

Программно-аппаратные платформы Интернета вещей и встраиваемые системы

Лекция 8

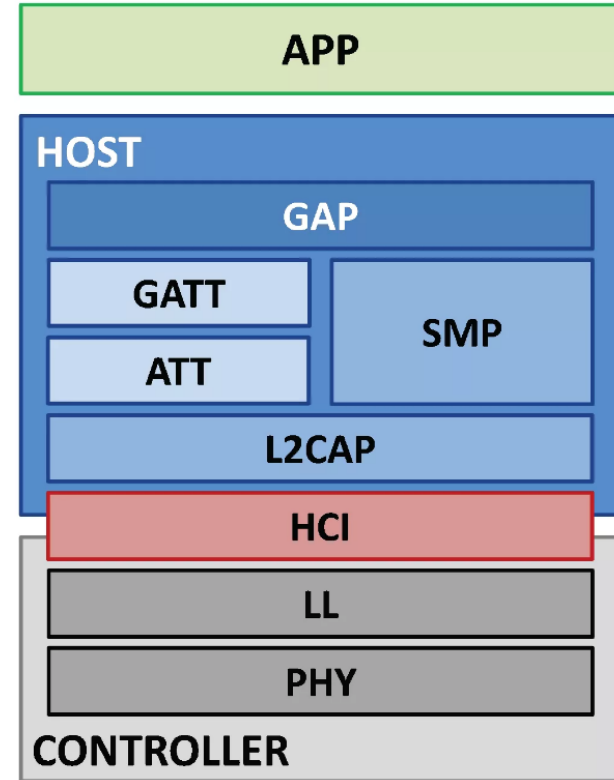
БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ КЛАССА PAN

WiFi (IEEE 802.11)

- Несколько поколений (802.11a/b/g/n/ac/ax/be/...)
- «Бытовые» диапазоны 2,4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц
- 802.11ah (WiFi HaLow) – физический уровень для диапазона 868/915 МГц
 - Р-168-К-МРА «Акведук» - MAC-уровень 802.11g в диапазонах 500-645 МГц и 1,5-1,75 ГГц
- Удобен для разворачивания беспроводных IP-сетей
- Повышенные требования к электропитанию устройств
- Сложность протокола, оптимизация «для скорости»
- TI CC32xx, Espressif ESP8266, ESP32, Newracom NRC 6791 (802.11n), NRC7292 (802.11ah)

Bluetooth Low Energy

- 40 каналов в диапазоне 2,4 ГГц, расстояние между соседними каналами 2 МГц
- Модуляция GFSK, 500/1000/2000 кбит/с
- Стандартизация вплоть до уровня приложений (Generic Attribute Profile)
- Очень гибкие настройки энергопотребления
- Удобен при совместном использовании со смартфонами



Зачем нужно что-то еще?

- Энергопотребление
- Дальность связи
- Сценарии использования, не укладывающиеся в рамки «бытовых» стандартов

IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4

- Стандарт описывает 18 (!) разных вариантов PHY и несложный MAC-уровень
- Наиболее часто встречающиеся варианты PHY:
 - QPSK DSSS, 868 МГц (100 кбит/с) и 2,4 ГГц (250 кбит/с)
 - GFSK, 868 МГц, 100 кбит/с

MAC-уровень 802.15.4

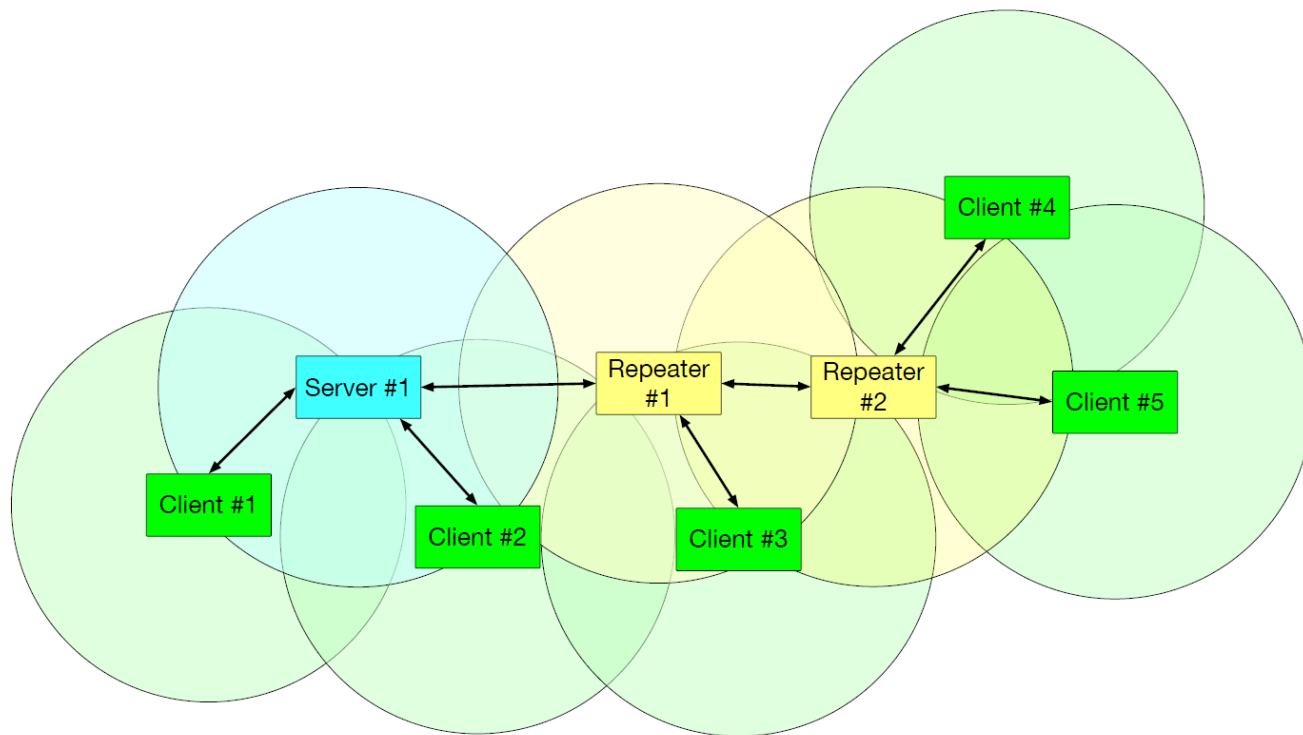
- Длина кадра – 127 байт, payload – от 81 байта
- Адресация по EUI-64 или с использованием коротких 16-битных адресов
- Кроме передачи данных, MAC-уровень описывает следующее:
 - Передача beacon'ов в сети с координатором
 - Доступ к среде (CSMA/CA, ALOHA, управление координатором)
 - Подтверждение доставки кадров
 - Вход и выход из сети (ассоциация и деассоциация)
 - Шифрование и защита данных

MESH-СЕТИ ПОВЕРХ IEEE 802.15.4

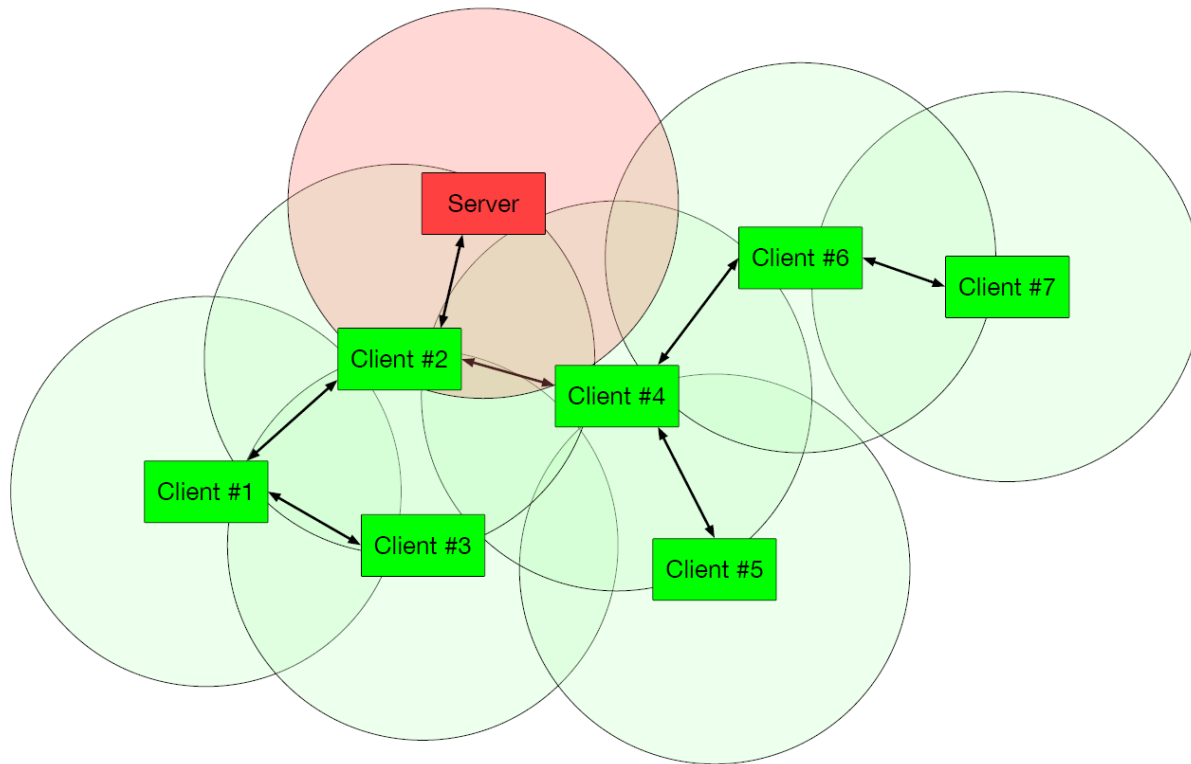
Mesh-сети

- ZigBee
 - Стандартизированы все уровни от сетевого и выше
 - Сеть полностью управляется координатором
- 6LoWPAN
 - Адаптация IPv6 для 802.15.4
 - Протокол маршрутизации RPL
 - Поверх сетевого уровня может использоваться «обычный» TCP/IP стек
- Применение
 - «Умный дом»
 - Сбор показаний счетчиков
 - Пожарная и охранная сигнализация
 - АСУНО
 - ...

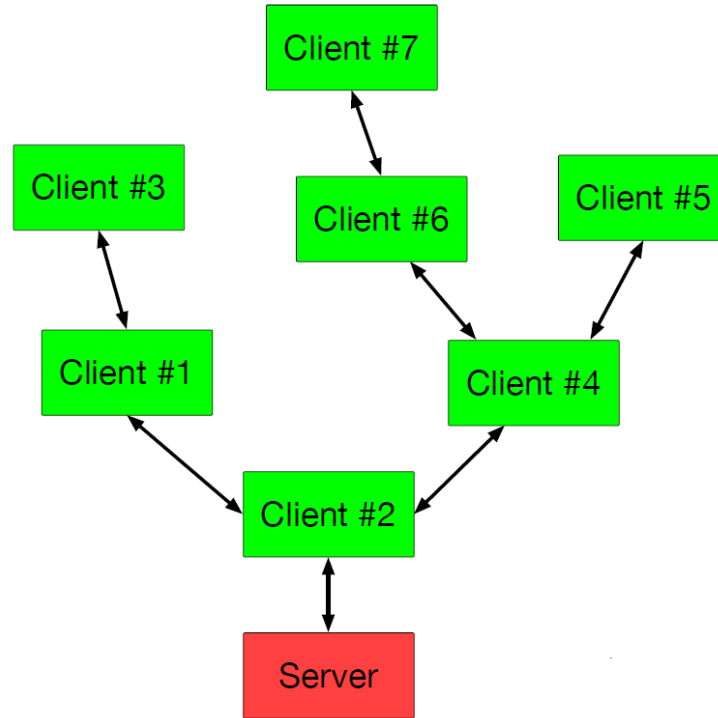
Сеть с ретрансляторами



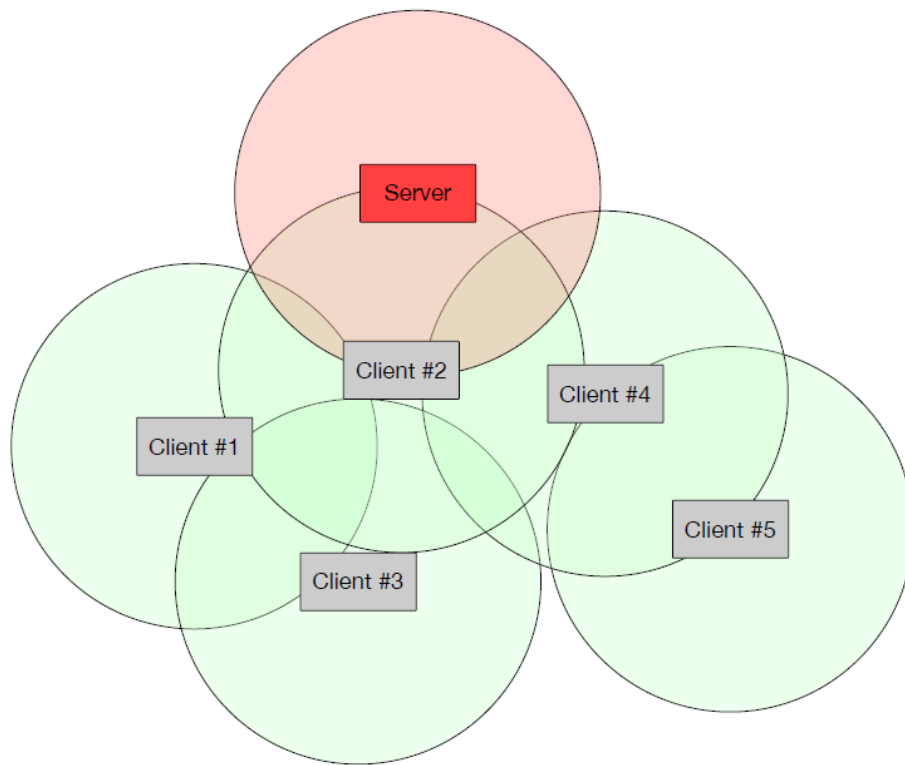
Ячеистая (mesh) топология



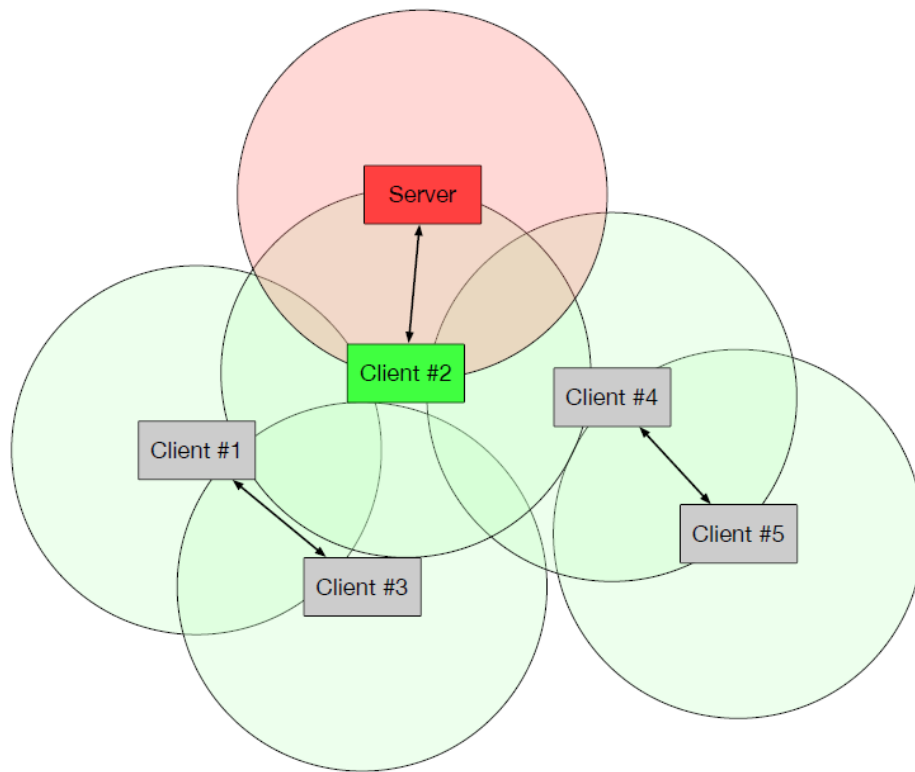
Направленный ациклический граф



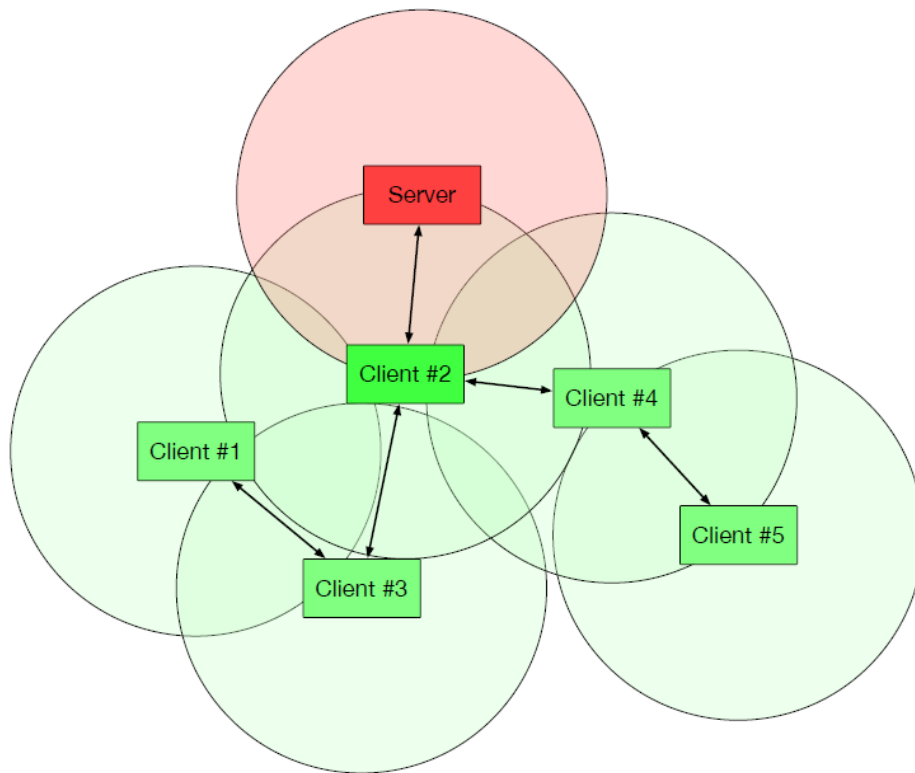
Самоорганизация ячеистой сети



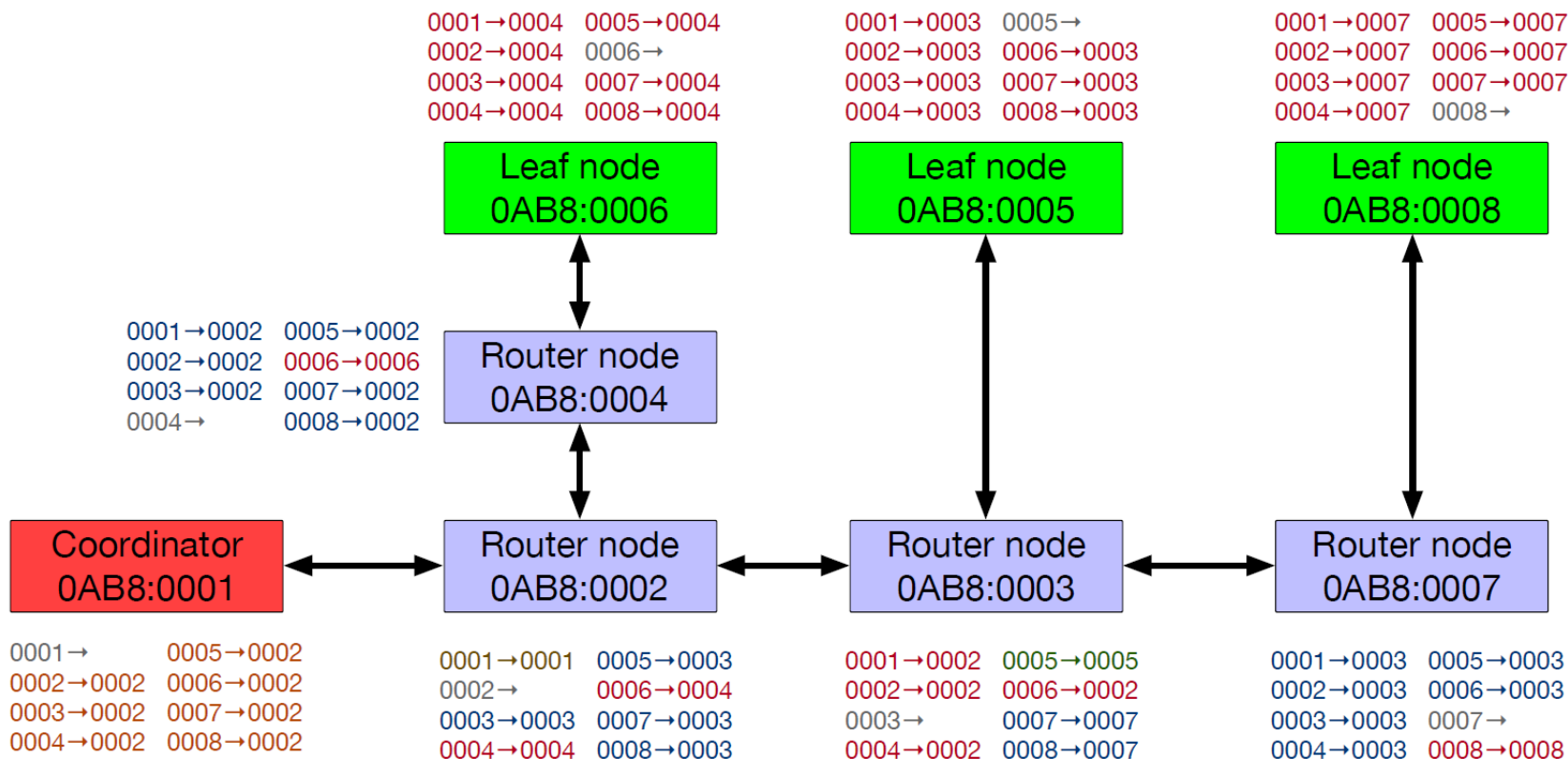
Самоорганизация ячеистой сети



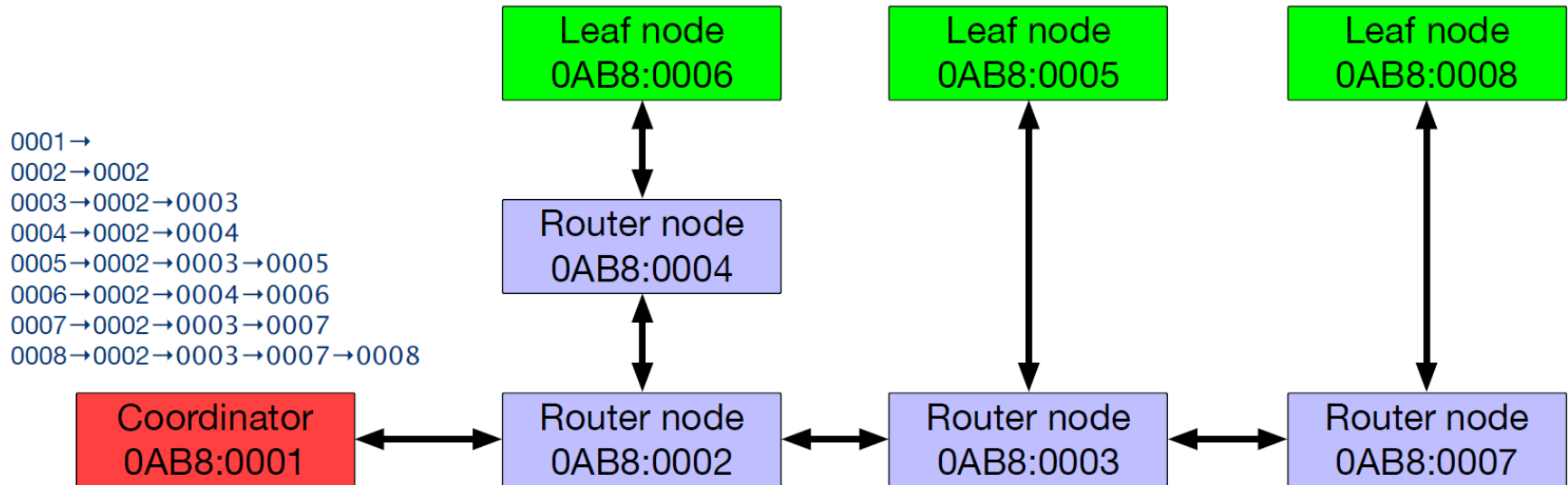
Самоорганизация ячеистой сети



Маршрутизация: storing mode



Маршрутизация: source-based



Достоинства mesh-сетей

- Самоорганизация, восстановление сети при отказе части устройств
- Можно использовать меньшую мощность при передаче
- Легко развернуть сеть на большом объекте

Недостатки mesh-сетей

- Сложность топологии и оконечных устройств
- Накладные расходы на поддержание таблицы маршрутизации
- Задержки, вносимые каждым из «хопов»
- Потребление энергии ретрансляторами

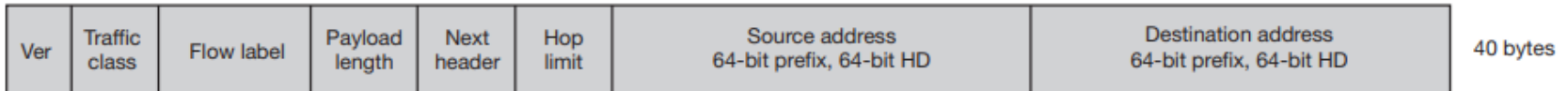
6LOWPAN

6LoWPAN

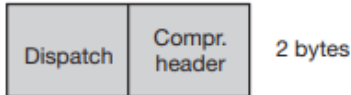
- Адаптация IPv6 к IEEE 802.15.4
- RFC 4944 и последующие
- Сжатие заголовков, фрагментация пакетов, маршрутизация
- Протокол маршрутизации RPL (RFC 6550)

Сжатие заголовков

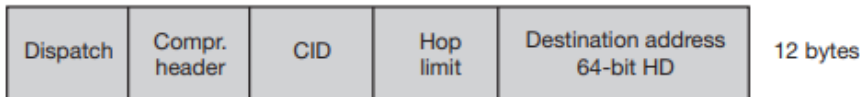
IPv6 header



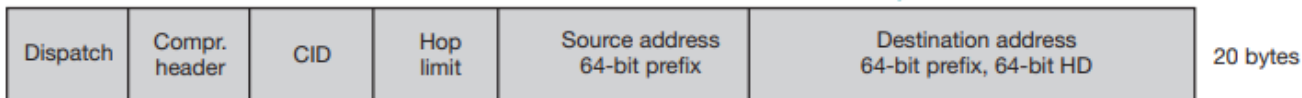
1. Compressed header, FE80::CAFE:00FF:FE00:0100 → FE80::CAFE:00FF:FE00:0200



2. Compressed header, 2001::DEC4:E3A1:FE24:9600 → 2001::4455:84C6:39BB:A2DD



3. Compressed header, 2001::DEC4:E3A1:FE24:9600 → 2001::4455:84C6:39BB:A2DD



Обнаружение соседей

- Четыре типа сообщений
 - RS, router solicitation
 - RA, router advertisement
 - NS, neighbor solicitation
 - NA, neighbor advertisement
- При входе в сеть устройство выбирает link-local адрес (FE80::IID) и отправляет сообщение NS с ним; если в ответ не получено NA, то адрес считается уникальным
- Префикс сети устройство получает от маршрутизатора после обмена сообщениями RS и RA

СЕТЕВЫЕ СИМУЛЯТОРЫ

Сетевые симуляторы

- Не все можно проверить в лаборатории
- Большое количество устройств, много шлюзов, сложные протоколы MAC-уровня
- Нетривиальные алгоритмы
 - Сетевой сервер LoRaWAN
 - Протокол маршрутизации RPL
 - Выбор скорости передачи данных в WiFi
 - ...
- Для моделирования работы радиосетей используются сетевые симуляторы

NS-3

- <https://www.nsnam.org>
- «Из коробки» есть модели IP-сетей, WiFi, LTE, 5G, ...
- Есть несколько попыток добавить в него LoRaWAN (например, <https://github.com/signetlabdei/lorawan>)
- Проблема – модели в симуляторе могут не соответствовать поведению реальных устройств

Cooja

- <https://github.com/contiki-ng/cooja>
- Входит в состав ОС Contiki
- Поведение оконечных устройств моделируется точно, с помощью эмулятора MSP430
- Необходимо иметь реализацию всех компонентов сети для Contiki