

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «РГРТУ»

Факультет радиотехники и телекоммуникаций
Кафедра «Телекоммуникаций и основ радиотехники»

КУРСОВАЯ РАБОТА

часть 3

по теме «Радиосистема управления беспилотными объектами»
по дисциплине «Системы и сети связи с подвижными объектами»

Выполнил:
ст. гр. 719
Дудин П.А.

Проверил:
доц. каф. ТОР
Бакке А.В.

Рязань 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

3. Разработка канала передачи данных (L2)	3
3.1. Пояснение идеи одиночных и множественных логических соединений L2 уровня: назначение, основание для установления, контроль функционирования, завершения соединения. Обоснованный анализ необходимых для функционирования радиосети ключевых видов канальных ресурсов.	3
3.2. Обоснованный анализ видов логических каналов (ЛКС), оценка производительности сигнальных и информационных ЛКС в обоих направлениях.....	3
3.3. Задачи службы передачи данных канального уровня в виде пояснения обработки информационных и служебных сообщений на L2 уровне: характеристика информационного трафика, поступающего на L2 уровень, оценка необходимости его фрагментации и последующей нумерации, пояснение способов разделения сообщений.....	4
3.4. Пояснение структуры L2 сообщений ЛКС, анализ их атрибутов, назначение и размерности полей, оценка скорости передачи битов сообщений ЛКС. Обоснование гарантированной/негарантированной доставки указанных видов сообщений..	5
3.5. Проработка сценария (протокола) гарантированной доставки сообщений одного из ключевых ЛКС в виде повторной передачи неверно принятого сообщения (ARQ).....	7
3.6. Обоснованный выбор алгоритма доступа к канальным (физическим) ресурсам, пояснение структуры физических ресурсов. Описание стратегии планирования распределения канальных ресурсов..	8
3.7. Проработка основных информационных объектов L2 уровня (управление оперативными сведениями).....	9
4. Разработка физического уровня (L1). Реализация необходимых уровню L2 физических ресурсов.....	10
4.1. Обоснование характеристик требуемых физических ресурсов (пропускная способность, направление и качество доставки, разделяемость ресурса).	10
4.2. Обоснованный выбор частотного диапазона (на основании документов ГКРЧ); аргументированный выбор модели оценки потерь распространения радиоволн, расчет уровня потерь.	10
4.3. Обоснование выбора мер по обеспечению синхронизации и по защите приема от многолучевости и помех в канале связи. При необходимости, проработка профилей физического уровня и сценария их выбора.....	11
4.4. Оценка пропускной способности физического канала с учетом избыточности, вносимой на L1 уровне.....	12
4.5. Расчет отношения сигнал/шум, требуемого для обеспечения необходимого качества приема без помехоустойчивого кодирования. Обоснованный выбор метода и скорости помехоустойчивого кодирования, расчет эффективности кодирования, пояснение влияния выбора на структуру пакета L1 уровня.	13
4.6. Определение структуры и расчет размерности полей пакетов L1 уровня.....	15
4.7. Оценка уровня мощности передачи с учетом необходимого запаса мощности сигнала для его уверенного приема с вероятностью PR% на границе радиопокрытия, оценка размера зоны радиопокрытия.	15
4.8. Разработка и описание функциональной схемы L1 уровня.	18
Список литературы и используемых источников.....	19

3. Разработка канала передачи данных (L2)

3.1. Пояснение идеи одиночных и множественных логических соединений L2 уровня: назначение, основание для установления, контроль функционирования, завершения соединения. Обоснованный анализ необходимых для функционирования радиосети ключевых видов канальных ресурсов.

3.1.1. Пояснение идеи одиночных и множественных логических соединений L2 уровня: назначение, основание для установления, контроль функционирования, завершения соединения.

На канальном уровне (L2 уровень) будут решаться задачи, необходимые для организации логического соединения между ПУ и БПЛА. Для данной сети логическое соединение – это декларация о том, как должна быть осуществлена передача сообщений между ПУ и БПЛА. В проектируемой радиосети возможна только одна активная сессия между ПУ и конкретным БПЛА, множественный доступ не требуется. Вместе с тем устанавливаются множественные логические соединения L2 уровня между ПУ и БПЛА, поскольку каждый логический канал обладает своей задачей.

Основанием для установления соединения будет являться потребность в передаче данных между ПУ и БПЛА. За контроль функционирования радиосети отвечает служба L2 уровня – служба контроля качества соединения. Условием завершения установленного соединения будет являться прекращение передачи данных.

3.1.2. Обоснованный анализ необходимых для функционирования радиосети ключевых видов канальных ресурсов.

Для установления радиосоединения требуется передача широковещательных сообщений, которые содержат параметры подключения к сети, следовательно, необходимо выделение канальных ресурсов в виде однонаправленного канала BCCH (Broadcast Control Channel).

Наряду с этим в ходе установления радиосоединения и регистрации БПЛА в сети требуется канальный ресурс для передачи сообщений в обратном направлении, для этого выделяются каналы ACH (Access Channel – канал запроса доступа) и AGCH (Access Grant Channel – канал разрешенного доступа).

С целью реализации основной задачи радиосети – передачи трафика также необходимы канальные ресурсы, кроме того, как было учтено ранее, трафик в данной радиосистеме асимметричен, таким образом, для передачи трафика выделяются низкоскоростной канал DCN (Data Channel – канал данных) и высокоскоростной TCH (Traffic Channel – канал трафика). Канал DCN предназначается для передачи команд управления, телеметрии и сигнальных сообщений. Канал TCH является симплексным, в обратном направлении, и предназначается для передачи видеопотока с камеры БПЛА.

3.2. Обоснованный анализ видов логических каналов (ЛКС), оценка производительности сигнальных и информационных ЛКС в обоих направлениях.

В проектируемой радиосети предусмотрены следующие логические каналы: BCCH, ACH, AGCH, DCN и TCH.

Широковещательный канал BCCH предназначается для вещания широковещательных сообщений (ШВС). Благодаря ему сеть обозначает своё присутствие в данной зоне обслуживания. С помощью канала BCCH происходит установление соединения. Так же он используется для синхронизации (временной, частотной). ШВС, передаваемые по данному

каналу необходимо транслировать с некоторым интервалом времени (каждую секунду), предполагается производительность трафика для канала данного вида в 1 сообщение в секунду.

Канал запроса доступа АСН предназначается для передачи запроса на регистрацию в сети со стороны БПЛА. Для данного ЛКС производительность трафика предполагается до 1 сообщения раз в 5 секунд.

Канал разрешенного доступа (AGCH) в свою очередь предназначается для передачи ПУ информации о выделении ресурсов, в случае успешной регистрации БПЛА в сети. Данному ЛКС так же рационально выделить производительность до 1 сообщения раз в 5 секунд.

Канал данных (DCH) осуществляет дуплексную передачу сообщений трафика, под которыми понимаются различные команды управления и данные телеметрии, а также для передачи сообщений сигнализации, к ним относятся уведомления о доставке (успешной или с ошибками). Данный канал используется службами передачи данных и контроля качества соединения подуровня доставки сообщений L2 уровня. Ранее было установлено, что передачи команд управления необходима передача до 4 сообщений в секунду, равно как и для трафика сообщений сигнализации, наряду с этим под телеметрию отводится 1 сообщение в секунду. Таким образом, для указанного ЛКС целесообразно обеспечить производительность в минимум 9 сообщений в секунду.

Канал ТСН используется непосредственно для передачи видеотрафика в обратном направлении передачи.

3.3. Задачи службы передачи данных канального уровня в виде пояснения обработки информационных и служебных сообщений на L2 уровне: характеристика информационного трафика, поступающего на L2 уровень, оценка необходимости его фрагментации и последующей нумерации, пояснение способов разделения сообщений по типам и их адресации, обеспечение целостности сообщений и т.п.

К информационному трафику, поступающему на L2 уровень, относятся команды управления и данные телеметрии. Служебные (сигнальные) сообщения, поступающие на L2 уровень, включают в себя сообщения для следующих служб: организации низкоскоростного соединения, организации высокоскоростного обратного канала трафика, контроля качества соединения и службы передачи данных.

Служба передачи данных является основной службой подуровня доставки сообщений L2 уровня. Данная служба имеет задачи осуществлять фрагментацию сообщений, разделять их на пакеты, а также обеспечивать целостность и надежность передачи. В данную службу поступают служебные сообщения с плоскости подуровня управления радиосоединениями, а также информационный трафик, подлежащий кодированию и шифрованию. Пакеты L2 уровня имеют фиксированную длину. Служебные сообщения имеют ограниченный объем и помещаются в пакеты L2 уровня, сообщения данных так же небольшого объема, исходя из этого фрагментация сообщений не потребуется.

По каналу DCH на канальный уровень поступают информационные и служебные сообщения, вследствие этого следует добавить идентификатор сообщения, таким образом добавляется битовый флаг P, и в случае, когда $P = 0$ принято информационное сообщение трафика, при $P = 1$ принято служебное сообщение, направляемое соответствующей службе.

Ввиду того, что на L2 уровне находится четыре службы, то следует добавить поле идентификации служебного сообщения, с целью обозначения для какой из служб адресовано текущее сообщение. Таким образом, для идентификации служебных сообщений выделяется атрибут I, размерностью 4 бита.

L2 уровень должен обеспечивать надёжную доставку сообщений. Для выполнения этой задачи в данной системе используется циклический избыточный код CRC (Cyclic Redundancy Code), который позволяет на основании контрольной суммы, рассчитываемой на приемнике, убедиться в достоверности принятого сообщения.

3.4. Пояснение структуры L2 сообщений ЛКС, анализ их атрибутов, назначение и размерности полей, оценка скорости передачи битов сообщений ЛКС. Обоснование гарантированной/негарантированной доставки указанных видов сообщений. Результаты п.3.1-3.4 свести в таблицу (с оценкой производительности ЛКС).

Сообщения канала ВССН являются ширококестельными, служебными, ответа либо подтверждения их не требуется, таким образом, они являются уведомительными. В данных сообщениях присутствует поле идентификатора сети размером 8 бит, поле данных размером 232 бита, в котором указываются параметры сети, и поле CRC размером 16 бит, для контроля достоверности принятого сообщения. Сообщения для рассматриваемого ЛКС передаются периодически через определенные промежутки времени в одну секунду. Ширококестельные сообщения не требуют гарантированной доставки, поскольку повторяются и несут в себе постоянно актуализированную информацию о сети. Предполагается скорость передачи трафика для сообщений данного вида в 1 Кбит/с. Структура сообщений канала ВССН приведена на рисунке 17.



Рисунок 17 – структура сообщений канала ВССН

Сообщения канала АСН являются адресными и служебными, и требует ответа со стороны ПУ. В структуре сообщений передаются идентификатор ПУ размером 16 бит, идентификатор БПЛА размером 16 бит, которому необходимо предоставить ТК услугу в виде выделения канала трафика, и поле CRC размером 16 бит. В поле данных, размером 208 бит, содержится информация о доступных профилях настройки физического уровня, номерах доступных алгоритмов шифрования. Для сообщений данного ЛКС скорость передачи битов предполагается в 1 Кбит/с.

Сообщения канала АГСН являются адресными, служебными, по структуре похожими на сообщения канала АСН, однако обязательного ответа на них не требуется. Данным сообщениям так же рационально выделить пропускную способность в 1 Кбит/с.

Сообщения каналов АСН и АГСН подлежат для подачи запроса БПЛА или для ответа на запрос со стороны ПУ. Данные сообщения являются адресными и должны быть доставлены

до адресата гарантированно. С этой целью сообщения, передаваемые по этим каналам, имеют возможность повторной передачи, до тех пор, пока адресат не подтвердит отправителю успешный прием сообщения. Структура сообщений каналов ACH и AGCH представлена на рисунке 18.

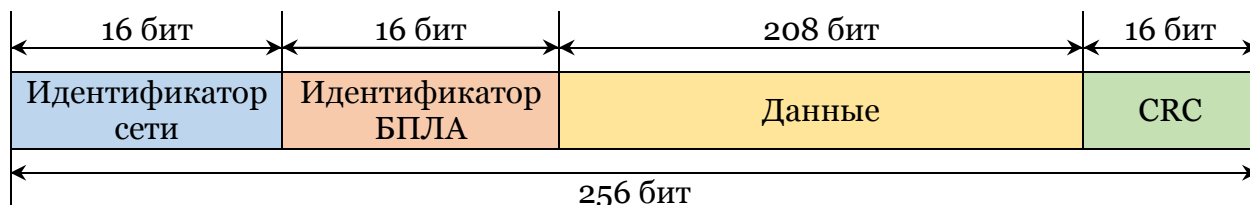


Рисунок 18 – структура сообщений каналов ACH и AGCH

Сообщения канала DCH являются адресными, как правило, требуют ответа, а также могут быть как служебными, так и информационными. В структуре сообщений передаются битовый флаг Р размером 1 бит, атрибут I размером 4 бита, поле данных размером 491 бит, и поле CRC размером 16 бит. Для сообщений указанного ЛКС целесообразно обеспечить скорость передачи до 128 Кбит/с. Сообщения данного канала обязаны быть доставлены до адресата гарантированно. Структура сообщений канала DCH изображена на рисунке 19.



Рисунок 19 – структура сообщений канала DCH

Сообщения канала TCH являются однонаправленными, гарантированная доставка для них не требуется. Как уже известно, производительность данного вида трафика варьируется от 2,3 до 9,22 Мбит/с в зависимости от помеховой обстановки. Структура сообщений канала TCH показана на рисунке 20.



Рисунок 20 – структура сообщений канала TCH

Результаты п.3.1-3.4 сведем в таблицу 2.

Таблица 2

ЛКС	Направление	Производительность	Скорость передачи битов сообщений	Гарантированность доставки
Широковещательный (BCCH)	DL	1 сообщ/с	1 Кбит/с	Не требуется
Запроса доступа (ACH)	UL	0,2 сообщ/с	1 Кбит/с	Требуется
Разрешенного доступа (AGCH)	DL	0,2 сообщ/с	1 Кбит/с	Требуется
Данных (DCH)	DL/UL	9 сообщ/с	128 Кбит/с	Требуется
Трафика (TCH)	UL	25 кадров/с	2,3–9,2 Мбит/с	Не требуется

3.5. Проработка сценария (протокола) гарантированной доставки сообщений одного из ключевых ЛКС в виде повторной передачи неверно принятого сообщения (ARQ).

В разрабатываемой радиосети для команд управления и сообщений сигнализации требуется гарантированная доставка. Для реализации этой задачи предлагается использовать метод ARQ с остановками. ПУ перед началом очередной передачи ожидает подтверждения об успешном приеме предыдущей (ACK). Если передаваемое сообщение принято с ошибкой, то БПЛА передает отрицательное подтверждение приема (NAK); тогда ПУ повторяет передачу сообщения, принятого с ошибкой, и только после этого передает следующее по очередности сообщение. Передачи сообщений подтверждения о доставке осуществляется по каналу DCH (канал данных).

Таким образом, благодаря службе передачи данных, основанной на методе ARQ, в разрабатываемой радиосети осуществляется гарантированная доставка сообщений. Смысл данного метода иллюстрируется на рисунке 21.

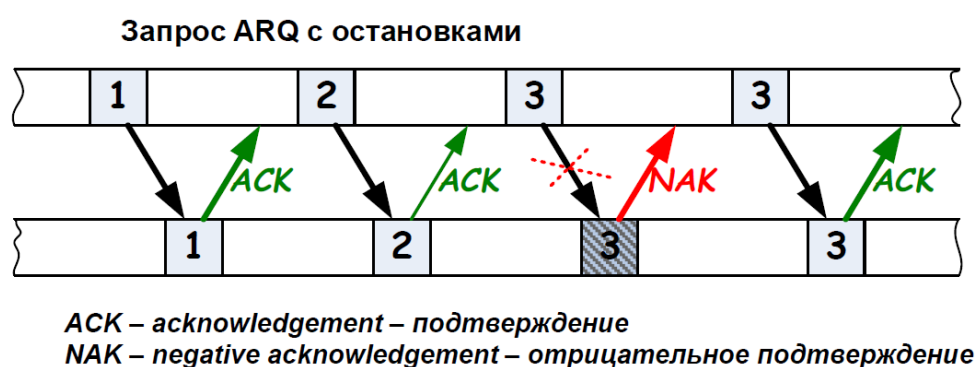


Рисунок 21 – запрос ARQ с остановками

3.6. Обоснованный выбор алгоритма доступа к канальным (физическим) ресурсам, пояснение структуры физических ресурсов. Описание стратегии планирования распределения канальных ресурсов. Анализ предлагаемого алгоритма доступа к ресурсам на предмет возникновения коллизий и пояснение решения по их устранению. Формирование правила распределения физических ресурсов между ЛКС (п.3.1, 3.4).

Алгоритм доступа к канальным (физическим) ресурсам в данной радиосети предполагает использование OFDM. Множественный доступ к ПУ отсутствует, т.е. активная сессия только одна. Таким образом, алгоритм доступа к каналному ресурсу основывается на OFDM символах, для каждого логического канала выделяются определенные поднесущие в конкретный промежуток времени. OFDM символы будут собираться на физическом уровне.

Организация прямого и обратного каналов связи в разрабатываемой системе возможна путем организации парных частотных полос в направлениях «вверх» (UL) и «вниз» (DL), либо посредством временного разделения кадров UL и DL. Для данной радиосистемы используется временной дуплекс – временное разделение кадров в направлениях UL и DL.

Для решения задачи надежного доступа БПЛА к ресурсам сети необходимо предусмотреть в направлении UL реализацию канала доступа АСН. Для этого канала выделяется некоторое количество ресурсных блоков в начале кадра UL.

В направлении DL необходимо реализовать каналы широковещательной несущей ВССН и каналы разрешенного доступа АГСН для обеспечения взаимодействия БПЛА с сетью.

Для каналов DCH и TCH выделяется основная часть ресурсов.

В данной работе возникновение коллизии маловероятно и является из ряда вон выходящей ситуацией. Она может произойти лишь в ситуации, когда заранее нарушено частотно-пространственное планирование работы данной сети. В частности, когда сеть с той же настройкой находится в непосредственной близости к аналогичной. Терминалы работают в своих заранее заданных полосах частот и в штатном режиме не должны оказывать влияние на функционирование друг друга.

Схема использования физических ресурсов представлена на рисунке 22.

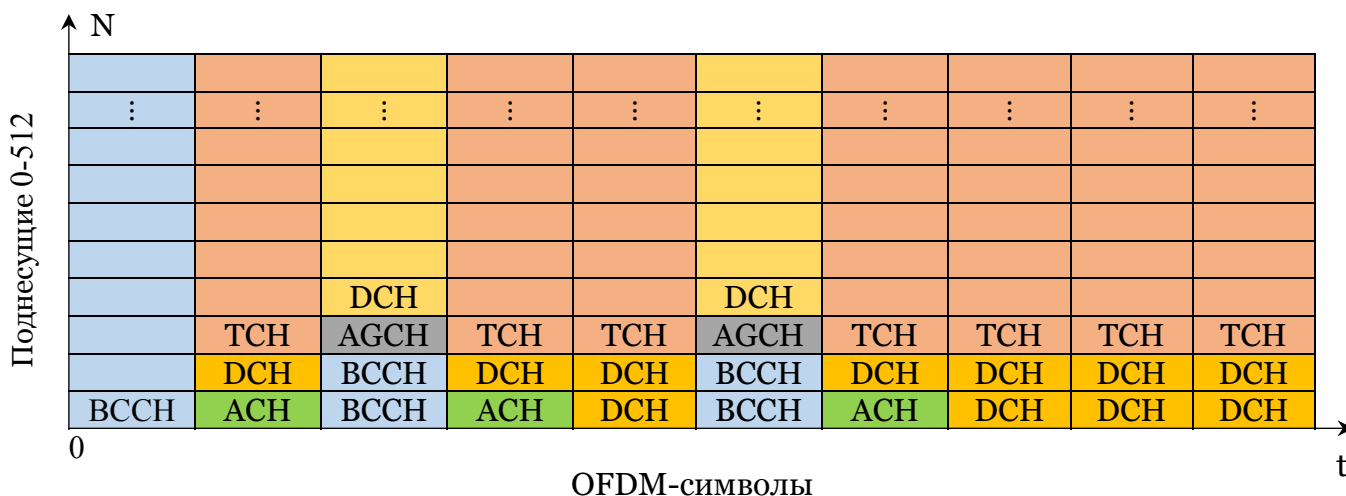


Рисунок 22 – схема использования физических ресурсов для L2 соединений

3.7. Проработка основных информационных объектов L2 уровня (управление оперативными сведениями).

Рассмотрим постоянные и оперативные сведения, которые используют как службы плоскости сигнализации, так и плоскости пользователя (приложение на ПУ).

Информационный объект службы L2 уровня контроля качества соединения представляет собой журнал, отражающий информацию о:

- ID активного соединения с БПЛА;
- средний уровень сигнала БПЛА;
- средний уровень сигнала ПУ, измеренный БПЛА и переданный на ПУ по каналу связи в рамках отчета по радиоизмерениям.

Журнал активных сеансов, используемый службами подуровня управления соединениями для обслуживания активных сеансов, содержит: № сеанса, идентификатор БПЛА, код используемого профиля L1 уровня (вид модуляции QPSK или QAM-16, скорость кодирования – 1/2, уровень мощности и т.п.), выделенные каналы (ресурсы в прямом и обратном направлении). На основе этих данных принимаются решения на передающей и приемной стороне.

Информационный элемент сети, используемый службами организации ЛК для формирования сообщений ВССН, содержит: идентификатор ПУ, наименование сети, параметры доступа к сети, такие как частоты, зарезервированные для запроса доступа, их периодичность.

Параметры управления содержат: код частотного канала работы сети, минимальный и максимальный уровень мощности, периодичность радиоизмерений и т.п.

4. Разработка физического уровня (L1). Реализация необходимых уровню L2 физических ресурсов.

4.1. Обоснование характеристик требуемых физических ресурсов (пропускная способность, направление и качество доставки, разделяемость ресурса).

Как было установлено ранее, для передачи команд управления и данных телеметрии требуется 128 Кбит/с, то есть гарантируемая скорость передачи данных по каналу DCH составляет 128 кбит/с. Канал DCH является дуплексным.

Пропускная способность канала BCCH составляет 1 Кбит/с. Канал BCCH является симплексным в прямом направлении.

Пропускная способность канала ACCH и канала AGCH 1 Кбит/с для каждого. Каждый из этих каналов является симплексным в своем направлении.

Пропускная способность канала TCH составит 2,3 Мбит/с при работе профиля «0» и соответственно 9,22 Мбит/с при работе профиля «1». Канал TCH является симплексным обратным каналом (от БПЛА к ПУ).

4.2. Обоснованный выбор частотного диапазона (на основании документов ГКРЧ); аргументированный выбор модели оценки потерь распространения радиоволн, расчет уровня потерь.

В соответствии с решением ГКРЧ при Минкомсвязи РФ от 15.07.2010 № 10- 07-01 «О выделении полос радиочастот для радиоэлектронных средств любительской и любительской спутниковой служб» для функционирования разрабатываемой радиосети возьмем полосу частот 1260-1300 МГц с несущей частотой 1280 МГц. Этот диапазон предназначен для любительской службы. Тогда занимаемая полоса составит от 1270 до 1290 МГц. В качестве модели оценки потерь выберем модель NLOS – оценку потерь пространстве с потерями, поскольку разрабатываемая радиосеть будет реализована в сельской местности в пространстве с потерями, нижней границы потерь будет достаточно.

В соответствии с выбранной моделью потери при распространении радиоволн можно рассчитать по формуле:

$$L_{NLOS}(r, f) = L_{LOS}(r, f) - 10 \cdot n \cdot \lg(r/r_0), \text{ [дБ]};$$

$$L_{LOS}(r, f) = 27,56 - 20 \lg f - 20 \lg r + 10 \lg G_{пр} + 10 \lg G_{п}, \text{ [дБ]},$$

где $f = 1280$ МГц – несущая частота; $r = 6000$ м = 6 км – дальность связи, то есть радиус зоны обслуживания (в соответствии с заданием); $r_0 = 10\%$ от r ; $G_{пр}$, $G_{п} = 1,5$ дБ – КНД приемной и передающей антенны соответственно.

$$L_{LOS}(r, f) = 27,56 - 20 \lg(1280) - 20 \lg(6000) + 10 \lg(1,5) + 10 \lg(1,5) = -106,63 \text{ дБ};$$

$$L_{NLOS}(r, f) = -106,63 - 10 \cdot 3 \cdot \lg(6000/(6000 \cdot 0,1)) = -136,63 \text{ дБ}.$$

Рассмотрим модель Окамуры-Хата, поскольку эта модель обеспечивает достаточно высокую точность определения потерь при распространении радиоволн в условиях сельской местности. В соответствии с выбранной моделью потери при распространении радиоволн можно рассчитать затухание сигнала по формуле:

$$L = L_{гор} - 2 \cdot (\lg(f / 28))^2 - 5,4 ,$$

$$\text{где } L_{гор} = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(h_{БС}) - \alpha(h_{АС}) + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{БС})) \cdot \lg(R),$$

$f = 1280$ МГц – несущая частота; $R = 6000$ м = 6 км – дальность связи, то есть радиус зоны обслуживания (в соответствии с заданием); h_{AC} – высота подъема антенны БПЛА, которая будет равняться высоте полета – не более 200 м; $h_{BC} = 0,3$ м – типовая высота антенны ПУ; $\alpha(h_{AC})$ – поправочный коэффициент, учитывающий высоту антенны абонентской станции в зависимости от местности, дБ: $\alpha(h_{AC}) = 3,2 \cdot \lg(11,75 \cdot h_{AC})^2 - 4,97 = 31,4$ дБ.

Тогда рассчитаем потери в городе по формуле:

$$L_{\text{гор}} = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(1280) - 13,82 \cdot \lg(0,3) - \alpha(200) + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(0,3)) \cdot \lg(6) = 164,26 \text{ дБ.}$$

Потери в сельской местности составляют по формуле:

$$L = 164,26 - 2 \cdot (\lg(1280 / 28))^2 - 5,4 = 151,35 \text{ дБ.}$$

4.3. Обоснование выбора мер по обеспечению синхронизации и по защите приема от многолучевости и помех в канале связи. При необходимости, проработка профилей физического уровня и сценария их выбора. Оценка требуемой избыточности, вносимой указанными факторами.

С целью обеспечения временной и частотной синхронизации шкал времени ПУ и БПЛА используется преамбула, которая добавляется к каждому пакету физического уровня.

Поскольку разрабатываемая радиосеть функционирует в пригороде и сельской местности, есть риск возникновения многолучевости и помех. Предлагаемый в задании радиоинтерфейс OFDM решает эту задачу, его основная особенность – противостояние межсимвольным помехам, а именно борьба с многолучевостью. Технология OFDM позволяет распределять поток передаваемых данных по множеству частотных ортогональных каналов. Применение OFDM не требует внедрения в систему сложных фильтров-эквалайзеров, которым необходимо резервирование широких частотных полос, требуемых для их функционирования, в условиях ограниченности частотного ресурса.

При передаче данных по каналу связи из-за помех возникают ошибки. Поэтому для их исправления на L1 уровне будет предусмотрено использование помехоустойчивого кодирования. В разрабатываемой радиосети предлагается использовать сверточное кодирование, которое вносит необходимую избыточность в передаваемое сообщение для обеспечения его безошибочного приема. Избыточность кода определяется скоростью кодирования, то есть отношением числа бит, поступивших на вход кодера, к числу бит, получаемых для данной входной последовательности на выходе кодера. В данной радиосети предлагается использовать сверточное кодирование со скоростью $1/2$.

В данной радиосети организуются два профиля работы физического уровня, их использование будет зависеть от условий, в которых осуществляется радиосоединение. Профили работы различаются видами модуляции: QPSK (профиль работы «0») и QAM-16 (профиль работы «1»). QAM-16 имеет высокую пропускную способность, высокую скорость передачи и, соответственно, большую вероятность ошибки. QPSK в свою очередь обладает низкой вероятностью ошибки и не требует высокой скорости передачи, что будет необходимо при ухудшении помеховой обстановки.

Передача по прямому каналу команд управления и сообщений сигнализации будет осуществляться по профилю работы «0», т.к. не требуется больших скоростей и модуляции QPSK достаточно. Передача по обратному каналу данных телеметрии будет осуществляться по профилю работы «0», т.к. для телеметрии и сообщений сигнализации модуляции QPSK так же достаточно. Передача видеопотока по обратному каналу возможна по двум профилям работы. Выбор профиля работы будет основываться на измерении ОСШ,

то есть достижения какого-то порогового значения ОСШ, при превышении которого будет осуществлен переход на профиль работы «1» (QAM-16). Выбор профиля работы обеспечивает служба контроля качества соединения подуровня доставки сообщений L2 уровня.

4.4. Оценка пропускной способности физического канала с учетом избыточности, вносимой на L1 уровне.

Потому как предлагается использовать сверточное кодирование со скоростью $1/2$ количество бит вносится некоторая избыточность. Следовательно, с учетом вносимой избыточности при полускоростном сверточном помехоустойчивом кодировании пропускная способность увеличивается в 2 раза. Скорость в канале TCH для профиля работы «0» составит 4,6 Мбит/с, а для профиля работы «1» составит 18,44 Мбит/с. Скорость в канале DCH для профиля «0» составит 256 кбит/с.

Для оценки приблизительной пропускной способности физического канала найдем соотношение данных скоростей – 1:41. Это означает, что на один пакет данных приходится 41 пакет видеотрафика.

Для ширины канала 5 МГц оптимально использовать 512 поднесущих.

Для QPSK 1 символ OFDM будет переносить 2 бита. При использовании QPSK модуляции размер одного OFDM символа будет равен $512 \times 2 = 1024$ бит. Следовательно, с помощью одного символа возможно передать 1 пакет физического уровня. Соответственно, за период будет передаваться $1 + 41 = 42$ пакета или 42 OFDM символа. Тогда за период получается: $42 \times 1024 = 43008$ бит. Теперь определим период при заданной скорости и размере пакетов $43008 \text{ бит} / 4,6 \text{ Мбит/с} = 9350 \text{ мс}$.

Для QAM-16 модуляции 1 символ OFDM будет переносить 4 бита информации.

Также необходимо добавить пилот-сигналы и защитные интервалы. Тогда один OFDM символ будет состоять из 512 поднесущих.

На основании выше сказанного структура OFDM символа будет включать в себя защитные интервалы (GI), 11 информационных полей (D), 11 пилот-сигналов (PS) и одну центральную нулевую поднесущую.

Структура OFDM символа иллюстрируется рисунком 22.



Рисунок 22 – структура OFDM символа

4.5. Расчет отношения сигнал/шум, требуемого для обеспечения необходимого качества приема без помехоустойчивого кодирования. Обоснованный выбор метода и скорости помехоустойчивого кодирования, расчет эффективности кодирования, пояснение влияния выбора на структуру пакета L1 уровня. Повторный расчет отношения сигнал/шум с учетом метода помехоустойчивого кодирования. Окончательная оценка требуемой полосы частот.

Расчет ОСШ, требуемого для обеспечения заданной вероятности ошибки, проводится с использованием инструмента `bertool`, входящий в пакет MATLAB. В соответствии с заданием необходимо обеспечить вероятность ошибки на бит $P_b = 10^{-7}$.

Зависимости вероятностей битовой ошибки от ОСШ для QPSK и QAM-16 без помехоустойчивого кодирования представлены на рисунке 23.

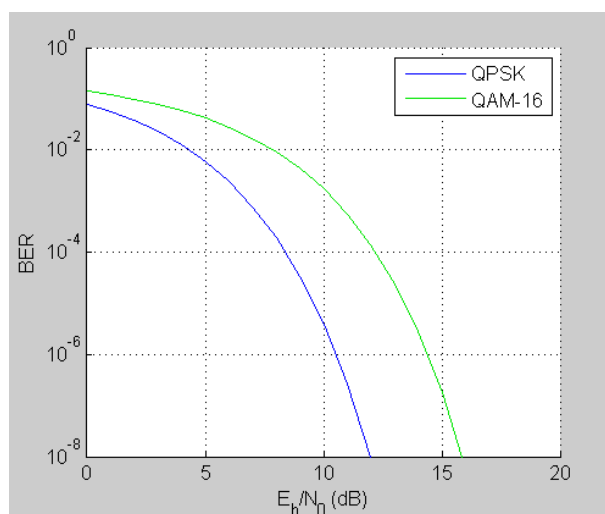


Рисунок 23 – зависимости вероятностей битовой ошибки от ОСШ для QPSK и QAM-16 без помехоустойчивого кодирования

По данной зависимости можно сделать вывод о том, что при модуляции QPSK заданная вероятность битовой ошибки обеспечивается при 11,3 дБ, а при модуляции QAM-16 при 15,2 дБ.

Помехоустойчивое кодирование реализуется с помощью сверточного кода со скоростью $1/2$, где каждому биту на входе соответствует 2 бита на выходе. Декодирование сверточных кодов будет осуществляться по алгоритму Витерби, который пытается восстановить переданную последовательность согласно критерию максимального правдоподобия.

Зависимости вероятностей битовой ошибки от ОСШ для QPSK и QAM-16 с использованием помехоустойчивого кодирования представлены на рисунке 24.

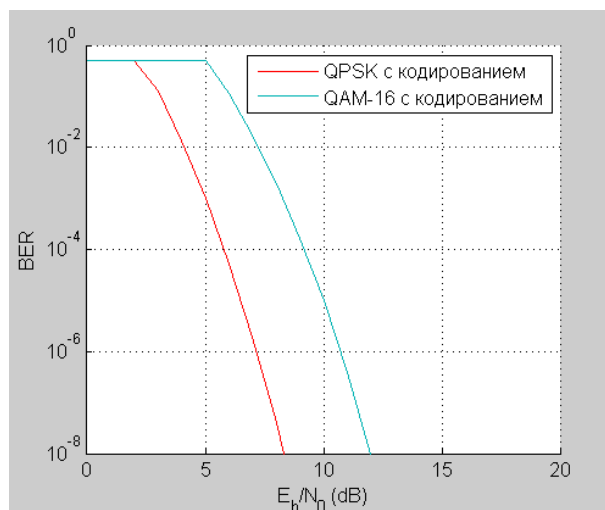


Рисунок 24 – зависимости вероятностей битовой ошибки от ОСШ для QPSK и QAM-16 с помехоустойчивым кодированием

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что при модуляции QPSK заданная вероятность битовой ошибки обеспечивается при 7,8 дБ, а при модуляции QAM-16 при 11,3 дБ.

Для наглядности все вышеперечисленные зависимости изображены на одном графике рисунка 25.

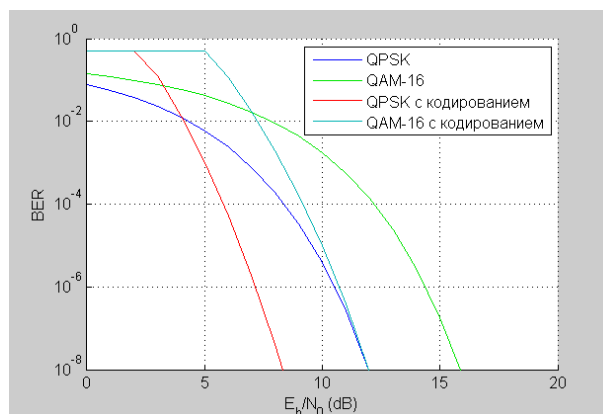


Рисунок 25 – зависимости вероятностей битовой ошибки от ОСШ для QPSK и QAM-16 с помехоустойчивым кодированием и без него

Таким образом, выигрыш при использовании помехоустойчивого кодирования при модуляции QPSK составляет 3,5 дБ, а при использовании модуляции QAM-16 составляет 3,9 дБ. Полученные значения сведены в таблице 3.

Таблица 3

Вид модуляции	ОСШ без кодирования, дБ	ОСШ с кодированием, дБ	Выигрыш, дБ
QPSK	11,3	7,8	3,5
QAM-16	15,2	11,3	3,9

4.6. Определение структуры и расчет размерности полей пакетов L1 уровня.

Как было указано ранее, каждый блок OFDM символов дополняется преамбулой, которая осуществляет частотную и временную синхронизацию. Так же требуется поле, которое будет содержать информацию о профиле работы, для такого поля достаточно одного OFDM символа. Далее поле передачи потока данных, то есть будут передаваться OFDM символы. OFDM символ в своем составе содержит информационное поле, которое заполняется сообщениями с L2 уровня и может иметь переменную длину. Необходимо использовать поле добавления дополнительных нулевых битов (биты заполнения), которые приводят размер пакета к числу, кратному степени 2. Таким образом, структура сообщения L1 уровня имеет вид, представленный на рисунке 26.

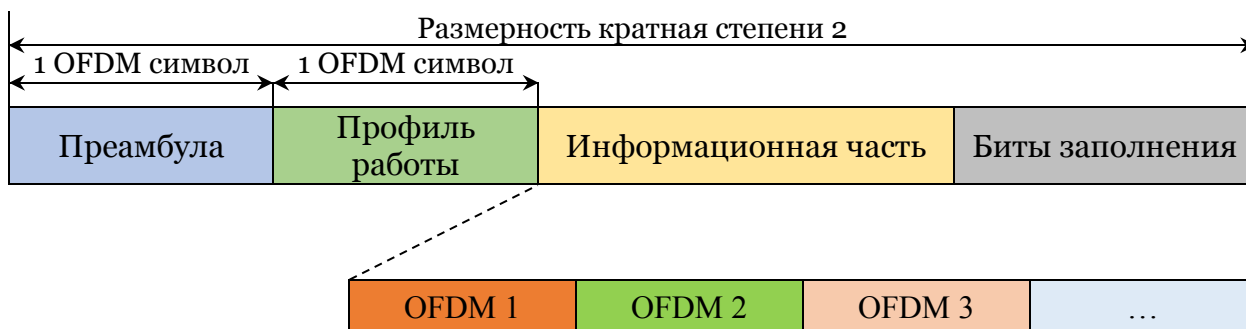


Рисунок 26 – структура сообщения L1 уровня

4.7. Оценка уровня мощности передачи с учетом необходимого запаса мощности сигнала для его уверенного приема с вероятностью PR% на границе радиопокрытия, оценка размера зоны радиопокрытия.

Произведем оценку уровня мощности передачи для работы профиля «0» (QPSK модуляция), по этому профилю работы будет осуществляться передача по низкоскоростным каналам и при ухудшении помеховой ситуации в высокоскоростном канале связи.

Расчет для низкоскоростного канала связи.

Скорость передачи = 256 кбит/с (из-за использования сверточного кодирования со скоростью 1/2 необходимая скорость увеличилась в 2 раза).

Эффективная полоса: $\Delta f = R / \log_2(M) = 100 \text{ кГц} + \text{защитный интервал OFDM (примем 10\%)}$
 $= 110 \text{ кГц} = 0,11 \text{ МГц}$.

Шумовая полоса приемника:

$$\Delta f_{\text{ш}} = 1,1 \cdot \Delta f = 0,121 \text{ МГц}.$$

Мощность шума на входе приемника:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T \cdot \Delta f_{\text{ш}} = 43,9 \cdot 10^{-17} \text{ Вт} = -153,57 \text{ дБВт} = -123,57 \text{ дБм}.$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана; $T = 295 \text{ К}$ – шумовая температура.

Чувствительность приемника:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ш}} + N_k + \text{SNR}.$$

$$E_b/N_0 = 7,8 \text{ дБ (пункт 4.5 для QPSK)}.$$

$$\text{SNR} = E_b/N_0 + 10\log(\Delta f / \Delta f_{\text{ш}}) = 7,38 + 4 \text{ (запас по ОСШ)} = 11,38 \text{ дБ.}$$

Коэффициент шума первых каскадов приемника примем равным $N_k = 3 \text{ дБ}$,

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ш}} + N_k + \text{SNR} = -153,57 + 3 + 11,38 = -139,19 \text{ дБВт.}$$

Рассчитаем мощность излучения подвижного объекта:

$$P_{\text{изл}} = P_{\text{прм}} + L - G_t - G_r;$$

$L = 136,63 \text{ дБ}$ – рассчитано в п.4.2 по модели NLOS; $G_t = 1,5 \text{ дБ}$ – КНД передающей антенны; $G_r = 1,5 \text{ дБ}$ – КНД приемной антенны;

Получим суммарную излучаемую мощность, с учетом того, что расчет проводился для всей полосы частот, включающей 384 поднесущих OFDM.

$$P_{\text{изл}} = -139,19 + 136,63 - 3 = -5,56 \text{ дБВт} = 0,19 \text{ Вт.}$$

В результате было получено расчетное значение мощности, которое удовлетворяет указанному в задании к курсовой работе условию: $P_{\text{изл}} < 0,2 \text{ Вт}$.

Расчет для высокоскоростного обратного канала связи.

Скорость передачи = 4,6 Мбит/с (из-за использования сверточного кодирования со скоростью 1/2 необходимая скорость увеличилась в 2 раза)

Эффективная полоса: $\Delta f = R / \log_2(M) = 4 \text{ МГц}$ + защитный интервал OFDM (примем 10%) = 4,4 МГц

Шумовая полоса приемника:

$$\Delta f_{\text{ш}} = 1,1 \cdot \Delta f = 4,84 \text{ МГц.}$$

Мощность шума на входе приемника:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T \cdot \Delta f_{\text{ш}} = 1756,1 \cdot 10^{-17} \text{ Вт} = -137,55 \text{ дБВт} = -107,55 \text{ дБм.}$$

Чувствительность приемника:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ш}} + N_k + \text{SNR.}$$

$E_b/N_0 = 7,8 \text{ дБ}$ (пункт 4.5 для QPSK).

$$\text{SNR} = E_b/N_0 + 10\log(\Delta f / \Delta f_{\text{ш}}) = 7,38 + 4 \text{ (запас по ОСШ)} = 11,38 \text{ дБ.}$$

Коэффициент шума первых каскадов приемника примем равным $N_k = 3 \text{ дБ}$,

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ш}} + N_k + \text{SNR} = -137,55 + 3 + 11,38 = -123,17 \text{ дБВт.}$$

Рассчитаем мощность излучения подвижного объекта:

$$P_{\text{изл}} = P_{\text{прм}} + L - G_t - G_r;$$

$L = 151,35 \text{ дБ}$ – рассчитано в п.4.2 по модели Окамуры-Хата.

Получим суммарную излучаемую мощность, с учетом того, что расчет проводился для всей полосы частот, включающей 384 поднесущих OFDM.

$$P_{\text{изл}} = -139,19 + 151,35 - 3 = 9,16 \text{ дБВт} = 0,12 \text{ Вт.}$$

В результате было получено расчетное значение мощности, которое удовлетворяет указанному в задании к курсовой работе условию: $P_{\text{изл}} < 0,2 \text{ Вт}$.

Произведем оценку уровня мощности передачи для работы профиля «1» (QAM-16), использование которого подразумевается только в обратном направлении, т.е. для видеопотока:

Скорость передачи = 18,4 Мбит/с (из-за использования сверточного кодирования со скоростью 1/2 необходимая скорость увеличилась в 2 раза)

Эффективная полоса: $\Delta f = R / \log_2(M) = 4 \text{ МГц}$ + защитный интервал OFDM (примем 10%) = 4,4 МГц

Шумовая полоса приемника:

$$\Delta f_{\text{ш}} = 1,1 \cdot \Delta f = 4,84 \text{ МГц.}$$

Мощность шума на входе приемника:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T \cdot \Delta f_{\text{ш}} = 1756,1 \cdot 10^{-17} \text{ Вт} = -137,55 \text{ дБВт} = -107,55 \text{ дБм.}$$

Чувствительность приемника:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ш}} + N_k + \text{SNR.}$$

$$E_b/N_0 = 11,3 \text{ дБ (пункт 4.5 для QAM).}$$

$$\text{SNR} = E_b/N_0 + 10 \log(\Delta f / \Delta f_{\text{ш}}) = 10,9 + 4 \text{ (запас по ОСШ)} = 14,9 \text{ дБ.}$$

Коэффициент шума первых каскадов приемника примем равным $N_k = 3 \text{ дБ}$,

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ш}} + N_k + \text{SNR} = -137,55 + 3 + 14,9 = -116,65 \text{ дБВт.}$$

Рассчитаем мощность излучения подвижного объекта:

$$P_{\text{изл}} = P_{\text{прм}} + L - G_t - G_r;$$

$$L = 151,35 \text{ дБ} - \text{рассчитано в п.4.2 по модели Окамуры-Хата.}$$

Получим суммарную излучаемую мощность, с учетом того, что расчет проводился для всей полосы частот, включающей 384 поднесущих OFDM.

$$P_{\text{изл}} = -116,65 + 151,35 - 3 = 31,7 \text{ дБВт} = 0,0007 \text{ Вт.}$$

В результате было получено расчетное значение мощности, которое удовлетворяет указанному в задании к курсовой работе условию: $P_{\text{изл}} < 0,2 \text{ Вт}$.

Произведем оценку мощности, для обеспечения уверенного приема сигнала с вероятностью PR = 70% на границе зоны радиопокрытия радиус которой равен 6000м.

Согласно исходному заданию можно взять при PR = 50%, $r_{50} = 6000 \text{ м}$.

Рассчитаем вероятность выполнения условий уверенного приема:

$$X_{70} = 70 / 100 = 0,7.$$

По таблице функций Лапласа вычислим аргумент, при котором:

$$x_{70} - 0,5 = F(-W)$$

$$F(-W_{70}) = x_{70} - 0,5 = 0,2$$

$$W_{70} = -0,52$$

Так как анализируемая система будет функционировать в условиях пригорода или сельской местности, то примем $\sigma = 7$ и $n = 3$.

Определим радиус зоны радиопокрытия ($PR = 70\%$):

$$r_{70} = 10^{((W_{70} \cdot \sigma) / (10 \cdot n))} \cdot r_{50}$$

$$r_{70} = 10^{((-0,52 \cdot 7) / (10 \cdot 3))} \cdot 6 = 4,54 \text{ км} = 4540 \text{ м}$$

4.8. Разработка и описание функциональной схемы L1 уровня.

Поступающее с канального уровня сообщение проходит процедуру свёрточного кодирования со скоростью $1/2$. Далее осуществляется блочное перемежение, которое предназначено для борьбы с замираниями и, как следствие, возникновением пакетов ошибок, и модуляция. Вид модуляции зависит от выбранного системой профиля функционирования (QPSK или QAM-16). Профиль функционирования выбирается исходя из качества канала связи. Подсистема радиоизмерений сообщает уровню принятия решений о качестве канала связи. Если необходима смена модуляции, то на модулятор с уровня принятия решений приходит соответствующая команда.

С выхода модулятора сообщение поступает на вход формирователя OFDM сигналов, где оно разбивается на блоки равной длины. Далее, к полученным символам с помощью блока синхронизации и формирователя последовательности CAZAC добавляется преамбула. Передающая часть БПЛА выполнена таким же образом.

После канала связи после обнаружения преамбулы происходит частотная и временная синхронизация. Приемная часть выполняет обратные функции: демодуляция OFDM-сигнала, демодуляция согласно выбранной модуляции, деперемежение, свёрточное декодирование.

Функциональная схема L1 уровня схематично представлена на рисунке 27.

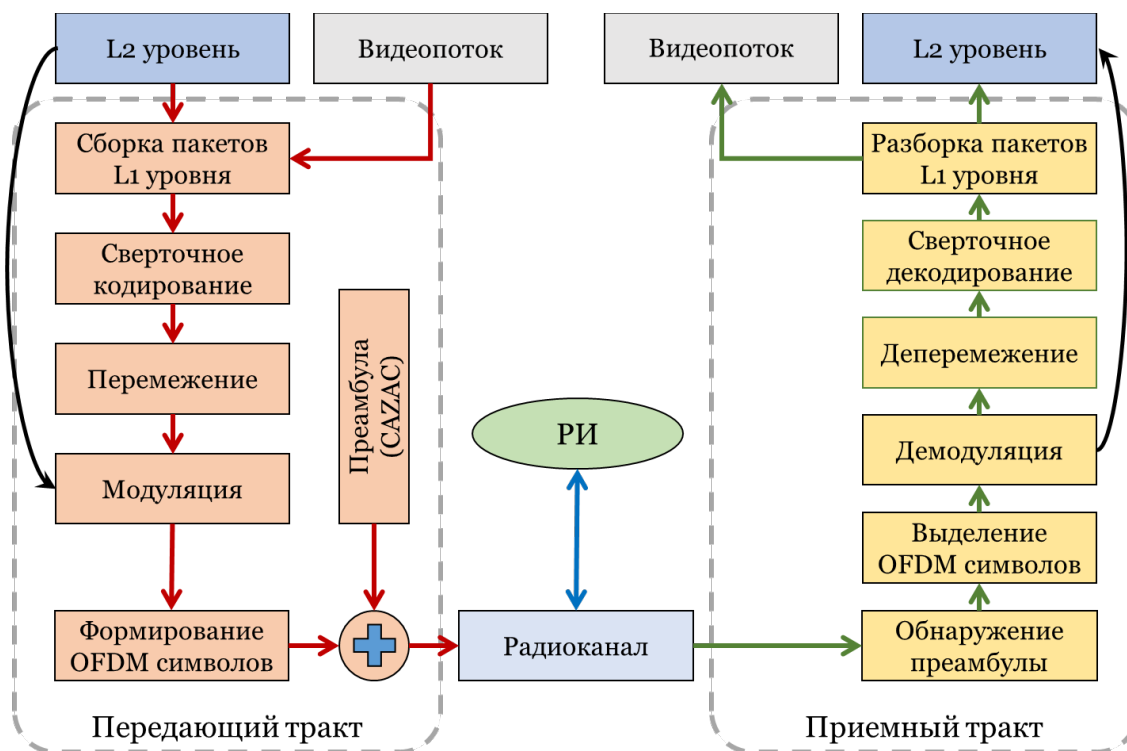


Рисунок 27 – функциональная схема L1 уровня

Список литературы и используемых источников

1. Лекции по курсу «Системы и сети связи с подвижными объектами» / А.В. Бакке – Рязань, 2020.
2. [Радиосистема управления беспилотными объектами. Часть 3 / А.В. Баранова – Рязань, 2018.](#)
3. [Радиосистема управления беспилотным аппаратом. Часть 3 / И.И. Макаркин – Рязань, 2017.](#)
4. [Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015 – 312 с.](#)