических работ по дисциплине «Методы и устройства радиотоники в системах радиосвязи» для студентов магистрантов направления 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», является развитие у студентов компетенции по исследованию и проектированию устройств РФ. Тематика работ охватывает все основные разделы дисциплины и направлена на закрепление и самостоятельное освоение знаний, полученных на лекциях.

Большая часть предлагаемых работ рекомендуется для самостоятельного домашнего выполнения.

В пособии используется пораздельная нумерация литературных ссылок, рисунков и формул. Ссылки на рисунки и формулы из других разделов оформляются с указанием соответствующего раздела, отделенного от номера формулы точкой. Например, формула (2.18) и т.п.

Литература

1. В. Дж. Урик-мл., Дж. Д. МакКинни, К. Дж. Вилльямс. Основы микроволновой фотоники. Техносфера. 2016 376 с. ISBN: 978-5-94836-445-2

Тема 1. Системы квантового распределения ключей (СКРК)

Краткие теоретические сведения

Квантовая криптография – это метод защиты информации, основанный на принципах квантовой физики. В отличие от классической криптографии, которая для защиты информации использует математические методы, квантовая криптография использует законы физики, рассматривая случаи, когда данные переносятся с помощью объектов квантовой механики. При помощи квантовой криптографии возникает возможность перекрыть несанкционированный доступ к данным.

Для организации конфиденциальных каналов передачи данных широкое распространение получили методы шифрования с открытым ключом (асимметричное шифрование), пришедшие на смену симметричному шифрованию, которое обладает существенным недостатком – необходимостью надежного распределения секретного ключа для передающей и приемной стороны.

Защищенность систем с использованием асимметричного шифрования ограничена, как известно, вычислительными возможностями аппаратуры нелегитимного пользователя. В этой связи подобные криптографические алгоритмы принято считать условно защищенными.

Развитие науки и техники, практическое применение идей квантовой механики в области квантовых вычислений в последние десятилетия позволило разработать системы квантового распределения ключа (КРК), использующие симметричное шифрование. Технология КРК основывается на применении для связи между легитимными пользователями квантовых частиц – фотонов, свойства которых используются для формирования ключевой последовательности K_{AB} .

Системы КРК обладают существенным преимуществом перед существующими методами шифрования, так как их защищенность от перехвата данных является безусловной, основанной на физических законах, в том числе на теореме о запрете клонирования (ТЗК) – о невозможности создания точной копии неизвестного квантового состояния.

Основные принципы квантовой механики

При описании работы систем квантового распределения ключа в дальнейшем воспользуемся следующими принципами квантовой механики:

1. Принцип суперпозиции состояний. Любая микросистема, такая как атом, молекула или частица, в данном состоянии может рассматриваться как находящаяся частично в каждом из двух или более других состояний, т.е. любое состояние может рассматриваться как суперпозиция. Их можно реализовать бесконечным числом разных способов [2].

2. Принцип недетерминированности. Наблюдение, производимое над микросистемой, заставляет ее принять одно или более конкретное состояние (что связано с типом измерения). Невозможно предсказать, в какое именно состояние перейдет данная система, но можно предсказать вероятность перехода конкретной системы в данное конечное состояние [2].

Бритва Дирака. Квантовая механика отвечает только на вопросы, связанные с результатами возможных экспериментов, а любые другие вопросы лежат вне ее сферы [1].

Описание состояния квантовой частицы

В общем случае вектор состояния квантовых частиц $|\varphi\rangle$ [Ошибка! Источник ссылки не найден.-7] представляет собой многомерный объект гильбертова пространства [Ошибка! Источник ссылки не найден.-7], однако во многих системах КРК [Ошибка! Источник ссылки не найден.-7] состояние $|\psi\rangle$ приготавливается в двумерном ортогональном базисе некоторой наблюдаемой, связанной с соответствующим эрмитовым оператором измерения A [5, Ошибка! Источник ссылки не найден.],

$$|\psi_2\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (1)$$

где $|0\rangle$, $|1\rangle$ и α , β – соответственно, собственные векторы-столбцы оператора A и амплитуды вероятности нахождения частицы в данных состояниях, которые в общем случае являются комплексными числами. Индексом 2 здесь отмечено число возможных состояний частицы. Вектор-столбец называется «кет-вектор» [1, Ошибка! Источник ссылки не найден.-7].

Соотношение (1) устанавливает вид кодирования квантовой частицы в системе КРК, т.е. связь информационной составляющей с ее физическим свойством, и представляет собой элементарный квантовой бит - кубит [Ошибка! Источник ссылки не найден.-7]. В качестве его физической реализации может быть фотон или электрон. Векторы $|0\rangle$, $|1\rangle$ составляют вычислительный базис кубита [Ошибка! Источник ссылки не найден.-7].

До измерения кубит имеет оба логических значения, т.е. находится в обоих состояниях вычислительного базиса одновременно, а измерение позволяет кубиту коллапсировать в одно из этих состояний. Это отличается от классического подхода, в рамках которого предполагается, что бит до измерения находится в одном из логических состояний, а измерение только обнаруживает этот факт.

Состояние вычислительного базиса являются ортогональными, поэтому с практической точки зрения векторами вычислительного базиса являются состояния

фотона с горизонтальной или вертикальной поляризацией, или состояние электрона, характеризуемые направлением спина вверх или вниз [3].

Важно отметить, что отличие когерентной суперпозиции от некогерентной смеси состоит в том, что для первой всегда существует базис, в котором возможные значения кубита строго определены. При этом когерентное состояние есть состояние, в котором величины неопределенностей амплитуды и фазы равны.

Условие нормировки имеет вид:

$$\langle \psi | \psi \rangle = |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (2)$$

где $\langle \psi |$ - бра-вектор [1].

Таким образом, состояние кубита можно рассматривать как вектор в двумерном комплексном векторном пространстве. Условие (1.2) тогда означает, что этот вектор имеет единичную длину [Ошибка! Источник ссылки не найден.-7].

Протоколы кодирования в системах КРК

Протокол BB84

Основными протоколами кодирования одиночных состояний фотонов в системах КРК являются протокол BB84, предложенный Беннеттом и Brassardом в 1984 году и B92, разработанный Беннеттом в 1992 году, а также множество других [1-7].

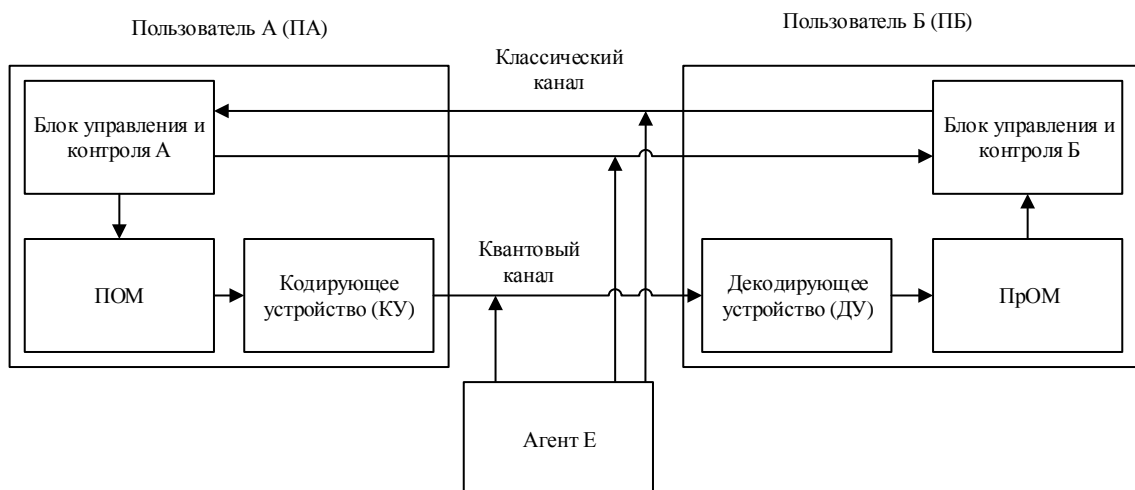


Рис. 1. Структурная схема системы КРК

Структурная схема системы КРК изображена на рис. 1, на первом этапе происходит передача сигнальных импульсов по квантовому каналу (КК) между легитимными пользователями А (ПА) и Б (ПБ), в ПОМ происходит приготовление, а в КУ – кодирование состояний, далее в ДУ происходит декодирование, а в ПрОМ – детектирование. После этого по классическому каналу производится обмен информацией

о номере используемого для кодирования базиса, без раскрытия состояния. При этом считается, что нелегитимный пользователь может прослушивать классический канал, но не может вносить изменения в передаваемые данные, а перехват информационных посылок из квантового канала приводит к возникновению дополнительных ошибок [1-7].

Механизм защиты основан на случайной смене стороной ПА в каждом такте формируемой ею последовательности кубитов \mathbf{m}_A состояний используемого для их приготовления вычислительного базиса. Альтернативные состояния базиса $|0\rangle-|1\rangle$ и $|0'\rangle-|1'\rangle$ в различных тактовых интервалах \mathbf{m}_A при этом оказываются развернутыми друг относительно друга на фиксированный угол $\varphi=45^\circ$ [1-7]. В целом система при этом ориентирована на проведение стороной ПБ проекционных измерений кубитов (измерений фон Неймана), т.е. измерений с четким исходом, при которых \mathbf{A} представлен проектором i -го кубита из \mathbf{m}_A на кет-векторы соответствующего вычислительного базиса. С этой целью при приготовлении \mathbf{m}_{Ai} в любом из альтернативных базисов $|0\rangle-|1\rangle$ или $|0'\rangle-|1'\rangle$ один коэффициентов α, β в (1), в зависимости от значения передаваемого символа (0 или 1), всегда обращается в ноль.

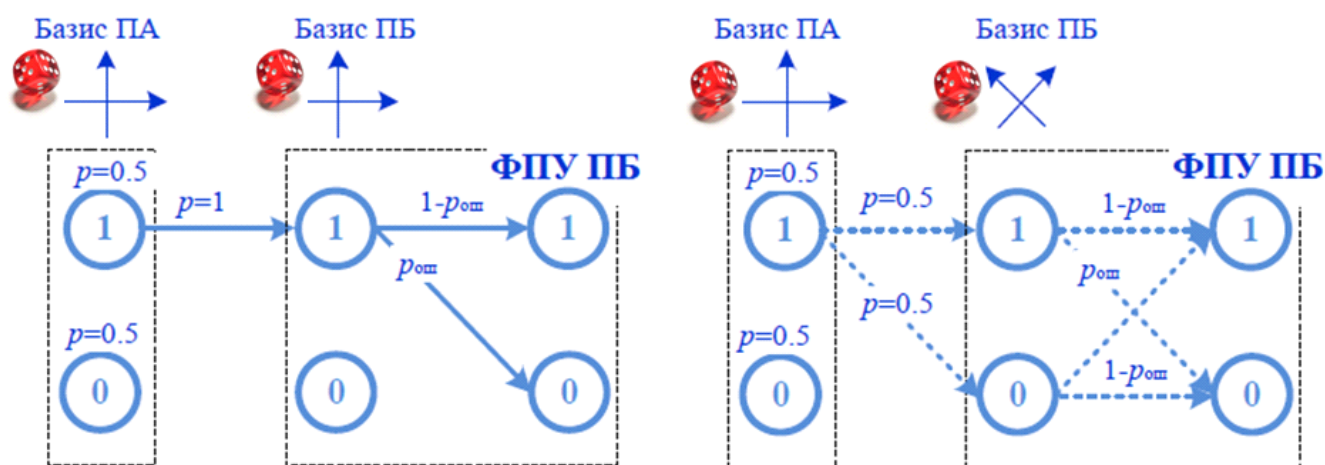


Рис. 2. Граф четких измерений поляризационных кубитов в СКРК ВВ8 в условиях приема символа 1.

Для реализации проекционных измерений, поступающих из квантового канала последовательности \mathbf{m}_A , сторона ПБ формирует у себя собственную случайную последовательность \mathbf{m}_B состояний своего измерительного базиса, состоящую из тех же векторных комбинаций $|0\rangle-|1\rangle$ и $|0'\rangle-|1'\rangle$. В силу некоррелированности \mathbf{m}_A и \mathbf{m}_B среднее число совпадения вычислительного и измерительного базисов в указанных последовательностях возможно лишь для половины элементов из которых и формируется ключевая последовательности \mathbf{k}_{AB} . Для второй половины элементов условия проекционных измерений не выполняются. Здесь измерительный базис \mathbf{m}_{Bi} оказывается

повернутым относительно векторов вычислительного базиса ПА данного элемента \mathbf{m}_A , следовательно, на стороне Б \mathbf{m}_{A_i} оказывается в суперпозиции состояний векторов измерительного базиса \mathbf{m}_{B_i} . Формально данная ситуация означает, что оба коэффициента α и β измеряемого кубита \mathbf{m}_{A_i} отличны от нуля, и безошибочное копирование кубитов в данных условиях невозможно в принципе. Согласно ТЗК нелегитимному пользователю Еве, которая осуществляет атаку на канал связи легитимных пользователей системы КРК, не сможет получить из сообщения даже частичную информацию без изменения ее случайным и неконтролируемым образом, что с большой вероятностью будет детектировано ПА и ПБ [3]. Отсюда следует, что перспективы успешного копирования ключевой последовательности \mathbf{m}_K агентом Е могут быть связаны лишь с несовершенством программно-аппаратного устройства системы КРК ПА и ПБ. К основным системным показателям такого рода обычно относят уровень ошибок и V - скорость формирования \mathbf{k}_{AB} (битрейт), которые используются для контроля и детектирования атак АЕ.

Теоретическим пределом ошибки, до которого данный протокол является защищенным, составляет около 11% [1-7]. В случае использования Евой следующих атак: прием-перепосыл, прозрачное индивидуальное подслушивание, коллективной и когерентной атаки данная критическая величина корректна.

Однако для атаки с расщеплением по числу фотонов (photon number splitting attack – PNS), которая основана на том, что в системах КРК обычно используются ослабленные лазерные импульсы, вместо строго однофотонных, протокол BB84 является полностью незащищенным [1-7].

Данная атака сводится к тому, что агент Е неразрушающим образом измеряет в разрыве квантового канала числа фотонов в импульсах. Однофотонные импульсы при этом блокируются, а пользователю Б транслируются только импульсы с двумя и более фотонами, один из которых агент Е сохраняет в своей квантовой памяти.

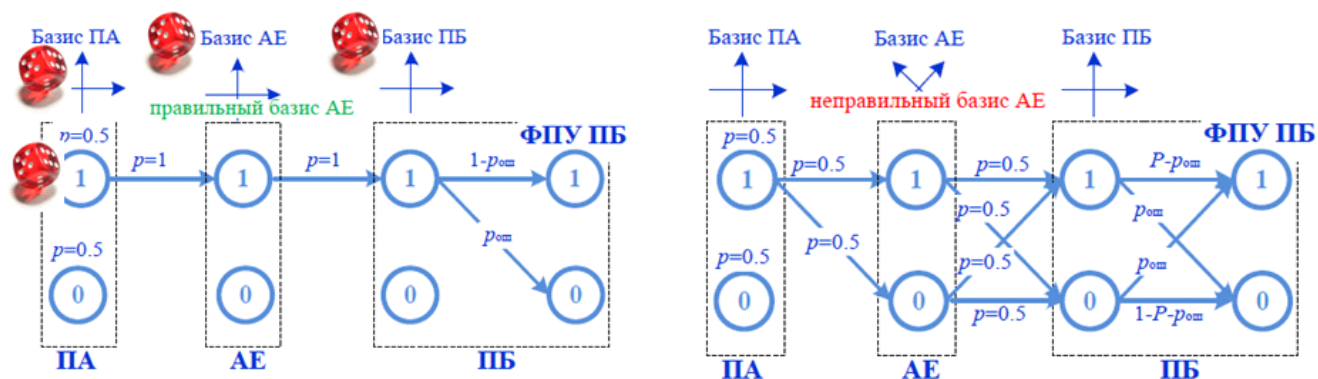


Рис. Граф четких измерений поляризационных кубитов в СКРК BB8 в условиях приема символа 1 и присутствия АЕ.

Битовое состояние этого фотона АЕ может легко установить позднее, после раскрытия и согласования пользователями состояний соответствующих базисов по классическому каналу. АЕ маскирует заблокированные импульсы используя канал связи с меньшим затуханием [1-7], однако это возможно только при определенной критической длине квантового канала, которая зависит от доли двух- и более фотонных импульсов в передаваемых информационных посылках.

Протокол В92

Основное отличие от вышеописанного протокола для В92 в том, что для кодирования состояния фотона на передающей стороне используется один базис с двумя неортогональными состояниями – «0» соответствует поляризация 0° , «1» - 45° . Измерение при этом происходит в двух базисах: в прямом, где «0» - 0° , «1» - 90° и диагональном, где «0» - 45° , а «1» - 135° .

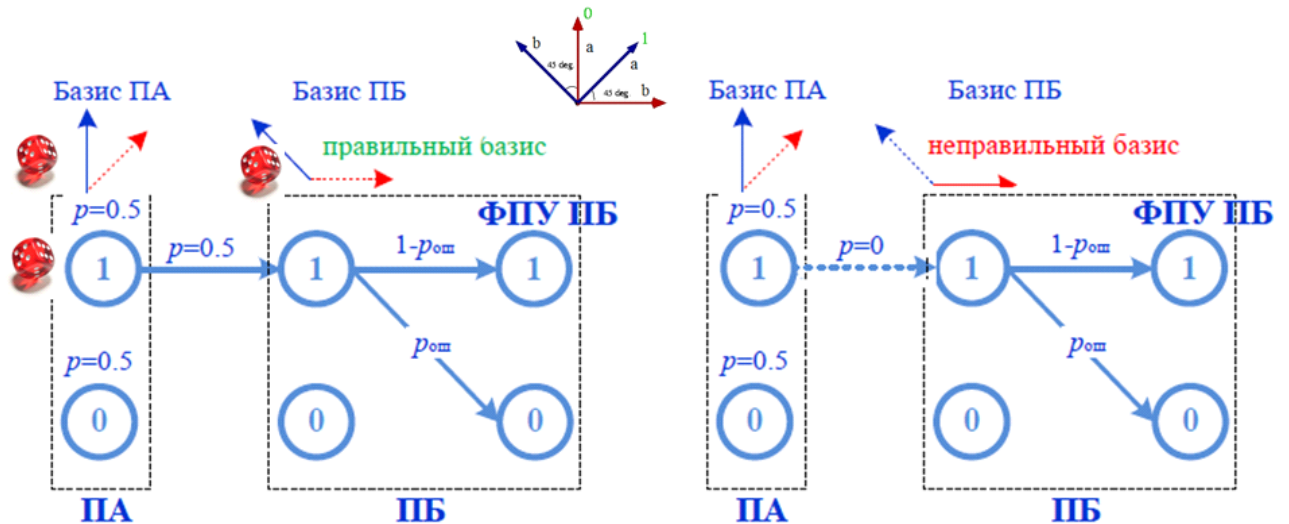


Рис. 4. Граф формирования ключа по протоколу КРК В9

При этом важно отметить, что проекционные измерения, которые выполняются при совпадении передаваемого состояния и базиса для измерения, происходят только для символа «0». Иначе вероятности для появления «0» и «1» составляют 50%.

В том случае, когда ПБ получает в результате измерения «1» - это указывает на то, что он не угадал переданное ПА состояние и соответствующие биты в последовательностях \mathbf{m}_A и \mathbf{m}_B не совпадают. По классическому каналу пользователь Б сообщает номера битов, где получил «1», пользователю А. После инвертирования одним из пользователей ключевой последовательности, на сторонах ПА и ПБ получаются полностью совпадающие ключи \mathbf{k}_{AB} .

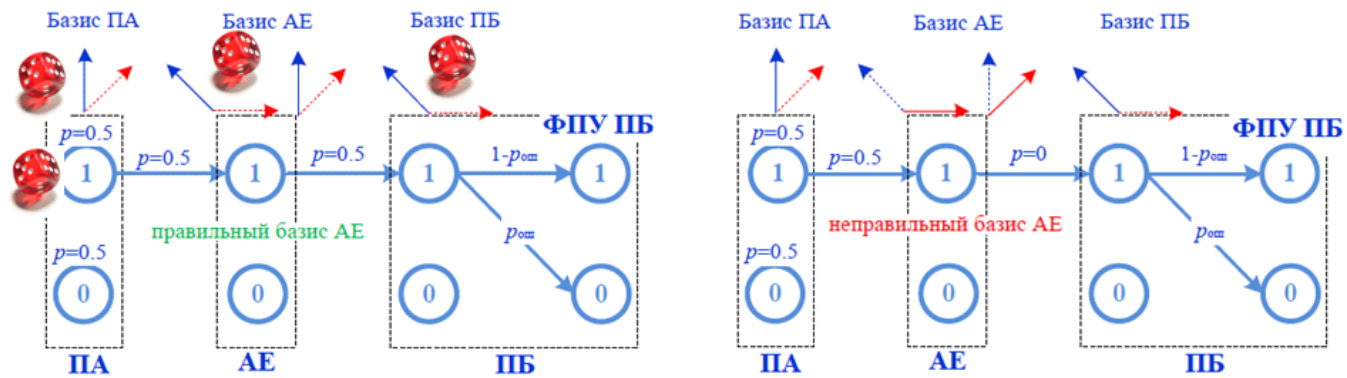


Рис. 5. Граф формирования ключа по протоколу КРК ВВ84 в условиях приема символа 1 и присутствия АЕ.

Поляризационное кодирование в системах КРК

Рассмотрим принцип работы ВВ84 на примере первого предложенного протокола КРК [1-5 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**], в котором $|0\rangle$, $|1\rangle$ выражаются через два состояния поляризации поступательного движения фотона. Такая частица рассматривается как поляризационный кубит (ПК) (polarization qubit) [1-5].

Обычно пары состояний с поляризационным кодированием используют либо прямые с вертикальным (0°) и горизонтальным (90°) состояниями, либо диагональными 45° и 135° ; либо разнонаправленные круговые поляризации. Любые два из этих базисов могут быть использованы в протоколе. Ниже используются прямой и диагональный базисы.

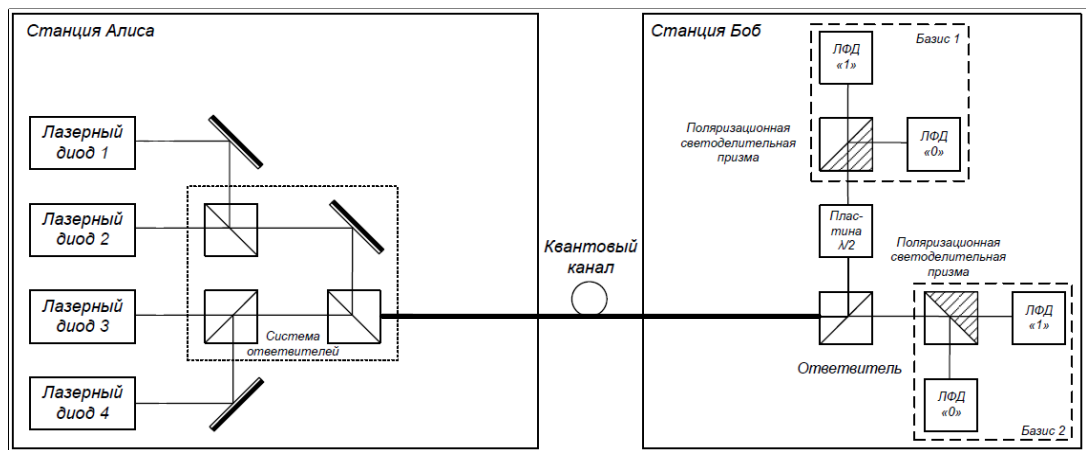


Рис. 6. Структурная схема поляризационного кодирования систем КРК

Первым шагом в ВВ84 является квантовая передача. ПА создает случайный бит (0 или 1), а затем случайным образом выбирает один из двух базисов (прямолинейный или диагональный), чтобы передать его. Затем она готовит состояние поляризации фотона в зависимости от значения бита в базисе. Так, например, 0 кодируется в прямолинейной основе (+) в виде вертикального состояния поляризации, и 1 кодируется в диагональной

основе (х) в виде 135° состоянии. ПА затем передает один фотон в указанном состоянии ПБ используя квантовый канал. Процесс выбора базиса случаен, ПА записывает состояние, базис и время отправки каждого фотона.

Согласно квантовой механике (в частности, квантовой неопределенности), невозможно измерение с различением 4 различных состояниях поляризации, когда они не все ортогональны. Возможно только измерение между любыми двумя ортогональными состояниями (ортонормированный базис). Так, например, измерения в прямом базисе дает результат по горизонтали или по вертикали. Если фотон был создан с горизонтальной или вертикальной поляризацией (прямой базис), то произойдет правильное измерение состояния, но если он был создан как 45° или 135° (диагональный базис), то прямое измерения выдает горизонтальное или вертикальное состояние наугад. Кроме того, после этого измерения вся информация об изначальной поляризации фотона будет потеряна.

Так как ПБ не знает базис фотона, все, что он может сделать, это выбрать базис для измерения наугад либо прямой или диагональный. Он делает это для каждого принятого фотона, записывая время, результат измерения и использованный базис. После приема всех фотонов ПБ общается с ПА по публичному классическому каналу. Пользователь А передает какой базис был использован для каждого отправленного фотона, а пользователь Б базис, который он использовал для измерения. Они оба отбрасывают фотоны (биты), где ПБ использовал другой базис, что составляет половину от общего количества переданного ключа, оставляя половину битов в качестве общего ключа.

Структурная схема системы изображена на рис. 5. Пользователь А отправляет слабые импульсы с одного из четырех лазерных диодов, излучение каждого из которых поляризуется в строго определенном состоянии. Пройдя через систему светоделителей и квантовый канал, фотон попадает на проходит через светоделитель 50/50 на стороне ПБ – таким образом происходит рандомизация выбираемого для измерения базиса.

Для проверки на наличие подслушивания, ПА и ПБ сравнивается определенное подмножество их оставшихся битовых строк. Если нелегитимный пользователь получила информацию о поляризации фотонов, это вносит ошибки в измерения ПБ. В случае превышения порогового уровня в 11%, пользователи А и Б прекращают общения, т.к. возможно наличие в канале связи агента Е.

Существенным фактором, препятствующим применению ОВ для поляризационного кодирования, является поляризационная дисперсия волокна [2-7], приводящая к декогеренции ПК в ОВ, т.е. быстрому разрушению когерентных состояний (1). Поэтому использование ПК в ОВ нежелательно.

АЕ проводит измерения MEAS_E кубита Q_{B_i} , если сигнал зарегистрирован при выбранной поляризации, то текущий ключевой символ KSym_A угадан, если нет (т.е. нет сигнала ФПУ-Е), то АЕ следует просто взять альтернативный символ.

Таким образом, защита протокола В92 основана только на снижении квантового битрейта.

Уровень ошибок в квантовом канале СКРК.

Для защиты квантового канала используют предельный уровень ошибок в квантовом канале, чтобы злоумышленник не смог прятаться под шумами канала. Рассмотрим предельный уровень ошибок в квантовом канале для протокола В92. Для этого будем считать, что канал является актуальной моделью КК с симметричным двоичным каналом (ДСК) без памяти.

Для подсчета предельного уровня ошибок в квантовом канале будем использовать формулу:

$$C_d = 1 + p * \log(p) + (1 - p) * \log(1 - p), \quad (3)$$

где p – уровень ошибок в квантовом канале, C_d – средний битовый объем информации.

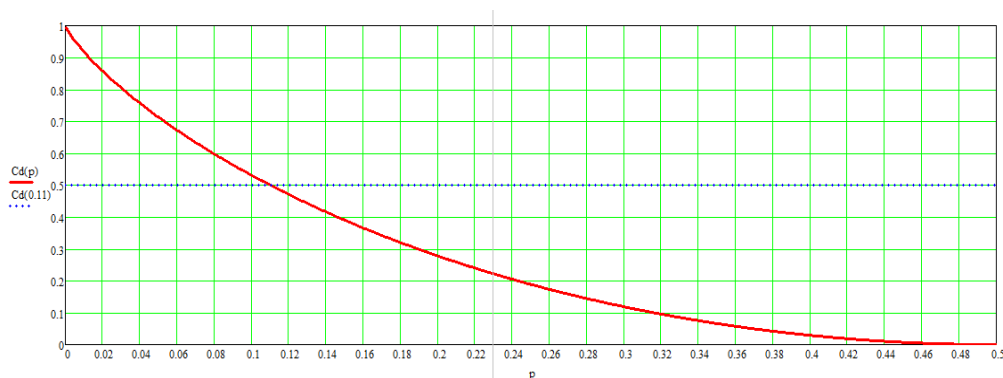


Рисунок 7. Графическое решение уравнения (3)

Из уравнения (3) следует, что при $p=0$ $C_d = 1$, а при приближении $p \rightarrow 0.5$ средний битовый объем передаваемой информации падает до нуля.

Соотношение (3) позволяет оценить предельно допустимый уровень ошибок в квантовом канале связи. Приравнивая данное уравнение к 0.5 мы сможем найти предельный уровень ошибок в квантовом канале который равен 11%.

Для обеспечения работы СКРК, допустимый уровень ошибок должен быть в несколько раз меньше указанной оценки.

Фотоприемное устройство СКРК.

Развитие аппаратуры и элементной базы для регистрации предельно слабых оптических сигналов стимулирует развитие новых оптических технологий передачи данных [8]. Одним из наиболее перспективных такого рода направлений являются системы квантового распределения ключей (КРК), обеспечивающая защищенность цифровых телекоммуникационных систем от несанкционированного доступа [9-12].

Практическое распространение технологий КРК стало возможным после создания лавинных фотодиодов специальной конструкции SPAD (Single Photon Avalanche Diode), способных в режиме так называемой «гейгеровской» моды обеспечивать счет одиночных фотонов без применения сложной системы низкотемпературного термостатирования. Именно характеристики SPAD диодов, вместе с последующим фотоприемным устройством (ФПУ), определяют предельные параметры систем КРК.

В данной работе исследуются возможности применения моделей ФПУ волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) [14,15] для описания SPAD-ФПУ, а также их влияния на основные параметры систем КРК - скорости генерации ключа B и вероятности содержания в нем ошибочных символов.

Зададим структурную схему SPAD-ФПУ канала КРК в виде рис.8.

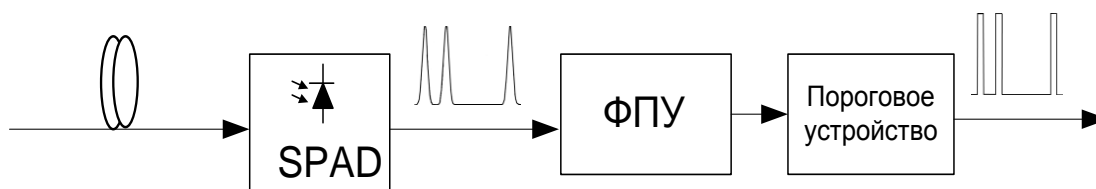


Рис.8. Структурная схема ФПУ канала КРК

В дальнейшем будем считать, что канал построен на основе оптического волокна (ОВ) длиной L и с погонным затуханием α [дБ/км]. Будем полагать, что SPAD работает в гейгеровском режиме с временным стробированием (Time-gated single photon counting - TGSPC), в котором осуществляется динамическое управление формированием лавин за счет дополнительного импульсного питания диода, так называемым, перенапряжением $U-U_t$, где U - рабочее напряжение, U_t – пороговое напряжение лавинного пробоя диода. Квантовую эффективность, коэффициент лавинного умножения и уровень темнового тока диода обозначим как η , M и i_{tt} соответственно. Внутренние шумы предварительного усилителя ФПУ, структурная схема которого представлена на рис.8, представим приведенными к входу шумовыми источниками тока и напряжения S_E, S_I [8,9]. На рис.2

нагрузочный резистор SPAD и суммарная емкость выходной цепи ПУ обозначены как R и C .

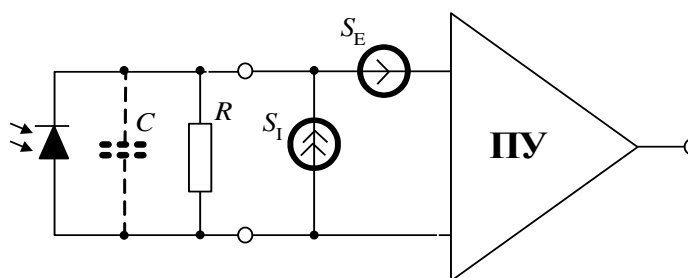


Рис.9. Структурная схема предварительного усилителя ФПУ

Как известно, во всех протоколах технологии КРК секретный ключ K формируется путем многоступенчатой рандомизации «сырого ключа» K_0 первоначально создаваемого на одном конце канала (Алиса) и передаваемого ею «Бобу» путем кодирования каких либо не ортогональных состояний однофотонных посылок светового сигнала [9,12]. Обозначим битовую скорость этого исходного ключа как B_0 , а среднюю скорость генерации символов секретного ключа - B . Разность значений скоростей $B_0 - B$ может быть весьма значительной. Она зависит от параметров SPAD (η , M , i_{tt}), потерь в волокне, порога срабатывания ФПУ U_0 и др. и тесно связана с другой характеристикой помехоустойчивости приемника КРК – вероятностью генерации ложных символов P_f в ключе K . При отыскании оптимальных схемотехнических решений ФПУ необходимо контролировать обе указанные зависимости. Рассмотрим каждую из них.

Прежде всего, заметим, что при формировании Алисой однофотонных посылок на основе первоначального кода K_0 вероятность обнаружения в тактовом интервале n фотонов $p(n)$, при их среднем числе m , описывается пуассоновской статистикой [7-9],

$$p(n) = \frac{(m \cdot \eta)^n e^{-m \cdot \eta}}{n!}, \quad (4)$$

На практике значение m берется ~ 0.1 [11], так, что $p(1) \approx 0.1$, а $p(0) \approx 0.9$. Отсюда следует, что уже на этапе передачи в системе КРК возникает рандомизация последовательности K_0 . Происходит это, однако, за счет десятикратного снижения скорости генерации ключа.

Другие механизмы случайного удаления однофотонных посылок из последовательности K_0 в рассматриваемой технологии связаны с поглощением фотонов в оптическом волокне, ограниченной квантовой эффективностью SPAD η , а также особенностями протоколов КРК. Так в протоколе BB84 коэффициент k_p априорного снижения скорости B_0 составляет 0.5, а в протоколе B92 – 0.25 [11,12].

Еще один фактор снижения скорости B обусловлен внутренними шумами ФПУ, которые, с одной стороны, с вероятностью P_l , приводят к пропускам сигнальных посылок в моменты опроса пороговой схемы, а с другой, с вероятностью P_f - к генерации ложных символов в ключе K . С помощью P_l можно получить оценку для скорости B :

$$B = B_0(1 - P_l)p(1)k_p \exp(\alpha L) \quad (5)$$

Механизм генерации ложных символов в ключе не исчерпывается только шумами ФПУ. При расчете P_f следует учитывать также эффекты афтерпалсинга и спонтанного формирования лавин в SPAD-структуре электронами темнового тока[1]. Если обозначить средние частоты генерации ложных символов в ключе K , обусловленные указанными эффектами соответственно как F_r , F_{ap} и F_{dcr} , то:

$$P_f = (F_r + F_{ap} + F_{dcr}) / B_0 \quad (6)$$

Коэффициент P_f может быть выражен через другой важный системный показатель P_d , называемый эффективностью детектирования фотонов - PDE (Photon Detection Efficiency) [1], который описывает полную вероятность регистрации фотонов системой,

$$P_d = 1 - P_f.$$

Для отыскания вероятностей P_f и P_l воспользуемся методикой расчета помехоустойчивости ВОСП [7-9]. Для этого сделаем несколько допущений.

Первое из них будет касаться формы, вызываемых лавинными процессами импульсов в нагрузке SPAD $u_c(t)$, которую аппроксимируем гауссовой кривой:

$$u_c(t) = \frac{u_0}{\sqrt{2\pi\alpha}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\alpha^2 T^2}\right). \quad (7)$$

где α - параметр формы сигнала, определяющий долю тактового интервала $=1/B_0$, занимаемого сигнальным импульсом $u_c(t)$ (см. рис.3). Физически значение αT описывает время, необходимое для разряда лавины и заряда диодов до номинального напряжения питания. Этот параметр ограничивает максимальную скорость регистрации фотонов и называется мёртвое время (dead time) [1,11]. В дальнейшем будем считать, что длительность τ поддерживающих режим TGSPC стробирующих импульсов так же $\sim \alpha T$.

Заметим так же, что реальный темновой ток i_{tt} при надпробойных напряжениях представляет собой хаотическую последовательность коротких импульсов, средняя частота которой обозначается как F_{dcr} (DCR- dark count rate) [8].

Будем считать, что каждый из импульсов указанной стохастической последовательности формируется за счет запуска лавин отдельными электронами темнового тока. В таком случае эквивалентный заряд DCR-импульсов можно оценить в $\sim M$ -электронов, а их среднюю скважность $\sim 1/\alpha$.

С учетом сделанных замечаний, оценку для частоты F_{dcr} несложно выразить через среднее число темновых электронов n_{tt} в одном импульсе последовательности:

$$F_{dcr} = n_{tt}B_0 = \frac{i_{tt} \cdot \tau \cdot B_0}{e} = \frac{i_{tt} \cdot \alpha}{e}, \quad (9)$$

где e - заряд электрона.

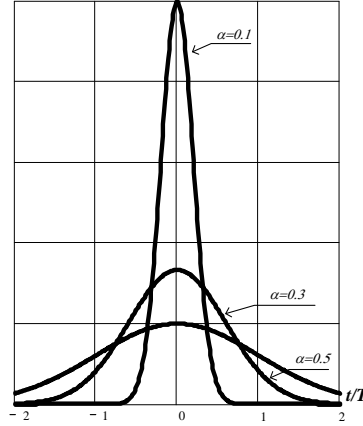


Рис.10. Аппроксимация импульсов в нагрузке SPAD

Из (3),(5) видно существенное влияние длительности стробирующих импульсов на эффективность работы системы КРК. Из этих формул, например, следует, что при больших τ , $n_{tt} \rightarrow 1$, $F_{dcr} \rightarrow B_0$, а $P_f \rightarrow 1$. Это, очевидно, случай заполнения всех тактовых интервалов информационной последовательности ложными темновыми импульсами означающий полную неработоспособность системы.

Определим далее вероятности P_l и P_f , связанные с внутренними источниками шума ФПУ. Среди этих источников рассмотрим шумы нагрузки SPAD и предварительного усилителя ФПУ, общее распределение плотности вероятности $p(n)$ которых будем считать гауссовым, с дисперсией, описываемой безразмерным температурным параметром W [15,16]:

$$W(\alpha) = \frac{S_I}{e^2 B_0} + \frac{4kt}{R \cdot e^2 B_0} + \frac{S_E}{e^2 B_0} \left[\frac{1}{R^2} + (2\pi C)^2 \frac{I(\alpha)}{I(\alpha)} B_0^2 \right]; \quad (10)$$

где t – температура в градусах Кельвина; k – постоянная Больцмана.

Параметр W в (6) имеет смысл эквивалентного числа фотоэлектронов, порождаемых тепловыми шумами нагрузочного резистора и внутренними шумами источников S_E, S_I ФПУ на интервале стробирования τ [14,15].

Коэффициенты I_2, I_3 в формуле (6) называются интегралами Персона и устанавливают соотношение между эффективной шумовой полосой частот ФПУ $B_{\text{эф}}$ и битовой скоростью B_0 как [15,16]:

$$B_{\text{эф}} = B_0 I_2 + C^2 R^2 B_0^3 I_3. \quad (11)$$

При этом второе слагаемое (11) определяет уширение $B_{эф}$, связанное с воздействием на помехоустойчивость КРК внутреннего источника шумового напряжения $e_a(t)$ предварительного усилителя ФПУ (рис.9). Коэффициенты I_2, I_3 выражается через отношение спектров огибающей оптического сигнала на выходе и входе ФПУ. В качестве аргумента этих зависимостей является безразмерная нормированная частота $\Omega = \omega/T$:

$$I_2 = \int_0^\infty \left| \frac{H'_{ВЫХ}(\Omega)}{H_{ВХ}(\Omega)} \right|^2 d\Omega, \quad (12)$$

$$I_3 = \int_0^\infty \left| \frac{H_{ВЫХ}(\Omega)}{H_{Р}(\Omega)} \right|^2 \Omega^2 d\Omega \quad (13)$$

Особенностью технологии КРК является малость времени dead time τ по сравнению с длительностью тактового интервала $T=1/B_0$. Это избавляет от необходимости введения высокочастотной коррекции АЧХ ФПУ, которая обычно используется в ВОСП для восстановления формы принимаемых символов. Здесь становится возможным, наоборот, сужение полосы частот ФПУ и снижение шумов приемника.

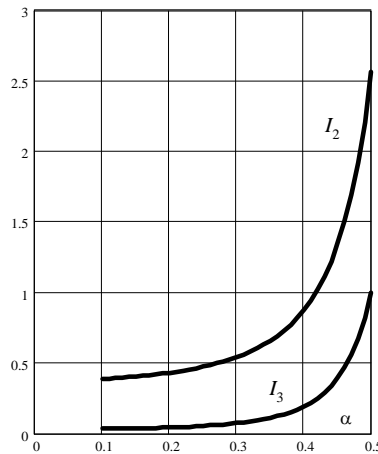


Рис.11. Расчетные зависимости I_2, I_3 от α

Вследствие указанных особенностей системы тракта КРК сигнал $P_c(t)$ на выходе ФПУ системы КРК может значительно уширяться относительно импульсов (4). Обычно допуск на такое отклонения регламентируется требованием минимизации межсимвольной интерференции. Таким свойством обладает, например, широко распространенный тракт с характеристикой $H(f)$ вида «приподнятого косинуса»:

$$H(f) = \frac{1 + \cos\left(\frac{\pi f}{T}\right)}{2}, \quad (14)$$

Для сигналов (4) и АЧХ ФПУ вида (10) зависимости I_2, I_3 в (6), (7) от α изображены на рис.11.

Соотношения (10)-(16) определяют суммарную плотность вероятности шумов в присутствии и в отсутствии сигнальной посылки p_c и p_n . При этом в качестве аргументов данного распределения удобно использовать числа фотоэлектронов n . В таком случае искомые вероятности P_l и P_f запишутся как:

$$P_l = \int_{-\infty}^{U_0} p_c(n) dn, P_f = \int_{-U_0}^{\infty} p_n(n) dn, \quad (15)$$

где U_0 - порог срабатывания ФПУ, выраженный через n .

Подставляя значение P_f из (11) в формулу (3), можно отыскать среднюю частоту F_r генерации ложных импульсов секретного кода, вызываемых внутренними шумами ФПУ:

$$F_r = P_f B_0 \quad (16)$$

Представленная выше модель позволяет связать основные параметры канала КРК по скорости генерации ключа и вероятностью содержания в нем ошибочных символов с характеристиками фотоприемника, построенного на основе SPAD- структуры.

Программная модель отоприемного устройства СКРК.

Для моделирования работы ФПУ СКРК в лабораторной работе используется MachCad программа «Ошибки ФПУ в СКРК». Ее структура отражается графами на рис. 2,3 и включает следующие разделы:

- **Раздел фундаментальных постоянных:**

$$(h := 6.62 \cdot 10^{-34}) \quad (k := 1.38 \cdot 10^{-23}) \quad \text{постоянные Планка и Больцмана}$$

$$(q := 1.6 \cdot 10^{-19}) \quad \text{заряд электрона}$$

$$t := 260 \quad \text{температура среды СКРК (К)}$$

$$\lambda := 1.55 \cdot 10^{-6} \quad \text{длина световой волны (мкм)}$$

$$\left(\nu := 3 \cdot \frac{10^8}{\lambda} \right) \quad \text{частота световой волны (мкм)}$$

- **Раздел расчета средней мощности сигнала:**

$$B := 1 \cdot 10^8 \quad \text{битовая скорость СП (бит/с)}$$

$$\left(T := \frac{1}{B} \right) \quad \text{длительность тактового интервала (с)}$$

$$\tau_0 := 1 \cdot 10^{-9} \quad \text{длительность сигнального импульса (с)}$$

$$P_0 := h \cdot \frac{\nu}{\tau_0} \quad \text{мощность сигнального импульса Pс, Вт}$$

Распределение Гаусса

$$Pg(u, u_0, \sigma) := \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(u - u_0)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right]$$

$nc := 0.1$	среднее число фотоэлектронов
$Pc := nc \cdot Po$	средняя мощность сигнала Pc, Вт
$(Ls := 20)$	длина линии передачи (км)
$(\alpha := 0.25)$	коэффициент затухания сигнала в тракте СП (дБ/км)
$\left(P_{C_{\text{ср}}} := Pc \cdot 10^{-\frac{(\alpha \cdot Ls)}{10}} \right)$	средний уровень сигнала на входе приемника системы КРК

• **Модуль расчета помехоустойчивости системы КРК:**

$R_{\text{н}} := 1 \times 10^7$	R - сопротивление нагрузки ЛФД
$C := 1 \cdot 10^{-14}$	C - емкость фотодиода
$R_{\text{max}} := \frac{1}{2 \cdot C \cdot B} = \bullet$	
$itt := 1 \cdot 10^{-9}$ ($\tau_0 := 0.8$)	темновой ток (А), квантовая эффективность ЛФД
$M := 50$	коэффициент лавинного размножения ЛФД
$n_{\text{tt}} := \left(itt \cdot \frac{\tau_0}{q} \right)$	число шумовых фотоэлектронов темнового тока

Параметры предварительного усилителя ФПУ

qm, Γ - крутизна (См), ток утечки затвора (А) и коэффициент шума (дБ) полевого транзистора	
$qm := 40 \times 10^{-3}$ $\Gamma_d := 1$ $I_{\text{in}} := 1 \times 10^{-11}$	
$\left((\Gamma) := 10^{\frac{\Gamma_d}{10}} \right)$ $(\Gamma) = 1.259$	
$S_{\text{ai}}, S_{\text{ae}}$ - эквивалентные шумовые источники полевого транзистора	
$(S_{\text{ai}} := 2 \cdot q \cdot I_{\text{in}})$ $\left(S_{\text{ae}} := \frac{4 \cdot k \cdot t \cdot \Gamma}{qm} \right)$	
$\alpha_1 := \frac{\tau_0}{T}$ $\alpha_1 = 0.1$	

$$\left(I_2(\alpha) := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{16 \cdot \alpha^2 x^2} \cdot (\cos(x))^4 dx \right) \quad \text{Второй интеграл Персона}$$

$$\left(I_3(\alpha) := \left(\frac{2}{\pi} \right)^3 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{16 \cdot \alpha^2 x^2} \cdot x^2 \cdot (\cos(x))^4 dx \right) \quad \text{Третий интеграл Персона}$$

W-бездразмерный температурный шумовой параметр усилителя ФПУ

$$(W(itt, t)) := \left(2 \cdot \frac{itt \cdot I_2(\alpha_1)}{q \cdot B} \right) + \left[\frac{I_2(\alpha_1)}{(q^2 \cdot B)} \cdot \left(S_{\text{ai}} + \frac{4 \cdot k \cdot t}{R} + \frac{S_{\text{ae}}}{R^2} \right) + S_{\text{ae}} \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot C^2 \cdot B \cdot I_3(\alpha_1)}{q^2} \right]$$

$$\underline{N} := (W(\text{itt}, t))^{0.5} = 16.319$$

Суммарное распределение шумов $P(n)$

$$P_n(n, \text{itt}, t) := P_g(n, 0, (W(\text{itt}, t))^{0.5})$$

Распределение смеси сигнала и шума $P_c(n)$

$$P_c(n, \text{itt}, t) := P_g(n, M, (W(\text{itt}, t))^{0.5})$$

Пороговый уровень сигнала L

$$L(s) := sM$$

$$\int_{-15N}^{15N} P_n(n, \text{itt}, t) \, dn = 1$$

$$\int_{-15N}^{15N} P_c(n, \text{itt}, t) \, dn = 1$$

$$n := -4(N) .. 1.5(N + M)$$

Вероятность ложного сигнала $P_f(n)$

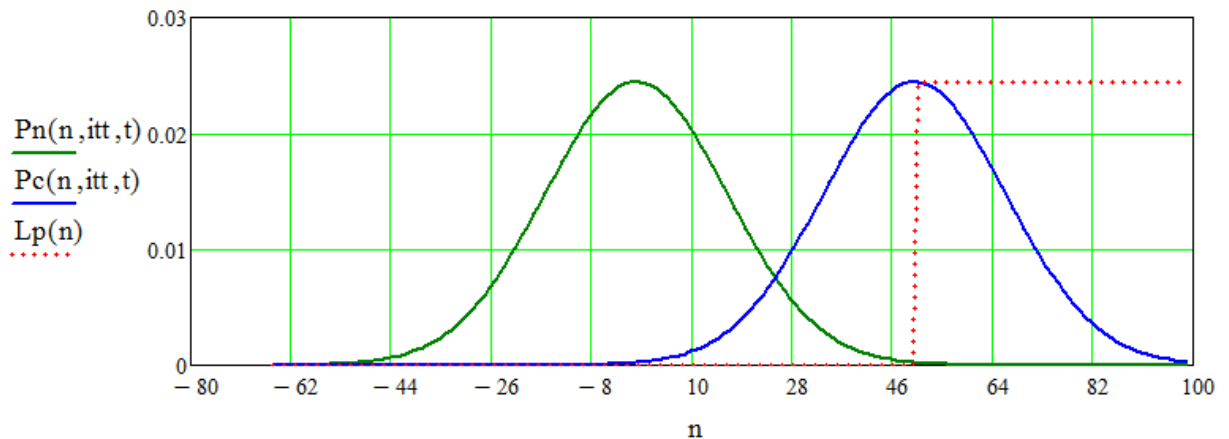
$$(P_f(s, \text{itt}, t)) := 0.5 \cdot \int_{L(s)}^{15N} (P_n(n, \text{itt}, t)) \, dn$$

Вероятность пропуска сигнала $P_l(n)$

$$(P_l(s, \text{itt}, t)) := \int_{-15N}^{L(s)} (P_c(n, \text{itt}, t)) \, dn$$

$$a := 1 \quad (\Lambda(n) := \text{if}(n \geq 0, 1, 0))$$

$$L_p(n) := \Lambda(n - L(a)) \cdot (P_n(0, \text{itt}, t))$$



Распределения вероятностей шумовых отсчетов и смеси сигнал-шум на выходе ФПУ

Рекомендуемая литература

1. Дирак П. Принципы квантовой механики. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 480 с.

2. Кулик С.Д., Берков А.В., Яковлев В.П. Введение в теорию квантовых вычислений (методы квантовой механики в кибернетике): учебное пособие. Т. 2. М.: МИФИ, 2008. – 532 с.
3. Имре Ш., Балаж Ф. Квантовые вычисления и связь. Инженерный подход. Пер. с англ. М.: Физматлит, 2008. – 320 с.
4. Килин С.Я., Хорошко Д.Б., Низовцев А.П. Квантовая криптография: идеи и практика. Минск: Белорусская наука, 2008. – 392 с.
5. Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. Физика Квантовой Информации. Пер. с англ. М.: Постмаркет, 2002. – 376 с.
6. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. Пер. с англ. М.: Мир, 2006. – 824 с.
7. Емельянов В.И., Владимирова Ю.В. Квантовая физика: биты и кубиты: учеб. пособие. М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 176 с.
8. Laser Pulse Phenomena and Applications. Edited by Dr. F. J. Duarte Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. 2010. ISBN 978-953-307-405-4
9. Bennett C H, Brassard G "Quantum cryptography: public-key distribution and coin tossing", in Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computers Systems, and Signal Processing, Bangalore, India, December 1984 (New York: IEEE Press, 1984) p. 175
10. Nicolas Gisin, Grégoire Ribordy, Wolfgang Tittel, and Hugo Zbinden. Reviews of Modern Physics – January - March 2002 Volume 74, Issue 1 Published 8 March 2002/ pp. 145-195
11. Килин С. Я. Квантовая информация / Успехи Физических Наук. — 1999. — Т. 169. — С. 507—527.
12. С. Н. Молотков Квантовая криптография и теоремы В. А. Котельникова об одноразовых ключах и об отсчетах // Успехи физических наук. - 2006. - Т. 176, N 7. - С. . 777-788.
13. И.В. Ванюшин, В.А. Гергель, В.М. Гонтарь, В.А. Зимогляд, Ю.И. Тишин, В.А. Холоднов, И.М. Щелева Дискретная модель развития и релаксации локального микропробоя в кремниевых лавинных фотодиодах в режиме Гейгера // Физика и техника полупроводников, 2007, том 41, вып. 6, с.741-745.
14. Personick S.D. Receiver design for digital fiber optic communication systems / S.D.Personick // Bell. Sys. Tech. J. – 197 – Vol. 52, № 6. – P. 843-886.
15. Keiser G. Optical Fiber Communications – New York : McGraw-Hill Inc., 1991. – 461 p.
16. Optische Kommunikationstechnik. Handbuch fur Wissenschaft und Industrie /E. Voges, K. Petermann. – Berlin : Springer-Verlag, 2002. – 1110 s.

1. Лабораторная работа.

Исследование С КРК на основе протокола BB84

Цель работы

1. Изучить принципы поляризационного кодирования кубитов в СКРК на основе протокола BB84 (СКРК-BB84).
2. Ознакомиться с методами контроля защищенности СКРК-BB84 от внешних атак.
3. Исследовать зависимость вероятности ошибок в каналах СКРК от уровня шумов приемника и длины квантового канала.

Домашнее задание к работе

1. Изучить назначение основных элементов структурной схемы СКРК-BB84 и ее основные характеристики.
2. В среде MatchCad провести моделирование СКРК-BB84 для заданных параметров квантового канала, фотоприемного устройства и скорости формирования секретного ключа. Рассчитать протяженность квантового канала СКРК-BB84, при котором достигается заданная вероятность ошибки формирования ключевой последовательности.
3. Изучить структуру фотоприемного устройства (ФПУ) СКРК-BB84, способов моделирования его помехозащищенности.
4. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.

Описание программного обеспечения лабораторной работы

Работа проводится на программной модели системы КРК-BB84 (файл «0 Модель СКРК BB84») и ее фотоприемного устройства (файла «0 Ошибки ФПУ СКРК»).

Структура программы «0 Модель СКРК BB84» содержит следующие разделы:

- **Функции задания базисов: осуществляющие формирование прямого и наклонного плоских прямоугольных базисов для кодирования и декодирования кубитов:**

X_{Ya0} и X_{Ya1} - Случайные прямой и наклонный прямоугольные базисы для кодирования кубитов на стороне А

$$X_{Ya0} := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad X_{Ya1} := \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

X_{Yb0} и X_{Yb1} - Случайные прямой и наклонный прямоугольные базисы для декодирования кубитов на стороне Б

$$X_{Yb0} := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad X_{Yb1} := \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

X_{Ye0} и X_{Ye1} - Случайные прямой и наклонный прямоугольные базисы для декодирования кубитов на АЕ

$$X_{Ye0} := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad X_{Ye1} := \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

- **Функции приготовления состояния кубита пользователем А:**

$x_0 := \text{trunc}(\text{rnd}(2)) = 0$ x_0 и x_1 - Случайные символы, переносимые кубитами стороны А

$$x_1 := 1 - x_0 = 1 \quad \text{KSym}_A := \begin{cases} 1 & \text{if } x_0 = 1 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{KSym}_A \text{- значение передаваемого символа} \\ \text{KSym}_A = -1 \end{array}$$

$$x := \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$m_A := \text{trunc}(\text{rnd}(2)) = 0$ $XY_{mA} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ - состояние базиса на стороне А

$\text{QBit} := XY_{mA} \cdot x = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ QBit - кубит, сформированный на стороне А

- **Функции действий нелегитимного агента Е в СКРК:**

$m_E := \text{trunc}(\text{rnd}(2)) = 1$ XY_e - состояние базиса на стороне Е

$$XY_e := XY_{e_mE} = \begin{pmatrix} -0.707 & 0.707 \\ 0.707 & 0.707 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} m_A = 0 \\ m_E = 1 \end{array}$$

Приготовление фальшивого кубита QBit_E АЕ в базисе XY_e

$$\text{QBit}_E := XY_e \cdot \text{QBit} = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.707 \end{pmatrix}$$

- **Функции действий легитимного пользователя Б в СКРК:**

$m_B := \text{trunc}(\text{rnd}(2)) = 0$ - состояние базиса на стороне Б

$$XY_b := XY_{b_mB} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Результат измерения MEAS кубита QBit_E на стороне Б в базисе XY_{b_m}

$$\text{MEAS} := XY_b \cdot \text{QBit}_E = \begin{pmatrix} 0.707 \\ 0.707 \end{pmatrix} \quad \text{MEAS} := XY_b \cdot \text{QBit} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Вероятности правильных измерений состояния кубита на стороне Б

$$\left(\text{MEAS}^2 \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad d := \left| (\text{MEAS}_0)^2 - (\text{MEAS}_1)^2 \right| = 1$$

$d=0$ - признак нечеткого измерения) на стороне А, если $d=1$, то измерение четкое.

Результат D правильных измерений кубита стороной Б:

$$\text{MEAS}_0 - \text{MEAS}_1 = -1$$

$$D := \begin{cases} (\text{MEAS}_0 - \text{MEAS}_1) & \text{if } d \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad D = -1$$

$D=0$ означает, что результат измерений кубита нужно отбросить через протокольное соглашение. Это измерение содержит неопределенность:

$$\text{QBer} := 0 \quad \text{QBer}_2 := 0 \quad \text{QBer}_3 := 0 \quad B := 0$$

$$\text{divide} := \left(\text{MEAS}^2 \right)_0 = 0 \quad \text{NN} := 10 \quad \text{NN} \text{- число измерений на стороне Б}$$

- **Модуль расчета QBer- коэффициента квантовых ошибок:**

Ppass - вероятность пропуска кубита;

Pincorrest - вероятность неправильного детектирования кубита;

$$Ppass := 0.4 \quad Pincor := 0.1$$

$$\text{Prob}(x, \text{divide}) := \begin{cases} z \leftarrow 1 & \text{if } x \leq \text{divide} \\ z \leftarrow -1 & \text{otherwise} \\ \text{return } z \end{cases}$$

$$\text{PDincor}(V, x, Pincor) := \begin{cases} z \leftarrow -V & \text{if } x \leq Pincor \\ z \leftarrow V & \text{otherwise} \\ \text{return } z \end{cases} \quad \text{PDpass}(V, x, Ppass) := \begin{cases} z \leftarrow 0 & \text{if } x \leq Ppass \\ z \leftarrow V & \text{otherwise} \\ \text{return } z \end{cases}$$

$$i := 0..NN - 1$$

$$p := \text{runif}(NN, 0, 1)$$

$$KSym_B_i := \text{Prob}[(p)_i, \text{divide}] \quad \underline{QBer} := \sum_{i=0}^{NN-1} (KSym_B_i - KSym_A)$$

Расчет QBer- коэффициента квантовых ошибок, проц.

$$\underline{QBer} := \begin{cases} (-QBer) \cdot \frac{100}{2NN} & \text{if } KSym_A = 1 \\ (QBer) \cdot \frac{100}{2NN} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$QBer = 0$$

- Модуль расчета ошибок, вносимых фотоприемником (ФПУ):

Расчет ошибок, при регистрации кубитов в ФПУ

$$KSym_B_i := \text{PDincor}[KSym_B_i, (p)_i, Pincor] \quad \underline{QBer2} := \sum_{i=0}^{NN-1} (KSym_B_i - KSym_A)$$

$$\underline{QBer2} := \begin{cases} (-QBer2) \cdot \frac{100}{2NN} & \text{if } KSym_A = 1 \\ (QBer2) \cdot \frac{100}{2NN} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$QBer2 = 20$$

$$j := 0..NN - 1$$

$$p_j := \text{runif}(NN, 0, 1)$$

Расчет пропусков кубитов ФПУ

$$KSym_B_j := \text{PDpass}[KSym_B_j, (p)_j, Ppass] \quad \underline{QBer3} := \sum_{j=0}^{NN-1} (KSym_B_j - KSym_A \cdot |KSym_B_j|)$$

$$\underline{QBer3} := \begin{cases} (-QBer3) \cdot \frac{100}{NN} & \text{if } KSym_A = 1 \\ (QBer3) \cdot \frac{100}{NN} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$QBer3 = 40$$

- **Модуль расчета относительной скорости формирования ключа B :**

$$B := \frac{\left(\sum_{j=0}^{NN-1} |K_{Sym_Bj}| \right)}{NN} = 0.8$$

- **Модуль расчета B_c - битрейта сигнальных отсчетов (бит/с.) системы КРК:**

$$(K_{pr} := 0.5)$$

K_{pr} - протокольный коэффициент снижения скорости K_{pr} ,

$$(nc) = 0.1$$

nc - среднее число фотоэлектронов в сигнальной посылке

$$\gamma := 10$$

γ - затухание сигнальной посылки на трассе длиной L_s , $\gamma = \alpha \cdot L_s$, дБ

$$(\eta := 0.8)$$

η - квантовая эффективность ЛФД

$$(B) = 1 \times 10^8$$

B - исходный битрейт на стороне А

$$t = 260$$

t - абсолютная температура среды СКРК (К)

$$B_c(s, \text{itt}, \gamma, t) := \eta B \cdot (1 - (Pl(s, \text{itt}, t))) \cdot nc \cdot K_{pr} \cdot 10^{\frac{-(\gamma)}{10}}$$

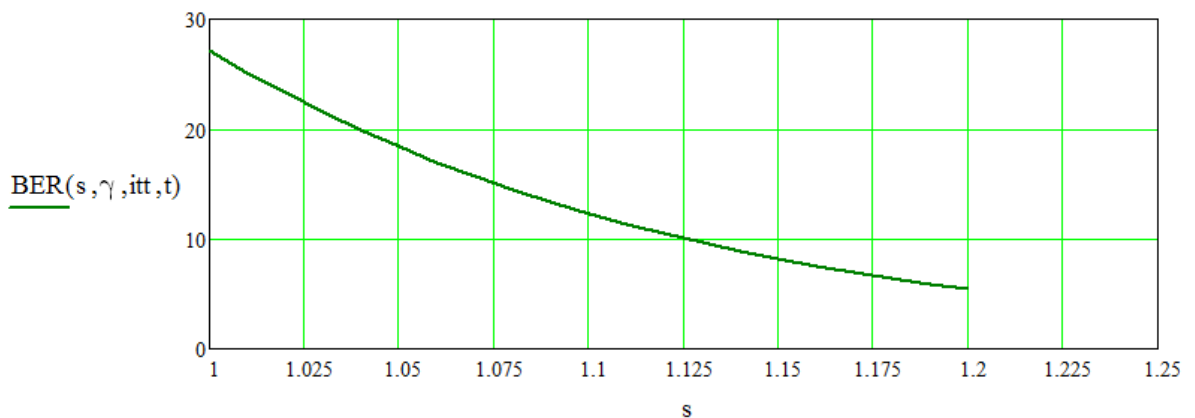
Расчет B_n - битрейта шумовых отсчетов, бит/с.

$$(B_n(s, \text{itt}, t)) := B \cdot (Pf(s, \text{itt}, t)) \cdot \left[1 - \eta nc \cdot K_{pr} \cdot 10^{\frac{-(\gamma)}{10}} \right]$$

Расчет B_{er} - процента ошибок в квантовом канале СКРК, проц.

$$(BER(s, \gamma, \text{itt}, t)) := (Pf(s, \text{itt}, t)) \cdot \frac{\left[1 - \eta nc \cdot K_{pr} \cdot 10^{\frac{-(\gamma)}{10}} \right] \cdot 100}{\left[\eta (1 - (Pl(s, \text{itt}, t))) \cdot nc \cdot K_{pr} \cdot 10^{\frac{-(\gamma)}{10}} \right]}$$

$$s := 1.0, 1.01 .. 1.2$$



Зависимость V_c - битрейта сигнальных отсчетов (бит/с.) от порога срабатывания
компаратора ФПУ СКРК

Лабораторное задание

1. Каждому студенту, в соответствии с его порядковым номером и таблицей 1, заданы:
 - протокол, определяющий коэффициент снижения скорости СКРК;
 - длина и погонное затухание квантового канала на основе одномодового ОВ;
 - длина световой волны;
 - температура среды СКРК, град.К;
 - коэффициент лавинного размножения, темновой ток и квантовая эффективность лавинного фотодиода (ЛФД);
 - емкость и сопротивление нагрузки ЛФД;
 - крутизна (Сим), ток утечки затвора (А) и коэффициент шума (дБ) полевого транзистора фотоприемного устройства (ФПУ) СКРК;
 - эквивалентные шумовые источники полевого транзистора ФПУ;
 - допустимый уровень QBER - процента ошибок в квантовом канале СКРК (проц.);
 - необходимая скорость формирования «сырого» ключа V_c – битрейт;
2. С помощью предложенной модели СКРК выполнить следующие действия:
 - Ознакомится с интерфейсом программы;
 - Исследовать структурную схему СКРК для квантового канала и выбранной длины световой волны;
 - Рассчитать зависимости вероятностей пропуска и ложного сигнала отнормированного порога срабатывания компаратора ФПУ СКРК s ;
 - Провести расчет зависимости V_c - битрейта сигнальных отсчетов, бит/с. от порога s ;
 - Определить необходимые температуру среды СКРК и порог срабатывания компаратора ФПУ СКРК, обеспечивающие заданный уровень V_c ;
3. Подготовить отчет, в котором дать объяснения полученным результатам.

Таблица 1. Варианты лабораторных заданий.

№ п./п	Протокол КРК	Рабочая длина волны, нм.	QBER, %	α , дБ/км	L , км	B_c , бит/с.
1	BB84	800	5	0.1	20	$5 \cdot 10^3$
2	B92	1300	8	0.2	40	$3 \cdot 10^4$
3	BB84	1550	3	0.5	120	$2 \cdot 10^1$

Содержание отчета

1. Структурная схема СКРК-BB84.

1 Результаты расчетов по п.п. 2 домашнего задания;

2. Структурная схема оптического приемника;

4 Результаты моделирования процессов формирования секретных ключей в условиях помех СКРК в виде таблиц и графиков;

5 Выводы по результатам симуляции работы СКРК-BB84.

Контрольные вопросы

1. Поясните основные особенности кубитов как единицы квантовой информации.

2. Какие ограничения вносит эффект декогеренции в работу систем КРК?

3. Как выбирается значение частоты квантовых частиц в СКРК?

4. Поясните идею шифрования с помощью одиночных фотонов.

Рекомендуемая литература

1. **Задорин А. С.** Методы и устройства радиофотоники в системах радиосвязи. Методические указания по выполнению практических работ: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 109 с.

2. Лабораторная работа.

Исследование С КРК на основе протокола В92

Цель работы

1. Изучить принципы поляризационного кодирования кубитов в СКРК на основе протокола В92 (СКРК-В92).
2. Ознакомиться с методами контроля защищенности СКРК-В92 от внешних атак.
3. Исследовать зависимость вероятности ошибок в каналах СКРК от уровня шумов приемника и длины квантового канала.

Домашнее задание к работе

1. Изучить назначение основных элементов структурной схемы СКРК-В92 и ее основные характеристики.
2. В среде MatchCad провести моделирование СКРК-В92 для заданных параметров квантового канала, фотоприемного устройства и скорости формирования секретного ключа. Рассчитать протяженность квантового канала СКРК-В92, при котором достигается заданная вероятность ошибки формирования ключевой последовательности.
3. Изучить структуру фотоприемного устройства (ФПУ) СКРК-В92, способов моделирования его помехозащищенности.
4. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.

Описание программного обеспечения лабораторной работы

Работа проводится на программной модели системы СКРК-В92 (файл «0 Модель СКРК-В92») и ее фотоприемного устройства (файла «0 Ошибки ФПУ СКРК»).

Структура программы «0 Модель СКРК-В92» отражается графами на рис. 4,5 и включает следующие разделы: содержит следующие разделы:

- **Модуль задания базисных векторов, для кодирования и декодирования кубитов:**

XU_{a_0} и XU_{a_1} - Два случайных состояния кубитов в неортогональном базисе при их кодировании символами 0 и 1 на стороне А

$$XU_{a_0} := \frac{(1 \ 1)}{\sqrt{2}} \quad XU_{a_1} := (0 \ 1)$$

XU_{b_0} и XU_{b_1} - Два случайных состояния кубитов в неортогональном базисе при декодировании символов 0 и 1 на стороне Б

$$XU_{b_0} := (1 \ 0) \quad XU_{b_1} := \frac{(-1 \ 1)}{\sqrt{2}}$$

XU_{em_0} и XU_{em_1} - Два случайных состояния кубита в неортогональном базисе при их измерении агентом АЕ

$$XU_{em_0} := (1 \ 0) \quad XU_{em_1} := \frac{(-1 \ 1)}{\sqrt{2}}$$

XU_{ep_0} и XU_{ep_1} - Два случайных состояния кубита в неортогональном базисе при его приготовлении агентом АЕ

$$XU_{ep_0} := \frac{(1 \ 1)}{\sqrt{2}} \quad XU_{ep_1} := (0 \ 1)$$

- **Модуль приготовления состояния кубита пользователем А:**

- случайный выбор состояний передаваемого символа и кубита стороной А

$$k_A := \text{trunc}(\text{rnd}(2)) = 0 \quad XU_{a_{k_A}} = (0.707 \ 0.707) \quad k_A = 0$$

$$QBit := XU_{a_{k_A}} = (0.707 \ 0.707) \quad QBit - \text{кубит, сформированный на стороне А}$$

$$KSym_A := \begin{cases} 1 & \text{if } k_A = 1 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad KSym_A - \text{значение передаваемого символа} \\ KSym_A = -1$$

- **Модуль действий нелегитимного агента Е в СКРК:**

$$m_E := \text{trunc}(\text{rnd}(2)) = 0$$

XU_{em} - выбор АЕ состояния измеряемого кубита

$$XU_{em} := XU_{em_{m_E}} = (1 \ 0) \quad m_E = 0$$

MEAS_E - результат измерения АЕ состояния принятого кубита

$$MEAS_E := QBit \cdot XU_{em}^T = 0.707$$

Приготовление фальшивого кубита QBitE АЕ в базисе XU_{ep}

$$QBitE := MEAS_E \cdot QBit = (0.5 \ 0.5)$$

$$QBitE := \begin{cases} XU_{ep_{m_E}} & \text{if } MEAS_E = 0 \\ QBit & \text{otherwise} \end{cases} \quad QBitE := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot QBitE$$

- **Модуль действий легитимного пользователя Б в СКРК:**

$$m_B := \text{trunc}(\text{rnd}(2)) = 1 \quad - \text{выбор состояния измеряемого кубита на стороне Б}$$

$$XU_{b_m} := XU_{b_{m_B}} = (-0.707 \ 0.707) \quad k_A = 0 \quad m_B = 1 \quad m_E = 0$$

$$Sym_B := \begin{cases} 1 & \text{if } m_B = 1 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad XU_{b_m} = (-0.707 \ 0.707) \\ Sym_B = 1$$

Результат измерения MEAS_B кубита QBit на стороне Б в базисе $XU_{b_{m_B}}$

$$MEAS_B := QBitE \cdot XU_{b_m}^T = 0 \quad MEAS_B := QBit \cdot XU_{b_m}^T = 0$$

Вероятности правильного измерения состояния кубита стороной Б

$$\left(\text{MEAS_B}^2 \right) = 0$$

$$\text{QBer} := 0 \quad \text{QBer2} := 0 \quad \text{QBer3} := 0 \quad \text{B} := 0$$

$$\text{divide} := \left(\text{MEAS_B}^2 \right) = 0 \quad \text{NN} := 100 \quad \text{NN- число измерений на стороне Б}$$

$$\text{Ppass} := 0.1 \quad \text{Pincor} := 0.05$$

$$\text{Prob}(x, \text{divide}) := \begin{cases} z \leftarrow \text{Sym_B} & \text{if } x \leq \text{divide} \\ z \leftarrow 0 & \text{otherwise} \\ \text{return } z \end{cases}$$

$$\text{PDincor}(V, x, \text{Pincor}) := \begin{cases} z \leftarrow -V & \text{if } x \leq \text{Pincor} \\ z \leftarrow V & \text{otherwise} \\ \text{return } z \end{cases} \quad \text{PDpass}(V, x, \text{Ppass}) := \begin{cases} z \leftarrow 0 & \text{if } x \leq \text{Ppass} \\ z \leftarrow V & \text{otherwise} \\ \text{return } z \end{cases}$$

$$i := 0.. \text{NN} - 1$$

$$p := \text{runif}(\text{NN}, 0, 1)$$

$$\text{KSym_E}_i := \text{Prob}[(p)_i, \text{divide}] \quad \text{QBer} := \sum_{i=0}^{\text{NN}-1} \left(\text{KSym_E}_i - \text{KSym_A} \cdot \left| \text{KSym_E}_i \right| \right)$$

- *Модуль расчета QBer- коэффициента квантовых ошибок:*

$$\text{QBer} := \begin{cases} (-\text{QBer}) \cdot \frac{100}{2\text{NN}} & \text{if } \text{KSym_A} = 1 \\ (\text{QBer}) \cdot \frac{100}{2\text{NN}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{QBer} = 0$$

Расчет ошибок, при регистрации кубитов в ФПУ

Ppass - вероятность пропуска кубита;

Pincogest - вероятность неправильного детектирования кубита;

$$p := \text{runif}(\text{NN}, 0, 1)$$

$$n := 0.. \text{NN} - 1$$

- Модуль расчета ошибок, вносимых фотоприемником (ФПУ):

Расчет пропусков кубитов ФПУ

$$\text{KSym_E}_j := \text{PDpass}[\text{KSym_E}_j, (p)_j, \text{Ppass}]$$

$$\text{QBer3} := \sum_{j=0}^{\text{NN}-1} \left(\text{KSym_E}_j - \text{KSym_A} \cdot \left| \text{KSym_E}_j \right| \right)$$

$$\text{QBer3} := \begin{cases} (-\text{QBer3}) \cdot \frac{100}{\text{NN}} & \text{if } \text{KSym_A} = 1 \\ (\text{QBer3}) \cdot \frac{100}{\text{NN}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{QBer3} = 0$$

Расчет пропусков кубитов ФПУ

$$KSym_E_j := PDpass[KSym_E_j, (p)_j, Ppass]$$

$$QBer3 := \sum_{j=0}^{NN-1} (KSym_E_j - KSym_A \cdot |KSym_E_j|)$$

$$QBer3 := \begin{cases} (-QBer3) \cdot \frac{100}{NN} & \text{if } KSym_A = 1 \\ (QBer3) \cdot \frac{100}{NN} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$QBer3 = 0$$

- **Модуль расчета относительной скорости формирования ключа B :**

$$B := \frac{\left(\sum_{j=0}^{NN-1} |KSym_E_j| \right)}{NN} = 0.8$$

Лабораторное задание

- Каждому студенту, в соответствии с его порядковым номером и таблицей 1, заданы:
 - протокол, определяющий коэффициент снижения скорости СКРК;
 - длина и погонное затухание квантового канала на основе одномодового ОВ;
 - длина световой волны;
 - температура среды СКРК, град.К;
 - коэффициент лавинного размножения, темновой ток и квантовая эффективность лавинного фотодиода (ЛФД);
 - емкость и сопротивление нагрузки ЛФД;
 - крутизна (Сим), ток утечки затвора (А) и коэффициент шума (дБ) полевого транзистора фотоприемного устройства (ФПУ) СКРК;
 - эквивалентные шумовые источники полевого транзистора ФПУ;
 - допустимый уровень QBER - процента ошибок в квантовом канале СКРК (проц.);
 - необходимая скорость формирования «сырого» ключа B_c – битрейт;
- С помощью предложенной модели СКРК выполнить следующие действия:
 - Ознакомится с интерфейсом программы;
 - Исследовать структурную схему СКРК для квантового канала и выбранной длины световой волны;
 - Рассчитать зависимости вероятностей пропуска и ложного сигнала отнормированного порога срабатывания компаратора ФПУ СКРК s ;

- Провести расчет зависимости B_c - битрейта сигнальных отсчетов, бит/с. от порога s ;
 - Определить необходимые температуру среды СКРК и порог срабатывания компаратора ФПУ СКРК, обеспечивающие заданный уровень B_c ;
5. Подготовить отчет, в котором дать объяснения полученным результатам.

Таблица 1. Варианты заданий.

№ п./п	Протокол КРК	Рабочая длина волны, нм.	QBER, %	α , дБ/км	L , км	B_c , бит/с.
1	BB84	800	5	0.1	20	$5 \cdot 10^3$
2	B92	1300	8	0.2	40	$3 \cdot 10^4$
3	BB84	1550	3	0.5	120	$2 \cdot 10^1$

Содержание отчета

1. Структурная схема СКРК-B92.
 - 1 Результаты расчетов по п.п. 2 домашнего задания;
 2. Структурная схема оптического приемника;
 - 4 Результаты моделирования процессов формирования секретных ключей в условиях помех СКРК в виде таблиц и графиков;
 - 5 Выводы по результатам симуляции работы СКРК-B92.

Контрольные вопросы

1. Поясните основные особенности кубитов как единицы квантовой информации.
2. Какие ограничения вносит эффект декогеренции в работу систем КРК?
3. Как выбирается значение частоты квантовых частиц в СКРК?
4. Поясните идею шифрования с помощью одиночных фотонов.

Рекомендуемая литература

1. **Задорин А. С.** Методы и устройства радиофотоники в системах радиосвязи. Методические указания по выполнению практических работ: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 109 с.

Тема 2. Исследование оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона

Краткие теоретические сведения

РЧ- и СВЧ-АГ широко используются во всех современных радиолокационных и беспроводных системах связи [3,16]. На низких частотах в транзисторных генераторах обычно используются высокочастотные кварцевые резонаторы. В качестве резонансной системы СВЧ-генераторов используются объемные резонаторы, линии задержки или диэлектрические резонаторы. Основное назначение автогенератора состоит в преобразовании мощности источника питания в сигнал заданной частоты. В задачах формирования сигналов с высокой спектральной чистотой чаще всего используются АГ гармонических сигналов.

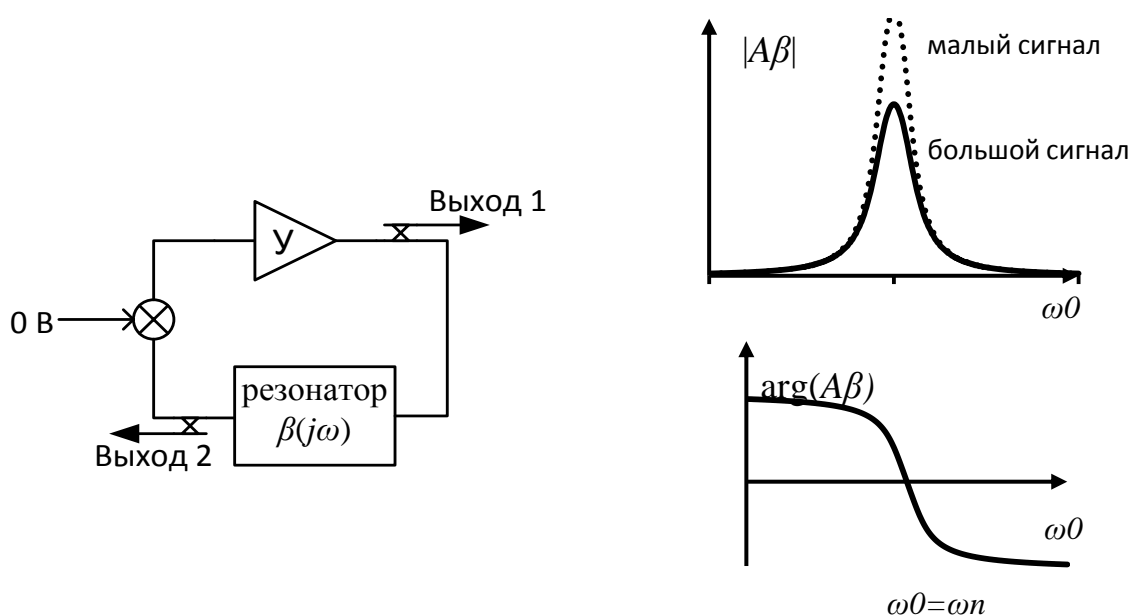


Рис. 1. Базовая схема автогенератора с обратной связью, генерирующей на собственной частоте резонатора.

Структура АГ приведена на рис.1. Она представляет собой усилитель с положительной обратной связью (ОС), компенсирующего потери в петле ОС на заданной частоте ω_0 . Условия самовозбуждения данной схемы известны как условия баланса фаз и амплитуд (условие Баркгаузена):

$$|A\beta(j\omega)| = 1, \quad (1)$$

$$\arg A\beta(j\omega) = 0, \quad (2)$$

что эквивалентно,

$$A\beta(j\omega) = 1. \quad (3)$$

Для формирования (3) необходимо, чтобы частотная характеристика петли ОС $|\beta(j\omega)|^2$ имела вид выраженной резонансной кривой. Графики соответствующих зависимостей $A\beta(j\omega)$, показаны на рис.1.

Запуск автоколебаний в данной схеме чаще всего вызывается случайными флуктуациями в петле ОС. При этом, если $|A\beta(j\omega)| > 1$, то автоколебательный процесс экспоненциально возрастает. Если же коэффициент усиления активного элемента приближается к насыщению, то амплитуда колебаний достигает максимальной величины, а автогенератор входит в стационарный режим, где $A\beta(j\omega) = 1$.

Спектр шумов АГ

Экспериментальные наблюдения показывают, что линия излучения сигнала АГ всегда искажается шумами, сосредоточенными в узкой полосе вокруг несущей частоты ω_0 . Можно показать, что основной механизм этих искажений обусловлен **фазовыми шумами (ФШ)**.

Фазовый шум

При описании фазового шума АГ наиболее часто используемым показателем является односторонняя спектральная плотность мощности случайной флуктуации фазы $\varphi(t)$, определяемая как $S_\varphi(f)$, измеряемая в [рад²/Гц.]. Другим способом описания шумов АГ является частотная спектральная плотность мощности,

$$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi\nu_0)^2} S_\varphi(f) \quad (4)$$

На практике распространена также оценка $\mathcal{L}(f)$ уровня *спектральной плотности мощности ФШ в одной боковой полосе при заданной отстройке f от несущей частоты в частотном интервале 1 Гц.*,

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2} S_\varphi(f), \quad (5)$$

рекомендуемая стандартом **IEEE 1139** для описания уровня фазового шума [1].

Закономерности изменения $S_\varphi(f)$

Для АГ, построенных на основе затягивания частоты формируемого сигнала высокочастотным резонатором в активной петле ОС, распространенным эмпирическим приближением зависимости $S_\varphi(f)$ является степенная аппроксимация Лисона [2],

$$L(Q, f) = 10 \log \left(\frac{GFKT}{2P} \left(\left(\frac{f_0}{2Q} \right)^2 \frac{f_\alpha}{f^3} + \left(\frac{f_0}{2Q} \right)^2 \frac{1}{f^2} + \frac{f_\alpha}{f} + 1 \right) \right), \quad (9)$$

где $L(Q, f)$ – СПМ фазового шума АГ, нормированная к мощности самого колебания (несущей) и выраженная в децибелах; G, F – коэффициенты усиления и шума усилительного каскада АГ; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; P – номинальная мощность, подводимая к резонатору; Q – добротность нагруженного резонатора; f_α – верхняя граничная частота области доминирования фликерт шума в СПМ активного прибора (граничная фликкертная частота)

В логарифмическом масштабе различные участки спектра (0.1) можно представить прямыми линиями, наклон которых к координатным осям связан со степенным показателем i в (6) как $i \times 10$ (дБ/декада). Обозначения соответствующих шумовых процессов приведены в таблица 1

Таблица 1 Слагаемые фазового шума АГ

Закономерность	крутизна	Шумовой процесс	Единицы измерения
$b_0 f^0$	0	белый фазовый шум	рад ² /Гц
$b_{-1} f^{-1}$	-1	фликкер фазовый шум	рад ²
$b_{-2} f^{-2}$	-2	белый частотный шум	рад ² Гц
$b_{-3} f^{-3}$	-3	фликкер частотный шум	рад ² Гц ²
$b_{-4} f^{-4}$	-4	случайное блуждание частоты	рад ² Гц ³

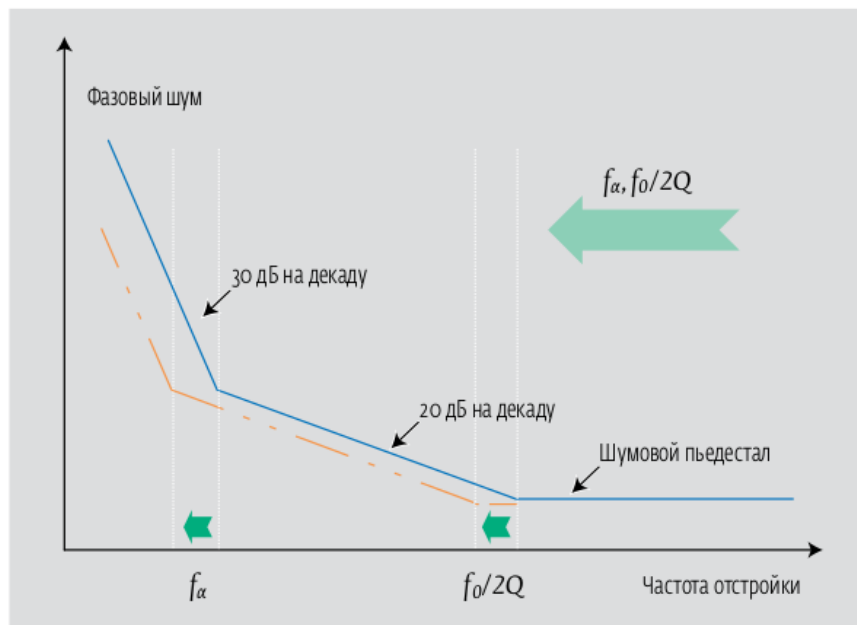


Рис. 2 – Модель Лисона. Распределение СПМ фазового шума автогенератора

Частотный шум

Другой механизм ФШ связан со случайными вариациями частоты $\Delta\nu(t)$ АГ, описываемыми соответствующей спектральной плотностью мощности $S_{\Delta\nu}(f)$. Учитывая связь частоты и фазы сигнала АГ, несложно установить, что [3]:

$$S_{\Delta\nu}(f) = f^2 S_{\varphi}(f) \quad (7)$$

$$S_y(f) = \frac{f^2}{v_0^2} S_{\varphi}(f) \quad (8)$$

В литературе коэффициенты $S_y(f)$ обозначаются через h_i . Отсюда следует,

Амплитудный шум АГ

Амплитудным шумом в АГ обычно пренебрегают. Связано это с тем, что спектральная плотность амплитудного $S_{\alpha}(\omega)$ (АШ) и $S_{\psi}(\omega)$ фазового (ФШ) шумов АГ описываются как, [3]:

$$S_{\alpha}(\omega - \omega_0) = \frac{\delta * S_i}{9\beta^2 G_0^2 v_0^6 \left[1 + Q_0^2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 \right]}, \quad (10a)$$

$$S_{\psi}(\omega - \omega_0) = \frac{\delta * S_i}{9\beta^2 G_0^2 v_0^6 Q_0^2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2}, \quad (10б)$$

где Q_0 - добротность РС АГ.

Из данных формул следует, что вблизи рабочей частоты АГ преобладающими являются именно фазовые шумы генератора. Таким образом, высокая спектральная чистота автоколебаний должна достигаться, прежде всего, за счет снижения уровня ФШ АГ.

Оптоэлектронный автогенератор на ВО-ЛЗ

Один из способов значительного повышения добротности Q СВЧ АГ состоит в использовании в схеме АГ серии промежуточных преобразований энергии СВЧ колебаний в энергию световой волны, которая может эффективно накапливаться в высокодобротных оптических резонаторах. Генераторы, построенные на основе указанной методологии, относят к оптоэлектронным СВЧ генераторам (ОЭГ) [6-8]. В качестве накапливающего элемента ОЭГ используются линии задержки (ЛЗ) на одномодовых кварцевых оптических волокнах (ОВ), в которых энергия световой волны способна эффективно накапливаться в оптоэлектронных резонаторах, представляющих собой оптоволоконные (ОВ) линии задержки на время τ_d :

$$\tau_d = nl/c, \quad (11)$$

где n – групповой показатель преломления и длина ОВ, c – скорость света в вакууме.

Такие резонаторы используются для построения оптоэлектронных генераторов (ОЭГ), рис. 1. Их эквивалентная добротность Q_{rf} на несущей частоте f_{rf} определяется формулой

$$Q_{rf} = Q_{opt} \cdot \frac{f_{rf}}{f_{opt}} \quad (12)$$

Здесь Q_{opt} – добротность ОВ-резонатора на оптической частоте f_{opt}

$$Q_{opt} = 2\pi f_{opt} \tau_d$$

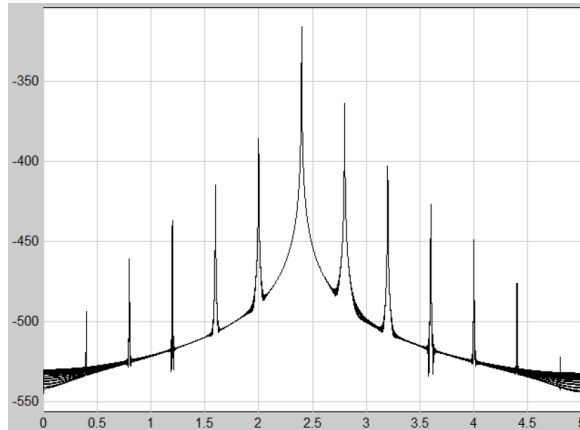


Рис. Форма линий $L(f_m)$ АГ с запаздывающей обратной связью

Такой ОЭГ в принципе соответствует модели хорошо известного электронного АГ с запаздывающей обратной связью, крутизна ФЧХ и добротность Q резонатора которого пропорциональны времени задержке волны τ в ЛЗ [3]. В практических конструкциях ОЭГ с ЛЗ-ОВ для достижения высоких значений Q задержка τ в ОВ обеспечивалась волокнами с длиной в несколько сотен метров. Габаритные размеры подобных ЛЗ также не позволяют разместить их в корпусе интегральных схем.

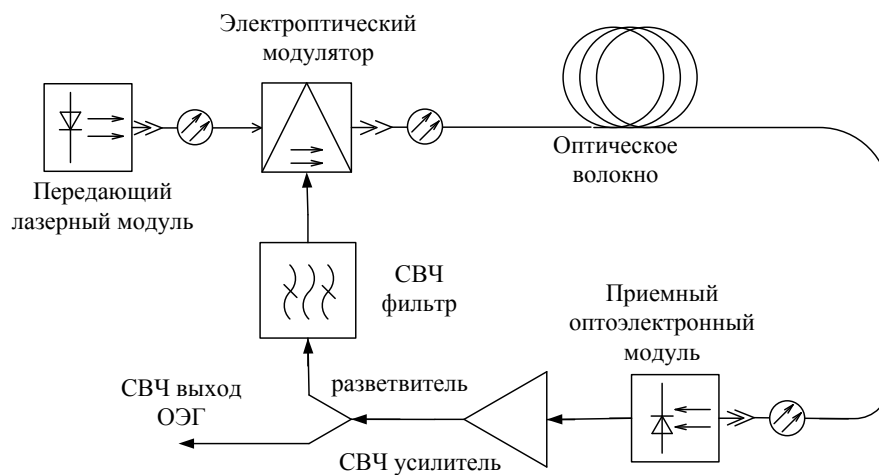


Рис. 4. Структура одноконтурного ОЭАГ.

Другим недостатком ОЭГ указанного типа является трудности в подавлении побочных колебаний в спектре $L(f_m)$, число которых пропорционально задержке τ (рис.2).

Как видно из рис. , свет лазерного источника здесь последовательно проходит через электрооптический модулятор (ЭОМ) и контур оптического волокна (ОВ), в

фотоприемнике приемного оптоэлектронного модуля он преобразуется в радиочастотный (РЧ) сигнал. Этот сигнал усиливается, фильтруется и помощью направленного ответвителя (НО) разделяется, часть мощности сигнала поступает обратно в контур ОС, на радиочастотный порт ЭОМ, а другая - на РЧ выход ОЭАГ.

Основным достоинством данного ОЭАГ является низкий уровень фазового шума. В экспериментах Яо и Малеки его уровень на несущей частоте 800 МГц и отстройке по частоте на 10 кГц. был менее -130 дБн/Гц. Задержка в петле ОС составляла 1,25 мкс [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. В дальнейшем $\mathcal{L}(f)$, в схеме ОЭАГ с двойным контуром на частоте 10 ГГц., этот показатель был снижен до -140 дБн/Гц [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Эти показатели на 44 дБ ниже уровня фазового шума хорошего синтезатора частоты HP 8617B. В последние два десятилетия было предложено еще ряд новых схем ОЭАГ, обеспечивающих ~ 160 дБн/Гц на частоте 10 ГГц.

Диэлектрические резонаторы с азимутальными модами высокого порядка

Особенностью диэлектрических резонаторов (ДР), работающих на азимутальных типах модах (АМ), т. е. колебаний с вариациями поля в направлении криволинейной координаты вокруг оси резонатора заключается в том, что излучение из ДР АК может быть сделано как угодно малым даже при $\varepsilon = 10 \dots 2$, если только число вариаций по азимуту достаточно велико [8]. Слабое излучение азимутальных колебаний объясняется тем, что они формируются волнами, распространяющимися внутри диэлектрика и падающими на боковую криволинейную поверхность ДР под очень пологими углами. При этом их коэффициент отражения очень близок к единице. Впервые подобная физическая закономерность обнаружена на факте аномально слабого затухания акустических волн вблизи внутренней стенки кольцевой галереи здания [8]. Поэтому колебания в ДР АМ часто называют модами «шепчущей галереи» (МШГ) [8].

Зависимости электромагнитных полей ДР АМ от угла φ для каждого из двух сдвинутых по азимуту на четверть периода колебаний $\Phi_s(\varphi)$ и $\Phi_c(\varphi)$ описываются гармоническими функциями.

$$\Phi_s(\varphi) = \begin{cases} \sin(n\varphi + \Psi) \\ \cos(n\varphi + \Psi) \end{cases} \text{ и } \Phi_c(\varphi) = \begin{cases} \cos(n\varphi + \Psi) \\ \sin(n\varphi + \Psi) \end{cases} \quad (13)$$

где n — азимутальный индекс или порядок колебания; Ψ — угол, определяемый азимутальным положением источника возбуждения или неоднородности, нарушающей азимутальную симметрию. Верхние и нижние записи в (13) применимы к разным составляющим поля. Каждому номеру n соответствуют два различных собственных колебания с азимутальными зависимостями Φ_s и Φ_c .

Дисковый диэлектрический резонатор (ДДР) представляет собой азимутально-симметричную конструкцию. Если свойства материала также азимутально-однородны и эта симметрия не нарушается дополнительными элементами конструкции (в том числе и внешними по отношению к ДДР) или устройствами возбуждения, колебания с $\Phi_s(\varphi)$ и $\Phi_c(\varphi)$ имеют одинаковые резонансные частоты и добротности

$$f_{ps} = f_{pc}, \quad Q_{sa} = Q_{ca} \quad (14)$$

В общем случае устройство связи или другие конструктивные элементы нарушают азимутальную симметрию ДДР, внося азимутальную нерегулярность. При этом условия (14) нарушаются – собственные колебания с двумя видами азимутальных зависимостей (13) будут иметь разные f_p , разные Q_a или разные f_p и Q_a . Если это различие достаточно велико, то возникает расщепление собственных колебаний.

Существуют следующие закономерности АМ в ДДР:

- азимутальные распределения полей имеют характер стоячей волны (13).
- распределения в направлении z оси ДДР (4,б) имеют такой же характер, как у поверхностных волн плоских диэлектрических волноводов [8].
- радиальные распределения полей описываются функциями Бесселя внутри диэлектрика и функциями Ганкеля (второго порядка) во внешней области. Для низших по радиусу колебаний они имеют вид, показанный на рис. б.

Поля всех АК дискового ДР носят гибридный характер и содержат шесть компонент поля. Их обозначают двойными символами HE или EH , в зависимости от того, какая составляющая (E_z или H_z) преобладает.

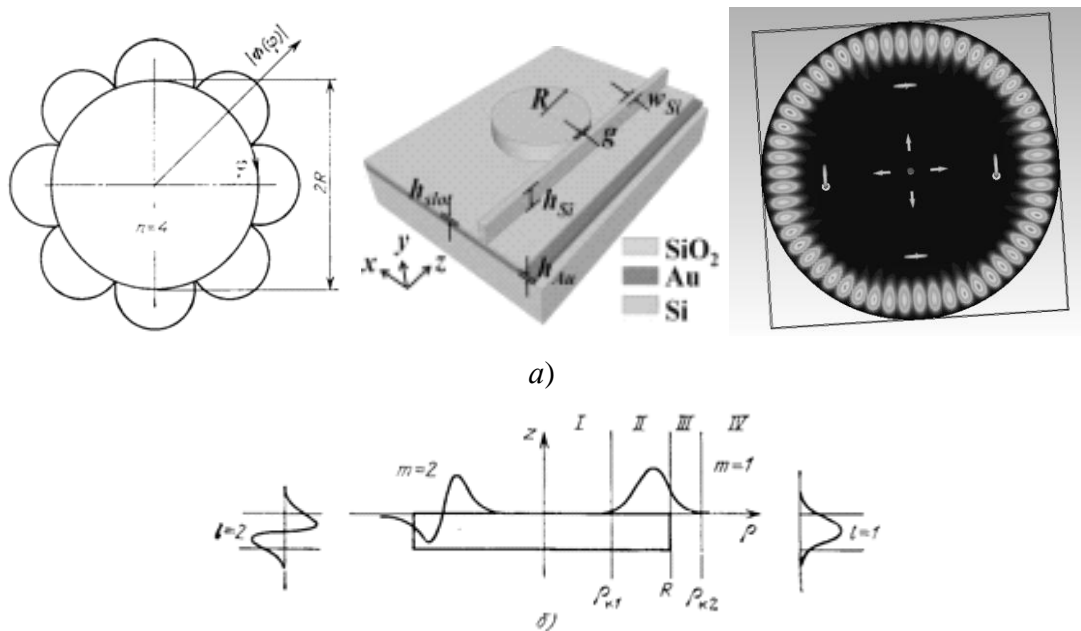


Рис. 5. Распределение электромагнитного поля азимутальных мод ДДР

Для объяснения радиального распределения полей АК удобно воспользоваться представлениями о каустических поверхностях, понимая каустику как границу, разделяющую области с волновым и «запредельным, экспоненциально убывающим» характером полей. В ДР АМ можно представить наличие каустических поверхностей, которые расположены там, где выполняется условие $2\pi\rho_k\sqrt{\varepsilon_p} = n\lambda$; при $\rho > \rho_k$ парциальные радиальные волны распространяются, а при $\rho < \rho_k$ - нет. При этом внутренняя каустика характеризуется радиусом,

$$\rho_{k1} = \frac{n\lambda}{2\pi\sqrt{\varepsilon_p}} \quad (15)$$

а внешняя - радиусом,

$$\rho_{k2} = \frac{n\lambda}{2\pi} \quad (16)$$

Область $R < \rho < \rho_{k2}$ поверхности диска оказывается внутри внешней каустики и поле здесь убывает почти экспоненциально. При $\rho > \rho_{k2}$ поле приобретает характер бегущей по радиусу волны излучения. Увеличение азимутального индекса n , в соответствии с (16), отодвигает каустику от резонатора, уменьшая излучение с открытого резонатора.

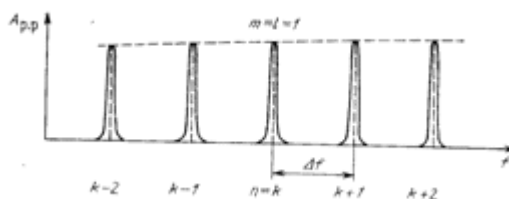


Рис. 6. Модовые спектры дискового резонатора:

m , l и n – радиальный, продольный и азимутальный модовые индексы

Спектр собственных мод ДР показанный на рис. представляет собой квазипериодическую последовательность узких резонансных пиков, разделенных $\Delta\nu_{\text{FSR}}$ - **областями свободной дисперсии FSR (Free Spectral Range)**. Данные типы азимутальных мод физически могут существовать одновременно, поэтому актуальной является проблема разрежения спектра АМ. Частотный спектр ДР АМ может быть разрежен, например, путем введения в резонатор нерегулярностей, избирательно влияющих на интенсивность различных типов колебаний. Благодаря этому резонатор может иметь одно высокочастотное колебание в широкой полосе частот, называемой одномодовой областью, которая может составлять 15 ... 35 %.

Оптоэлектронный генератор на основе ДДР

Существенным недостатком ОЭГ на рис.3 является трудности в подавлении побочных колебаний в спектре $L(f_m)$, число которых пропорционально задержке τ .

Способ преодоления данного недостатка, а также миниатюризации резонансной системы ОЭАГ основан на использовании оптический микрорезонатора, возбуждаемым модами "шепчущей галереи" (МШГ). Низкие излучательные потери МШГ в таком резонаторе обеспечивают малый декремент затухания δ оптического поля и, соответственно, больше время звона $\tau^*=1/2\delta$, которое может превысить задержку τ в ОЭАГ с ЛЗ [9].

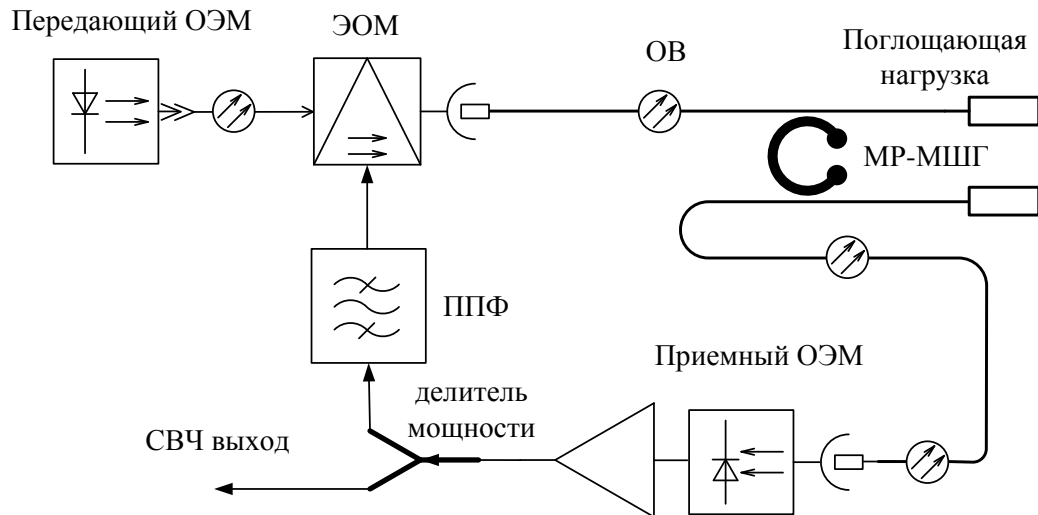


Рис.7. Структурная схема ОЭГ на основе МР-МШГ

Структурная схема рассматриваемого ОЭГ приведена на рис.6. Здесь в качестве несущего колебания здесь используется световое поле лазерного диода, формируемое в передающем оптоэлектронном модуле (ОЭМ). Кольцо обратной связи генератора образовано двумя отрезками одномодового ОВ, замыкающихся в виде элементов связи с ОМР-МШГ, приемного ОЭМ, полосно-пропускающего фильтра, СВЧ- усилителя и электрооптического модулятора, собранного по схеме интерферометра Маха-Цендера (ЭОМ-ИМЦ). Режим бегущей волны в ОВ обеспечивается поглотителями на концах отрезков волокон. Модулятор обеспечивает амплитудную модуляцию проходящего через него лазерного пучка с интенсивностью I_0 и начальной фазой φ_0 СВЧ сигналом с амплитудой V . Зависимость интенсивности света I на выходе ЭОМ-ИМЦ от V имеет вид,

$$I(V) = I_0 \cos^2 (\pi V / (2V_\pi) + \varphi_0) \quad (17)$$

Отсюда видно, что именно модулятор является основным нелинейным элементом схемы ОЭГ, определяющим как амплитуду установившихся колебаний, так и форму линии генерации $L(f_m)$, а также возможные устойчивые состояния ОЭГ.

Рассмотрим резонансную систему ОЭАГ рис.6, построенную на основе дискового оптического диэлектрического микрорезонатора, возбуждаемого на одной из его резонансных частот ω_0 фундаментальной МШГ.

Радиус и высоту резонаторного диска обозначим как R_0 и h , а его показатель преломления материала на длине световой волны λ_0 , как n_s . Одномодовые элементы связи ЭС-Н,С, представляющие собой встроенные в волноводный тракт оптические направленные ответвители (ОНО), обеспечивают направленное возбуждение резонатора и съем накопленной в нем энергии. Вместе с ЭС-Н,С рассматриваемый ДОМР образует проходную резонансную систему ОЭАГ (рис.).

Полутоновой штриховкой на этом рисунке отмечены максимумы энергии поля E_0 МШГ расположенные в пределах кольцевой области, ограниченной внешней и внутренней каустиками моды с радиусами R_{in} и R_{out} .

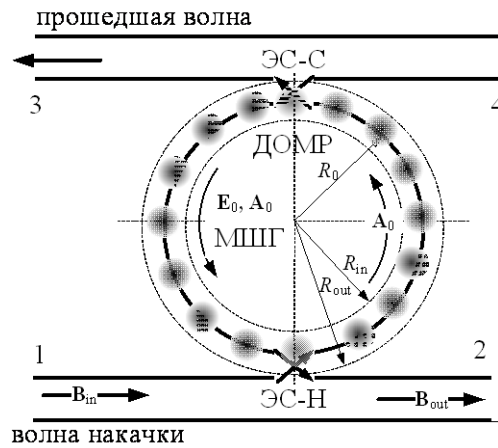


Рис. 8. Структурная схема резонансной системы ОЭАГ на основе ДОМР с элементами связи

Для исследования наиболее существенных связей и свойств резонансной системы рис. рассмотрим сначала ее упрощенную модель. Прежде всего, заметим, что в типичном для работы ОЭАГ стационарном режиме на резонансной частоте ДОМР амплитуда поля МШГ A_0 , как известно, определяется декрементами затухания резонатора δ_0 и элементов связи δ_c [8],

$$A_0 = \frac{j\Gamma \cdot B_{in}}{\delta_0 + \delta_c} \sqrt{\frac{2\delta_c}{\tau_0}} \quad (18)$$

где коэффициент $\Gamma \leq 1$ определяется нормированным скалярным произведением векторов напряженности полей мод ЭС \mathbf{B}_{in} и МШГ \mathbf{A}_0 в области связи,

$$\Gamma = \frac{\mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{B}_{in}}{|\mathbf{A}_0| |\mathbf{B}_{in}|} \quad (19)$$

$$\delta_0 = \frac{\alpha c}{2n_s}, \quad \delta_c = \frac{T^2}{2\tau_0}, \quad \tau_0 = \frac{2\pi n_s R_0}{c} \quad (20)$$

T – коэффициент передачи направленных ответвителей ЭС-Н,С, α – коэффициент затухания мощности МШГ в ДОМР, c – скорость света.

Нагруженная добротность $Q_{он}$ рассматриваемой резонансной оптической системы определяется собственной добротностью резонатора Q_{0o} и добротностью связи Q_c и выражается через указанные выше параметры как [**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**],

$$\frac{1}{Q_{он}} = \frac{1}{Q_{0o}} + \frac{1}{Q_c} = \frac{2\delta_0}{\omega_0} + \frac{2\delta_c}{\omega_0} \quad (21)$$

Для заданного Q_c добротность связи обычно выбирают из условия максимума запасенной в резонаторе энергии $E_0 \sim (A_0)^2$. Из (18) видно, что данное требование выполняется в условиях критической связи между ДОМР и ЭС-Н,С, когда $\delta_0 = \delta_c$.

Анализ механизмов, ограничивающих собственную добротность резонатора Q_{0o} , показывает, что основными среди них являются рассеяние на термодинамических флуктуациях плотности и рассеяние на поверхностных неоднородностях ДОМР [8]. Соответствующие оценки для Q_{0o} дают величину $\sim 10^{12}$.

Воспользуемся последними формулами, например, для оценки Q_n резонатора из плавленого кварца ($\varepsilon=2,13$, $Q_{0o}=0,17 \cdot 10^{12}$ [8]). Для расстояния между ЭС и ДОМР равным $1,5\lambda$, получим, что $Q_c \approx 227 \cdot 10^9$, $Q_{он} \approx 90 \cdot 10^9$, а нагруженная добротность резонансной системы автогенератора $Q_n \approx 10^7$, т.е. может превысить добротность лучших сапфировых СВЧ резонаторов.

Важнейшим параметром резонансной системы ОЭАГ является ее спектр оптических резонансных частот ν_{0m} . При их выборе необходимо учитывать принцип работы ОАЭГ (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), основанный на амплитудной модуляции в ЭОМ оптической несущей СВЧ колебанием с частотой f_0 . В данной связи ДОМР должен обеспечивать резонанс на трех частотах, отстоящих друг от друга на равный частотный интервал $\Delta\nu_{0m} = f_0$.

Рекомендуемая литература

1. 1139-2008 - IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities, IEEE, Feb. 2009.
2. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities (IEEE Standard 1139-2008), IEEE, New York, Feb. 2009.

3. Leeson D. B. A simple model of the feedback oscillator noise spectrum// Proceedings of the IEEE, 1966, vol. 54, no 2, p. 329-330.
4. Букингем, М. Шумы в электронных приборах и системах/ М. Букингем – Москва: «Мир», 1986 г. –399 с.
5. Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике — М.: Наука, 1984. — 320 с.
6. Yao X.S. Optoelectronic oscillator for photonic systems / X.S. Yao, L. Maleki // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1996. – Vol. 32, No. 7. – PP. 1141–1149
7. Урик-мл, В. Дж. Основы микроволновой фотоники. / В. Дж. Урик-мл., Дж. Д. МакКинни, К. Дж. Вильямс. – Техносфера, 2016 – 376 с.
8. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. Изд. Физматлит, 2011 г. 415 с.
9. A. V. Matsko , L. Maleki , A. A. Savchenkov & V. S. Ilchenko Whispering gallery mode based optoelectronic microwave oscillator, Journal of Modern Optics, 2003, vol.50, №15-17, 2523-2542

3. Лабораторная работа.

Исследование влияния параметров оптоэлектронного автогенератора (ОЭАГ) с резонансной системой на основе оптического волокна (ОВ)

Цель работы

Исследование влияния параметров оптоэлектронного автогенератора с резонансной системой на основе оптического волокна (ОЭАГ-ОВ) на его основные характеристики - частоту генерации и спектр фазовых шумов.

Домашнее задание к работе

1. Изучить назначение основных элементов структурных схем ОЭАГ-ОВ и ее основные характеристики.
2. В среде MatchCad провести моделирование СКРК-ВВ84 для заданных параметров квантового канала, фотоприемного устройства и скорости формирования секретного ключа. Рассчитать протяженность квантового канала СКРК-ВВ84, при котором достигается заданная вероятность ошибки формирования ключевой последовательности.
3. Изучить структуру фотоприемного устройства (ФПУ) СКРК-ВВ84, способов моделирования его помехозащищенности.

Лабораторная имитационная модель ОЭАГ

Возможность компьютерного моделирования ОЭАГ-ОВ значительно упрощает его процесс проектирования. В данной работе для компьютерного моделирования и исследования ОЭАГ-ОВ была использована имитационная модель [1], написанная в математической среде Matlab/Simulink. Мощные инструменты Matlab позволяют рассчитать в широком спектре, более миллион точек. Модель учитывает количество динамических эффектов и шумовые источники, которые необходимы для точного моделирования ОЭГ. В работе ОЭГ играют важную роль четыре различных временно/частотные шкалы. В оптоволокне на самом высоком частотном масштабе имеется оптический носитель информации, который имеет частоту, близкую к 200 ТГц. Тем не менее, роль оптического носителя информации полностью пассивна. Свет служит только для переноса РЧ сигнала от одного конца оптоволокна к другому и не оказывает никакого эффекта на функции ОЭАГ-ОВ. Поэтому мы моделируем оптоволокно в качестве фиксированной задержки ВЧ сигнала и игнорируем функции на оптической шкале частот. На следующей по величине частотной шкале у нас имеется РЧ несущая в порядке 10 ГГц. На данной шкале РЧ фильтры в контурах ОЭГ, которые обычно имеют пропускную способность равную примерно 10 МГц, проводят гармоники РЧ сигнала, возникающие вследствие насыщения усиления в РЧ усилителях и оптических

модуляторов. На следующей по величине частотной шкале у нас имеется инверсия (обратное величине времени $1/t$) времени кругового прохождения в контурах ОЭГ. Это время может принимать значение 0,2 мкс в 40 м контуре, что соответствует частоте 5 МГц, и может достигать значения 30 мкс для 6 км контура, что соответствует частоте 33 кГц. Наконец, мы имеем шкалу частот фазового шума. Нас интересует частотный диапазон примерно от 1 Гц до 100 кГц. Точка, которую стоит выделить, показывает, что последние две шкалы недостаточно хорошо отделены друг от друга.

Описание модели ОЭАГ-ОВ на платформе Simulink

В качестве имитационной модели одноконтурных и двухконтурных ОЭГ на платформе MatLab-Simulink ниже используются результаты работы [1]. Соответствующая аналитическая модель описана в работе [2].

На рис. 1 приведена структурная схема одноконтурного ОЭГ, реализованная в вычислительной среде MATLAB/Simulink.

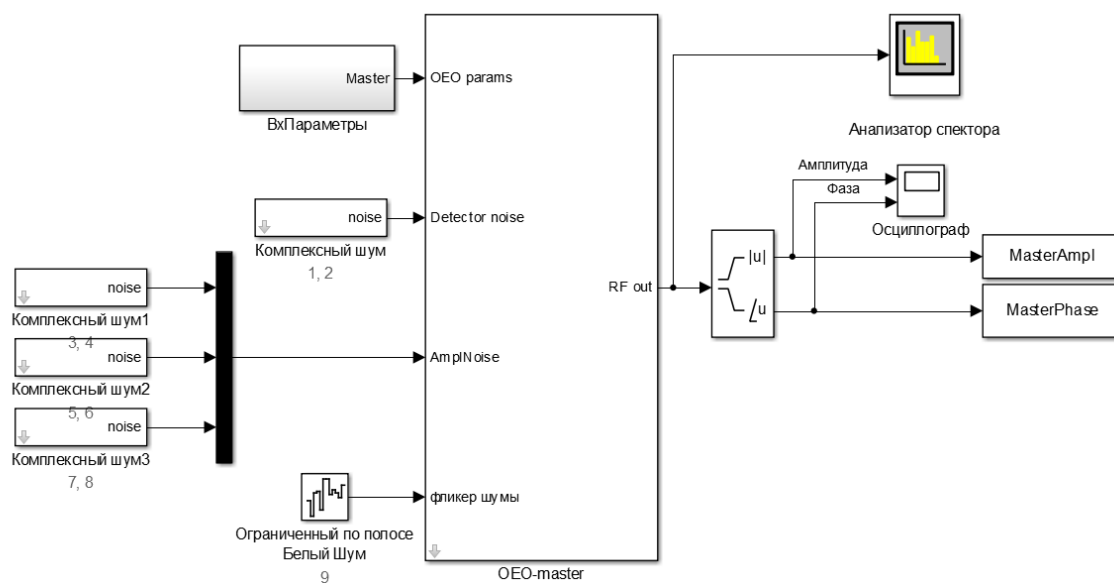


Рис. 1. Структурная схема модели одноконтурного ОЭАГ

Параметры модель задается в окне в Matlab (рис. 2).

```

1  %----- Parameters file-----
2  carrierFrequency=2*pi*10e9; % 10 GHz // несущая частота
3
4  %-----Slave loop-----
5  Slave.delay= 2.5689e-6; %2.5e-6; // задержка tau=nl/c, n-показатель преломления, l-длина линий задержки, c-скорость распрот
6  Slave.rho_DC=0.8; %// чувствительность фотодетектора при DC, то есть 0 ГГц
7  Slave.rho_AC=0.5509; %// чувствительность фотодетектора при AC при 10 ГГц
8  Slave.P0=40e-3; % Watt //мощность лазера
9  Slave.alpha=0.1156; %0.1585 //потеря Э/О модулятора
10 Slave.VpiDC=3.15; % Volt //напряжение
11 Slave.VpiAC=5.11; % Volt //напряжение
12 Slave.Vb=1.92; % смещение напряжение
13 Slave.R=50; % ohm сопротивление на нагрузке в детекторе
14 Slave.NF=1.5; % noise figure // коэффициент шума
15 Slave.eta=0.68; % //
16 Slave.g11=10^(-7/10/2); %sqrt(0.5); %10^(-7/10/2); %sqrt(0.5); %
17 Slave.g21=10^(-13.5/10/2); %0; %
18 Slave.filterOrder=2; % //порядок фильтра
19
20 % -----Параметры фликкер шума-----
21 Slave.filterCutOff=9e6; %Hz
22 Slave.flickerF0=1; % Hz
23 Slave.flickerKnee=10e6;
24 Slave.flickerFilterOrder=10;
25 Slave.flickerSigma=sqrt(20e-12); % sqrt(1/b)
26
27 Slave.ExtraFilterLoss=10^((-2)/10/2)*10^(-5/10/2);

```

Рис. 2. Окно для занесения параметры ОЭГ

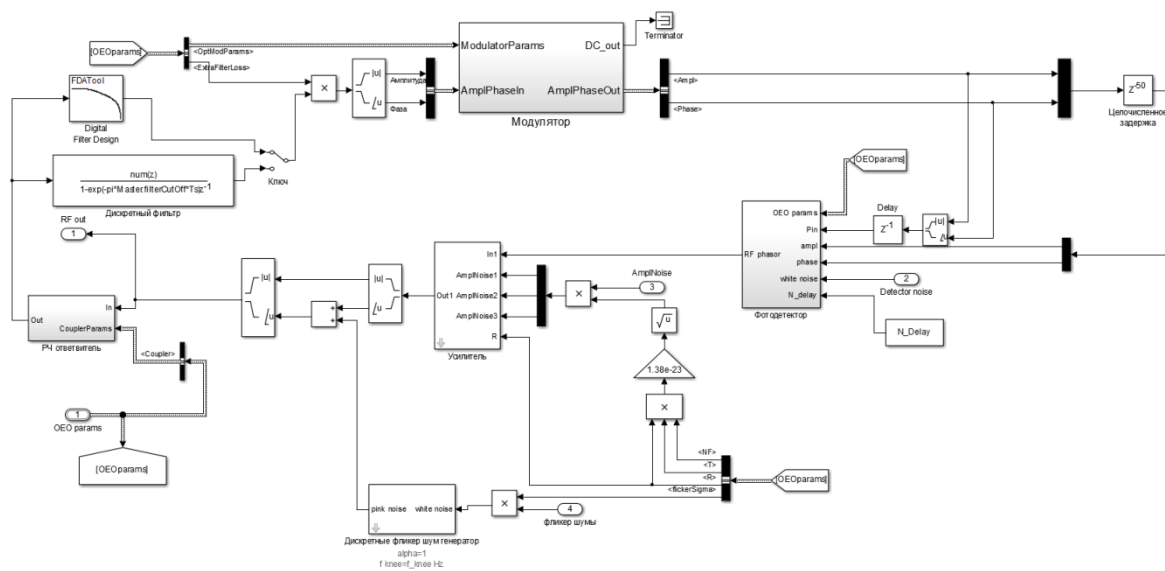


Рис. Структура устройства ОЕО-master

ОЕО-master состоит из: модулятора, линии задержки, фотодетектор, усилителя, направленного ответвителя, и цифрового фильтра, для выделения сигнала на выходе ОЭГ в полосе 20 МГц.

Электрооптический модулятор (ЭОМ), анализируемый в нашей модели, является интерферометром Маха-Цандера. Оптическая мощность светового сигнала на выходе ЭОМ, который образует цикл, зависящий от приложенным напряжением $V_{in}(t)$

$$P(t) = (\alpha P_0 / 2) \left\{ 1 - \eta \sin \pi \left[V_{in}(t) / V_{\pi} + V_B / V_{\pi} \right] \right\}, \quad (1)$$

где α - вносимые потери в модуляторе и детекторе;

P_0 – оптическая мощность на входе модулятора;

η – параметр, определяемый коэффициентом затухания модулятора $(1+\eta)/(1-\eta)$;

V_B – напряжение смещения постоянного тока;

$V_{in}(t)$ – напряжение на входе ЭОМ;

V_π – полуволновые напряжения модулятора [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Далее используя разложение Якоби-Ангера из (1) для расчета первой гармоники в нелинейном отклике модулятора, получаем

$$P_0(t) = \alpha_2 \cdot \frac{P_0}{2} \cdot (1 - \eta \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{V_b}{V_{\pi DC}}\right) \cdot J_0\left(\pi \cdot \left|\frac{V_a}{V_{\pi AC}}\right|\right), \quad (2)$$

$$P_1(t) = -\alpha_2 \cdot P_0 \cdot \eta \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{V_b}{V_{\pi DC}}\right) \cdot J_1\left(\pi \cdot \left|\frac{V_{a0}}{V_{\pi AC}}\right|\right) \cdot e^{i \cdot \varphi(V_{b0})} \quad (3)$$

где $V_{\pi DC}$ и $V_{\pi AC}$ – полуволновые напряжения модулятора для постоянного и переменного токов соответственно;

J – функция Бесселя.

Схема модели модулятора, составленная по уравнениям (2) и (3), представлена на рис.4.

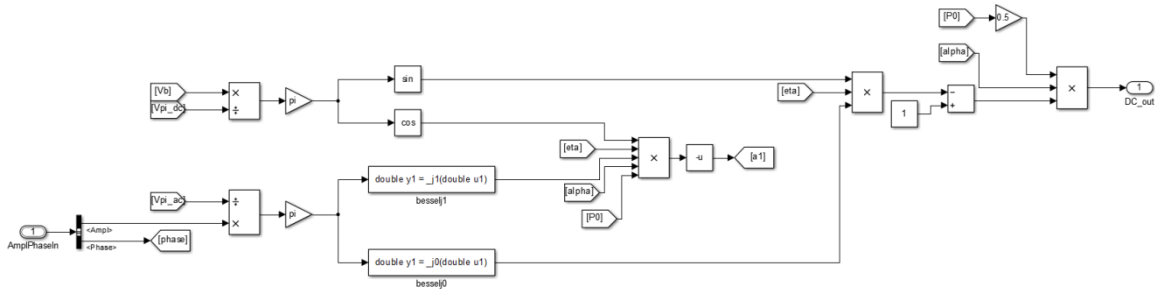


Рис.4. Схема модели ЭОМ на базе уравнений (2), (3)

Шумы ОЭАГ.

Аддитивный белый гауссовский шум включен в модель и добавлен к комплексной векторной величине осциллирующего сигнала. Аддитивный белый гауссовский шум добавляется на выходе фотоприемника и на входе каждого из РЧ усилителей в каждом круговом цикле.

Спектральная плотность мощности аддитивного шума на выходе фотоприемника и на входе РЧ усилителей определяется путем оценки плотности мощности дробового шума P_{SN} и плотности мощности теплового шума P^{th} соответственно. Плотность мощности дробового шума фотоприемника вычисляется по формуле:

$$\rho_{SN} = 2eI_{PD}R, \quad (4)$$

$$I_{PD} = \left\langle |a_{out}^{PD}(t)| \right\rangle_{\tau} / R \quad (5)$$

где I_{PD} - ток фотоприемника в среднем за один круговой цикл. А знак $\langle \rangle_{\tau}$ означает усреднение по времени в круговом цикле.

Спектральная плотность мощности теплового шума, данная по формуле

$$\rho_{th} = (NF)k_B T, \quad (6)$$

определяется коэффициентом шума NF РЧ усилителей. Коэффициент шума определяется эмпирически, и для того, чтобы получить наилучшее совпадение между теорией и экспериментом, мы, как правило, используем коэффициент шума $NF = 4$. Добавив шум к колеблющейся комплексной векторной (рис. 3) величине в том же порядке, который был описан в работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Во время каждого кругового цикла мы добавили N независимых друг от друга шумовых переменных w_i $i = 1, \dots, N$, в массив колеблющейся векторной величины таким образом, что дисперсия шумовых переменных задается соотношением

$$\left\langle |w_i|^2 \right\rangle_{\tau} / 2R = \rho / \tau, \quad (7)$$

где ρ является плотностью мощности шума.

Предполагается комплексное распределение Гаусса, и каждый из реальных и мнимых частей шумовых переменных распределены по нормальному закону с дисперсией

$$D_{\varepsilon} = \rho \cdot R / \tau. \quad (8)$$

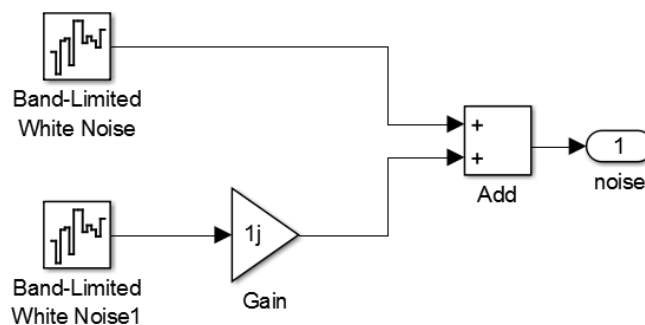


Рис.5. Схема формирования источника шума в ОЭАГ

В процессе моделирования шум добавляется после фотоприемника и перед каждым РЧ усилителем с плотностью мощности шумов ρ_{SN} и ρ_{th} соответственно. Отметим, что основной вклад теплового шума в фазовый шум приходится на шум, который добавлен на входе первого РЧ усилителя. В результате, фазовый шум в нашем моделировании

практически определяется общим белым шумом, который добавлен между фотоприемником и первым РЧ усилителем, с плотностью мощности шума

$$\rho_{total} = \rho_{th} + \rho_{SN} . \quad (9)$$

Напряжение на выходе фотодетектора определяется по формуле (10). Построенная схема модели фотодетектора показано на рис. 6, в ней учитывается тепловые, дробовые шумы.

$$V_{ph} = \frac{\alpha \cdot P_0 \cdot \rho \cdot R \cdot G_A}{2} , \quad (10)$$

где α – вносимые потери; ρ – чувствительность фотодетектора; G_A – коэффициент усиления по напряжению.

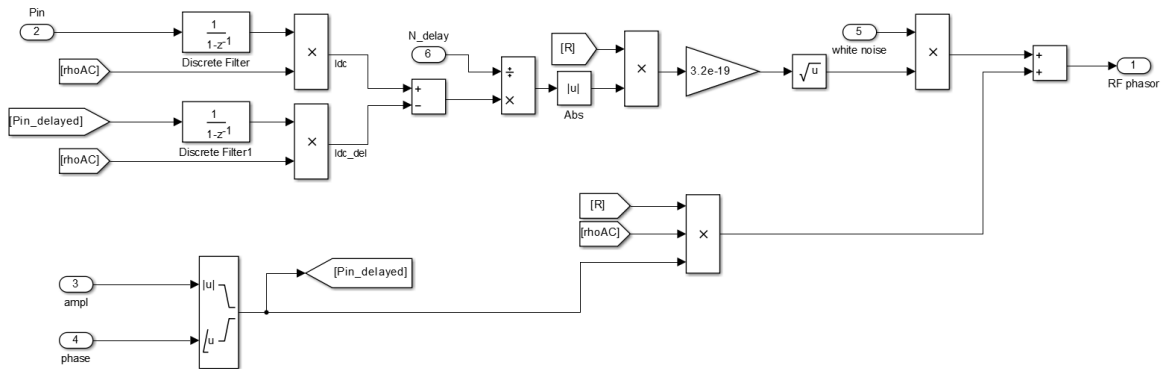


Рис. 6. Схема модели фотодетектора

Модель усилителя мощности включает три устройства, каждому из которых вносит свой вклад в шум ОЭАГ. Напряжение с выхода фотодетектора, поступающее на вход усилителя, затем вычисляется мощность сигнала. Полученный сигнал проходит через ограничитель и проводится операция перевода мощности в логарифмическую величину. Далее добавляется коэффициент усиления в децибелах, и затем полученное значение переводится в разы. Иллюстрация процесса, выполняющий усилитель мощности, приведена на рис. 7.

Чтобы компенсировать потери в электрооптических и оптоэлектронных преобразованиях, а также на выходе генератора получить требуемый уровень сигнала, коэффициент усиления усилителя выбрано порядка 50 дБ. Экспериментально через спектр анализатор определили, что коэффициент усиления усилителя составляет 49,16 дБ.

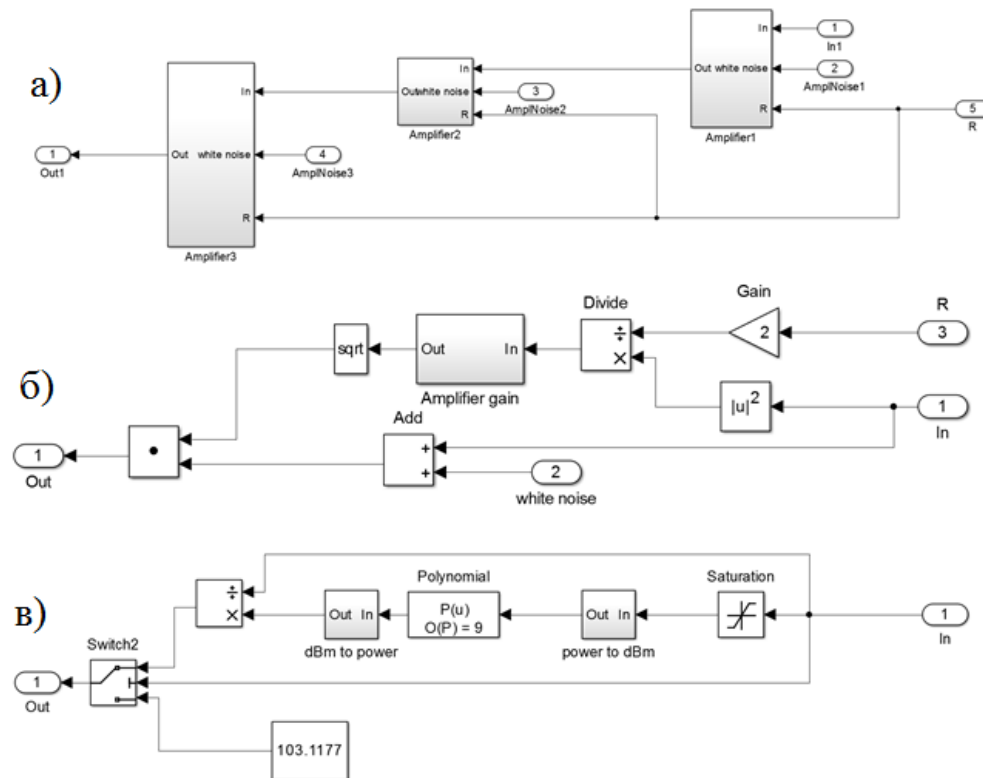


Рис. 7. Схема модели усилителя мощности

- а) Основная схема усилителя мощности;
 б) структура устройства Amplifier;
 в) структура устройства Amplifier gain

2 Исследование одноконтурного ОЭГ.

В работе [86] экспериментально определено, что в ОЭГ эффективно подавляется паразитные моды в длинах отрезка оптического волокна 50-100 метров. Поэтому исследование одноконтурного ОЭГ проводилось на разных длинах задержки, в частности 50, 75, 100 и 500 метров.

Расчетная модель одноконтурного ОЭАГ.

Спектр генерации ОЭГ определяется временем запаздывания в оптическом волокне Δt :

$$\Delta t = nl/c, \quad (11)$$

где n – групповой показатель преломления оптического волокна (для кварцевого стекла $n = 1,45$), l – общая длина ВОГ, c – скорость света в вакууме. В соответствии с условием баланса фаз собственный спектр генерации ОЭГ будет представлять эквидистантный ряд частот одинаковой амплитуды:

$$f_{ok} = \frac{k}{\Delta t} = \frac{ck}{nl}, \quad (12)$$

где k - порядковый номер моды генерации ОЭГ. Нужная мода выделяется в схеме ОЭГ при помощи ППФ.

Расстояние между соседними модами (разность частотных мод - РЧМ):

$$PCM = \frac{c}{nl} . \quad (13)$$

Пример 1. Модель ОЭАГ с ОБ длиной 50 м

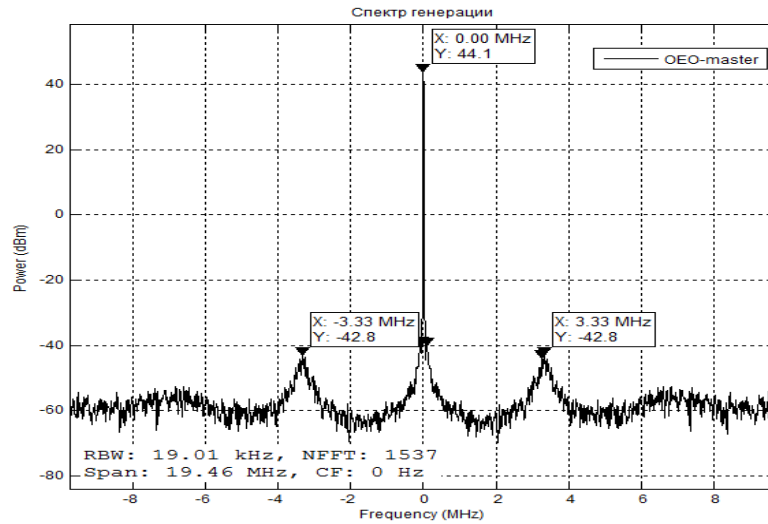


Рис. 8. Спектр генерации модели одноконтурного ОЭГ

Как следует из рис. 8, на длине задержки 0,250 мкс спектр генерации составил 44,1 дБм, область свободной дисперсии 3,33 МГц. Уровень боковых мод подавлен свыше 86,9 дБ.

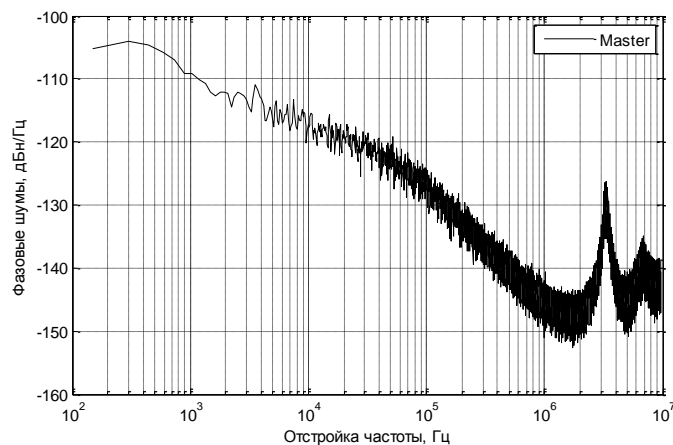


Рис. 9. распределение мощности фазовых шумов ($l_{BOT} = 50$ м)

Из данных рис. 9, следует, что уровень фазового шума ОЭГ составляет: $S_{10кГц} = -117$ дБн/Гц, $S_{100кГц} = -129$ дБн/Гц, $S_{1МГц} = -146$ дБн/Гц.

Пример 2. Модель ОЭАГ с ОБ длиной 500 м

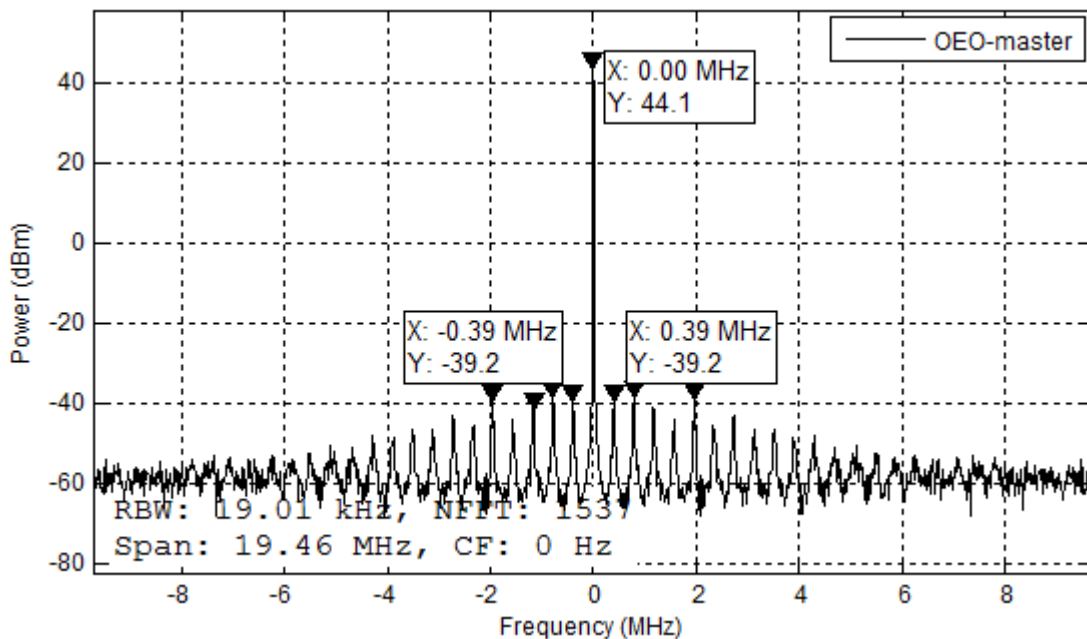


Рис. 10. Спектр одноконтурного ОЭАГ с ОБ длиной 500 м.

Из рис. 10 следует, что при задержке 2,502 мкс область свободной дисперсии составляет 0,39 МГц, а уровень подавления боковых мод - 83,3 дБ.

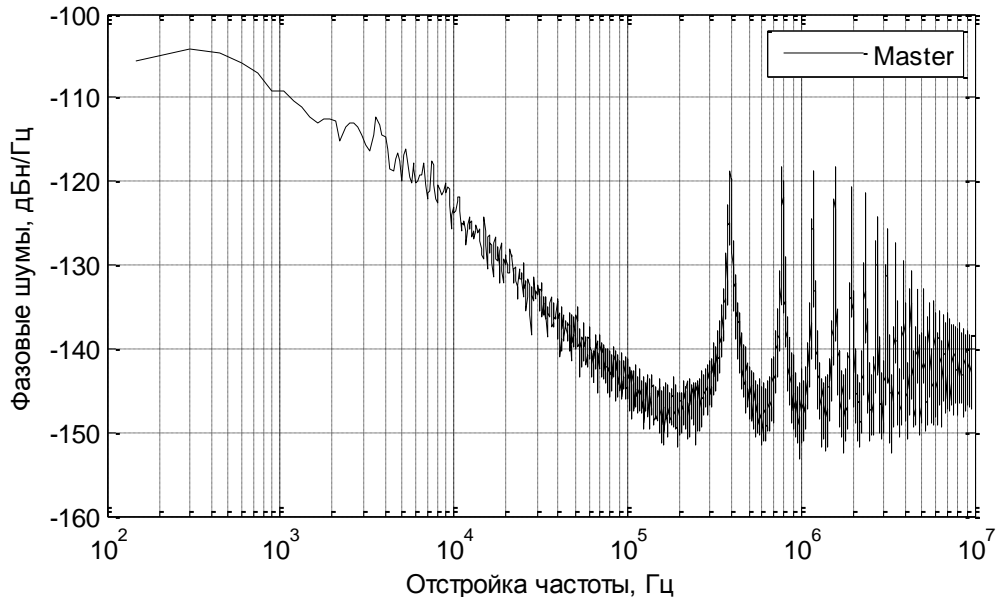


Рис. 11. Односторонняя плотность мощности фазовых шумов ОЭАГ ($l_{BOT} = 500$ м)

- Рассчитать уровень спектральной чистоты спектра излучения ОЭАГ;
- Определить требование к полосе пропускания фильтра на рис.3;
- Определить требование к ширине линии излучения лазера на рис.3;

Задача 2

Оптоэлектронный автогенератор (ОЭАГ) СВЧ диапазона должен обеспечивать следующие характеристики:

- тип резонансной системы ОЭАГ волоконно-оптическая линия задержки (ВОЛС);
- уровень спектральной плотности мощности ФШ $\mathcal{L}(f)$ излучения ОЭАГ в одной боковой полосе при заданной отстройке f от несущей частоты в частотном интервале 1 Гц. 120 дБс;
- рабочая радиочастота 1 ГГц;

Задание:

- Рассчитать необходимую длину ВОЛС;
- Определить требование к полосе пропускания фильтра на рис.4;
- Определить требование к ширине линии излучения лазера на рис.4;

Рекомендуемая литература

1. E. C. Levy, O. Okusaga, M. Horowitz, C. R. Menyuk, W. Zhou, and G. M. Carter, “Comprehensive computational model of single- and dualloop optoelectronic oscillators with experimental verification,” *Opt. Express* 18, 21461–21476 (2010).

2. Levy, E.C. Modeling optoelectronic oscillators / E.C. Levy, M. Horowitz, C.R. Menyuk // *JOSA B*. – 2009. – Vol. 26, №1, p.148 – 158

Задорин А. С. Методы и устройства радиофотоники в системах радиосвязи. Методические указания по выполнению практических работ: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 109 с

4. Лабораторная работа.

Исследование влияния параметров оптоэлектронного автогенератора с инжекционной синхронизацией

Цель работы

Исследование влияния параметров схемы оптоэлектронного автогенератора с инжекционной синхронизацией (ИС-ОЭАГ) на его основные характеристики - частоту генерации и спектр фазовых шумов.

Расчетная модель инжекционно-синхронизированной схемы ОЭАГ.

Инжекционно-синхронизированный ОЭАГ (ИС-ОЭАГ) [1] **Ошибка! Источник ссылки не найден.** позволяет эффективно подавлять паразитные моды и обеспечивает компромисс между широкой спектральной перестройкой и уровнем фазовых шумов.

Компоненты в контуре такого ОЭАГ моделируются таким же образом, как это было описано выше, в модели одноконтурного ОЭАГ. Различие между двумя схемами обусловлено наличием внутренних мостовых связей, используемых в качестве внутреннего затвора между колебательными сигналами ведущего и ведомого генераторов ОЭАГ.

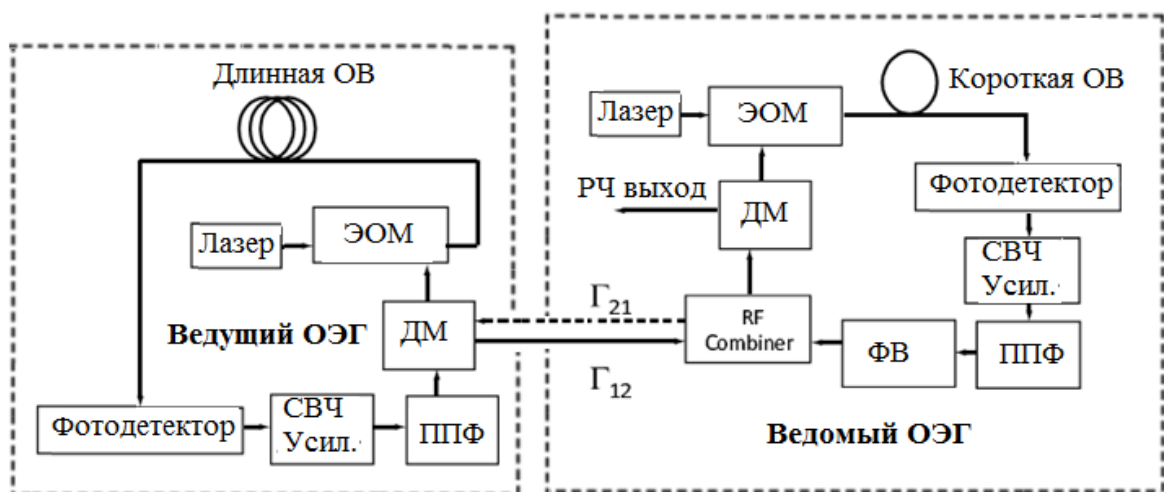


Рис. 1. Структурная схема инжекционно-синхронизированного ИС-ОЭГ

В качестве примера ИС-ОЭГ рассмотрим синхронизацию двух ОЭАГ с длинами ОБ $l_{BOT} = 75$ м и $l_{BOT} = 750$ м. Схема ИС-ОЭГ, реализованная в среде Matlab-Simulink, приведена на рис. 13

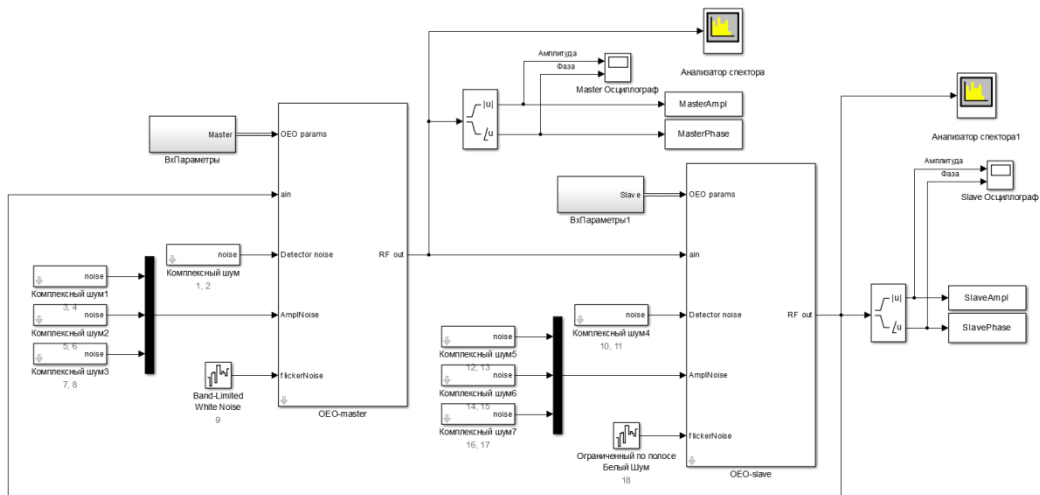


Рис. 2. Схема ИС-ОЭАГ в среде Matlab-Simulink

На рис. 14 и 16 приведены соответствующие результаты моделирования спектра генерации Matlab-Simulink при длинах ОБ 75 м и 750 м., а также спектры фазовых шумов.

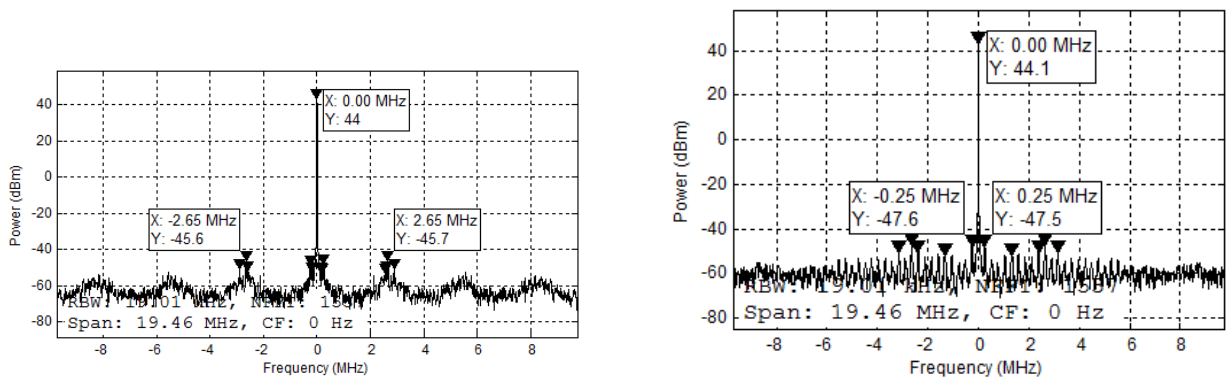


Рис.3. Спектр генерации модели ИС-ОЭГ при задержке 0,3753 мкс. и 3,753 мкс в полосе 20 МГц.

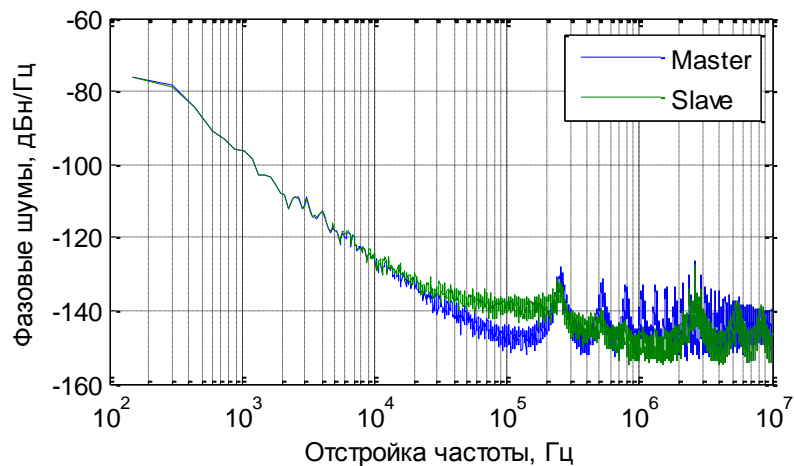


Рис. 4. Односторонняя плотность мощности фазовых шумов ИС-ОЭАГ

Сравнение данных рисунков 11 и 15 показывает, что применение схемы ИС-ОЭАГ обеспечивает подавление паразитных мод более чем на 93 дБ.

Лабораторное задание

3. Даны структурная схема ИС-ОЭАГ по рис.1.)
4. Каждому студенту, в соответствии с его порядковым номером и таблицей 1, заданы:
 - рабочая частота ИС-ОЭАГ;
 - длина используемой световой волны;
 - $\mathcal{L}(\Delta f)$ – требуемая спектральная плотность мощности ФШ в одной боковой полосе при заданной отстройке f от несущей частоты в частотном интервале 1 Гц;
5. С помощью предложенной модели ОЭАГ выполнить следующие действия:
 - Ознакомится с интерфейсом программы;
 - Рассчитать длину оптических волокон в ведущем и ведомом ОЭАГ, обеспечивающих требуемый уровень $\mathcal{L}(\Delta f)$ и подавления паразитных мод;
6. Подготовить отчет, в котором дать объяснения полученным результатам.

Таблица 1. Варианты лабораторных заданий.

№ п./п	Рабочая частота ОЭАГ, МГц.	Длина волны, нм.	Δf , кГц.	$\mathcal{L}(\Delta f)$, дБс
1	800	800	10	100
2	1200	1300	20	120
3	2500	1550	100	140

Контрольные вопросы

5. Поясните различия в принципах работы схем ОВ-ОЭАГ и ИС-ОЭАГ
6. Что такое спектральная чистота сигнала АГ?
7. Какой узел в схеме на рис.1 играет роль резонансной системы?
8. Как связана спектральная чистота сигнала ИС-ОЭАГ добротностью резонансной системы ведомого АГ?

Рекомендуемая литература

1. E. C. Levy, O. Okusaga, M. Horowitz, C. R. Menyuk, W. Zhou, and G. M. Carter, “Comprehensive computational model of single- and dualloop optoelectronic oscillators with experimental verification,” *Opt. Express* 18, 21461–21476 (2010).
2. Levy, E.C. Modeling optoelectronic oscillators / E.C. Levy, M. Horowitz, C.R. Menyuk // *JOSA B*. – 2009. – Vol. 26, №1, p.148 – 158
3. Задорин А. С. Методы и устройства радиофотоники в системах радиосвязи. Методические указания по выполнению практических работ: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019, 109 с.

5. Лабораторная работа.

Исследование влияния параметров оптоэлектронного автогенератора с резонансной системой на основе оптического микрорезонатора (ОМР)

Цель работы

Исследование влияния параметров схемы оптоэлектронного СВЧ-автогенератора с резонансной системой на основе оптического микрорезонатора (ОМР-ОЭАГ) на его основные характеристики - частоту генерации и спектр фазовых шумов.

Расчетная модель схемы ОМР-ОЭАГ.

Описание программного обеспечения лабораторной работы

Работа проводится на программной модели ОМР-ОЭАГ (файл «Расчет ФШ ОЭАГ с ОМР.xmcd»).

Структура программы «Расчет ФШ ОЭАГ с ОМР.xmcd» включает следующие разделы: содержит следующие разделы:

- **Модуль оценки параметров резонатора для ОЭАГ**

$\epsilon := 2.37$	$\sqrt{\epsilon} = 1.539$	диэлектрическая проницаемость резонатора /плавленый кварц
$c := 3 \cdot 10^{11}$		скорость света мм./с.
$\lambda_0 := 1.5 \cdot 10^{-3}$	$\lambda_{in} := \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}} = 9.744 \times 10^{-4}$	длина световой волны, мм.
$f_0 := \frac{c}{\lambda_0} = 2 \times 10^{14}$		частота света, Гц.
$\Delta\lambda := 0.25 \cdot 10^{-8}$		ширина линии излучения лазера, мм.
$\Delta\nu := \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.333 \times 10^8$		ширина линии излучения лазера, Гц.
$f_{rf} := 1 \cdot 10^9$		частота генерации ОЭАГ, Гц.
$R := 31 \cdot 10^0$		радиус ДДР, мм.
$\nu := 200000$		азимутальный индекс моды
$2 \cdot \pi \cdot \frac{R}{\lambda_{in}} = 1.999 \times 10^5$		максимальное значение ν
$\Delta opt := 2 \cdot \pi \cdot \frac{R}{\nu} = 9.739 \times 10^{-4}$		период интерференционной картины, мм
$\Delta f := \frac{c}{(2 \cdot \pi \cdot R \sqrt{\epsilon})} = 1 \times 10^9$		межмодовый интервал FSR (Free Spectral Range), Гц.

• **Модуль оценки резонансной оптической частоты ОМР**

$$f_{opt_E} := \Delta f \left[\nu + 1.85576 \cdot \nu^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] = 2.002 \times 10^{14}$$

$$f_{opt_H} := \Delta f \left[\nu + 1.85576 \cdot \nu^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] = 2.002 \times 10^{14}$$

$$f_{opt} := \frac{c \cdot \nu}{[2 \cdot \pi \cdot (R \sqrt{\epsilon})]} = 2.001 \times 10^{14}$$

$$f_{opt_E} - f_{opt_H} = 7.607 \times 10^8$$

$$m(r) := \text{round} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda_{in}}, 0 \right)$$

зависимость азимутального индекса МШГ ДДР от радиуса r

$$m(R) := \text{round} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{R}{\lambda_{in}}, 0 \right) = 1.999 \times 10^5$$

• **Модуль оценки ограничений добротности резонатора из за рассеяния на неоднородностях его поверхности**

$$d := 1.7 \cdot 10^{-6} \quad \text{толщина рассеивающего слоя резонатора, мм.}$$

$$B := 5 \cdot 10^{-6} \quad \text{средний размер неоднородности рассеивающего слоя резонатора, мм.}$$

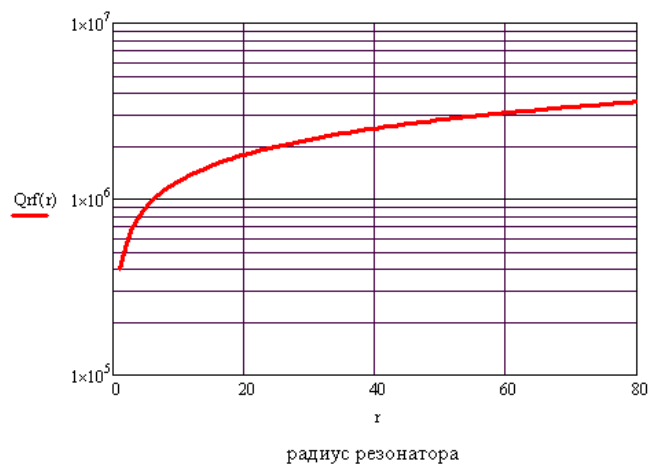
$$Q_{opt}(r) := \frac{\left[3 \cdot \epsilon \cdot (\epsilon + 2)^2 \cdot \lambda_0^{\frac{7}{2}} \cdot (2 \cdot r)^{\frac{1}{2}} \right]}{\left[(4 \cdot \pi)^3 \cdot (\epsilon - 1)^{\frac{5}{2}} \cdot (d \cdot B)^2 \right]} \quad \text{зависимость оптической добротности ДДР от радиуса r [2]}$$

$$Q_{opt}(R) = 4.437 \times 10^{11} \quad \text{расчет оптической добротности ДДР [2]}$$

$$Q_{rf}(r) := Q_{opt}(r) \cdot \frac{F_{rf}}{f_0} \quad Q_{rf}(R) = 2.218 \times 10^6 \quad \text{оценка добротности ДДР на радиочастоте}$$

• **Модуль расчета зависимость добротности резонатора от его радиуса на радиочастоте**

$$r = 1..80$$



- **Модуль параметров модели Лисона**

$$k := 1.38 \cdot 10^{-23}$$

постоянные Больцмана

$$P_c := 5 \cdot 10^{-3}$$

мощность радиосигнала P_c , Вт

$$F := 2$$

коэффициент шума активного прибора АГ

$$G := 10$$

коэффициент усиления активного прибора АГ

**спектральная плотность мощности
фазового шума в полосе 1Гц.**

$$L(T, f_0, Q, f_{\alpha}, \Delta f) := 10 \cdot \log \left[\frac{F \cdot G \cdot k \cdot T}{P_c} \cdot \left[\left(\frac{f_0}{2 \cdot Q} \right)^2 \cdot \frac{f_{\alpha}}{(\Delta f)^3} + \left(\frac{f_0}{2 \cdot Q} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\Delta f)^2} + \frac{f_{\alpha}}{(\Delta f)} + 1 \right] \right]$$

- **Модуль расчета спектральная плотность мощности фазового шума в полосе 1Гц.**

$$f_{\alpha} := 10$$

граничная частота фликкер шума, Гц

$$Q := 2 \cdot 10^4$$

добротность Q

$$f_0 := 1.2 \cdot 10^9$$

частота генерируемого сигнала

$$T := 300$$

температура среды, К

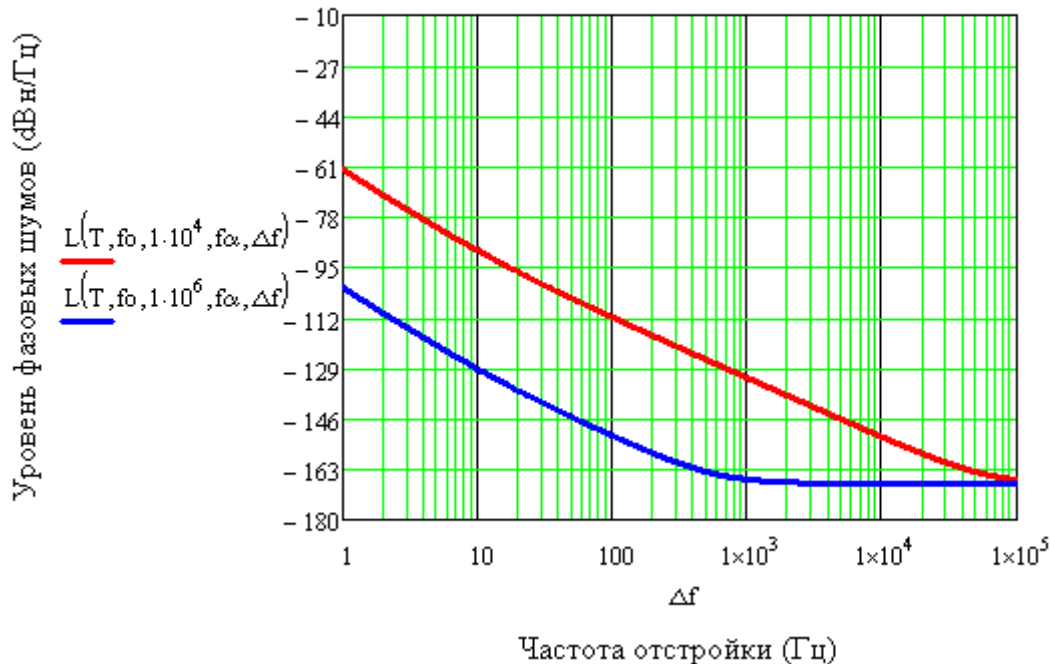
$$\Delta f := 10 \cdot 10^3$$

частотная расстройка, Гц.

$$L(T, f_0, Q, f_{\alpha}, \Delta f) = -157.805$$

$$\Delta f := 0.1 \cdot 10^5$$

Спектральная плотность фазовых шумов



Лабораторное задание

5. Даны структурная схема ОЭГ по рис.7, а также ее MathCad-модель «Расчет ФШ ОЭАГ с ОМР.xmcd»,» ((путь- X:\0 Temp\00 Методы и устройства РФ в СРС\00 МРФ-СР разработка УМПО\Разработка ПЗ-РО 2019\0 МУРФ-СРС)
6. Каждому студенту, в соответствии с его порядковым номером и таблицей 1, заданы:
 - рабочая частота ОМР-ОЭАГ;
 - длина используемой световой волны;
 - $\mathcal{L}(\Delta f)$ – требуемая спектральная плотность мощности ФШ в одной боковой полосе при заданной отстройке f от несущей частоты в частотном интервале 1 Гц;
7. С помощью предложенной модели ОМР-ОЭАГ выполнить следующие действия:
 - Ознакомится с интерфейсом программы;
 - Рассчитать необходимые габариты ОМР;
8. Подготовить отчет, в котором дать объяснения полученным результатам.

Таблица 1. Варианты лабораторных заданий.

№ п./п	Рабочая частота ОЭАГ, МГц.	Длина волны, нм.	Δf , кГц.	$\mathcal{L}(\Delta f)$, дБс
1	800	800	10	100
2	1200	1300	20	120
3	2500	1550	100	140

Контрольные вопросы

1. Поясните различия в принципах работы классических известных Вам типов АЭАГ.
2. Назовите преимущества АЭАГ с оптическим микрорезонатором перед другими известными Вам типами оптоэлектронных автогенераторов.
3. Какой уровень связи ОМР с элементами связи на рис.7 является оптимальным?
4. Как связана рабочая частота ОЭАГ с размерами ОМР?

Контрольные задачи

Задача

Оптоэлектронный автогенератор (ОЭАГ) СВЧ диапазона должен обеспечивать следующие характеристики:

- тип резонансной системы ОЭАГ оптический микрорезонатор (ОМР);

- уровень спектральной плотности мощности ФШ $\mathcal{L}(f)$ излучения ОЭАГ в одной боковой полосе при заданной отстройке f от несущей частоты в частотном интервале 1 Гц.

120 дБс;

- рабочая радиочастота 1 ГГц;

Задание:

- Рассчитать необходимый диаметр ОМР;
- Определить требование к полосе пропускания фильтра на рис.7;
- Определить требование к ширине линии излучения лазера на рис.7;

Рекомендуемая литература

1. E. C. Levy, O. Okusaga, M. Horowitz, C. R. Menyuk, W. Zhou, and G. M. Carter, “Comprehensive computational model of single- and dualloop optoelectronic oscillators with experimental verification,” *Opt. Express* 18, 21461–21476 (2010).
2. Levy, E.C. Modeling optoelectronic oscillators / E.C. Levy, M. Horowitz, C.R. Menyuk // *JOSA B*. – 2009. – Vol. 26, №1, p.148 – 158
3. А. Н. Ораевский, “Волны шепчущей галереи”, *Квантовая электроника*, **32:5** (2002), 377–400
4. Задорин А. С. Методы и устройства радиофотоники в системах радиосвязи. Методические указания по выполнению практических работ: учебное пособие – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – .109 с.