1. Назначение, область применения
2. Сравнение
3. Описание и своя задача
4. Описание аппаратной части и требования к коду
5. Энергетические характеристики канала связи
6. Выбор и обоснование сигнально-кодовых конструкций
7. Разработка АПК для системы
8. **Назначение, область применения**

Система КТР предназначена для пересылки командно-телеметрической информации между устройством и комплексом управления. В качестве первых могут выступать БПЛА. На сегодняшний день БПЛА активно развиваются. Из-за этого приходится постоянно пересматривать требования выдвигаемые к командно-телеметрическому каналу связи между БПЛА и наземным комплексом управления.

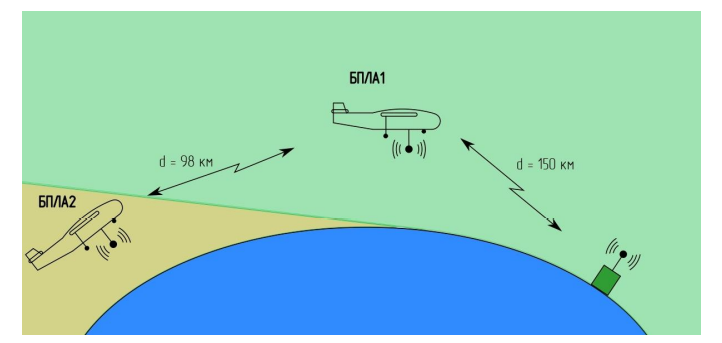


Рисунок – Работа система КТР

Учитывая их внушительную область применения в военной (авиаразведка, нанесение ударов по наземным и морским целям, перехват воздушных целей, постановка огнем и целеуказания, ретрансляция сообщений и данных, доставка грузов), гражданской (доставка грузов, тушение пожаров, перевозка пассажиров), а также космических сферах становится очевидным актуальность системы КТР.

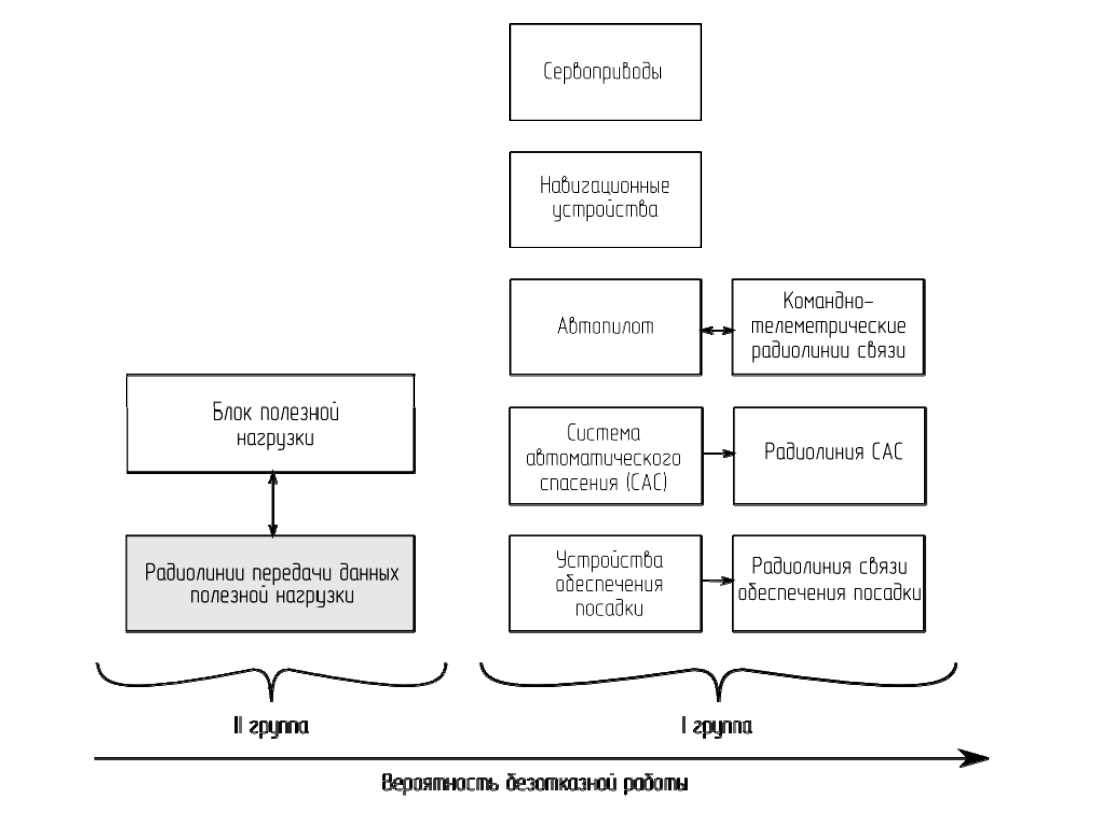


Рисунок – Упрощенная классификация радиоэлектронного оборудования БПЛА по вероятности безотказной работы

Как видно из рисунка система командно-телеметрической радиолинии связи входит в первую группу, что означает повышенные требования к её отказоустойчивости. Для удовлетворения требований по пропускной способности канала связи при передаче как данных телеметрии так и данных полезной нагрузки, необходимо

1. **Сравнение**

Решаемые задачи:

- Передача командной информации с наземной станции управления на борт летательного аппарата.

- Передача телеметрической информации с борта летательного аппарата на наземную станцию управления

Диапазон рабочих частот, Полоса занимаемых частот, Скорость передачи данных, Дальность действия, Вид модуляции, Интерфейсы связи

**РМ-02М2**

Командно-телеметрический радиомодем РМ-02М2 предназначен для двустороннего полудуплексного обмена данными между БПЛА и наземной станцией управления на расстояниях до 30 км.

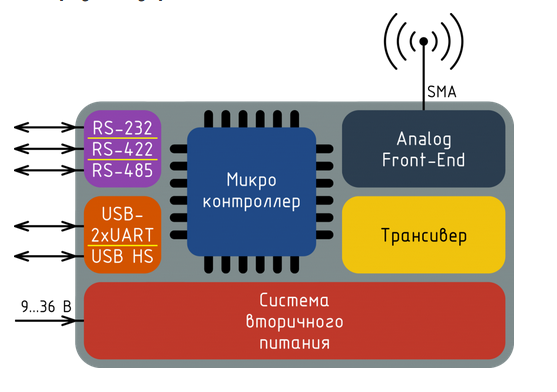


Рисунок – Структурная схема радиомодема РМ-02М2

**РМ-16**

Командно-телеметрический радиомодем РМ-16М предназначен для двустороннего полудуплексного обмена данными между БПЛА и наземной станцией управления на расстоянии до 100 км.

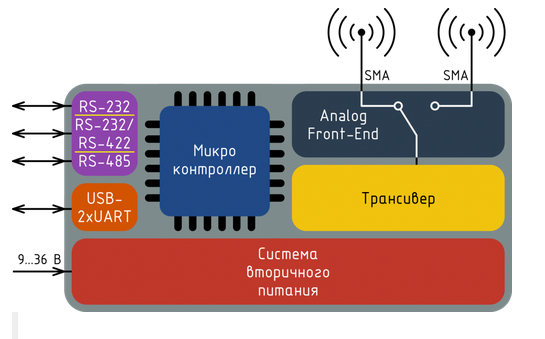


Рисунок – Структурная схема модема РМ-16

**3D Link**

Цифровой модем 3D Link предназначен для организации видео- и командно-телеметрического каналов связи с малыми робототехническими комплексами в сложных условиях распространения радиосигнала.

Модем построен на базе уникальной технологии OFDM, способной формировать сигналы с высокой спектральной эффективностью и сигналы с расширенным спектром, что обеспечивает информационную скорость до 64 Мбит/с в видеоканале, а также отличную помехозащищенность в командно-телеметрическом канале. Отдельный модем для команд и телеметрии больше не нужен.

Видеоканал подключается через интерфейс Ethernet, канал команд и телеметрии — через интерфейсы Ethernet, RS232 или CAN.

Таблица – Сравнение характеристик радиомодемов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Модем | Диапазон рабочих частот, МГц | Полоса занимаемых частот, кГц | Скорость передачи данных | Дальность действия в условиях прямой видимости, км | Выходная мощность, дБм |
| РМ-16 | 860-1020 | 500 | до 115,2 (1-30 кбит/с в режиме LoRa) | 100 | 30 |
| РМ-02М2 | 2400-2483,5 | 1000 | до 250 кбит/с | 30 | 23 |
| 3D Link | 2400-2500 | до 20 | 15-85 кбит/с | 83 | 29.5 |
| Мое | от 7,8 до 500 | до 300 | посмотреть | 190 | 30 |

Таблица – Сравнение характеристик модемов (Продолжение)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Модем | Интерфейсы | Тип | Виды модуляции |
| РМ-16 | RS-232х2, RS-485, USB | Полудуплекс | FSK, GFSK |
| РМ02-М2 | RS-232, RS-422, RS-485, 2xUSB | Полудуплекс | FSK, GFSK |
| 3D-Link | Ethernet 100 Base-TX, RS-232, CAN, USB | Дуплекс | BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM |
| Мое | Ethernet 100 Base-TX, RS-232, CAN, USB | Дуплекс | FSK, LoRa |

**4. Описание аппаратной части и требования к коду**

В состав устройства входят:

1. Два радиотракта на основе радиомодуля SX1276
2. Микроконтроллер STM32F7
3. Два импульсных регулятора напряжения LM5005
4. Ethernet модуль KSZ804NL
5. Преобразователь интерфейсов CP2102-GMR
6. CAN модуль MAX3051EKA

Краткое описание:

1. **SX1276**

SX1276 представляет собой радиомодуль поддерживающий модуляции LoRa, FSK. Данный модуль может обеспечить бюджет канала связи до 168 дБ. Имеет высокую чувствительность (до 148 дБ). Малый ток потребления в режиме передачи

Таблица – характеристики модуля SX1276

|  |  |
| --- | --- |
| Поддерживаемые модуляции | FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK |
| Максимальный бюджет, дБ | 168 |
| Максимальная мощность выходного сигнала, дБм | 20 |
| Коэффициент усиления УМ, дБ | 14 |
| Скорость передачи данных, кбит/с | до 300 |
| Потребление в режиме приема, мА | 9.9 |
| Погрешность интегрированного синтезатора частот, Гц | 61 |
| Входной динамический диапазон, дБ | 127 |
| Размер полезной нагрузки, байт | 256 |
| Полоса частот выходного сигнала, МГц | 137 до 1020 |
| Диапазон частот, кГц | от 7,8 до 500 |
| Аппаратный CRC | есть |
| Детектирование преамбулы | есть |

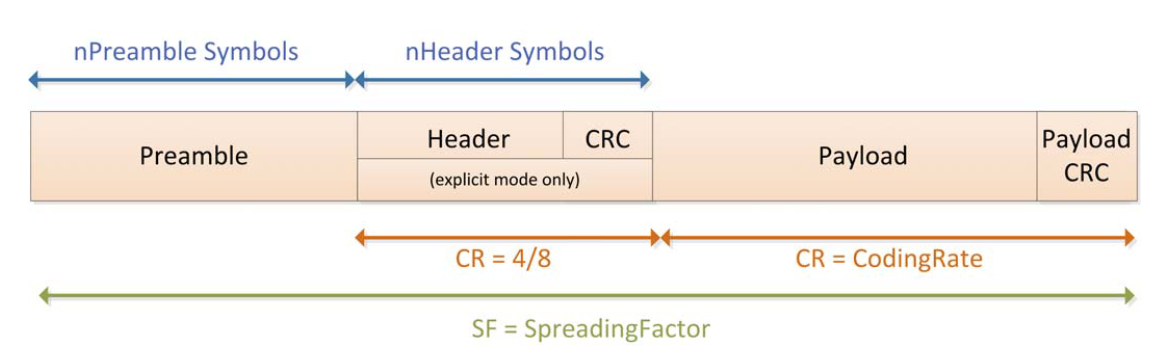


Рисунок – Структура кадра

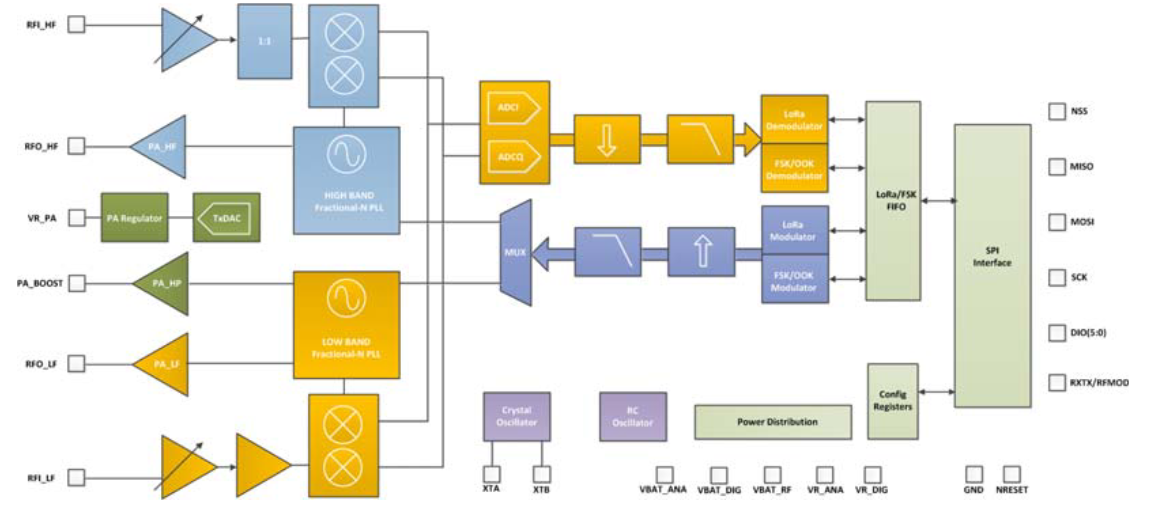


Рисунок – Структурная схема SX1276

1. **STM32F7**

STM32F7 микроконтроллер компании ST Microelectronics спроектированный на основе архитектуры ARM Cortex-M7. Имеет следующие характеристики:

Таблица – Общие характеристики микроконтроллера

|  |  |
| --- | --- |
| Размер l кэша, кБ | 16 |
| Размер D кэша, кБ | 16 |
| Количество DMA контроллеров | 2 + 1 для Ethernet |
| Максимальная тактовая частота, МГц | 216 |
| Размер памяти для хранения данных в режиме низкого потребления, кБ | 4 |
| Размер памяти для обработки критических ко времени данных, кБ | 128 |
| Размер памяти для критичных ко времени инструкций, кБ | 16 |
| Модуль для вычислений с плавающей точкой | есть |

Таблица – Периферия микроконтроллера

|  |  |
| --- | --- |
| Название | Количество |
| USB 2.0 | 2 |
| SDIO | 1 |
| USART | 4 |
| UART | 2 |
| SPI | 4 |
| I2C | 2 |
| CAN 2.0 | 1 |
| HDMI-CEC | 1 |
| Ethernet | 1 |
| Dual mode Quad-SPI | 2 |
| I2S |  |
| SAI | 2 |
| 12-bit DAC | 2 |
| 16-bit timers |  |
| 32-bit timers |  |
| 12-bit ADC | 3 |

1. **Импульсный преобразователь напряжения**

Высоковольтный понижающий преобразователь LM5005 обладает всеми функциями, необходимыми для реализации эффективного импульсного стабилизатора высокого напряжения с минимальным количеством внешних компонентов. Этот простой в использовании преобразователь работает в диапазоне входных напряжений от 7 В до 75 В и обеспечивает максимальный выходной ток 2,5 А. Архитектура контура управления основана на управлении по току с использованием эмулируемой рампы тока для обеспечения высокой помехоустойчивости. Управление по току обеспечивает встроенную прямую связь по линии, поцикловую защиту от перегрузки по току и простую компенсацию контура. Использование эмулируемой рампы управления снижает чувствительность схемы ШИМ к шуму, обеспечивая надежное управление небольшими рабочими циклами, необходимыми в приложениях с высоким входным напряжением. Частота коммутации программируется резистором в диапазоне от 50 кГц до 500 кГц. Чтобы уменьшить электромагнитные помехи, вывод синхронизации генератора позволяет нескольким регуляторам LM5005 выполнять самосинхронизацию или синхронизацию с внешним тактовым сигналом. Дополнительные функции защиты включают настраиваемый плавный пуск, отслеживание внешнего источника питания, отключение при перегреве с автоматическим восстановлением и возможность удаленного отключения.

Таблица – Характеристики преобразователя напряжения

|  |  |
| --- | --- |
| Диапазон входного напряжения, В | от 7 до 75 |
| Регулируемое выходное напряжение, В | от 1,225 |
| Выходной ток, А | до 2,5 |
| Диапазон температур, °C | от -40 до 125 |
| Точность напряжения обратной связи | ±1,5 % |
| Частота переключения | от 50 кГц до 500 кГц |
| Минимальное включение ШИМ, нс | 80 |
| Внутренний высоковольтный стабилизатор напряжения смещения | есть |
| Дополнительный источник питания смещения для VCC | есть |

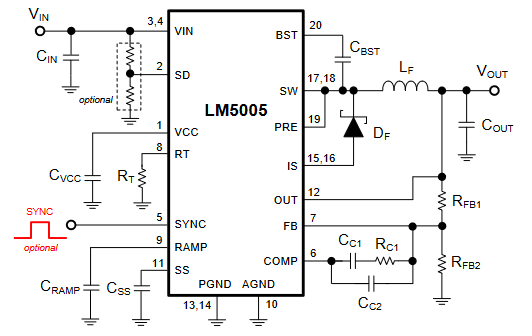


Рисунок – Типовая схема включения преобразователя напряжения в схему

**4.KSZ8041NL**

KSZ8041NL — это приемопередатчик физического уровня, обеспечивающий MII/RMII интерфейсы для передачи и приема данных. Конструкция смешанных сигналов увеличивает расстояние передачи сигналов при одновременном снижении энергопотребления.

HP Auto MDI/MDI-X представляет собой наиболее надежное решение, устраняющее необходимость различать перекрестные и прямые кабели. KSZ8041NL представляет собой новый уровень функций и производительности и является идеальным выбором приемопередатчика физического уровня для приложений 10Base-T/100Base-TX.

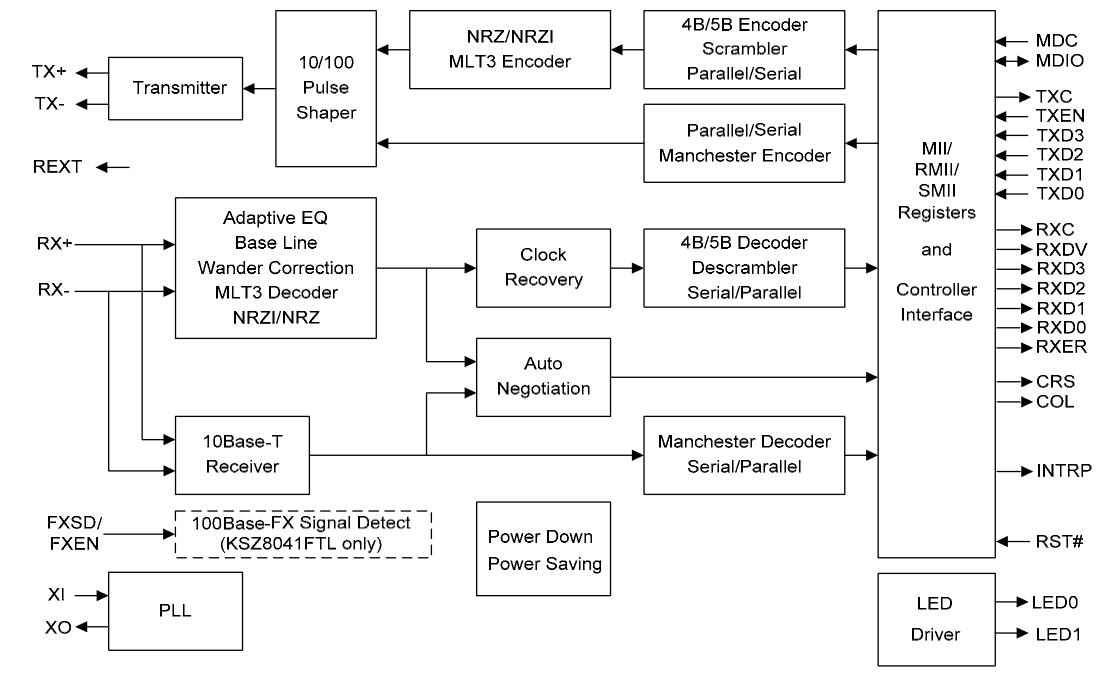


Рисунок – Структурная схема приемопередатчика Ethernet

1. **CP2102-GMR**

СР21хх – это двунаправленные преобразователи интерфейсов UART - USB (мосты). Они предназначены для добавления интерфейса USB в различные приборы, построенные на базе микроконтроллеров и не имеющих интерфейса USB, а также для обновления уже существующих приборов, требующих перехода на современный интерфейс USB.  
Микросхемы СР21хх – это интегрированное решение, на одном кристалле расположены:   
-контроллер USB интерфейса спецификации 2.0, работающий в режиме USB-device со скоростью передачи данных до 12Мбит/сек  
-контроллер UART с поддержкой всех модемных сигналов (линий квитирования)   
-память EEPROM для хранения настроек микросхемы (например, Vendor ID, Product ID, Serial Number, Max Power и др)   
-раздельные буферы с объемом более 512б для приема и передачи данных  
-тактовый генератор на 48 МГц, поэтому в системе не потребуется внешний генератор  
-регулятор напряжения позволяет подключать внешнюю нагрузку в режимах питания от шины.   
Благодаря тому, что большинство элементов интегрировано на кристалле, для разработки преобразователей интерфейсов на основе микросхем СР21хх требуется минимальное количество внешних компонентов, только двух внешних фильтрующих конденсаторов на линию питания. Для обеспечения помехозащищенности микросхемы рекомендуется использовать подтягивающий резистор на 2 кОм (на линию /RESET). Также, для стойкости к электростатическим разрядам можно использовать защитные диоды.

1. **MAX3051**

MAX3051 обеспечивает возможность дифференциальной передачи на шину и возможность дифференциального приема на контроллер CAN. MAX3051 в первую очередь предназначен для приложений с однополярным питанием +3,3 В, которые не требуют строгой защиты от сбоев, предусмотренной автомобильной промышленностью (ISO 11898). MAX3051 имеет четыре различных режима работы: высокоскоростной режим, режим управления наклоном, режим ожидания и режим отключения. Высокоскоростной режим позволяет передавать данные со скоростью до 1 Мбит/с. Режим управления наклоном можно использовать для программирования скорости нарастания передатчика для скорости передачи данных до 500 кбит/с. Это снижает влияние электромагнитных помех, что позволяет использовать неэкранированный витой или параллельный кабель. В режиме ожидания передатчик выключен, а приемник находится на высоком уровне, переводя MAX3051 в слаботочный режим. В режиме выключения передатчик и приемник выключены.

**Радиоинтерфейс LoRa**

Физический радиоинтерфейс LoRa основан на использовании широкополосных радиосигналов с большой базой B, много большей единицы. Данный вид радиосигналов имеет две главные особенности:

* ширина спектра радиосигнала BW значительно больше скорости передачи данных *R* *b* (*BW* *>>* *Rb*);
* корреляционная функция существенно уже корреляционной функции узкополосного радиосигнала с базой *B ~1*.

Частотная избыточность широкополосного радиосигнала обуславливает его высокую помехоустойчивость, а узкая корреляционная функция – высокую точность временной синхронизации.

Широкополосный радиосигнал LoRa представляет собой сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) или CSS (Chirp Spread Spectrum). Частота CSS радиосигнала может как увеличиваться (up-chirp), так и уменьшаться (down-chirp). Математически ЛЧМ сигнал представляется в виде выражения:

Широкополосный радиосигнал LoRa

и описывается следующими параметрами:

***BW*** – ширина спектра радиосигнала;  
    Центральная (несущая) частота радиосигнала – центральная (несущая) частота радиосигнала;

Нижняя частота радиосигнала – нижняя частота радиосигнала;

Верхняя частота радиосигнала – верхняя частота радиосигнала;

***SF*** – коэффициент расширения спектра (изменяется в диапазоне от 7 до 12);  
**Tsym = 2SF/BW** – длительность радиосигнала;  
Cкорость изменения частоты радиосигнала  – скорость изменения частоты радиосигнала;

**B = BW•Tsym = 2SF** – база радиосигнала.

Здесь коэффициент расширения спектра (SF) определяет разрядность символа данных (в битах), передаваемого через радиоинтерфейс за время *Tsym*.  
На Рис. 5 приведен вид ЛЧМ сигнала во временной области, а на Рис. 6 и Рис. 7 показан его спектр с BW=125кГц и базой равной 128 (SF=7) и 4096 (SF=12) соответственно.



Рисунок – Временная диаграмма сигнала



Рисунок – Спектр сигнала

Передатчики LoRa формируют CSS радиосигналы с шириной спектра (BW) 125, 250 или 500 кГц (однако проект регионального частотного диапазона для Российской Федерации, подразумевает использование только полосы 125кГц). При фиксированной ширине спектра радиосигнала BW изменение его базы осуществляется за счет изменения длительности Tsym и скорости изменения частоты мю.

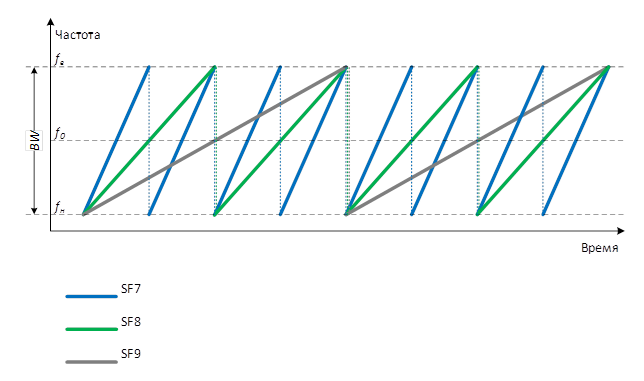


Рисунок – Временная диаграмма изменения частоты сигнала

**Синхронизация приемника и передатчика**

Для успешного функционирования любой системы обмена информацией необходима взаимная синхронизация приемника и передатчика, позволяющая определить временные границы приема-передачи как целого блока данных (или кадра), так и единичных символов.  
Технология LoRa использует асинхронный режим приема-передачи при котором передатчик может начать генерацию радиосигнала в любой момент времени. В этом случае требуется механизм, обеспечивающий синхронизацию приемника по сигналу от передатчика (аналог "старт-бита" протокола RS232). В качестве такого механизма используется преамбула, предшествующая каждому сеансу связи. Преамбула включает в себя последовательность символов, позволяющих приемнику обнаружить активность передатчика, определить используемый передатчиком коэффициент расширения спектра (SF) и выполнить символьную синхронизацию. Длительность преамбулы является конфигурируемой величиной и должна быть не менее, чем *T1+2T2*, где *T1* определяет максимальное время нахождения приемника в состоянии "сна" (Sleep), *T2* – определяет время поиска приемником преамбулы (Рис. 9).

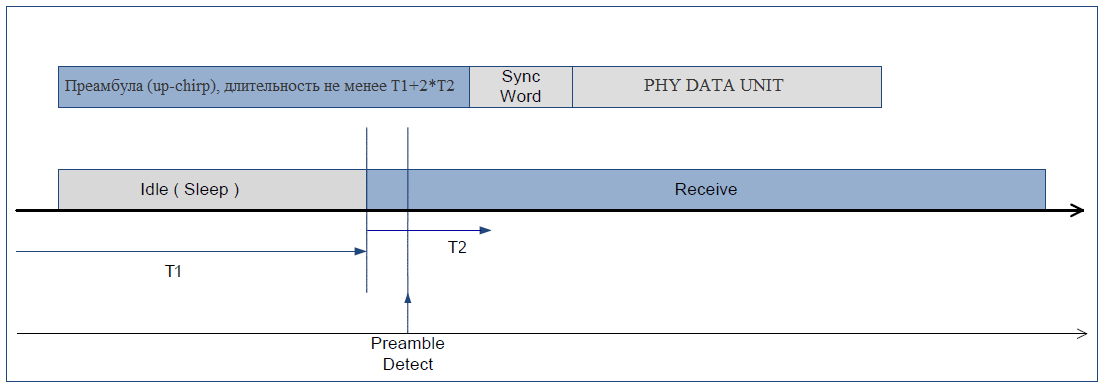
[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic9.png)

Рисунок – Распространение кадров

По завершении преамбулы следует слово синхронизации (Sync Word) и блок данных физического уровня. Длина слова синхронизации настраивается в диапазоне от 1 до 8 байт. Спецификацией LoRa определен ряд специфических значений Sync Word – 0x34 для публичных сетей (public networks), 0x12 – для частных сетей (private networks) и 0xC194C1 – для каналов с FSK модуляцией.

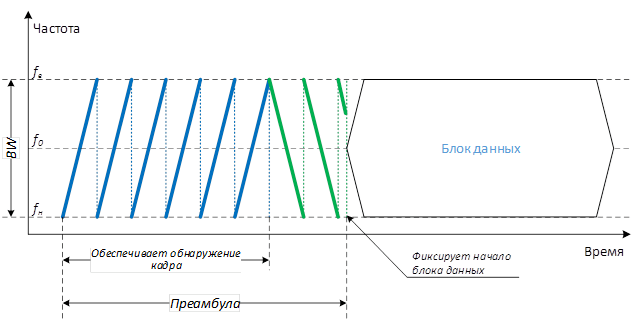
[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic10.png)

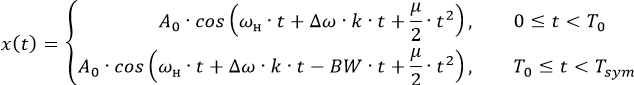
Рисунок – Структура кадра обеспечивающего передачу одного блока данных

**Детектирование CSS сигнала**

Механизм функционирования детектора преамбулы основан на использовании согласованного фильтра (СФ), чья импульсная характеристика комплексно сопряжена с CSS радиосигналом в частотной области и имеет зеркальное отображение его во времени:

Импульсная характеристика

Принцип передачи символов информации блока данных физического уровня (PHY DATA UNIT) посредством широкополосного радиосигнала LoRa заключается в частотном смещении Частотное смещение относительно опорного ЛЧМ радиосигнала Опорный ЛЧМ радиосигнал, где k=0,1,2,…,2SF – информационный символ, размерностью SF бит (Рис. 11):



*Рис. 11:*

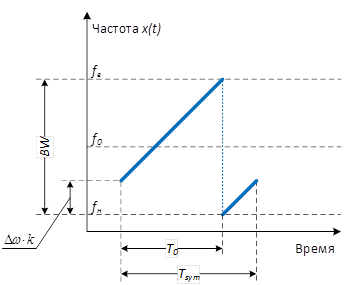
[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic11.png)

Рисунок – Пример передачи одного символа

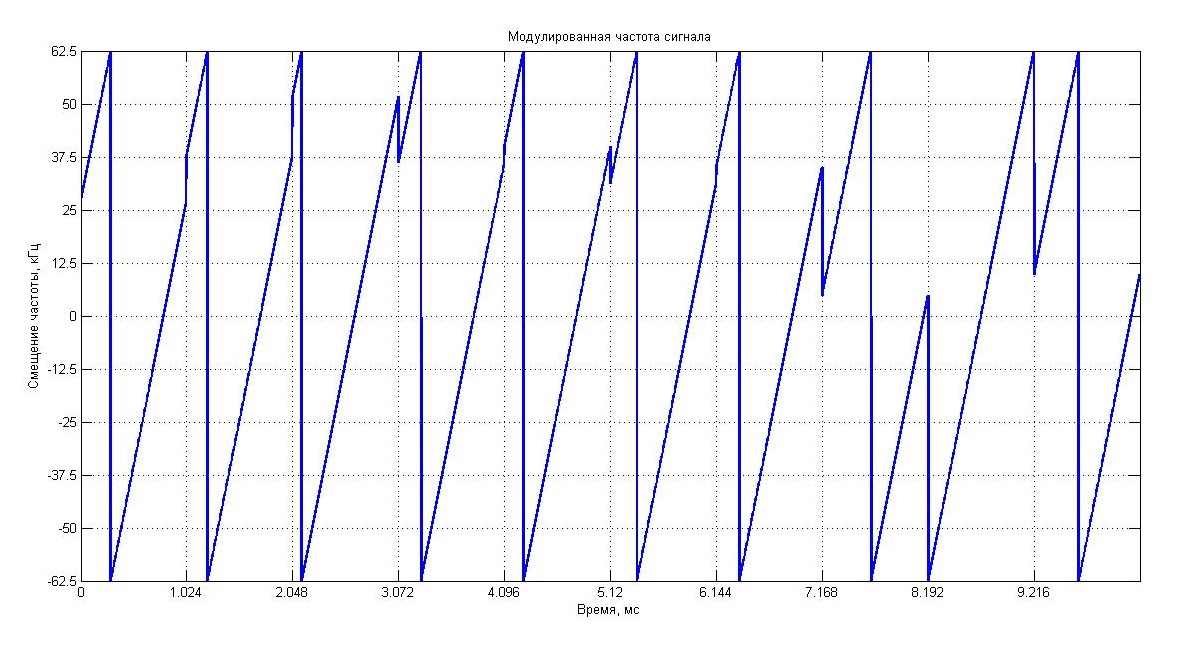
[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic12.png)

Рисунок – Пример зависимости частоты радиосигнала от времени для кадра LoRa

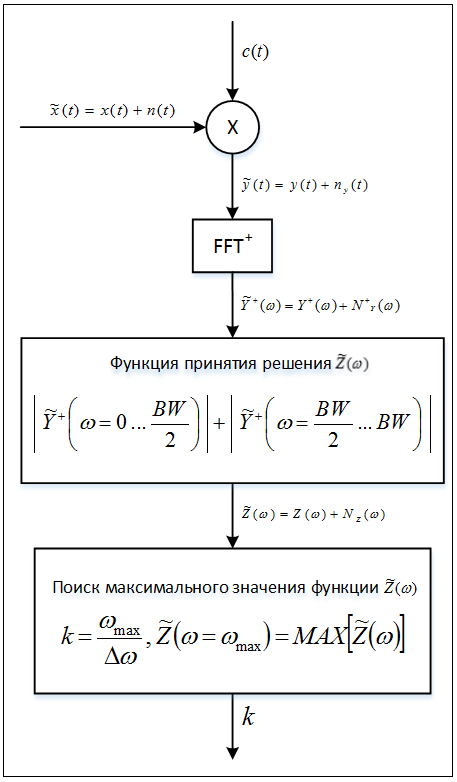
[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic13A.png)

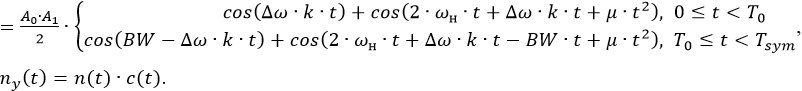
Рисунок ­­– Возможная схема приемника сигнала LoRa, переносящего блок данных физического уровня.

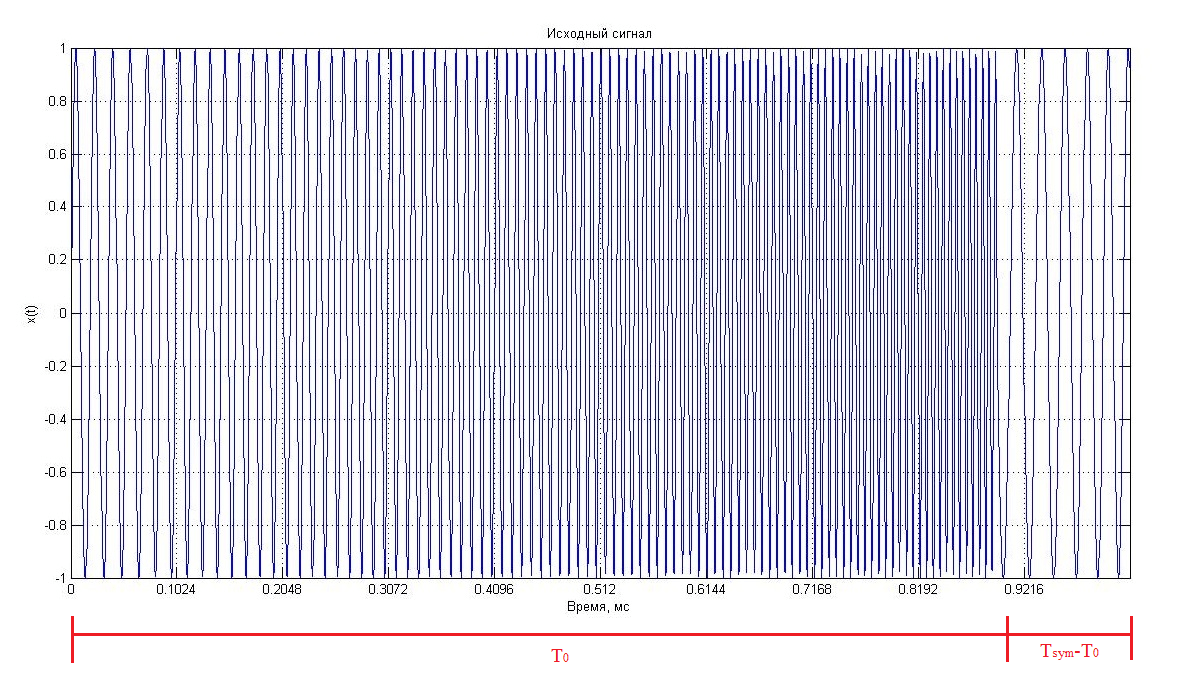
Здесь:

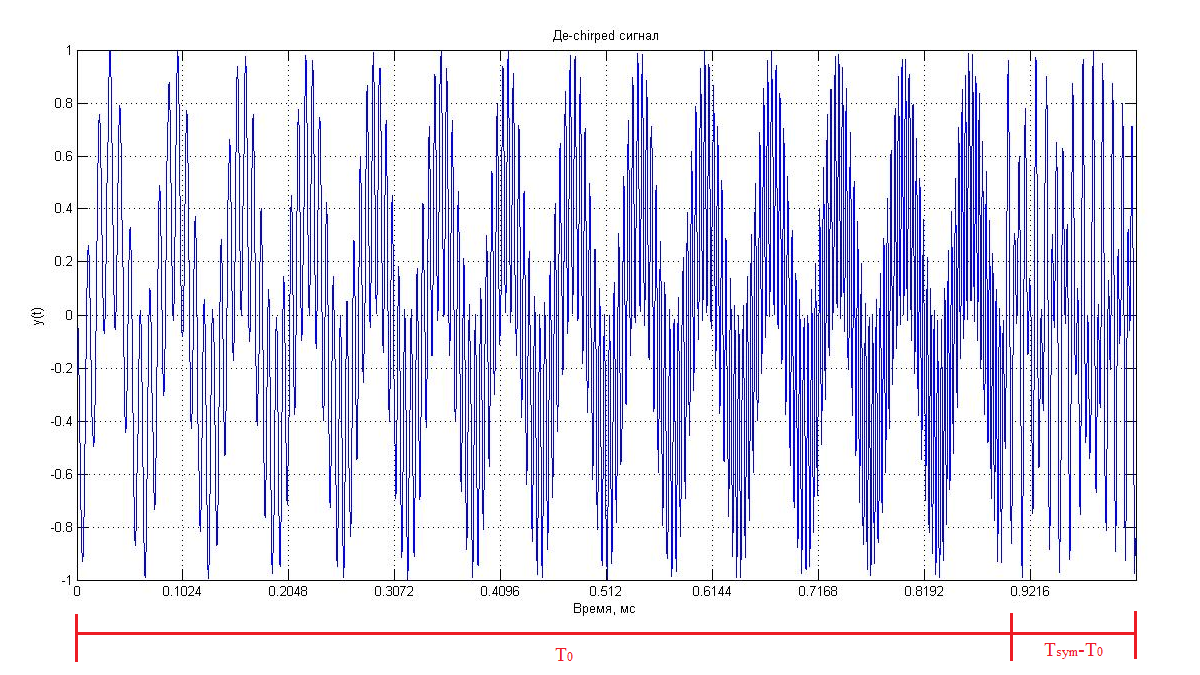
Эталонный ЛЧМ сигнал  – эталонный ЛЧМ сигнал,

Аддитивный белый Гаусовский шум,– аддитивный белый Гаусовский шум,

Де-chirped сигнал: Де-chirped сигнал



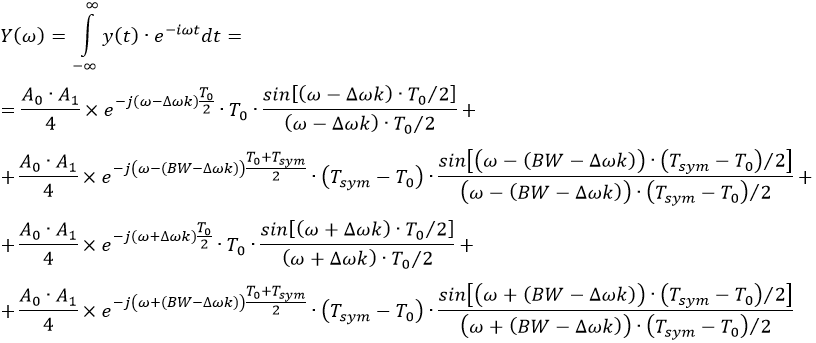
[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic14.png)

[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic15.png)

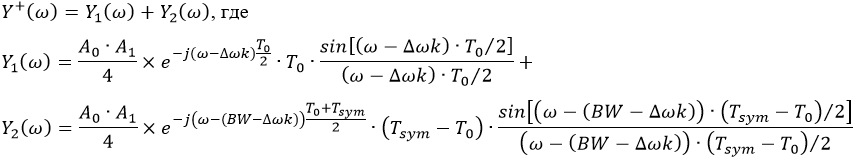
Отбросив в выражении для **y(t)** вторые слагаемые в фигурных скобках (как высокочастотные составляющие):

Де-chirped сигнал

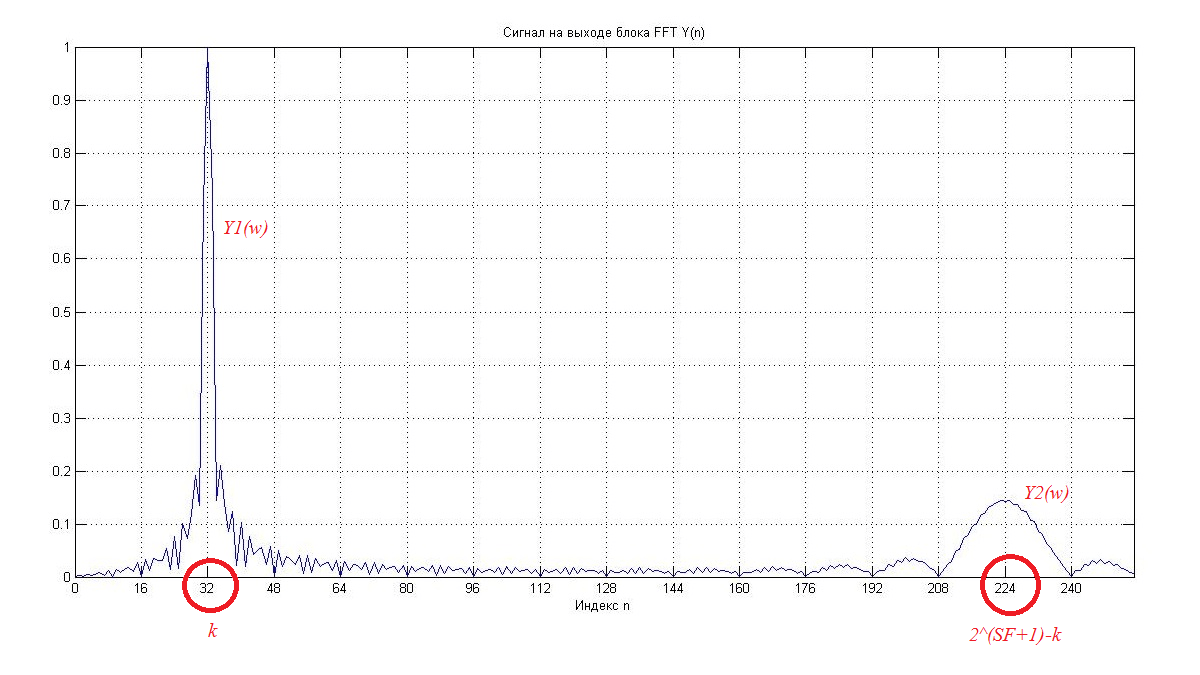
на выходе блока преобразования Фурье (FFT+) получаем следующий комплексный сигнал:



Далее избавляемся от двух последних слагаемых, имеющих существенное влияние в области отрицательных частот и низкое в области положительных:

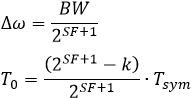


*Рис. 16:*

[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic16.png)

Для того чтобы избежать перекрытия двух слагаемых Y при различных значениях k должно выполняться неравенство: Неравенство.

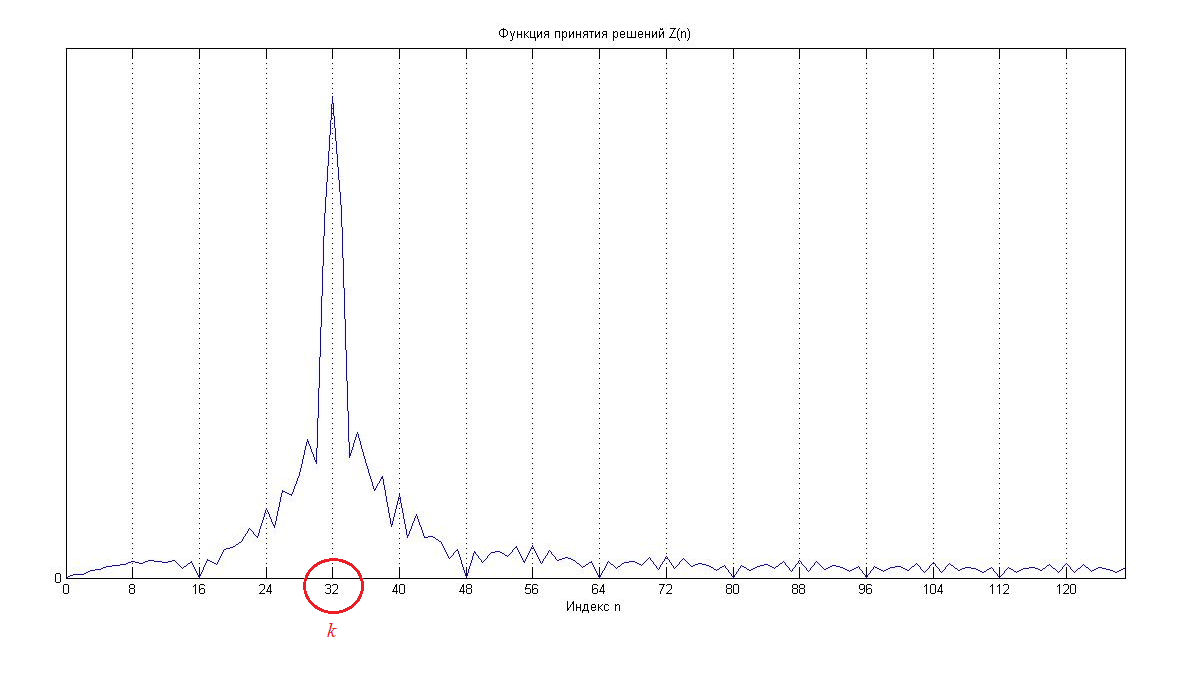
Следовательно,



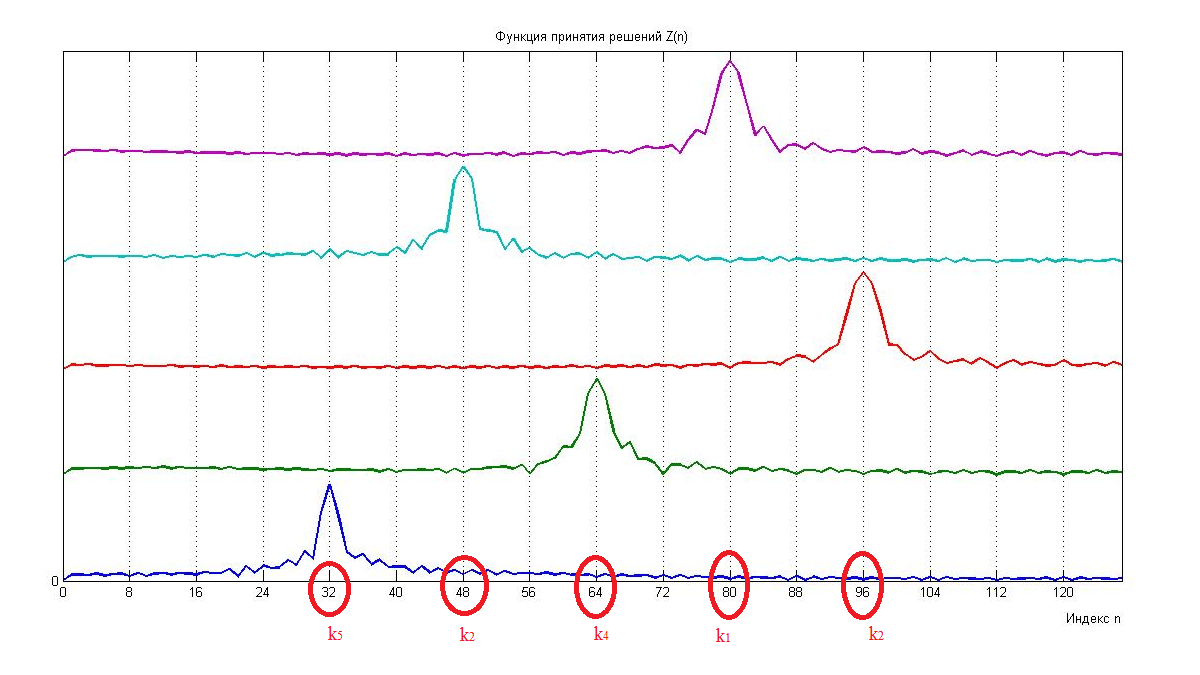
На следующем этапе вычисляется функция принятия решения Функция принятия решения, представляющая собой сумму модулей функции Функция Y и функции Функция Y, зеркально отраженной относительно точки Фаза

Функция принятия решения

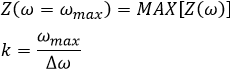
*Рис. 17:*

*[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic17.png)*

*Рис. 18:*

[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic18.png)

Наконец определяем значение декодированного приемником информационного символа k.  
Для этого находим частоту Частота, при которой функция принятия решения Функция принятия решенияпринимает максимальное значение (Максимальное значение частоты):



Ключевой особенностью радиоинтерфейса LoRa (как уже упоминалось выше) является его высокая помехоустойчивость. Рисунки ниже демонстрируют функционирование описанного детектора сигнала LoRa в условиях аддитивного белого гаусовского шума (отношение сигнал/шум SNR=0dB). А в Табл. 14 приведены результаты моделирования в среде Matlab работы детектора при различных отношениях сигнал/шум и коэффициентах расширения спектра.

*Рис. 19:*

[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic19.png)

*Рис. 20:*

[](https://itechinfo.ru/sites/default/files/lora/pic20.png)

**5. Энергетические характеристики канала связи**

Канал связи имеет следующие характеристики:

1. Выходная мощность передатчика Pвых = 30 дБ
2. Потери в радиотракте передатчика Ltx = 3 дБ
3. Коэффициент усиления передающей антенны Gtx = 2 дБи
4. Коэффициент усиления приемной антенны Grx = 2 дБи
5. Потери в радиотракте приемника Ltx = 3 дБ
6. Запас по энергетике канал Lm = 20 дБ

Для расчета бюджета канала связи сначала необходимо определить чувствительность приемника, которая вычисляется из необходимого отношения сигнал/шум для заданной вероятности битовой ошибки (BER). На рисунке 4 приведены аналитические зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения сигнал/шум (ОСШ, SNR) для используемой модуляции CSS (LoRa) и различных коэффициентов расширения спектра (Spreading factor, SF), для канала прямой видимости с аддитивным белым Гауссовым шумом (АБГШ)

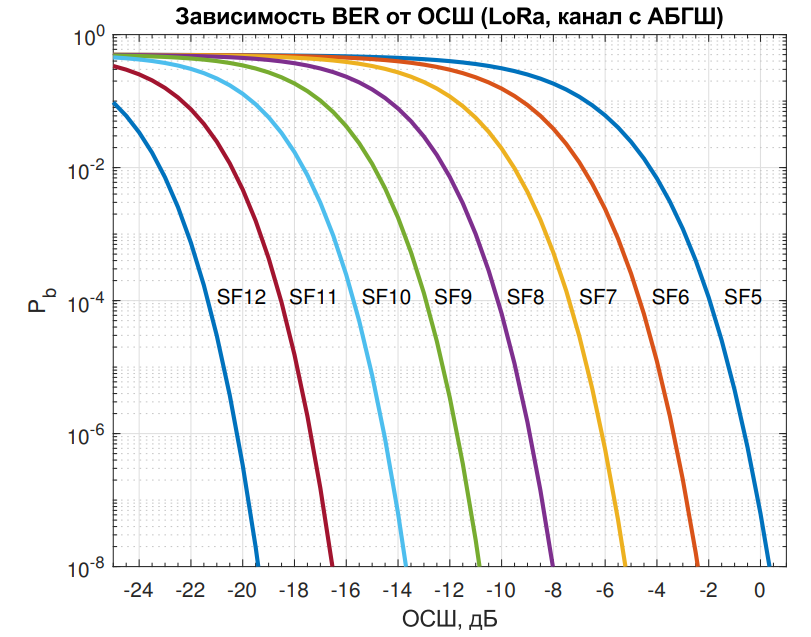


Рисунок – Зависимость BER от ОСШ для канала с АБГШ

Таблица – Отношения сигнал/шум при различных коэффициентах расширения спектра для типичной вероятности битовой ошибки командно-телеметрических радиоканалов BER = 10-8

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| SF | Чип/символ | Порог ОСШ, дБ |
| 5 | 32 | 0,40 |
| 6 | 64 | -2,40 |
| 7 | 128 | -5,20 |
| 8 | 256 | -8,00 |
| 9 | 512 | -10,85 |
| 10 | 1024 | -13,70 |
| 11 | 2048 | -16,50 |
| 12 | 4096 | -19,40 |

Заданным коэффициентам расширения спектра также соответствуют различные скорости передачи данных BR (бит/с), формула 2:

где SF – коэффициент расширения спектра;

CR – относительная скорость сверточного кодирования;

BW – ширина полосы частот сигнала, Гц.

Для дальнейших расчетов принимается скорость сверточного кодирования CR = 4/5. Требуемой пропускной способности соответствует коэффициент расширения равный 7 (SF7). Вероятность битовой ошибки равна -5.2 дБ.

Чувствительность приёмника (в дБ) для заданных отношений сигнал шум (SNR) определяется по формуле:

Где k = 1.38 10-23 Дж/К – постоянная Больцмана

T – температура приёмника, К

BW – ширина полосы приемника, Гц

NF – коэффициент шума МШУ приёмника, дБ

Зная чувствительность приемника можно перейти к расчету канала связи между наземной станцией управления (НСУ) и БПЛА.

Для взаимности радиоканала примем выходную мощность передатчиков радиомодемов БПЛА и НСУ равной, что позволяет рассчитать радиоканал только для одного направления передачи ( с БПЛА на НСУ или с НСУ на БПЛА). Расчет бюджета канала связи производится по формуле 4:

Где L – это потери в радиоканале без учета потерь при распространении в свободном пространстве, а Lfs – допустимые для данного радиоканала потери в свободном пространстве.

Из этих уравнений можно вывести максимальную дальность передачи данных d для заданных чувствительностей приемника PRXmin:

Расчёт бюджета производится для параметров T = 300 K, NF = 3 дБ, SNR = -5.2 дБ

Расчет бюджета канала связи наземная станция управления – беспилотный летательный аппарат (430 МГц):

Минимальная чувствительность приёмника равна:

Потери в канале связи без учета потерь при распространении в свободном пространстве:

Бюджет канала связи будет равен:

Максимальная дальность связи будет равна:

Расчет бюджета канала связи наземная станция управления – беспилотный летательный аппарат (863 МГц):

Минимальная чувствительность приёмника равна:

Потери в линии связи без учета потерь при распространении в свободном пространстве:

Бюджет канала связи будет равен:

Максимальная дальность связи будет равна:

**Разработка** **АПК системы**

1. Алгоритм синхронизации устройств по радиоканалу

Так как первоначально радиомодем SX1276 был выключен требуется произвести его инициализацию. Каждое из устройств на этом этапе имеет одинаковые права. После каждое из устройсв генерирует случайное число, уходит в сон на это значение времени и после пробуждения запускает приём с заданным тайм-аутом. Далее программа ожидает прерывания от радиомодема, сигнализирующее либо о событии приема (RX\_DONE, RX\_TIMEOUT, RX\_ERROR), либо о событии передачи (TX\_DONE, TX\_TIMEOUT). Далее рассмотрим действия программы в зависимости от принятого события.

- **RX\_DONE**:

Программа анализирует принятый кадр. Если принятый кадр является кадром MASTER\_REQ, то программа корректирует синхронизирующий таймер, становится ведомым устройством, отправляет кадр SLAVE\_RESP и переходит в стандартный режим работы. Если принятый кадр был кадром SLAVE\_RESP, то устройство остается ведущим и переходит к стандартому режиму работы. Если же принятый кадр не является ни кадром MASTER\_REQ, ни кадром SLAVE\_RESP, то устройство перезапускает аппаратный таймер и отправляет кадр MASTER\_REQ, продолжая считать себя ведущим устройством.

- **TX\_DONE**:

Программа переводит радиомодем в режим приёма.

- **TX\_TIMEOUT**:

Данное событие связано с аппаратной невозможностью радиомодема отправить кадр, радиомодем сбрасывается и инициализируется по новой. После инициализации делается рандомная задержка и запускается прием на заданное время.

- **RX\_TIMEOUT**:

Время отведенное под прием закончилось. Кадр не был принят. Выполняется перезапуск аппаратного таймера и отправляется кадр MASTER\_REQ.

-**RX\_ERROR**:

Не сошлась контрольная сумма. Выполняются те же действия что и для RX\_TIMEOUT.

Ниже представлена блок-схема алгоритма синхронизации

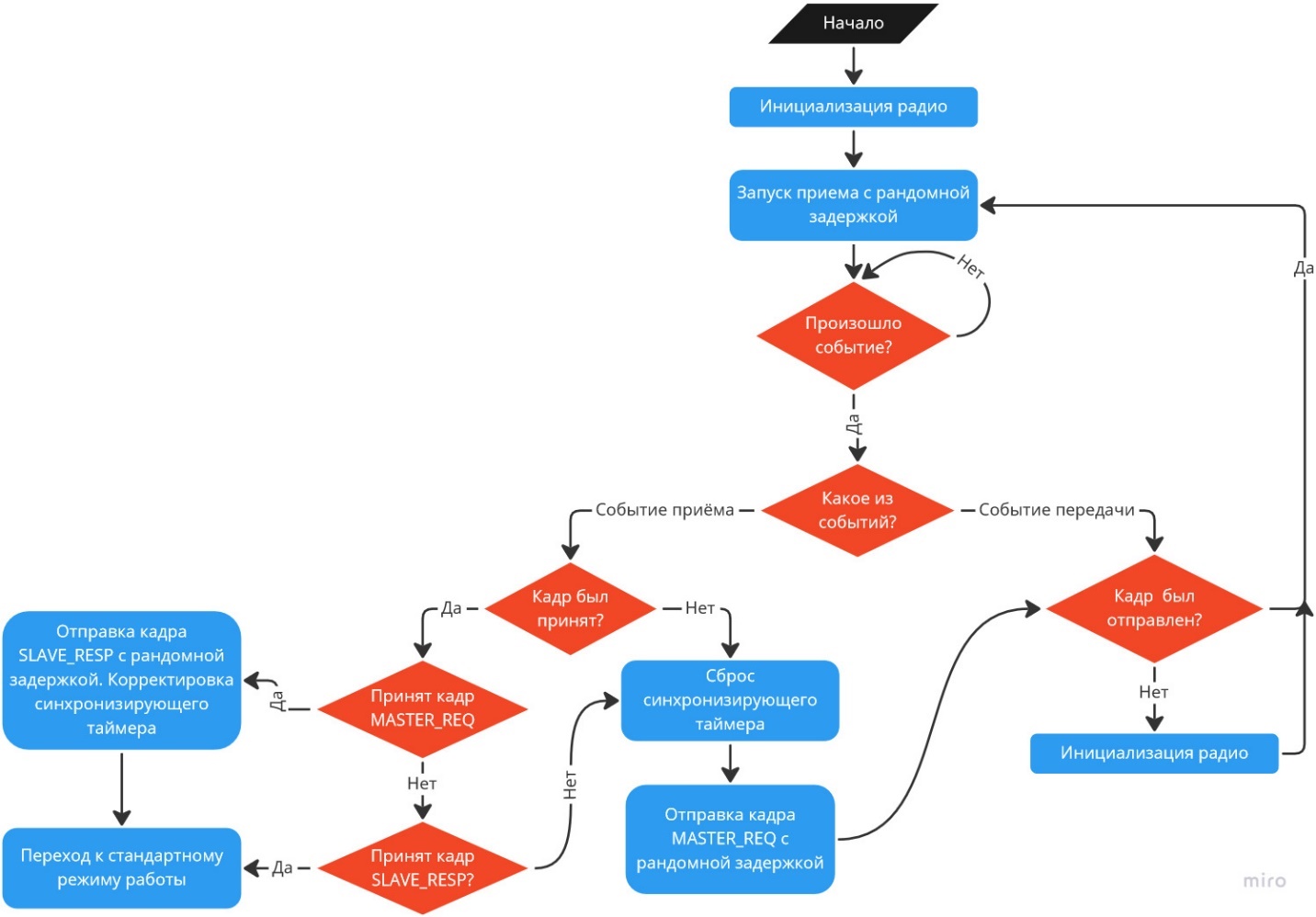


Рисунок ­­– Блок–схема алгоритма синхронизации устройств по радиоканалу

**Расчёт корректировки синхронизирующего таймера**

В расчёте участвуют три временных точки: tА, tВ, tС. Время А фиксируется на приёмной стороне в момент срабатывания прерывания от радиомодема:

tA = tIRQ.

Время B рассчитывается исходя из известного времени затрачиваемого на распространение синхронизирующего кадра от передатчика к приемнику timeOnAir и времени А:

tB = |tA – timeOnAir|

Исходя из полученного таймштампа от передающего устройства и времени В рассчитывается время С:

tC = |tB - timeStamp|

Далее вычисляется время следующего временного слота slot\_time:

slot\_time’ = tC + timeslot, если timeOnAir + timeStamp < tA

slot\_time’ = tC – timeslot, если timeOnAir + timeStamp > tA

где timeslot – стандартная длительность временного слота. После истечения временного слота с длительностью slot\_time’, синхронизирующий таймер продолжает отсчитывать временные слоты с длительностью slot\_time.

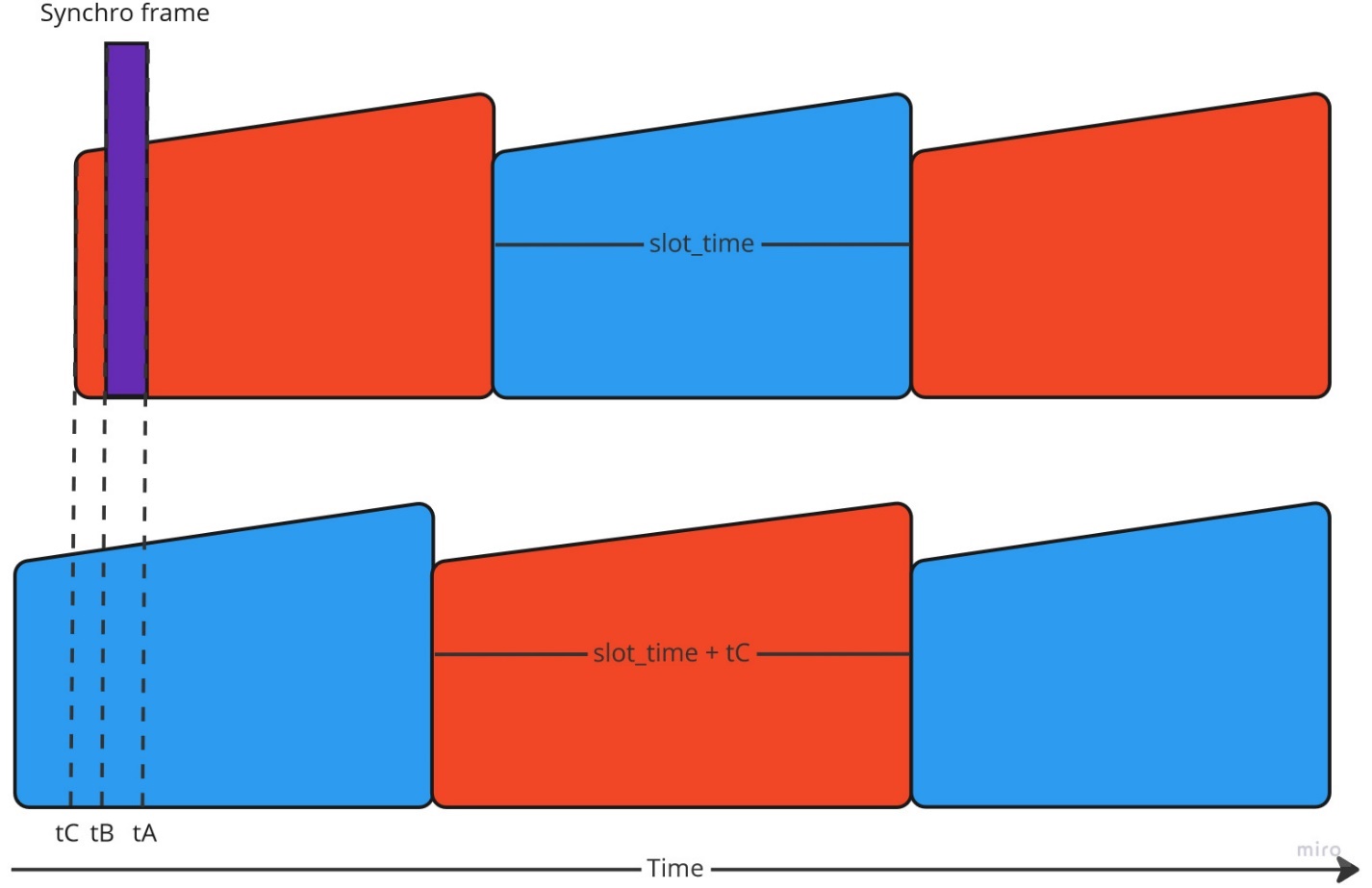


Рисунок – Временные диаграммы переключения временных слотов при приёме кадра синхронизации, при условии timeOnAir + timeStamp < tA

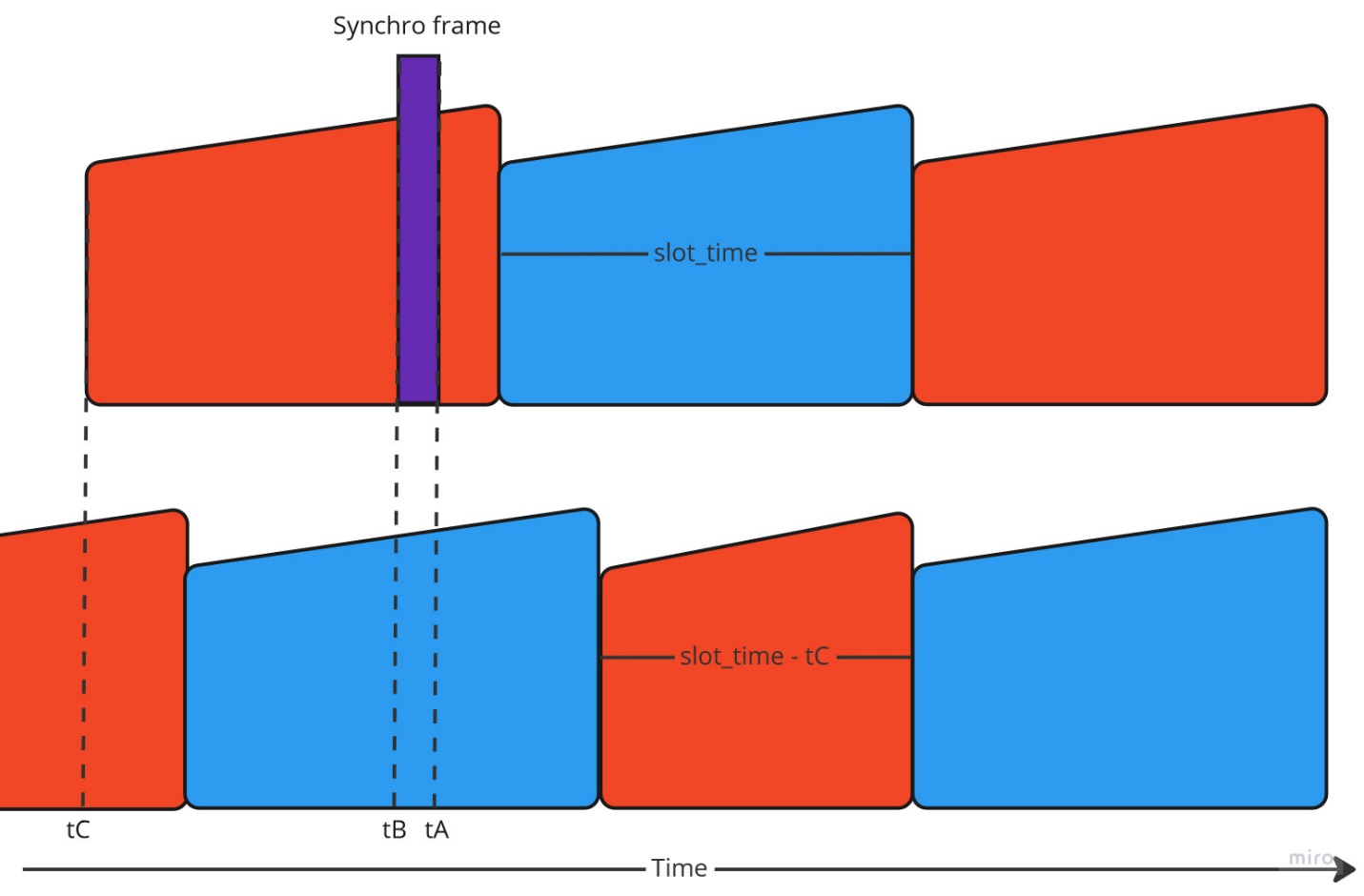


Рисунок – Временные диаграммы переключения временных слотов при приёме кадра синхронизации, при условии timeOnAir + timeStamp > tA

Литература:

1. Статья Боева
2. Википедия БПЛА
3. Даташиты на каждую микросхему
4. Статья по LoRa