

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



МИРОНОВА ПОЛИНА ДЕМЬЯНОВНА

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ МОМЕНТА ПРИЁМА СИНХРОИМПУЛЬСА В
СИСТЕМЕ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА ОСНОВЕ
ОТСЧЁТОВ СО СМЕЖНОЙ ПАРЫ ВРЕМЕННЫХ СЕГМЕНТОВ

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности.

Научный руководитель: **Румянцев Константин Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Широков Игорь Борисович**,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электронной техники
Севастопольского государственного
университета (г. Севастополь);
Семенов Евгений Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
телекоммуникационных систем
Волгоградского государственного
университета (г. Волгоград).

Защита состоится «23» мая 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.07 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», аудитория Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте Южного федерального университета по адресу <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1326416/>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, д. 44, корпус «Д», ИТА ЮФУ, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.02.07.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.02.07
кандидат технических наук, доцент



Пилипенко А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Успешно реализованные волоконно-оптические системы квантового распределения ключа (КРК) с фазовым кодированием состояний фотонов функционируют по схеме с автоматической компенсацией поляризационных искажений и обеспечивают устойчивую работу при изменяющихся внешних факторах. Для эффективной работы автокомпенсационной системы КРК необходимо наличие стабильной синхронизации кодирующей и приёмопередающей станций. Синхронизация станций в составе системы КРК считается установленной в момент регистрации квантового синхроимпульса в приёмопередающей станции. Таким образом, проблема синхронизации формулируется как проблема оценки момента приёма синхроимпульса. Несовершенство синхронизации может вызвать существенное ухудшение эффективности КРК в целом.

Известны двухэтапные алгоритмы синхронизации, преимуществом которых является отсутствие влияния времени нечувствительности однофотонного лавинного фотодиода (ОЛФД), используемого для детектирования ослабленных до фотонного уровня синхроимпульсов, на процесс синхронизации. Здесь в процессе синхронизации аппаратура первоначально работает в режиме поиска фотона. При первом превышении порогового уровня процессом с выхода ОЛФД (регистрации фотона) аппаратура переходит на этап тестирования. Повторный опрос ОЛФД производится только в интервалах ожидаемого прихода квантового импульса во время действия импульса стробирования. В остальное время ОЛФД не реагирует на приём фотонов.

Для известных двухэтапных алгоритмов предложены методики расчёта вероятностных, временных и энергетических характеристик, вероятности ошибки и среднего времени синхронизации. В то же время в методике расчёта параметров синхронизации не учитывалось влияние дисперсионных свойств оптических волокон (ОВ), которое накладывает ограничения на дальность КРК.

В случае фазового кодирования состояний фотонов предпочтительным подходом является использование интерферометра Маха-Цендера, в котором сигналы отдельно модулируются на двух сторонах линии связи, а выходные сигналы плеч интерферометра Маха-Цендера интерферируют в направленных волоконных ответвителях (НВО) X-типа перед подачей на ОЛФД. Однако известные алгоритмы синхронизации на интерферометре Маха-Цендера предполагают значительные временные затраты на синхронизацию системы КРК. Для снижения времени синхронизации перспективно применять алгоритмы на основе анализа смежных пар интервалов. Однако известные алгоритмы оценки момента приёма синхроимпульса предполагают только этап поиска и обнаружения синхроимпульса без анализа и коррекции вероятности ошибки (этап тестирования), всегда отличной от нуля в связи со статистическим характером сигнальных отсчётов.

Последнее предполагает проведение исследований для поиска оптимального алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК на основе анализа смежных пар интервалов (сегментов), позволяющего снизить время вхождения в синхронизм при

обеспечении вероятности обнаружения не хуже заданного уровня и включающего этап тестирования для отбраковки ошибочных решений.

Степень разработанности темы. Анализ известных алгоритмов и технических решений синхронизации системы КРК показывает значительные временные затраты на процесс синхронизации, а также отсутствие учёта влияния дисперсионных свойств среды распространения, исследование идеализированного случая передачи синхроимпульсов. Следует отметить, дисперсионные свойства волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) накладывают ограничения на дальность КРК. Реализация систем КРК на одном интерферометре Маха-Цендера в случае фазового кодирования состояний фотонов показывает эффективность в плане стабильности интерференционной картины благодаря распространению частей импульсов через один и тот же интерферометр. Однако это требует значительных временных ресурсов. Известный подход, заключающийся в анализе смежных пар временных сегментов, потенциально может снизить время вхождения в синхронизм, однако он не предполагает процедуру отбраковки ошибочных решений, что накладывает ограничения на вероятность правильного обнаружения синхросигнала.

Цель диссертационных исследований заключается в уменьшении времени синхронизации при обеспечении вероятности обнаружения синхронизации не хуже заданного уровня за счёт внедрения оптимального алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса станций автокомпенсационной системы КРК на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов с добавлением этапа тестирования.

Объект исследований: волоконно-оптическая автокомпенсационная система КРК.

Предмет исследований: алгоритм грубой оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов.

Общая научная задача: разработка и исследование алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов с добавлением этапа тестирования, обеспечивающего снижение времени синхронизации при обеспечении вероятностных характеристик не хуже заданного уровня.

Частные задачи диссертационных исследований:

1. Анализ известных алгоритмов и существующих технических решений синхронизации станций систем КРК. Обоснование актуальности и цели, определение общей научной задачи и частных задач диссертационных исследований.

2. Синтез и анализ двухэтапного алгоритма грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем в системе КРК.

3. Синтез и анализ двухэтапного алгоритма грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в системе КРК.

4. Сравнительный анализ эффективности двухэтапных алгоритмов грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов с учётом дисперсионных свойств среды распространения.

Для решения поставленных задач используются следующие методы исследования:

- методы теории обнаружения для синтеза алгоритма грубой оценки момента приёма синхросигнала в системе КРК;

- методы теории вероятностей и математической статистики при выводе аналитических выражений для расчёта вероятностных характеристик системы КРК в режиме синхронизации;

- численные методы для количественной оценки влияния параметров аппаратуры на вероятностные и временные характеристики синхронизации системы КРК;

- компьютерное моделирование для доказательства эффективности и подтверждения реализуемости предлагаемого алгоритма синхронизации в автокомпенсационных системах КРК.

Основные научные положения, выдвигаемые для защиты:

Положение 1. Поиск оптимального алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК, позволяющего снизить время синхронизации при обеспечении вероятности обнаружения не хуже заданного уровня с добавлением этапа тестирования для отбраковки ошибочных решений, является актуальной научной задачей.

Положение 2. Разработанный двухэтапный алгоритм грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем в системе КРК с добавлением этапа тестирования гарантирует отбраковку ошибочных решений на этапе поиска при обеспечении вероятности обнаружения не хуже заданного уровня.

Положение 3. Разработанный двухэтапный алгоритм грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в системе КРК с добавлением этапа тестирования гарантирует отбраковку ошибочных решений на этапе поиска при обеспечении вероятности обнаружения не хуже заданного уровня.

Положение 4. Сравнительный анализ предложенных двухэтапных алгоритмов оценки момента приёма синхросигнала на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов позволяет выбрать оптимальный алгоритм оценки момента приёма синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем, позволяющий снизить время поиска и синхронизации по сравнению с алгоритмом оценки момента приёма синхросигнала на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом.

К наиболее существенным новым научным результатам, полученным в результате диссертационных исследований, относятся:

- двухэтапный алгоритм грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым

уровнем в системе КРК с добавлением этапа тестирования, обеспечивающий вероятность обнаружения не хуже заданного уровня;

- двухэтапный алгоритм грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в системе КРК с добавлением этапа тестирования, обеспечивающий вероятность обнаружения не хуже заданного уровня;

- методика выбора порогового уровня для обеспечения заданной вероятности ложного срабатывания в паре шумовых временных сегментов;

- аналитические выражения для расчёта временных, вероятностных и энергетических характеристик двухэтапных алгоритмов грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов с учётом свойств среды распространения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

Разработан двухэтапный алгоритм грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем в системе КРК с добавлением этапа тестирования, отличающийся отбраковкой ошибочных решений на этапе поиска и обеспечивающий вероятность обнаружения не хуже заданного уровня (пункт 5 паспорта специальности).

Разработан двухэтапный алгоритм грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в системе КРК с добавлением этапа тестирования, отличающийся отбраковкой ошибочных решений на этапе поиска и обеспечивающий вероятность обнаружения не хуже заданного уровня (пункт 5 паспорта специальности).

Впервые получены аналитические выражения для расчёта временных, вероятностных и энергетических характеристик двухэтапных алгоритмов грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов с учётом свойств среды распространения (пункт 5 паспорта специальности).

Практическая ценность работы соответствует пункту 5 паспорта специальности и заключается в следующем:

Двухэтапный алгоритм оценки момента приёма синхроимпульса на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем при обеспечении вероятности успешного поиска и успешного тестирования более 99 % позволяет снизить среднее время синхронизации, по сравнению с двухэтапным алгоритмом оценки момента приёма синхроимпульса на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом. Так, при среднем числе фотонов в синхроимпульсе 5 различие составляет 2 и 1,33 раза для среднего времени поиска и синхронизации соответственно.

Разработана методика выбора порогового уровня для обеспечения заданной вероятности ложного срабатывания в паре шумовых временных сегментов в двухэтапном алгоритме грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем.

Разработана методика проектирования аппаратуры обнаружения синхросигнала на основе анализа суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем для волоконно-оптических и атмосферных систем КРК.

Предложены структуры подсистем синхронизации согласно предложенным двухэтапным алгоритмам грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов.

Сформулированы рекомендации по выбору оптимального алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса: при ориентации на быстроедействие алгоритма синхронизации целесообразно использовать алгоритм на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем, позволяющий, кроме того, достичь лучших показателей вероятности успешной синхронизации, по сравнению с алгоритмом на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом при одних и тех же условиях.

Разработаны два программных продукта для ЭВМ, позволяющие моделировать синтезированные алгоритмы грубой оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК на основе анализа суммы отсчётов со смежной пары временных сегментов.

Внедрение результатов работы. Результаты разработки двухэтапных алгоритмов оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК на основе анализа суммы отсчётов со смежной пары временных сегментов внедрены в научную работу и учебный процесс кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем, а также в программу повышения квалификации «Квантовые коммуникации», реализуемую в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности на основе приказа об утверждении дополнительной образовательной программы № 298 от 27 февраля 2023 г.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректной постановкой цели и задач, результатами вычислительного эксперимента и строгостью применяемого математического аппарата. Отклонение результатов моделирования от теоретических расчётов составляет не более 1,41 и 1,16 % для алгоритма на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем и алгоритма на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом соответственно, что указывает на правильность полученных аналитических выражений и возможность их применения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 3-х международных и 8 всероссийских научно-технических конференциях:

- ICCMIT 2018. International Conference on Communication, Management and Information Technology. University of Politecnica de Madrid, Madrid, Spain. Conference Date: April 2-4, 2018;

- International Scientific Conference Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW 2019, 24-28 июня 2019, Дивноморское, Россия;

- 13th International Conference on Security of Information and Networks (SIN 2020), 4-7 November 2020, Istanbul, Turkey;

- Всероссийская научно-техническая конференция им. профессора Пьявченко О.Н. «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» (КомТех 2020), 3-5 июня 2020, ЮФУ, г. Таганрог;

- II Всероссийская научная конференция «Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации» (FISP-2020), 30 ноября 2020, г. Ставрополь;

- I Всероссийская научно-практическая конференция «Digital Era», 26 марта 2021, г. Грозный;

- V-IX Всероссийские научно-технические конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности», 1-7.04.2019, 6-12.04.2020, 5-11.04.2021, 4-9.04.2022, 10-15.04.2023, Таганрог.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 17 научных работ. Из них в перечне рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора технических наук, в соавторстве с научным руководителем Румянцевым К. Е., опубликованы 3 статьи [1-3]. В реферируемых изданиях, учитываемых в РИНЦ, опубликовано 6 работ [8-13]. В трудах международных конференций, реферируемых в базе данных «SCOPUS», апробированы 4 научные статьи [4-7]. Четыре статьи принадлежат лично диссертанту [8-9, 14-15].

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует пункту 5 («Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки») паспорта научной специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Личный вклад автора. Основные научные результаты, результаты патентных исследований, аналитические выражения для описания двухэтапных алгоритмов грубой оценки момента приёма синхроимпульса в волоконно-оптической автокомпенсационной системе КРК на основе отсчётов со смежной пары сегментов, количественная оценка параметров процесса синхронизации, моделирование предложенных двухэтапных алгоритмов оценки момента приёма синхроимпульса, анализ результатов моделирования, рекомендации по применению алгоритмов, приведённые в диссертации, получены автором лично.

Структура диссертационной работы. Диссертационное исследование написано на русском языке, включает введение, пять глав, заключение, список использованных источников и приложения. Полный объём диссертации составляет 163 страницы, включая 35 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 115 наименований. Приложения содержат 7 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность проведения исследований для поиска оптимального алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК на основе анализа смежных пар интервалов

(сегментов), позволяющего снизить время вхождения в синхронизм при обеспечении вероятности обнаружения синхронизации не хуже заданного уровня и включающего этап тестирования для отбраковки ошибочных решений. Определены объект, предмет, цель и общая научная задача диссертационных исследований, сформулированы частные задачи диссертационных исследований. Отмечена апробация результатов исследований и публикации, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе рассмотрены способы генерации секретного ключа посредством КРК с дискретной переменной DV-QKD и с непрерывной переменной CV-QKD, обоснован выбор генерации секретного ключа посредством КРК с DV-QKD в связи с обеспечением протяжённой линии связи и доказанной эффективностью практического применения. Проведённый анализ рынка коммерческих решений показал широкое применение протокола квантовой криптографии BB84 и его модификации BB84 Decoy-State. При реализации системы КРК по протоколу BB84 наиболее эффективным решением является фазовое кодирование состояний фотонов, обеспечивающее рекордные протяжённости ВОЛС. Таким образом, для дальнейших исследований выбрана система КРК с автоматической компенсацией поляризационных искажений с одним интерферометром Маха-Цендера по принципу «plug&play», отличающаяся устойчивой и стабильной работой.

Необходимым условием эффективной работы систем КРК является наличие точной и стабильной подсистемы синхронизации приёмопередающей и кодирующей станций системы КРК. Существующие коммерческие решения систем КРК реализуют процесс синхронизации приёмопередающей и кодирующей станций в многофотонном режиме. Примерами таких систем КРК являются id 3110 Clavis 2 и QPN 5505.

Синхронизация станций в составе системы КРК считается установленной в момент регистрации (прихода) квантового синхроимпульса в приёмопередающей станции. Несовершенство синхронизации может вызывать существенное ухудшение эффективности системы КРК в целом. Например, осуществление НСД и внесение помех в линию связи нарушает процесс формирования ключевой последовательности в связи с увеличением количества ошибок. Следовательно, увеличивается время формирования просеянной и одобренной ключевой последовательностей, а также повышается вероятность отбраковки ключевых последовательностей на этапах коррекции ошибок и усиления секретности.

Алгоритм синхронизации предполагает две последовательные операции обнаружения синхроимпульса – операция «грубой» и операция «точной» оценки момента приёма синхроимпульса. В течение «грубой» оценки аппаратура ищет временной интервал, в котором находится синхроимпульс. Далее аппаратура вычисляет временное отклонение положения синхроимпульса от начала найденного интервала («точная» оценка). Затем аппаратура переходит к процедуре слежения, обеспечивающей коррекцию положения синхроимпульса при влиянии внутренних и внешних помех и шумов. В случае нарушения синхронизации станций аппаратура переходит снова к операции «грубой»

оценки момента приёма синхроимпульса, процедура синхронизации повторяется.

Известные алгоритмы синхронизации на интерферометре Маха-Цендера предполагают значительные временные затраты на синхронизацию станций системы КРК. Для решения актуальной научной задачи снижения времени синхронизации могут применяться алгоритмы на основе анализа смежных пар интервалов. Однако в данном случае известные алгоритмы оценки момента приёма синхроимпульса предполагают только этап поиска и обнаружения синхроимпульса без анализа и коррекции вероятности ошибки (этап тестирования), всегда отличной от нуля в связи со статистическим характером сигнальных отсчётов.

Исследование специфики синхронизации в системах КРК и предварительный анализ существующих алгоритмов и технических решений синхронизации определяют проблемы применения подсистем синхронизации из-за дальности линии связи, ошибок обнаружения сигнальной пары временных интервалов. Поэтому поиск оптимального алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса в автокомпенсационной системе КРК, позволяющего снизить время синхронизации при обеспечении вероятности обнаружения синхронизации не хуже заданного уровня, является актуальной научной задачей. Алгоритм оценки момента приёма синхроимпульса должен включать не только этап поиска сигнальной пары временных интервалов, но и дополнительно вводимый этап тестирования для отбраковки ошибочных решений.

Во второй главе исследован процесс оценки момента приёма синхросигнала. Проблема синхронизации может формулироваться как проблема оценки момента (времени) приёма синхросигнала по результатам наблюдения. При этом синтез структуры аппаратуры синхронизации является частным случаем общей проблемы оценки параметров аппаратуры синхронизации. Применительно к задаче синтеза аппаратуры синхронизации оценка параметров сводится к нахождению оптимального алгоритма для определения момента приёма синхросигнала t_s по отношению к моменту начала работы $t=0$. С этой целью необходимо, во-первых, сформулировать критерий оценки момента приёма синхросигнала, а, во-вторых, установить статистическую связь между оцениваемым параметром и наблюдаемым процессом.

Для определения оптимальности оценок используются два наиболее популярных критерия: критерий максимума апостериорной вероятности и критерий условного среднего. Исходя из выявленных особенностей структуры приёмной станции с аппаратурой синхронизации и с учётом квантовой природы синхросигнала для определения оптимальности оценки момента приёма синхросигнала целесообразен выбор критерия максимума апостериорной вероятности.

Применим критерий максимума апостериорной вероятности к анализу модели аппаратуры синхронизации с учётом квантовой природы входного сигнала фотодетектора. Наблюдаемая переменная величина является дискретным вектором количества отсчётов (сигнальных фотонов и шумовых импульсов) $\vec{n} = (n_1, n_2, \dots, n_{Nw})$, регистрируемых фотодетектором в процессе

последовательного анализа N_w временных сегментов длительностью τ_w внутри временного кадра $[0, T_s]$, где T_s – период следования синхроимпульсов (рисунок 1). Длительность сегмента τ_w равна длительности синхроимпульса τ_s , поэтому в связи с высокой вероятностью нахождения синхроимпульса на границе двух смежных сегментов последние необходимо анализировать попарно.

Отметим, устройство оценки меняет вид, если импульсы интенсивности становятся менее гладкими. Известно, что граница Крамера-Рао для оценки момента приёма синхросигнала минимальна, если передаётся периодическая последовательность прямоугольных коротких импульсов. Такая реализация интенсивности фотонов и импульсов темнового тока (ИТТ) соответствует передаче узких оптических синхроимпульсов.

Оценка момента приёма синхроимпульса t_s по критерию максимума апостериорной вероятности может быть получена путём одновременного оценивания номера временного сегмента (окна) \widehat{j}_w , в котором располагается синхроимпульс, и временного сдвига положения синхроимпульса в пределах временного сегмента $\widehat{\Delta}_{ts}$ (рисунок 1). Вычисление \widehat{j}_w можно рассматривать как «грубую» оценку, тогда как оценка $\widehat{\Delta}_{ts}$ представляет «точную» оценку момента приёма синхроимпульса $\widehat{t}_s = \widehat{j}_w \cdot \tau_w + \widehat{\Delta}_{ts}$.

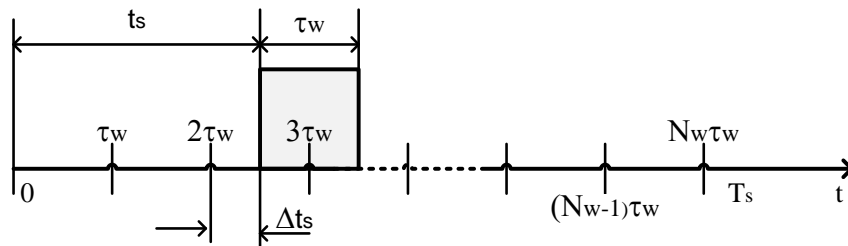


Рисунок 1 – Процесс оценки момента приёма синхроимпульса

Если известна априорная совместная плотность $p(j_w, \Delta_{ts})$, то можно дать оценку только для j_w по критерию максимума апостериорной вероятности из соотношения

$$\widehat{j}_w = \max_{j_w} [p(j_w | \vec{n})] = \max_{j_w} \left\{ \int_0^{\tau_w} p(\vec{n} | j_w, \Delta_{ts}) \cdot p(j_w, \Delta_{ts}) \cdot d\Delta_{ts} \right\},$$

где $p(\vec{n} | j_w, \Delta_{ts})$ – условная вероятность регистрации чисел фотонов и ИТТ $\vec{n} = (n_1, n_2, \dots, n_{N_w})$ во временных сегментах при данных j_w и Δ_{ts} .

Пусть в течение временного кадра определён временной сегмент \widehat{j}_w (выполнено грубое оценивание). Используя его в качестве истинного значения j_w на последующих интервалах наблюдения, получаем в следующем временном кадре точную оценку Δ_{ts}

$$\widehat{\Delta}_{ts} = \frac{\overline{n_{\widehat{j}_w}}}{\overline{n_{\widehat{j}_w}} + \overline{n_{\widehat{j}_w+1}}} \cdot \tau_w.$$

В третьей главе разработан двухэтапный алгоритм оценки момента приёма синхроимпульса на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем в системе КРК.

Временной интервал, равный по длительности периоду следования синхроимпульсов T_s , делится на N_w временных сегментов, причём длительность одного временного сегмента равна длительности синхроимпульса $\tau_w = \tau_s$

(рисунок 2). Операция «грубой» оценки начинается с этапа поиска, в течение которого аппаратура последовательно, начиная с 1-й пары временных сегментов, сравнивает отсчёты со смежной пары сегментов с заданным пороговым уровнем k_{th} . При ориентации на распределение Пуассона вероятность обнаружения в сигнальной паре i -го и $(i+1)$ -го временных сегментов при среднем суммарном числе сигнальных фотонов и шумовых импульсов $\bar{k}_s = \bar{n}_s + 2 \cdot \bar{n}_b$ может быть рассчитана по формуле $p_{th.s} = \sum_{k=k_{th}}^{\infty} Pos(k, \bar{k}_s)$, при ориентации на нормальное распределение – $p_{th.s} = \int_{k=k_{th}}^{\infty} p(k, \bar{k}_s) \cdot dk$. Вероятность ошибочного обнаружения сигнальной пары сегментов $p_{th.b}$ связана с пороговым уровнем k_{th} соотношением $p_{th.b} = \sum_{k=k_{th}}^{\infty} Pos(k, 2 \cdot \bar{n}_b)$ при ориентации на распределение Пуассона, а при ориентации на нормальное распределение – $p_{th.b} = 1 - \Phi\left(\frac{k_{th} - \bar{k}_b}{\sqrt{\bar{k}_b}}\right)$. Если за первый кадр сигнальная пара сегментов не найдена, аппаратура переходит к анализу следующего кадра, причём предельное допустимое число кадров $N_T \geq N_{T.min} = \left\lceil \frac{\lg(1-P_D)}{\lg(1-p_{D1})} \right\rceil$, где P_D – вероятность успешного обнаружения на этапе поиска, p_{D1} – условная вероятность обнаружения в процессе анализа первого временного кадра. В предельном случае при $N_T \rightarrow \infty$ предельно-максимальное значение среднего числа временных кадров для успешного поиска равно $\bar{N}_T = \frac{1}{p_{D1}} = \frac{N_T}{p_{th.s}} \cdot \left[\frac{p_{th.b}}{1 - (1 - p_{th.b})^{N_T}} \right]$, причём среднее время успешного поиска может быть найдено по формуле $\bar{T}_{search} = T_s \cdot \bar{N}_T$. При превышении отсчётом со смежной пары временных сегментов порогового уровня k_{th} этап поиска считается успешно завершённым, аппаратура переходит к этапу тестирования. Отметим, статистические свойства потока фотонов и ИТТ подчиняются распределению Пуассона, однако при многофотонном или токовом режиме синхронизации распределение Пуассона стремится к нормальному распределению.

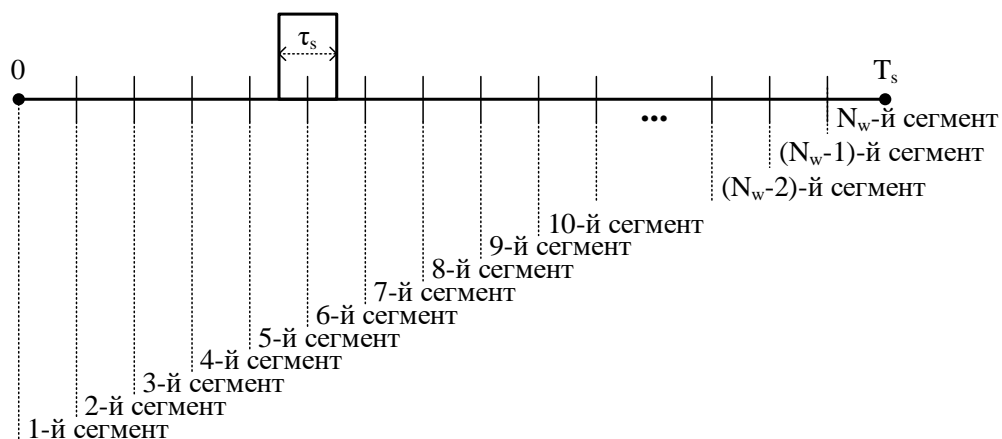


Рисунок 2 – Поиск синхроимпульса в 1-м временном кадре

Пороговый уровень зависит от вероятности ошибочного обнаружения сигнальной пары сегментов $p_{th.b}$ и может быть найден по формуле $k_{th} = \bar{k}_b + \sqrt{2 \cdot \bar{k}_b} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - 2 \cdot p_{th.b})$, где \bar{k}_b – среднее число шумовых импульсов в смежной паре сегментов.

На этапе тестирования аппаратура опрашивает фотодетектор в моменты стробирования $\tau_{strob} = 2\tau_s$. Если на этапе тестирования повторно регистрируется факт превышения суммарным отсчётом порогового уровня k_{th} , этап тестирования считается успешно завершённым, операция «грубой» оценки момента приёма синхроимпульса окончена. В противном случае, если за предельное число тестов на этапе тестирования N_{test} повторная регистрация превышения порогового уровня не происходит, этап тестирования считается завершённым с отрицательным результатом, аппаратура переходит к анализу оставшейся части временного кадра.

Предельное число тестов на этапе тестирования может быть найдено по формуле $N_{test} \geq N_{test.min} = \left\lceil \frac{\lg(1-P_{test})}{\lg(1-p_{test1})} \right\rceil$, где P_{test} – вероятность успешного тестирования, p_{test1} – условная вероятность успешного тестирования во время проведения 1-го теста.

Среднее число тестов для успешного тестирования определяется формулой $\overline{N_{test}} = \sum_{k_{test}=1}^{N_{test}} k_{test} \cdot (1 - p_{test1})^{k_{test}-1} \cdot p_{test1}$, причём среднее время тестирования будет равно $\overline{T_{test}} = T_s \cdot \overline{N_{test}}$.

Отметим, увеличение порогового уровня при фиксированном значении среднего числа фотонов в синхроимпульсе $\overline{n_s}$ приводит к значительному увеличению числа тестов, необходимого для успешного результата тестирования с заданной вероятностью – при $\overline{n_s} = 2$ и увеличении порогового уровня в 3 раза (с 4 до 12) число тестов возрастает в 75,7 раза (227 против 3 тестов). Обеспечение среднего числа фотонов в синхроимпульсе на уровне $\overline{n_s} \geq 5$ позволяет завершить тестирование сигнальной смежной пары сегментов с положительным результатом в среднем не более чем за 0,2; 0,29; 0,46 и 0,94 мс при пороговых уровнях 4; 8; 10 и 12 соответственно.

На рисунке 3 представлена структура предлагаемого двухэтапного алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса в системе КРК на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем: ГТИ – генератор тактовых импульсов, БП – блок памяти, ЛЗ – линия задержки, ФПИ – формирователь пачки импульсов, ЦСИП – цифровой счётчик импульсов пачки, БСН – блок сдвига номера, ФМ – формирователь меток, ФИ – формирователь импульсов, ПУ – пороговое устройство, ЦСИ – цифровой счётчик импульсов, ФИС – формирователь импульсов стробирования, УУ – устройство управления.

Полученные аналитические выражения позволили рассчитать временные, вероятностные и энергетические характеристики предложенного алгоритма. На рисунке 4,а представлены зависимости вероятности ложного срабатывания от порогового уровня. Аппроксимация статистики сигнала моделью Гаусса даёт значение порога на 3...4 пункта ниже реально требуемого уровня. Причём различие растёт с ужесточением требований к вероятности ложного срабатывания. Для поддержания постоянной вероятности ложного срабатывания $p_{th.b}$ требуется увеличивать пороговый уровень k_{th} с ростом среднего числа шумовых импульсов $\overline{n_b}$.

На рисунке 4,б представлены графики зависимостей условной вероятности обнаружения в процессе анализа первого временного кадра от среднего числа сигнальных фотонов за длительность синхроимпульса при $\bar{n}_b=2$, которая может быть найдена по формуле $p_{D1} = \frac{p_{th.s}}{N_w} \cdot \left[\frac{1-(1-p_{th.b})^{N_w}}{p_{th.b}} \right]$. Выбор порогового уровня 10 обеспечивает вероятность ложного срабатывания при анализе пары шумовых сегментов за длительность синхроимпульса в 0,0081.

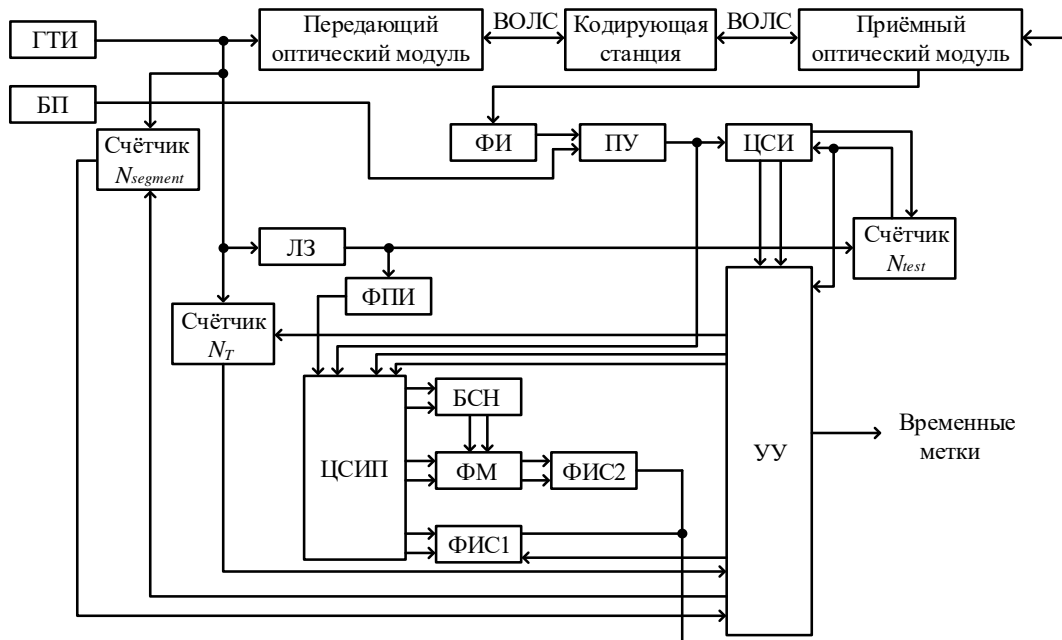


Рисунок 3 – Структура алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса на основе сравнения отсчётов со смежной парой сегментов с пороговым уровнем

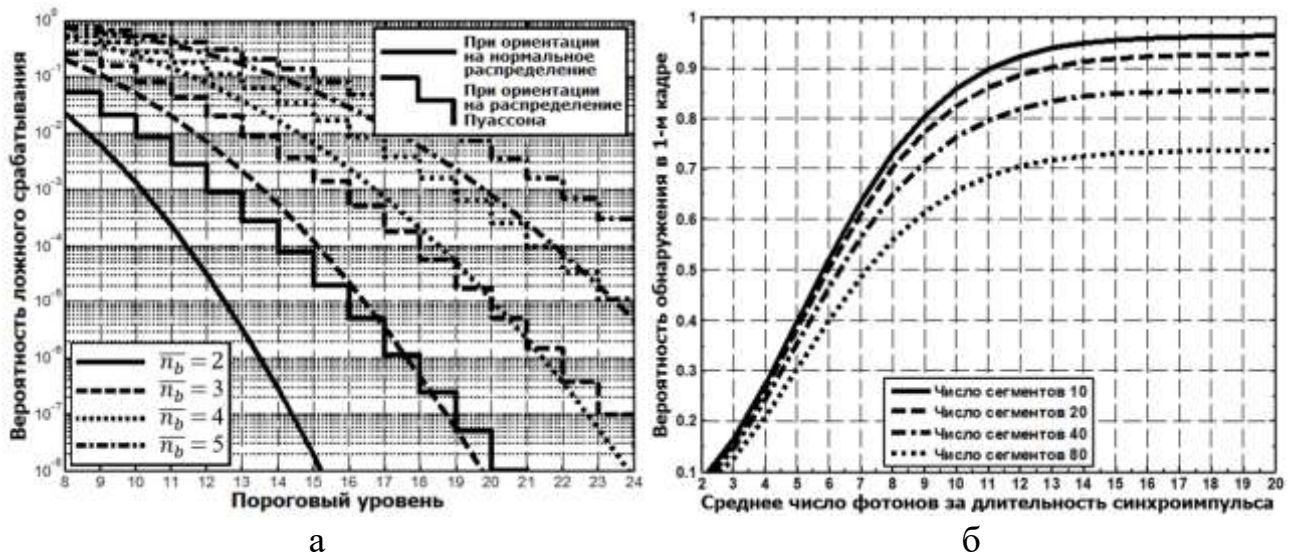


Рисунок 4 – Зависимости вероятности ложного срабатывания от порогового уровня (а); зависимости вероятности обнаружения при анализе первого кадра от среднего числа сигнальных фотонов за длительность синхроимпульса (б)

Из графиков видно, что с ростом среднего числа сигнальных фотонов за длительность синхроимпульса растёт вероятность синхронизации в процессе

анализа первого временного кадра. Однако этот рост замедляется, стремясь к некоторому предельному значению $p_{D1.lim1} = p_{th.s} \cdot \left[1 - \frac{N_w \cdot p_{th.b}}{2}\right]$.

Уменьшение отклонения реальной вероятности синхронизации от предельного значения предполагает предъявления более жёстких требований к вероятности ложного срабатывания в шумовой паре: уменьшение отклонения с 20 % до 10 % потребует уменьшения вероятности ложного срабатывания не менее чем в 1,3 раза, до 5 % – в 1,75 раза, а до 1 % – почти в 4 раза.

Получены аналитические выражения для оценки влияния дисперсионных свойств среды распространения на параметры алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса. Среднеквадратичное отклонение (СКО) времени задержки фотона из-за хроматической дисперсии после распространения через ВОЛС протяжённостью L_{TF} может быть рассчитано по формуле $\sigma_{OF}[\text{пс}] = 2 \cdot K_\lambda[\text{пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})] \cdot L_{TF}[\text{км}] \cdot \Delta\lambda_s[\text{нм}]$, где K_λ – коэффициент хроматической дисперсии, $\Delta\lambda_s$ – разность длин волн фотонов, проходящих через волокно.

Среднеквадратичное значение поляризационной модовой дисперсии изменяется пропорционально квадратному корню от длины ВОЛС $\sigma_{PMD}[\text{пс}] = K_{PMD} \left[\frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}} \right] \cdot \sqrt{2 \cdot L_{TF}[\text{км}]}$, где K_{PMD} – коэффициент поляризационной модовой дисперсии (ПМД, PMD).

Таким образом, хроматическая σ_{OF}^2 и поляризационная модовая σ_{PMD}^2 дисперсии в оптическом волокне приводят к необходимости регистрации фотонов в более широком временном интервале. Последнее определяет длительности принимаемого квантового импульса и стробимпульса

$$\tau_{s.in} = \tau_s + 2 \cdot \Delta\tau_{TF} + 2 \cdot \Delta T_s = \tau_s + 6 \cdot \sqrt{\sigma_{OF}^2 + \sigma_{PMD}^2} + 2 \cdot \Delta T_s, \tau_{strob} = 2 \cdot \tau_{s.in}.$$

Расчёты по полученным аналитическим выражениям показали, что при передаче синхроимпульсов на длине волны 1550 нм с учётом дисперсионных свойств ВОЛС длительности принимаемого квантового импульса и импульса стробирования увеличиваются в десятки раз (более чем в 65 раз при протяжённости линии связи 50 км), что обуславливает значительное ухудшение предельно допустимой вероятности ложного срабатывания $p_{th.b.max}$ в шумовой паре (в 65,4 раза). Отмечено отсутствие влияния дисперсионных свойств линии связи на временные характеристики синхронизации (в данном случае при размытии синхроимпульса более чем в 65 раз).

В четвёртой главе разработан двухэтапный алгоритм оценки момента приёма синхроимпульса на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в системе КРК.

Отличительной особенностью данного алгоритма является сравнение суммарного отсчёта со смежной пары сегментов на этапе поиска не с пороговым уровнем, как в предыдущем алгоритме, а с отсчётами с других смежных пар сегментов и выбор пары сегментов с максимальным отсчётом. Данная особенность позволяет упростить поиск сигнальной смежной пары сегментов, исключая необходимость расчёта и выбора порогового уровня.

На этапе поиска аппаратура последовательно, начиная с 1-й пары смежных сегментов, регистрирует суммарный отсчёт с каждой пары сегментов. После

анализа всех пар сегментов во временном кадре выбирается пара сегментов с максимальным суммарным отсчётом, причём отсчёт в одной из пар сегментов надёжно превышает значения отсчётов со всех других пар сегментов. Далее аппаратура переходит на этап тестирования, задача которого состоит в опросе фотодетектора в течение импульса стробирования на предмет превышения зарегистрированным на этапе поиска отсчётом порогового уровня k_{th} . В случае превышения отсчётом порогового уровня k_{th} этап тестирования считается успешно завершённым, операция «грубой» оценки момента приёма синхроимпульса закончена. В случае отрицательного результата тестирования аппаратура возвращается к поиску в следующем временном кадре. При отсутствии обнаружения синхроимпульса в течение анализа всех смежных пар сегментов во временном кадре аппаратура переходит к поиску в следующем временном кадре.

На рисунке 5 представлена структура предлагаемого двухэтапного алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса в системе КРК на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом: БПсТ – блок памяти с таймером, ПМО – блок поиска максимального отсчёта.

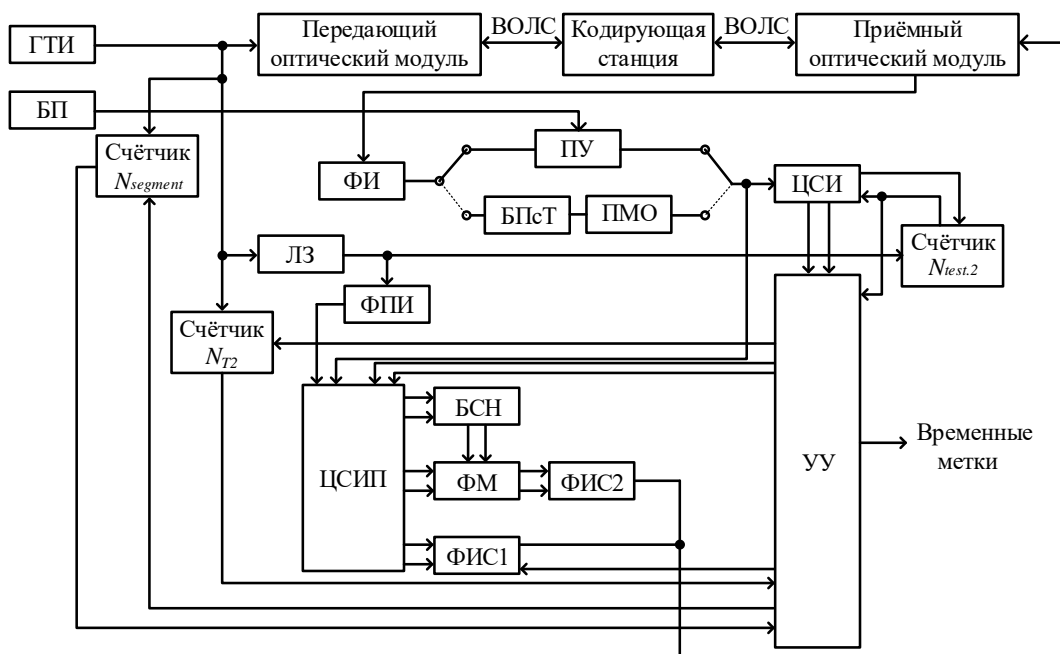


Рисунок 5 – Структура алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом

Вероятность обнаружения синхроимпульса в течение временного кадра может быть найдена по формуле

$$p_{D1.2} = \sum_{k_1=1}^{\infty} \left\{ Pos(k_1, \bar{k}_s) \cdot \left[\sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_2, \bar{k}_b) \right]^{N_w-1} \right\}.$$

На рисунке 6 приведены зависимости вероятности обнаружения синхроимпульса в течение кадра при $\bar{n}_b=2$.

Необходимо отметить ограничения, накладываемые на вероятность обнаружения в алгоритме на основе порогового теста: увеличение числа сегментов во временном кадре N_w ведет к снижению вероятности обнаружения. Так, при числе сегментов $N_w \geq 40$ вероятность обнаружения не превышает

$p_{D1} \leq 0,85$, причём предельное значение вероятности обнаружения составляет не более $1,01 \cdot p_{D1} \dots 1,10 \cdot p_{D1}$ при числе сегментов $N_w = 20 \dots 80$. В алгоритме же на основе поиска смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом при увеличении среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе вероятность обнаружения стремится к 1 и составляет $p_{D1.2} \geq 0,95$ при $\bar{n}_s \geq 13$.

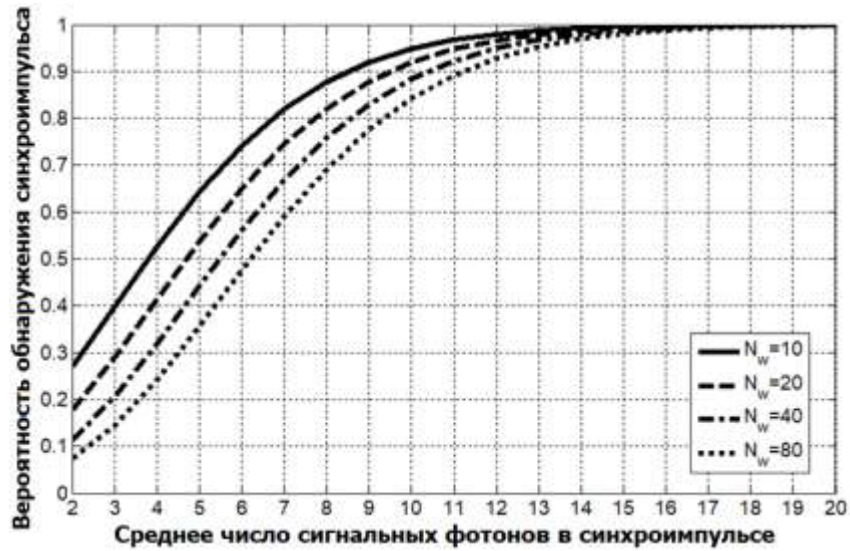


Рисунок 6 – Зависимости вероятности обнаружения синхроимпульса в кадре от среднего числа сигнальных фотонов в синхроимпульсе

Для обеспечения на этапе поиска заданной вероятности обнаружения $P_{D.2}$ при известной вероятности $p_{D1.2}$ потребуется анализ не менее $N_{T.2.min}$ временных кадров $N_{T.2} \geq N_{T.2.min} = \left\lceil \frac{\lg(1-P_{D.2})}{\lg(1-p_{D1.2})} \right\rceil$.

Среднее число временных кадров для успешного обнаружения на этапе поиска равно $\overline{N_{T.2}} = \sum_{j_T=1}^{N_{T.2}} j_T \cdot (1 - p_{D1.2})^{j_T-1} \cdot p_{D1.2}$, соответственно, среднее время успешного поиска $\overline{T_{search.2}} = T_s \cdot \overline{N_{T.2}}$.

Для обеспечения заданной вероятности успешного тестирования $P_{test.2}$ при произвольной вероятности повторной регистрации синхроимпульса на этапе тестирования за 1-й тест $p_{test1.2}$ потребуется не менее $N_{test.2.min}$ тестов $N_{test.2} \geq N_{test.2.min} = \left\lceil \frac{\lg(1-P_{test.2})}{\lg(1-p_{test1.2})} \right\rceil$.

Среднее число тестов для успешного тестирования определяется формулой $\overline{N_{test.2}} = \sum_{k_{test}=1}^{N_{test.2}} k_{test} \cdot (1 - p_{test1.2})^{k_{test}-1} \cdot p_{test1.2}$, тогда среднее время успешного тестирования будет равно $\overline{T_{test.2}} = T_s \cdot \overline{N_{test.2}}$.

Анализ влияния дисперсионных свойств среды распространения показывает, что при передаче синхроимпульсов на длине волны 1550 нм длительность принимаемого синхроимпульса увеличивается более чем в 65 раз при протяжённости линии связи 50 км, пропорционально ухудшая вероятность ложного срабатывания в шумовой паре (в 65,4 раза).

В пятой главе представлен сравнительный анализ алгоритмов оценки момента приёма синхроимпульса станций автокомпенсационной системы КРК на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов.

Проведено моделирование алгоритмов грубой оценки момента приёма синхроимпульса в системе квантового распределения ключа на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем и на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в среде Matlab. Период следования оптических синхроимпульсов равен $T_s=195,76$ мкс, что соответствует протяжённости ВОЛС примерно в 20 км. Длительность синхроимпульса равна $\tau_s=300$ пс, следовательно, число сегментов во временном кадре равно $N_w=652\,533$. Обеспечиваемые вероятности успешного поиска и тестирования равны 99 %.

При ориентации на отклонение в $K_{pD1}=1,1$ раза от предельной вероятности обнаружения и частоте генерации ИТТ 10 Гц пороговый уровень, рассчитанный по разработанной методике, равен $k_{th} = 1$. Отметим, по методике расчёта порогового уровня реально достижимая вероятность ложного срабатывания при ориентации на пороговый уровень $k_{th} = 1$ составляет $p_{th.b} = 6 \cdot 10^{-9}$.

Для получения статистических данных, в том числе расчёта среднего времени грубой синхронизации и вероятностных характеристик, проведено 100 000 итераций моделирования. Ограничение числа итераций связано со значительными временными затратами на моделирование. Однако отметим, отклонение временных характеристик и средних чисел кадров и тестов при увеличении числа итераций моделирования до 200 000 составляет не более 0,58 %, а отличие вероятностных характеристик составляет не более 0,1 %, по сравнению с результатами моделирования при числе итераций равном 100 000.

Сравнительный анализ результатов моделирования с теоретическими расчётами показал незначительное отклонение не более 1,41 % и 1,16 % для алгоритмов на основе порогового теста и на основе поиска максимального суммарного отсчёта соответственно, что указывает на правильность полученных аналитических выражений и возможность их дальнейшего применения.

Результаты моделирования указывают на достижение требуемых вероятностей успешного поиска и успешного тестирования более 99 %. В целом вероятность успешной синхронизации составляет более 98,53 % и 98,48 % для алгоритма на основе порогового теста и алгоритма на основе поиска максимального суммарного отсчёта соответственно.

Отмечен выигрыш по времени поиска и суммарному времени успешной синхронизации алгоритма на основе порогового теста, по сравнению с алгоритмом на основе поиска максимального суммарного отсчёта. Так, выигрыш составляет более чем 1,47 и 1,2 раза для времени успешного поиска и успешной синхронизации соответственно при обеспечении вероятности успешного поиска и тестирования более 99 %. Необходимо отметить, при увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе выигрыш возрастает в 2 и 1,33 раза при среднем числе фотонов в синхроимпульсе 5 и более.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе диссертационных исследований достигнута поставленная цель – уменьшение времени синхронизации при обеспечении вероятности обнаружения синхронизации не хуже заданного уровня за счёт внедрения

оптимального алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса станций автокомпенсационной системы КРК на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов с добавлением этапа тестирования.

Разработаны двухэтапные алгоритмы оценки момента приёма синхроимпульса на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем и на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом в автокомпенсационной системе КРК с использованием многофотонных синхроимпульсов, отличающиеся отбраковкой ошибочных решений на этапе поиска и обеспечивающие вероятность успешного обнаружения не хуже заданного уровня. Моделированием разработанных двухэтапных алгоритмов грубой оценки момента приёма синхроимпульса на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов установлено, что вероятности успешного завершения этапов поиска и тестирования превышают 0,99. Предложены структуры аппаратуры согласно синтезированным двухэтапным алгоритмам оценки момента приёма.

Даны рекомендации по выбору распределения вероятностей для аппроксимации статистики сигнала. Аппроксимация плотности распределения вероятностей сигнала законом Гаусса предполагает выбор порогового уровня на 3...4 пункта ниже реально требуемого уровня, рассчитанного при ориентации на дискретное распределение вероятностей Пуассона. Предложена методика выбора порогового уровня для достижения заданной вероятности ложного срабатывания в паре шумовых временных сегментов.

Полученные аналитические выражения позволяют рассчитывать временные, вероятностные и энергетические характеристики двухэтапных алгоритмов грубой оценки момента приёма синхросигнала на основе отсчётов со смежной пары временных сегментов с учётом свойств среды распространения. При увеличении среднего числа фотонов в синхроимпульсе в 5 раз (с 1 до 5) среднее время успешного тестирования уменьшается в 1,5 раза при снижении допустимого числа кадров в 5 раз. Установлено снижение среднего времени успешного поиска синхроимпульса и синхронизации при применении двухэтапного алгоритма оценки момента приёма синхроимпульса на основе сравнения суммы отсчётов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем по сравнению с алгоритмом на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом. Так, при среднем числе фотонов в синхроимпульсе 5 различие составляет 2 и 1,33 раза для времени успешного поиска синхроимпульса и успешной синхронизации соответственно. Предложены выражения для экспресс-расчёта вероятности обнаружения синхроимпульса, причём отклонение результатов экспресс-расчёта от расчётов по точным выражениям не превышает 5,6 %. Анализ влияния дисперсионных свойств среды распространения показывает, что при передаче синхроимпульсов на длине волны 1550 нм длительность принимаемого синхроимпульса увеличивается более чем в 65 раз при протяжённости линии связи 50 км, пропорционально ухудшая вероятность ложного срабатывания в шумовой паре (в 65,4 раза).

Таким образом, на основе проведенного сравнительного анализа разработанных двухэтапных алгоритмов на основе отсчетов со смежной пары сегментов сформулированы рекомендации по их применению: при ориентации на быстроедействие целесообразно использовать алгоритм на основе сравнения суммы отсчетов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем, позволяющий, кроме того, достичь лучших показателей вероятности успешной синхронизации по сравнению с алгоритмом на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчетом при одних и тех же условиях.

Публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах из списка ВАК РФ

1. Румянцев, К. Е. Вероятностные характеристики алгоритма обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчетом / К. Е. Румянцев, П. Д. Миронова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3 (233). – С. 96-107.

2. Румянцев, К. Е. Оценка влияния функциональных элементов на параметры системы квантового распределения ключа на основе протокола B92 / К. Е. Румянцев, П. Д. Миронова, Шакир Хайдер Хуссейн Ш. Х. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4 (228). – С. 63-77.

3. Миронов, Я. К. Вероятностные характеристики порогового алгоритма обнаружения синхроимпульсов в системе квантового распределения ключа на основе информации со смежной пары временных сегментов / Я. К. Миронов, П. Д. Миронова, К. Е. Румянцев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – №4 (214). – С. 221-229.

В международных научных изданиях, индексируемых Scopus

4. Mironov, Y. K. Methodology for calculating the average time of entry into synchronism of stations of the system of quantum key distribution with sequential polling of fiber-optic line sections with decreasing length by the graphic-analytical method / Y. K. Mironov, P. D. Mironova, K. E. Rummyantsev // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 224. – P. 01032 (p. 1-9). – DOI: 10.1051/e3sconf/202022401032.

5. Mironov, Y. Characteristics of a two-stage synchronization algorithm in the system of quantum key distribution with dividing a fiber-optic line into sections with decreasing length / Y. Mironov, P. Mironova, K. Rummyantsev // ACM International Conference Proceeding Series. – 2020. – P. 3433596 (p. 1-5). – DOI: 10.1145/3433174.3433595.

6. Rummyantsev, K. E. Evaluation of the Influence of the Dispersion Properties of a Fiber-Optic Line on the Efficiency of an Algorithm for Single-Photon Synchronization of Quantum Key Distribution System / K. E. Rummyantsev, P. D. Linenko, H. H.-Sh. Shakir // Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves. – 2019. – P. 392-395. – DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792769.

7. Albogachieva, L. A. The single-photon model of search of pulse signals for telecommunication systems / L. A. Albogachieva, K. Y. Rummyantsev, P. D. Linenko //

International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Vol. 7, No 3.13. – P. 17-21. – DOI: 10.14419/ijet.v7i3.13.16316.

В прочих изданиях

8. Миронова, П. Д. Алгоритм обнаружения синхросигналов на основе выбора смежной пары сегментов с максимальным суммарным отсчётом / П. Д. Миронова // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности : IX Всероссийская научно-техническая конференция : сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, 10-15 апреля 2023. – Таганрог, 2023. – С. 52-53.*

9. Миронова, П. Д. Алгоритм обнаружения синхросигнала в системе квантового распределения ключа на основе сравнения суммы отсчетов со смежной пары сегментов с пороговым уровнем / П. Д. Миронова // *I Всероссийская научно-практическая конференция «Digital Era», [Грозный], 26.03.2021. – Грозный : Чеченский государственный университет, 2021. – С. 91-94. – DOI: 10.36684/38-2021-1-91-94.*

10. Миронов, Я. К. Исследование характеристик алгоритма синхронизации системы квантового распределения ключа на основе сравнения числа отсчетов со смежной пары временных окон с пороговым уровнем / Я. К. Миронов, П. Д. Миронова, К. Е. Румянцев // *Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации : сборник докладов II Всероссийской научной конференции (с приглашением зарубежных ученых), Ставрополь, Россия Ноябрь 30, 2020. – Ставрополь : СКФУ, 2020. – С. 219-226.*

11. Миронов, Я. К. Вероятностные характеристики порогового алгоритма обнаружения синхроимпульсов в системе квантового распределения ключа на основе информации со смежной пары временных сегментов / Я. К. Миронов, П. Д. Миронова, К. Е. Румянцев // *Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении : материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О. Н. Пьявченко "КомТех-2020" : в двух томах. Т. 1. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – С. 54-61.*

12. Линенко, П. Д. Разбиение временного кадра на интервалы в системе квантового распределения ключа / П. Д. Линенко, Я. К. Миронов, К. Е. Румянцев // *V Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов "Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности" : сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, 01-07 апреля 2019 г. – Таганрог, 2019. – С. 82-84.*

13. Линенко, П. Д. Ограничения на скорость формирования ключа в системе квантового распределения ключа по протоколу B92 / П. Д. Линенко, К. Е. Румянцев, Х. Х. Шакир // *V Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов "Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности" : сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, 01-07 апреля 2019 г. – Таганрог, 2019. – С. 78-81.*

14. Миронова, П. Д. Алгоритм синхронизации станций системы квантового распределения ключа на основе порогового теста для отсчетов со смежной пары временных сегментов с учетом дисперсионных и поляризационных свойств ВОЛС / П. Д. Миронова // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности* : VIII Всероссийская научно-техническая конференция : сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, 4-9 апреля 2022. – Таганрог, 2022. – С. 22-25.

15. Миронова, П. Д. Синхронизация станций системы квантового распределения ключа на основе порогового теста для отсчетов со смежной пары временных сегментов / П. Д. Миронова // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности* : VII Всероссийская научно-техническая конференция : сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, 5-11 апреля 2021. – Таганрог, 2021. – С. 107-109.

16. Миронов, Я. К. Вероятность обнаружения сигнального окна в алгоритме поиска фотонного импульса с разбиением временного интервала на временные окна / Я. К. Миронов, П. Д. Миронова // VI Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов "Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности" : сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, 06-12 апреля 2020 г. – Таганрог, 2020. – С. 135-138.

17. Mironov, Y. K. Study of the characteristics of the synchronization algorithm for a quantum key distribution system based on comparing the number of samples from an adjacent pair of time windows with a threshold level / Y. K. Mironov, P. D. Mironova, K. E. Rumyantsev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1069. – P. 012011 (p. 1-8). – DOI 10.1088/1757-899X/1069/1/012011.

Миронова Полина Демьяновна
АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ МОМЕНТА ПРИЁМА СИНХРОИМПУЛЬСА В СИСТЕМЕ
КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА ОСНОВЕ ОТСЧЁТОВ СО СМЕЖНОЙ
ПАРЫ ВРЕМЕННЫХ СЕГМЕНТОВ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано к печати 29.02.2024 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз
Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № _____

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

Издательско-полиграфического комплекса

КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863) 243-41-66.