

T3: LOrett StratoLink — система передачи изображений

Проект	LOrett StratoLink
Документ	Техническое задание на систему передачи изображений со стратосферного зонда
Ревизия	0.2
Дата	2026-02-26

1. Назначение

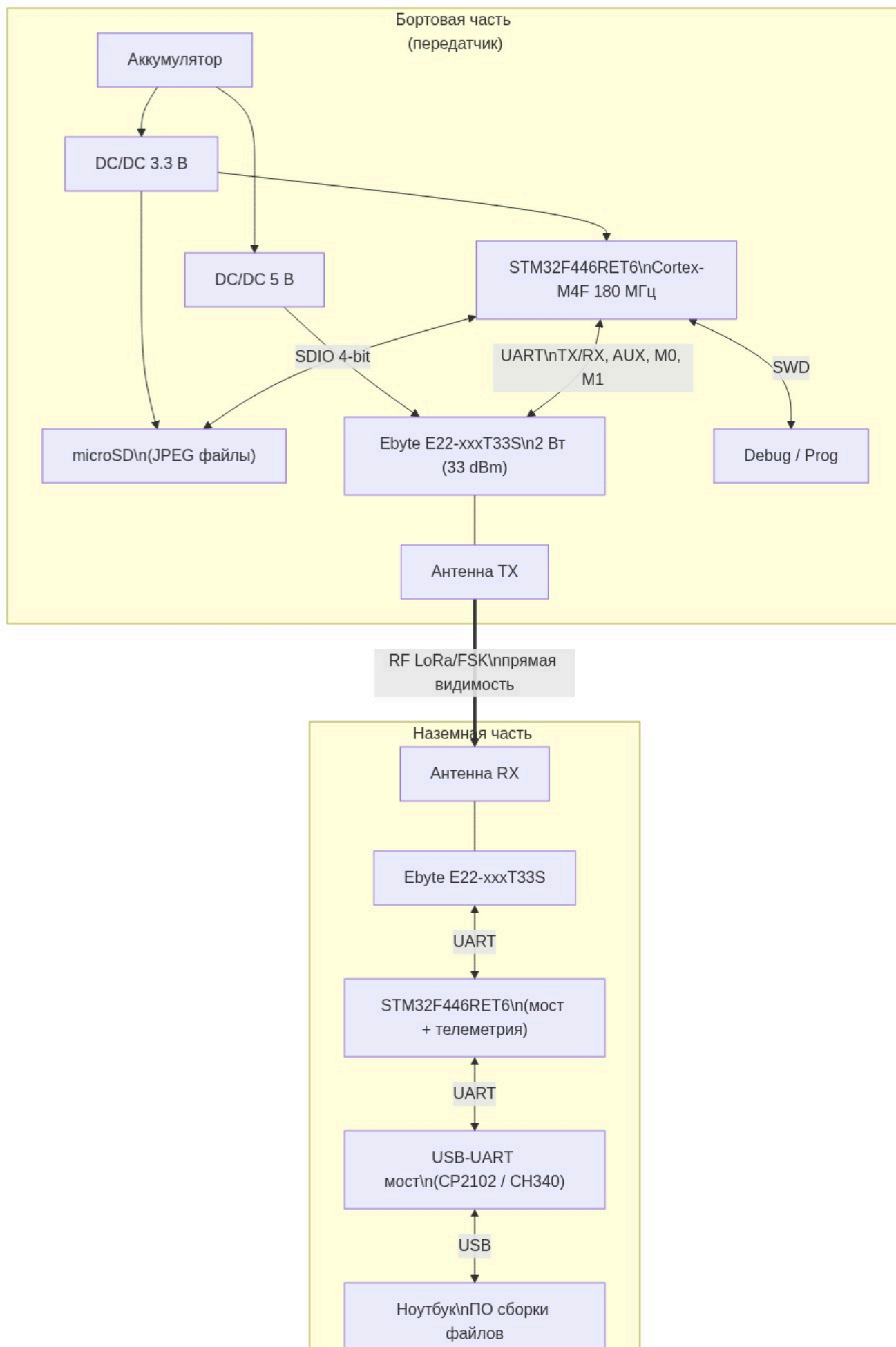
Бортовой передатчик для стратосферного зонда. Считывает заранее записанные изображения (JPEG) с microSD-карты и передаёт их по радиоканалу LoRa/FSK на наземную приёмную станцию с использованием помехоустойчивого кодирования Reed-Solomon (erasure-FEC). Наземная станция восстанавливает файлы из принятых блоков и отображает результат в графическом интерфейсе.

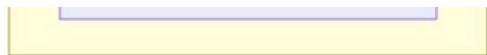
Ключевые свойства протокола:

- **Односторонняя передача** — борт только передаёт, обратный канал не требуется.
- **Erasure-FEC** — потеря до M блоков на RS-группу восстанавливается без повторной передачи.
- **Файл восстанавливается 1:1** при получении любых K из N блоков.

2. Состав системы

2.1 Структурная схема





2.2 Перечень составных частей

#	Узел	Назначение
1	Плата передатчика (борт)	MCU + microSD + радиомодуль + питание + RS-кодирование
2	Плата приёмника (земля)	MCU + радиомодуль + USB-UART мост + формирование TELEM
3	ПО наземной станции — приёмник	Приём FEC/TELEM пакетов, RS-декодирование, сборка файлов, GUI
4	ПО наземной станции — передатчик-симулятор	Тестовая утилита: кодирование и отправка по TCP

2.3 Структура репозитория

```
LorettStratoLink/
├── LorettStratoLink_tx/      # Прошивка бортового передатчика (PlatformIO, STM32Cube)
│   ├── src/                 # main.c, e22_driver.c, fec_packet.c, gf256.c, rs_encode.c, sd_fatfs.c
│   └── include/             # config.h, e22_driver.h, fec_packet.h, gf256.h, rs_encode.h, sd_fatfs.h
├── LorettStratoLink_rx/     # Прошивка наземного приёмника (PlatformIO, STM32Cube)
│   ├── src/                 # main.c, e22_driver.c, telem.c
│   └── include/             # config.h, e22_driver.h, telem.h
├── receiver/                # ПО наземной станции – приёмник (Python/PyQt5)
│   ├── stratolink_receiver.py # Главное приложение
│   ├── erasure_fec.py        # RS кодек (ErasureEncoder / ErasureDecoder)
│   ├── protocol.py           # StreamParser (FEC + TELEM)
│   ├── widgets.py            # ChunkMatrixWidget
│   ├── theme_manager.py      # Управление темами
│   ├── mainwindow.ui         # Qt Designer UI
│   └── styles/                # dark.qss, light.qss
├── transmitter/             # ПО наземной станции – передатчик-симулятор (Python/PyQt5)
│   ├── stratolink_transmitter.py
│   ├── erasure_fec.py, protocol.py, widgets.py, theme_manager.py
│   ├── transmitter.ui
│   └── styles/
├── test_images/             # Тестовые JPEG-изображения
└── requirements.txt          # PyQt5, pyserial, reedsolo
```

3. Требования к бортовому передатчику

3.1 Микроконтроллер

Параметр	Требование
Модель	STM32F446RET6 (LQFP-64)
Ядро	ARM Cortex-M4F, 180 МГц
Flash / SRAM	512 КБ / 128 КБ
Интерфейс к microSD	SDIO 4-bit (PC8–PC11 D0–D3, PC12 CK, PD2 CMD)
Интерфейс к радиомодулю	USART1 (PA9 TX, PA10 RX), 9600 бод
Управление E22	PB0 AUX (вход), PB1 M0, PB2 M1 (выходы)
Отладочный UART	USART2 (PA2 TX, PA3 RX), 115200 бод
Отладка	SWD (4-pin: SWDIO, SWCLK, GND, 3.3 В)
Индикация	LED на PA5
Питание	3.3 В ±5%

Тактирование: HSI 16 МГц → PLL → 180 МГц SYSCLK, APB1 45 МГц, APB2 90 МГц, SDIO 45 МГц.

3.2 Хранение данных

Параметр	Требование
Носитель	microSD (SDHC), подключение по SDIO 4-bit
Файловая система	FAT32 (FatFs)
Формат изображений	JPEG
Целевой размер файла	до 64 КБ (FILE_BUF_MAX = 65536)
Структура карты	Корневая папка с файлами *.JPG

Алгоритм работы: циклический обход всех JPEG-файлов на карте, чтение в RAM-буфер, кодирование и передача, пауза 5 с между циклами.

3.3 Радиомодуль

Параметр	Требование
Серия	Ebyte E22-xxxT33S
Мощность передатчика	2 Вт (33 dBm)
Интерфейс	UART (TTL 3.3 В), 9600 бод
Управляющие линии	TX, RX, AUX, M0, M1
Питание модуля	5 В (отдельный DC/DC)
Режим работы	P2P, transparent mode, полудуплекс
Sub-packet size	240 байт
Air rate по умолчанию	9.6 кбит/с (E22_AIRRATE_9K6)
Канал по умолчанию	0x17 (23)

Варианты модулей по диапазонам:

Модуль	Диапазон	Примечание
E22-170T33S	150–173 МГц	Требует правовой проработки
E22-400T33S	410–493 МГц	Покрывает любительский диапазон 430–440 МГц
E22-900T33S	850–930 МГц	ISM 868/915 МГц

Модули **не являются pin-to-pin совместимыми**. Плата проектируется под один конкретный модуль.

3.4 Питание

Параметр	Требование
Входное напряжение	от аккумулятора (1S LiPo 3.0–4.2 В или 2S 6.0–8.4 В — уточнить)
DC/DC 3.3 В	для MCU, microSD, логика; ток ≥ 500 мА
DC/DC 5 В	для радиомодуля; ток ≥ 1.5 А (пиковый при TX 2 Вт)
Развязка	раздельные DC/DC для цифровой части и RF
Фильтрация	керамические конденсаторы рядом с VCC радиомодуля (100 нФ + 10 мкФ + 100 мкФ)
Защита	от переполюсовки и просадки напряжения при TX

4. Требования к наземному приёмнику (прошивка)

4.1 Аппаратная часть

Параметр	Требование
MCU	STM32F446RET6 (аналогичен передатчику)
Радиомодуль	Ebyte E22-xxxT33S (тот же диапазон, что и борт)
USART1	К радиомодулю E22 (9600 бод), приём по прерыванию (ring buffer 1024 Б)
USART2	К USB-UART мосту (115200 бод), передача на ноутбук
Антенна	направленная (Yagi / коллинеарная)
Питание	от USB ноутбука (5 В)

4.2 Алгоритм работы прошивки приёмника

- 1. Инициализация: тактирование 180 МГц, GPIO, UART, E22 в режиме RX (RSSI byte ON).
- 2. Приём по прерыванию USART1 в кольцевой буфер.
- 3. В главном цикле: сканирование буфера на супс-паттерн 0x55 0x68 .
- 4. При обнаружении FEC-пакета (256 байт): - Чтение пакета + 1 байт RSSI из буфера. - Пересылка 256-байтного FEC-пакета на PC через USART2. - Формирование и отправка 10-байтного TELEM-пакета с RSSI.
- 5. Heartbeat LED каждые 2 с.

5. Протокол передачи данных

5.1 Общие принципы

- Файл разбивается на **K блоков данных** фиксированного размера.
- RS-кодер генерирует **M parity-блоков**, распределённых по RS-группам.
- Каждый блок передаётся как самодостаточный **FEC-пакет** размером 256 байт.
- Передача **однаправленная** (broadcast) — обратный канал не требуется.
- При получении **любых K из N** ($N = K + M$) блоков файл восстанавливается 1:1.
- CRC-32 на каждый пакет для обнаружения битовых ошибок.

5.2 Параметры кодирования

Параметр	Значение
Размер пакета	256 байт (фиксированный)
Payload блока	200 байт
Заголовок	20 байт
CRC-32	4 байта (CRC bytes [1..219])
Reserved	32 байта (нули)
Поле Галуа	GF(2 ⁸), примитивный полином 0x11D
Макс. RS-кодовое слово	255 символов
FEC overhead по умолчанию	25% (настраиваемый, 5–100%)
Межпакетная пауза (борт)	50 мс

5.3 RS-группы (interleaved encoding)

Ограничение GF(2⁸): одно RS-кодовое слово не более 255 символов. Для файлов, где $K + M > 255$, данные разбиваются на **RS-группы**:

- Блок `i` принадлежит группе `i % num_groups`.
- Каждая группа кодируется независимо: `g_size data + m_per_group parity ≤ 255`.
- Кодирование **поколоночное**: для каждого из 200 байт payload формируется отдельное RS-кодовое слово.
- Потеря до `m_per_group` блоков **в каждой группе** восстанавливается.

Вычисление параметров групп:

```
m_desired = ceil(K × fec_ratio)
if K + m_desired ≤ 255:
    1 группа, g_size = K, m_g = m_desired
else:
    m_g = round(fec_ratio × 255 / (1 + fec_ratio)), max 127
    g_size = 255 - m_g
    num_groups = ceil(K / g_size)
N = K + num_groups × m_g
```

5.4 FEC-пакет (256 байт)

Смещение	Размер	Поле	Описание
0	1	sync	0x55
1	1	type	0x68
2–5	4	callsign	Base-40, big-endian (6 символов → 32 бит)
6	1	image_id	ID изображения (0–255)
7–8	2	block_id	Индекс блока (big-endian, 0..N–1)
9–10	2	k_data	Количество data-блоков K
11–12	2	n_total	Общее количество блоков N = K + M
13–16	4	file_size	Размер файла в байтах
17	1	file_type	0x00 = raw, 0x01 = JPEG, 0x02 = WebP
18	1	m_per_group	Parity-блоков на RS-группу
19	1	num_groups	Количество RS-групп
20–219	200	payload	Данные блока (data или parity)
220–223	4	crc32	CRC-32 байт [1..219]
224–255	32	reserved	Нули

Блоки с block_id < k_data — data, с block_id ≥ k_data — parity.

5.5 Кодирование позывного (Base-40)

Алфавит: 0123456789ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ-_. (40 символов).

Позывной до 6 символов кодируется в 32-битное целое:

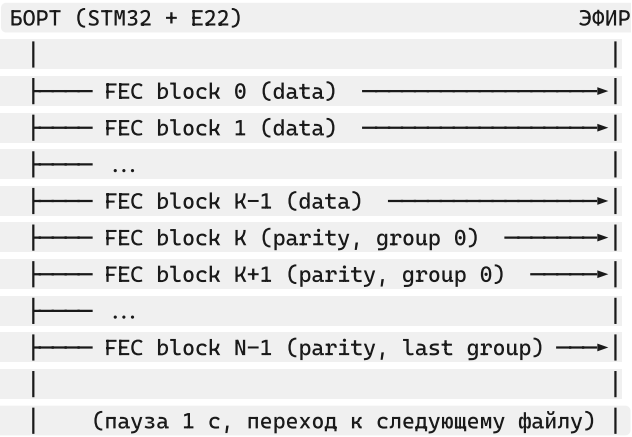
```
value = 0
for ch in callsign:
    value = value × 40 + index(ch)
```

5.6 TELEM-пакет (10 байт)

Формируется приёмником (MCU) и передаётся на ноутбук вместе с FEC-пакетами.

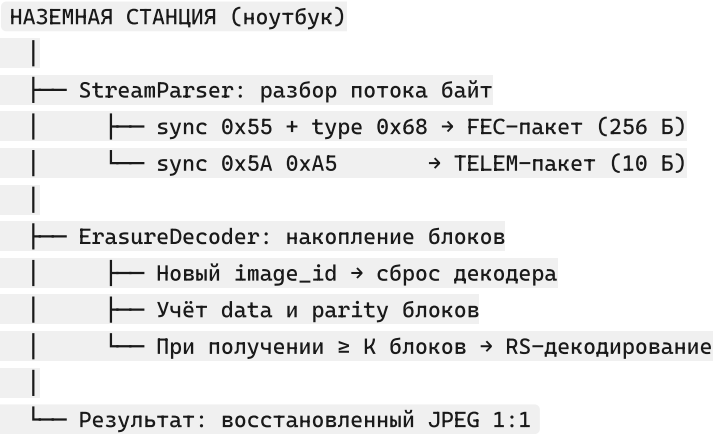
Смещение	Размер	Поле	Описание
0–1	2	sync	0xA55A (little-endian: 0x5A, 0xA5)
2	1	version	0x01
3	1	type	0x30
4–5	2	rss_i	int16, little-endian, дБм
6	1	snr	int8, дБ × 4
7	1	tx_power	uint8, дБм
8–9	2	crc16	CRC-16 CCITT (init 0xFFFF, poly 0x1021) байт [2..7]

5.7 Алгоритм передачи (борт)



- 1. Чтение JPEG-файла с microSD в RAM-буфер.
- 2. Вычисление параметров RS-групп (K, M, g_size, m_g, num_groups).
- 3. Последовательная передача K data-блоков через E22 (пауза 50 мс между пакетами).
- 4. Поколоночное RS-кодирование для каждой группы, передача parity-блоков.
- 5. Пауза 1 с, переход к следующему файлу.
- 6. После обхода всех файлов — пауза 5 с, повтор цикла.

5.8 Алгоритм приёма (наземная станция)



6. Требования к ПО наземной станции

6.1 Приёмник (receiver/)

Параметр	Требование
Язык	Python 3
GUI	PyQt5 (Qt Widgets, Fusion style)
Вход	COM-порт (pyserial) / TCP-сервер / локальная симуляция
Парсинг	StreamParser: FEC (0x55 0x68, 256 Б) + TELEM (0x5A 0xA5, 10 Б)
Декодирование	ErasurDecoder (reedsolo): RS-декодирование по группам
Выход	Восстановленные JPEG/WebP файлы
Отображение	Предпросмотр изображения, матрица блоков (ChunkMatrixWidget), прогресс-бар, лог, RSSI/SNR/TX Power
Темы	Светлая / Тёмная (QSS), сохранение через QSettings

Функции:

- Подключение к COM-порту (выбор порта, baud rate).
- TCP-сервер для приёма от передатчика-симулятора.
- Локальная симуляция (выбор файла, задержка, FEC overhead).
- Автоматический предпросмотр (обновление каждые 500 мс).
- Сохранение восстановленного файла.
- Вкладка «Настройки»: тема, параметры симуляции.

6.2 Передатчик-симулятор (transmitter/)

Параметр	Требование
Язык	Python 3
GUI	PyQt5 (Qt Widgets, Fusion style)
Выход	TCP-клиент (подключение к приёмнику)
Кодирование	ErasurEncoder (reedsolo): RS-кодирование по группам
Функции	Выбор файла, предпросмотр, настройка callsign / FEC overhead / задержки
Телеметрия	Генерация TELEM-пакетов с смоделированным RSSI/SNR каждые 64 блока
Отображение	Матрица блоков, прогресс-бар, лог
Темы	Светлая / Тёмная (QSS), сохранение через QSettings

6.3 Зависимости

PyQt5 ≥ 5.15
pyserial ≥ 3.5
reedsolo ≥ 1.7

7. Требования к РСВ передатчика

7.1 Питание

- Раздельные DC/DC для цифровой части (3.3 В) и радиомодуля (5 В).
- Керамические конденсаторы рядом с VCC радиомодуля: 100 нФ, 10 мкФ, 100 мкФ.
- Сплошной полигон GND; правильная разводка токов возврата RF.

7.2 Антенный тракт

- Линия 50 Ом от радиомодуля до антенного разъёма.
- Минимальная длина тракта.
- Согласующая цепь (Pi/T) под рабочий диапазон.

7.3 Разводка РСВ

Параметр	Требование
Слои	≥ 2 (рекомендовано 4: TOP, GND, PWR, BOTTOM)
Антенный тракт	50 Ом, минимальная длина
Антенный разъём	SMA или U.FL (уточнить)
Земля	сплошной полигон GND, звёздная точка объединения силовой и цифровой земли

7.4 Интерфейсы на плате

Разъём / пады	Назначение
SWD (4-pin)	Прошивка и отладка MCU
UART debug (2-pin)	Отладочный вывод логов (USART2)
microSD слот	Push-push или push-pull
Антенна (SMA / U.FL)	Подключение внешней антенны
Питание (2-pin)	Вход от аккумулятора

7.5 Тест-пойнты

Вывести на плату: VCC 3.3 В, VCC 5 В, GND, UART TX/RX (E22), AUX.

8. Оценка производительности

8.1 Время передачи одного файла

Размер пакета 256 байт, полезная нагрузка 200 байт, FEC overhead 25%.

Размер JPEG	K блоков	N блоков (25% FEC)	Air rate 9.6 кбит/с	Air rate 62.5 кбит/с
10 КБ	51	64	~14 с	~2.1 с
30 КБ	154	193	~41 с	~6.3 с
50 КБ	256	320	~68 с	~10.5 с
64 КБ	328	410	~87 с	~13.4 с

С учётом межпакетной паузы 50 мс. Фактическое время = $N \times (256 \text{ Б} / \text{air_rate} + 50 \text{ мс})$.

8.2 Дальность

При 33 dBm (2 Вт), прямая видимость со стратосферы (20–35 км высота):

- **LoRa SF12/BW125** (2.4 кбит/с): чувствительность ~ -148 дБм, запас линк-бюджета достаточен.
- **LoRa SF7/BW500** (62.5 кбит/с): чувствительность ~ -123 дБм, на пределе при большом расстоянии.
- Рекомендуемый режим: **SF9–SF10, BW 125–250 кГц** (~ 4.7 – 9.6 кбит/с).

9. Сборка и запуск

9.1 Прошивки (PlatformIO)

```
# Передатчик
cd LorettStratoLink_tx
pio run -t upload
```

```
# Приёмник
cd LorettStratoLink_rx
pio run -t upload
```

Требования: PlatformIO, ST-Link, плата STM32F446RE.

9.2 ПО наземной станции

```
pip install -r requirements.txt
```

```
# Приёмник
cd receiver
python stratolink_receiver.py
```

```
# Передатчик-симулятор
cd transmitter
python stratolink_transmitter.py
```

10. Частотные ограничения (РФ)

Диапазон	Частоты	Статус
2 м	144–146 МГц	Любительский, требует позывной
70 см	430–440 МГц	Любительский, требует позывной
~ 170 МГц	150–173 МГц	Не любительский, требует отдельного разрешения
868/915 МГц	ISM	Ограничения по мощности и скважности

Перед эксплуатацией необходимо проверить актуальные нормативные требования.

11. Открытые вопросы

#	Вопрос	Варианты
1	Рабочий диапазон	430–440 МГц (рекомендуется) / 868 МГц / 170 МГц
2	Конкретная модель модуля Ebyte	E22-400T33S / E22-900T33S / E22-170T33S
3	Входное напряжение / тип аккумулятора	1S LiPo / 2S LiPo / внешнее 5–12 В
4	Антенный разъём	SMA / U.FL / впаянная антенна
5	Размеры платы	Ограничения конструктива зонда
6	Air rate	SF9 BW125 (~4.7 кбит/с) / SF10 BW125 (~2.4 кбит/с) / SF7 BW500 (~62.5 кбит/с)
7	Максимальный размер JPEG	64 КБ (текущий) / увеличить буфер
8	FEC overhead	25% (текущий) / адаптивный по условиям канала