

# Программно-аппаратные платформы Интернета вещей и встраиваемые системы

Лекция 6

# **БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ**

# Модель OSI

- Семиуровневая модель сетевого взаимодействия
- Описывает абстрактную модель сети передачи данных
- В реальных системах часто используются упрощенные варианты, но принцип разбиения на несколько уровней остается неизменным

Данные	<b>Прикладной</b> Данные приложений
Данные	<b>Представления</b> Представление и кодирование данных
Данные	<b>Сеансовый</b> Управление сеансом связи
Блоки	<b>Транспортный</b> Безопасное и надежное соединение точка-точка
Пакеты	<b>Сетевой</b> Маршрутизация, логическая адресация
Кадры	<b>Канальный</b> LLC – logical link control (управление соединением) MAC – medium access control (доступ к среде) Физическая адресация
Биты	<b>Физический</b> Кабели, сигналы, передача двоичных данных

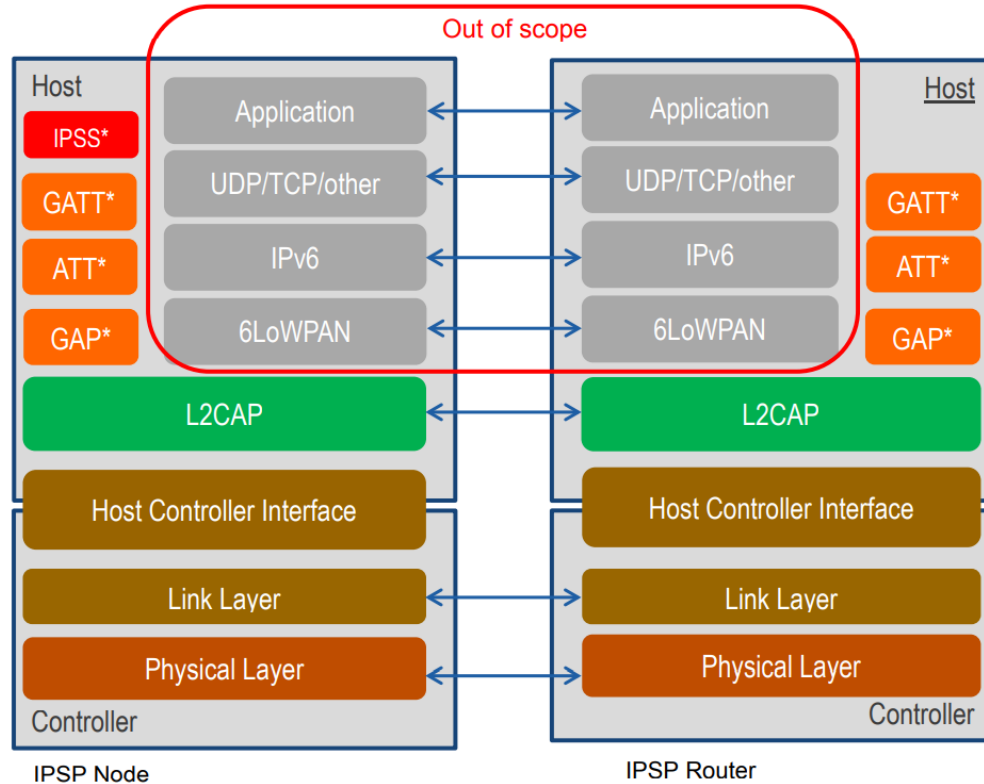
# Модель OSI – упрощенные варианты

- «Модель TCP/IP» - 4 уровня
  - Уровни прикладной, представления и сеансовый слиты в один (на усмотрение приложений)
  - Транспортный уровень – TCP, UDP
  - Сетевой уровень – IP (IPv4, IPv6)
  - Все, что ниже (link layer), нас не касается («каким-то образом пересылает Ethernet-кадры»)

# Модель OSI – упрощенные варианты

- «Модель IETF для IoT» - 4 с половиной уровня
  - Уровни прикладной, представления и сеансовый слиты в один (протокол CoAP)
  - Транспортный уровень – UDP
  - Сетевой уровень – IPv6
    - 6LoWPAN – адаптация IPv6 к персональным радиосетям
  - Все, что ниже (link layer), в модель не входит

# Модель OSI – упрощенные варианты



# Беспроводные технологии IoT

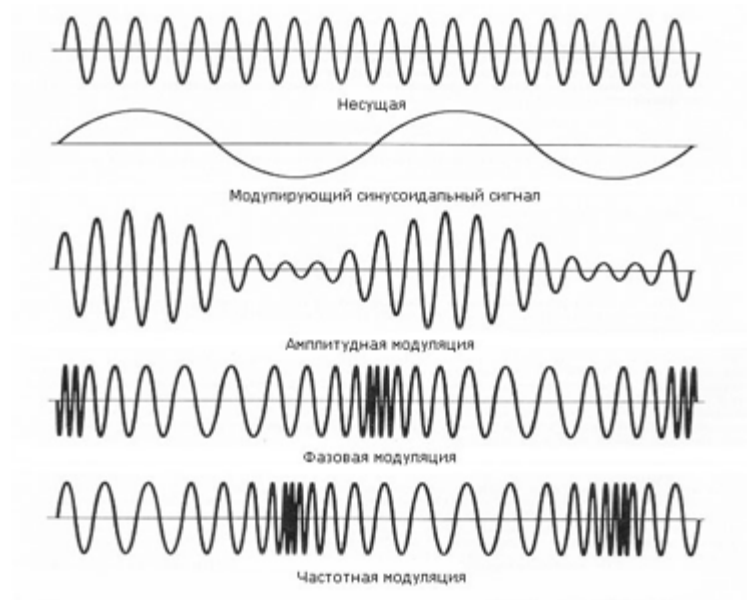
- Игнорировать существование MAC и PHY не получится
- В IoT могут применяться не IP-сети
- Рассматривая их архитектуру, увидим, что про нижние уровни модели OSI нельзя забывать (как в «модели TCP/IP»)

# **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ: ФИЗИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ**



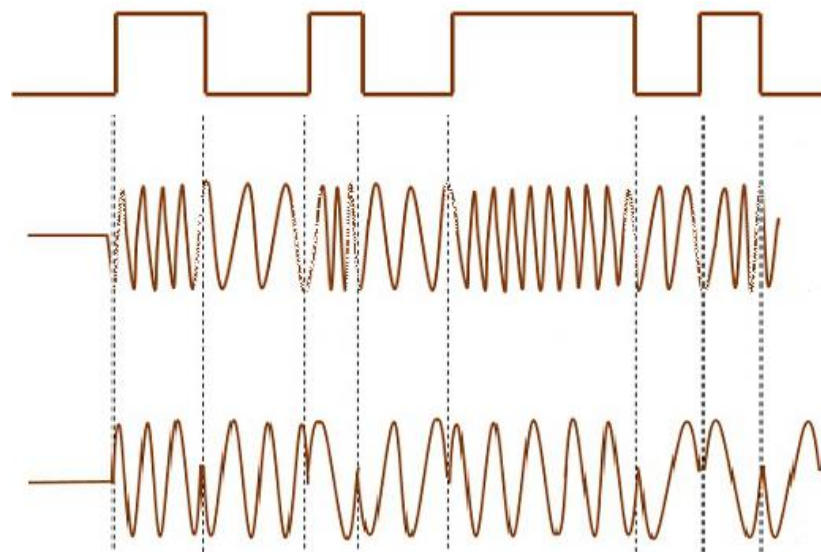
# Модуляция радиосигнала

- Изменение параметров несущего сигнала при помощи модулируемого сигнала
- Аналоговая модуляция:
  - АМ – амплитудная модуляция
  - FM – частотная модуляция
  - РМ – фазовая модуляция



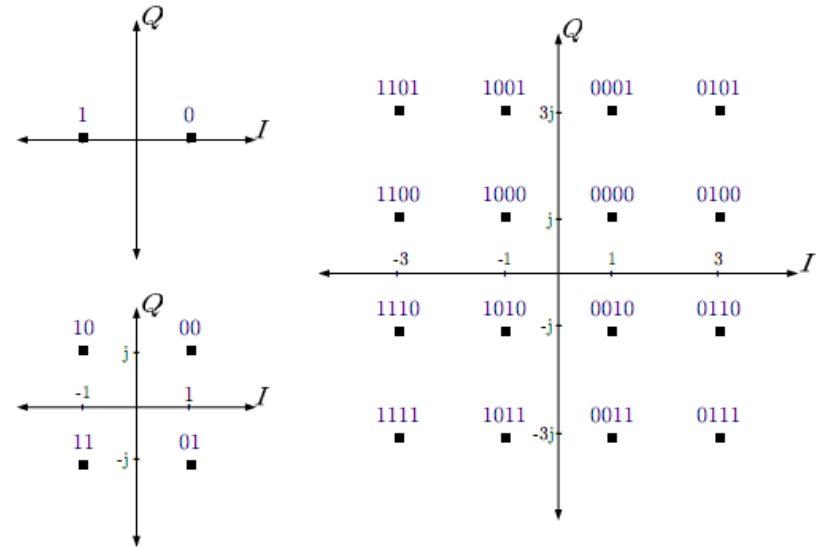
# Цифровая манипуляция-I

- FSK – frequency-shifted keying
- PSK – phase-shifted keying
  - BPSK
  - QPSK
  - 8-PSK



# Цифровая манипуляция-II

- PSK – phase-shifted keying
  - BPSK
  - QPSK (2 бита/символ)
  - 8-PSK (3 бита/символ)
  - ...
- QAM (до 12 бит на символ в 4096-QAM)



# Фундаментальные ограничения

Предел Шеннона (теорема Шеннона-Хартли)

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right),$$

где:

- $C$  – пропускная способность канала (capacity), бит/с
- $B$  – полоса пропускания канала, Гц
- $S$  – полная мощность сигнала, Вт
- $N$  – мощность шума, Вт
- $S/N$  - отношение сигнал/шум, SNR

# Фундаментальные ограничения

В случае, когда  $S/N \gg 1$ , перепишем формулу Шеннона в следующем виде:

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \approx B \log_2 \frac{S}{N} = \\ &= \frac{\ln 10}{\ln 2} B \log_{10} \frac{S}{N} = 3,32 \times B \times \log_{10} \frac{S}{N} = \\ &= 0,332 \times B \times SNR^{[dB]} \end{aligned}$$

# Фундаментальные ограничения

В случае, когда  $S/N \ll 1$ , перепишем формулу Шеннона в следующем виде:

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = B \frac{1}{\ln 2} \ln \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \approx \\ &\approx \frac{1}{\ln 2} B \frac{S}{N} \approx 1,44 \frac{S}{N_0}, \end{aligned}$$

где  $N_0$  - спектральная плотность шума,  $N = BN_0$ .

# Фундаментальные ограничения

## Формула Фрииса

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 ,$$

где:

- $P_r, P_t$  - мощность сигнала на приемнике (receiver) и передатчике (transmitter)
- $G_r, G_t$  - коэффициент усиления антенн приемника и передатчика
- $R$  – расстояние между приемником и передатчиком
- $\lambda$  – длина волны

# Фундаментальные ограничения

## Формула Фрииса в дБ

$$P_r^{[dBm]} = P_t^{[dBm]} + G_t^{[dBi]} + G_r^{[dBi]} + 20\log_{10} \frac{\lambda}{4\pi R},$$

где:

- $P_r, P_t$  - мощность сигнала на приемнике (receiver) и передатчике (transmitter)
- $G_r, G_t$  - коэффициент усиления антенн приемника и передатчика
- $R$  – расстояние между приемником и передатчиком
- $\lambda$  – длина волны



# Выводы

- Пропускная способность радиоканала прямо пропорциональна ширине полосы и отношению сигнал-шум
  - Если мы хотим большей пропускной способности при той же полосе пропускания, то снизится дальность уверенного приема
- При малом уровне сигнала пропускная способность канала от ширины полосы не зависит
  - Расширение спектра: DSSS, CSS
- Мощность принятого сигнала квадратично падает с увеличением расстояния и частоты передачи
  - Если мы хотим уверенного приема на больших расстояниях, то частоту надо выбирать по возможности меньше

# Два класса технологий IoT

- LPWAN
  - Low-power Wide Area Network
  - Скорость передачи не важна (сотни-тысячи бит/с), требуется большая зона покрытия
  - UNB-сети (Sigfox, Стриж и подобные), LoRa, в некоторой степени – NB-IoT
  - Частотный диапазон Sub 1-GHz (433, 868/915 МГц)
- LR-WPAN
  - Low-Rate Wireless Personal Area Network
  - Скорость передачи относительно мала (обычно до 250 кбит/с)
  - BLE, IEEE 802.15.4, IEEE 802.11ah
  - Частотный диапазон ISM (2,4 ГГц) или Sub 1-GHz
- Вне зачета – «традиционные» беспроводные технологии
  - Bluetooth, Bluetooth Low Energy (BLE), WiFi (IEEE 802.11), сотовая связь

# Диапазон 864-868 МГц в РФ

**Приложение 12 к Решению ГКРЧ № 18-46-03-1 от 11 сентября 2018 года**

*Неспециализированные (любого назначения) устройства – устройства малого радиуса общего применения, включая устройства дистанционного управления и передачи телеметрии, телеуправления, сигнализации, передачи данных и других подобных передач*

- 864,0 — 865,0 МГц — мощность до 25 мВт, рабочий цикл до 0,1 % или LBT, запрещено использование на территории аэропортов
- 866,0 — 868,0 МГц — мощность до 25 мВт, рабочий цикл до 1 % или LBT, запрещено использование на территории аэропортов, спектральная плотность мощности до 1000 мВт/МГц
- 868,7 — 869,2 МГц — мощность до 100 мВт, рабочий цикл до 10 % или LBT, использование без ограничений

LBT – listen before talk, нигде не расшифровывается

# LPWAN: Sigfox и подобные

- UNB – Ultra-Narrow Band; Sigfox, Стриж, Waviot, Nb-Fi, Феникс...
- Скорость передачи – 50/100/200 бит/с, модуляция FSK или PSK
- Очень узкая полоса (50-200 Гц)
- Сложная БС, проблемы с организацией нисходящего канала
- Закрытый протокол MAC-уровня (есть попытки стандартизации в РФ, ПНСТ 354-2019)



# LPWAN: LoRa/LoRaWAN

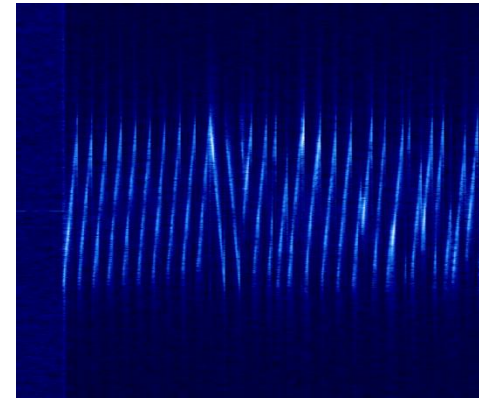
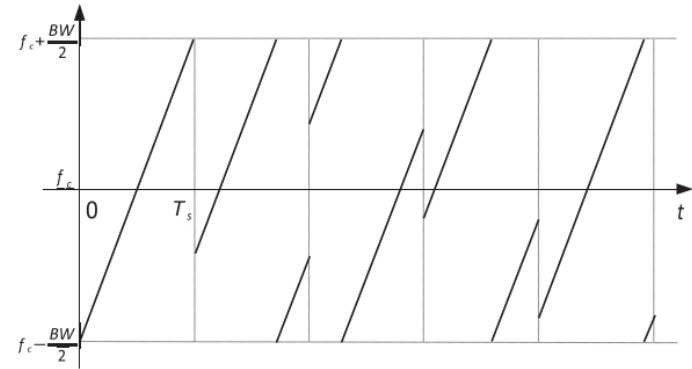
- LoRa (Long Range) – вид модуляции, запатентован фирмой Semtech, патент US 8,406,275 B.
- Модуляция Chirp Spread Spectrum
- Трансиверы SX1272, SX1276, SX1280
- SX1301, SX1302 – чипы для базовых станций
- Одночиповое решение – серия STM32WLE5
- Поверх этого можно использовать MAC-уровень LoRaWAN или что-то свое
- LoRaWAN – полностью открытый стандарт; в России принят в статусе «Проекта национального стандарта» с некоторыми дополнениями (ПНСТ 516-2021)



**LORA И LORAWAN**

# Модуляция LoRa

- Линейно-частотная модуляция (Chirp Spread Spectrum)
- Chirp – сигнал с изменением частоты от минимальной до максимальной
- Модуляция – «излом» чирпа в определенный момент
  - Spreading factor, SF – «наклон» чирпа и опосредованно – количество бит/чирп
  - ECC – error-correcting code
    - 4/5, 4/6, 4/7, 4/8
  - Ширина полосы от 7,81 до 250 кГц
- Устойчивость к частотным сдвигам
- Ортогональность различных SF
- Читайте даташит модема (SX1276) и Application Note AN1200.22



# Модуляция LoRa

Ширина полосы (кГц)	SF	CR	Скорость (бит/с)	Чувствительность приемника (дБм)
10.4	6	4/5	782	-131
	12	4/5	24	-147
20.8	6	4/5	1562	-128
	12	4/5	49	-144
62.5	6	4/5	4688	-121
	12	4/5	146	-139
125	6	4/5	9380	-118
	12	4/5	293	-136



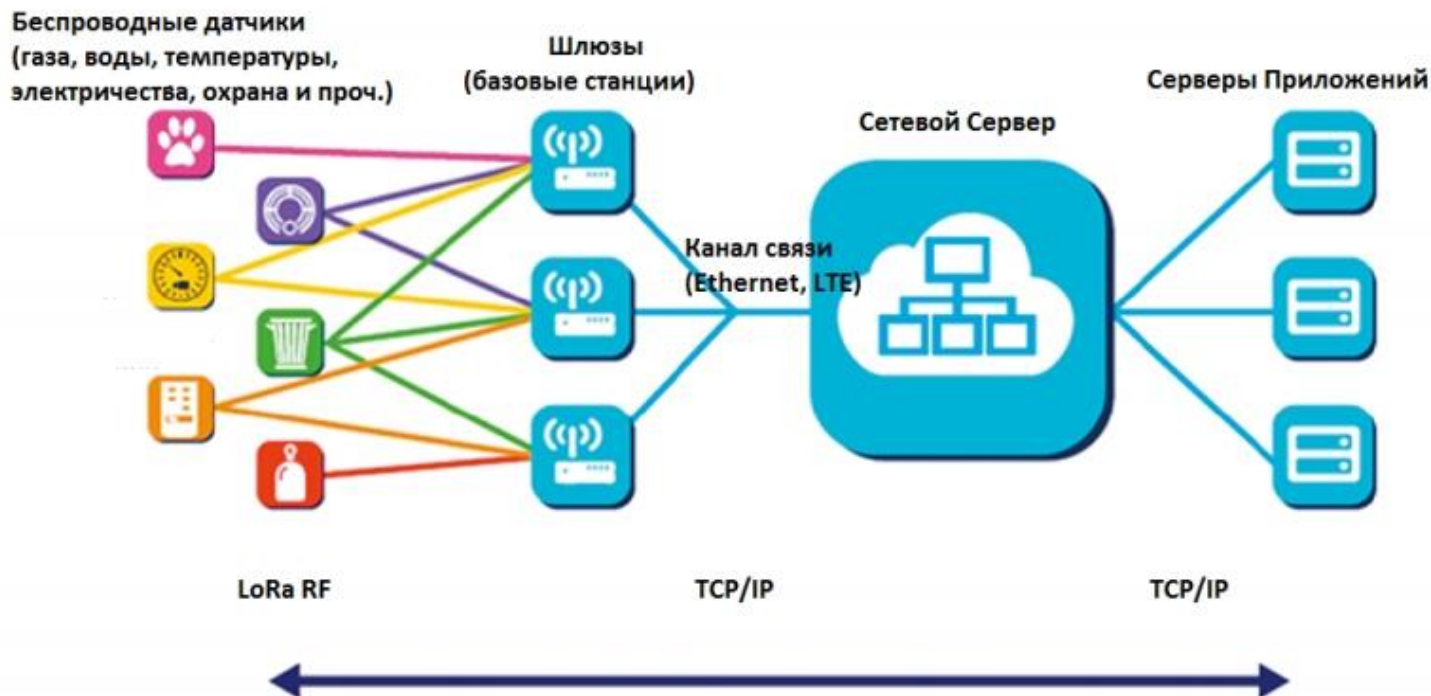
# MAC-уровень на примере LoRaWAN

- **Medium Access Control** – управление доступом к среде:
  - Адресация устройств
  - Разрешение коллизий при передаче
  - Частотный план
  - Требования по duty cycle
  - Безопасность передачи данных

# MAC-уровень на примере LoRaWAN

- **LoRaWAN** – протокол MAC-уровня поверх LoRa
  - Несколько версий спецификации (1.0, 1.0.1, 1.0.2, 1.1, 1.0.3)
    - <https://lora-alliance.org/>
    - Дополнение к спецификации – региональные параметры
  - Semtech предоставляет эталонные реализации некоторых компонентов системы:
    - <https://github.com/Lora-net>
  - Для других компонентов (сетевой сервер, сервер приложений, ...) есть открытые реализации:
    - <https://www.chirpstack.io/>
    - <https://github.com/gotthardp/lorawan-server>

# LoRaWAN – архитектура сети



# Шлюз LoRaWAN



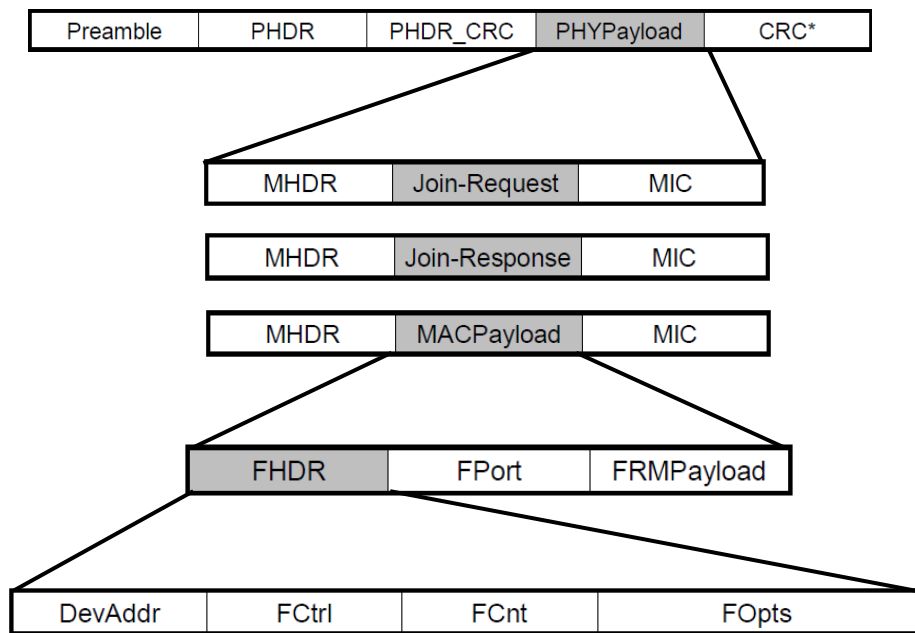
- Внутри модем SX1301/SX1302
- Принимает все пакеты на 8 каналах одновременно, пересылает их сетевому серверу
- По запросу сетевого сервера – передает данные оконечному устройству

[https://github.com/Lora-net/packet\\_forwarder](https://github.com/Lora-net/packet_forwarder)

# Шлюз LoRaWAN

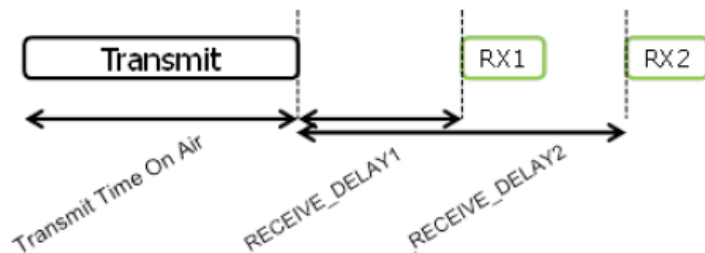


# Пакеты в LoRaWAN



- Преамбула – 12 «чирпов»
- PHDR – заголовок PHY с параметрами модуляции
- Контрольная сумма (CRC) только для uplink
- MHDR – MAC Header, 1 байт с типом сообщения и версией протокола
- MIC – Message Integrity Code, вычисляется по алгоритму AES-CMAC с использованием ключа сети (Network Session Key)
- Payload зашифровано с помощью ключа приложения (Application Session Key)
- FCnt – счетчик кадров

# LoRaWAN – классы устройств



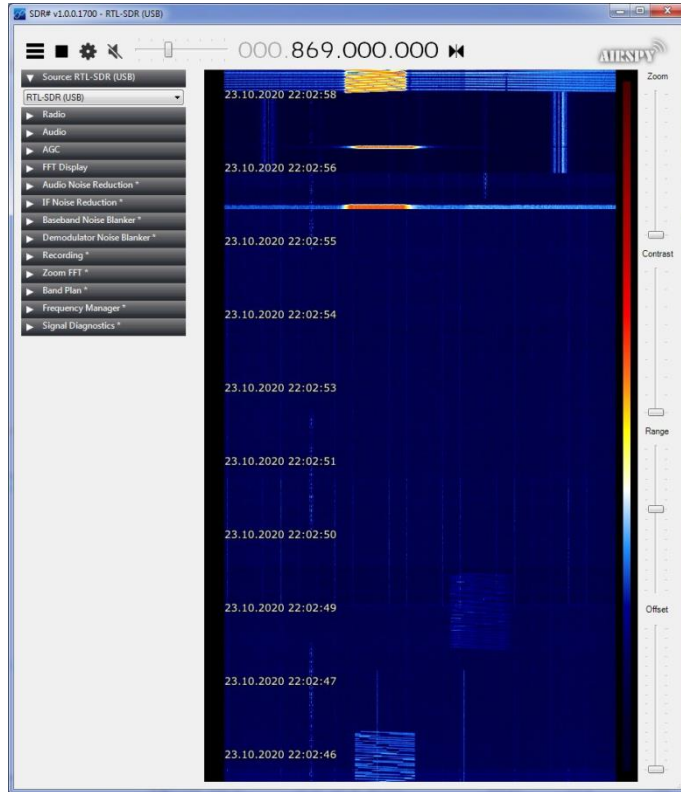
- После передачи данных устройство готово к приему данных
- Сеть должна ответить либо в первом «окне приема», либо во втором
  - RX1 – частота и data rate зависят от частоты и data rate восходящего канала
  - RX2 – частота и data rate фиксированы (либо в региональных параметрах, либо в настройках сети)
- Класс B (Beacon) – дополнительные «окна приема» в фиксированное время
- Класс C (Continuous) – всегда готово к приему данных на RX2

# LoRaWAN – частотный план

- Regional Parameters – приложение к стандарту
  - Используемые частоты (обязательные каналы для Join)
  - Виды модуляции
  - Продолжительность RECEIVE\_DELAY, JOIN\_ACCEPT\_DELAY
  - Параметры RX1 и RX2
  - Размер payload
- Для РФ определен частотный план RU864, сильно отличающийся от EU868
- EU868
  - Три обязательных канала: 868,10, 868,30, 868,50 МГц, ширина полосы 125 кГц
  - 5 дополнительных каналов
  - RX2 – на частоте 869,525 МГц, DR0 (SF12, 125 кГц)
- RU864
  - Два обязательных канала: 868,9, 869,1 МГц, ширина полосы 125 кГц
  - 6 дополнительных каналов, обычно выбираются в диапазоне 864-865 МГц, с 2018 года можно использовать 866-868 МГц
  - RX2 – на частоте 869,1 МГц, DR0 (SF12, 125 кГц)
- Дополнительные каналы сообщает сетевой сервер (вместе с JoinAccept)



# LoRaWAN – реальный обмен в сети



- Частота – по горизонтальной оси, время – по вертикальной (waterfall)
- Цвет – мощность принятого сигнала
- Видно оба обязательных канала
- Внизу – обмен с малым SF, ответ в RX2
- Вверху – обмен с высоким SF, ответ в RX1