



# Sveprisutno računarstvo

## 9. Bežične mreže

- Osnove radio komunikacije
- Mreže dugog dosega i male snage (LPWAN)
  - LoRa / LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT ...
- Mreže kratkog dosega (PAN)
  - Bluetooth, Bluetooth LE, ZigBee ...

# Creative Commons



[Sveprisutno računarstvo](#) by Hrvoje Mlinarić & Igor Čavrak, FER  
is licensed under [CC BY-NC-SA 4.0](#)

## **Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)**

This license requires that reusers give credit to the creator.

It allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, for noncommercial purposes only.

If others modify or adapt the material, they must license the modified material under identical terms.

**BY:** Credit must be given to you, the creator.

**NC:** Only noncommercial use of your work is permitted.

**SA:** Adaptations must be shared under the same terms.



# Osnove radio komunikacije

# Povijest bežične komunikacije

- Elektromagnetski valovi u prostoru
  - Maxwellove jednadžbe
- Bežična (radio) komunikacija nije novost
  - 1897. Marconi (?) - bežična telegrafija
  - 1901. radio-veza preko Atlantskog oceana
- Stalna promjena žično-bežično
  - telekomunikacijske mreže
  - televizija (odašiljanje – kabelska televizija)
  - telefonija (fiksni – mobilni terminali)
- Problem ograničenosti spektra
  - strogo kontrolirani resurs
  - FCC (USA), ETSi (Europa), HAKOM (HR), ...

# Bežični komunikacijski sustav

- Dimenzije sustava:

- vrijeme
- frekvencija (spektar)
- prostor
- korisnici

- Komunikacijski kanal

- komunikacijska veza predajnik-prijemnik
- modeliranje signala u točki prijemnika
  - jačina signala
  - faza signala
  - šum (SNR – signal to noise ratio)

# Tipovi komunikacije i zahtjevi

- Glasovna komunikacija

- mala količina podataka (ovisno o željenoj kvaliteti zvuka)
- konstantna brzina prijenosa podataka
- ograničeno kašnjenje (~100ms)

- Podatkovna komunikacija

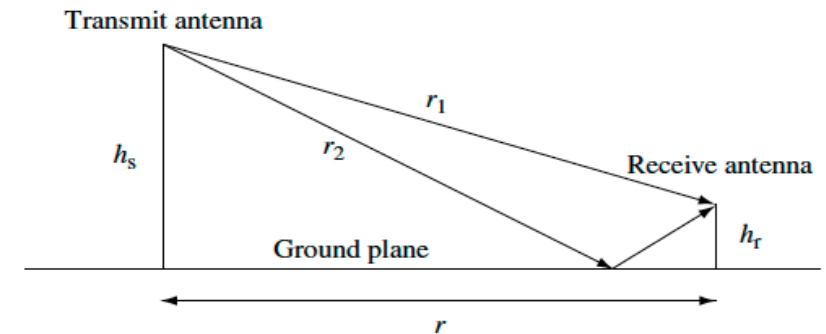
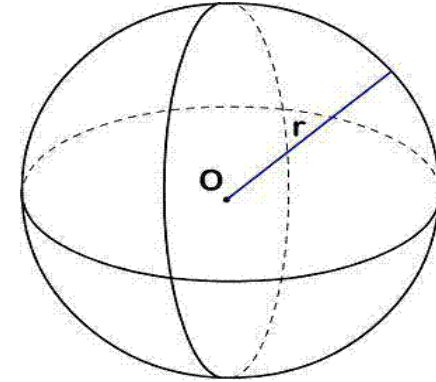
- zahtjevi snažno ovisni o konkretnoj aplikaciji
- multimedija (velika propusnost, srednje kašnjenje)
- kritične aplikacije :) (velika propusnost, malo kašnjenje)
- IoT (mali *duty-cycle*, *burst* način prijenosa)
- običan prijenos podataka (web, ftp ...)

# Komunikacijski kanal

- Osnovni problemi komunikacijskog kanala:
  - slabljenje signala
  - Interferencija
- Uzroci slabljenja signala
  - *velikog razmjera (frekvencijski neovisno)*
    - slabljenje uzrokovano udaljenošću prijamnika od predajnika
    - slabljenje uzrokovano zasjenjivanjem predajnika
  - *malog razmjera (frekvencijski ovisno)*
    - slabljenje ili pojačavanje signala uzrokovano interferencijom zbog višestrukog rasprostiranja
  - interferencija između više korisnika kom. kanala
- Spektralna efikasnost
  - slabljenje signala - ponovna iskoristivost spektra

# Slabljenje signala

- Oplošje kugle:  $4r^2\pi$
- Teoretsko slabljenje snage signala:  $\sim r^{-2}$
- Refleksija od tla na većim udaljenostima od predajnika:  $\sim r^{-4}$
- Refleksije od prepreka, apsorpcija signala na većim udaljenostima:  $e^{-r}$





# Interferencija

- Konstruktivna i destruktivna interferencija:
  - Statička komponenta: refleksije od prepreka
  - Dinamička komponenta: Dopplerov efekt
- Područja s dobrim i lošim prijemom signala
  - udaljenost od maksimuma do minimuma:  
 $\lambda/4$ ,  $\lambda=c/f$



# Tehnike diverzifikacije

- **Ideja:**

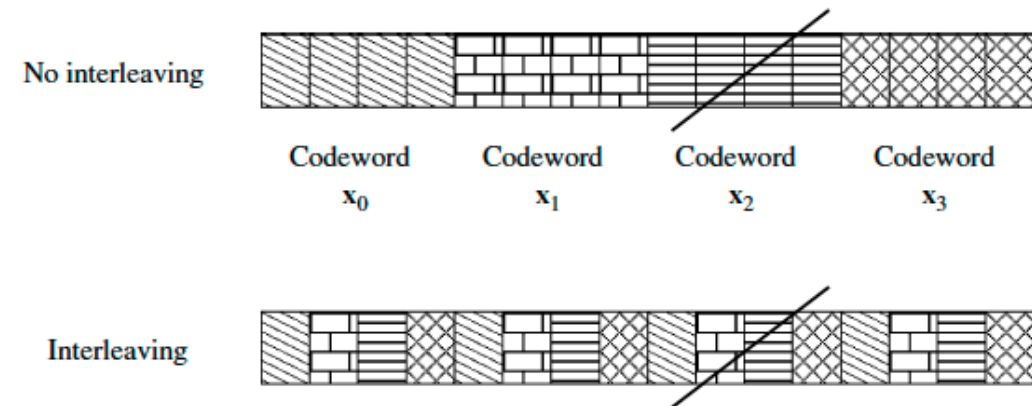
- slanje podataka različitim putovima, s neovisnim slabljenjem signala
- Rekonstrukcija podataka na strani primatelja

- **Dimenzije:**

- vrijeme
  - primjer: ponavljanje simbola
- frekvencija
  - primjer: raspršivanje spektra
- prostor
  - primjer: dvije dovoljno razmaknute antene

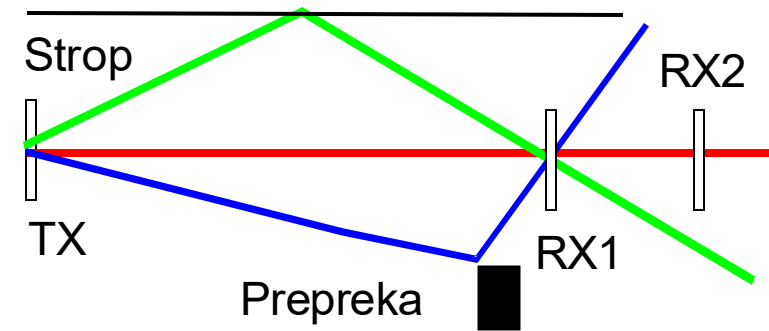
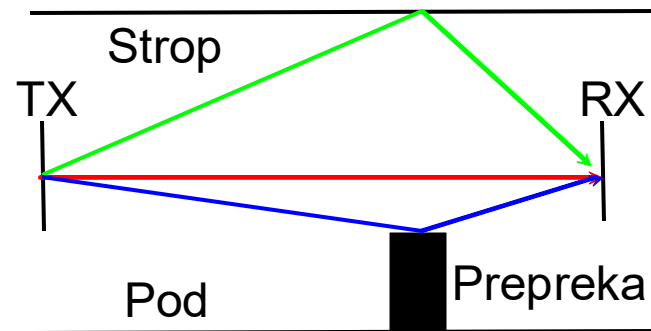
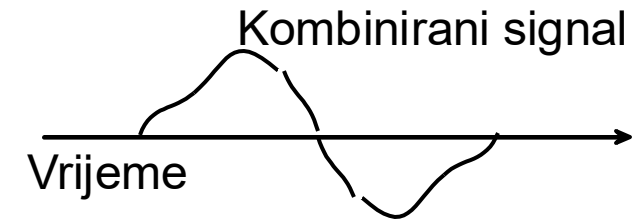
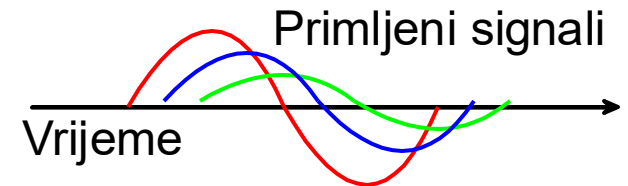
# Vremenska diverzifikacija

- Kodiranje informacije simbolima
  - višestruko ponavljanje simbola u vremenu
- Simboli raspršeni u vremenu
  - gubitak signala u kanalu periodičan
  - vremenski razmak između simbola dovoljno velik
  - ispreplitanje simbola – manja vjerojatnost potpunog gubitka informacije



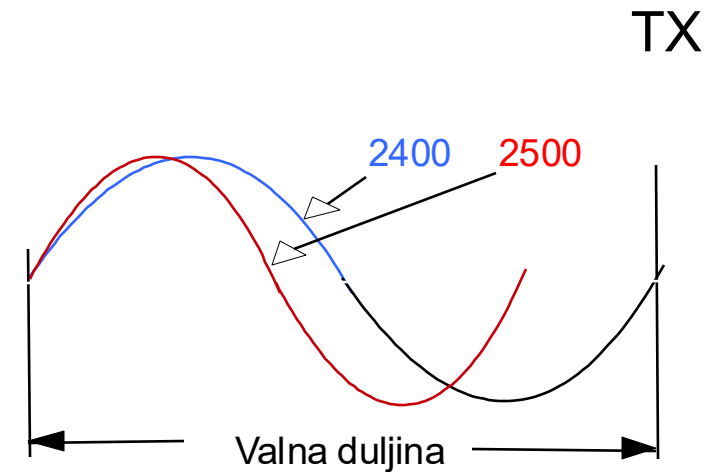
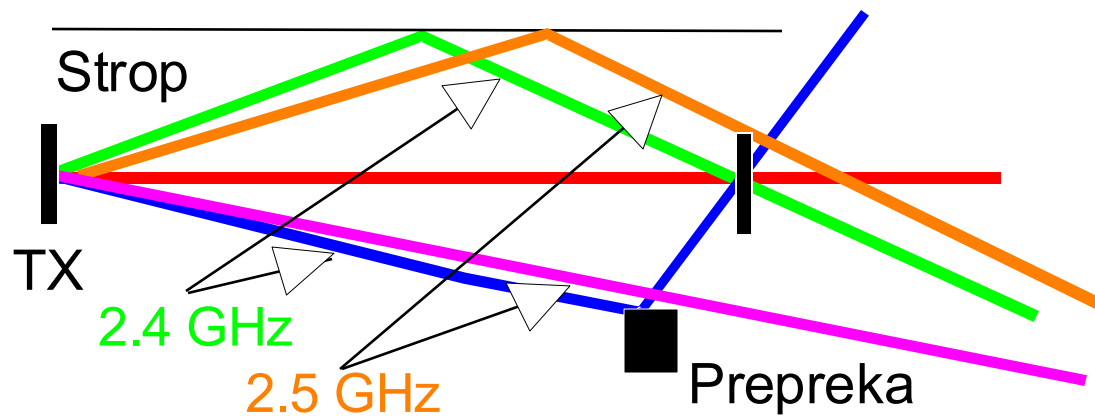
# Prostorna diverzifikacija

- Distorzirani signal i odbijanje od prepreke
- Točke bez prijama ili sa lošim prijemom
  - Svugdje u prostoru
  - Često mali pomak antene donosi ispravan prijam
  - Rješenje – dualne antene



# Frekvencijska diverzifikacija

- Odbijanje vala od prepreka i pojavljivanje točaka bez prijama ovisi i o frekvenciji vala
- Promjenom frekvencije utječe se na lokaciju točaka bez prijama



# Izbjegavanje kolizija

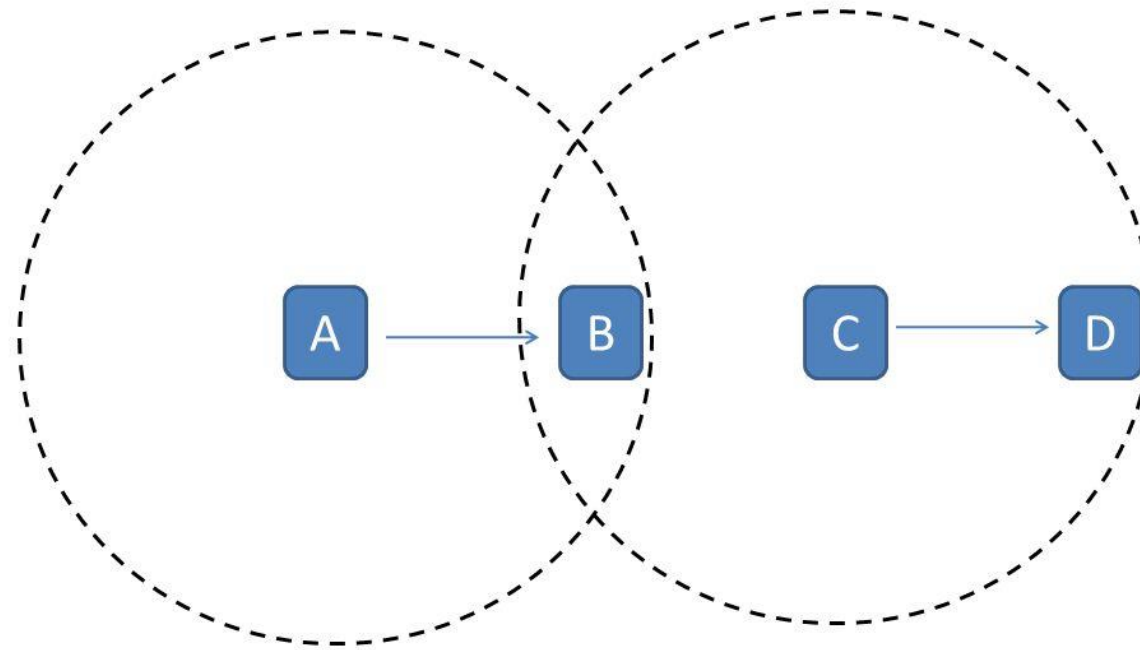
- Medij u osnovi broadcast medij (teško je ograničiti komunikaciju na 1:1)
- Potrebno korištenje tehnike za izbjegavanje kolizija
- Ethernet (žičani) koristi CSMA/CD
  - Prije slanja podatka osluškuje se kanal
  - Ako je kanal slobodan, podaci se počinju slati
    - Dok se podaci šalju, uspoređuje se željeno i stvarno stanje kanala – ako se razlikuju, došlo je do kolizije
  - Ako kanal nije slobodan ili je došlo do kolizije, pošiljalac čeka neko vrijeme (slučajno) prije ponovnog pokušaja
- Bežična komunikacija ne može osluškivati medij dok šalje podatke – nije moguć CSMA/CD

# Izbjegavanje kolizija

- Koristi se druga varijanta – CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
- U osnovi CSMA
  - Prije slanja podatka osluškuje se kanal
  - Ako je kanal slobodan, šalje se signal svim ostalima da ne šalju podatke
    - I tek zatim šalju podaci
  - Ako kanal nije slobodan, pošiljalac čeka slučajno vrijeme da se kanal oslobodi

# Problem skrivenog terminala

## The Hidden Terminal Problem

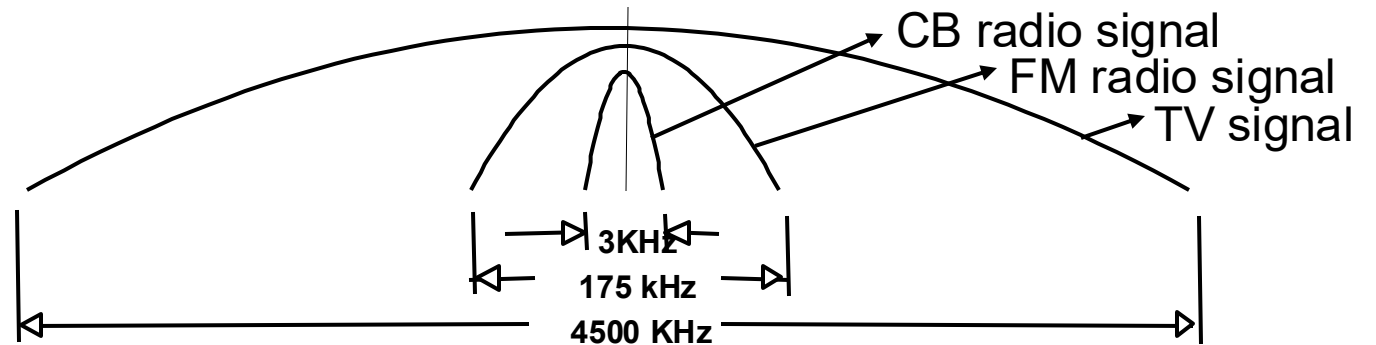




# Prijenos podataka

- Prijenos većeg broja podataka jednim signalom

- Korištenje većeg broja frekvencija (veći spektar)
- Korištenje kompleksnije modulacije



- Primjer korištenja većeg broja frekvencija

- CB (zvuk niske kvalitete), FM radio, TV (zvuk + slika)
- Više informacija – veći frekvencijski spektar

# Tehnologija raspršenog spektra

- Spread spectrum
- Frekvencijska modulacija signala – energija vala raspršuje se kroz mnogo širi pojas frekvencija nego što je nužno potrebno
- Najčešće korištene tehnologije
  - Raspršeni spektar direktnog slijeda – Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
  - Raspršeni spektar sa skakanjem frekvencije – Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

- Podaci se prije slanja kombiniraju sa pseudo-slučajnim uzorkom i moduliraju
- Svaki podatkovni bit predstavljen je nizom bitova (chipping sequence) jedinstvenog uzorka poslanih po jednoj frekvenciji
- Fazna modulacija velike brzine raspršuje spektar, smanjujući pri tome spektralnu gustoću snage
- Dužina uzorka minimalno 10 (FCC)
  - Omjer raspršivanja 1:10 ili veći

# Uzorci DSSS

- Podatkovni bitovi se operacijom XOR kombiniraju sa uzorkom i šalju

- Primjer:

- Podatak: 1001
- Uzorak: 00110011011 (dužine 11)
- Moguće kombinacije:

1 = 00110011011

0 = 11001100100

- Poslani podatak glasit će:

▪ 00110011011 11001100100 11001100100 00110011011

1

0

0

1

# Dobitak pri procesiranju

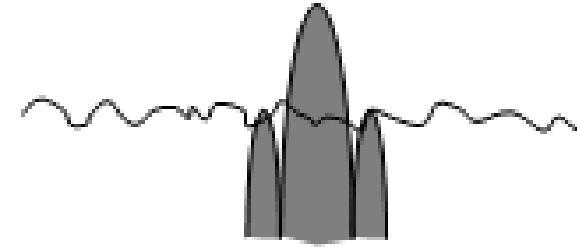
- Omjer raspršivanja odnosno dužina uzorka je zapravo dobitak pri procesiranju (*processing gain*)
- Izražava se u dB (logaritamski odnos signala i šuma)
- FCC zahtijeva bar 10 dB
- Veća vrijednost = veća neosjetljivost na interferenciju
- Moguć rad pri negativnim vrijednostima odnosa signal / šum (u dB)

# Prijam signala

- Djelomična neosjetljivost na šum u kanalu

ŠUM

SIGNAL

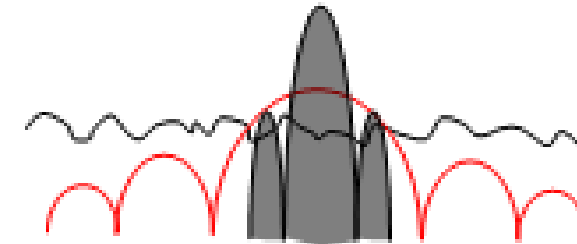
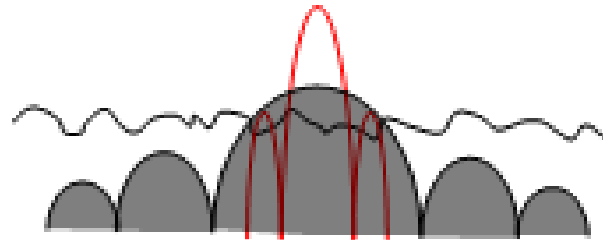


- Odbacivanje interferencije

ŠUM

INTERFERENCIJA

SIGNAL

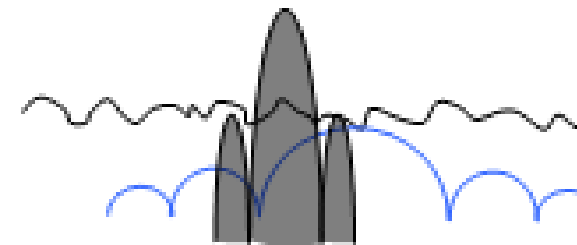
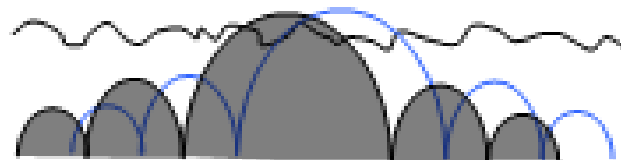


- Istovremeni prijam više signala

ŠUM

SIGNAL A

SIGNAL B



# Prijam uzorka

- Prijamnik prima odaslani niz bitova, prepoznaje jedinstvene uzorke i prevodi ih u podatkovne bitove
  - Uzorci omogućavaju da prijamnik pravilno identificira podatkovne bitove iako nije ispravno primio cijeli niz
  - U slučaju interferencije pogreška je smanjena, jer tek niz koji je više od 50% izmijenjen daje lažnu informaciju
- Primjer
  - Primljeni niz 01111011011 uspoređuje se s ispravnim uzorcima
  - Usporedbom s 00110011011 razlika je u 2 bita
  - Usporedbom s 11001100100 razlika je u 9 bitova
  - Zaključak: vjerojatno je poslan prvi niz

# Značajke DSSS

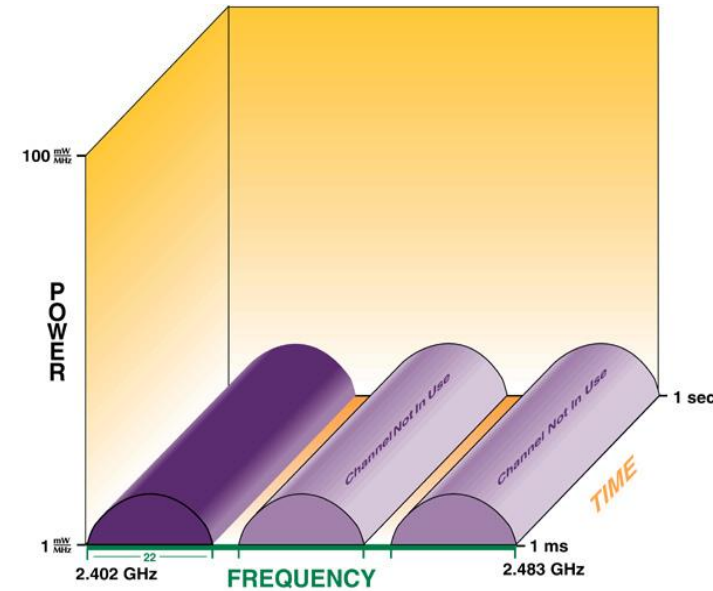
- Za slanje uzorka duljine 11 bitova koji reprezentira 1 bit potrebna je informacija 11 puta veća
  - Ako je za 1 Mbps bio potreban frekvencijski opseg od 2 MHz tada će za 11 Mbps biti potrebno 22 MHz
- Energija se široko rasprostire po području pojasa
- Ako su frekvencijski opsezi kanala širine 22 MHz tada se može 3 takva kanala upotrijebiti u istom području, a da se oni ne preklapaju (802.11)
  - Pri interferenciji u jednom području moguć prijelaz na drugi kanal – rekonfiguracija
  - Kombinacija s tehnikama odabira kanala (CSMA/CA)



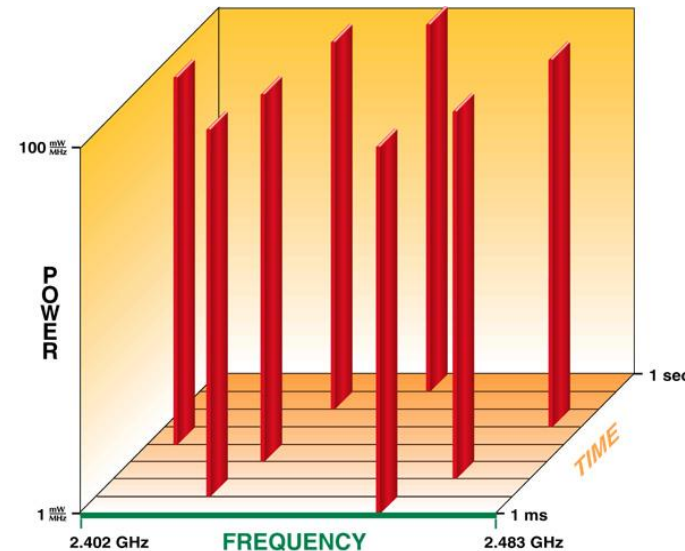
- Frequency Hopping Spread Spectrum
- Kanal (frekvencija) za prijenos podataka se brzo mijenja po pseudo-slučajnom uzorku – frekvencija skače
  - Komunikacija naizgled zauzima vrlo širok frekvencijski pojas
  - Raspršenje energije – smanjenje prosječne snage na uskom frekvencijskom kanalu
  - Potrebna sinkronizacija skakanja na obje strane
- Iskorišteno za 2.4 GHz pojas širine 83 MHz
  - Širina svakog kanala 1 MHz

# Usporedba DSSS i FHSS

- DSSS daje veću pokrivenost, domet i propusnost

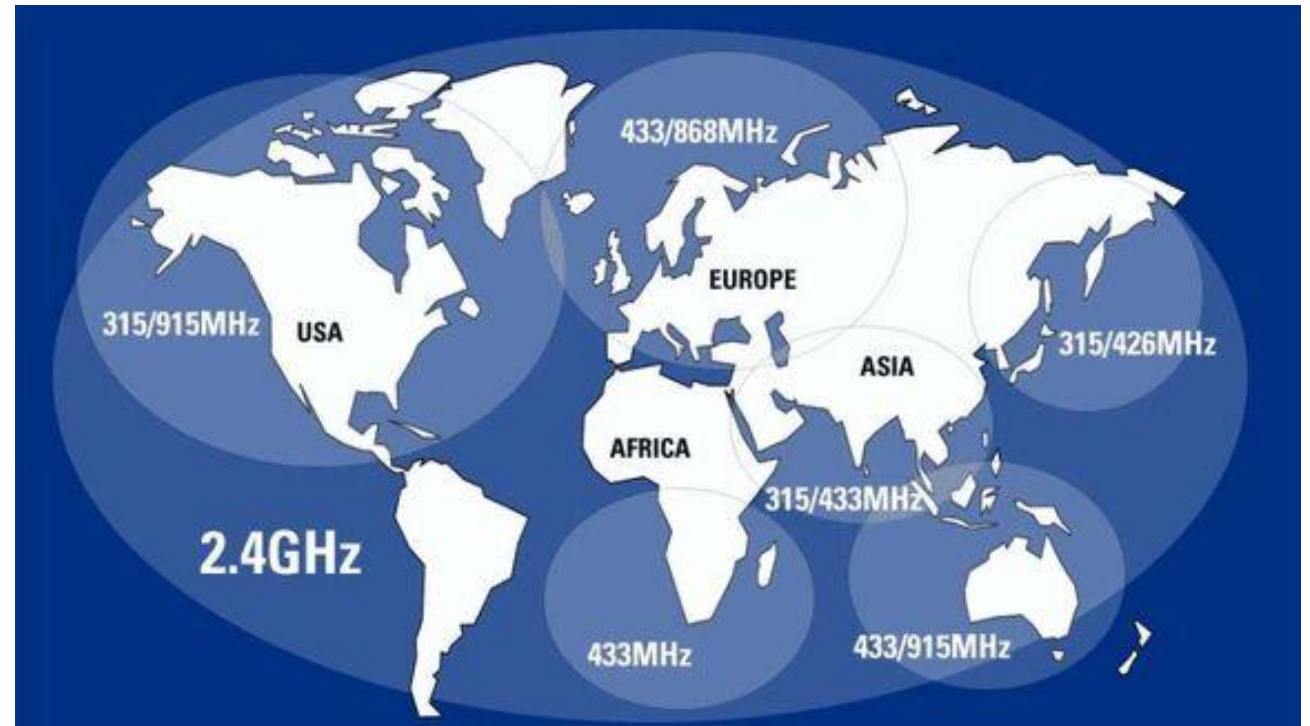


- FHSS rješava probleme višestrukog rasprostiranja signala u okruženju s jakom interferencijom



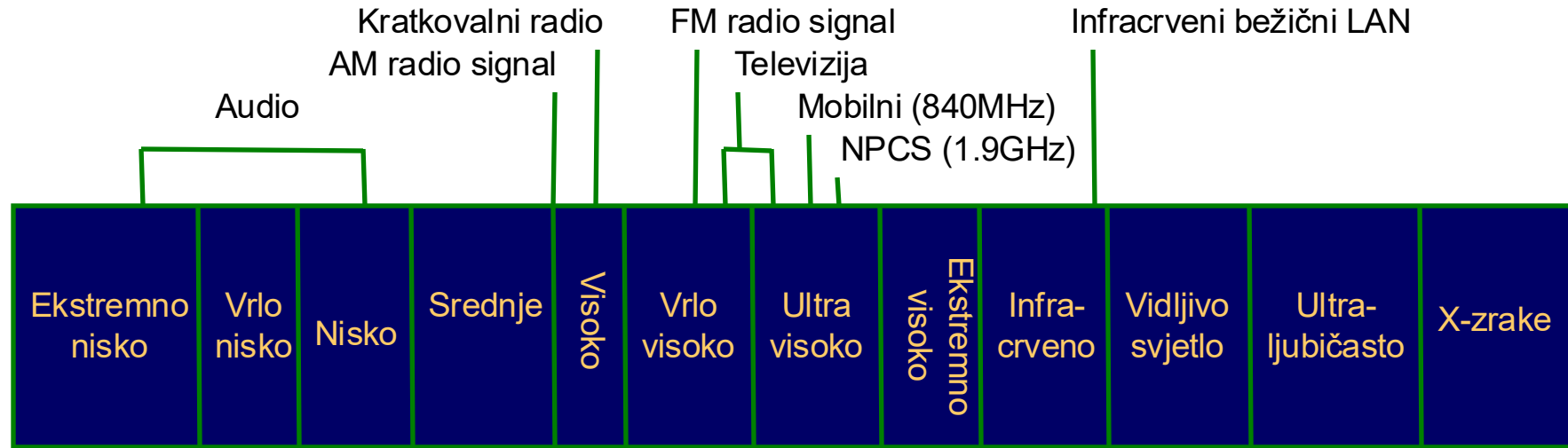
# Bežične mreže

- Umjesto žičanih veza koriste se elektromagnetski valovi u prostoru
  - Potrebne dozvole za korištenje elektromagnetskog spektra
- Američki FCC definirao tri frekvencijska pojasa za ISM (Instrumentation, Scientific and Medical) primjene
  - 900 MHz, 2,4 GHz, 5,2 GHz, 5,7 GHz
- Na svjetskoj razini dostupni pojasevi 2,4 i 5,2 GHz



Izvor: [https://iot-fpms.fandom.com/wiki/ISM\\_Band:\\_Industrial,\\_Scientific\\_and\\_Medical\\_band](https://iot-fpms.fandom.com/wiki/ISM_Band:_Industrial,_Scientific_and_Medical_band)

# ISM nelicencirani frekvencijski pojasi



**902 do 928 MHz**  
**širina pojasa : 26 MHz**

**2.4000 do 2.4835 GHz**  
**širina pojasa : 83.5 MHz**  
**(specifikacija IEEE 802.11)**

# Pojas 2,4 GHz

- **Europa**

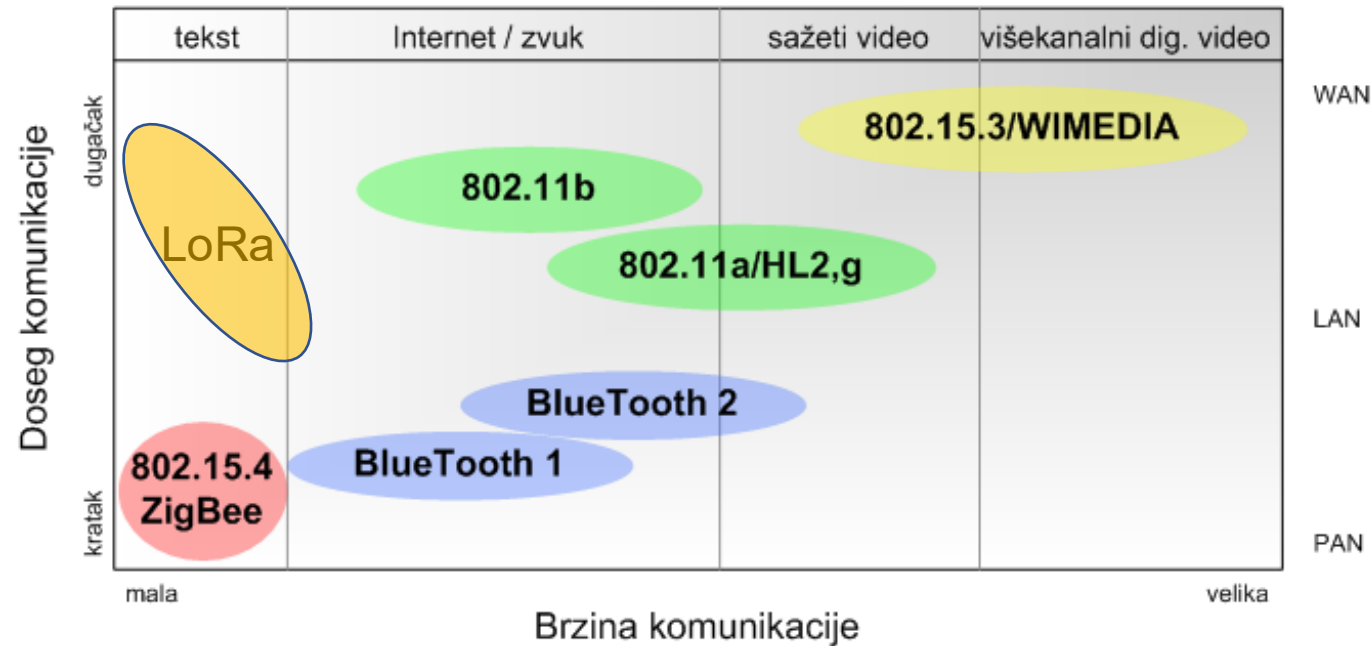
- European Telecommunications Standards Institute
- Dozvoljena snaga do 100 mW (EIRP)
- ograničenje odašiljanja: duty cycle do 1%

- **Sjeverna Amerika**

- Industry Canada i Federal Communications Commission
- Dozvoljena snaga do 1000 mW

- **Pojas 5,2 GHz slobodan u Japanu, SAD i Singapuru**

# Bežične kom. tehnologije



- IEEE 802.11x (WLAN): ~11-54 Mbps
- IEEE 802.15.4 (ZigBee): ~250Kbps
- BlueTooth (+BLE): ~1Mbps
- LoRaWAN (LPWAN): 0,3 – 11 (50) Kbps



# Mreže dugog dosega i male snage

## Low Power Wide Area Networks (LPWAN)

# Low Power Wireless Area Network

- Tradicionalne mobilne mreže (3-5G):

- naglasak na podršku mobilnosti spojenog uređaja
- podrazumijeva trajnu komunikacijsku aktivnost uređaja
- srednja do velika količina prenošenih podataka
- dominantan smjer komunikacije – *downlink* (iz mreže)
- potrošnja energije nezanemariva, ali se očekuje trajan pristup energiji ili njena jednostavna nadopuna

- IoT uređaji

- nemaju izraženu mobilnost
- vrlo ograničene zalihe energije, teško nadopunjiva
- kratkotrajna komunikacijska aktivnost
- mala količina prenošenih podataka
- dominantan smjer komunikacije – *uplink* (prema mreži)



# Low Power Wireless Area Network

- Komunikacijski doseg - preko 1km
- Scenariji korištenja:
  - pametni mjerni uređaji
  - pametno parkiranje
  - nadgledanje parametara okoliša
  - ...
- => spore pojave, mala potreba za komunikacijom (do nekoliko kratkih poruka dnevno)
- Tehnologije:
  - LoRa/LoRaWAN
  - IEEE802.15.4 (samoorganizirajuće multihop mreže)
  - IEEE 802.11 ah
  - Sigfox
  - DASH7
  - NB-IoT
  - ...

# Infrastruktura, troškovi ...

- Čije je intelektualno vlasništvo?
- Tko proizvodi čipove i elemente?
- Tko postavlja kom. infrastrukturu?
- Tko održava kom. infrastrukturu?
- Koji su troškovi komunikacije?
  - s obzirom na pristup mreži
  - s obzirom na količinu podataka
  - s obzirom na brzinu prijenosa podataka
  - ...

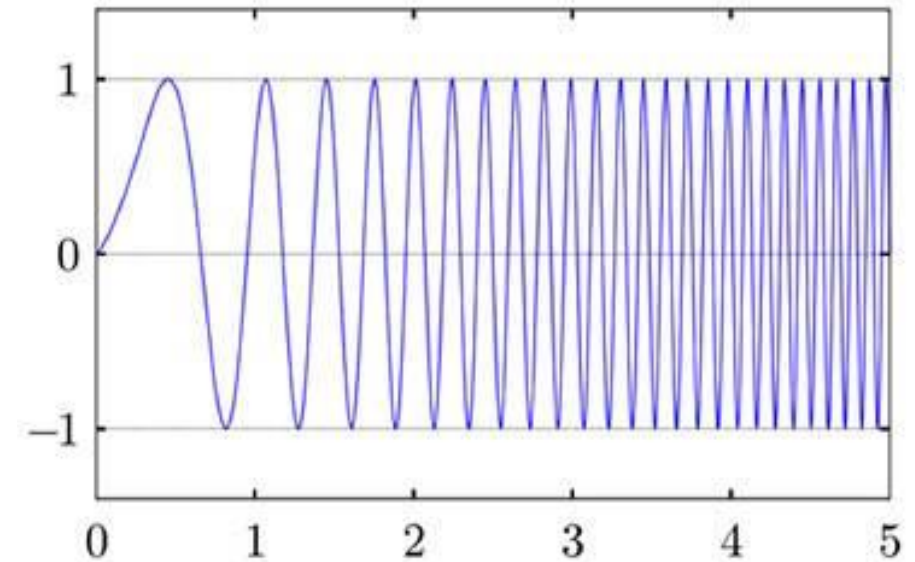
- Komunikacijski protokol dugog dosega za uređaje s vrlo ograničenom energijom
  - Doseg komunikacije
    - urbana područja 3-5km
    - ruralna područja (LoS) do 20km
  - Količina podataka u paketu – 2-255 okteta
  - Brzina prijenosa – do 50kbit/s (u stvarnosti daleko niža)
  - Vrlo visoka otpornost na smetnje, slabljenje signala (komunikacija ispod razine šuma)
- ISM pojas frekvencija (ovisno o regiji)
  - 433Mhz, 868MHz, 916MHz
  - duty cycle ~1% (Europa)
- Semtech drži patente na metodu modulacije (nije normirano i otvoreno rješenje)

# LoRa pojasi frekvencija

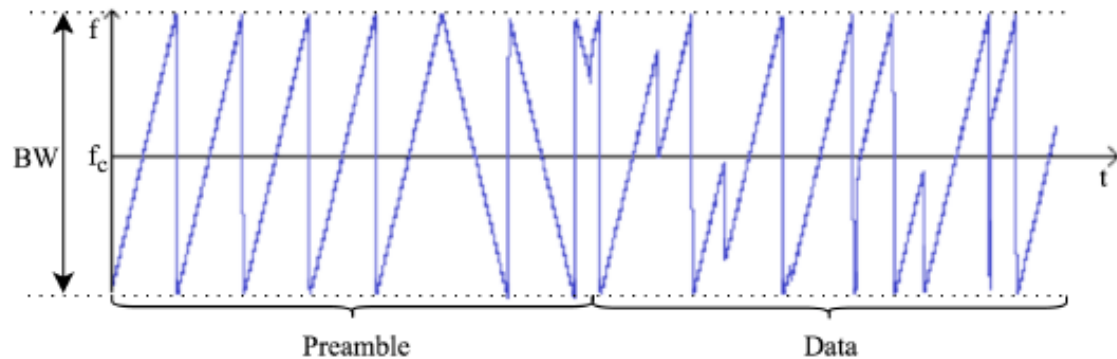
	Europe	North America
Frequency band	867-869 MHz	902-928 MHz
Channels	10	64 + 8 + 8
Channel BW Up	125/250 kHz	125/500 kHz
Channel BW Dn	125 kHz	500 kHz
TX Power Up	+14 dBm	+20 dBm typ (+30 dBm allowed)
TX Power Dn	+14 dBm	+27 dBm
SF Up	7-12	7-10
Data rate	250 bps - 50 kbps	980 bps - 21.9 kbps
Link Budget Up	155 dB	154 dB
Link Budget Dn	155 dB	157 dB

# Chirp Spread Spectrum modulacija

- Porodica modulacija raspršenog spektra
- Koriste se frekvencijski chirp-ovi s linearnom varijacijom frekvencije u vremenu
- Modulacija je parametrizirana
  - moguće je mijenjati parametre, a time i karakteristike komunikacijskog kanala
- Parametri:
  - Bandwidth – **BW** (125, 250, 500 kHz)
  - Spreading factor – **SF** (6-12) – logaritam(baza 2) broja chirp-ova po simbolu
  - Code rate – **CD** (4/5 – 4/8)



# Parametri LoRa kom. kanala (1)



- LoRa simbol
  - sastoji se od  $2^{SF}$  *chirp*-ova koji pokrivaju čitav BW komunikacijskog kanala
  - enkodira SF bitova informacije
- Trajanje pojedinog *chirp*-a ovisno samo o BW komunikacijskog kanala
- Promjena faktora raspršivanja (SF) za 1:
  - mijenja trajanje simbola za 2:

$$T_s = 2^{SF}/BW$$

# Parametri LoRa kom. kanala (2)

- LoRa koristi Forward Error Correction Code (FEC):

$$CR = 4/(4+n), n=1..4$$

- Veći n: veća pouzdanost prijenosa, preneseno manje korisnih informacija
- Korisna brzina prijenosa (*bitrate*)

$$R_b = SF \times BW / 2^{SF} \times CR$$

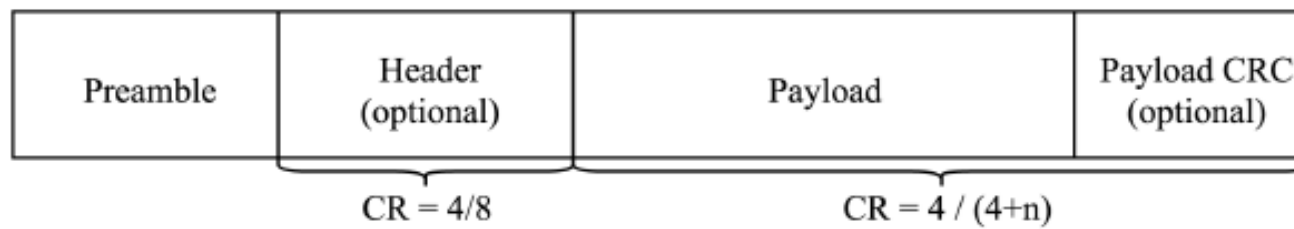
- Osjetljivost dekodera
  - veći BW – manja osjetljivost => više grešaka
  - veći SF – veća osjetljivost => manje grešaka

# Parametri LoRa kom. kanala (3)

- Virtualni LoRa komunikacijski kanali
  - definirani parovima (BW, SF)
  - nema interferencije između virt. kanala iako zauzimaju isti frekvencijski pojas (raspršeni spektar)
  - virtualni kanali efektivno povećavaju ukupan kapacitet komunikacijskih kanala
  - pojedini virtualni kanal ima:
    - različitu brzinu prijenosa (definirano s  $R_b$ )
    - različit doseg komunikacije (definirano osjetljivošću prijamnika)
- Veća brzina komunikacije -> manji doseg



# LoRa okvir

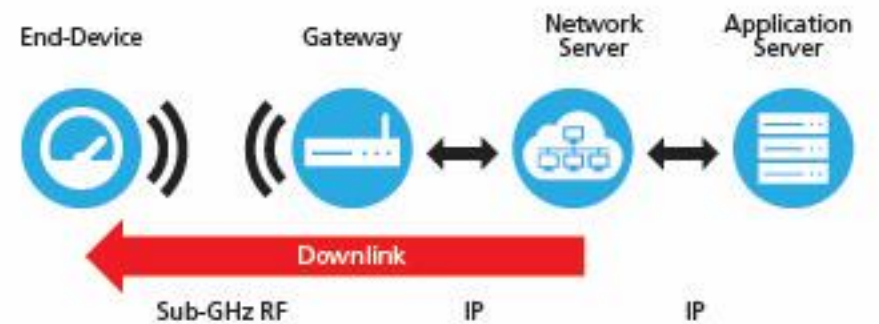
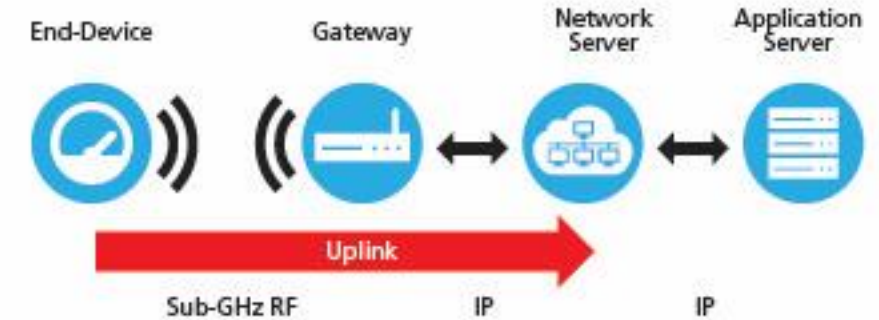
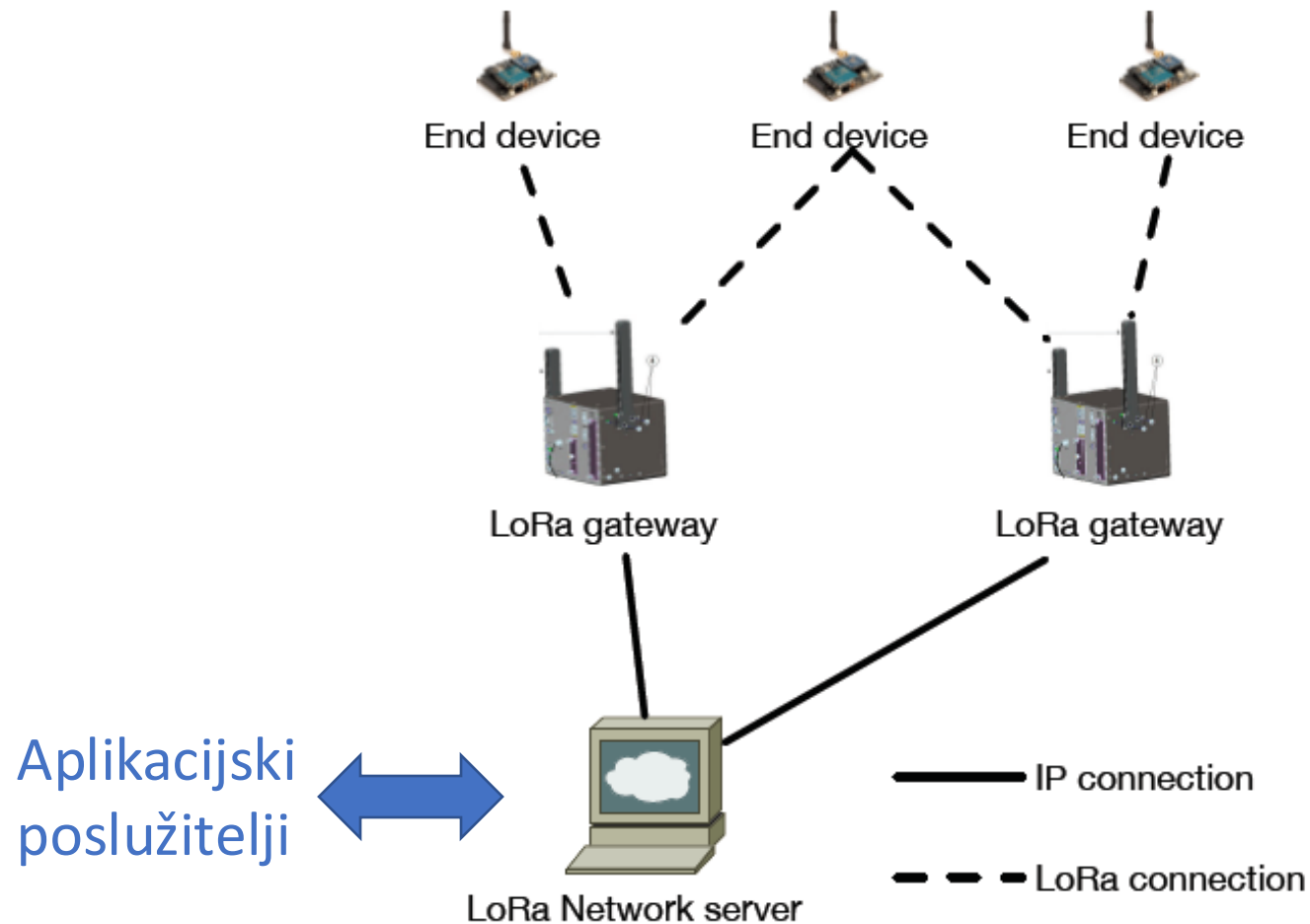


- Preambula
  - sinkronizacija predajnika i prijemnika
  - networkID
- Zaglavlje (opcionalno)
  - veličina podataka (payload)
  - CR za ostatak okvira
  - da li postoji CRC na kraju okvira
  - CRC zaglavlja
- Podatci
  - najviše 255 okteta
- CRC podataka (opcionalno)

# LoRaWAN

- MAC (Media Access Control) protokol nad LoRa fizičkim slojem
- Dizajn namijenjen mrežama osjetila
  - mala brzina prijenosa podataka
    - red veličine par desetaka bitova/s
  - mala količina podataka s jednog čvora
    - nekoliko okteta
  - vrlo kratak period aktivnosti čvorova
    - slanje podataka jednom/nekoliko puta dnevno
  - vrlo velik broj čvorova u mreži
    - podržava do 1M čvorova u mreži

# Arhitektura LoRaWAN mreže



# LoRaWAN krajnji uređaji

## ▪ Razred A (asinkroni)

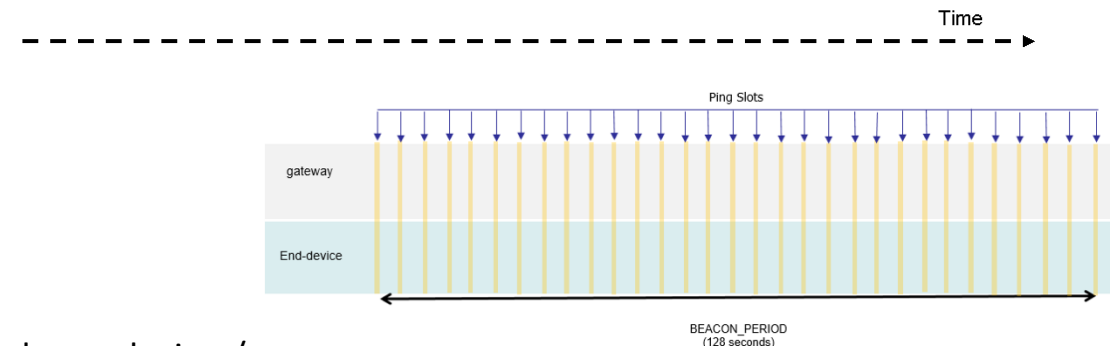
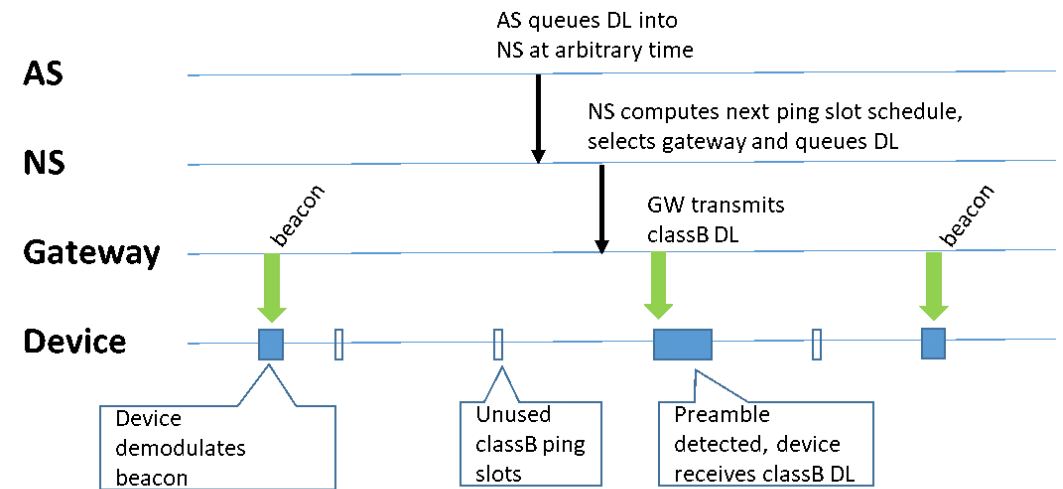
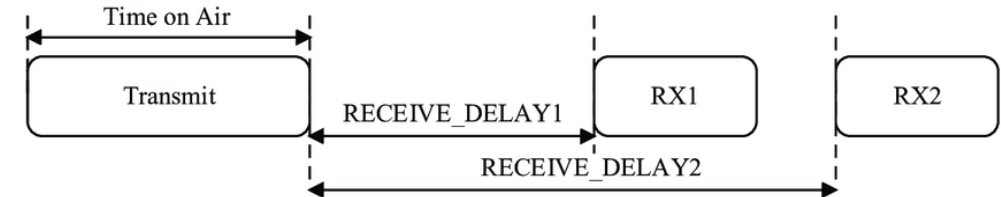
- slanje podataka – po potrebi
- primanje podataka – dva kratka prozora nakon slanja
- najmanja potrošnja energije

## ▪ Razred B (sinkroni)

- slanje podataka – po potrebi
- primanje podataka
  - prozori nakon slanja
  - prozori u određenim vremenskim trenucima
    - sinkronizacija s pristupnikom (period 128 sekundi)
    - dodjeljivanje vremenskog prozora za primanje podataka
- povećana potrošnja energije

## ▪ Razred C

- radio podsustav trajno aktivan, primanje trajno moguće (osim u trenucima slanja)



# LoRaWAN pristupnik

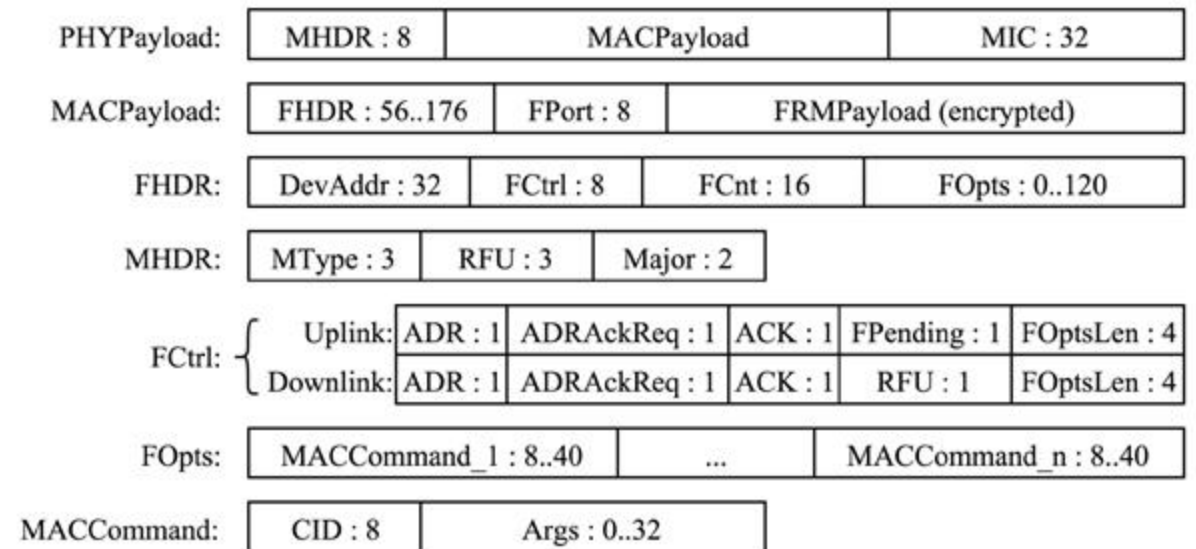
- Transparentan za krajnje uređaje
  - (višestruka) LoRa sučelja prema krajnjim uređajima
  - stalna veza velike propusnosti s mrežnim poslužiteljem
    - LAN, 3/4/5G, ...
- Od krajnjeg uređaja prema poslužitelju:
  - prikuplja sve valjane poruke
  - dodaje podatke o jačini signala (RSSI)
  - prosljeđuje poruke mrežnom poslužitelju
- Od poslužitelja prema krajnjem uređaju
  - sinkronizacija vremena s krajnjim uređajima
  - upravljanje vremenom slanja poruka prema pojedinim krajnjim uređajima

# LoRaWAN mrežni poslužitelj

- Agregacija svih poruka od strane mrežnih pristupnika
  - filtriranje dupliciranih poruka
- Stvaranje ACK poruka (za poruke koje zahtijevaju potvrdu)
- Prosljeđivanje poruka odgovarajućim aplikacijskim poslužiteljima
- Zaprimanje poruka od aplikacijskih poslužitelja, formiranje LoRaWAN poruka, prosljeđivanje *jednom* pristupniku na slanje poruke ciljnom krajnjem uređaju
- Upravljanje mrežom i krajnjim uređajima
  - MAC naredbe
  - ...

# LoRaWAN format poruke

- LoRaWAN poruka unutar korisnog sadržaja LoRa okvira
- Duljina LoRaWAN zaglavlja: 13-26 okteta
- Adresiranje uređaja:
  - Prema pristupniku (uplink): nema adrese odredišta
  - Prema uređajima (downlink): nema adrese izvorišta
- FPort (1 oktet) – multipleksiranje podataka (TCP port)
- Acknowledged / not acknowledged poruke
- ACK bit označava potvrdu prethodnog paketa
- FCnt – praćene slijeda poruka



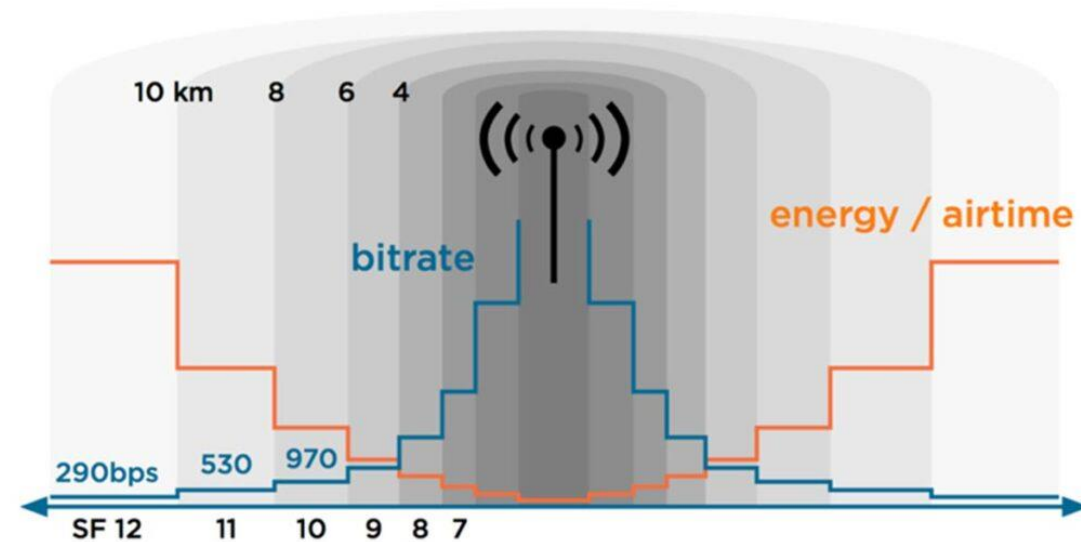
# LoRaWAN MAC naredbe

- MAC naredbe unutar LoRaWAN okvira poruke
  - upravljanje parametrima krajnjih uređaja od strane mrežnog poslužitelja
    - snaga odašiljanja
    - broj retransmisija paketa u nedostatku potvrde
    - SF (brzina slanja)
    - period budnosti
    - promjena komunikacijskog kanala
    - podešavanje vremena primanja poruka
    - stanje baterije
    - snaga signala primljenih paketa na krajnjem uređaju
    - ...
  - provjera kvalitete veze od krajnjeg uređaja prema pristupniku



# Algoritam ADR

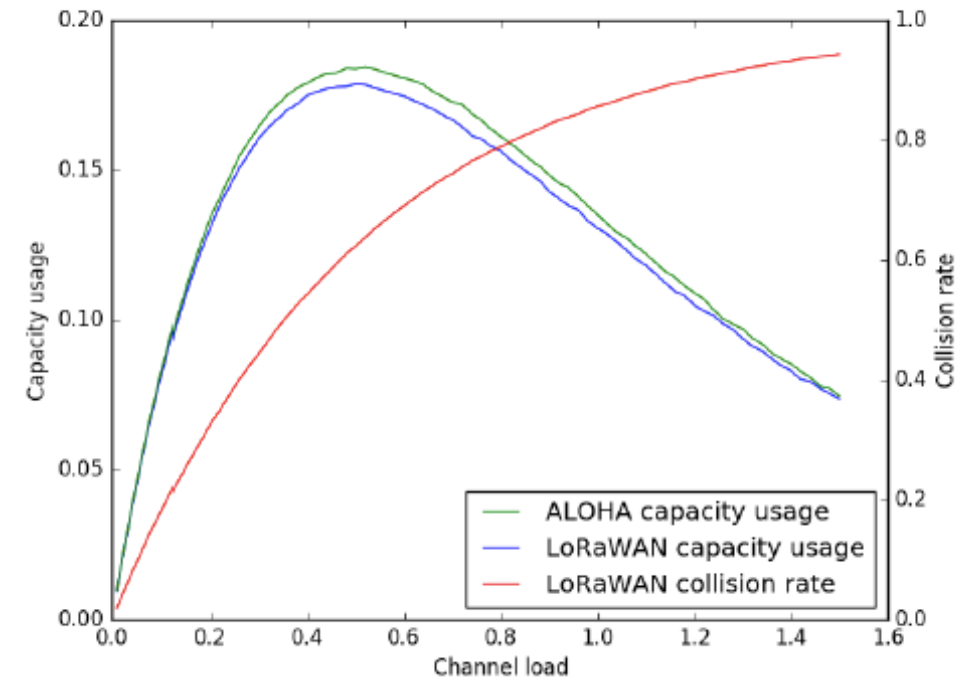
- Adaptive Data Rate (ADR) - optimiranje rada krajnjih uređaja u mreži upravljanjem njihovim parametrima komunikacije:
  - SF, BW, snaga odašiljanja
- Mrežni poslužitelj:
  - Procjenjuje kvalitetu veze pristupnika s pojedinim krajnjim uređajem (SNR), računa zalihost kvalitete signala
  - prema krajnjem uređaju šalje naredbe:
    - smanjenja snage odašiljanja
    - smanjenja SF
- Krajnji uređaj
  - Prilagođava parametre komunikacijskog kanala ADR naredbama pristupnika
  - Ukoliko prestane dobivati potvrde o odaslanim okvirima
    - Povećava SF



<https://www.actility.com/category/blog/>

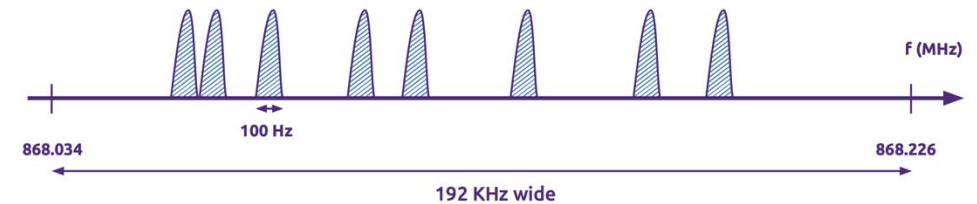
# Propusnost mreže

- LoRaWAN izvorno ne podržava CSMA/CA !
- Opterećenje kanala (channel load) – prosječan broj uređaja koji šalje paket
- Iskorištenost kapaciteta (capacity usage) – postotak iskorištenosti od ukupnog kapaciteta kanala (ovisi o parametrima kanala)



- **Zaštićena (tajna) izvedba fizičkog sloja**

- ISM frekvencijski pojas < 1GHz (868Mhz EU, 902-928MHz USA...)
- BPSK modulacija (promjena faza nosioca za enkodiranje informacije)
- 400 kanala, kanal širine 100Hz (Ultra Narrow Band)



Izvor: Sigfox Technical Overview

- **Asimetrična izvedba**

- bolji prijem na strani bazne stanice nego na strani krajnjeg uređaja
- veća kompleksnost bazne stanice od krajnjeg uređaja
- => naglasak na komunikaciji prema baznoj stanici

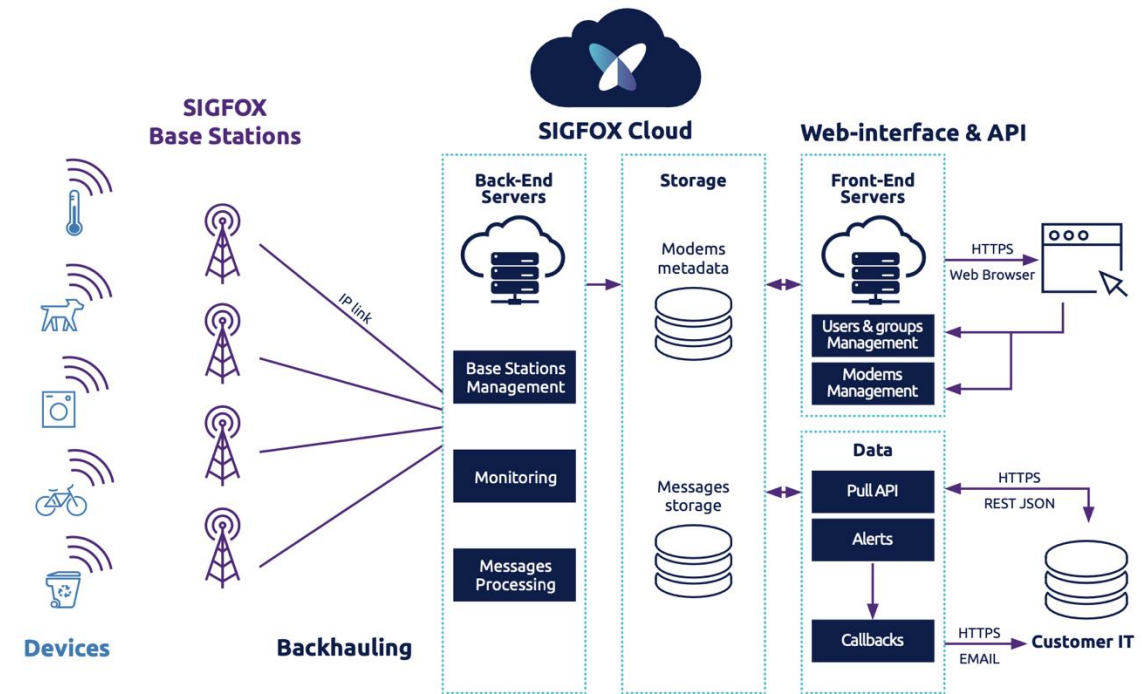
- **Doseg komunikacije**

- 30-50 km u ruralnim područjima
- 3-10 km u urbanim područjima



# Sigfox - komunikacijska infrastruktura

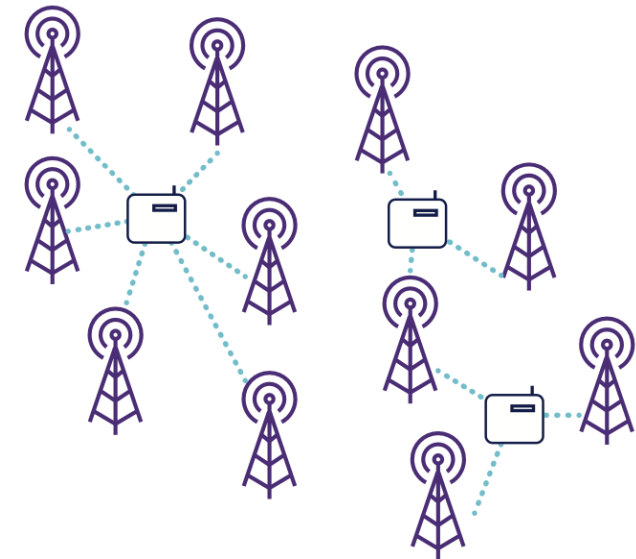
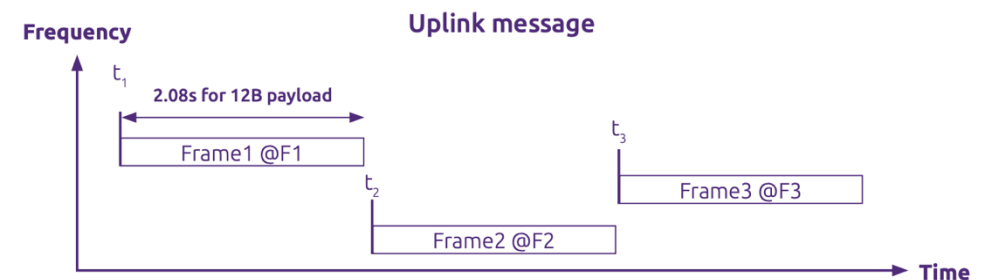
- Topologija zvijezde
  - bazna stanica kao agregator komunikacije
  - krajnji uređaji koriste baznu stanicu za komunikaciju s aplikacijskim poslužiteljima
- Infrastruktura se temelji na pružanju usluga pristupa mreži
  - veliki pružatelji usluga pristupa (prostorna ograničenost samo na jednog pružatelja)
  - naknade za korištenje usluge



Izvor: Sigfox Technical Overview

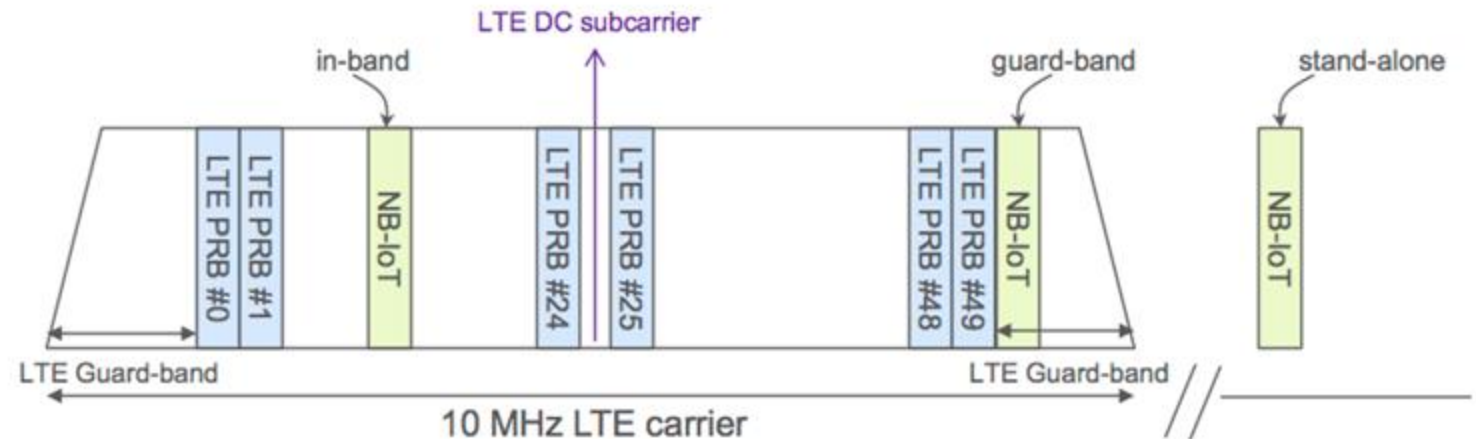
# Sigfox - komunikacija

- Pretpostavka: vrlo nizak duty-cycle krajnjih čvorova
- Duljina korisnih podataka u paketu: do 12 okteta *uplink*, 8 okteta *downlink*
- Do 140 poruka dnevno, 4 poruke/sat, ~ 100 bps (2.1s *on-air*)
- Tijek komunikacije:
  - Krajnji uređaj formira poruku
  - Aktivira se Sigfox sučelje
  - Šalje se poruka prema baznoj stanici (uplink)
  - Čeka se na eventualnu povratnu poruku (downlink)
- Samo *client push* i *polling*, *server push* nije moguć !
  - pogodno za osjetila, loše za upravljanje/aktuatore
- Pouzdanost prijenosa podataka
  - retransmisije, bez potvrde prijema
  - vremenska i frekvencijska diverzifikacija poruka
  - prostorna diverzifikacija baznih stanica



# NB-IoT

- LPWAN u sklopu licenciranog spektra mobilnih operatera
- 3GPP inicijativa, izravna konkurencija Sigfox-u
- Viskoka pokrivenost prostora korištenjem postojećih baznih stanica
  - Širina frekvencijskog pojasa: min. 180kHz za *uplink* i *downlink*
- *Brzine prijenosa:*
  - downlink vršna: 250kbit/s
  - uplink: 20kbit/s (250kbit/s)





# Mreže kratkog dosega

## Personal Area Networks (PAN)

- BlueTooth
- BlueTooth Low Energy
- 802.15.4/ZigBee

# Otkud Bluetooth ?!

- 976. jedino snagom govora danski kralj Harald Blåtand (Bluetooth) uspio je ujediniti Dansku i dio Norveške u jedinstvenu kraljevinu
- sredinom 90-ih:
  - pojavljuje se potreba za razvojem
- standarda za bežičnu komunikaciju
- kratkog dometa
  - umjesto razvoja više različitih standarda, proizvođači mobilnih uređaja se udružuju u SIG (Special Interest Group) i definiraju jedan otvoreni standard - Bluetooth\*



\* Bluetooth is a trademark of Telefonaktiebolaget L.M. Ericson



# Bluetooth - inačice

- prve verzije 1.0 i 1.0B imale dosta problema u radu, verzije 1.1 i 1.2 otklonile većinu problema, uvode poboljšanja (komunikacija bez enkripcije, adaptive frequency-hopping spread spectrum...), brzine teoretski do 1 Mbit/s
- verzija 2.1, maks. brzina prijenosa 2.1 Mbit/s
- verzija 3.0 + HS, 24Mbit/s (HS preko 802.11 kanala)
- verzija 4.0 + LE (Bluetooth Smart) (2010.)
  - 4.1 (2013.), 4.2 (2014.) -> proširenja (sigurnost, IoT)
- verzija 5 (2016.)
  - upravljanje omjerom brzina / doseg

# Osnovna svojstva

- inicijalna namjena - tehnologija za bežično povezivanje mobilnih uređaja
- za rad troši malo energije - pogodna za uređaje s baterijskim napajanjem
- uređaji koji implementiraju Bluetooth bežičnu tehnologiju dijele se u 3 razreda, ovisno o maksimalnoj potrošnji energije za bežično komuniciranje

Class	Maximum Permitted Power mW (dBm)	Range (approximate)
Class 1	100 mW (20 dBm)	~100 meters
Class 2	2.5 mW (4 dBm)	~10 meters
Class 3	1 mW (0 dBm)	~1 meter

# Prijenosni medij

- norma je definirana na dvije razine
  - fizička razina – radio frekvencija
  - viša razina – protokoli i profili
- prijenosni medij je nelicencirani ISM (Industrial, Scientific, Medical devices) pojas frekvencija, područje 2.400–2.500 GHz
  - Bluetooth koristi frekvencije od 2.402 GHz do 2.480 GHz
  - frekvencijski spektar podijeljen je na 79 komunikacijskih kanala širine 1MHz
  - kanal je podijeljen u vremenske odsječke u trajanju od 625μs
    - jedan uređaj (master) upravlja satom unutar grupe komunicirajućih uređaja
    - period 312,5μs, 2 perioda=slot, 2 slota=par (m\_rx,m\_tx)

# Bluetooth mehanizmi zaštite

- ugrađeni mehanizmi za izbjegavanje interferencije
  - odašiljanje slabog signala (red veličine mW), prilagodljiva snaga odašiljanja signala ovisno o interferenciji
  - mali podatkovni paketi
  - brze **promjene komunikacijskog kanala** u pravilnim vremenskim razmacima u pseudo-slučajnom redoslijedu
    - ili tehnika frekvencijskog skakanja s raspršenim spektrom (*FHSS, frequency hopping spread spectrum*)
    - redoslijed mora biti unaprijed poznat prijamniku i predajniku
  - predajnik mijenja frekvencije **1600 puta u sekundi**
  - interferencija eventualno samo mali dio sekunde, a to se može riješiti retransmisijom na drugoj frekvenciji

# Bluetooth podatci i glas

- Bluetooth normom definirane su dvije vrste veza:
  - sinkrona spojno orijentirana veza (*Synchronous Connection Oriented – SCO*)
    - za prijenos govora
    - istovremeno do tri aktivna glasovna kanala
  - asinkrona bespojna veza (*Asynchronous Connectionless Link – ACL*)
    - za prijenos podataka i upravljačkih informacija
- brzine prijenosa podataka:
  - Bluetooth 1.2 – 721 kbit/s
  - Bluetooth 2.1 (+ EDR, *Enhanced Data Rate*) – 2.1 Mbit/s

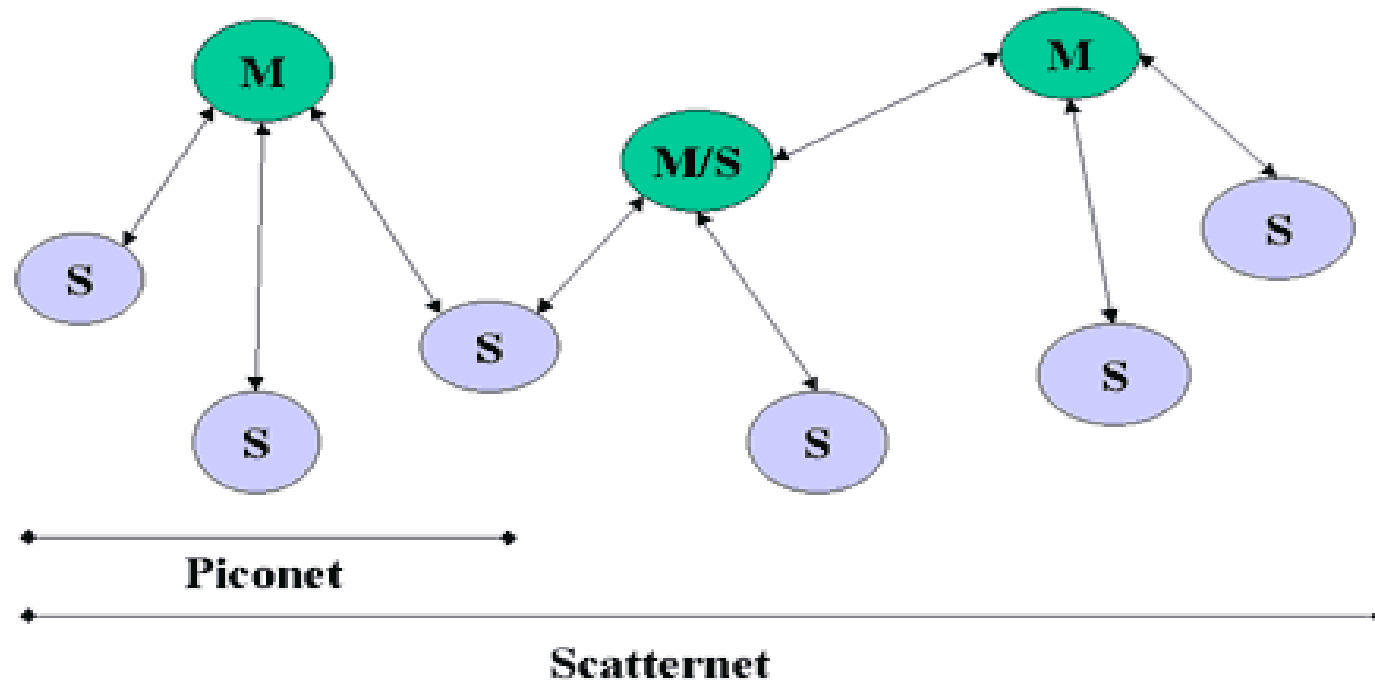
# Bluetooth – *ad-hoc* mreža

- mreža se formira tek kad postoji potreba za prijenosom podataka tj. ne zahtjeva prethodnu infrastrukturu
- svaki uređaj može poprimiti jednu od 2 uloge:
  - *master*
    - postavlja redoslijed promjena frekvencije, *slave* uređaji se moraju prilagoditi *masteru*
    - može simultano komunicirati sa do 7 *slave* uređaja (adrese su 3-bitne), istovremeno samo 1 *master* i 1 *slave* mogu razmjenjivati podatke
  - *slave*
    - izražava zahtjev za komunikaciju s *master* uređajem

# Bluetooth – *ad-hoc* mreža

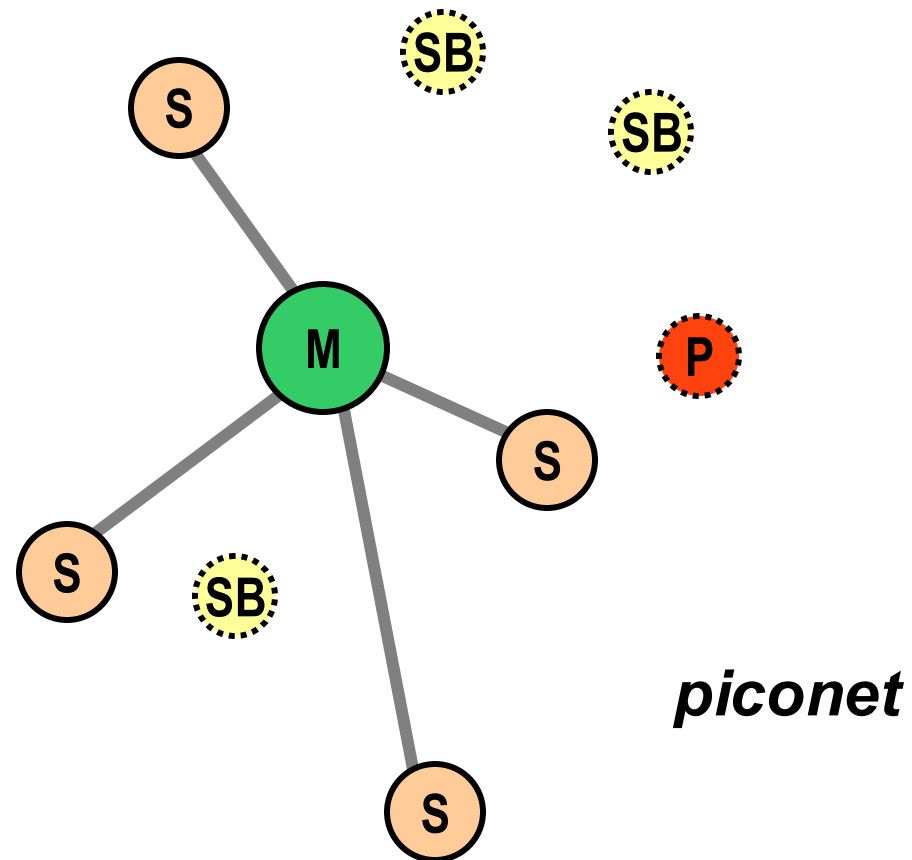
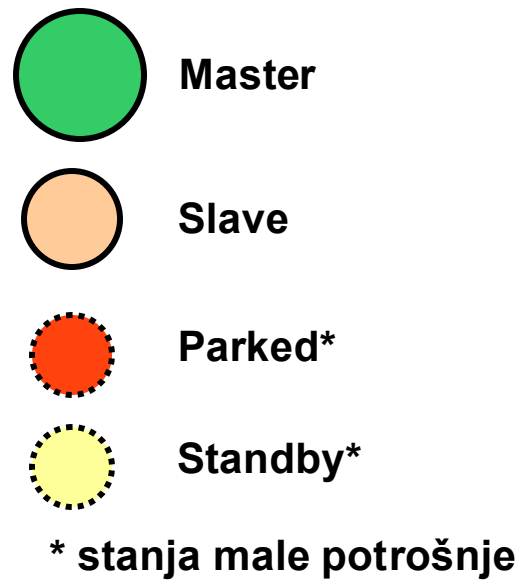
- dva tipa mreža:

- **piconet** je ćelija s jednim *masterom* i do 7 *slave* modula
- **scatternet** čini nekoliko povezanih *piconeta*
- vezu između *piconet* mreža čini uređaj uključen u oba *piconeta* (*master* u jednom, *slave* u drugom *piconetu*)



# Stanja uređaja

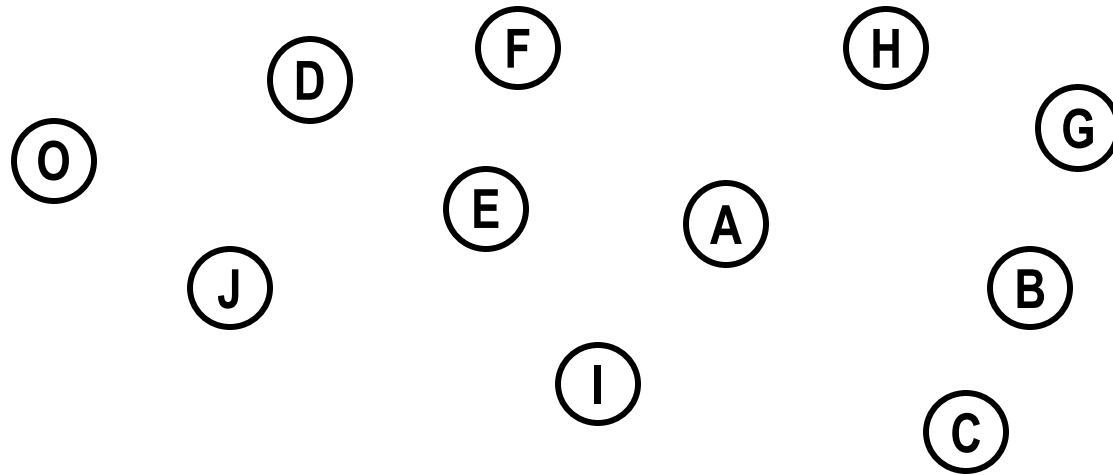
- uređaj je u jednom od 4 stanja:





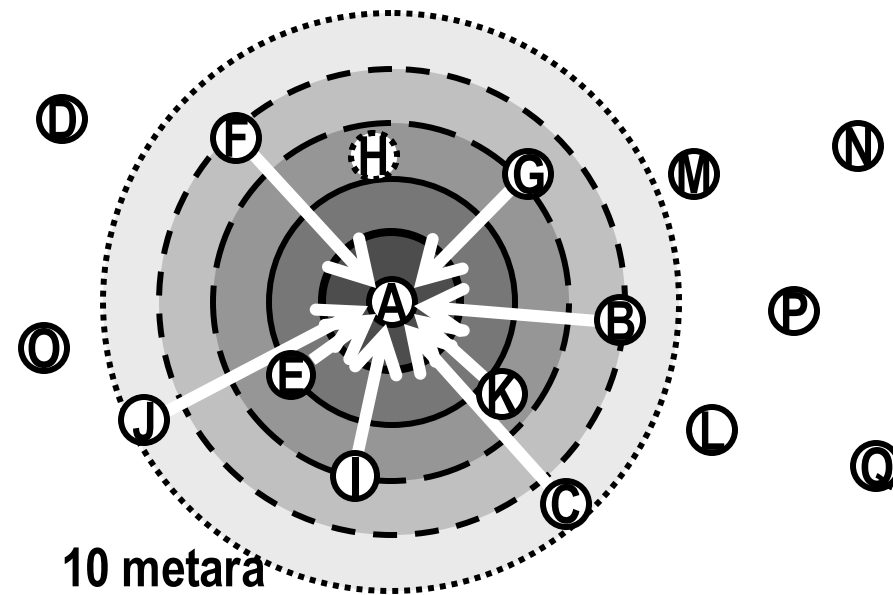
# Povezivanje (1)

- inicijalno uređaji ne znaju jedni za druge:
  - nisu sinkronizirani
  - osluškiju u *standby* načinu rada
  - mogu postati *master* ili *slave* uređaji



# Povezivanje (2)

- uređaj koji započinje komunikaciju postaje *master*
  - traži uređaje u blizini slanjem upita (*inquiry*)
  - uređaji u dometu odgovaraju porukom *inquiry response*:



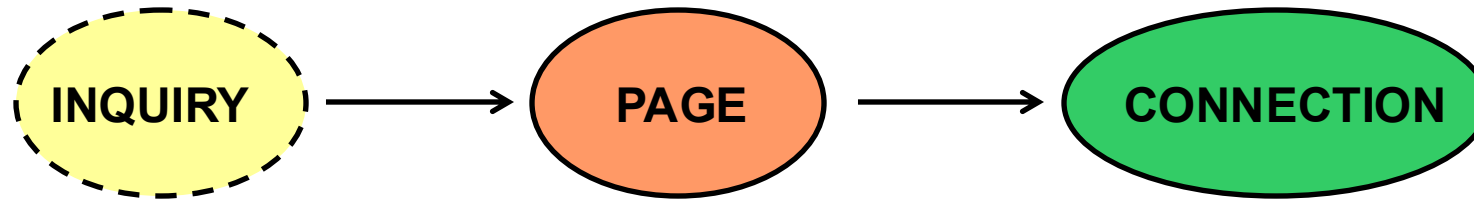
- ako je faza *inquiry* uspješno završena, prelazi se u fazu *page* – dogovor oko parametara komunikacije

# Povezivanje (3)

- faza page:

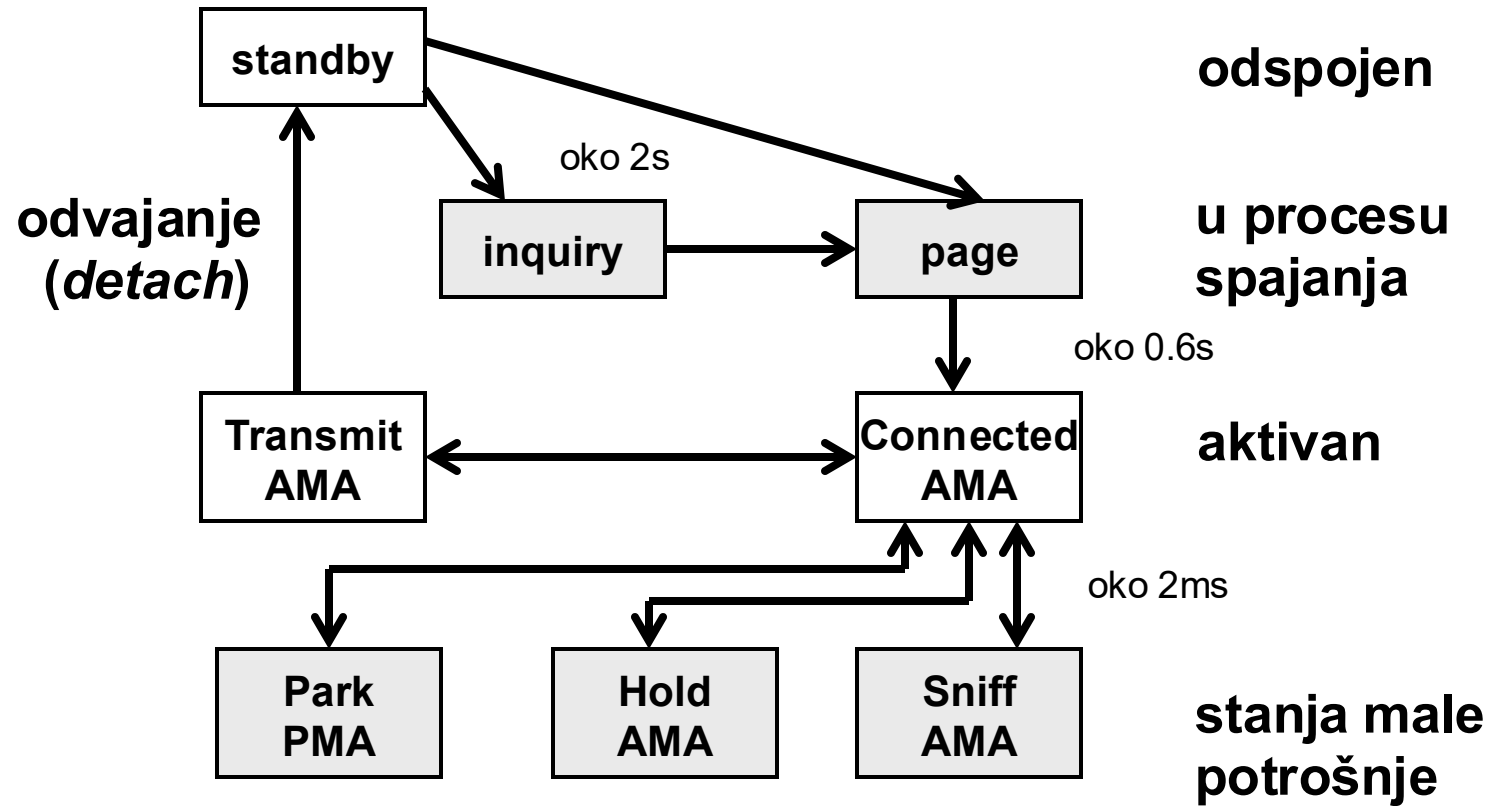
- uređaj koji je započeo pretraživanje šalje svim uređajima poruke s postavkama veze (page response)
- uređaji koji su primitkom početne inquiry poruke u odgovarajućem stanju primitkom poruke page response prelaze u stanje connection

- dakle, pri uspostavi veze uređaj prolazi kroz tri stanja:



# Povezivanje (4)

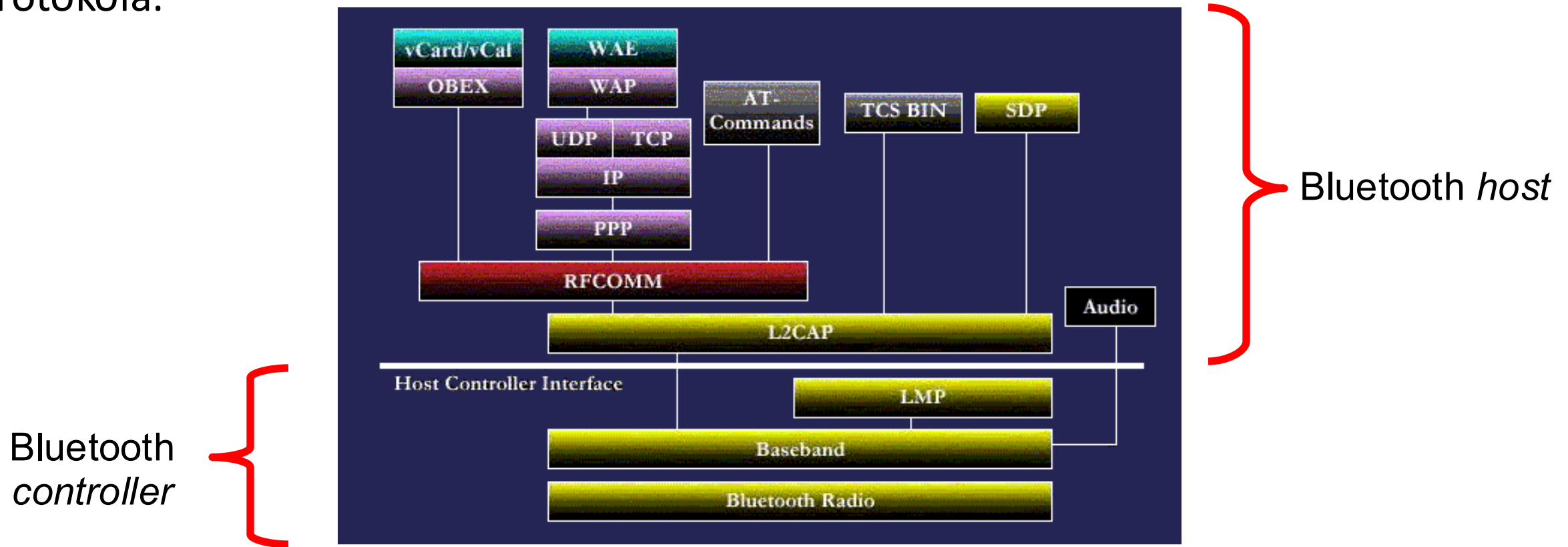
- sva moguća stanja uređaja:



- AMA=Active member address, 3-bitna adresa aktivnog uređaja
- PMA=Parked member address, 8-bitna adresa neaktivnog uređaja

# Protokolni složaj

- osim komunikacije na fizičkoj razini, Bluetooth specifikacija definira cjelokupni složaj protokola:



- host* (računalo) i *controller* (komunikacijski uređaj) komuniciraju preko standardnog sučelja (*Host Controller Interface - HCI*)

# Protokolni složaj

- podjela protokola po namjeni:
  - Bluetooth bazni protokoli: *Baseband*, *Link Manager Protocol*, *L2CAP*, *SDP*
  - Protokol za zamjenu serijskog kabela: *RFCOMM*
    - emulira RS-232 kontrolne i podatkovne signale preko Bluetooth *Baseband* sloja, omogućavajući prijenos podataka višim slojevima koji koriste serijsko sučelje kao prijenosni mehanizam
  - Protokol za kontrolu telefonije: *TCS Binary*
  - Usvojeni protokoli: PPP, UDP/TCP/IP, OBEX, WAP
- protokoli se ne koriste izravno već kroz profile (*Bluetooth profiles*)
  - profil definira moguće namjene/uloge uređaja

# Komunikacija

- **poslužitelj:**

- nudi usluge klijentima oglašavanjem
- za svaku ponuđenu uslugu postoji zapis (Service record) koji opisuje uslugu
- zapisi o uslugama spremaju se u Service Discovery Database (SDDB) - sadrži je svaki poslužitelj, klijenti je pretražuju

- **klijent:**

- zahtjeva uslugu od servera čime se inicira komunikacija
- pretražuje SDDB na strani servera za željenom uslugom
- također može otvoriti određenu uslugu te postati server u bilo kojem trenutku

# Tijek komunikacije

- inicijalizacija uređaja
- poslužitelj stvara opisnik usluge (Service Record) i otvara istu (dodaje Service Record u svoj SDDB)
- klijent započinje pretragu za susjednim uređajima spajanjem na fizičkoj razini (inquiry, page, connection)
- nakon uspostave veze, pronađene uređaje pretražuje za željenom uslugom (pretražuje njihov SDDB)



# Opisnik usluge (*Service Record*)

- sadrži attribute koji opisuju određenu uslugu
- svaka usluga je definirana jedinstvenim 128 bitnim *Universally Unique Identifier (UUID)* identifikatorom
- često korišteni servisi imaju 16 ili 32 bitni UUID (radi lakšeg korištenja), koji je proširiv na 128 bita

# Bluetooth Low Energy

- Za uređaje ultra-niske potrošnje
  - Rješava probleme Bluetooth-a:
    - trajanja povezivanja
    - problem trajnosti veze (oslušivanje mastera od strane ostalih članova mreže)
  - Oko 100x manja potrošnja energije od BT
- Različiti profili komunikacije: stabilan prijenos (BT) – *burst* prijenos (BTLE)
- Organizacija komunikacije:
  - Point-to-point (+ piconet)
  - Mesh
  - Broadcast
- Single i dual mode implementacije BT 4.0
- Isti frekvencijski pojas
  - 40 komunikacijskih kanala širine 2MHz

# BLE vrste uređaja

- **Poslužitelj**

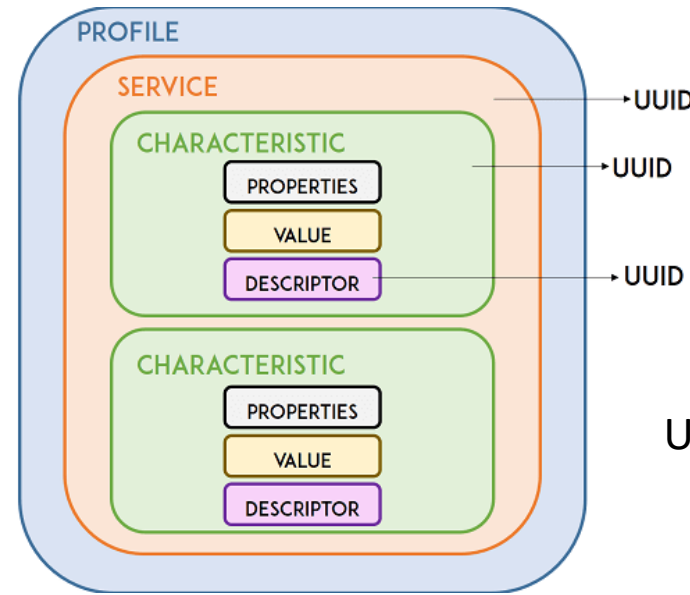
- Implementira jednu ili više usluga
- Oglašavanje usluga klijentima unutar komunikacijskog dosega

- **Klijent**

- Skenira aktivne (oglašavane) poslužitelje unutar komunikacijskog dosega
- Spaja se na uslugu poslužitelja

# BLE GATT

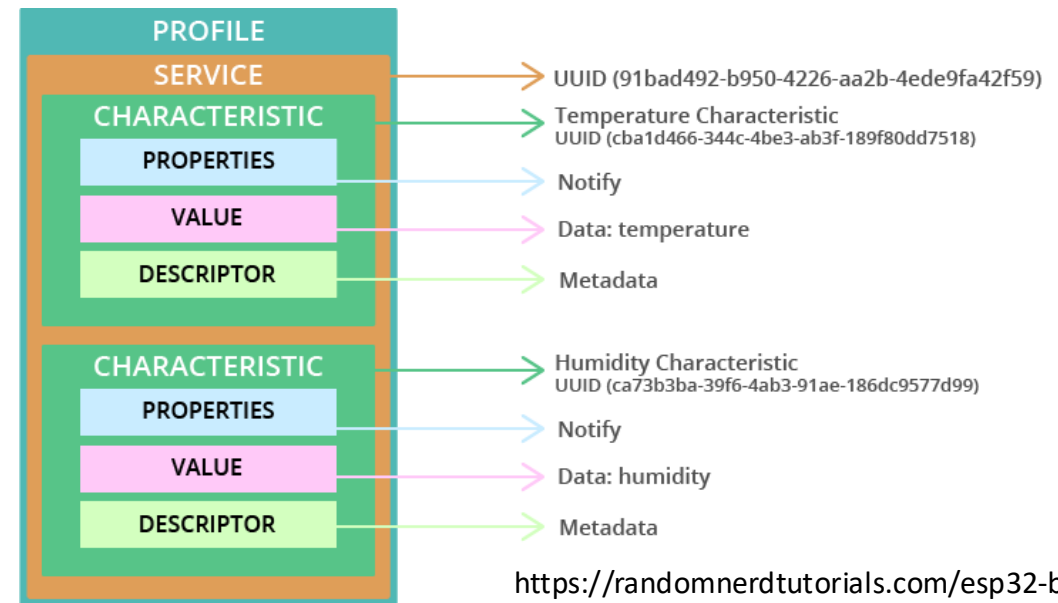
- GATT – generički atributi
- Hijerarhijska struktura:
  - Profil poslužitelja
    - Usluga 1
      - Karakteristika A
        - Svojstva
        - Vrijednost
        - Opisnik
      - Karakteristika B
        - Svojstva
        - Vrijednost
        - Opisnik
      - ...
    - Usluga 2
      - ...



Predefinirane usluge  
(baterija, tlak, HR, ...)

Kratki UUID-i za poznate  
(normirane) usluge

UUID: 128 bita



# BLE karakteristike usluge

- Value – vrijednost (ma što to bilo)
- Svojstva karakteristike:
  - Broadcast (podaci u paketima oglašavanja)
  - Read (čitanje, inicirano od klijenta)
  - Write without response (postavljanje vrijednosti, inicirano od klijenta, bez potvrde)
  - Write (pisanje vrijednosti, inicirano od klijenta, s potvrdom klijentu)
  - Notify (obavijest o promjeni, inicirano od servera)
  - Indicate (*obavijest o promjeni, inicirano od servera, potvrda serveru*)
  - Authenticated Signed Writes (pisanje vrijednosti, inicirano od autenticiranog klijenta)

- Zašto ?
  - Bluetooth
    - Ograničenja u povezivanju većeg broja uređaja međusobno
    - Puno okruženja koja traže srednje brz prijenos uz veću uštedu energije i manju složenost od Bluetootha
- Nova norma za bežičnu komunikaciju na kratke udaljenosti
- ZigBee Alliance
  - Udruga brojnih kompanija (među njima Motorola, Philips, Samsung, LG)
  - Krajem 2004. izlazi prva usvojena specifikacija



# ZigBee

- 2005. postaje međunarodna norma za bežične mreže u nadgledanju i upravljanju
  - pod kontrolom ZigBee Alliance
- Naziv
  - Potječe od eng. naziva za pčele koje posebnim tipom plesa prenose informacije (npr. gdje je hrana) među članovima roja

- ZigBee (IEEE 802.15.4)
  - Glavni cilj - fleksibilnost u suradnji i sučeljavanju uređaja različitih proizvođača
  - Mikrociljevi - povezivanje (nadgledanje, upravljanje) jeftinih uređaja:
    - jednostavnost
    - niska cijena
    - mala potrošnja
    - brzina (maksimalno 250 kb/s)
    - upotreba slobodnih (nelicenciranih) radijskih pojasa
    - sposobnost samoprilagodbe mreže i preusmjerenja poruka



# Primjena

- Automatizacija poslovnih prostora i domaćinstava
  - Grijanje, klimatizacija, ventilacija, rasvjeta, vrata, zaključavanje, kućna zabava
- Sigurnost i zaštita
  - Detekcija požara, provala
- Zdravstvo
  - Osjetila i uređaji za pomoć u dijagnostici, praćenje stanja pacijenata, sportaša i sl.
- Nadgledanje vozila
  - npr. senzor tlaka u gumi
    - male udaljenosti, vrlo neprikladno koristiti kabel

# Primjena (II)

- Poljoprivreda
  - Praćenje usjeva i uvjeta okoliša
- Opće situacije (mreže) gdje
  - čvorovi većinu vremena "spavaju" – ne primaju i ne šalju poruke (informacije)



# Grada ZigBeea

- Troslojna arhitektura, osnovni slojevi:
  - Fizički sloj – IEEE 802.15.4
    - Osnovno adresiranje (MAC – Media Access Control)
    - Kontrola medija (odašiljanje)
  - ZigBee stog (*stack*)
    - Uspostavljanje mreže (razne topologije)
    - Prosljeđivanje poruka (*message routing*)
    - Zaštita podataka (autentikacija, enkripcija, razmjena ključeva)
  - Aplikacije
    - Koriste usluge mreže za svoj rad
    - Daju funkcionalnost čvoru
    - Jedan čvor može sadržavati više aplikacija

Aplikacijski sloj

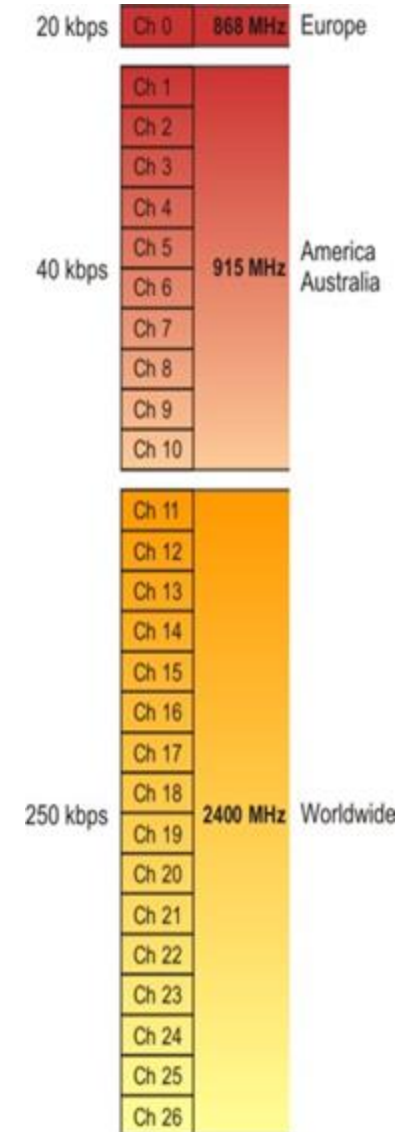
ZigBee stog

Fizički / podatkovni  
sloj

# ZigBee

- Fizički sloj

- koristi radijski pojas (RF)
  - frekvencija definirana normom
- slobodni radijski pojasi nisu jednaki u svim zemljama
  - ZigBee se i ovdje prilagođava – može koristiti jedan od tri:
    - 868 Mhz
    - 915 Mhz
    - 2400 Mhz
  - jedan pojas sastoji se od više kanala
- DSSS

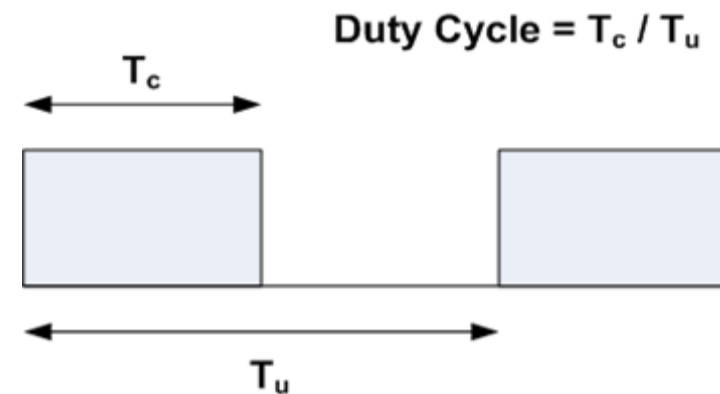


- Fizički sloj (nastavak)
  - radijski pojasevi
    - značajke RF pojasa niže frekvencije
      - manje korisnika (kanala)
      - manje interferencija
      - manja apsorpcija i refleksija energije radio valova
    - 2400 Mhz ima također prednosti
      - bolja raširenost (prihvaćenost) – gotovo posvuda je prihvaćen
      - veća brzina prijenosa (viša frekvencija )
      - veći broj kanala
      - niža potrošnja (slanje/primanje traje kraće zbog više frekvencije)
  - domet
    - pri izlaznoj snazi od oko 0 dBm
      - otvoren prostor: oko 200 m
      - zatvoren prostor: oko 30 m
        - apsorpcija, refleksija, difrakcija, efekt stojnog vala

# Niska potrošnja

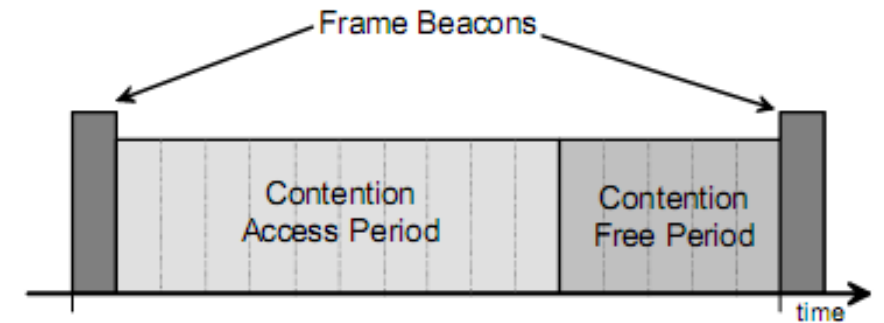
- **Autonomni mrežni uređaji**
  - jednostavna i jeftina instalacija
  - fleksibilni po mjestu primjene
  - mrežu je jednostavno mijenjati
- **Svi čvorovi u mreži ne moraju nužno imati stalno napajanje**
  - Podrška baterijskim i solarno napajanim uređajima
  - Moguća mješovita mreža

- Kako postići autonomiju ?
  - napajanje
    - baterijsko
      - baterije manjeg kapaciteta, potrebna rjeđa zamjena
    - solarno
      - svjetlosna energija - zahtijevaju svjetla mjesta
  - kako smanjiti potrošnju ?
    - duty cycle – aktivno vrijeme
    - režim spavanja
    - modulacija s ciljem manje potrošnje



# ZigBee

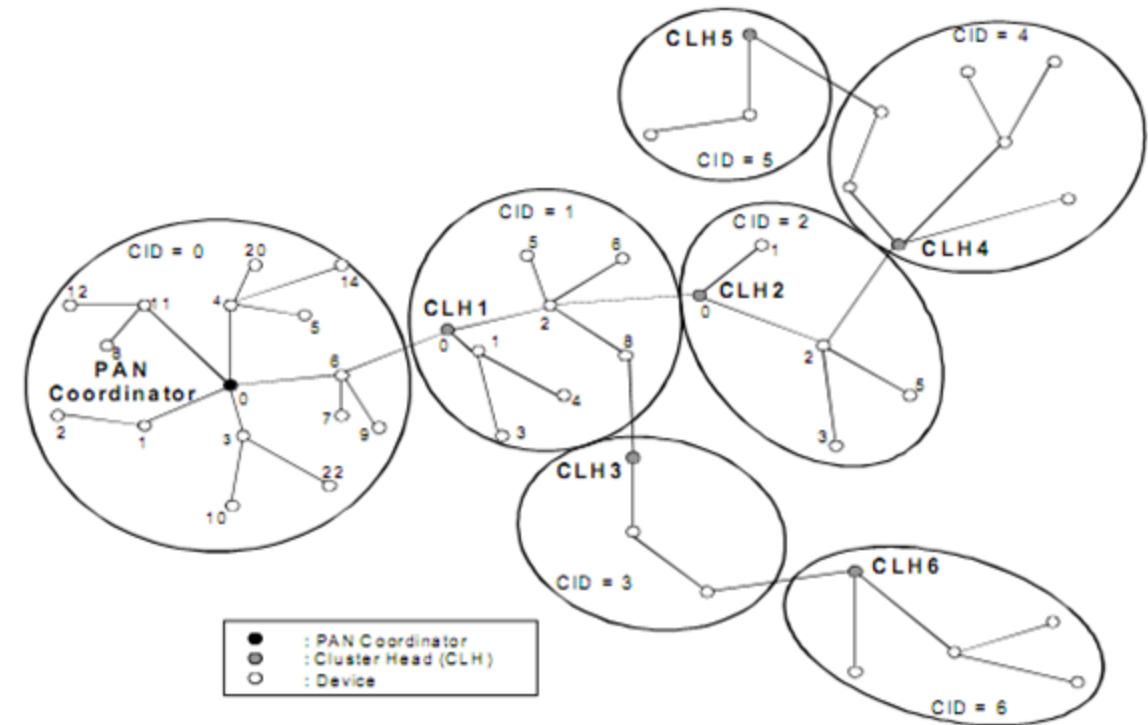
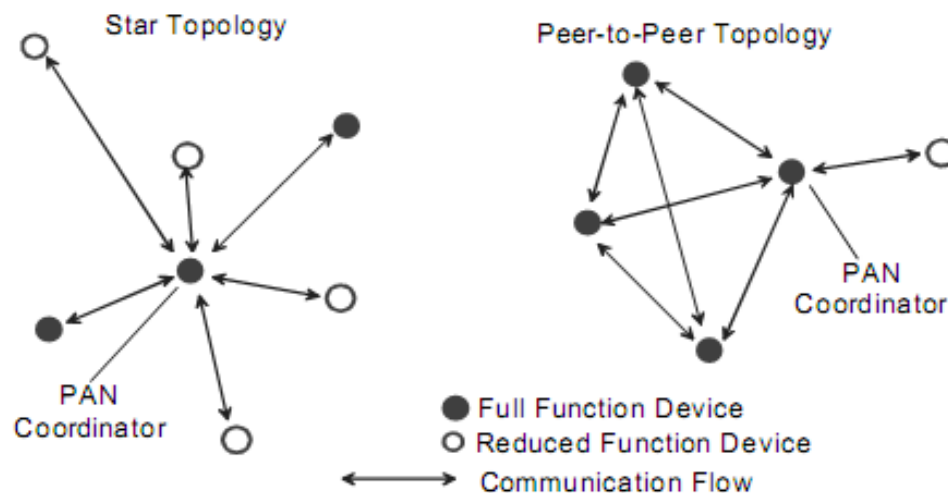
- Štednja energije
  - Slanje poruke ograđeno signalnim okvirima (*beacon*)
  - Mehanizmi sinkronizacije čvorova
    - Signalni okviri opisuju nastavak komunikacije
- Sklopovska izvedba sa što manje analognih dijelova
  - Pogodna za ugradnju u jeftine mikrokontrolere
  - Lakša kontrola kvalitete digitalnih sklopova
    - Loša izvedba radija može uzrokovati veću potrošnju drugih čvorova





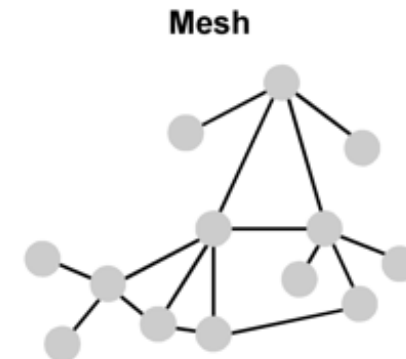
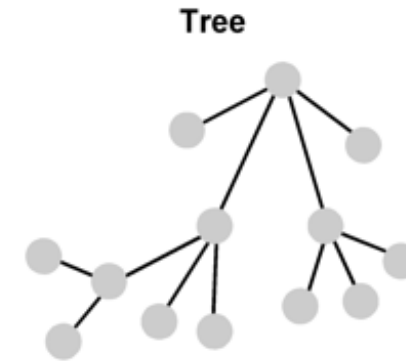
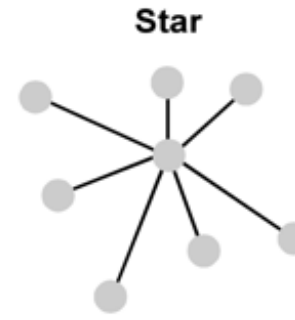
# Organizacija mreže

- Dva tipa čvorova
  - *Full-function Device* (FFD)
  - *Reduced-function Device* (RFD)
- Jednostavne mreže
  - Jedan-na-jedan (*point-to-point*)
  - Zvezda (*star*)
  - Proširenje na složenije mreže (*peer-to-peer*) - viši slojevi



# Topologije mreže

- Topologija mreže određuje način prosljeđivanja poruka među čvorovima
  - Zvijezda (*star*)
    - Središnji čvor vezan sa ostalima
  - Stablo (*tree*)
    - Središnji čvor – korijen stabla
    - Poruka se penje/spušta po stablu
  - Mreža (*mesh*)
    - Slično stablu samo su pojedine grane vezane

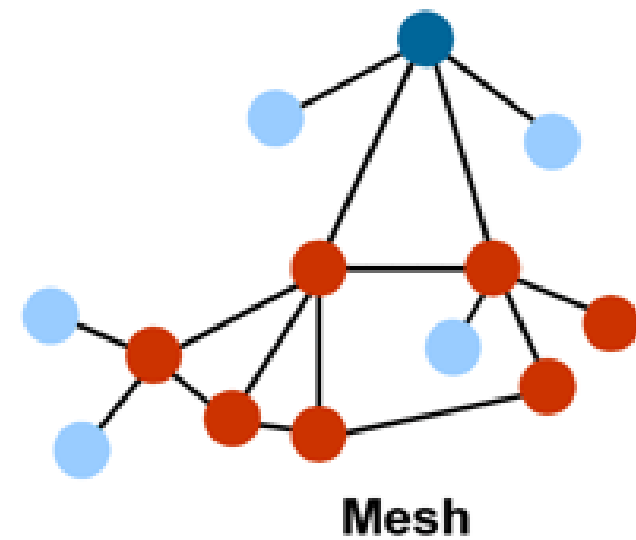
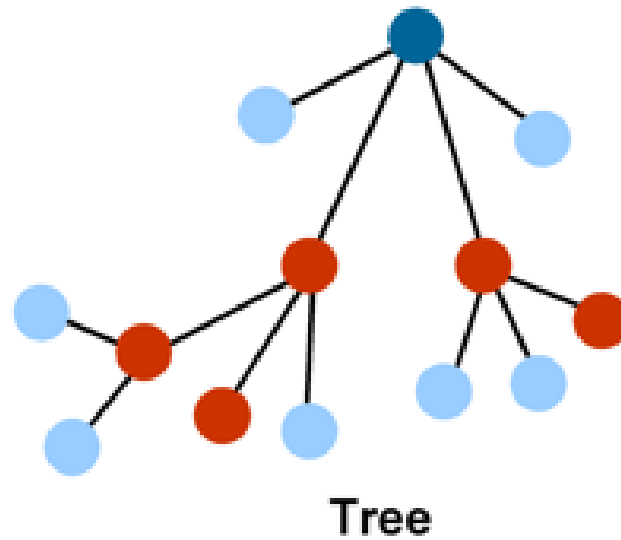
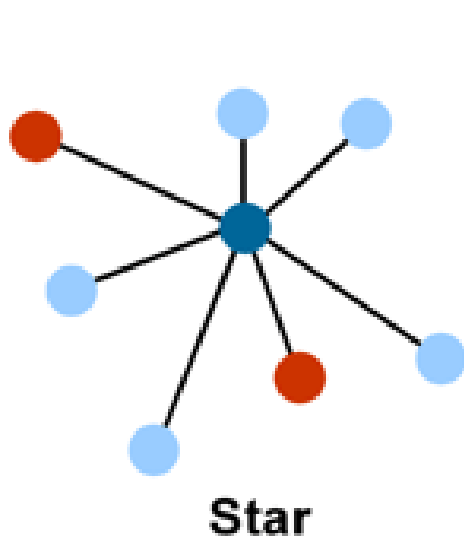


# Tipovi čvorova

- Unutar mreže može biti do 65536 čvorova
- Osnovni tipovi čvorova
  - Koordinator (*coordinator*) – ZC
    - Odabire komunikacijski kanal
    - Inicira mrežu
    - Dozvoljava uređajima pristupanje mreži (*join*)
    - Može imati ulogu prijenosnika (zvijezda, stablo)
  - Usmjernik (*router*) – ZR
    - Prenosi poruke među čvorovima
    - Dozvoljava čvorovima (djeci) da se povežu s njim
  - Krajnji uređaj (*end device*) – ZED
    - Šalju i primaju poruke
    - Ne prenose poruke za druge čvorove

# Tipovi čvorova

- Koordinator – uvijek samo jedan
  - U slučaju ispada, mreža ponekad *može* nastaviti raditi (ali ne uvijek – zvijezda)
- Usmjernik – odgovoran za komunikaciju dijela mreže
  - Ne smije spavati



# Topologija mreže

- Topologija zvijezde – IEEE 802.15.4
  - Nije potrebno korišćenje ZigBeea za uspostavu mreže
- Topologije stabla i mreže – ZigBee
  - ZigBee slog osigurava mehanizme prosljeđivanja poruka
  - Moguće veće udaljenosti
  - Mreža (mesh)
    - Najefikasnija za prijenos poruka
    - Otporna na ispad čvorova
    - Najsloženija za održavanje (tablice putova poruka)

# Adresiranje

- Svaki čvor ima
  - IEEE adresu – 64 bita
    - MAC adresa, proširena adresa (extended address)
    - IEEE 802.15.4 – adresiranje
  - mrežnu adresu – 16 bita
    - Kratka adresa (short address)
    - Određuje je koordinator ili usmjernik koji prima čvor u mrežu
    - Koordinator uvijek ima adresu 0x0000
- Aplikacija koristi
  - krajnju točku (endpoint) – 8 bita
    - početna ili završna točka prijenosa poruke
    - korisničkim aplikacijama dostupne točke od 1 do 240
    - točka 0 rezervirana za ZigBee Device Objects (kontrola mreže)
    - točka 255 – broadcast prema svim krajnjim točkama

# Normiranje aplikacija

- ZigBee definira profile uređaja za pojedine primjene
  - Osigurava se kompatibilnost uređaja raznih proizvođača
  - Npr. profil *Home Controls – Lightning* (HCL)
    - Rasvjetna tijela, prekidači, prigušnici (*dimmers*), osjetila prisustva, ...
- Javni i privatni profili
  - Proizvođačima ostaje mogućnost proširivanja
- Dvije razine poštivanja protokola
  - *ZigBee Network Capable*
    - Uređaj koristi ZB mrežu za rad, koristi privatni profil
    - Ne smeta rad ostalih ZB uređaja (drugih proizvođača)
  - *ZigBee Compliant Product*
    - Uređaji koji koriste ZB mrežu za rad i javne profile

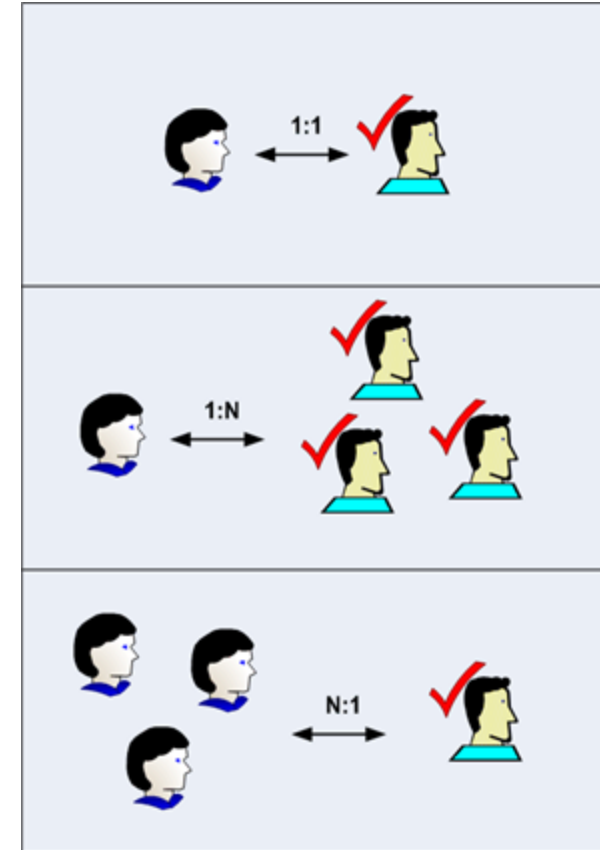
# Aplikacije

- Funkcija uređaja opisana opisnicima (*descriptor*)
  - Opisnik čvora (*node descriptor*) – osnovne informacije
  - Opisnik napajanja (*power descriptor*) – napajanje čvora
  - Opisnici aplikacija (*application descriptor*) – opcionalni
    - Profil aplikacije
    - Atributi i grupe atributa (*clusters*) koje aplikacija nudi
- ZB orijentiran prema nadgledanju i kontroli
  - Atributi – uglavnom mjerne ili kontrolne veličine
    - Npr. OnOff za prekidač,
  - Grupiranje atributa u funkcionalne cjeline (*cluster*)
- Atributi se mogu međusobno povezati (*bind*)
  - Koji prekidač kontrolira ovo svjetlo?



# Povezivanje

- Mehanizam povezivanja oslanja se na grupe atributa
  - Povezivanje dva uređaja moguće samo ako imaju kompatibilne grupe
    - Da bi povezali dva uređaja koji upravljaju grijanjem na osnovu temperature, jedan uređaj mora nuditi grupu atributa vezanih uz temperaturu kao izlaz, dok drugi mora moći iskoristiti tu grupu atributa kao ulaz
- Razne vrste veza
  - 1:1
  - 1:N
  - N:1



# Osobine

## ▪ Pouzdanost

- Odabir kanala prije komunikacije
  - Odabire se kanal s najmanje aktivnosti
- Oslušivanje prije slanja podataka
- Kôdiranje podataka za manju vjerojatnost grješke
- Mehanizam rukovanja pri komunikaciji
- Otkrivanje novog puta (*route discovery*) kod ispada

## ▪ Sigurnost

- ACL (*Access Control List*) – kontrola pristupa mreži
- Enkripcija – podaci se štite sa 128-bitnim AES-om
- Vremenske oznake poruka – odbacuju se prestare poruke (zaštita od napada ponavljanjem poruke)

## ▪ Suživot

- Unutar ZigBee svijeta moguće postojanje više mreža koje međusobno dijele *eter*
  - Mreža ima svoj identifikator (PAN ID)
- Parametri mrežnog sloja ZigBee (IEEE 802.15.4) odabrani tako da ne ometaju druge mreže
  - Suživot s WiFi i Bluetooth mrežama
  - Suživot s drugim mrežama zasnovanim na IEEE 802.15.4

# Alternative ZigBee-ju

- Z-Wave

- Europska varijanta ZB
- Nije otvorena norma
- Slične karakteristike i primjene

- EnOcean

- Uređaji nemaju baterije (i bežični su)
  - Napajanje skupljanjem energije iz okoliša (energy harvesting)
    - Napajanje solarnim ćelijama, termoparovima, piezo-generatorima, Peltierovim uređajima i sl.
  - Npr. *prekidač* za svjetlo napaja se iz energije pritiska tipke
- Približavanje aktuatora kontroliranom elementu
  - Nema potrebe da je sklopka udaljena od žarulje
  - Udaljen je samo kontrolni element – *prekidač*