WWAN

– LoRa/LoRaWAN –

WWAN

- WWAN (*Wireless Wide-Area Network*), ili bežična WAN - bežična mreže za povezivanje na velikom geografskom području: grad, regione ili čak države.
- Karakteristike:
  - **Celularna tehnologija**: područje pokrivenosti podeljeno na manje geografske regione – tzv. ćelije i svaka ćelija ima svoju baznu stanicu koja komunicira sa uređajima unutar svog dometa.
  - **Pokrivenost**: pružaju povezanost na udaljenim lokacijama ili ruralnim područjima gde žičana infrastruktura nije dostupna ili je nepraktična.
  - **Podrška mobilnosti** (*hangover*) - korisnici mogu da održavaju internet konekciju i razmenjuju podatke dok se kreću od jedne ćelije do druge.
  - **Podrška za veliki broj uređaja**. S obzirom na veliku oblast pokrivanja, moraju da pružaju mogućnost povezivanja velikom broju uređaja/korisnika.
  - **Troškovi**. Tipično u vlasništvu telekomunikacionih kompanija, tzv. provajdera telekomunikacionih usluga, koji naplaćuju svoje usluge povezanim korisnicima (na osnovu količine prenetih podataka, broja povezanih uređaja ili po nekom drugom kriterijumu).

WWAN

- Mreže mobilne telefonije
  - Danas najrasprostranjeniji oblik WWAN mreža.
  - Pružaju servis mobilne telefonije i servis mobilnog interneta za pametne telefone, tablete i prenosne računare.
  - Tehnologija mreža mobilne telefonije se neprekidno unapređuje i evoluira.
  - 5 tehnoloških generacija, koje su poznate kao 2G, 3G, 4G i 5G, obezbeđujući sa svakom sledećom generacijom viši nivo performansi i podršku za povezivanje većeg broja uređaja.

WWAN i IoT

- WWAN mreže nalaze sve širu primenu i u realizaciji geografski razuđenih IoT (*Internet of Things*) sistemima,
- Obezbeđuju servis pristupa internetu za jednostavne embeded uređaje - mobilne ili postavljene na mestima gde nije dostupna neka druga mrežna infrastruktura.
- Brojne primene:
  - **Praćenje vozila i flota**: Praćenje lokacije i stanja vozila u realnom vremenu. Upravljanje flotama vozila, optimizaciju ruta, održavanje, sigurnost i smanjenje troškova goriva.
  - **Pametni gradovi**: Monitoring i upravljanje saobraćajem, osvetljenjem, otpadom, vodom, energijom, parkingom i drugim infrastrukturnim sistemima radi poboljšanja efikasnosti i kvaliteta života građana.
  - **Praćenje i upravljanje resursima**: praćenje i nadgledanje kontejnera, opreme, skladišta i drugo. Upravljanje inventarom, smanjenje gubitaka i optimizaciju korišćenja resursa.
  - **Urbana i ruralna poljoprivreda**: praćenje useva, monitoring vlažnosti zemljišta, automatsko navodnjavanje, praćenje stoke, kontrole temperature i praćenje prskalica.
  - **Bezbednost i nadzor**: sistemi za video nadzor, detekcija požara, detekcija provala, sigurnosne kamere, pametne brave i druge bezbednosne aplikacije na različitim lokacijama
  - **Zdravstvena nega i monitoring**: praćenje i upravljanje medicinskim uređajima i senzorima za praćenje vitalnih znakova, pametni inhalatori drugi uređaji za poboljšanje zdravstvene nege i praćenje bolesnika.
  - **Industrijska automatizacija**: povezivanje industrijskih uređaja i mašina. Praćenje performansi, održavanje, upravljanje zalihama, praćenje proizvodnje i optimizaciju procesa u fabrikama i postrojenjima.

WWAN i IoT

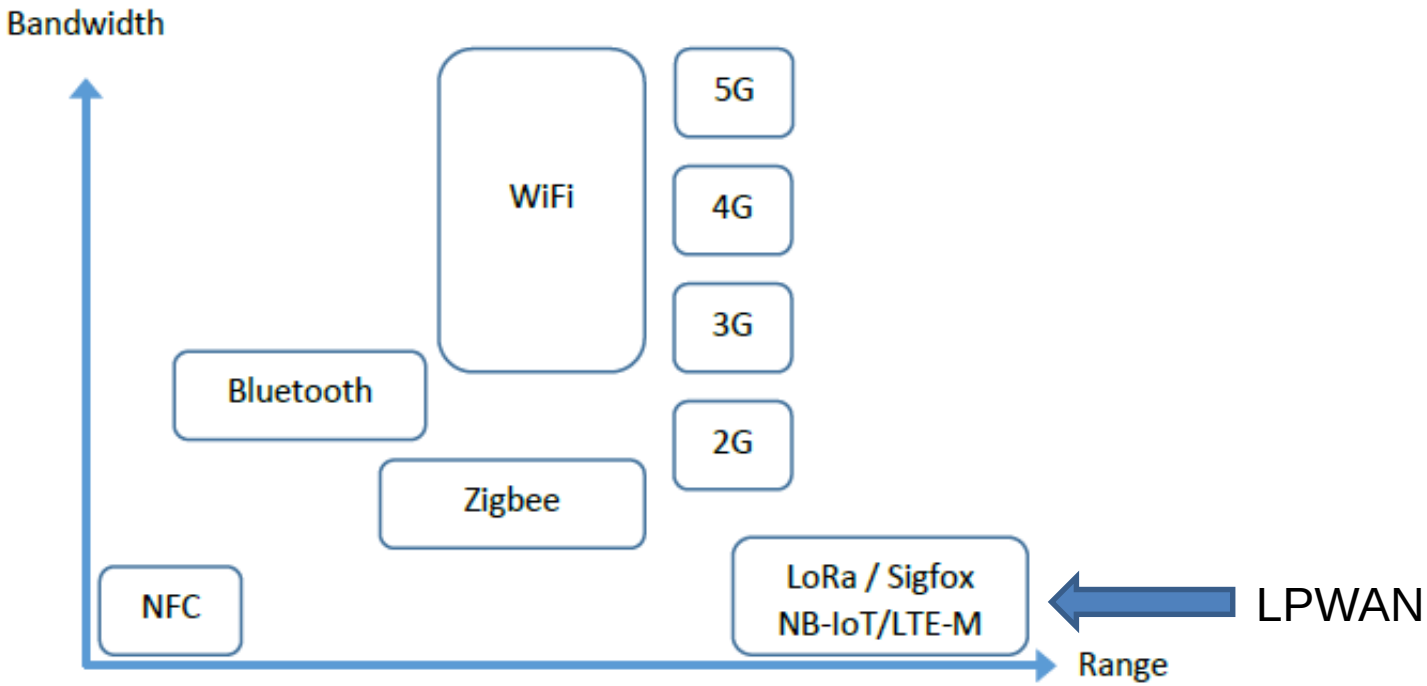
- Zašto mreže mobilne telefonije (2G, 3G i 4G), nisu uvek najpogodnije za primenu u IoT:
  - **Potrošnja energije**:
    - Mreže mobilne telefonije zahtevaju relativno visoku potrošnju energije na strani uređaja - problem za IoT uređaje koji se, po pravilu, napajaju baterijom i zahtevaju dug vek trajanja baterije.
    - Visoka potrošnja energije je posledica velike predajne snage, koja je potrebna da bi se na velikoj udaljenosti ostvarila velika brzina prenosa podataka koju ove mreže podržavaju.
    - IoT uređajima gotovo nikada nije potrebna velika brzina prenosa podatak => povećani utrošak energije zbog velikog protoka podataka je čist gubitak.
  - **Troškovi**:
    - Visoki troškove pretplate ili korišćenja podataka, što može biti nepraktično za velike IoT implementacije sa velikim brojem uređaja.
    - Modemi za mobilnu telefoniju su relativno skupi i mogu značajno cenovno da opterete IoT uređaje.
  - **Pokrivenost i penetracija signala**:
    - Mreže mobilne telefonije mogu imati ograničenu pokrivenost u ruralnim područjima ili unutar zgrada, posebno u nepristupačnim delovima zgrada
  - **Skalabilnost**:
    - Mreže mobilne telefonije nisu uvek dovoljno skalabilne za velike IoT implementacije sa velikim brojem uređaja.
    - Mreža mobilne telefonije su projektovane prema očekivanom broju korisnika mobilnih telefona, a ne prema očekivanom broju IoT uređaja (koji može biti višestruko veći od broja mobilnih telefona).

LPWAN

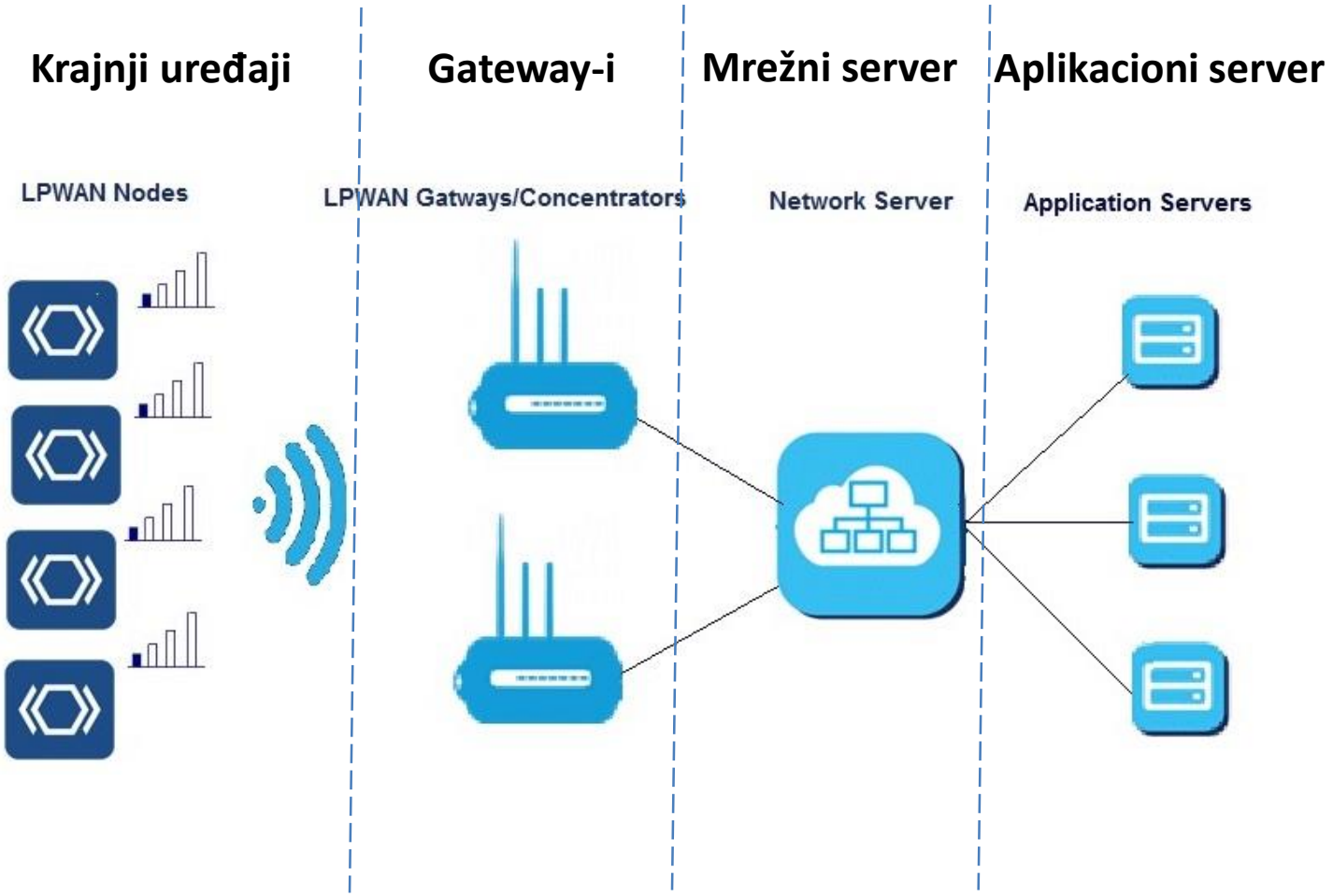
- **LPWAN** (*Low Power Wide Area Network*) je WAN bežična mreža niske potrošnje energije i velikog dometa komunikacije, posebno prilagođena umrežavanju baterijski napajanih pametnih (IoT) uređaja u većem geografskom području.
- Ključne karakteristike LPWAN mreža su sledeće:
  - **Domet komunikacije** LPWAN mreža se kreće od nekoliko kilometra do nekoliko desetina kilometara, što zavisi od tehnologije i okruženja (urbano/ruralno).
  - **Velika oblast pokrivanja**. LPWAN mreže pokrivaju veće geografske oblasti, što ih čini pogodnim za primene poput pametnih gradova, poljoprivrede, nadgledanje životne sredine, industrijski kompleksi i sl.
  - **Niska potrošnja energije.** Rade sa minimalnim utroškom energije, što omogućava baterijsko napajanje bez potrebe za čestom zamenom baterija ili ponovnim punjenjem (npr. trajanje baterije od 1 do 10 godina).
  - **Mala brzina prenosa podataka**. Optimizovane za prenos male količine podataka malom brzinom prenosa, u opsegu od ispod $1\ Kbps$ do nekoliko stotina $Kbps$. Zbog male brzina prenosa podataka, LPWAN mreže se ne mogu koristiti za npr. audio ili video striming, ali su zato pogodne za aplikacije koje uključuju povremeno slanje senzorskih podataka ili statusnih ažuriranja.
  - **Ekonomičnost**. Cena LPWAN povezivanja je niska i cenovno ne opterećuje značajno krajnji uređaj. To se odnosi kako na cenu RF transivera tako i na troškove prenosa podataka (pretplata).

LPWAN

- Gde se LPWAN nalaze na mapi bežičnih mreža?

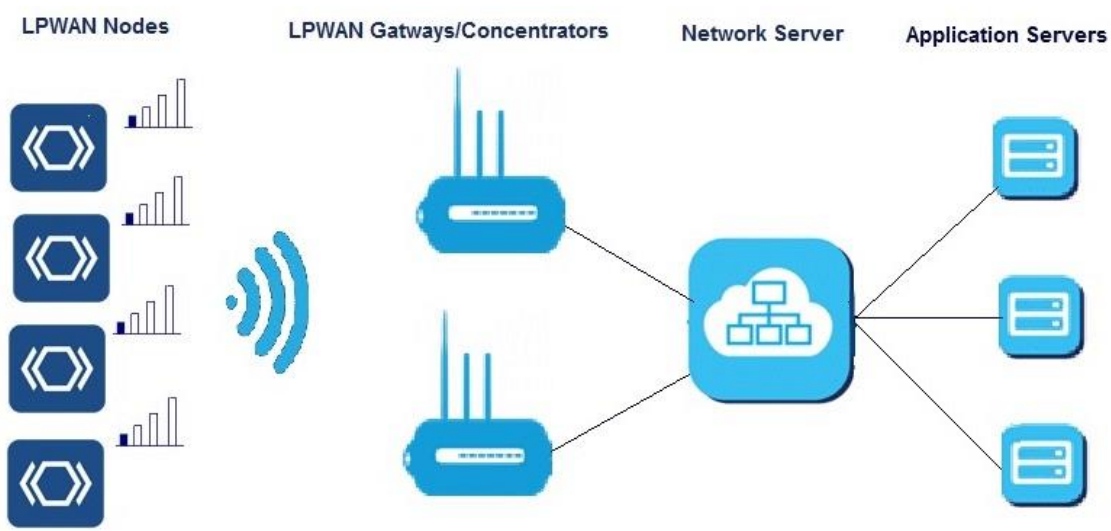


Arhitektura LPWAN mreže



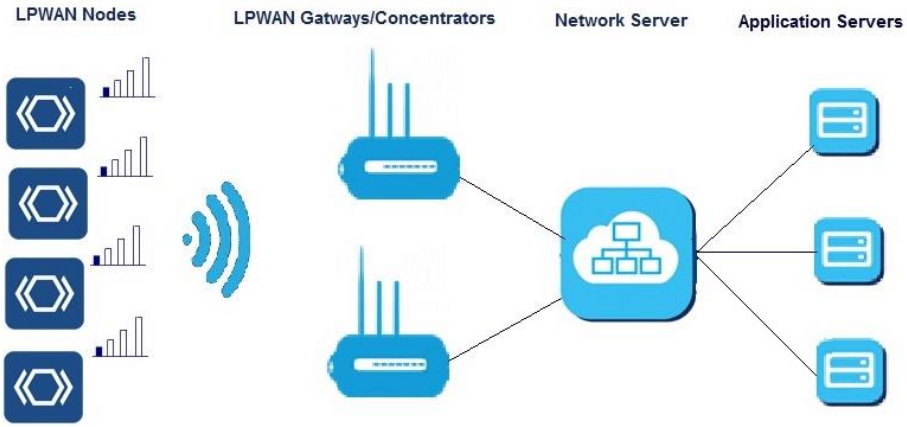
Arhitektura LPWAN mreže

- **Krajnji uređaji** (*end device*):
  - Baterijski napajani uređaji sa senzorima koji prikupljaju podatke iz okruženja (temperatura, vlažnost, pritisak, svetlost, vibracije itd.) i bežičnim putem ih šalju *gateway*-u.
  - Uređaji tipa aktuator koji izvršavaju određene radnje na osnovu primljenih naredbi (upravljanje ventilima, prekidačima, bravama itd.)
- ***Gateway*** (mrežni prolaz, ili koncentrator):
  - Pristupne tačke, ili mostovi između krajnjih uređaja i unutrašnje infrastrukture LPWAN mreže.
  - Prima podatke od krajnjih uređaja i prosleđuje ih mrežnom serveru, obično preko internata, bilo putem žičane veze (Ethernet) ili bežične veze (mreža mobilne telefonije).
  - LPWAN sadrži više gateway-a, strategijski raspoređenih u određenom geografskom području.



Arhitektura LPWAN mreže

- **Mrežni server**
  - Centralni server LPWAN mreže
  - Preko *gateway*-a prima podatke od krajnjih uređaja, privremeno ih skladišti i isporučuje aplikacionom serveru;
  - Prima podatke od aplikacionog servera, koje onda posredstvom *gateway*-a isporučuje krajnjim uređajima.
  - Upravlja mrežom: kontroliše mrežne parametre, poput izbora frekventnih kanala, podešavanje snage i vremena prenosa, obezbeđuje autentifikaciju uređaja i zaštitu podataka.
  - U LPWAN mreži postoji samo jedan mrežni server.
  - Mrežni server nije bežični uređaj, već sa *gateway*-ima i aplikacionim serverima komunicira putem interneta ili LAN.
- **Aplikacioni server**
  - Prima podatke od mrežnog servera i obrađuje ih (analiza podataka, generisanje izveštaja i upozorenja, pokretanje određenih akcija i sl.).
  - Spona između LPWAN mreže i krajnjeg korisnika.
  - Korisnici, tj. korisničke aplikacije, pristupaju aplikacionom serveru preko interneta.
  - U LPWAN mreži može postojati jedan ili više aplikacionih servera.



LPWAN tehnologije

- Danas je upotrebi nekoliko LPWAN tehnologija:
- NB-IoT i LTE-M:
  - Implementiraju se u okviru postojeće infrastrukture mreža mobilne telefonije
  - Za primene koje zahtevaju nisku latenciju i pouzdanost na širem području pokrivenosti (npr. praćenja vozila). U scenarijima gde je potrebna veća brzina prenosa podataka.
- LoRaWAN
  - Nije striktno vezana za infrastrukturu mobilne telefonije i mogu se realizovati i kao privatne mreže.
  - Za primene u kojima su domet i potrošnja energije ključni faktor.

NB-IoT i LTE-M

- **NB-IoT** (*Narrowband Internet of Things*) i
- **LTE-M** (*LTE for Machines*)
- LPWAN tehnologije koje se u značajnoj meri oslanjaju na standarde, protokole i postojeću infrastrukturu mobilne telefonije.
- Integrišu se sa postojećom LTE (*Long-Term Evolution* – deo 4G) mrežnom infrastrukturom, što olakšava implementaciju i omogućava operatorima da iskoriste svoje postojeće resurse.
- Rade u frekventnim opsezima licenciranim za mobilnu telefoniju,
- Modulacione šeme i komunikacioni protokoli su pojednostavljeni protokoli mobilne telefonije, prilagođeni specifičnim zahtevima LPWAN mreža.
- Obezbeđuju poboljšanu pokrivenost unutar zgrada i dublje u urbanim i ruralnim područjima u poređenju sa standardnim mobilnim mrežama.
- Poseduju mehanizme za optimizaciju protoka podataka i smanjenje potrošnje energije: periodično spavanje, smanjeni propusni opseg i efikasno upravljanje RF linkom.
- Bolja pokrivenost i manja potrošnja energije u odnosu na standardne mobilne mreže, ostvarena je na račun značajno manje brzine prenosa podataka.

NB-IoT i LTE-M
- karakteristike -

- **Brzina prenosa podataka**
  - NB-IoT tipično $10\ Kbps$; u maksimumu $250\ Kbps$.
  - LTE-M u opsegu od $10\ Kbps$ do $1MBps$; u optimalnim uslovima može dostići i $100Mbps$.
  - Kod obe tehnologije, brzina prenosa podataka je značajno uslovljena predajnom snagom, uslovima prostiranja signala i opterećenjem mreže.
- **Potrošnja energije**
  - NB-IoT optimizovan za nisku potrošnju energije
  - LTE-M ima nešto veću potrošnju energije u poređenju sa NB-IoT, ali je i dalje, u tom pogledu, značajno efikasniji od standardnih mobilnih mreža
- **Latencija** (Kašnjenje u prenosu podataka).
  - Malu potrošnju energije zahteva duže periode mirovanja (spavanje bez komunikacije) => povećana latencija.
  - NB-IoT: latencija je reda od nekoliko desetina sekundi do nekoliko minuta.
  - LTM-M: latencija je manja, nekoliko do nekoliko desetina sekundi, ali ipak značajno veća od latencije kod standardne mobilne telefonije (tipično 50 do 100 milisekundi).
  - Mala latencija je bitna samo kod aplikacija koje zahtevaju brzi odziv.
  - Kod većine IoT aplikacija, brzina odziva nije primarni zahtev

NB-IoT i LTE-M
- karakteristike -

- **Domet**:
  - NB-IoT je do nekoliko kilometara u zavisnosti od konfiguracije mreže i uslova okoline.
  - LTE-M je sličan ili nešto manji od domet NB-IoT, ali zato pruža veću brzinu prenosa podataka u odnosu na NB-IoT u istim uslovima.
- **Frekventni opsezi:**
  - NB-IoT i LTE-M koriste frekventne opsege unutar postojećih LTE frekvencija
  - Zbog manje brzine prenosa podataka, frekventni opseg NB-IoT je uži ($180\ kHz$ ili $200\ kHz$) – otuda „*Narrowband*“.
  - Frekventni opseg LTE-M, u zavisnosti varijante, je širi ($1.4\ MHz$ ili $1.6\ MHz$) – što obezbeđuje veću brzinu prenosa podataka.
  - Širina standardnih LTE frekventnih kanala za mobilnu telefoniju je $5 - 20MHz$.

LoRa/LoRaWAN

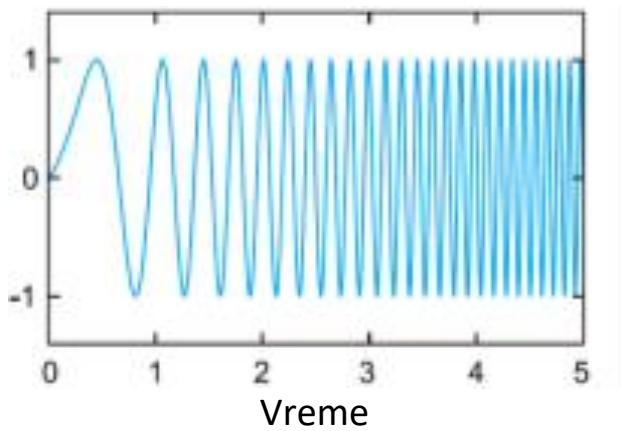
- **LoRa**
  - Modulaciona šema koja se koristi za bežičnu komunikaciju dugog dometa i male brzine prenosa između krajnjih uređaja i *gateway*-a.
  - LoRa je patentirana tehnologije kompanije *Semtech*
  - Pokriva fizički sloj
- **LoRaWAN** (***Lo****ng* ***Ra****nge* ***W****ide* ***A****rea Network*):
  - Tip LPWAN mreže
  - Oslanja se na LoRa i definiše više slojeve protokol-steka
  - LoRaWAN standard definiše uloge krajnjih uređaja, *gateway*-a i mrežnog servera, standardizuje protokole za komunikaciju između krajnjih uređaja i *gateway*-a, kao i između *gateway*-a i mrežnog servera, propisuje sigurnosne protokole itd
  - U nadležnosti *LoRa Alliance*
  - Uvedena 2015. god. Brza ekspanzija. 2024. god. 1 milijarda LoRa uređaja

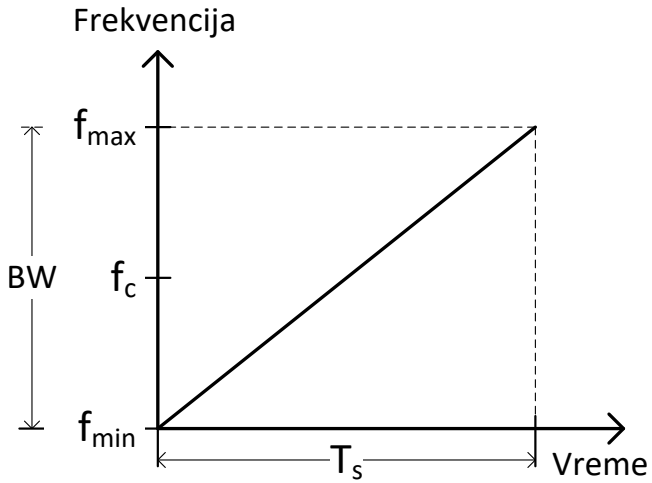
LoRa
- frekventni opsezi -

- LoRa tehnologija koristi frekvencije u sub-GHz ISM opsezima (< 1GHz), koji su dostupni za ne-licenciranu upotrebu u različitim delovima sveta.
- Korišćenje ISM opseg olakšava implementaciju LoRa mreža i uređaja bez potrebe za dobijanjem posebnih dozvola za korišćenje frekvencija.
- ISM opseg EU868 ($863 - 870\ MHz$) važi u Evropi i podeljen je na veći broj kanala različite širine opsega.
- Za svaki kanal je specificirana maksimalna dozvoljena brzina prenosa podataka i izlazna snaga predajnika.
- Specifično za opseg EU868 je *duty-cycle* koji mora biti manji od 1% (uređaj može da emituje samo 1% vremena).
- ISM opseg EU433 ($433.05 - 434.79\ MHz$) je takođe dostupan u Evropi; tri frekventna kanala, i predajna snaga je ograničena na $25mW$.

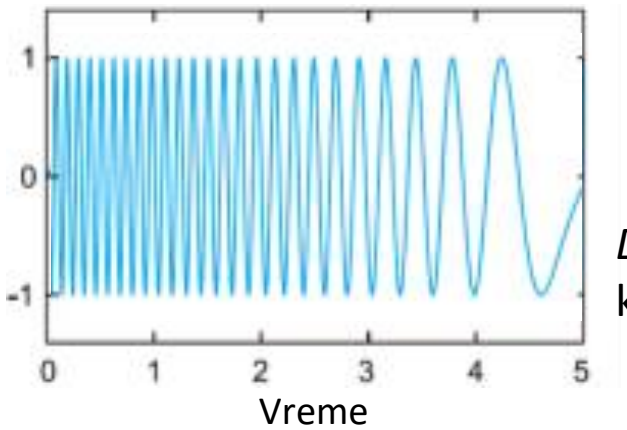
LoRa
- modulacija -

- ***Chirp Spread Spectrum*** (CSS) modulacija – vrsta modulacije u proširenom spektru



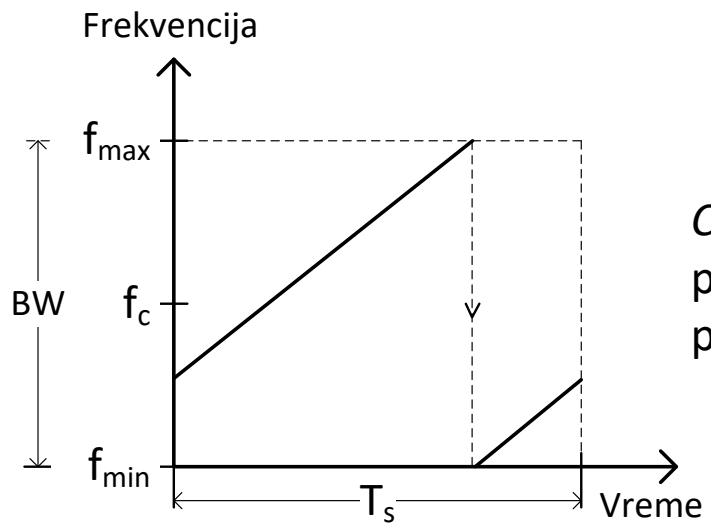


Up-chirp signal: frekvencija signala kontinualno raste od f_{min} do f_{max}



Down-chirp signal: frekvencija kontinualno opada od f_{max} do f_{min}

LoRa
- modulacija -

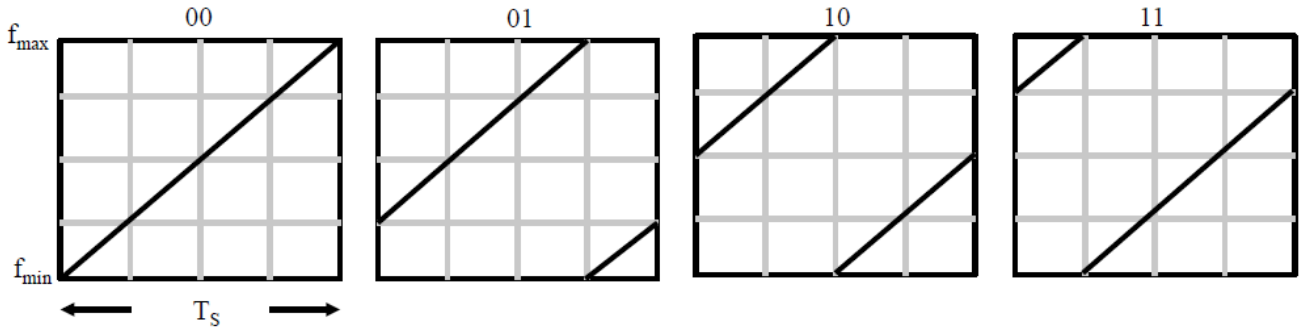


Chirp sa ofsetom: frekvencija linearno raste od početne do f_{max}, zatim naglo pada na f_{min}, da bi potom porasla do početne frekvencije

T_S: trajanje *chirp* signala – definiše brzinu porasta frekvencije

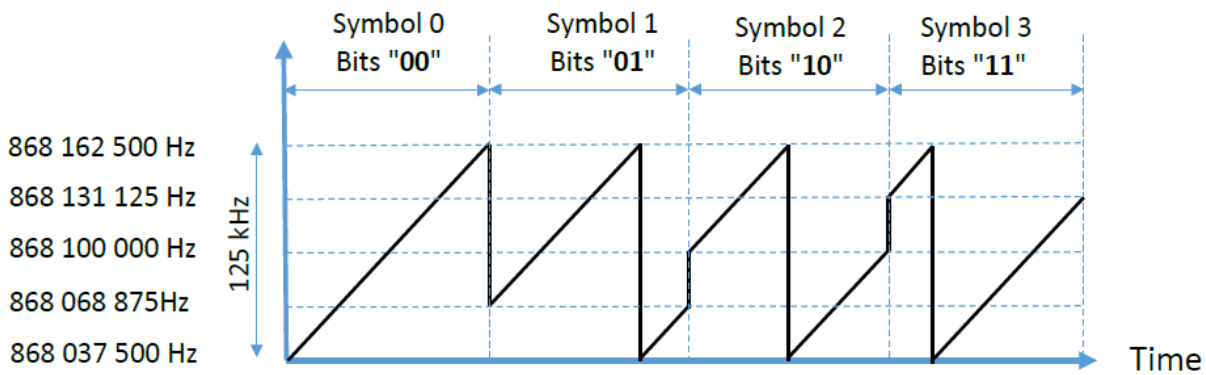
LoRa
- modulacija -

- Primer *Chirp Spread Spectrum* modulacione šeme u kojoj se koriste 4 *chirp*-a, svaki sa različitom početnom frekvencijom:



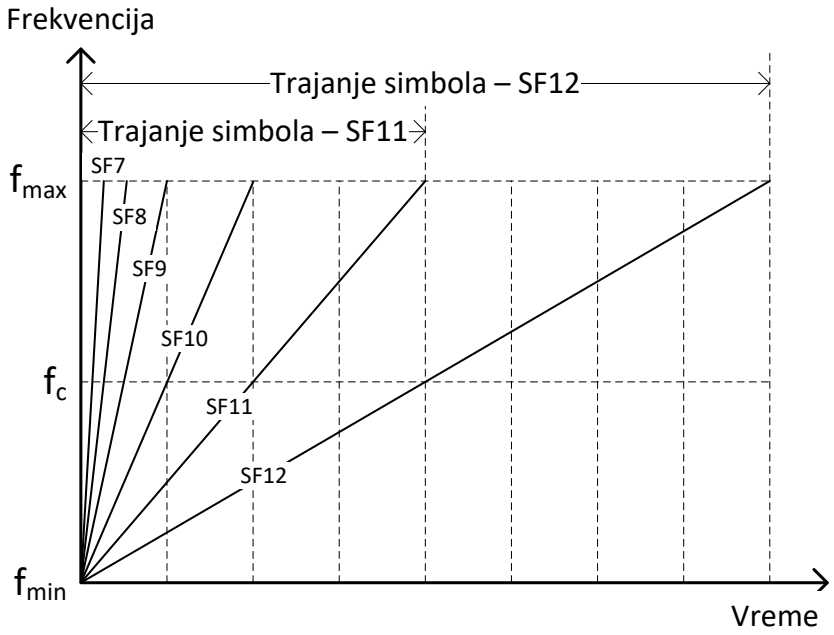
Svaki simbol/*chirp* predstavlja 2 bita informacije

***Spreading factor* (SF)** ove šeme je 2 i označava se sa **SF2**



LoRa
- modulacija -

- LoRa standard predviđa sledećih 6 faktora proširenja: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 i SF12
- Trajanje simbola, odnosno vreme transmisije simbola (T_s) zavisi od faktora proširenja.



LoRa
- modulacija -

- Trajanje simbola, T_s, takođe zavisi i od propusnog opsega, BW. Naime, T_s je inverzno proporcionalno propusnom opsegu:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Spreading Factor	Symbol transmission time
SF7	1.024 ms
SF8	2.048 ms
SF9	4.096 ms
SF10	8.192 ms
SF11	16.384 ms
SF12	32.768 ms

Trajanje simbola za BW=125 kHz

LoRa
- modulacija -

- S obzirom na to da svaki simbol nosi SF bita informacije, bitska brzina,DR, LoRa modulacije iznosi:

$$\boldsymbol{DR = SF \times \frac{BW}{2^{SF}}}$$

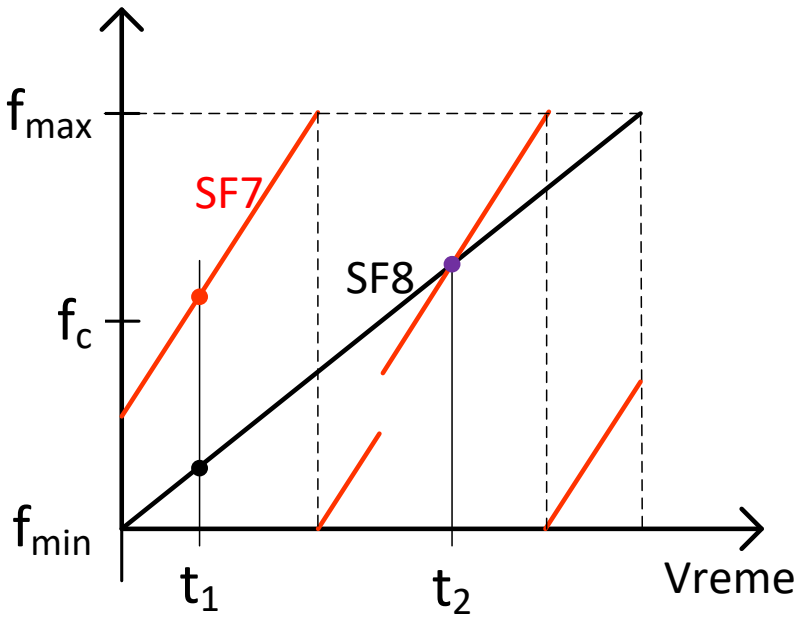
  - $SF = 7$ i $BW = 125KHz$ => $6{,}836\ Kbps$
  - $SF = 12$ i $BW = 125KHz$ => $366\ bps$
- LoRa koristi FEC (*Foreword Error Correction*), tako da je efektivna brzina prenosa još manja:

$$\boldsymbol{DR = CR \times SF \times \frac{BW}{2^{SF}}}$$

- Kod LoRa, tipično, $CR = 4/5$ (odnos između korisnih i ukupnog broja bita u paketu)

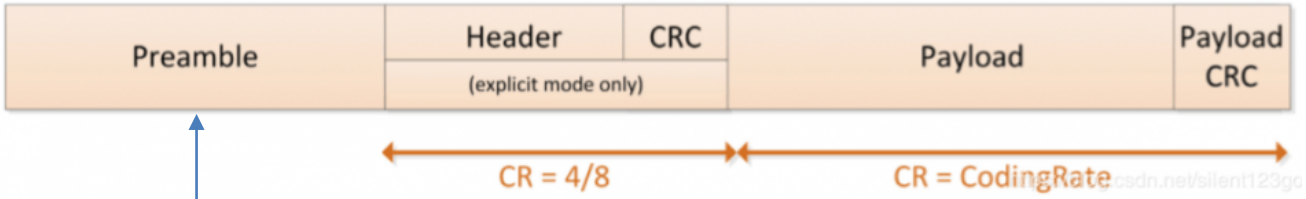
LoRa
- modulacija -

- Konkurentne transmisije: mogućnost istovremenih transmisija bez kolizije u okviru istog frekventnog opsega
- Uslov za prenos bez kolizija je da predajnici koriste različite faktore proširenja (SF)



LoRa
- format paketa -

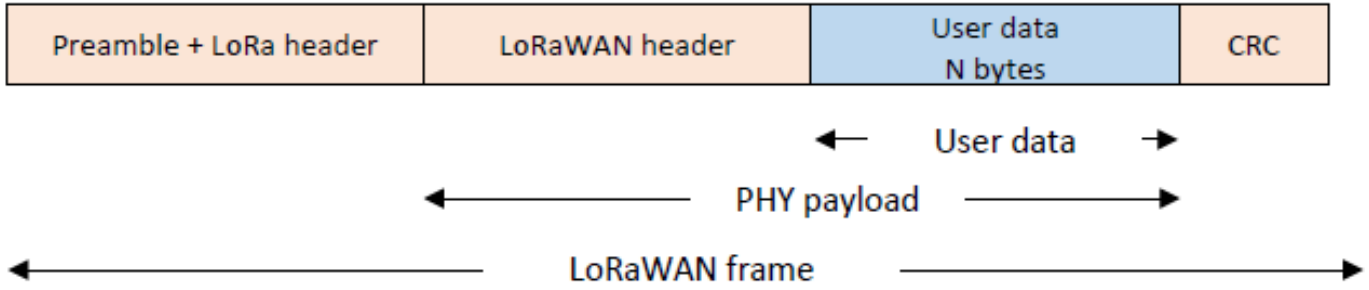
- Eksplicitni format: postoji zaglavlje, koje sadrži :
  - dužinu dela za podatke (*Payload*)
  - Kodnu brzinu koja se koristi u delu za podatke (CR)
  - Indikaciju da li postoji CRC (za payload)
- Implicitni format: zaglavlje ne postoji
  - Predajnik i prijemnih unapred usaglašeni, tako da prijemnik zna parametre paketa



Preambula može biti promenljive dužine ali je kod LoRaWAN fiksirana i sastoji se iz 8 osnovnih *up-chirp* simbola (kreću od minimalne frekvencije) i 4.25 sinhronizacionih simbola (2 *up-chirp* i 2.25 *down-chirp*) Sinhronizacioni simboli označavaju početak paketa

LoRa
- format paketa -

- Format LoRaWAN paketa: LoRaWAN dodaje svoje zaglavlja u delu za podatke LoRa paketa
- Relativno veliki režijski troškovi:
- Primer:
  - Primera radi, LoRaWAN paketa koji sadrži samo jedan bajta korisnih podataka (plus režijski troškovi) pri faktoru proširenja SF7 sadrži 37.25 simbola (kod SF7 važi: 1 simbol = 7 bita) i njegovo emitovanje traje $46.3ms$.
  - Vreme emitovanja istog paketa pri SF12 bi bilo čak $1155.1ms$.



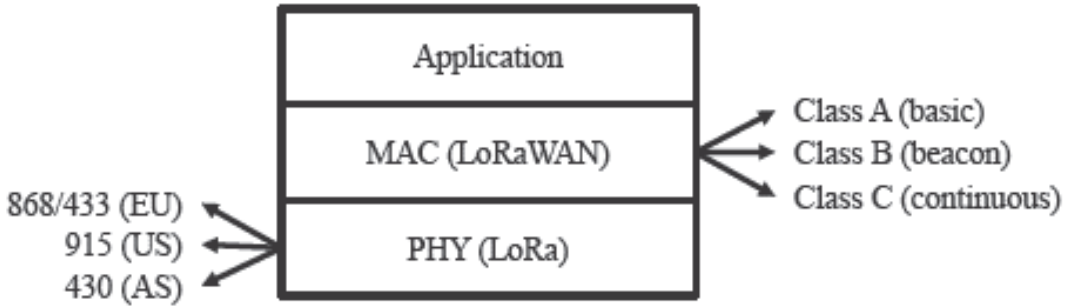
LoRa
- *duty cycle* -

- U frekventnom opsegu $868\ MHz$, *duty cycle* krajnjeg uređaja je ograničen na 1%.
- Primer,
  - Neka je uređaj potrošio $46.3ms$ da bi poslao paket => uređaj mora biti „miran“ sledećih $99 \times 46.3ms\ =\ 4.58s$.
  - Uređaj ima mogućnost da pošalje 1 bajt korisnih podataka na svake $4.58s$ => efektivna brzina prenosa, za ovaj slučaj, iznosi $1.73\ bps$
  - Za SF12, efektivna brzina prenosa bi bila samo $0.07\ bps$.

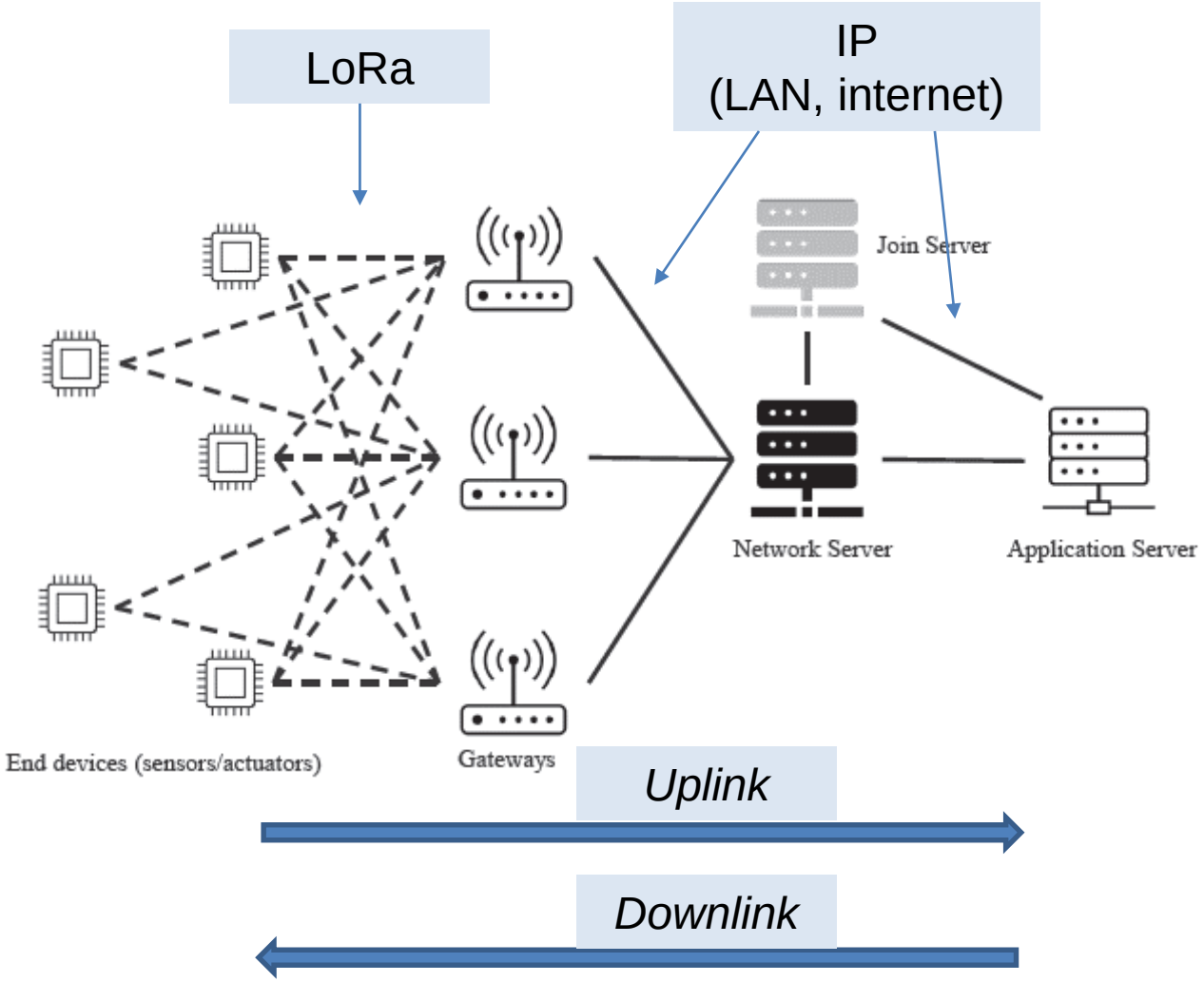
Veoma mali protok podataka, ali treba imati na umu ciljne aplikacije LoRa tehnologije – npr. jednostavni senzorski uređaji koji svoja merenja dostavljaju nekoliko puta dnevno.

LoRaWAN

- LoRaWAN je otvoreni standard za LPWAN mreže koji koristi LoRa fizički sloj za bežičnu komunikaciju.
- Najvećim delom fokusiran na MAC sloj, ali definiše i dodatne servise za upravljanje mrežom i komunikacijom između LoRa krajnjih uređaja i LoRa gateway-a, koji su, pozadinskom mrežom, povezani sa mrežnim serverom.

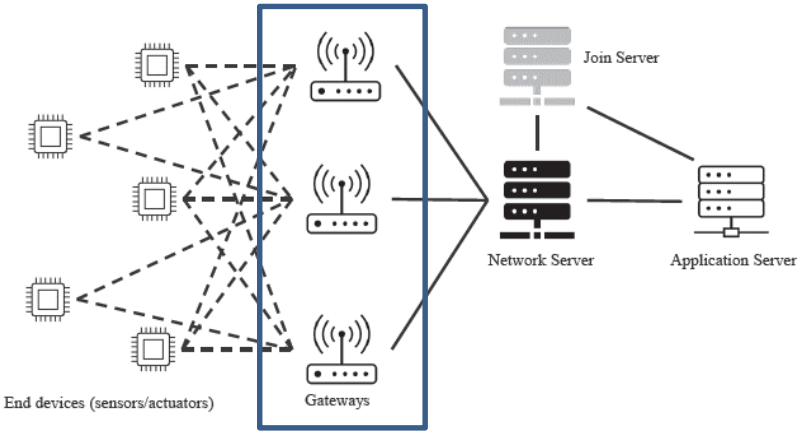


LoRaWAN
- arhitektura -

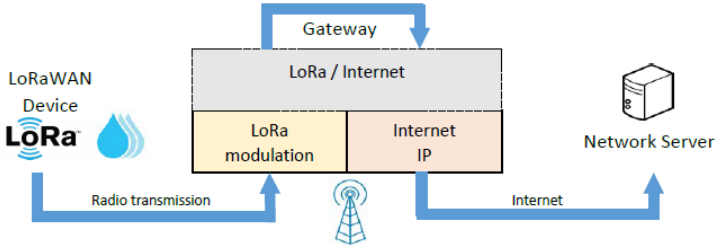


LoRaWAN
- gateway -

- Poput baznih stanica u mrežama mobilne telefonije
  - U mreži postoji više *gateway*-a, strategijski raspoređenih u oblasti pokrivanja
  - Spona između krajnjih uređaja i mrežnog servera
- Za razliku od baznih stanica:
  - U LoRaWAN mreži svi *gateway*-i primaju i procesiraju poruke koje šalju svi krajnji uređaji.
  - Tj. poruku koju šalje krajnji uređaj primaju svi *gateway*-i koji su u dometu radio komunikacije.



- *Gateway* funkcioniše isključivo na fizičkom nivou
  - Prima LoRa poruke i proverava njihov integritet (CRC)
  - Ako CRC nije ispravan, *gateway* odbacuje takvu poruku.
  - Ako je CRC korektan, *gateway* prosleđuje mrežnom serveru primljenu poruku, zajedno sa još nekoliko meta-podataka: nivo prijemnog signala (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*), odnos signal-šum (SNR), vreme prijema (tj. vremenski zapis - *timestamp*) i identifikator *gateway*-a.



Gateway prima transmisije na više kanala istovremeno i u mogućnosti je da prima više poruka istovremeno na istom kanalu ukoliko su one modulisane različitim SF

LoRaWAN
- mrežni server -

- Eliminiše duplikate *uplink* poruka (iste poruke primljene preko različitih *gateway*-a):
  - Eliminacija na osnovu sadržaja poruka i meta-podataka koji su *gateway*-i pridodali porukama
  - Svaka poruka koju šalje krajnji uređaj nosi redni broj (*Fcnt*)
  - Mrežni server, za svaki krajnji uređaj, pamti *Fcnt* poslednje prihvaćene poruke
  - Ako primi poruku sa istom ili manjom *FCnt* vrednošću od zapamćenog *FCnt* mrežni server odbacuje takvu poruku kao duplikat
  - Kada primi prvu poruku sa *FCnt* koji je veći od zapamćenog *FCnt* za konkretni uređaj, server ostavlja izvesno vreme za eventualni prijem poruka sa istim *FCnt* od istog uređaja preko nekih drugih *gateway*-a.
  - Server prihvata poruku sa najvećom jačinom primljenog signala i odnosom signal-šum, a ostale odbacuje kao duplikate
- Za *downlink* komunikaciju bira *gateway* preko kojeg je primio poslednje prihvaćenu *uplink* poruku od konkretnog krajnjeg uređaja.
- Mrežni server je zadužen i za mnoštvo dugih funkcija koje se odnose na dodelu uređajima frekventnih kanala i faktora proširenja i potvrđivanje prijema

LoRaWAN
- aplikacioni server -

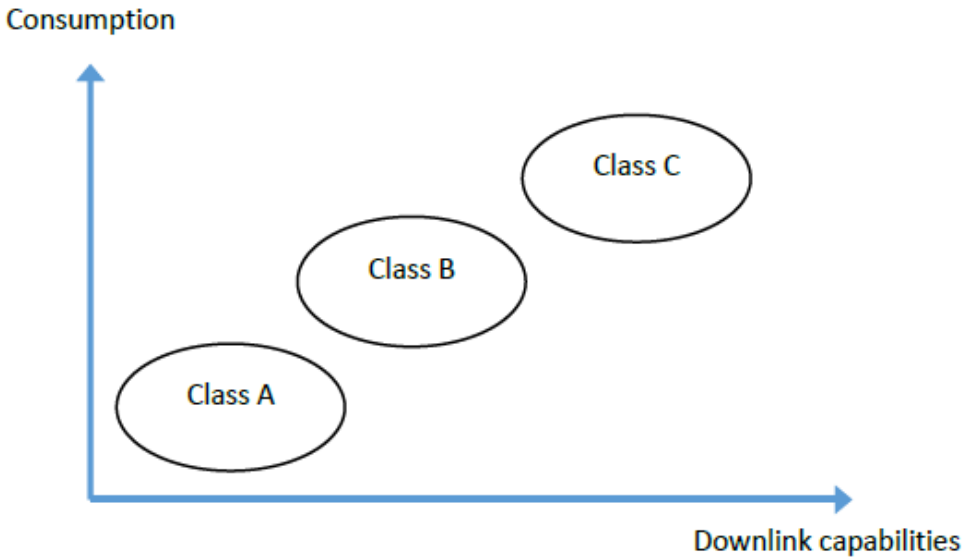
- Aplikacioni server u LoRaWAN arhitekturi je odgovoran za prijem, obradu i upotrebu podataka prikupljenih od krajnjih uređaja.
- Ako su podaci šifrovani, aplikacioni server vrši dekripciju
- Podaci se integrišu u različite IoT servise: praćenje stanja senzora u realnom vremenu, automatizacija procesa, kontrola uređaja na daljinu, analitika, izveštavanje, praćenje istorijskih podataka...
- Aplikacioni server generiše komande ili konfiguracione poruke koje se šalju nazad krajnjim uređajima kao *downlink* poruke putem mrežnog servera i *gateway*-eva.
- Omogućava programsku integraciju sa drugim sistemima i servisima
- Takođe, omogućava podešavanje automatizovanih notifikacija putem email-a, SMS-a ili drugih komunikacionih kanala u slučaju specifičnih događaja ili alarma.

LoRaWAN
- „Join“ server -

- *Join* server, ili server za priključene: zadužen za aktivaciju uređaja
- Kada se krajnji uređaj prvi put povezuje na mrežu, on *Join* serveru šalje *Join Request* poruku, koja sadrži identifikacione podatke uređaja.
- *Join* server prima ovu poruku i provera autentičnost uređaja (tj. da li je uređaju dozvoljeno da koristi mrežu).
- U slučaju uspešne autentifikacije, *Join* server:
  - Generiše i dodeljuje uređaju jedinstvenu adresu, *DevAddr* (*Device Address,*) koja se koristi za identifikaciju uređaja za komunikaciju unutar mreže.
  - Dva ključa za šifrovanje komunikacije: *NwkSKey* (*Network Session Key*) - ključ koji se koristi za komunikaciju između krajnjeg uređaja i mrežnog servera i *AppSKey* (*Application Session Key*) - ključ koji se koristi za šifrovanje korisničkih podataka između uređaja i aplikacionog servera.
  - *Join* server šalje *Join Accept* poruku nazad krajnjem uređaju, koja sadrži *DevAddr* i dva kriptografska ključa.
  - *Join* server, takođe, distribuira ključeve mrežnom i aplikacionom serveru.
  - Nakon toga, krajnji uređaj može da razmenjuje podatke sa mrežnim i aplikacionim serverom koristeći šifrovanu komunikaciju.

LoRaWAN
- klase uređaja-

- LoRaWAN predviđa tri klase uređaja: A, B i C.
- Klasa A se odnosi na osnovni način rada, koji mora biti podržan od strane svih krajnjih uređaja.
- Uređaji klase B takođe moraju imati podršku za rad u klasi A.
- Konačno, uređaji klase C moraju imati opciju da rade u bilo kojoj od tri klase.

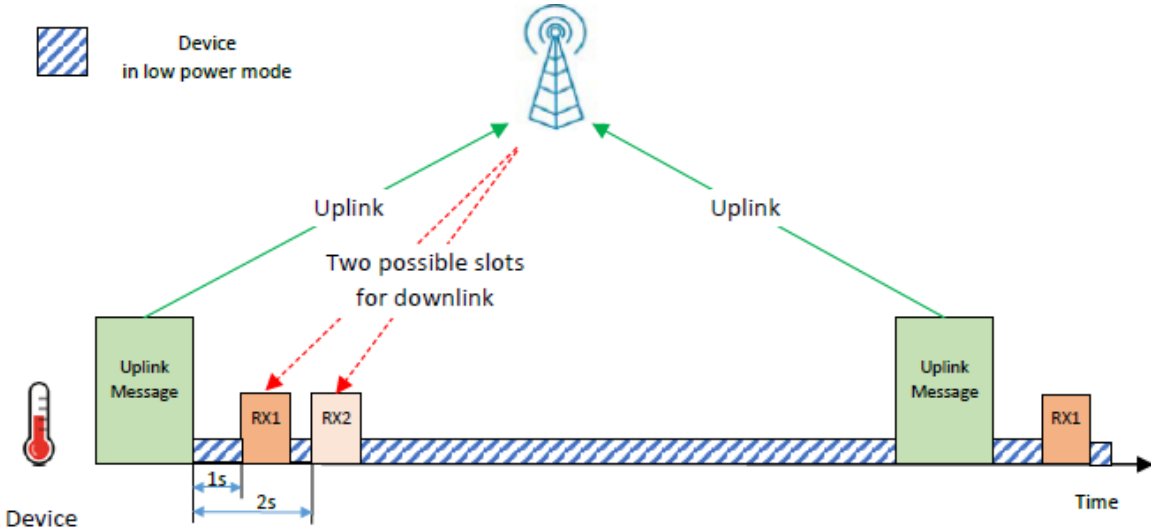


Svaka klasa nudi specifični balans između potrošnje energije i mogućnosti za *downlink* komunikaciju

U klasi A, downlink komunikacija je veoma restriktivna, ali je potrošnja veoma mala
U klasi C, ne postoje restrikcije u downlink komunikaciji, ali je potrošnja veoma velika.

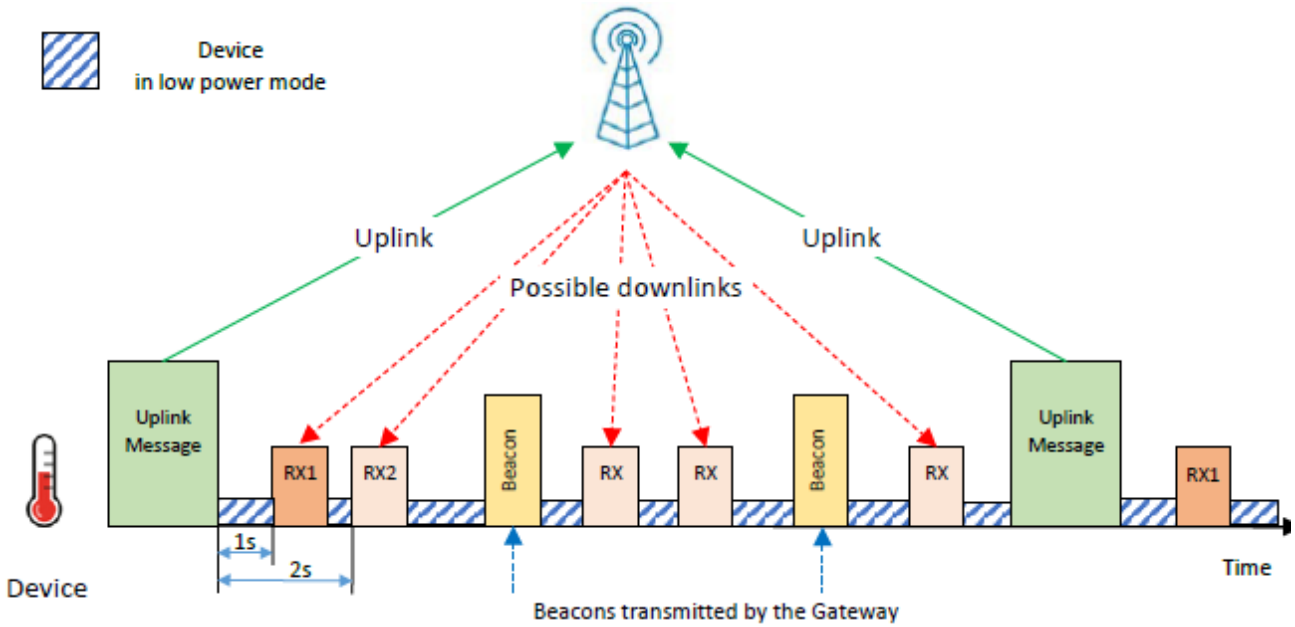
LoRaWAN
- Uređaji klase A -

- Uređaj može da pošalje *uplink* poruku kad god želi (ALOHA)
- Za svaku poslati *uplink* poruku, otvara se mogućnost za prijem jedne *downlink* poruke (zapravo, ACK + poruka) u jednom od dva prozora (slota) RX1 ili RX2
- Ukoliko uređaj primi poruku u slotu RX1, RX2 se ne otvara.
- Ako uređaj ne primi poruku u RX1, uređaj ima obavezu da osluškuje kanal u RX2
- Za komunikaciju u RX1 koriste se isti parametri prenosa (frekventni kanal i SF) kao u *uplink* poruci.
- Za komunikaciju u RX2 koriste se isti fiksni parametri prenosa (definisani konfiguracijom mrežnog servera)
- Svi krajnji uređaji počinju rad u režimu klase A.



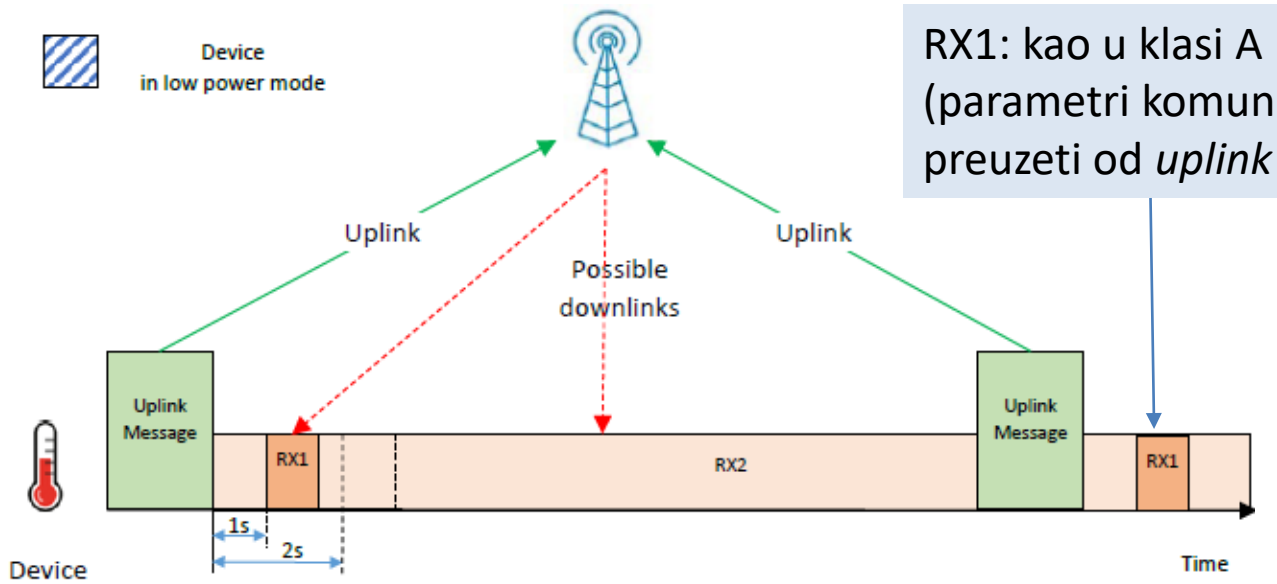
LoRaWAN
- Uređaji klase B -

- Klasa B = klasa A plus dodatni periodični slotovi (tzv. *ping* slotovi) za prijem *downlink* poruka
- Gateway-i periodično emituju bikon poruke, koje služe za vremensku sinhronizaciju krajnjih uređaja klase B
- Ping slotovi su raspoređeni tokom bikon perioda i svaki uređaj može biti konfigurisan da osluškuje jedan ili više ping slotova
- Uređaju se dodeljuju ping slotovi prilikom registracije, a raspodelom ovih slotova se bavi mrežni server.



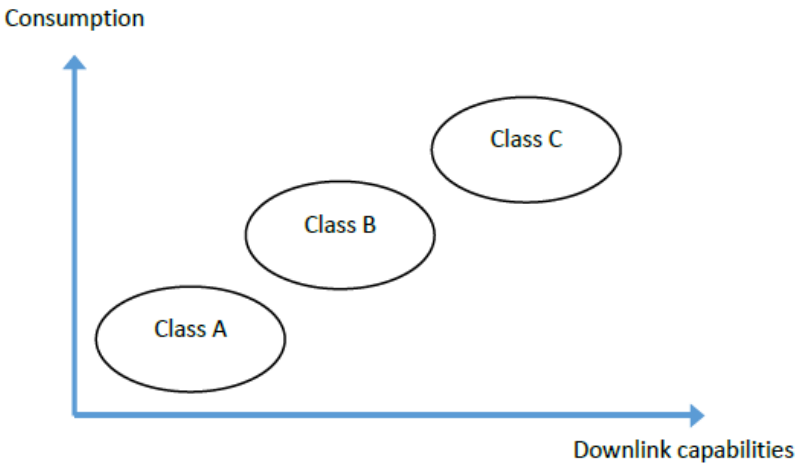
LoRaWAN
- Uređaji klase C -

- Uređaji u klasi C su uvek na prijemu, osim dok šalju *uplink* poruke.
- Minimalna latencija (kašnjenje) u dostavi poruka u smeru aplikacioni server – krajni uređaj
- Prilagođeno krajnjim uređajima koji moraju biti neprekidno nadgledani i upravljani od strane aplikacionog servera. (Npr. upravljanje svetlosnom saobraćajnom signalizacijom u gradu).
- Cena koja se plaća za laku i brzu dostupnost uređaja je značajno veća potrošnja energije na strani krajnjeg uređaja.



RX1: kao u klasi A (parametri komunikacije preuzeti od *uplink* poruke)

LoRaWAN
- klase uređaja-



Klasa	Potrošnja energije	Downlink dostupnost	Tipične primene
A	Najmanja	Ograničena – samo posle uplink poruke	Senzori sa malom frekvencijom javljanja
B	Umerena	Periodična – u zakazanim ping slotovima	Uređaji koji se povremeno kontrolišu
C	Najveća	Konstantna – osim tokom slanja	Aktuatori kojima je potrebna brza kontrola