

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(Н И У « Б е л Г У »)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Кафедра информационно-телекоммуникационных систем и технологий

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СИМВОЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В
БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Выпускная квалификационная работа студента

очной формы обучения

направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

4 курса группы 07001208

Киселёва Юрия Игоревича

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент кафедры
Информационно-
телекоммуникационных
систем и технологий
НИУ «БелГУ» Урсол Д.В.

Рецензент
профессор кафедры прикладной
информатики и информационных
технологий, кандидат технических
наук, доцент Черноморец А.А.

БЕЛГОРОД 2016

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1 ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ синхронизации | 6 |
| 1.1 Типы синхронизации | 7 |
| 1.2 Роль синхронизации в современных сетях связи | 9 |
| 1.3 Тактовая синхронизация | 9 |
| 1.4 Тактовая синхронизация в сетях WiMax | 11 |
| 1.5 Символьная синхронизация | 14 |
| 1.6 Кадровая синхронизация | 16 |
| 1.7 Сетевая синхронизация..... | 19 |
| 1.8 Синхронизация в сетях LTE | 22 |
| 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ ВЕКТОРОВ СУБПОЛОСНОЙ МАТРИЦЫ В ЗАДАЧЕ СИМВОЛЬНОЙ синхронизации | 25 |
| 2.1 Формирование собственных векторов субполосной матрицы | 25 |
| 2.2 Формирование синхронизирующего сигнала | 28 |
| 2.3 Исследование разработанного метода | 30 |
| 2.4 Вероятность неверного обнаружения начала сигнала при наличии шума | 42 |
| 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИМВОЛЬНОЙ синхронизации..... | 64 |
| 3.1 Реализация метода на языке MatLab | 66 |
| 3.2 Сравнение разработанного метода со стандартным..... | 70 |
| 4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.. | 75 |
| 4.1 Планирование работ по исследованию..... | 75 |

| | | | | | | | | |
|-----------|------|------------------------|---------|------|--|---------------------------------|------|--------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | | | |
| Разраб. | | <i>Киселёв Ю.И.</i> | | | Разработка технологии символьной синхронизации в беспроводных системах связи | Лит. | Лист | Листов |
| Провер. | | <i>Урсол Д.В.</i> | | | | | 2 | 84 |
| Рецензент | | <i>Черноморец А.А.</i> | | | | <i>НИУ «БелГУ», гр.07001208</i> | | |
| Н. контр. | | <i>Урсол Д.В.</i> | | | | | | |
| Утв. | | <i>Жилияков Е.Г.</i> | | | | | | |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.2 | Расчет расходов на оплату труда на исследование..... | 76 |
| 4.3 | Расчет продолжительности исследования..... | 77 |
| 4.4 | Расчет стоимости расходных материалов..... | 78 |
| 4.5 | Расчет сметы расходов на исследование..... | 79 |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 82 |
| | СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 84 |

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 3 |

ВВЕДЕНИЕ

С каждым днем в мире увеличивается потребность в использовании системы беспроводной связи. В связи с этим данная система должна обладать определенными критериями, одним из которых является корректная работа всей системы в целом.

Актуальностью выпускной квалификационной работы выступает спрос постоянной и качественной работе беспроводной сети. Для этого необходима согласованная работа всей беспроводной системы связи, что обеспечивается благодаря синхронизации.

Синхронизация сигналов позволяет согласовать принятые сигналы по времени. Многие сервисы, работающие в современных цифровых телекоммуникационных сетях, требуют точной синхронизации для отлаженной работы.

К факторам, влияющим на корректную работу связи, относится неравномерное время распределения сигнала. В связи с данным фактором необходимо достаточно точно определять начало первого символа сигнала при приеме. Существуют методы обнаружения начального символа сигнала. К данным методам относятся: методы на основе корреляции по синхронизирующим сигналам (LTE), по автокорреляции (система WiFi) и по детектированию появления энергии в канале.

Целью работы является разработка технологии символьной синхронизации. Основным нововведением в данном методе является то, что в качестве синхронизирующих сигналов выступает базис собственных векторов субполосной матрицы. Благодаря тому, что каждый субполосный вектор ортогонален относительно других векторов, вероятность их пересечения, при формировании информационного сигнала, достаточно мала. Это предоставляет возможность использования базиса собственных вектор в качестве синхронизирующего сигнала.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 4 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

1. Провести анализ современных методов синхронизации сигналов в телекоммуникационных системах связи.
2. Сформировать базис собственных векторов, для дальнейшего его использования.
3. Исследовать использование собственных векторов субполосной матрицы в задаче символьной синхронизации, при отсутствии шума.
4. Исследовать использование собственных векторов в задаче символьной синхронизации, при наличии белого шума, с различным его соотношением.
5. Провести сравнение стандартного метода символьной синхронизации в системе LTE с разработанным.
6. Рассчитать экономическую оценку исследования.

Апробация полученных результатов:

1. Киселёв Ю.И. Исследование использования собственных векторов субполосной матрицы в задаче символьной синхронизации / Д.В. Урсол, Ю.И. Киселёв. Сборник СНО по итогам научной недели БелГУ, апрель 2016 – 22-27 с.
2. Киселёв Ю.И. Зависимость ортогональности собственных векторов субполосной матрицы от величины шага квантования / Д.В.Урсол, Ю.И. Киселёв. Сборник статей Международной научно-практической конференции «Новые задачи технических наук и пути их решения».– Челябинск: декабрь 2015. С: 150-152.
3. Киселёв Ю.И. Оценка влияния величины шага квантования на ортогональность собственных векторов субполосной матрицы /Д.В. Урсол, Ю.И.Киселёв. Научные ведомости Белгородского Государственного Университета – Белгород: 2015. № 19(216), вып.36/1, декабрь 2015. С: 197-202.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программная система расчета оптимального количества уровней квантования

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 5 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

ортогонального субполосного базиса / Жиляков Е.Г., Урсол Д.В., Киселёв Ю.И. БелГУ: май 2016 - №2016615413.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 6 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

1 ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

1.1 Типы синхронизации

Трудности, связанные с синхронизацией, начались сразу с появлением цифровых методов передачи информации. Буквально каждая процедура дискретизации, передачи и приема информации в виде бинарного сигнала или кодированного бинарного сигнала, требует согласованности частот передачи и приема, в противном случае передаваемая информация будет принята неверно. Сложности синхронизации не ограничиваются лишь цифровой первичной сетью, но имеют важное значение при исследовании сетей ISDN, передачи данных (СПД), цифровой телефонии, сетей специального назначения и других вторичных сетей. В технологии современной связи существует три основных понятия синхронизации:

1. Частотная;
2. Фазовая;
3. Временная (то же самое, что и синхронизация по времени).

Наиболее важным типом синхронизации для первичной сети является синхронизация по частоте или частотная синхронизация (ЧС), которая определяет согласованность генераторов цифровых устройств в сети по частоте. При идеальных условиях в этом случае все генераторы сети работают с одинаковой частотой, скорость передачи цифровой информации с высокой степенью точности равна скорости приема, в результате в системе связи нет потерь информации вследствие проскальзывания, т.е. нет ошибок, связанных с нарушениями синхронизации. Конечно же это и является основной целью эксплуатации - добиваться наименьшего уровня ошибок в сети. Поэтому именно частотная синхронизация представляет главный интерес операторов связи.

Фазовой синхронизацией (ФС) называется соответствие фаз приемного и передающего сигналов. Большую важность эта синхронизация приобрела

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 7 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

внутри различных электронных устройств. Достижение используют различные компоненты (фазовращатели), фазовые детекторы и т.д. В современной практике систем связи ФС часто используется в цепях приемников сигнала, где осуществляется достижение фазовой синхронизации между линейным сигналом и цепью приемника.

Временная синхронизация (ВрС) или синхронизация по времени подразумевает, что все приборы в сети имеют установленное единое время. Это время согласуется со всемирным скоординированным временем (UTC - Coordinated Universal Time). Чаще всего задача временной синхронизации связана с различными вторичными сетями и системами СПД (сетями специального назначения, системами биллинга и т.д.). Для примера можно рассмотреть довольно известный метод защиты банковских электронных сетей, когда каждому документу устанавливается точная временная метка. На приемной стороне происходит сравнение данной метки с текущим временем и анализируется принципиальная возможность преобразования электронного документа при его передаче по сети. В случае превышения задержки передачи заданного порога, документ считается недействительным. Такая схема защиты является сильной, однако необходимо, чтобы все рабочие станции в сети были синхронизированы по времени. Необходимо заметить, что ВрС представляет собой совершенно независимую от частотной синхронизации задачу. В современной практике построения корпоративных сетей существует лишь несколько методов интегрального решения обеих задач.

1.2 Роль синхронизации в современных сетях связи

Главной задачей частотной синхронизации является достижение совпадающих или кратных частот генераторов (тактовых частот) всех

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 8 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

цифровых устройств, входящих в систему цифровой связи. Для достижения синхронизации в сети необходимо:

1. установить единую тактовую частоту для всей системы связи, чтобы система работала с одной скоростью;
2. обеспечить, чтобы все цифровые устройства в сети работали синхронно;
3. синхронизация сети должна поддерживаться в любое время независимо от изменений в структуре сети, вызванных такими факторами, как сбои в каналах и узлах, перестроения сети, ее расширение и т. д.;
4. система синхронизации (СС) должна быть также достаточно стабильной по отношению к таким нарушениям, как изменение частоты или фазы в узле, изменение времени передачи по линии и т.д.;

Из написанного выше определяется интегральный смысл синхронизации - для систем синхронизации абсолютно нет разделения на первичную и вторичные сети, синхронизация должна охватывать все цифровые приборы сети. Так или иначе, нынешние методы проектирования и построения системы электросвязи определяют установленную приоритетность в конструировании систем синхронизации. Так как в системе электросвязи первичная сеть представляет собой ядро сети и создает каналы для вторичных сетей, так и СС наиболее правильно конструируется в следующем порядке: сначала создается СС первичной сети, а затем вторичная сеть синхронизируется от первичной сети. Таким образом, СС начинается с первичной сети.

На данный момент наиболее актуальны вопросы синхронизации первичной сети. Современная первичная сеть ориентирована на использование технологии SDH. В отличие от технологии PDH, где предусматривался режим, плезиохронной ("почти синхронной") работы различных устройств систем передачи, технология SDH предусматривает синхронную работу всей сети и всех устройств, входящих в сеть.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 9 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

Вторым фактором, влияющим на рост роли синхронизации в нынешних цифровых системах связи, является развитие последних. В общем случае для синхронизации нет разделения на первичную и вторичные сети, все цифровые устройства системы электросвязи должны быть задействованы в системе синхронизации. В результате уровень проблем, возникающих с синхронизацией, определяется в зависимости от количества цифровых устройств в сети. При малом количестве цифровых устройств трудности синхронизации могут быть решены в частном порядке, и СС не рассматривается операторами как отдельная система в составе сети. Однако при увеличении количества цифровых устройств неполадки синхронизации уже не могут быть рассмотрены частично и должны рассматриваться системно. С этим связана определенная локальная революция в подходе: появление определенной "критической массы" цифровых устройств на сети приводит к необходимости рассматривать систему синхронизации как отдельную составную часть системы электросвязи. С дальнейшим увеличением количества цифровых устройств начинают изменять концепции построения систем синхронизации.

1.3 Тактовая синхронизация

Обширное наличие устройств, обеспечивающих синхронную работу приемной и передающей станций цифровых систем передач, а также качественную работу станционных и линейных регенераторов, называется устройствами тактовой синхронизации (УТС). Реализация УТС во многом зависит от методов создания синхросигнала и его использования для синхронизации оконечных станций. Для этого возможно использование:

1. Передачу сигнала тактовой синхронизации (или периодической последовательности импульсов, следующих с тактовой частотой) по

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 10 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

специальной паре жил кабеля или по отдельному каналу. Данный способ неэкономичен и, кроме того, сопряжен со значительными затруднениями, связанными с точной коррекцией фазовых соотношений с целью получения одинакового группового времени прохождения (ГВП) для частотных составляющих, несущих рабочую и синхронизирующую информацию.

2. Выделение тактовой частоты сигнала из группового ИКМ сигнала на станции приема. Операция фильтрации или выделения тактовой частоты из группового сигнала основана на том, что в спектре случайной однополярной последовательности импульсов, длительность которых t меньше длительности периода их следования T , содержится регулярная (периодическая) составляющая – тактовая частота. Часть УТС, обеспечивающая фильтрацию тактовой частоты называется выделителем тактовой частоты (ВТЧ).

Групповой ИКМ сигнал поступает на узкополосный фильтр тактовой частоты (УПФТЧ), выделяющий из регулярной составляющей группового ИКМ сигнала тактовую частоту. В простейшем случае УПФТЧ представляет собой параллельный резонансный контур. Под воздействием импульсов ИКМ - сигнала на выходе контура образуются затухающие гармонические колебания с тактовой частотой. Далее эти гармонические колебания усиливаются и ограничиваются по амплитуде в усилителе-ограничителе (УО). На выходе УО имеем ограниченный по амплитуде (с достаточно крутыми фронтами) гармонический сигнал. После прохождения этого сигнала через дифференцирующую цепь (ДЦ) получаем двухполярную последовательность стробирующих импульсов, которая преобразуется в последовательность однополярных импульсов, следующих с тактовой частотой f_t .

После этого данная последовательность отправляется на формирователь периодической последовательности прямоугольных импульсов (ФППИ), заданной амплитуды и следующих с тактовой частоты f_t . ФППИ, в простейшем случае, представляет собой ожидающий мультивибратор,

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 11 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

создающий импульсы заданной формы, длительности и амплитуды, частота которых определяется частотой возбуждающего сигнала.

Для подстройки фаз тактовой частоты синхросигнала и тактовой частоты синхронизируемого используется регулируемая линия задержки (РЛЗ).

Рассмотренная схема УТС использует так называемый резонансный метод выделения тактовой частоты, плюсами которого является простота реализации и улучшение экономических показателей системы, что важно для систем передачи местных или зональных первичных сетей. К минусам УТС резонансного типа можно отнести:

1. быстрое про падание тактовой частоты при перерывах связи или при появлении в принимаемом групповом ИКМ - сигнале длинных серий нулей;
2. зависимость стабильности выделенной тактовой частоты от характера кодовых комбинаций или структуры и скорости передачи линейного цифрового сигнала.

1.4 Тактовая синхронизация в сетях WiMax

Под тактовой синхронизацией в сетях WiMAX подразумевается поиск и анализ преамбулы в кадре нисходящего канала. Обработка осуществляется в основной полосе частот с возможным цифровым понижением частоты вниз.

Каждый кадр в сетях стандарта IEEE 802.16e-2005, 2009 в режиме WirelessMAN-OFDMA начинается с преамбулы, за которой следуют пакеты данных от базовой станции(БС) к абонентской станции(АС) и пакеты данных от АС к БС.

Преамбулой является один OFDMA-символ. Формирование преамбулы осуществляется следующим образом:

1. В частотной области(ЧО) в соответствии с номером используемого сегмента (0, 1 или 2) выбирается одно из трех подмножеств поднесущих для

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 12 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

формирования преамбул. Во всех случаях используется только каждая третья поднесущая. Отличие множеств заключается в начальном смещении. Оно может быть равно одной поднесущей, двум или отсутствовать и численно равно номеру используемого сегмента. 86 поднесущих слева и 86 справа диапазона занимаемых частот формируют защитный интервал в символе преамбулы (в информационных символах величина защитного интервала другая). Центральная поднесущая не используется.

2. Заранее определенные 284 поднесущие модулируются битами одной из ПСП, которые определены в стандарте. Вид модуляции — ФМ-2 (BPSK). Указанные ПСП формируются на основе функций Уолша и представляют собой ортогонализированные ПСП с хорошими автокорреляционными и плохими взаимокорреляционными свойствами (максимальный коэффициент взаимной корреляции равен 0,12). Амплитуда неиспользуемых поднесущих равна нулю.

3. Полученные 1024 точки в частотной области с помощью обратного быстрого преобразования Фурье(ОБПФ) преобразуются во временную область.

4. Перед полученными комплексными временными отсчетами вставляется циклический префикс

Всего возможно 114 различных псевдо-случайных последовательностей (ПСП) и, соответственно, преамбул.

Вследствие того, что преамбула в частотной области является вещественной, во временной — она сопряжено-симметрична относительно центрального отсчета. В ходе поиска и анализа преамбулы сигналов WiMAX кадра вниз ходящего канала решаются следующие частные задачи.

1. Нахождение преамбулы.
2. Точная частотная синхронизация.
3. Обнаружение точного положения начала преамбулы.
4. Определение номера сегмента.
5. Определение номера преамбулы и значения параметра IDcell.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 13 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

После выполнения описанных операций предполагается, что таковая синхронизация выполнена, и становится возможной демодуляция данных последующих OFDMA-символов кадра, в котором содержатся служебные поля FCH и DL-MAP. Правильное определение значения параметра IDcell является принципиально важным для последующей корректной обработки служебных данных и данных абонентов, так как в инициализирующие последовательности сдвигающих регистров перемежителя и скремблера и в формулы, определяющие процедуры формирования логических подканалов, входят биты параметра IDcell.

Также, для решения задач позиционирования мобильных абонентов в приемнике требуется проводить совместную обработку набора сигналов от различных базовых станций, определять уровни сигналов, системные параметры и параметры соединений, что возможно только на основе анализа номера сегмента, значения параметра IDcell и вида p , передаваемой преамбулой. Ниже представлено подробное описание этапов тактовой синхронизации:

1. Длительность циклического префикса, используемого БС в данный момент времени, считается известной и равной $1/8$ длительности OFDMA-символа. Ошибка в определении длины циклического префикса приведет к смещению отсчетов OFDMA-символов и возможной неправильной их обработке.

2. Задача обнаружения преамбулы состоит в принятии решения, присутствует ли преамбула в данный момент времени на входе приемника или нет. Данный этап является важнейшим в тактовой синхронизации в сетях WiMAX и требует тонкой настройки порогов в решающем устройстве.

3. В результате точной частотной синхронизации происходит устранение частотного сдвига в диапазоне от -1 до 1 величины разноса между поднесущими (дробная часть сдвига) при этом помехи неортогональности уменьшаются (в идеальном случае — устраняются).

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 14 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

4. В зависимости от применяемого алгоритма обнаружения преамбулы величины порога принятия решения и помеховой обстановки ошибка в определении начала преамбулы может лежать в диапазоне от долей до десятков интервалов дискретизации. Ошибка в определении точного начала преамбулы приведет к линейному набегу фазы между поднесущими. Эту ошибку можно проигнорировать при использовании дифференциального 118 демодулятора для преамбулы, в ином случае необходимо вычислить точное начало преамбулы. Ошибка в несколько единиц интервала дискретизации не является критически важной при анализе только части ПСП (~20 бит) на поднесущих, близких к нулевой, так как набег фазы на этих поднесущих будет пренебрежимо мал.

5. После нахождения отсчетов преамбулы во временной области производится их преобразование в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье и последующее нахождение номера используемого сегмента. В результате определяется номер сегмента и подмножество используемых частот (284 поднесущие, на которых передаются биты ПСП). Нахождение номера используемого сегмента удобно осуществлять по суммарной энергии поднесущих преамбулы.

6. На окончательном этапе осуществляется определение номера используемой в преамбуле ПСП. По нему определяется значение параметра ID_{cell} и корректируется номер сегмента. Все алгоритмы тактовой синхронизации основаны на расчете коэффициентов корреляции различных участков преамбулы во временной или частотной области.

Для обнаружения преамбулы можно использовать следующие свойства преамбулы:

1. наличие циклического префикса
2. симметричность относительно центрального отсчета
3. наличие приблизительно 3 одинаковых участков во временной области (псевдопериодичность)

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 15 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

1.5 Символьная синхронизация

При символьной синхронизации, для оптимальной демодуляции, все цифровые приемники должны синхронизироваться с переходами поступающих цифровых символов.

Класс синхронизаторов, используемых в подобном случае, называется синхронизаторами без применения данных (non-data-aided — NDA). Существует еще один класс символьных синхронизаторов, которые используют известную информацию об информационном потоке. Эта информация может извлекаться из переданных по обратной связи решений относительно принятых данных или из введенной в информационный поток известной последовательности.

В настоящее время более важными и доминирующими при выборе модуляций, эффективно использующих полосу, становятся методы с использованием данных (data-aided — DA).

Рассматриваемые символьные синхронизаторы можно разделить на две основные группы. Первая группа состоит из разомкнутых синхронизаторов. Данные схемы отводят внимание на копию выхода генератора тактовых импульсов передатчика непосредственно из поступающего информационного потока. Вторая группа — это замкнутые синхронизаторы; они синхронизируют локальный генератор тактовых импульсов с поступающим сигналом посредством сличения локального и поступающего сигналов. Замкнутые синхронизаторы, как правило, точнее, но при этом сложнее и дороже.

Разомкнутые символьные синхронизаторы также иногда называют нелинейными синхронизаторами на фильтрах; данное название говорит само за себя. Синхронизаторы этого класса генерируют частотный компонент со скоростью передачи символов, пропуская поступающий узкополосный сигнал

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 16 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

через последовательность фильтра и нелинейного устройства. Работа данного устройства аналогична восстановлению несущей в контуре сопровождения с подавленной несущей. В данном случае желательный частотный компонент, передаваемый со скоростью передачи символов, изолируется с помощью полосового фильтра, после чего насыщающий усилитель с высоким коэффициентом насыщения придает ему нужную форму. В результате восстанавливается прямоугольный сигнал генератора тактовых импульсов.

Основным недостатком разомкнутых символьных синхронизаторов является наличие неустраняемой ошибки сопровождения с ненулевым средним. Эту ошибку можно снизить при больших отношениях сигнал/шум, но поскольку форма сигнала синхронизации зависит непосредственно от поступающего сигнала, устранить ошибку не удастся никогда.

Замкнутые символьные синхронизаторы сравнивают входной сигнал с локально генерируемым с последующей синхронизацией локального сигнала с переходами во входном сигнале. По сути, процедура ничем не отличается от используемой в разомкнутых синхронизаторах.

Среди наиболее популярных замкнутых символьных синхронизаторов можно выделить синхронизатор с опережающим и запаздывающим стробированием" (early/late-gatesynchronizer). Его работа заключается в выполнении двух отдельных интегрирований энергии входного сигнала по двум различным промежуткам символьного интервала длительностью $(T-d)$ секунд. Первое интегрирование (опережающее) начинается в момент, определенный как начало периода передачи символа (условно — момент времени 0), и заканчивается через $(T-d)$ секунд. Второе итерирование (запаздывающее) начинается с задержкой на d секунд и заканчивается в конце периода передачи символа (условно — момент времени T). Разность абсолютных значений выходов описанных итераторов y_1 и y_2 является мерой ошибки синхронизации символов приемника и может подаваться обратно для последующей коррекции приема.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 17 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

1.6 Кадровая синхронизация

Практически все потоки цифровых данных имеют некоторую кадровую структуру. Другими словами, поток данных разбит на равные группы бит. Если поток данных — это оцифрованный телесигнал, каждый пиксель в нем представляется словом из не-скольких бит, которые группируются в горизонтальные растровые развертки, а затем в вертикальные растровые развертки. Компьютерные данные обычно разбиваются на слова, состоящие из некоторого числа 8-битовых байт, которые, в свою очередь, группируются в образы перфокарт, пакеты, кадры или файлы. Любая система, использующая кодирование с защитой от блочных ошибок, в качестве основы кадра должна брать длину кодового слова. Оцифрованная речь обычно передается пакетами или кадрами, неотличимыми от других цифровых данных.

Чтобы входной поток данных имел смысл для приемника, приемник должен синхронизироваться с кадровой структурой потока данных. Кадровая синхронизация обычно выполняется с помощью некоторой специальной процедуры передатчика. Данная процедура может быть как простой, так и довольно сложной, в зависимости от среды, в которой должна функционировать система.

Вероятно, простейшим методом, используемым для облегчения кадровой синхронизации, является введение маркера (рис. 1).

Маркер кадра — это отдельный бит или краткая последовательность бит, периодически вводимая передатчиком в поток данных. Приемник должен знать эту последовательность и период ее введения. Приемник, достигший синхронизации данных, сопоставляет (проверяет корреляцию) эту известную последовательность с потоком поступающих данных в течение известного периода введения. Если приемник не синхронизирован с кадровой

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 18 |

последовательно-стью, корреляция будет слабой. При синхронизации приемника с кадровой структурой, корреляция будет практически идеальной, повредить которую может только случайная ошибка обнаружения.

Преимуществом маркера кадра является его простота. Для маркера может быть достаточно даже одного бита, если перед принятием решения, находится ли система в состоянии кадровой синхронизации, было выполнено достаточное число корреляций. Основным недостатком состоит в том, что данное достаточное число может быть очень большим; следовательно, большим может быть и время, требуемое для достижения синхронизации. Таким образом, наибольшую пользу маркеры кадров представляют в системах, непрерывно передающих данные, подобно многим телефонным и компьютерным каналам связи, и не подходят для систем, передающих отдельные пакеты, или систем, требующих быстрого получения кадровой синхронизации. Еще одним недостатком маркера кадра является то, что введенный бит (биты) может повысить громоздкость структуры потока данных.

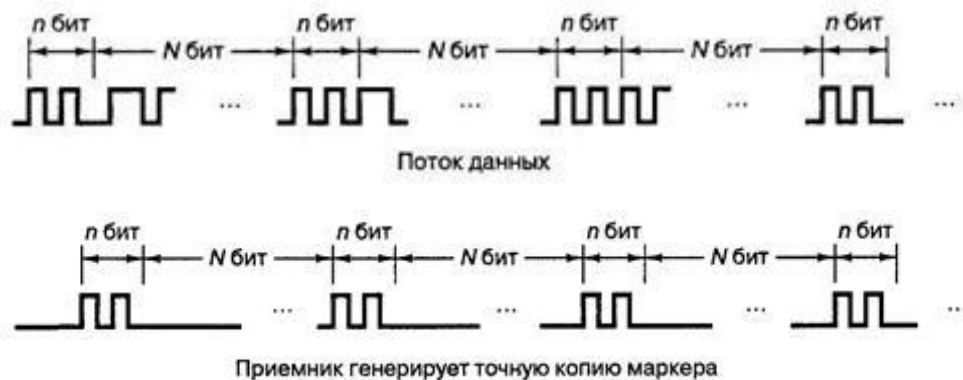


Рисунок 1 – Пример использования маркера кадра

В качестве примера можно привести линию T1, разработанную Bell Labs и широко используемую в североамериканских телефонных системах. Структура T1 включает использование маркера кадра размером 1 бит, вводимого после каждого набора из 24 8-битовых байт (каждый байт

представляет один из 24 возможных потоков речевой информации). При таком подходе возникает информационная структура, кратная 193 бит, — неудобное число с точки зрения большинства интегральных схем.

В системах с неустойчивыми или пульсирующими передачами либо в системах с необходимостью быстрого получения синхронизации рекомендуется использовать синхронизирующие кодовые слова. Обычно такие кодовые слова передаются как часть заголовка сообщения. Приемник должен знать кодовое слово и постоянно искать его в потоке данных, возможно, используя для этого коррелятор на согласованных фильтрах. Обнаружение кодового слова укажет известную позицию (обычно — начало) информационного кадра. Преимуществом подобной системы является то, что кадровая синхронизация может достигаться практически мгновенно. Единственная задержка — отслеживание кодового слова. Недостаток — кодовое слово, выбираемое для сохранения низкой вероятности ложных обнаружений, может быть длинным, по сравнению с маркером кадра. Здесь стоит отметить, что сложность определения корреляции пропорциональна длине последовательности, поэтому при использовании кодового слова коррелятор может быть относительно сложным.

Хорошим синхронизирующим кодовым словом является то, которое имеет малое абсолютное значение "побочных максимумов корреляции". Побочный максимум корреляции — это значение корреляции кодового слова с собственной смещенной версией.

1.7 Сетевая синхронизация

Для систем, использующих методы когерентной модуляции, одностороннюю связь такую как в широкополосных каналах, или одноканальную связь, как в большинстве микроволновых или оптоволоконных

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 20 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

систем, оптимальный подход — это возле жить все задачи синхронизации на приемник. Для систем связи, использующих методы некогерентной модуляции, или систем, где множество пользователей получаю доступ к одному центральному узлу, например во многих системах спутниковой связи, функцию синхронизации часто имеет смысл возложить (полностью или частично на оконечные устройства. Это означает, что для получения синхронизации модифицируются параметры передатчиков оконечных устройств, а не приемника центрального узла. Этот подход применим в системах, использующих множественный доступ временным разделением (time-divisionmultipleaccess — TDMA). В схеме TDMA каждому пользователю выделяется сегмент времени, в течение которого он может передавать информацию. Передатчик оконечного устройства должен синхронизироваться системой, чтобы переданные им пакеты данных прибывали на центральный узел в те момент, когда узел готов принимать данные. Синхронизация передатчика также имеет смысл в системах, объединяющих обработку сигналов на центральном узле с множественным доступом с частотным разделением (frequency-divisionmultipleaccess -FDMA). Если оконечные устройства предварительно синхронизируют свои передачи центральным узлом, узел может использовать конечный набор фильтров каналов единое эталонное время для обслуживания всех каналов. В противном случае узел будет требовать возможности захвата и сопровождения длительности и частоты каждого входного сигнала; кроме того, придется учитывать возможность интерференции сигналов из соседних каналов. Очевидно, что синхронизация передатчика оконечного устройства является более разумным решением при синхронизации сети.

Процедуру синхронизации передатчика можно отнести либо к открытой (без обратной связи), либо к замкнутой (с обратной связью). Открытые методы не зависят от измерения каких-либо параметров сигнала на центральном узле. Оконечное устройство заранее регулирует свою передачу, используя для этого

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 21 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

знания о параметрах канала, которые предоставляются извне, но, возможно, могут модифицироваться при наблюдениях сигнала, приходящего с центрального узла. Открытые методы зависят от точности и предсказуемости параметров канала связи. Лучше всего их применять в системах с практически фиксированной архитектурой, где каналы непрерывно проработали достаточно длительный промежуток времени после установки/настройки. Эти методы достаточно трудно использовать эффективно, если геометрия канала связи не является статической или оконечные устройства нерегулярно получают доступ к системе.

Основными преимуществами открытых методов является быстрое получение синхронизации (метод может работать без обратного канала связи) и малый объем требуемых вычислений в реальном времени. Недостаток состоит в том, что требуется наличие внешнего источника знаний о требуемых параметрах канала связи; кроме того, этот источник должен быть относительно неизменным. Отсутствие каких бы то ни было измерений характеристик системы в реальном времени означает, что система не может быстро приспособиться к любому незапланированному изменению условий.

С другой стороны, замкнутые методы требуют незначительных априорных знаний о параметрах канала; эти знания помогут снизить время, требуемое для достижения синхронности, но они не обязательно должны быть такими точными, как в случае открытых методов. Замкнутые методы включают измерения точности синхронизации передач от оконечных устройств, поступающих на центральный узел, и возврата результатов этих измерений посредством обратного канала связи. Таким образом, замкнутые методы требуют обратного канала, обеспечивающего отклик на передачу, возможности распознавания, на что был этот отклик, и возможности соответствующей модификации характеристик передатчика, основываясь при этом на полученном отклике. Из этих требований вытекает необходимость довольно значительной обработки в реальном времени, производимой на

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 22 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

оконечном устройстве, и двустороннего канала связи каждого оконечного устройства с центральным узлом.

Итак, недостатком замкнутых методов является требование значительной обработки в реальном времени, производимой на оконечном устройстве, двусторонний канал связи каждого оконечного устройства с центральным узлом и то, что получение синхронизации требует от-носително длительного промежутка времени. Преимущество состоит в том, что для работы системы не требуется внешнего источника знаний, а отклик по обратному каналу связи позволяет системе быстро и легко приспосабливаться к изменению геометрии системы и условий связи.

1.8 Синхронизация в сетях LTE

В сети LTE, каждая сота идентифицируется сигналами PSS и SSS, которые несут информацию о значении идентификатора соты. Процедура синхронизации состоит из следующих этапов, изображенных на рисунке 2. Существует две процедуры поиска соты в LTE:

1. Начальная синхронизация, посредством, которой МС обнаруживает соту LTE и декодирует всю информацию, необходимую для регистрации к нему. Данная процедура выполняется, когда включается МС, или когда она утратила связь с обслуживающей сотой.
2. Идентификация новой ячейки, выполняться, когда мобильная станция уже подключена к соте LTE и находится в процессе обнаружения новых соседних сот. В этом случае мобильная станция сообщает в обслуживающей соте измерения, связанные с новой сотой, при подготовке к хэндоверу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 23 |

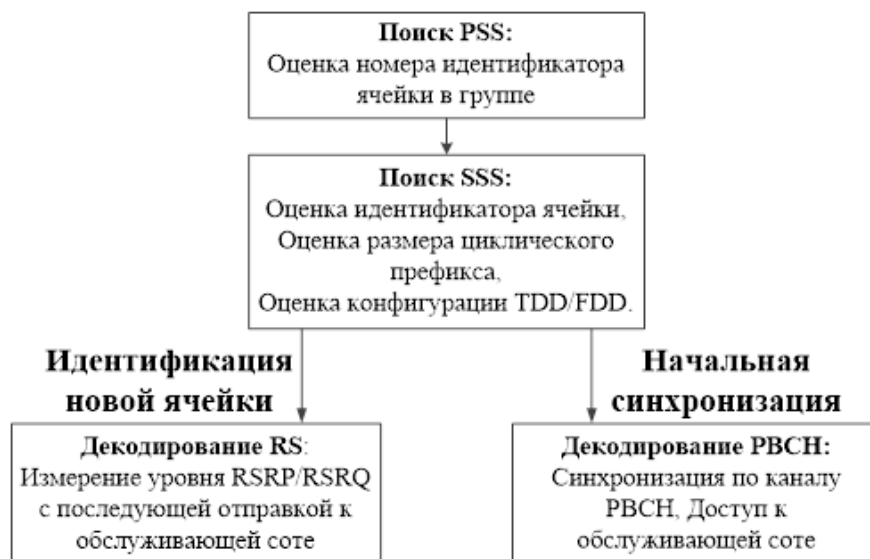


Рисунок 2 - Блок-схема процедуры синхронизации

В обоих случаях процедура синхронизации использует два вида специальных физических сигналов, которые транслируются в каждой соте: первичный сигнал синхронизации и вторичный сигнал синхронизации. Обнаружение этих двух сигналов дает не только временную и частотную синхронизацию, но также информирует мобильную станцию о физическом идентификаторе соты и длине циклического префикса, а также информирует мобильную станцию какой дуплекс используется: дуплекс с частотным разделением (FDD - Frequency Division Duplex), либо дуплекс с временным разделением (TDD - Time Division Duplex). Расположение сигналов PSS и SSS на частотно-временной области представлено на рисунке 3.

В случае частотного дуплекса во временной области сигналы PSS и SSS располагаются в 1-ом и 6-ом субфрейме и на последних OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) символах.

В частотной области PSS и SSS передаются на центральных шести ресурсных блоках вне зависимости от занимаемой полосы частот. Каждая последовательность PSS и SSS состоит из последовательности длиной 62 символов, которые отображаются на центральных 62 поднесущих вокруг постоянной поднесущей, которая остается неиспользованной. Это означает,

что пять ресурсных элементов на каждом конце каждой последовательности синхронизации не используются. Опорные сигналы, изображенные на рисунке 3, используются для оценки передаточной функции канала с целью эквалайзирования или восстановления потока данных. Всего существует три вида опорных сигналов:

1. Cell-specific RS (часто упоминается как «общие» RS, так как они доступны для всех UE (user equipment) в соте);
2. UE-specific RS, которые могут быть встроены в данные для конкретного абонента UE;
3. MBSFN-specific RS (Multicast-Broadcast Single Frequency Network Reference Signals, Опорные сигналы многоадресной одночастотной сети), которые используются только для работы в многоадресной одночастотной сети.

Расположение опорных сигналов вида Cell-specific по частотной оси зависит непосредственно от значения идентификатора ячейки, поэтому без правильной оценки сигналов PSS и SSS в дальнейшем не удастся провести корректное эквалайзирование с последующим восстановлением потока данных PSS использует последовательности известные как Задова-Чу (ZC).

Эта категория последовательностей широко используется в сети LTE, в том числе для преамбулы случайного доступа и опорных сигналов по восходящей линии связи в дополнение к PSS

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 25 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

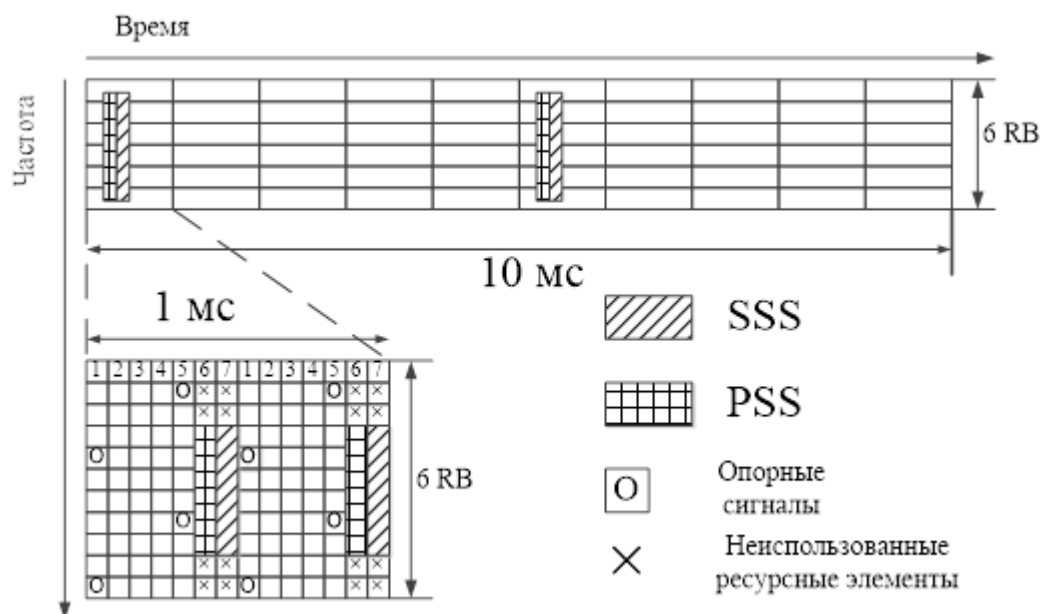


Рисунок 3 - Расположение сигналов PSS и SSS на частотно-временной области

Последовательности SSS образуются из последовательностей максимальной длины, известные как M-последовательности, которые генерируются путем перемежения, в частотной области, двух вторичных синхронизирующих кодов и длиной 31.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ ВЕКТОРОВ СУБПОЛОСНОЙ МАТРИЦЫ В ЗАДАЧЕ СИМВОЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

2.1 Формирование собственных векторов субполосной матрицы

Известно, что субполосный базис обладает свойствами оптимальности с точки зрения минимального уровня внеполосного излучения. В качестве исследуемых сигналов были выбраны собственные векторы субполосных матриц. Свойство ортогональности собственных векторов позволяет записать равенство:

$$Q' \cdot Q = 1 \quad (1)$$

где матрица $Q_i = \{\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_J\}$ имеет размерность $[N \times J]$;

Поэтому восстановление передаваемой информации может быть осуществлено на основе операции;

$$\bar{e} = Q^T \times \bar{x} = Q^T \times Q \times \bar{e} = 1 \times \bar{e} \quad (2)$$

В реальных условиях, однако, необходимо формировать непрерывные сигналы, а не дискретные. Для этого естественно воспользоваться аналогией вида:

$$x(t) = \sum_{i=1}^J e_i q_i(t), t \in [0, T] \quad (3)$$

где $q_i(t)$ - собственные функции субполосного ядра (3) вида

$$A(t-t_1) = (\sin[\Omega_2(t-t_1)] - \sin[\Omega_1(t-t_1)]) / \pi(t-t_1) \quad (4)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 27 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

так что по определению должно выполняться равенство:

$$\lambda_i q_i(t) = \int_0^T A(t-t_1) q_i(t_1) dt_1 \quad (5)$$

где Ω_1 и Ω_2 границы частотного интервала в Герцах;

Вычисления показывают, что одному и тому же собственному числу соответствуют две ортогональных собственных функции, модули трансформант Фурье которых не отличаются. Поэтому представляется целесообразным использовать аппроксимации:

$$\hat{q}_{2k-1}(t) = u_k(t) \cos(\Omega_c t), \quad (6)$$

$$\hat{q}_{2k}(t) = u_k(t) \sin(\Omega_c t), \quad (7)$$

$$\lambda_k u_k = \int_0^T A_0(t-\tau) u_k(\tau) d\tau, \quad (8)$$

$$A_0(\tau) = \sin\left[\frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \tau\right] / \pi \quad (9)$$

где $k = 1, 2, \dots, J/2$;

$$\Omega_c = (\Omega_2 - \Omega_1) / 2, \quad (10)$$

$$J = (\Omega_2 - \Omega_1) T / 2\pi \quad (11)$$

причем предполагается выполнение условия

$$(\Omega_2 - \Omega_1) T / 2\pi \gg 8 \quad (12)$$

так как, только в этом случае будет порядка $J/2$ собственных чисел мало отличающихся от единицы.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 28 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

Для вычисления аппроксимаций собственных функций согласно соотношению (5) следует использовать квадратурную формулу, например прямоугольников:

$$\lambda_i q_i(k\Delta t) = \Delta t \sum_{n=0}^N A(\Delta t(k-n)) q_i(n\Delta t) \quad (13)$$

выбрав достаточно малый шаг дискретизации

$$\Delta t = T/N \quad (14)$$

Целью дальнейшего является исследование, с точки зрения эффективности формирования канальных сигналов, свойств предлагаемых аппроксимаций, а именно:

- возможность построения на этой основе ортогонального базиса;
 - оценивание вероятностей ошибочных решений при приеме сигналов на основе правила
- и наоборот.

$$z_i = \int_0^T \hat{x}(t) \hat{q}_i(t) dt > 0 \Rightarrow e_i = 1 \quad (15)$$

где $\hat{x} = \bar{x} + \bar{\varepsilon}$;

Естественно, что как при формировании так и при обработке канальных сигналов интегралы заменяются суммами, что означает дискретизацию в том числе и огибающих. Поэтому собственные функции выполняются в дискретном наборе точек согласно (5).

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 29 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

2.2 Формирование синхронизирующего сигнала

Процесс формирования синхронизирующего сигнала происходит следующим образом:

1 Рассчитывается опорный синхронизирующий вектор:

$$\overline{sx} = QQ(:,i)' \quad (16)$$

где i - номер собственного вектора из матрицы собственных векторов, $i = 1 \dots J$;

В случае выбора в качестве синхронизирующего вектора несколько собственных векторов:

$$\overline{sx} = \sum_{i=k}^l QQ(:,i)' \quad (17)$$

где l - верхнее значение диапазона выбора, i - нижнее значение диапазона выбора, $l, i = 1 \dots J$;

2 Передаваемый сигнал формируется с использованием собственных векторов субполосной матрицы:

$$\overline{tx} = QQ \cdot \vec{e} \quad (18)$$

где \vec{e} - единичный вектор передаваемой информации, $e_n = 1, n = 1 \dots J$, n - длина вектора передаваемой информации;

3 К передаваемому сигналу добавляется шум и временной сдвиг, формируя таким образом принятый сигнал:

$$\overline{rx} = \overline{tx} \cdot \vec{\varepsilon} \quad (19)$$

где $\vec{\varepsilon}$ - белый шум;

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 30 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

$$\overline{rx(i)} = \overline{r} \overline{x(i + \tau)} \quad (20)$$

где τ - временной сдвиг;

4. Принятый синхронизирующий вектор восстанавливается из полученного сигнала поэлементным образом:

$$\overline{vs} = \overline{rx} \cdot \overline{s} \quad (21)$$

где \cdot - поэлементное перемножение

5. Коэффициент взаимной корреляции двух сигналов вычисляется по формуле:

$$p_{x_1x_2}(j) = \frac{r_{x_1x_2}(j)}{\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N x_1^2(n) \sum_{n=1}^N x_2^2(n)}} \quad (22)$$

где x_1 - сигнал, который сравнивается с опорным сигналом, x_2 - опорный синхро-вектор, N - длина отчетов сигнала, $r_{x_1x_2}$ - взаимная корреляция двух сигналов, которая вычисляется по формуле;

$$r_{x_1x_2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_1(n)x_2(n) \quad (23)$$

Используя в качестве x_2 исходный синхронизирующий вектор $\overline{s_x}$, а в качестве x_1 , рассчитанный на приемной стороне, синхронизирующий вектор \overline{vs} , была определена задержка принятого сигнала.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 31 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

2.3 Исследование разработанного метода

В таблице 1 приведены, используемые в данной эксперименте, матрицы собственных векторов, сформированный с различной пропускной способностью:

Таблица 1 – Сведения о матрице собственных векторах, которые были использованы в данной эксперименте

| Матрица собственных векторов | Ширина полосы пропускания (Гц) | Размерность |
|------------------------------|--------------------------------|-------------|
| QQ_1 | 1.4e6 | 128x72 |
| QQ_2 | 3e6 | 256x180 |
| QQ_3 | 5e6 | 512x300 |
| QQ_4 | 10e6 | 1024x600 |
| QQ_5 | 15e6 | 1536x900 |
| QQ_6 | 20e6 | 2048x1200 |

Опорные синхронизирующий сигнал формируется из матриц собственных векторов с различной пропускной способностью, используя формулу (16) или (17).

Для проведения эксперимента процентное содержания собственных векторов в синхронизирующем сигнал изменяется от 10 до 100 процентов с шагом 10%.

Таблица 2 – Задержка сигнала после символьной синхронизации для различных базисов.

| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | | | | | | |
|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| QQ_1 | -21 | 0 | 0 | 0 | 0 | -21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Окончание таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| QQ_4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 3 – Задержка сигнала после символьной синхронизации для различных базисов.

| QQ | Процентное содержания матрицы QQв синхронизирующем сигнале (%) | | | | | | | | | |
|------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| QQ_1 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 4 – Задержка сигнала после символьной синхронизации для различных базисов.

| QQ | Процентное содержания матрицы QQв синхронизирующем сигнале (%) | | | | | | | | | |
|------|--|----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| QQ_1 | -21 | 0 | 0 | 0 | 0 | -21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 5 – Задержка сигнала после символьной синхронизации для различных базисов.

| QQ | Процентное содержания матрицы QQв синхронизирующем сигнале (%) | | | | | | | | | |
|------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| QQ_1 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

На следующих рисунках представлены графики абсолютных значений коэффициентов корреляции принятого и исходного синхро-сигналов, а также коэффициентов автокорреляции, при установленной задержки в 50 отчетов.

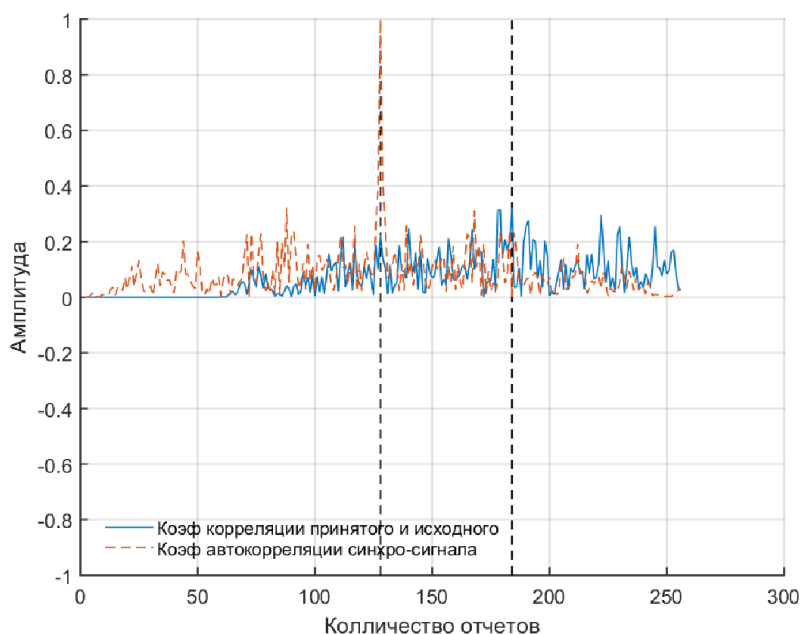


Рисунок 4–Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (10% QQ_1).

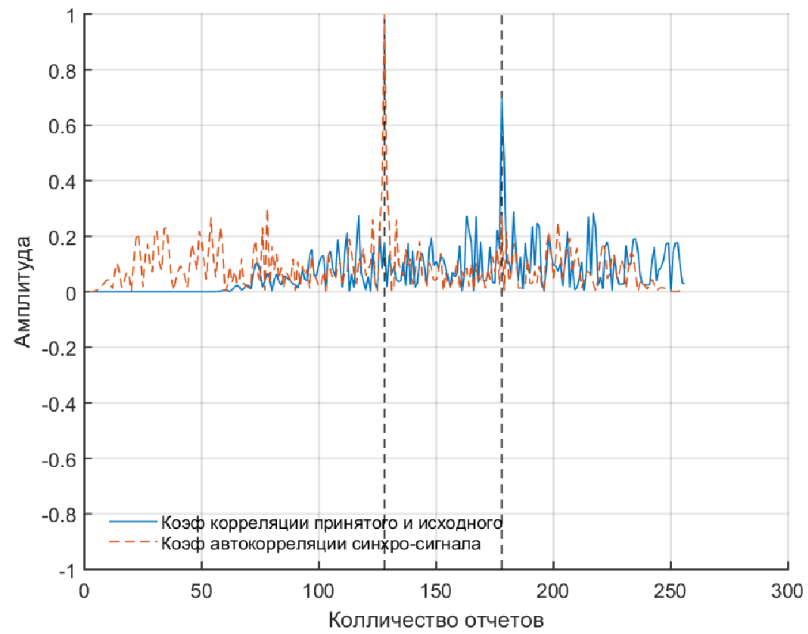


Рисунок 5 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (50% QQ_1).

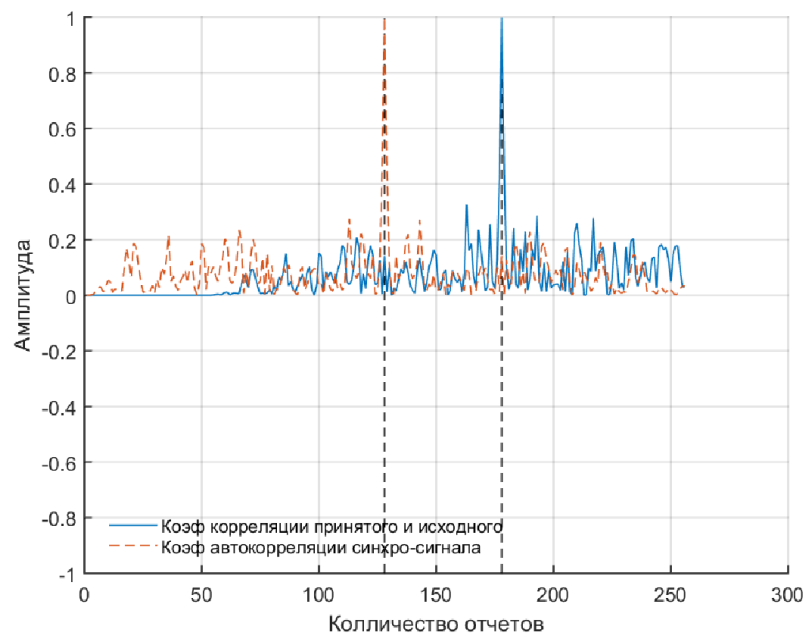


Рисунок 6 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (100% QQ_1).

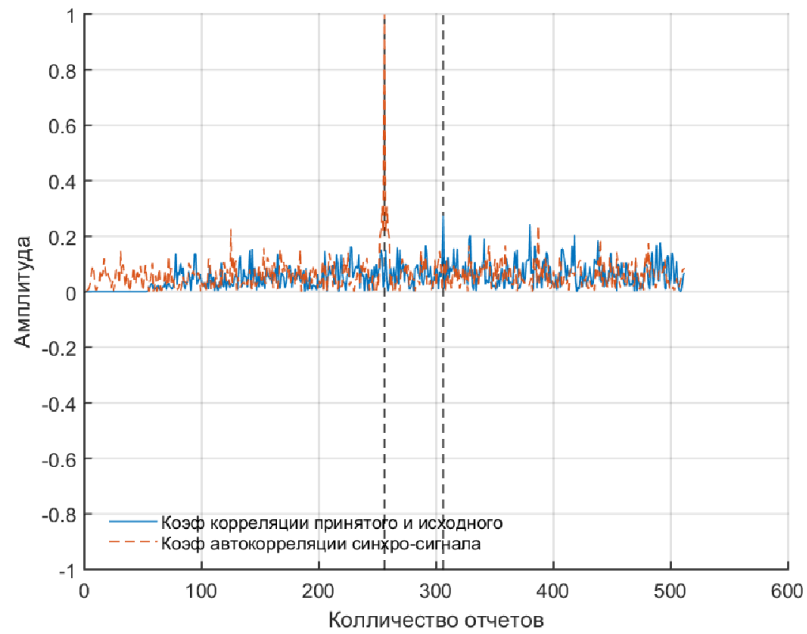


Рисунок 7 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (10% QQ_2).

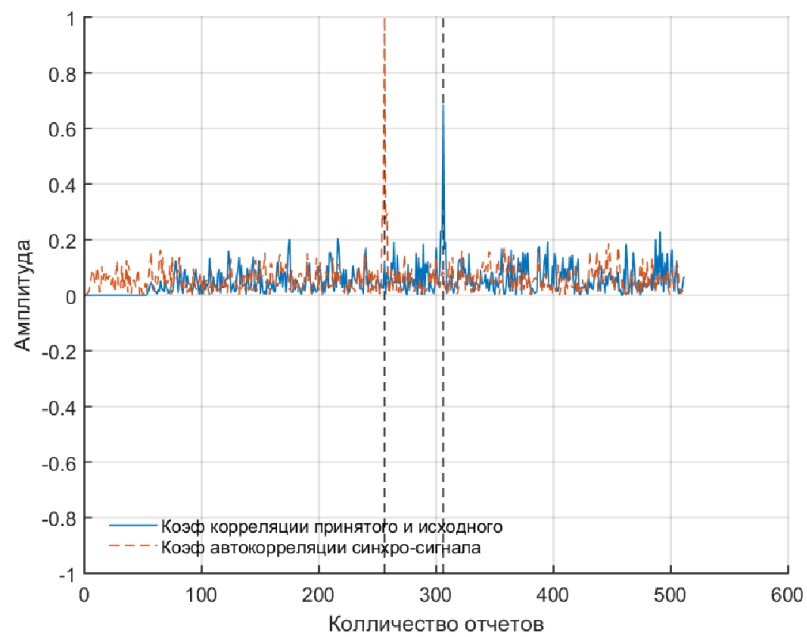


Рисунок 8 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (50% QQ_2).

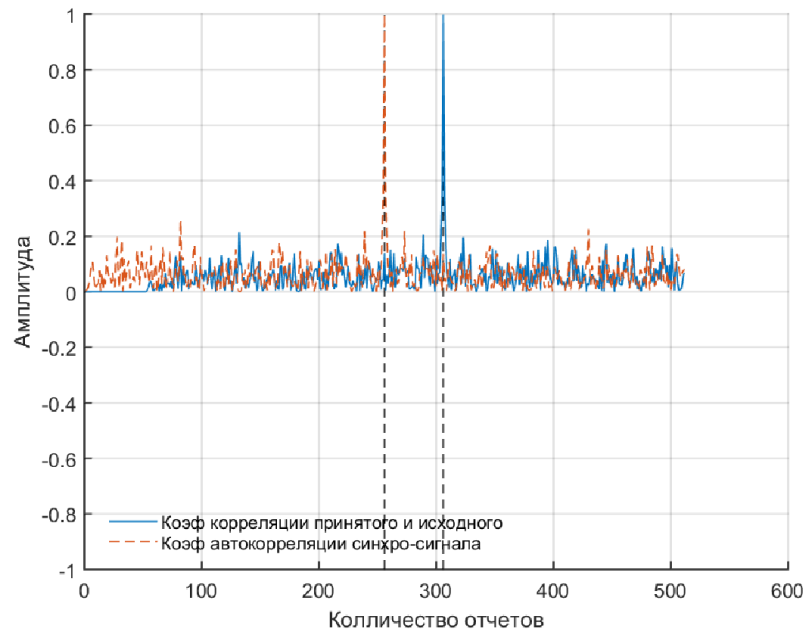


Рисунок 9 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (100% QQ_2).

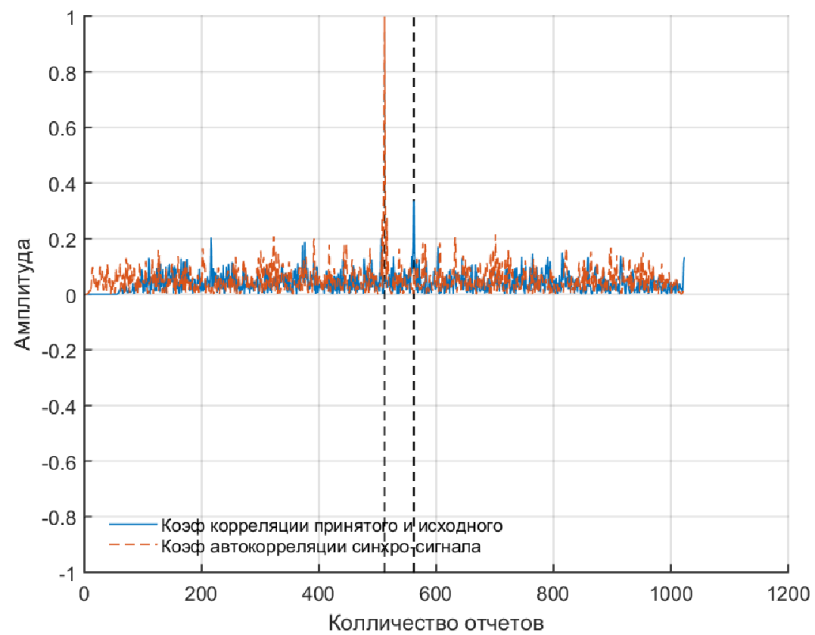


Рисунок 10 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (10% QQ_3).

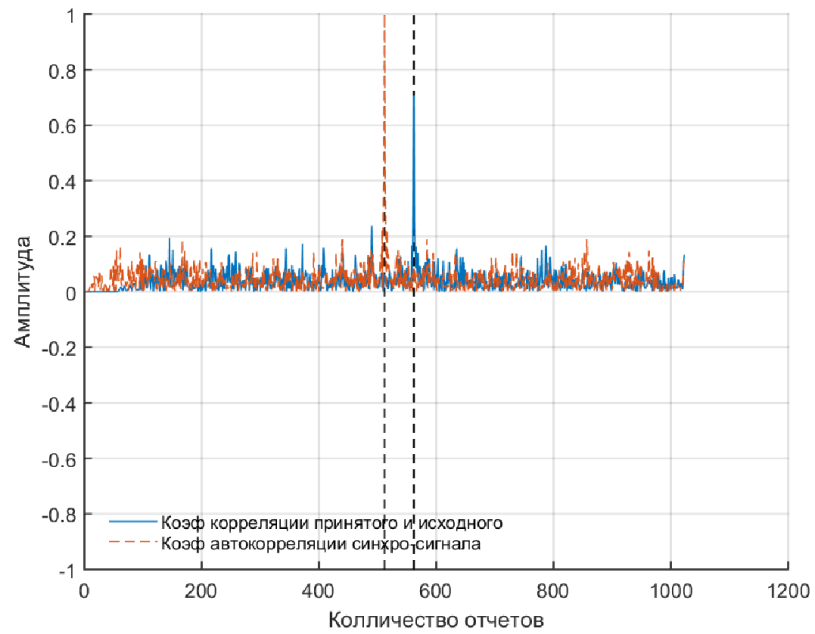


Рисунок 11 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (50% QQ_3).

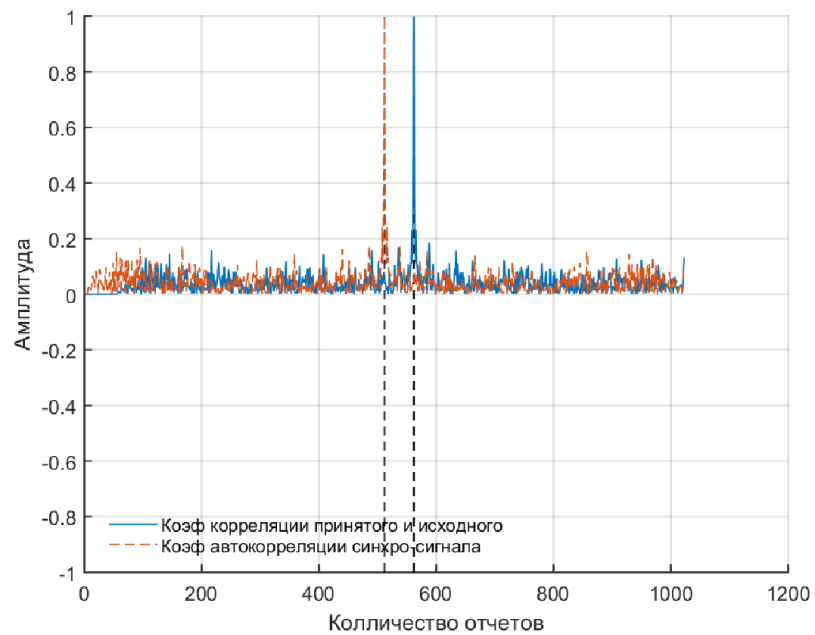


Рисунок 12 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (100% QQ_3).

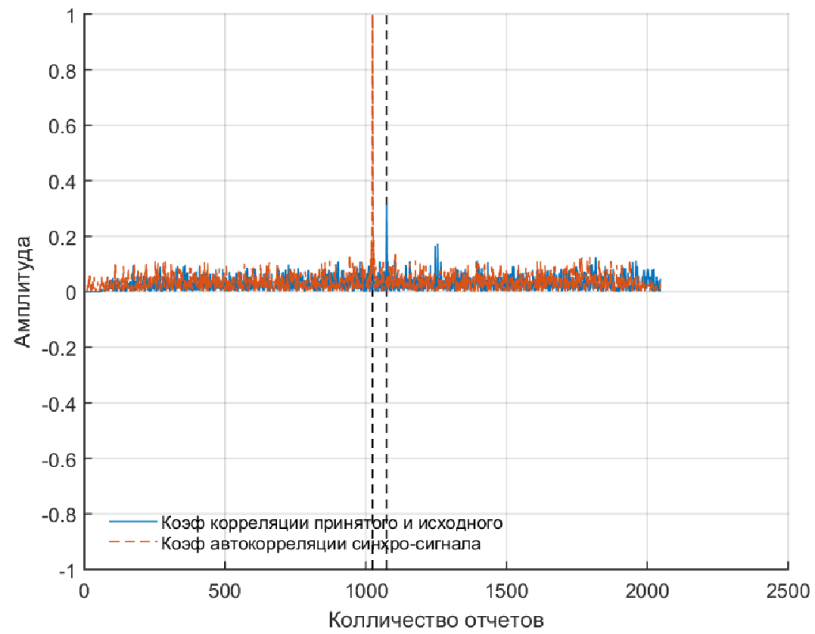


Рисунок 13 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (10% QQ_4).

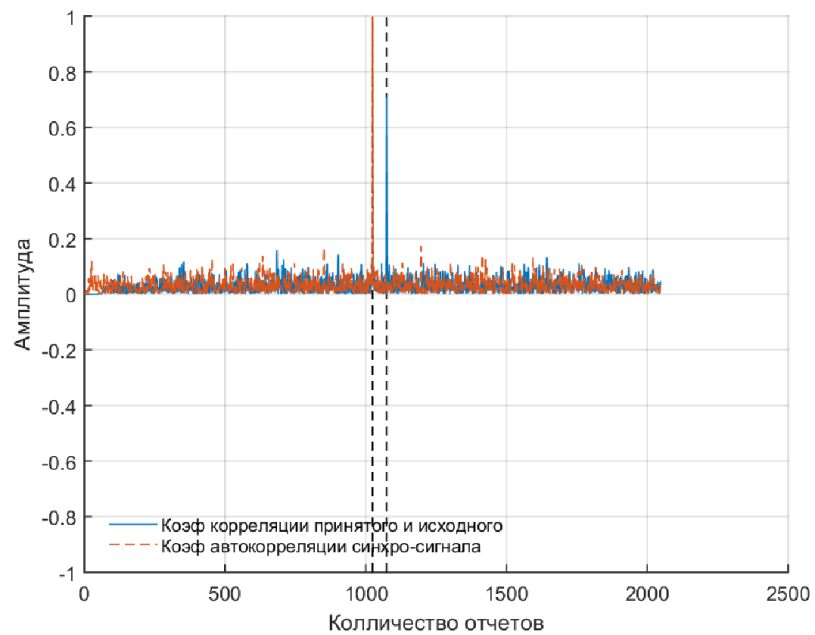


Рисунок 14 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (50% QQ_4).

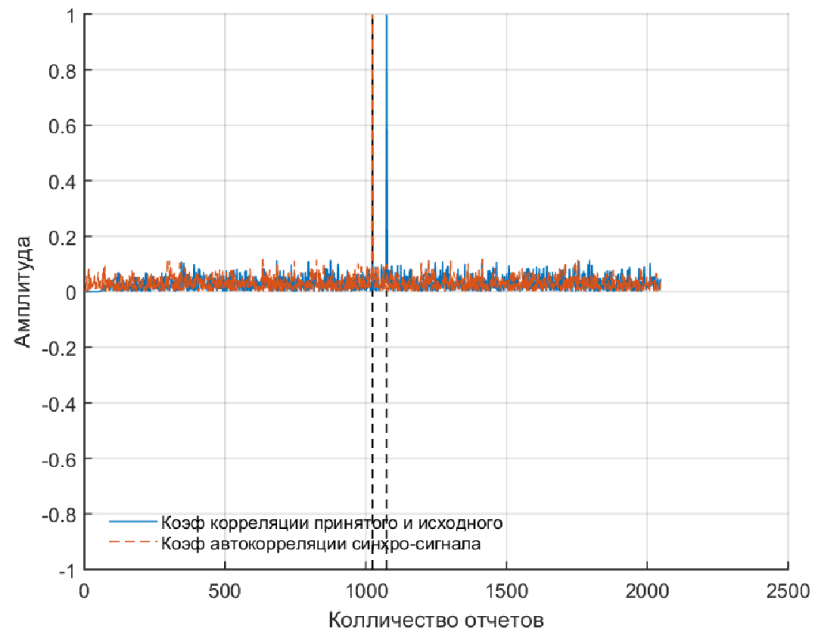


Рисунок 15 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (100% QQ_4).

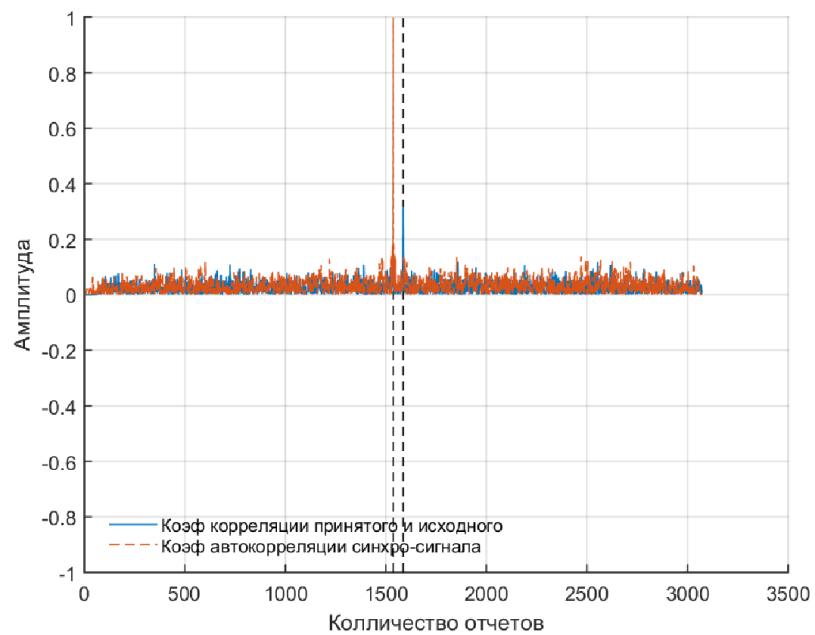


Рисунок 16 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (10% QQ_5).

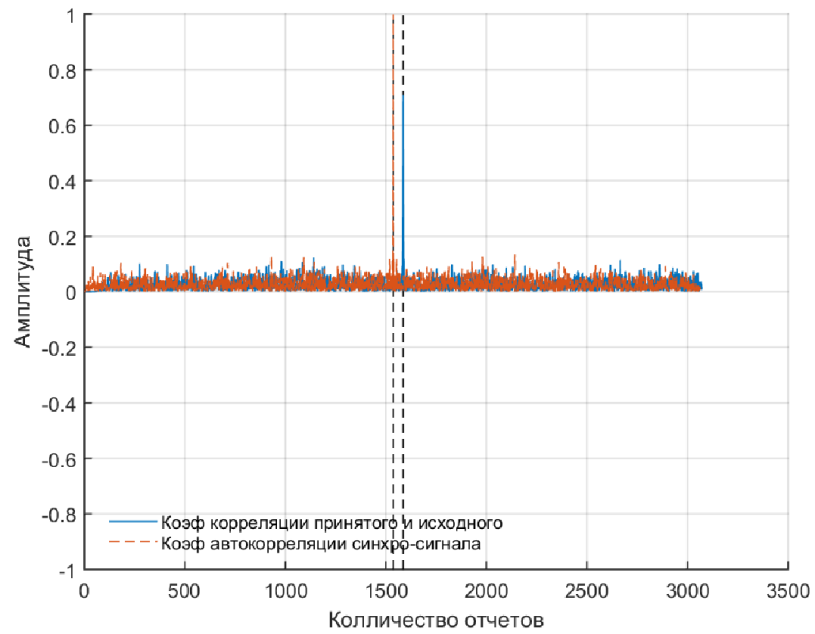


Рисунок 17 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (50% QQ_5).

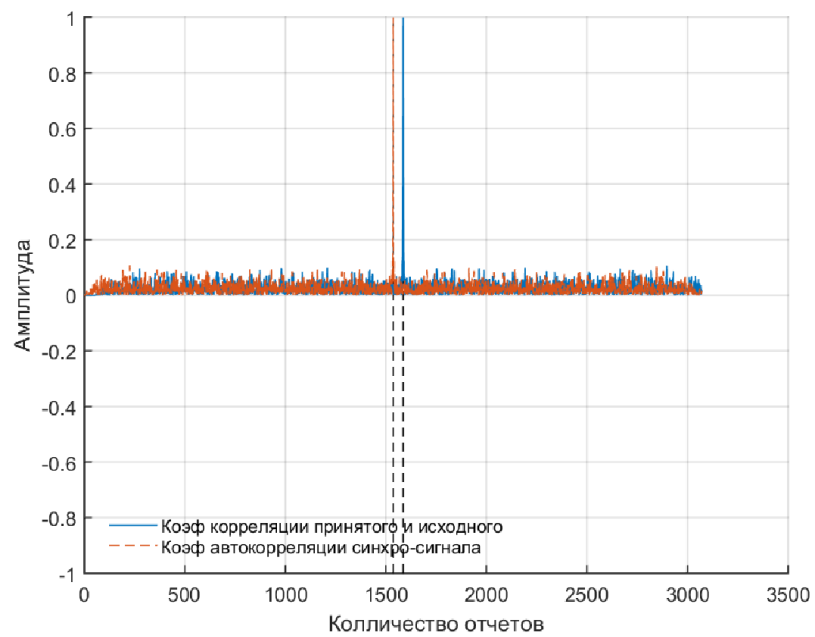


Рисунок 18 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (100% QQ_5).

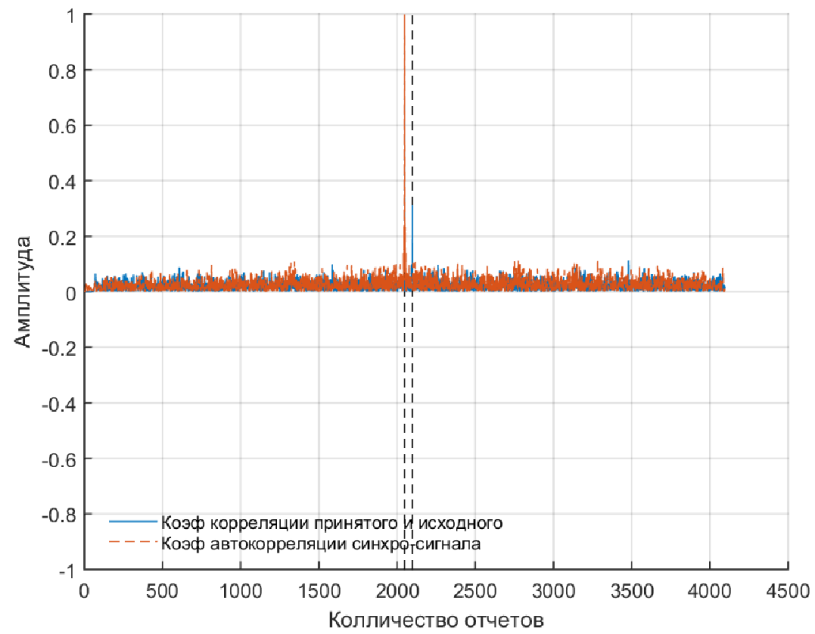


Рисунок 19 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (10% QQ_6).

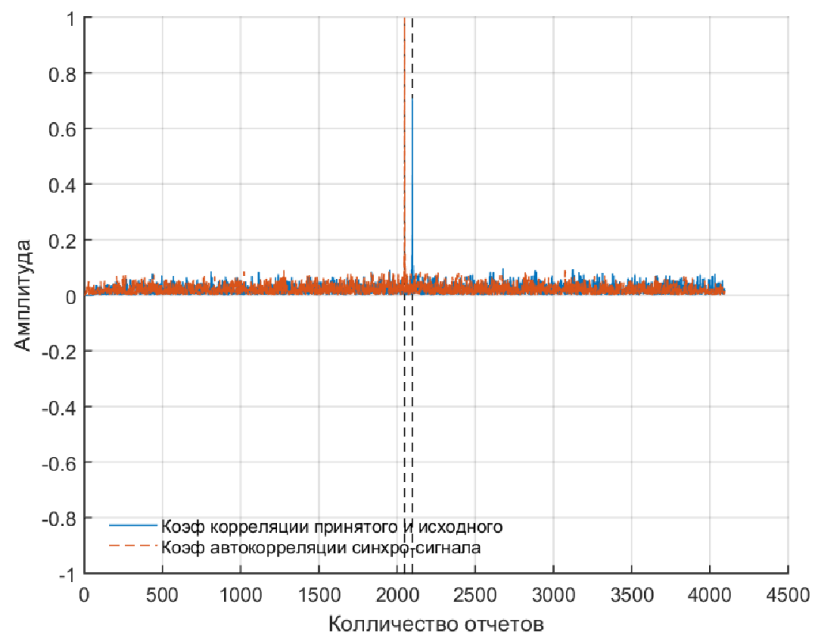


Рисунок 20 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (50% QQ_6).

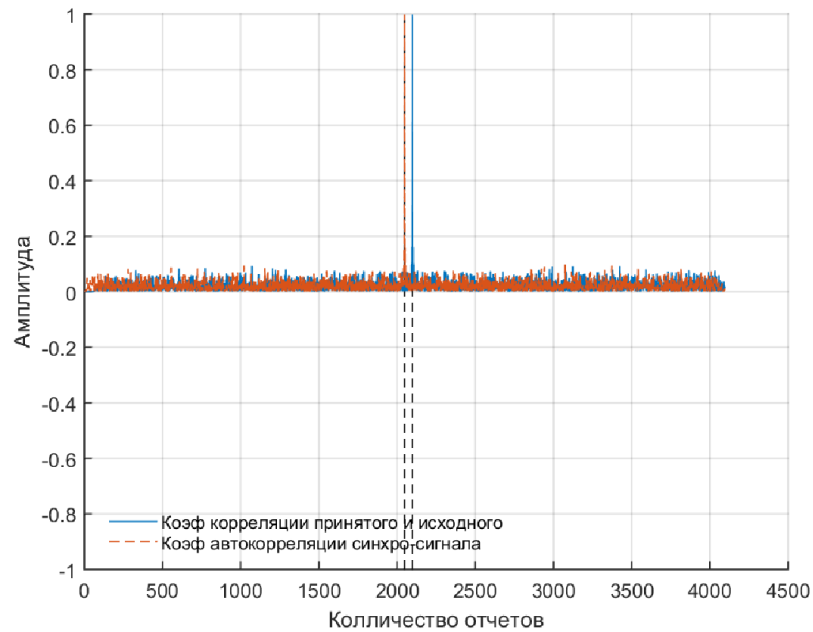


Рисунок 21 – Графики абсолютных значений коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (100% QQ_6).

По данным таблицы 2 можно сделать выводы, что при использовании матрицы собственных векторов в качестве синхро-сигнала сигнала, с процентным содержанием выше 10%, вычисления задержки сигнала являются верными.

При использовании в качестве синхро-сигнала базиса собственных векторов, с процентным содержанием ниже 70%, значение пика корреляции переданного и принятого сигналов, является недостаточно высокой. В связи с этим при наличии шумов в передаваемом сигнале, значение максимума корреляции может искажено и быть вычислено неверным образом.

2.4 Вероятность неверного обнаружения начала сигнала при наличии шума

Приведенные выше результаты были получены при идеальных условиях, наличие шума в сигнале отсутствовало. Однако в реальных системах связи такое невозможно.

В связи с этим, возникает потребность провести эксперимент по вычислению вероятности верного обнаружения начала сигнала, при наличии шумов в сигнале. Для этого к передаваемому сигналу, с изначально установленной начальной задержкой, был добавлен белый шум с различным соотношением SNR (сигнал/шум).

Данные значения шум/сигнал варьировались от -20 до 20 дБ, с шагом 5 дБ. Также, как и в предыдущем эксперименте в качестве синхро-сигнала выступ базис собственных векторов, с различной пропускной способностью. Процентное содержание базиса собственных векторов в синхро-сигнале также изменялось. Количество итераций операции добавления белого шума к сигналу составляет 1000.

Таблица 6 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -20дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -20 дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-------|---------------------|-------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0,994 | 0,990 | 0,975 | 0,976 | 0,972 |
| QQ_2(3МГц) | 0,989 | 0,971 | 0,976 | 0,956 | 0,931 |
| QQ_3(5МГц) | 0,982 | 0,968 | 0,958 | 0,925 | 0,910 |
| QQ_4(10 МГц) | 0,983 | 0,940 | 0,882 | 0,826 | 0,770 |
| QQ_5(15 МГц) | 0,969 | 0,904 | 0,848 | 0,707 | 0,580 |
| QQ_6(20 МГц) | 0,963 | 0,873 | 0,745 | 0,604 | 0,461 |

Таблица 7 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -20дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -20 дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|--------|---------------------|--------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 50,891 | 53,304 | 55,516 | 56,028 | 53,315 |
| QQ_2(3МГц) | 35,526 | 50,350 | 51,495 | 52,760 | 62,139 |
| QQ_3(5МГц) | 51,355 | 49,836 | 66,349 | 62,263 | 69,952 |
| QQ_4(10 МГц) | 24,462 | 45,278 | 58,781 | 59,829 | 66,024 |
| QQ_5(15 МГц) | 27,686 | 49,325 | 66,169 | 87,583 | 91,295 |
| QQ_6(20 МГц) | -33,150 | 68,859 | 57,587 | 72,673 | 71,207 |

Таблица 8 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -15дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -15дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-------|---------------------|-------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0,984 | 0,959 | 0,945 | 0,938 | 0,916 |
| QQ_2(3МГц) | 0,959 | 0,916 | 0,852 | 0,805 | 0,723 |
| QQ_3(5МГц) | 0,962 | 0,854 | 0,761 | 0,635 | 0,504 |
| QQ_4(10 МГц) | 0,886 | 0,695 | 0,454 | 0,275 | 0,129 |
| QQ_5(15 МГц) | 0,803 | 0,486 | 0,227 | 0,109 | 0,036 |
| QQ_6(20 МГц) | 0,729 | 0,326 | 0,088 | 0,017 | 0,005 |

Таблица 9 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -15дБ).

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 45 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -15дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|--------|---------------------|---------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 52,723 | 54,715 | 56,520 | 58,779 | 60,268 |
| QQ_2(3МГц) | 36,179 | 48,426 | 59,061 | 62,031 | 70,700 |
| QQ_3(5МГц) | 52,304 | 60,211 | 80,158 | 81,559 | 84,283 |
| QQ_4(10 МГц) | 24,089 | 60,996 | 73,969 | 92,315 | 93,119 |
| QQ_5(15 МГц) | 29,533 | 74,434 | 91,432 | 98,677 | 101,493 |
| QQ_6(20 МГц) | -1,878 | 79,477 | 90,866 | 98,877 | 99,758 |

Таблица 10 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -10дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -10дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-------|---------------------|-------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0,967 | 0,896 | 0,816 | 0,690 | 0,587 |
| QQ_2(3МГц) | 0,860 | 0,649 | 0,413 | 0,233 | 0,117 |
| QQ_3(5МГц) | 0,772 | 0,411 | 0,148 | 0,055 | 0,017 |
| QQ_4(10 МГц) | 0,437 | 0,082 | 0,006 | 0,001 | 0,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 0,187 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 0,102 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Таблица 11 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -10дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -10дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|---------|---------------------|---------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 58,243 | 64,150 | 66,729 | 71,938 | 74,123 |
| QQ_2(3МГц) | 46,704 | 66,410 | 82,304 | 88,053 | 95,295 |
| QQ_3(5МГц) | 62,051 | 78,979 | 96,811 | 97,705 | 99,780 |
| QQ_4(10 МГц) | 73,254 | 95,152 | 99,423 | 100,076 | 100,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 82,367 | 101,040 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 89,896 | 99,547 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

Таблица 12 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -5дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -5дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-------|---------------------|-------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0,859 | 0,582 | 0,312 | 0,139 | 0,054 |
| QQ_2(3МГц) | 0,497 | 0,066 | 0,013 | 0,001 | 0,000 |
| QQ_3(5МГц) | 0,177 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_4(10 МГц) | 0,009 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Таблица 13 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум -5дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | -5дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|------|----------------------------------|-----|---------------------|------|
|------------------------------|------|----------------------------------|-----|---------------------|------|

| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
|---------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 72,402 | 85,948 | 90,609 | 96,175 | 98,849 |
| QQ_2(3МГц) | 75,632 | 96,947 | 99,427 | 100,001 | 100,000 |
| QQ_3(5МГц) | 94,899 | 99,736 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_4(10 МГц) | 99,509 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 99,743 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

Таблица 14 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 0дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 0дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-------|---------------------|------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0,521 | 0,084 | 0,019 | 0 | 0 |
| QQ_2(3МГц) | 0,036 | 0,001 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_3(5МГц) | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_4(10 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_5(15 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_6(20 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 15 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 0дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 0дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|-----|---------------------|------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |

| | итераций | | | | |
|---------------|----------|--------|---------|-----|-----|
| QQ_1(1.4 МГц) | 94,296 | 99,741 | 100,007 | 100 | 100 |
| QQ_2(3МГц) | 99,034 | 99,999 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_3(5МГц) | 99,999 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_4(10 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_5(15 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_6(20 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Таблица 16 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 5дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 5дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-------|---------------------|-------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0,156 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_2(3МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_3(5МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_4(10 МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Таблица 17 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 5дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 5дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|---------|---------------------|---------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 98,086 | 100,001 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

| | | | | | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| QQ_2(3МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_3(5МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_4(10 МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

Таблица 18 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 10дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 10дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|-----------|---------------------|------------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0,013 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_2(3МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_3(5МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_4(10 МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Таблица 19 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 10дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 10дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-----------|---------------------|------------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 99,737 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_2(3МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_3(5МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

| | | | | | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| QQ_4(10 МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_5(15 МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| QQ_6(20 МГц) | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

Таблица 20 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 15дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 15дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|-----------|---------------------|------------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_2(3МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_3(5МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_4(10 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_5(15 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_6(20 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 21 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 15дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 15дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-----------|---------------------|------------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_2(3МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_3(5МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_4(10 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_5(15 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_6(20 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Таблица 22 – Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 20дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 20дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|---|----------------------------------|-----|---------------------|------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Оценка вероятности неверного обнаружения задержки | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_2(3МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_3(5МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_4(10 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_5(15 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QQ_6(20 МГц) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 23 – Среднее значение вычисленной задержки, при наличии белого шума (соотношение сигнал/шум 20дБ).

| Соотношение сигнал/шум (SNR) | 20дБ | Установленная начальная задержка | 100 | Количество итераций | 1000 |
|------------------------------|--|----------------------------------|-----|---------------------|------|
| QQ | Процентное содержания матрицы QQ в синхронизирующем сигнале (%) | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | Среднее значение вычисленной задержки при заданном количестве итераций | | | | |
| QQ_1(1.4 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_2(3МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_3(5МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_4(10 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_5(15 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| QQ_6(20 МГц) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

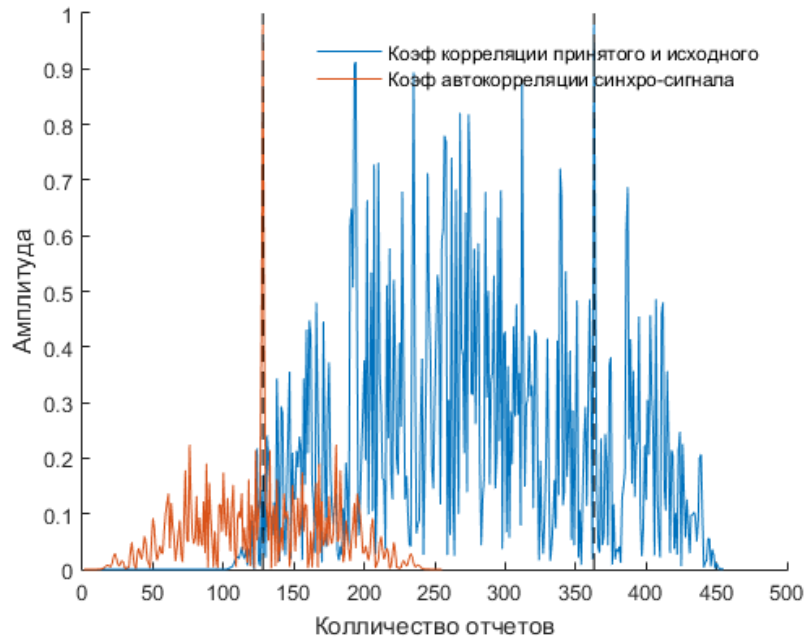


Рисунок 22 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ1, SNR = -20дБ).

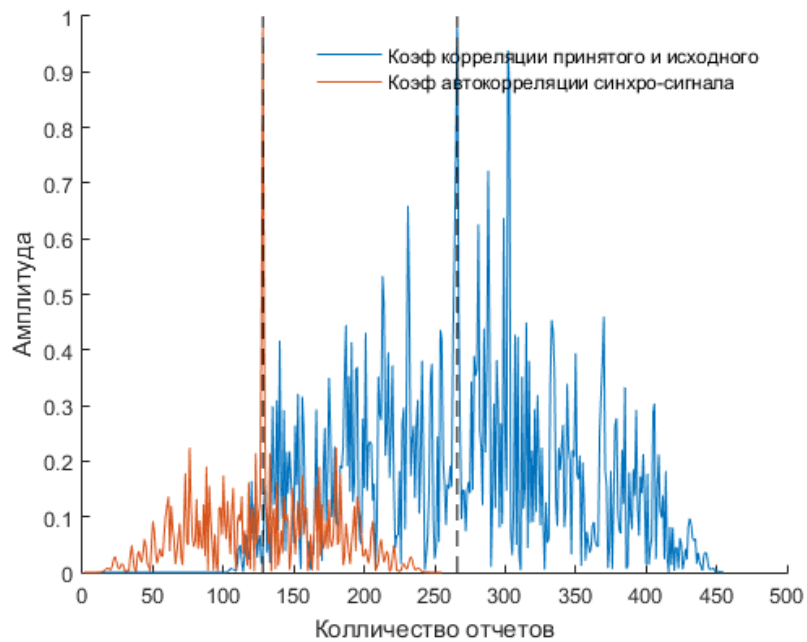


Рисунок 23 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ1, SNR = -10дБ).

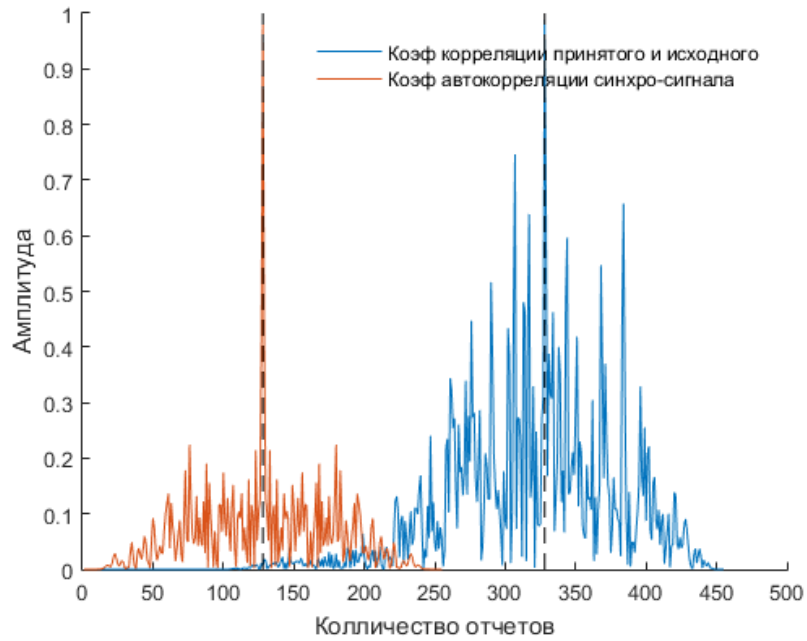


Рисунок 24 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ1, SNR = 20ДБ).

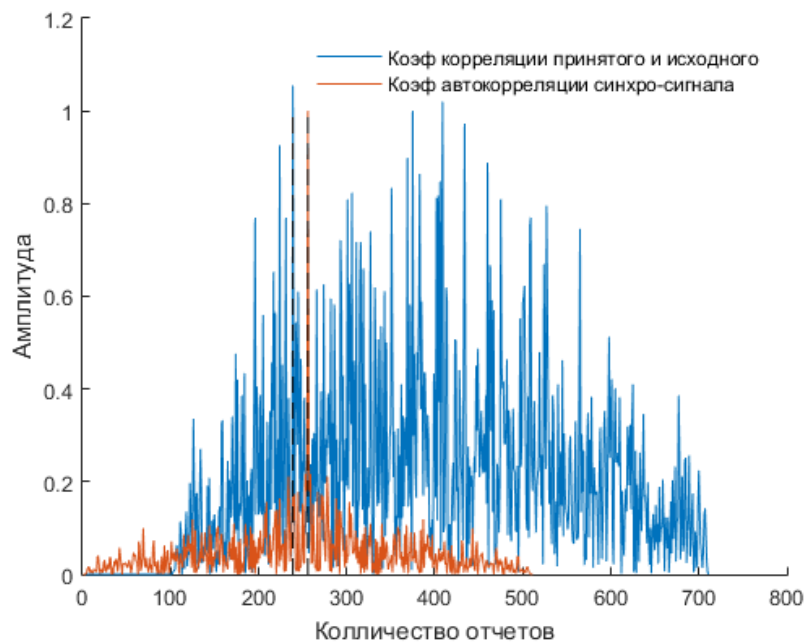


Рисунок 25 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ2, SNR = -20ДБ).

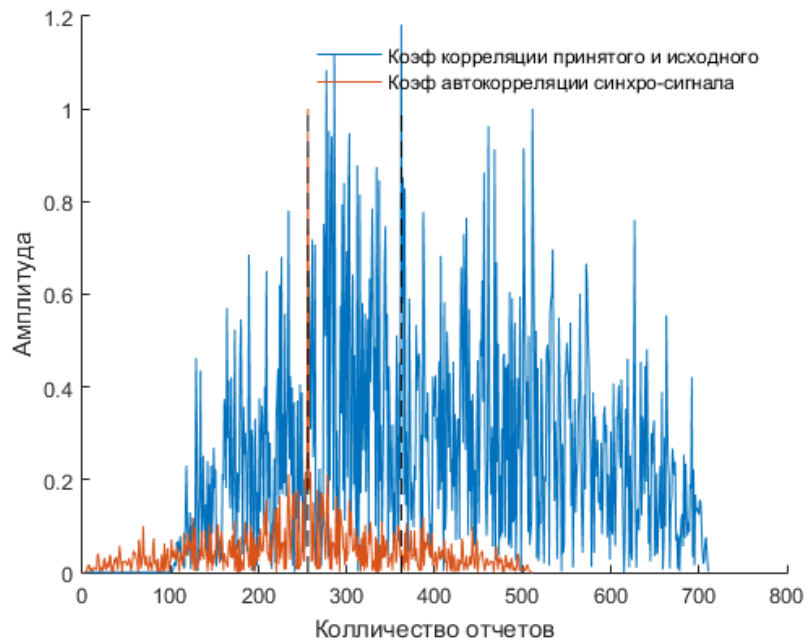


Рисунок 26 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ2, SNR = -10дБ).

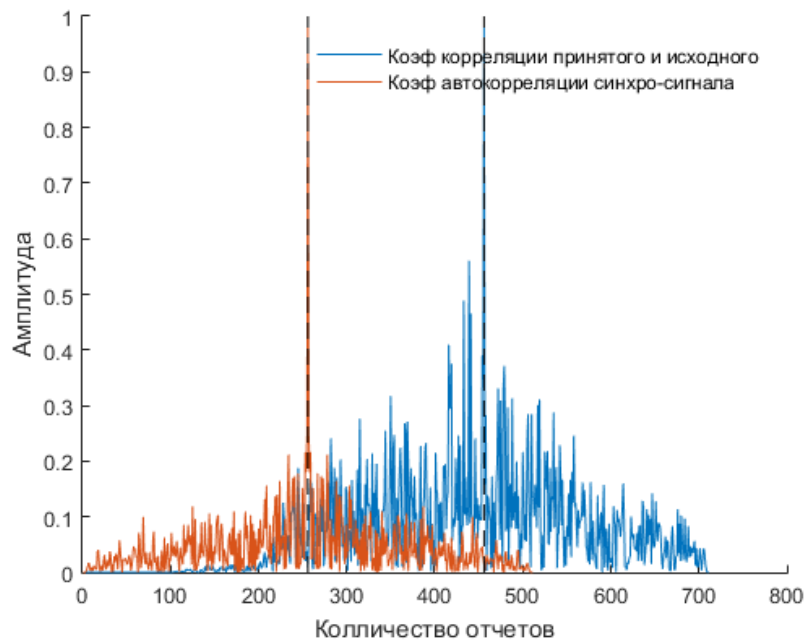


Рисунок 27 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ2, SNR = 20дБ).

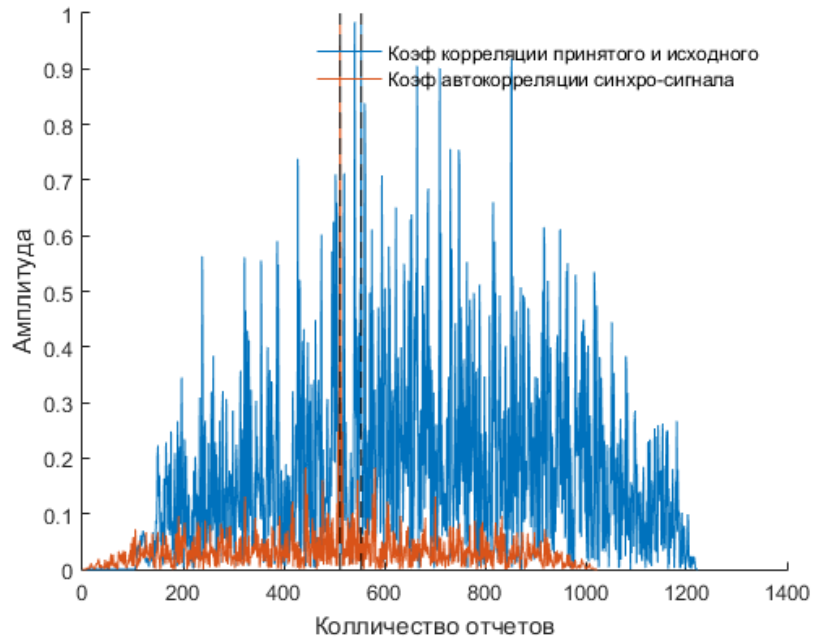


Рисунок 28 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ3, SNR = -20дБ).

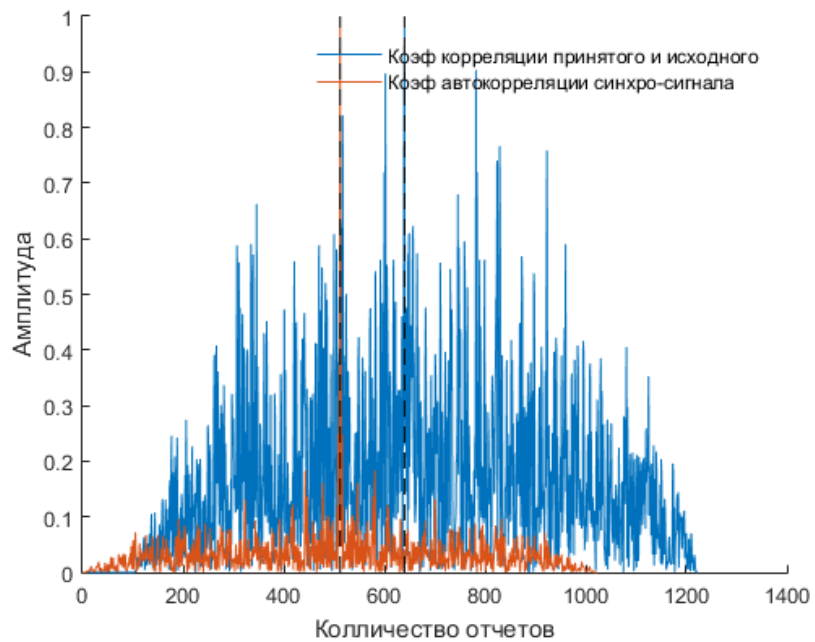


Рисунок 29 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ3, SNR = -10дБ).

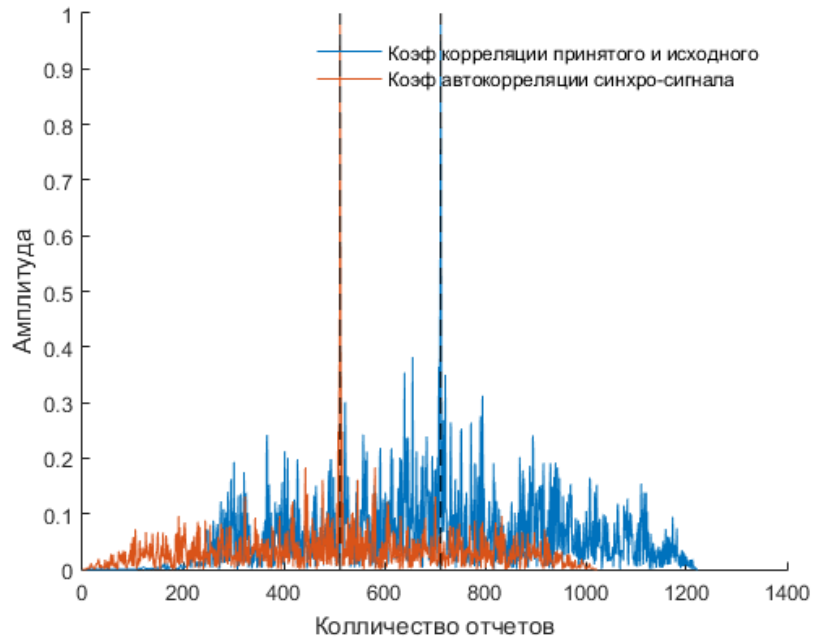


Рисунок 30 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ3, SNR = 20дБ).

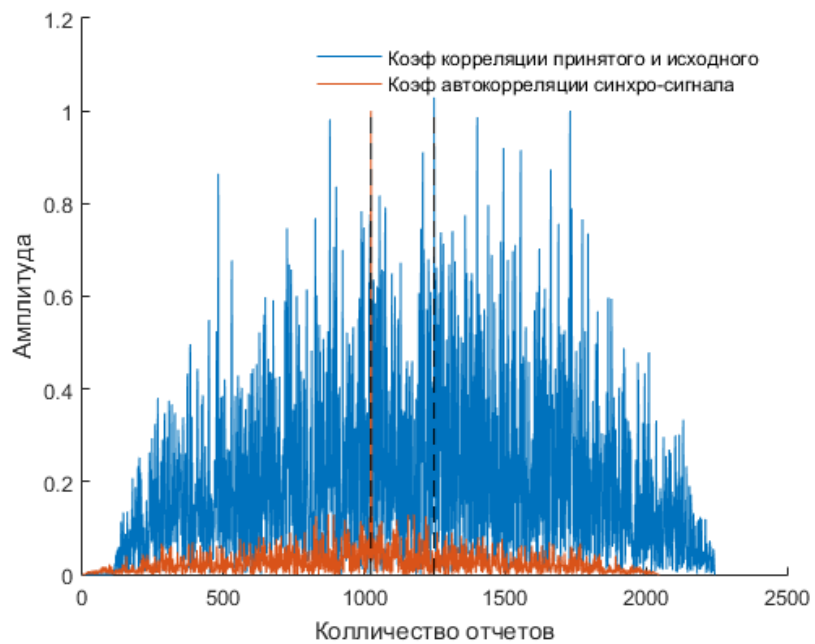


Рисунок 31 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ4, SNR = -20дБ).

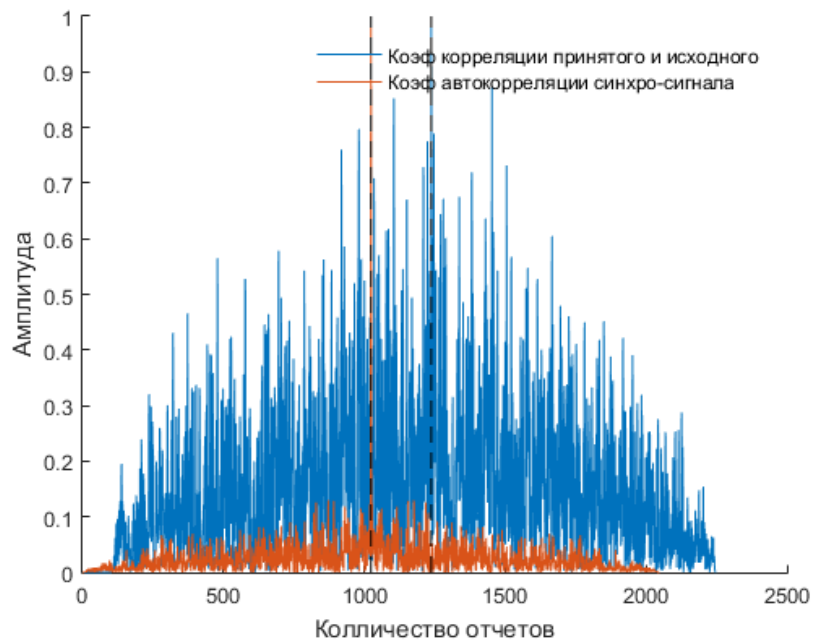


Рисунок 32 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ4, SNR = -10дБ).

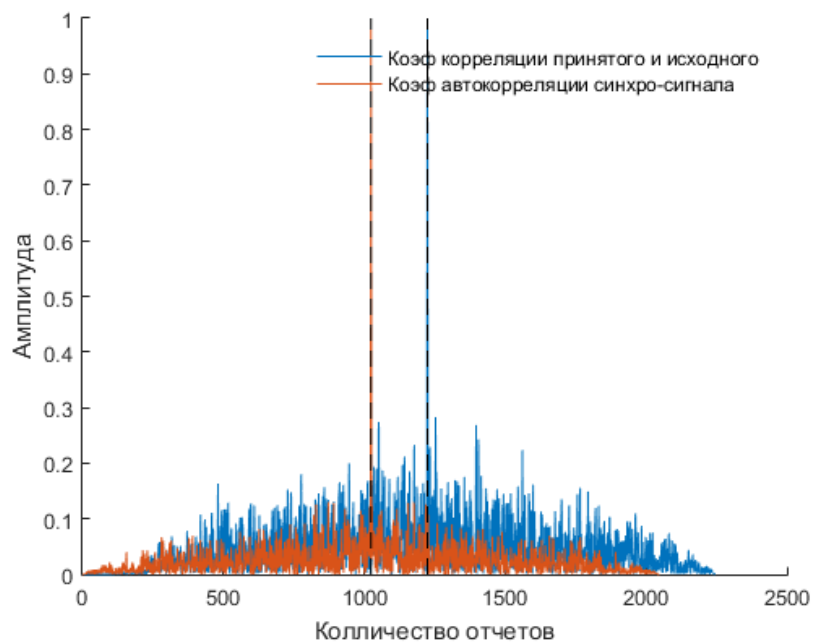


Рисунок 33 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ4, SNR = 20дБ).

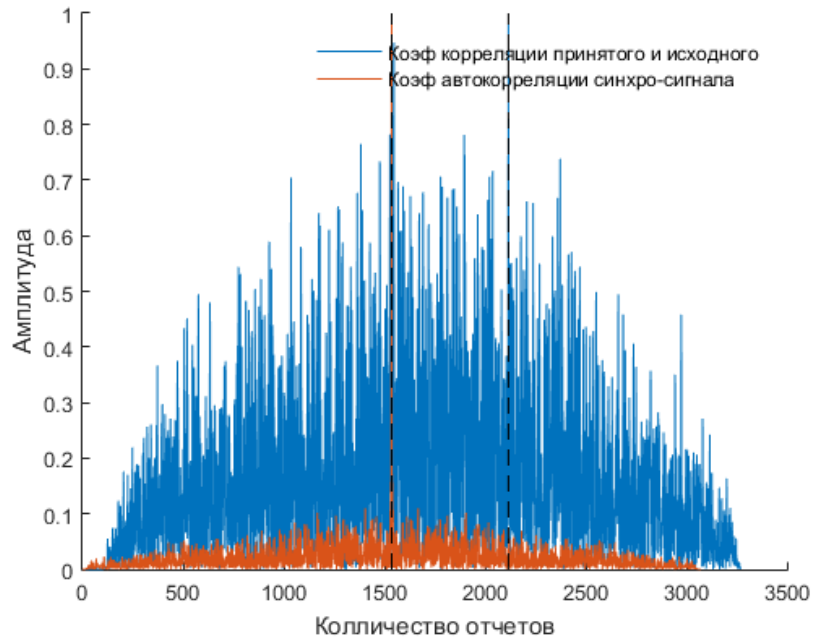


Рисунок 34 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ5, SNR = -20дБ).

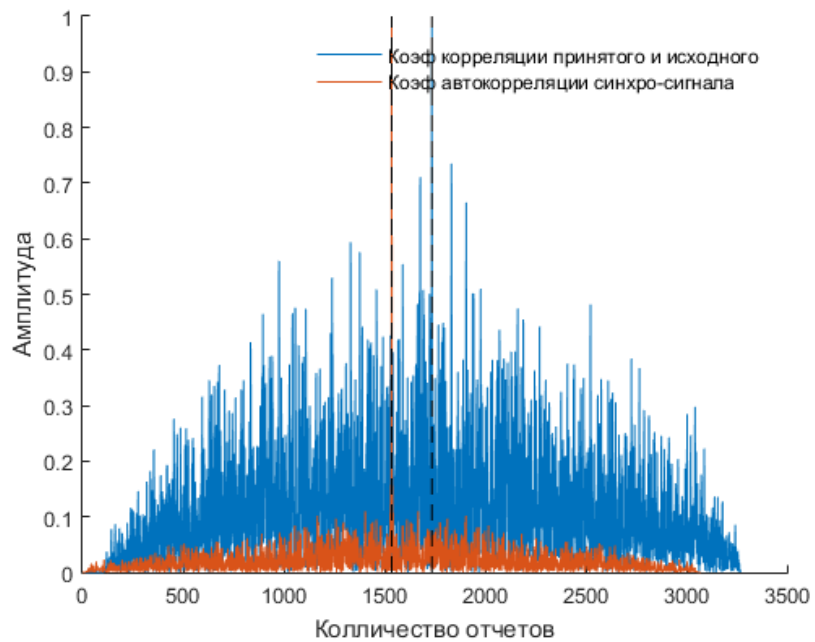


Рисунок 35 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ5, SNR = -10дБ).

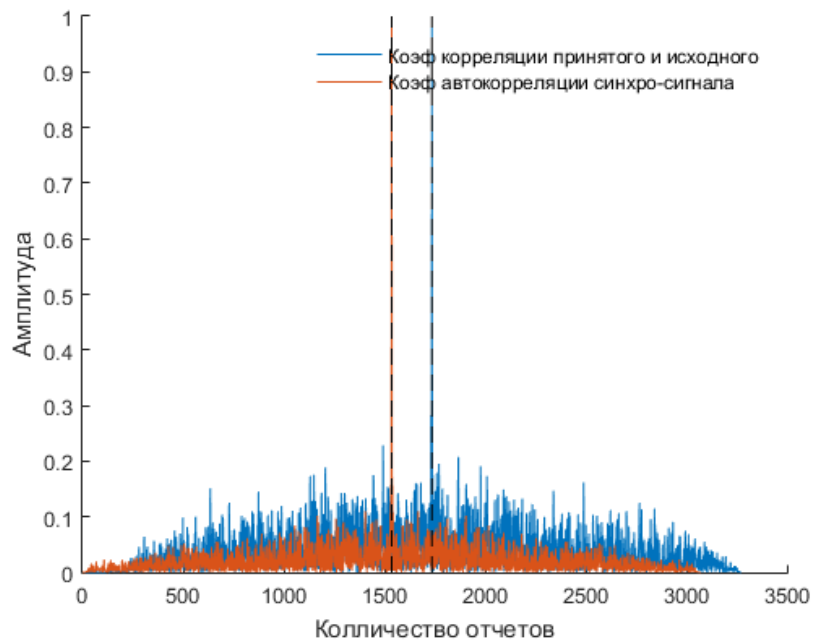


Рисунок 36 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ5, SNR = 20дБ).

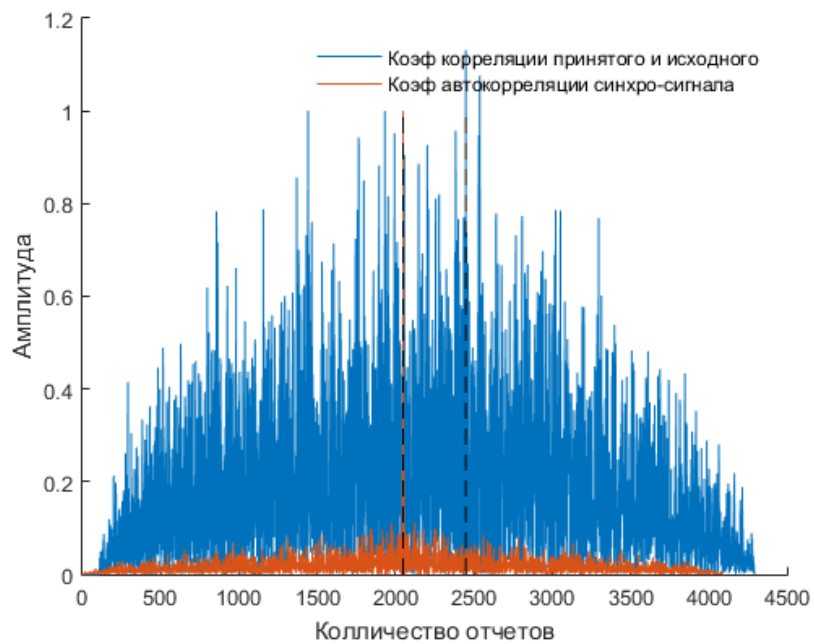


Рисунок 37 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ6, SNR = -20дБ).

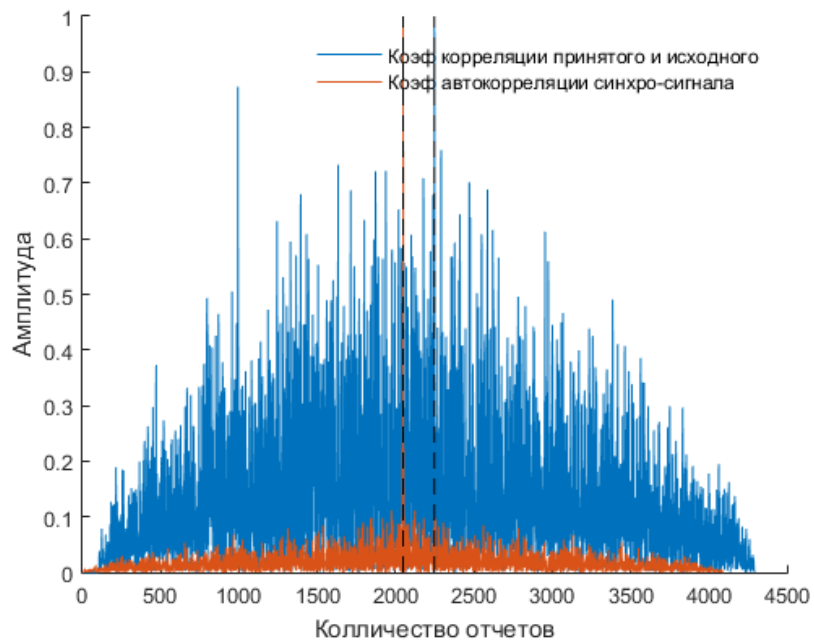


Рисунок 38 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ6, SNR = -10дБ).

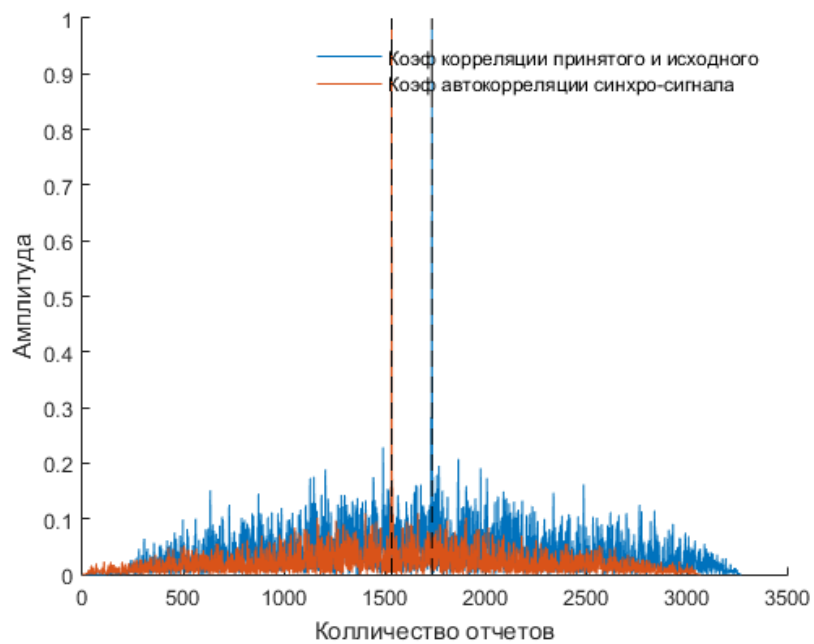


Рисунок 39 – Абсолютные значения коэффициентов автокорреляции синхро-сигнала и корреляции принятого и исходного синхро-сигнала (QQ6, SNR = 20дБ).

Далее была приведена оценка вероятности неверного обнаружения задержки при различном соотношении сигнал/шум для каждого базиса собственных векторов.

Таблица 24 - Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа для базиса QQ_1 (1.4 МГц).

| SNR(дБ) | QQ1(20%) | QQ1(40%) | QQ1(60%) | QQ1(80%) | QQ1(100%) |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| -20 | 0,994 | 0,990 | 0,975 | 0,976 | 0,972 |
| -15 | 0,984 | 0,959 | 0,945 | 0,938 | 0,916 |
| -10 | 0,967 | 0,896 | 0,816 | 0,690 | 0,587 |
| -5 | 0,859 | 0,582 | 0,312 | 0,139 | 0,054 |
| 0 | 0,521 | 0,084 | 0,019 | 0 | 0 |
| 5 | 0,156 | 0,001 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0,013 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 25 - Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа для базиса QQ_2 (3 МГц).

| SNR(дБ) | QQ2(20%) | QQ2(40%) | QQ2(60%) | QQ2(80%) | QQ2(100%) |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| -20 | 0,989 | 0,971 | 0,976 | 0,956 | 0,931 |
| -15 | 0,959 | 0,916 | 0,852 | 0,805 | 0,723 |
| -10 | 0,860 | 0,649 | 0,413 | 0,233 | 0,117 |
| -5 | 0,497 | 0,066 | 0,013 | 0,001 | 0,000 |
| 0 | 0,036 | 0,001 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 26 - Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа для базиса QQ_3 (5 МГц).

| SNR(дБ) | QQ3(20%) | QQ3(40%) | QQ3(60%) | QQ3(80%) | QQ3(100%) |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| -20 | 0,982 | 0,968 | 0,958 | 0,925 | 0,910 |
| -15 | 0,962 | 0,854 | 0,761 | 0,635 | 0,504 |
| -10 | 0,772 | 0,411 | 0,148 | 0,055 | 0,017 |
| -5 | 0,177 | 0,007 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0,156 | 0,001 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0,013 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 27 - Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа для базиса QQ_4 (10 МГц).

| SNR(дБ) | QQ4(20%) | QQ4(40%) | QQ4(60%) | QQ4(80%) | QQ4(100%) |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| -20 | 0,983 | 0,940 | 0,882 | 0,826 | 0,770 |
| -15 | 0,886 | 0,695 | 0,454 | 0,275 | 0,129 |
| -10 | 0,437 | 0,082 | 0,006 | 0,001 | 0,000 |
| -5 | 0,009 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 28 - Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа для базиса QQ_5 (15 МГц).

| SNR(дБ) | QQ5(20%) | QQ5(40%) | QQ5(60%) | QQ5(80%) | QQ5(100%) |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| -20 | 0,969 | 0,904 | 0,848 | 0,707 | 0,580 |
| -15 | 0,803 | 0,486 | 0,227 | 0,109 | 0,036 |
| -10 | 0,187 | 0,007 | 0 | 0 | 0 |
| -5 | 0,001 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 29 - Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа для базиса QQ_6 (20 МГц).

| SNR(дБ) | QQ6(20%) | QQ6(40%) | QQ6(60%) | QQ6(80%) | QQ6(100%) |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| -20 | 0,963 | 0,873 | 0,745 | 0,604 | 0,461 |
| -15 | 0,729 | 0,326 | 0,088 | 0,017 | 0,005 |
| -10 | 0,102 | 0,004 | 0 | 0 | 0 |
| -5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Оценка вероятности, приведенная таблице 30, позволяет пробонитировать работы различных базисов собственных векторов в качестве синхронизирующего сигнала, при их 100% содержании:

Таблица 30 - Оценка вероятности неверного обнаружения начала символа для различных базисов.

| SNR(дБ) | QQ1 | QQ2 | QQ3 | QQ4 | QQ5 | QQ6 |
|------------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| -20 | 0,972 | 0,931 | 0,910 | 0,770 | 0,580 | 0,461 |
| -15 | 0,916 | 0,723 | 0,504 | 0,129 | 0,036 | 0,005 |
| -10 | 0,587 | 0,117 | 0,017 | 0,0001 | 0 | 0 |
| -5 | 0,054 | 0,0001 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Окончание таблицы 30

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Результаты выше приведенных экспериментов показывают, что также как и с экспериментов в «пустом поле» вероятность неверного обнаружения начала символа уменьшается, при увеличении процентного содержания базиса собственных векторов в синхронизирующем сигнале.

Также при выборе базиса с большей пропускной способностью, вероятность неверного обнаружение уменьшается.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИМВОЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Для того, чтобы осуществлять передачу и прием данных мобильная станция (UE, User Equipment) должна быть синхронизирована с базовой станцией (eNodeB). Для этого базовая станция передает 2 специальных синхронизирующих сигнала: Primary Synchronization Signal (PSS) и Secondary Synchronization Signal (SSS).

PSS сигнал нужен для синхронизации по TTI, слотам и OFDM-символам, а также для вычисления физического идентификатора соты (Physical Layer Cell Identity, PCI). Передача PSS сигнала осуществляется в 0 и 10 слотах каждого кадра (нулевой и пятый TTI, таким образом PSS передается два раза за 10 мс) и для этой передачи используются 62-е центральные поднесущие в последнем OFDM-символе слота (7-ой символ от начала кадра, см. рисунок ниже). В качестве PSS используются три взаимно-ортогональные ZC-последовательности (Zadoff-Chu), каждой из которых соответствует идентификатор $N_{ID}^{(2)}$ от 0 до 2. При передаче PSS используется QPSK модуляция.

SSS сигнал передается в предпоследних OFDM-символах слотов 0 и 10 на центральных 62-х поднесущих. Принимая сигнал SSS, мобильная станция может определить группу идентификатора соты - $N_{ID}^{(1)}$, которая может принимать значения от 0 до 167.

После этого мобильная станция вычисляет идентификатор соты (который нужен для определения места пилотных сигналов) следующим образом:

$$N_{ID}^{(cell)} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (24)$$

Таким образом всего может быть 504 различных идентификатора соты.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 65 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

Прием SSS сигнала позволяет достичь синхронизации по кадрам между базовой станцией и мобильной. Такой тип синхронизации достигается за счет того, что в слотах 0 и 10 передаются различные последовательности SSS.

На рисунке 24 приведен пример расположения синхронизирующих последовательностей в кадре (PSS - зеленая, SSS - желтая):

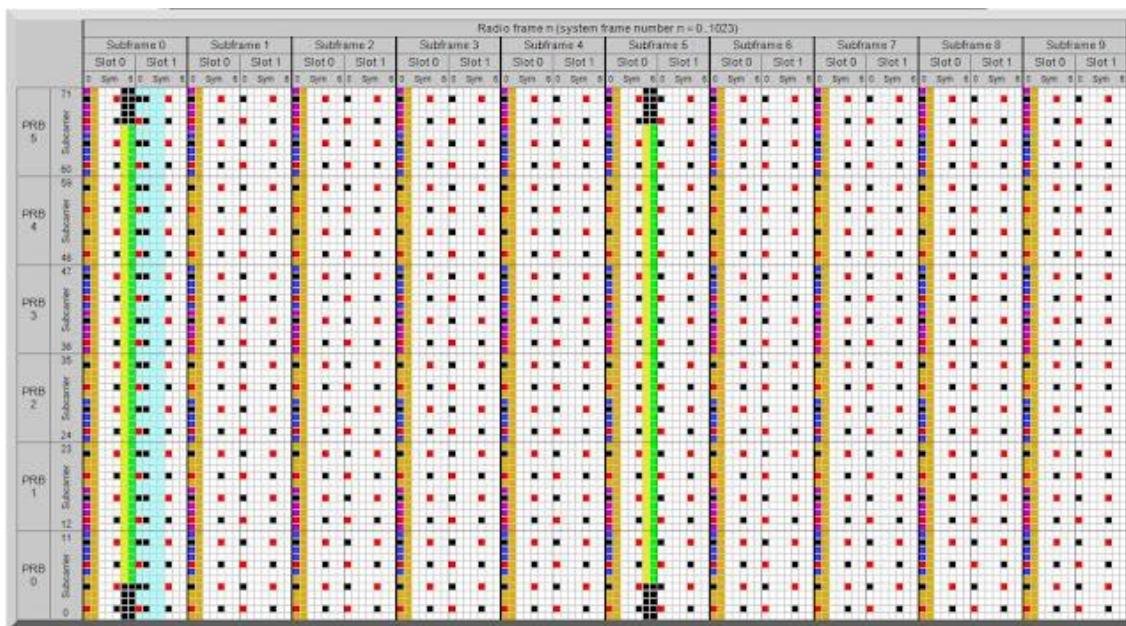


Рисунок 40 – Пример расположения PSSи SSSв сформированном кадре

Кроме 62-х поднесущих, на которых осуществляется передача синхронизирующих последовательностей, по 5-ть поднесущих "снизу" и "сверху" от них не используются для передачи. Таким образом можно сказать, что передача синхронизирующих последовательностей занимает 1.08 МГц (72 поднесущие умножить на 15 кГц). Количество ресурсов, которое отводится под передачу синхронизирующих последовательностей, не зависит от используемой полосы канала. Таким образом, накладные расходы (overhead) на передачу синхронизирующих сигналов могут составлять от 2.9% при полосе канала в 1.4 МГц, до 0.2% при 20 МГц (при 7-ми OFDM-символах в слоте).

В дальнейшем при проведении экспериментов в качестве PSSиSSSсигналов выступали базисы собственных векторов с различной полосой пропускания.

Формирование LTE-сетки и все дальнейшие эксперименты были произведены в программной среде MatLab.

3.1 Реализация метода на языке MatLab

Все эксперименты были проведены на языке Matlab. Одним из главных компонентов является «LTESystemToolBox».

LTE System Toolbox предоставляет соответствующие стандарту функции и приложения для проектирования, моделирования и проверки коммуникационных систем стандартов LTE и LTE-Advanced. Данный инструмент ускоряет разработку LTE-алгоритмов и физического уровня (PHY), предоставляет эталонный образец для проверки и тестирования на соответствие стандарту, а также позволяет генерировать тестовые сигналы.

С помощью LTE System Toolbox предоставляется возможным производить настройку, моделирование, измерения и анализ канала связи. Также можно создавать и повторно использовать сценарии тестов для подтверждения того, что проекты, прототипы и разработки соответствуют стандарту LTE.

К основным особенностям данного компонента можно отнести:

1. Модели, соответствующие стандартам LTE и LTE-Advanced (Release 8, 9, 10 и 11).
2. Функции обработки на канальном уровне, поддержка от 1 до 10 режимов передачи по нисходящему каналу, образцы проектов, в том числе CoMP.
3. Тестовые модели (E-TM), эталонный измерительный канал (RMC) для LTE, LTE-A, а также генератор UMTS-сигналов.
4. Интерактивные инструменты для проверки на соответствие стандарту и BER тестов.
5. Передача и приём сигналов при помощи радиоустройств для тестирования систем в реальном эфире.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 67 |

6. Выделение системных и контрольных параметров из принятого сигнала, в том числе cell ID, MIB и SIB1.

7. Оценка канала связи, синхронизация, функции приёма в режиме MIMO и модели каналов распространения.

LTE System Toolbox облегчает процесс тестирования LTE-проектов, предоставляя эталонный образец.

Вместе с комплексным набором компонентов, таких, как модели формирования и приёма сигналов, а также модели каналов распространения, данный инструмент предоставляет тестовые вектора и матрицы, необходимые для проверки каждого отдельного компонента в модели передатчика или приемника.

Набор компонентов включает в себя:

1. канальное кодирование с согласованием по скорости, скремблирование и модуляцию;
2. режим MIMO, включая распределение по уровням и по антенным портам; • распределение по ресурсной сетке, генерация сигналов OFDM и SC-FDMA;
3. синхронизацию кадров, частотные сдвиги и частотная подстройка;
4. оценку нисходящего и восходящего каналов, а также тестирование на идеальном канале связи; • различные виды эквалайзеров, включая ZF и MMSE;
5. демодуляцию, дескремблирование и декодирование;
6. гибридную систему автоматического запроса повторной передачи (HARQ)

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 68 |

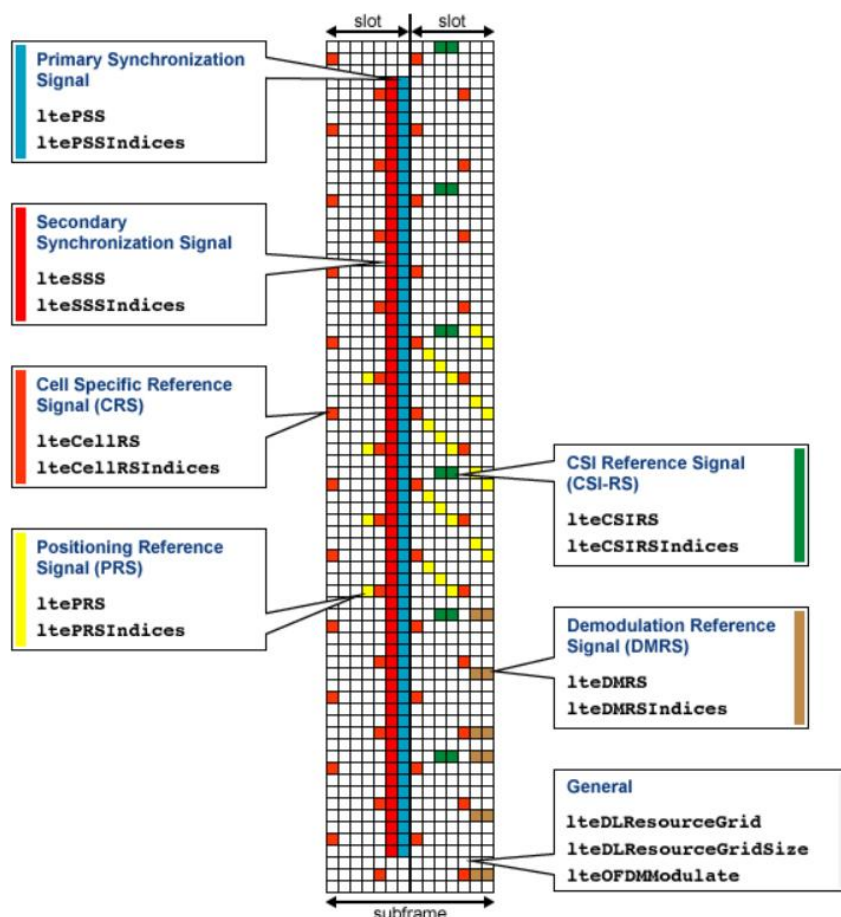


Рисунок 41 – Ресурсная сетка LTE, с указанными физическими сигналами.

LTE System Toolbox предоставляет полное описание частотно-временной ресурсной сетки. Ресурсная сетка представляет собой структуру, которая используется в стандарте LTE для распределения данных и мультиплексирования сигналов с каналами перед передачей сигнала OFDM через каждую из антенн.

Используя функции, которые создают и распределяют элементы внутри сетки, можно убедиться в правильной работе проекта или быстро обнаружить ошибки при распределении элементов по ресурсной сетке.

В ходе реализации метода символьной синхронизации были использованы следующие функции:

lteDLResourceGrid(enb) – возвращает пустой ресурсный массив, сгенерированный на основании глобальной сотовой настройки структуры enb.

IteDLResourceGridSize(enb) – возвращает 3-х элементный вектор длин измерений ресурсного вектора, генерируемого из глобальной сотовой настройки структуры enb.

IteSymbolModulate(in,mod) – преобразовывает битовое значение in, в комплексные символы модуляции, метод модуляции представлен в переменной mod. Возможно выбрать следующие методы ; BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM.

sym = IteCellIRS(enb) – возвращает специфически-сетевые символы опорного сигнала для глобальной сотовой настройки enb.

сумявляется вектором-столбцом, состоящий из комплексных значений, содержащий специфически-сетевые символы опорного сигнала.

В отличие от других физических каналов и сигналов, символы для множественной антенны объединяются в одну колонку, а не записываются в матрицу с колонкой для каждой антенны.

ind = IteCellRSIndices(enb) - возвращает вектор-столбец ресурсных элементов (RE), для специфически-сетевых символов опорного сигнала (RS), учитывая данные настройки в структуре enb.

ind = ItePSSIndices(enb) - возвращает вектор –столбец «ind» ресурсных элементов (RE), ориентированных на порт 0, первичного сигнала синхронизации «PSS», использующего глобальные настройки структуры enb.

ind = IteSSSIndices(enb)- возвращает вектор –столбец «ind» ресурсных элементов (RE), ориентированных на порт 0, вторичного сигнала синхронизации «SSS», использующего глобальные настройки структуры enb.

[waveform,info] = IteOFDMModulate(enb,grid) – выполняет вставку DCподнесущих, вычисление обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT), вставку циклического префикса, и дополнительное косинусоидальное сглаживание и перекрытием методом окон смежных OFDM-символов, массива ресурсов «grid».

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 70 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

[offset, corr] = lteDLFrameOffset(enb,waveform,corrcfg)– возвращает значение смещения синхронизации, между началом входного сигнала и началом первого кадра.

«**offset**» измеряется с помощью опорных синхронизирующих сигналов, определенных в стандарте LTE.

«**corr**» возвращает массив значений коэффициентов корреляции исходного сигнала и сигнала, после расчета в нем задержки.

3.2 Сравнение разработанного метода со стандартным

Важным критерием разработанного метода символьной синхронизации является его способность определять задержку между входным сигналом и началом первого кадра.

Поэтому необходимо определить насколько точно разработанный метод справляется с данной задачей, а также сравнить его с исходным, эталонным методом. Для данного сравнения были получены, изначально введенные в сигнал, значения задержки, рассчитанные с помощью эталонных синхронизирующих сигналов PSSи SSS, определенных в стандарте LTE, и значения задержки, рассчитанные с помощью синхронизирующих сигналов разработанного метода.

Изменяя такие исходные параметры как введенное значение задержки, полосу пропускания базиса собственных векторов были получены следующие результаты:

Таблица 31 – Значение вычисленной задержки сигнала

| | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Исходные значения задержки | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Рассчитанные значения задержки | | | | | |
| Эталонный метод | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| QQ_1(1.4 МГц) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |

Окончание таблицы 31

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| QQ_2(3 МГц) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| QQ_3(5 МГц) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| QQ_4(10 МГц) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| QQ_5(15 МГц) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| QQ_6(20 МГц) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |

Установив задержку начального символа в 1000 отчетов, были построены графики коэффициентов корреляции для различных базисов собственных векторов. Для наглядности результата, были выбраны первые 1500 отчетов

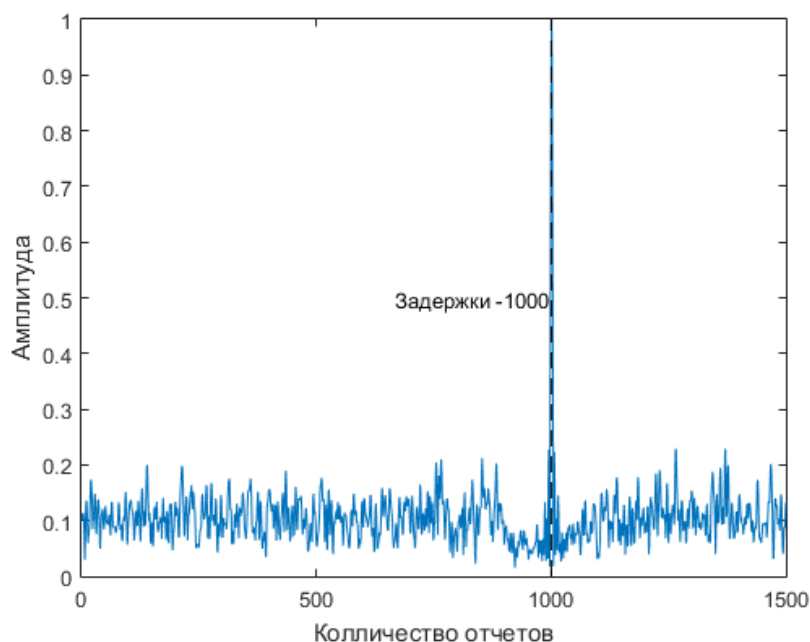


Рисунок 42 – Коэффициент корреляции стандартного метода синхронизации

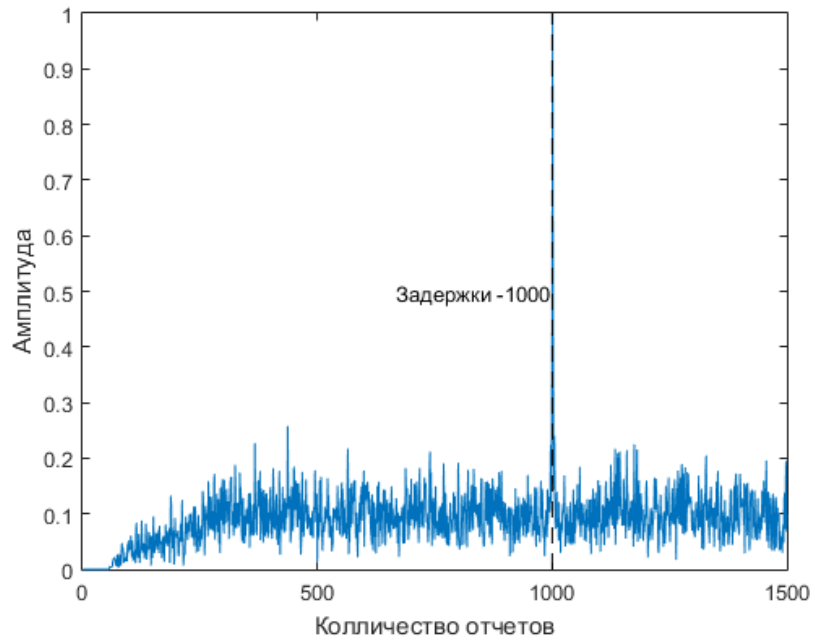


Рисунок 43 – Коэффициент корреляции при использовании QQ1(1.4МГц)

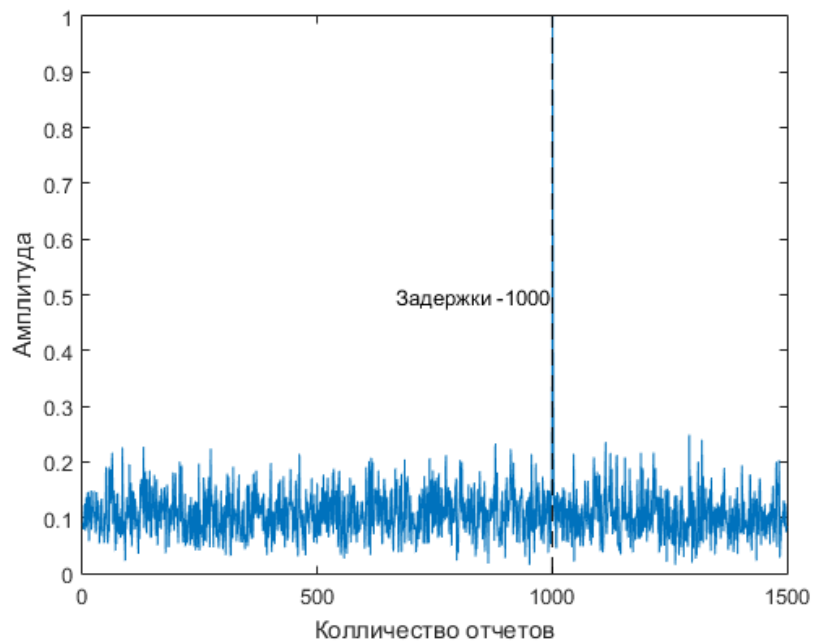


Рисунок 44 – Коэффициент корреляции при использовании QQ2(3МГц)

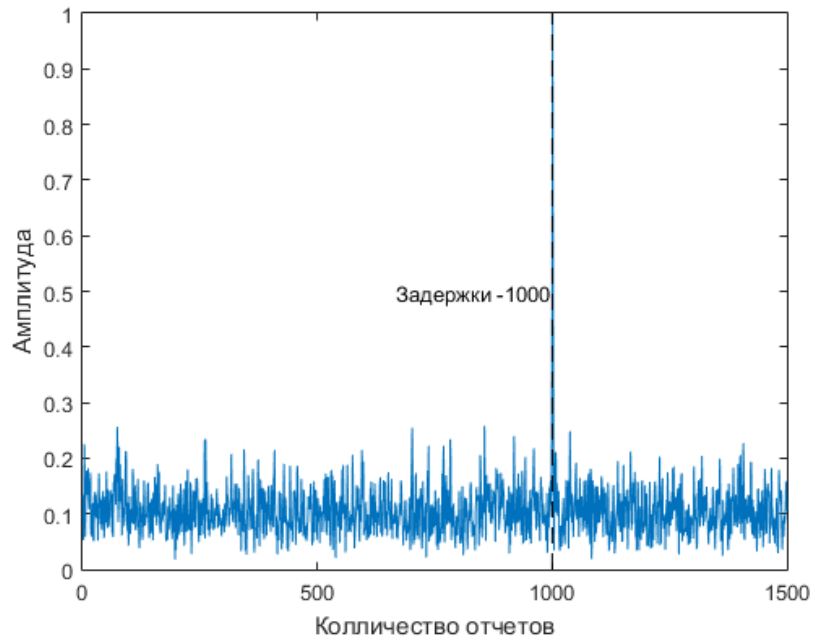


Рисунок 45 – Коэффициент корреляции при использовании QQ3(5МГц)

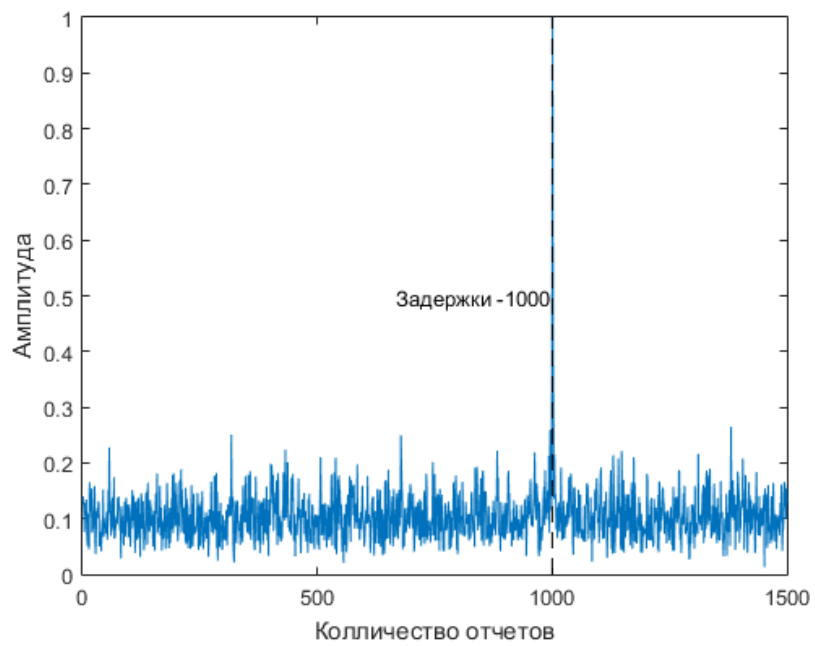


Рисунок 46 – Коэффициент корреляции при использовании QQ4(10МГц)

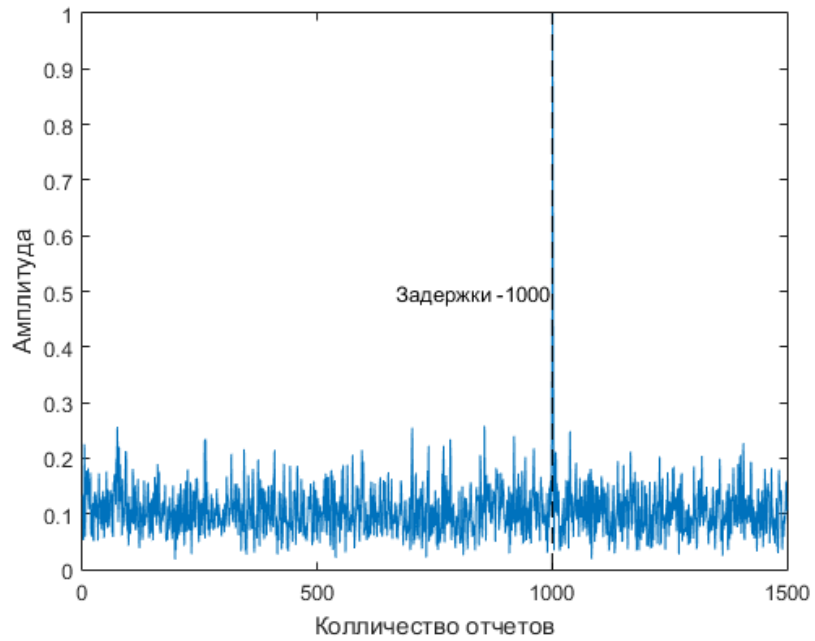


Рисунок 47 – Коэффициент корреляции при использовании QQ5(15МГц)

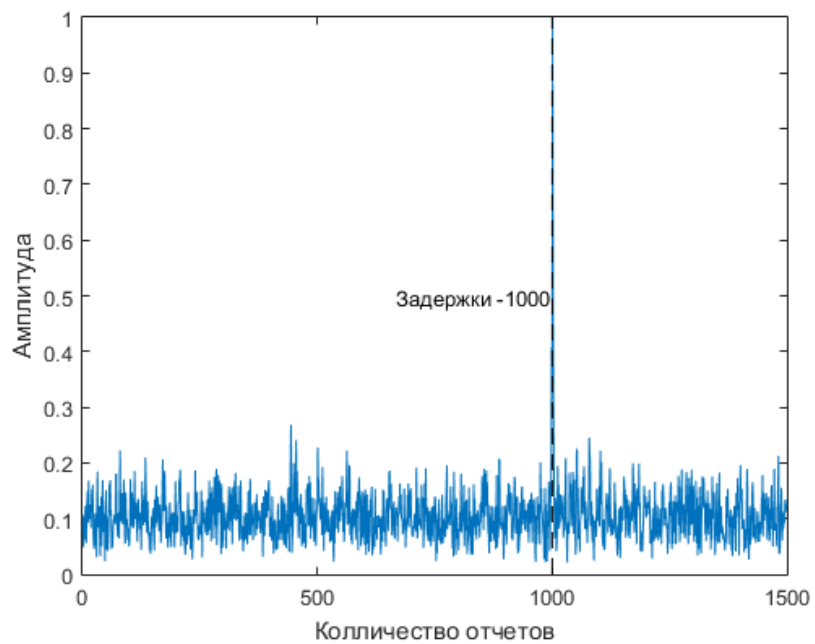


Рисунок 48 – Коэффициент корреляции при использовании QQ6(20МГц)

Можно сделать выводы, что разработанный метод, ничем не уступает стандартному(эталонному) методу синхронизации.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 75 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной целью данной научно-исследовательской работы является проведение работ, направленных на анализ разработанной технологии символьной синхронизации.

4.1 Планирование работ по исследованию

В реализации исследования заняты следующие специалисты:

1. главный инженер или старший научный сотрудник (заведующий лабораторией), осуществляющий общее руководство исследованием;
2. инженер I категории или младший научный сотрудник, проводящий разработку, исследование, необходимые расчеты, составляющий техническую документацию на исследование;
3. экономист, дающий экономическую оценку исследования.

Расчет сроков проведения выпускной квалификационной работы и трудоемкости представлен в таблице 32:

Таблица 32 - Планирование работ по исследованию

| Наименование этапов работ | Исполнитель | Трудоемкость, час | Продолжительность, дней |
|--|---------------------------|-------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.Подготовительный | | | |
| 1.1.Сбор информации | Младший научный сотрудник | 32 | 4 |
| 1.2.Выработка идеи | Старший научный сотрудник | 56 | 7 |
| 1.3.Определение объема исследовательских работ | Младший научный сотрудник | 24 | 3 |
| 1.4.Формирование исслед. работы | Младший научный сотрудник | 8 | 1 |

Окончание таблицы 32

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---------------------------|-----|----|
| 1.5.Обработка и анализ информации | Младший научный сотрудник | 80 | 10 |
| Итого: | | 200 | 25 |
| 2.Основной (экономический анализ) | | | |
| 2.1.Обоснование целесообразности работы | Старший научный сотрудник | 40 | 5 |
| 2.2.Выполнение работы | Младший научный сотрудник | 168 | 21 |
| Итого: | | 208 | 26 |
| 3.Заключительный | | | |
| 3.1.Технико-экономическое обоснование | Экономист | 40 | 5 |
| 3.2.Оформление и утверждение документации | Младший научный сотрудник | 40 | 5 |
| Итого: | | 80 | 10 |

Результатом работы планирования является расчет трудоемкости исследования по часам и количеству дней.

4.2 Расчет расходов на оплату труда на исследование

Расчет расходов по оплате труда разработки исследования представлен в таблице 33:

Таблица 33 - Расчет расходов на оплату труда

| Должность Исполнителей | Трудоемкость, час | Оклад, руб |
|---------------------------|----------------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Младший научный сотрудник | 352 | 14080 |
| Старший научный сотрудник | 96 | 19200 |
| Экономист | 40 | 12000 |
| Итого: | 488 | 45280 |

Часовая тарифная ставка ($Ч_{ТС}$) рассчитывается по формуле:

$$Ч_{ТС} = \frac{P}{F_{мес}} \quad (10)$$

где $F_{мес}$ – фонд рабочего времени месяца, составляет 176 часов (22 рабочих дня по 8 часов в день); P – оклад сотрудника;

Расход на оплату труда ($P_{ОТ}$) находится следующим образом:

$$P_{ОТ} = Ч_{ТС} * T_{сум} \quad (11)$$

где $T_{сум}$ – суммарная трудоемкость каждого из исполнителей;

Результаты данных расчетов представлены в таблице 34:

Таблица 34 - Расчет расходов на оплату труда

| Должность Исполнителей | Трудоемкость, час | Оклад, руб | Ч _{ТС} , руб/час | Р _{ОТ} , руб |
|------------------------------|----------------------|---------------|------------------------------|--------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Младший научный сотрудник | 352 | 14080 | 80 | 28160 |
| Старший научный сотрудник | 96 | 19200 | 109.1 | 10473.6 |
| Экономист | 40 | 12000 | 68,19 | 2727,28 |
| Итого: | 488 | | | 38910,88 |

4.3 Расчет продолжительности исследования

Согласно расчетам трудоемкость исследования составила 488 часов.

Продолжительность исследования составит:

$$T_{иссл} = T_{сум} / T_{РД} \quad (12)$$

где $T_{сум} = 488$ часа суммарная трудоемкость исследования, $T_{РД} = 8$ часов – продолжительность рабочего дня;

$$T_{иссл} = 488/8 = 61 \text{ дней.}$$

Продолжительность исследования составляет 61 дней, расчет производится без учета выходных и праздничных дне.

4.4 Расчет стоимости расходных материалов

В разделе стоимости расходных материалов учитываются расходы на приобретение основных материалов необходимых для проведения исследования, оформления соответствующей документации, а также учитывается стоимость картриджа.

Расчет стоимости расходных материалов приведен в таблице 35

Таблица 35 - Стоимость расходных материалов

| Наименование расходных материалов | Цена за единицу, руб. | Количество, шт. | Сумма, руб. |
|---|-----------------------|-----------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Бумага | 200 | 3 | 600 |
| Канцтовары | 300 | - | 300 |
| Расходные материалы для принтера (картридж) | 3000 | - | 3000 |
| Ватман | 12 | 5 | 60 |
| Итого: | | | 3960 |

Определили, что для проведения исследования затраты на приобретение расходных материалов потребуется 3960 рублей.

4.5 Расчет сметы расходов на исследование

С учетом часового тарифной ставки рассчитываются общие расходы на разработку и проведение исследования.

В данную статью расходов включаются премиальные выплаты, районный коэффициент и страховые взносы.

Для оценки затрат на исследование была составлена смета на разработку и проведение исследования.

Произведен расчет расходов:

Премиальные выплаты рассчитываются по формуле:

$$ПВ = P_{OT} K_{ПВ} \quad (13)$$

где $K_{ПВ}$ -коэффициент премиальных выплат, составляет 20 %, в случае если премии не предусмотрены $K_{ПВ}=1$;

$$ПВ = 38910,88 \cdot 0,2 = 7782,176 \text{ руб.}$$

Дополнительные затраты на проведение исследования можно определить как:

$$З_{ДОП} = P_{OT} K \quad (14)$$

где K -коэффициент дополнительных затрат ($K=14\%$);

$$З_{ДОП} = P_{OT} \cdot 14 \%$$

$$З_{ДОП} = 38910,88 \cdot 0,14 = 5447,5232$$

В заработной плате может быть предусмотрен районный коэффициент, которых характеризует доплату при работе в трудных условиях.

Величина коэффициента определяется в зависимости от характера производства

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 80 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

$$PK = P_{OT} K_{PB} \quad (15)$$

где K_{PB} – коэффициент районных выплат, составляет 15 % от суммы;

$$PK = 38910,88 \cdot 0,15 = 5836,632 \text{руб.}$$

Общие расходы на оплату труда вычисляются по формуле:

$$P_{общ} = P_{OT} + ПВ + PK + З_{ДОП} \quad (16)$$

где P_{OT} - основная заработная плата; ПВ - премиальные выплаты; $З_{ДОП}$ - дополнительные затраты; PK - районный коэффициент;

$$\Sigma P_{OT} = 38910,88 + 7782,176 + 5836,632 + 5447,5232$$

$$\Sigma P_{OT} = 57977,2112 \text{руб.}$$

Из таблицы 35 берется итоговая сумма стоимости расходных материалов по статье расходных материалов.

$$\Sigma P_{PM} = 3960 \text{руб.}$$

Страховые взносы рассчитываются по формуле:

$$CB = P_{OT} 0,3 \quad (17)$$

$$CB = 38910,88 \cdot 0,3 = 11673,264$$

Амортизационные исчисления на использование компьютера вычисляются по формуле:

$$AO = C_{ПК} 0,25 \quad (18)$$

где $C_{ПК}$ - стоимость персонального компьютера, в среднем составляет 40000 руб;

$$AO = 40000 \cdot 0,25 = 10000 \text{руб.}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | 81 |

Расходы на использование Интернета берутся из расчета месячной абонентской платы для предприятия:

$$P_{\text{ИНТ}}=1200 \text{ руб.}$$

Административно-хозяйственные расходы составляют 50% от основной заработной платы ($P_{\text{ОТ}}$).

$$P_{\text{АХ}} = P_{\text{ОТ}} \cdot 0,5 \quad (19)$$

$$P_{\text{АХ}}=38910,88 \cdot 0,5=19455,44 \text{ руб.}$$

Результаты расчета расходов сведем в таблицу. Смета расходов на разработку и проведение исследования представлена в таблице 36:

Таблица 36 - Смета расходов на разработку и проведение исследования

| Наименование статей расходов 1 | Сумма, руб. 2 | Удельный вес статей, % 3 |
|---|----------------------------|---------------------------------------|
| 1. Стоимость расходных материалов | 3960 | 3,80 |
| 2. Расходы на оплату труда | 57977,2138910,88 | |
| 2.1. Основная заработная плата | | 37,32 |
| 2.2. Дополнительные затраты | 5447,53 | 5,22 |
| 2.3. Премияльные выплаты | 7782,18 | 7,46 |
| 2.4. Районный коэффициент | 5836,64 | 5,60 |
| 3. Единый социальный налог | 11673,27 | 11,20 |
| 4. Амортизационные исчисления на использование компьютера | 10000 | 9,59 |
| 5. Расходы на использование Интернет | 1200 | 1,15 |
| 6. Административно-хозяйственные расходы | 19455,44 | 18,66 |
| Итого: | 104265,94 | 100 |

Результатом экономической оценки исследования является определение затрат на разработку и реализацию исследования:

1. продолжительность исследовательских работ составила 61 дней;
сметы расходов на исследование – 104265,94рубля.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 82 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной работы была достигнута установленная цель, а именно: была разработана технология символьной синхронизации, с использованием базиса собственных векторов субполосной матрицы.

Были проведены исследования по использованию базисов собственных векторов, с различной шириной пропускания, в качестве синхро-сигналов, при отсутствии в канале связи шумов различного происхождения. Процентное содержание собственных векторов в синхро-сигнале также варьировалось. Результаты показали, что использование в качестве синхронизирующего сигнала базиса собственных векторов, с процентным содержанием более 20% дает верный расчет начального символа сигнала. Однако значение максимума коэффициента корреляции, по которому и рассчитывается значение задержки, имеет невысокий пик, что может отрицательно сказаться на вычислении в случае наличия шумов. Поэтому оптимальным вариантом выбора процентного содержания базиса собственных векторов в качестве синхро-сигнала является 70%.

Были проведены повторные исследования, однако в данном случае к передаваемому сигналу добавлялся белый шум, с различным соотношением SNR(сигнал/шум). Результаты данного эксперимента показали, что использование большего процентного содержания базиса собственных векторов в синхро-сигнале дает лучший результат. Также как и использование базиса собственных векторов с большой полосой пропускания, гарантирует меньшую вероятность неверного обнаружения начала символа сигнала. Данные результаты эксперимента полностью совпадают с данным, когда шум в сигнале отсутствовал. В связи с этим можно сделать выводы, что использование базиса с большей полосой пропускания и большим процентным содержанием в синхро-сигнале даст верный расчет.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 83 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

Также были проведены сравнения разработанной технологии символьной синхронизации со стандартной технологией LTE. Выводы по результатам эксперимента, показывают, что разработанная технология также хорошо справляется со своей задачей.

Экономические расчеты по оценке исследования, показали что общие расходы составляют 104265,94 рублей, при продолжительность исследовательский работ в 61 день.

Подводя итоги исследования разработанной технологии, можно сделать вывод, что данная технология показала хорошие результаты по вычислению начала символа сигнала при наличии задержки и шума. Дальнейшие исследования позволят более подробно раскрыть потенциал разработанной технологии.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 84 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жилияков Е.Г.Оптимальные канальные сигналы при цифровой передаче с частотным уплотнением/ Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Д.В. Урсол. Научные ведомости БелГУ Серия: Информатика – 2009 - № 7(62). С. 166-172.
2. Жилияков Е.Г.Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным/ Е.Г. Жилияков. Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.
3. Эммануил С.А. Цифровая обработка сигналов: Практический подход/ С. А.Эммануил, У. Барри. Москва: Вильямс, 2008. – 282 с.
4. Тихвинский В.В. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура/ В.В. Тихвинский, С.А. Терентьев, А.А. Юрчук. Москва: Эко-Трендз, 2013 - 200 с.
5. Гмурман В.Е.Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов/ В.Е.Гмурман. Москва: Высшая школа, 2004. — 479 с.
6. Берлин А.В. Цифровые сотовые системы связи/ А.В. Берлин. Москва: Эко-Трендз, 2012 - 133 с.
7. Гордиенко В. Н. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов / В.Н. Гордиенко М.С Тверецкий. Москва : Горячая линия-Телеком, 2007. – 88с.
8. Слепов Н.Н Синхронные цифровые сети SDH/ Н.Н Слепов. Москва: Эко-трендз, 2012 – 122 с.
9. Соболев Ю.В. Системы синхронизации в цифровых системах связи/ Ю.В. Соболев. Москва: Эко-трендз, 2002 – 101 с.
10. Курицын С.А. Телекоммуникационные технологии и системы/ С.А. Курицын. Москва: Academia, 2008 – 155 с.
11. Берлин А.В. Сотовые системы связи/ А.В. Берлин. Москва: Эко-Трендз, 2011 - 121 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 85 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

12. Синхронизация по уровню сигнала в триггерах [Электронный ресурс]/ habrahabr.ru - Хабрахабр/ URL: <https://habrahabr.ru/post/115690/html> (дата обращения 25.05.2016)

13. Синхронизация в LTE [Электронный ресурс]/ anisimoff.org/LTE, WiMax, WiFi/ URL: http://anisimoff.org/lte/lte_synch.html (дата обращения 25.05.2016)

14. Синхронизация цифровых систем связи по сигналам спутниковых радионавигационных систем [Электронный ресурс]/ radio-systems.org/- Радиотехнические системы/ URL: http://radio-systems.org/synchronization_of_communication_systems(дата обращения 25.05.2016)

15. LTE[Электронный ресурс]/ ru.wikipedia.org - Википедия – свободная энциклопедия/ URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/LTE> (дата обращения 25.05.2016)

16. LTEAdvanced[Электронный ресурс]/ ru.wikipedia.org/- Википедия – свободная энциклопедия/ URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/LTE> (дата обращения 25.05.2016)

17. Корреляция [Электронный ресурс]/ ru.wikipedia.org/- Википедия – свободная энциклопедия/ URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Корреляция>(дата обращения 25.05.2016)

18. QPSK and OFDM with MATLAB System Objects [Электронныйресурс]/ mathworks.com /- MathWork – Makers of Matlab and Simulink/ URL: <http://www.mathworks.com/examples/matlab-communications/mw/comm-ex74651154-qpsk-and-ofdm-with-matlab-system-objects> (датаобращения 25.05.2016)

19. LTE System Toolbox [Электронныйресурс]/ mathworks.com /- MathWork – Makers of Matlab and Simulink/ URL: <http://www.mathworks.com/products/lte-system/> (датаобращения 25.05.2016)

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 86 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

20. Downlink frame timing estimate [Электронныйресурс]/
mathworks.com /- MathWork – Makers of Matlab and Simulink/ URL:
<http://www.mathworks.com/help/lte/ref/lteDLFrameOffset.html> (датаобращения
25.05.2016)

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------------|------|
| | | | | | 11070006.11.03.02.181.ПЗВКР | Лист |
| | | | | | | 87 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |