8 WWAN

Bežična WAN mreža (WWAN – *Wireless Wide-Area Network*) je vrsta bežične mreže koja omogućava povezivanje na velikom geografskom području. Za razliku od WLAN mreže, koja obično pokriva ograničeno područje poput kuće ili kancelarije, WWAN mreže mogu da pokriju cele gradove, regione ili čak i države. Osnovne karakteristike WWAN mreža su sledeće:

Celularna tehnologija: WWAN mreže se prvenstveno oslanjaju na celularnu mrežnu tehnologiju, gde je područje pokrivenosti podeljeno na manje geografske regione – tzv. ćelije. Svaka ćelija ima svoju baznu stanicu koja komunicira sa uređajima unutar svog dometa.

Pokrivenost. Celularna tehnologija omogućava komunikaciju na većim udaljenostima u poređenju sa WLAN mrežama. To omogućava WWAN mrežama da pružaju povezanost na udaljenim lokacijama ili ruralnim područjima gde žičana infrastruktura nije dostupna ili je nepraktična.

Podrška mobilnosti. Jedna od osnovnih karakteristika WWAN mreža je podrška za mobilne uređaje (*hangover*) - korisnici mogu da održavaju internet konekciju i razmenjuju podatke dok se kreću od jedne ćelije do druge.

Podrška za veliki broj uređaja. WWAN mreže, budući da pokrivaju veće područje, a da bi bile praktične, moraju da pružaju mogućnost povezivanja velikom broju uređaja/korisnika.

Troškovi. WWAN mreže su 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).

Mreže mobilne telefonije su danas svakako najrasprostranjeniji oblik WWAN mreža. Ove mreže pružaju ne samo servis mobilne telefonije već i servis mobilnog interneta za pametne telefone, tablete i prenosne računare. S obzirom na značaj koji ima u savremenom društvu, kao i stalne zahteve za povećanje kapaciteta i nivoa kvaliteta usluga, tehnologija mreža mobilne telefonije se neprekidno unapređuje i evoluira. Ova evolucija je do sada prošla kroz 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.

8.1 WWAN i IoT

Osim u klasičnoj mobilnoj telefoniji, WWAN mreže nalaze sve širu primenu i u realizaciji geografski razuđenih IoT (*Internet of Things*) sistemima, obezbeđujući servis pristupa internetu za jednostavne embeded uređaje, onda kada su ti uređaji mobilni ili su postavljeni na mestima gde nije dostupna neka druga mrežna infrastruktura (poput npr. WLAN ili Ethernet). Spektar primena je veoma širok. U nastavku sledi spisak tipičnih primena WWAN mreža u IoT domenu:

Praćenje vozila i flota: WWAN omogućava praćenje lokacije i stanja vozila u realnom vremenu. To je korisno za upravljanje flotama vozila, optimizaciju ruta, pravovremeno održavanje vozila, sigurnost i smanjenje troškova goriva.

Pametni gradovi: povezivanje različitih IoT uređaja u pametnim gradovima, što uključuje 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 različitih resursa kao što su kontejneri, oprema, skladišta i drugo. Omogućava efikasno 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, kao što su pametni pacijentski monitori, senzori za praćenje vitalnih znakova, pametni inhalatori drugi uređaji za poboljšanje zdravstvene nege i praćenje bolesnika.

Industrijska automatizacija: povezivanje različitih industrijskih uređaja i mašina za praćenje performansi, održavanje, upravljanje zalihama, praćenje proizvodnje i optimizaciju procesa u fabrikama i postrojenjima.

U početnom periodu razvoja IoT sistema, primene poput prethodno nabrojanih, realizovane su korišćenjem mreža mobilne telefonije. Čak i danas, pojedini IoT sistemi se oslanjaju na mreže mobilne telefonije. To podrazumeva da je svaki IoT uređaj opremljen modemom za mobilnu komunikaciju, putem kojeg, poput mobilnog telefona, uspostavlja vezu sa mobilnom mrežom radi prenosa podataka. Međutim, mreže mobilne telefonije, poput 2G, 3G i 4G, nisu uvek najpogodnije za primenu u IoT i to iz nekoliko razloga:

Potrošnja energije: mreže mobilne telefonije zahtevaju relativno visoku potrošnju energije na strani uređaja. Ovo je 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. Primera radi, struja potrošnje 4G modema tokom predaje iznosi $1 - 2A$! S druge strane, IoT uređajima gotovo nikada nije potrebna velika brzina prenosa podatak, pa je, u tom pogledu, povećani utrošak energije zbog velikog protoka podataka čist gubitak.

Troškovi: Mreže mobilne telefonije mogu imati visoke troškove pretplate ili korišćenja podataka, što može biti nepraktično za IoT implementacije sa velikim brojem uređaja. Takođe, 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, poput podruma, ili šahtova i slično, gde korisnici mobilne telefonije retko zalaze, ali gde često borave IoT uređaji.

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).

U zaključku, mreže mobilne telefonije nisu optimizovane za većinu IoT scenarija, uključujući nisku potrošnju energije, dug vek trajanja baterije, podršku za veliki broj uređaja i široku pokrivenost. Iz tog razloga, u novije vreme, u sve većoj upotrebi su WWAN mreže namenski projektovane za IoT. Ovo mreže su poznate pod skraćenicom LPWAN, gde „*LP*“ potiče od „*Low Power*“. U nastavku, naš fokus je isključivo na LPWAN mrežama.

8.2 LPWAN

LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) je 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:

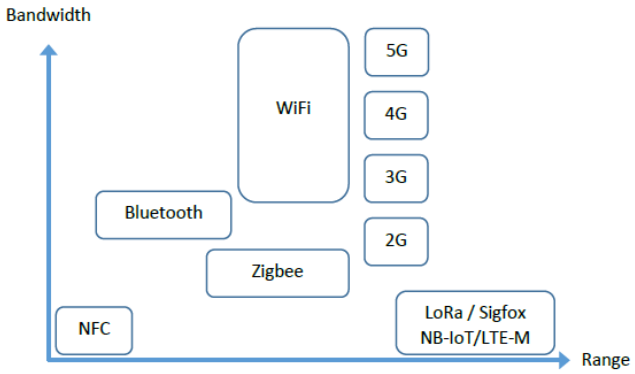
Domet komunikacije LPWAN mreža se kreće od nekoliko kilometra do nekoliko desetina kilometara, što zavisi od tehnologije i okruženja (urbano/ruralno).

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 (odnosi se na potrošnju krajnjih uređaja u mreži, a ne uređaja koji čine infrastrukturu mreže). LPWAN uređaji 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. LPWAN mreže su optimizovane za prenos male količine podataka malom brzinom prenosa. Brzina prenosa podataka se kreće u opsegu od ispod $1\ Kbps$ do nekoliko stotina $Kbps$ i često nije fiksna već zavisi od udaljenosti krajnjeg uređaja od pristupne tačke. 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. Krajnji uređaji u LPWAN mreži su po pravilu jednostavni senzorski uređaji. LPWAN mreža, po pravilu, opslužuje veliki broj jednostavnih krajnjih uređaja (obično, senzorski uređaji), što nameće nisku cenu LPWAN umrežavanja. LPWAN umrežavanje ne bi trebalo da značajno cenovno optereti krajnji uređaj. To se odnosi kako na cenu RF transivera tako i na troškove prenosa podataka (pretplata).



Sl. 1 Poređenje bežičnih tehnologija prema brzini prenosa podataka i dometu

Na Sl. 1 je dato poređenje bežičnih tehnologija prema propusnosti (brzina prenosa) i komunikacionom dometu. LPWAN mrežama odgovara pravougaonik u donjem desnom uglu. Dakle, LPWAN se karakterišu malom brzinom prenosa podataka (uporedivo sa NFC) i veliki domet komunikacije (poput mreža mobilne telefonije i više). Odnos između mreža mobilne telefonije i LPWAN je sličan odnosu između WLAN i WPAN mreža. Na primer, sistem pametne kuće je moguće realizovati upotrebom WiFi mreže, ali to nije uvek praktično, već je u većini slučajeva bolje koristi WPAN mrežu, zbog manje potrošnje energije, bolje pokrivenosti i niže cene. Slično, IoT sistem pametnog grada je moguće realizovati upotrebom mreže mobilne telefonije, ali iz razloga manje potrošnje energije, bolje pokrivenosti, skalabilnosti i niže cene, praktičnije je koristiti LPWAN mrežu.

8.2.1 Arhitektura LPWAN mreže

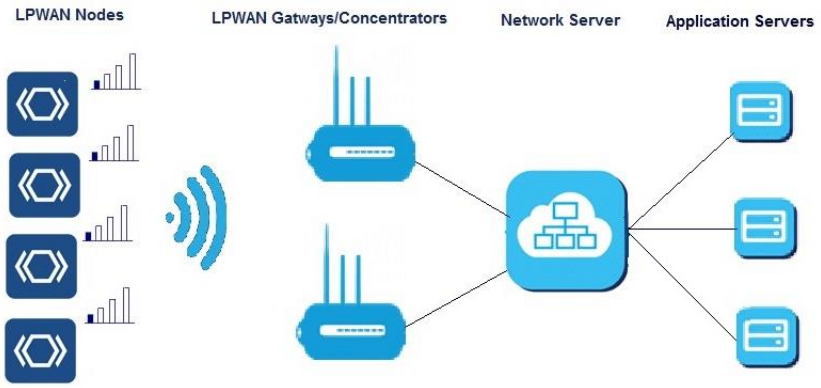
Arhitektura LPWAN mreže obuhvata nekoliko ključnih elemenata i uređaja koji čine njenu infrastrukturu i omogućuju komunikaciju između uređaja i mreže. Osnovne komponente LPWAN mreže su: krajni uređaj, *gateway*, mrežni server i aplikacioni server (Sl. 2).

Krajnji uređaji (*end device*), označeni kao "*LPWAN nodes*" na Sl. 2, su (po pravilu) baterijski napajani uređaji sa senzorima koji prikupljaju podatke iz okruženja (temperatura, vlažnost, pritisak, svetlost, vibracije itd.) i bežičnim putem ih šalju *gateway*-u. Takođe, to mogu biti i uređaji tipa aktuator koji izvršavaju određene radnje na osnovu primljenih naredbi (upravljanje ventilima, prekidačima, bravama itd.).

Gateway (mrežni prolaz, ili koncentrator). Igra ulogu pristupne tačke, ili mosta između krajnjih uređaja i unutrašnje infrastrukture LPWAN mreže. *Gateway* prima podatke od krajnjih uređaja i prosleđuje ih mrežnom serveru, obično preko internata, bilo putem žičane veze (Ethernet) ili bežične veze (celularna mreža). LPWAN mreža ne sadrži samo jedan, već, po pravilu, više *gateway*-a, strategijski raspoređenih u određenom geografskom području. Ipak, broj *gateway*-a u LPWAN mreži je mnogo manji od broja krajnjih uređaja koje mreža opslužuje.

Mrežni server je centralni server LPWAN mreže, koji 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. Takođe, mrežni server upravlja mrežom, tako što 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 prema specifičnim potrebama aplikacije (analiza podataka, generisanje izveštaja i upozorenja, pokretanje određenih akcija i sl.). Aplikacioni server je 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.



Sl. 2 Arhitektura LPWAN mreže

Za razliku od WLAN i WPAN mreža koje su u vlasništvu pojedinaca, koji su često i njihovi jedini korisnici, ili su u vlasništvu institucije ili kompanije koja mrežu koristi za svoje potrebe, LPWAN mreže pružaju svoje usluge različitim korisnicima u okviru šireg geografskog područja. Iz tog razloga, LPWAN mreže su u vlasništvu provajdera mrežnih usluga (NSP - *Network Service Provider*). NSP je kompanija koja je vlasnik mrežne infrastrukture (uključujući *gateway*-e i mrežne servere) i pruža (tj. prodaje) usluge

LPWAN povezivanja zainteresovanim korisnicima. Po pravilu, LPWAN NSP su telekomunikacione kompanije i provajderi mobilne telefonije, koje LPWAN uvode kao proširenje svoje komunikacione infrastrukture.

8.2.2 LPWAN tehnologije

Danas je upotrebi nekoliko LPWAN tehnologija, od kojih široku primenu nalaze: NB-IoT, LTE-M i LoRaWAN. NB-IoT i LTE-M se implementiraju u okviru postojeće infrastrukture mreža mobilne telefonije, dok se LoRaWAN mreže nisu striktno vezane za infrastrukturu mobilne telefonije i mogu se realizovati i kao privatne mreže.

NB-IoT i LTE-M tehnologije su pogodan za primene koje zahtevaju nisku latenciju i pouzdanost na širem području pokrivenosti (npr. praćenja vozila). Često se koristi u scenarijima gde je dostupnost mobilne mreže važna ili gde je potrebna veća brzina prenosa podataka. LoRaWAN je čest izbor za privatne mreže i primene u kojima su domet i potrošnja energije ključni faktor. U nastavku će ukratko biti predstavljene NB-IoT i LTE-M tehnologije, dok će LoRaWAN biti obrađena sa više detalja u posebnoj sekciji.

NB-IoT i LTE-M

NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) i LTE-M (*LTE for Machines*) su LPWAN tehnologije koje se u značajnoj meri oslanjaju na standarde, protokole i postojeću infrastrukturu mobilne telefonije. NB-IoT i LTE-M se integrišu sa postojećom LTE (*Long-Term Evolution* – deo 4G) mrežnom infrastrukturom, što olakšava implementaciju i omogućava operatorima da iskoriste svoje postojeće resurse. NB-IoT i LTE-M rade u frekventnim opsezima licenciranim za mobilnu telefoniju, a modulacione šeme i komunikacioni protokoli koje koriste su, u suštini, pojednostavljeni protokoli mobilne telefonije, prilagođeni specifičnim zahtevima LPWAN mreža.

NB-IoT i LTE-M obezbeđuju poboljšanu pokrivenost unutar zgrada i dublje u urbanim i ruralnim područjima u poređenju sa standardnim mobilnim mrežama. Obe tehnologije imaju mehanizme za optimizaciju protoka podataka i smanjenje potrošnje energije kroz različite tehnike poput periodičnih spavanja, smanjenog propusnog opsega i efikasnog upravljanja RF linkom. Bolja pokrivenost i manja potrošnja energije u odnosu na standardne mobilne mreže, ostvarena je na račun značajno manje brzine prenosa podataka.

Brzina prenosa podataka. Brzina prenosa podataka kod NB-IoT je tipično $10\ Kbps$, dok u maksimumu može dostići $250\ Kbps$. Kod LTE-M, brzina prenosa podataka je viša, u opsegu od $10\ Kbps$ do $1MBps$, s tim da 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 karakteriše niska potrošnja energije, što ga preporučuje za uređaje sa dugim vekom trajanja baterije. Ova tehnologija je optimizovana za minimalnu potrošnju energije kroz periodično spavanje i druge tehnike štednje energije. S druge strane, LTE-M ima nešto veću potrošnju energije u poređenju sa NB-IoT, ali je i dalje, u tom pogledu, znatno efikasniji od standardnih mobilnih mreža poput 2G, 3G ili 4G.

Latencija. Odnosi se na kašnjenje u prenosu podataka (od trenutka kada je na strani krajnjeg uređaja podatak spreman za slanje do trenutka kada je podatak prenet mrežnom serveru). NB-IoT i LTE-M su optimizovanu za veoma malu potrošnju energije, što se delimično postiže uvođenjem dužih perioda mirovanja (spavanje bez komunikacije). Neizbežna posledica ovakvog režima rada je povećana latencija. Kod NB-IoT latencija je reda od nekoliko desetina sekundi do nekoliko minuta. Kod 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. Međutim, kod većine IoT aplikacija, brzina odziva nije primarni zahtev (da li će dostava informacije o trenutnom zagađenju vazduha kasniti $50ms$, ili $10s$, ili čak 10 minuta, nije od velikog značaja).

Domet. NB-IoT i LTE-M obezbeđuju bolju pokrivenost u zatvorenim prostorima i dublje u urbanim i ruralnim područjima u poređenju sa standardnim mobilnim mrežama. Tipičan domet NB-IoT je do nekoliko kilometara u zavisnosti od konfiguracije mreže i uslova okoline. Domet 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, što omogućava efikasno deljenje spektra sa drugim LTE uređajima (mobilnim telefonima). 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. (Inače, širina standardnih LTE frekventnih kanala, za mobilnu telefoniju, je $5 - 20MHz$).

8.3 LoRa/LoRaWAN

LoRaWAN (***Lo**ng **Ra**nge **W**ide **A**rea **N**etwork*) je tip LPWAN mreže. Arhitektura LoRaWAN je podudarna sa opštom arhitekturom LPWAN mreže na Sl. 2. 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. S druge strane, „LoRa“ je modulaciona šema koja se koristi za bežičnu komunikaciju dugog dometa, male brzine prenosa i niske potrošnje između krajnjih uređaja i *gateway*-a. LoRa je patentirana tehnologije kompanije *Semtech* (https://www.semtech.com/), koja je danas vodeći proizvođač LoRa transivera. Dakle, LoRa pokriva fizički sloj, dok se LoRaWAN oslanja na LoRa i definiše više slojeve protokol-steka. Iza LoRaWAN tehnologije stoji *LoRa Alliance* (https://lora-alliance.org/) – neprofitna organizacija koja okuplja proizvođače čipova, opreme, operatere u cilju standardizacije i promocije korišćenja LoRa tehnologije za WWAN IoT mreže. Nakon uvođenja 2015. godine, LoRa tehnologija je doživela brzu ekspanziju. Procenjuje se da je danas (2024. god.) u svetu operativno preko 1 milijarde LoRa uređaja.

8.3.1 LoRa

LoRa (***Lo**ng **Ra**nge*) je bežična tehnologija fizičkog nivoa koja omogućava komunikaciju na velike udaljenosti uz nisku potrošnju energije. Ključne karakteristike LoRa tehnologije uključuju dug domet (do nekoliko kilometara u ruralnim područjima, a do nekoliko stotina metara u urbanim okruženjima), niska potrošnja energije, niska ali promenljiva i prilagodljiva brzina prenosa podataka, mogućnost dvosmerne komunikacije i sve to po relativno niskoj ceni.

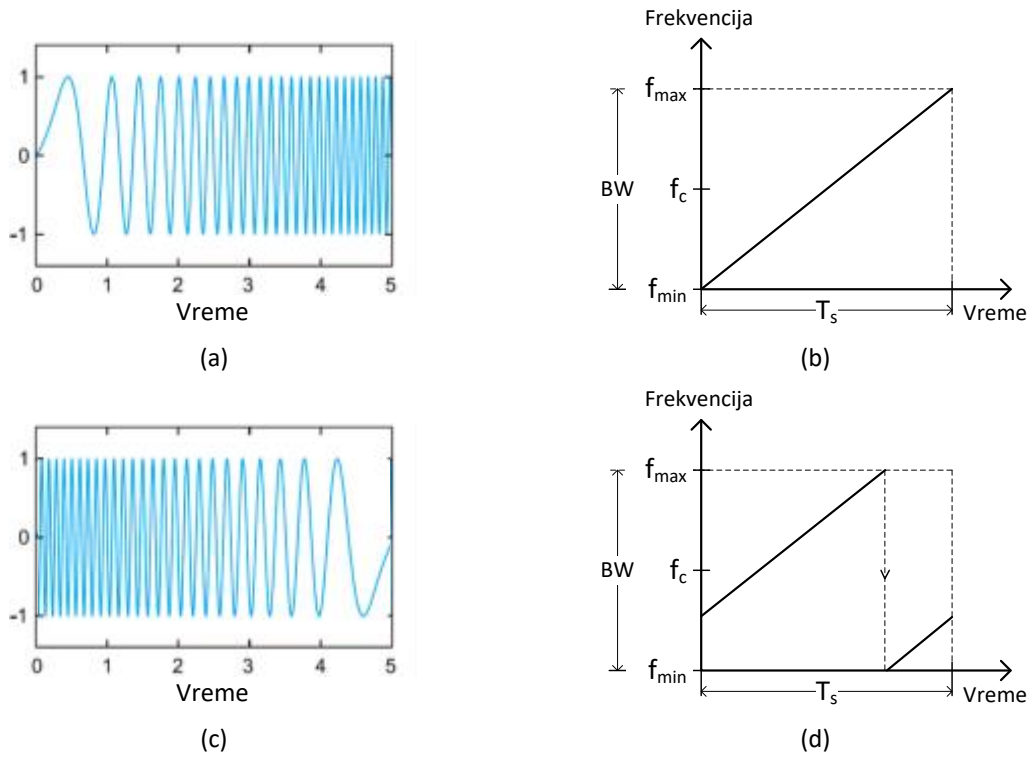
Frekventni opsezi

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. Za razliku od ISM opsega 2.4GHz, koji je globalno dostupan, u sub-GHz delu frekventnog spektra ne postoji opseg koji je priznat kao slobodan u celom svetu, već se u različitim regionima koriste različiti ISM opsezi, svaki sa specifičnim zahtevima koji se odnose na podelu na frekventne kanale, brzinu prenosa

podataka, izlaznu snagu, maksimalnu dužinu paketa, *duty-cycle* i sl. Primera radi, 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 ovaj opseg 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 dostupna frekventna kanala, i predajna snaga je ograničena na $25mW$.

Modulacija

Komunikacija na velikim udaljenostima uz nisku potrošnju energije je izazvan problem, jer u takvim uslovima prijemnik treba da demoduliše prijemni signal koji može biti veoma slab, čak ispod nivoa šuma. Kod LoRa, ovaj problem se rešava prenosom podataka u *proširenom spektru* (*spread spectrum*), gde, kao što znamo, modulisani signal zauzima veći propusni opseg nego što je to neophodno. Drugim rečima, primenom specifične modulacije, snaga signala se raspršuje na sve frekvencije preko celokupnog frekventnog opsega, što onda olakšava prijemniku da kombinujući uzorke sa mnogo frekvencija rekonstruiše poslati signal uprkos niskoj snazi prijemnog signala. Proširenje spektra, u formi CDMA (*Code Division Multiple Access*) i FH (*Frequency Hopping*) se koristi u mnogim bežičnim tehnologijama (WiFi, Bluetooth). Međutim, LoRa, ne koristi ni CDMA ni FH, već tzv. *Chirp Spread Spectrum* (CSS) modulaciju.



Sl. 3 *Chirp* signal: (a) *up-chirp*; (b) zavisnost frekvencije od vremena; (c) *down-chirp*; (d) *chirp* sa ofsetom

Proširenje spektra metodom CSS se postiže generisanjem tzv. *chirp* signala definisanog trajanja čija se frekvencija kontinualno i linearno menja u celom opsegu frekventnog kanala na koji je predajnik podešen[1]. Na Sl. 3(a) je prikazan talasni oblik osnovnog *up-chirp* signala. Kao što vidimo, frekvencija signala kontinualno raste - otuda *up-chirp*. Promena frekvencije *chirp* signala u vremenu je linearna, kao što je to prikazano na Sl. 3(b). Ako je LoRa predajnik podešen na frekventni kanal centralne

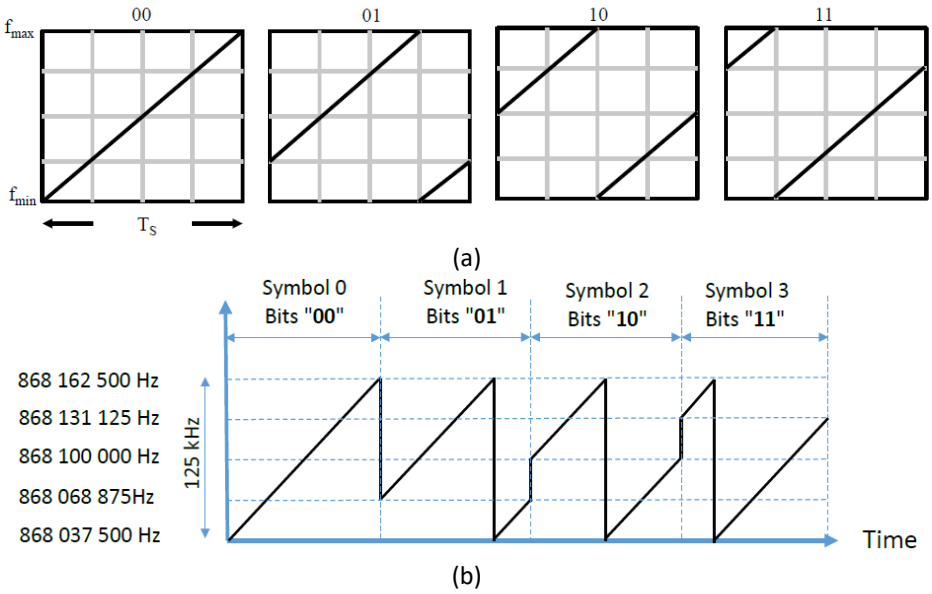
[1] *Chirp* znači „cvrčak“ ili „cvrkut“, što bi čak mogao da bude adekvatan naziv za signal čiji talasni oblik vidimo na slici. Međutim, *Chirp* je zapravo skraćenica od "***C**ompressed **H**igh-**i**ntensity **R**adar **P**ulse*" – pojam koji potiče iz oblasti radarskih sistema gde se takođe koriste signali ovog tipa.

frekvencije f_c i širine opsega BW, tada je minimalna frekvencija *chirp* signala $f_{min} = f_c - \frac{BW}{2}$, a maksimalna $f_{min} = f_c + \frac{BW}{2}$ (Sl. 3(a)). Osim *up-chirp* LoRa koristi i *down-chirp* signale, čija frekvencija linearno opada (Sl. 3(c)).

Chirp signal na Sl. 3(a) je osnovni *chirp*, jer kreće od minimalne frekvencije. Međutim, početna frekvencija *chirp*-a ne mora biti minimalna frekvencija opsega (odnosno maksimalna ako je reč o *down-chirp*-u), već, u opštem slučaju, to može biti bilo koja frekvencija u opsegu datog frekventnog kanala. U tom slučaju, frekvencija *chirp*-a linearno raste od početne do maksimalne, zatim naglo pada na minimalnu, da bi potom porasla do početne frekvencije, kao npr. na Sl. 3(c). Dakle, *chirp* je signal koji frekventno „prebriše“ celokupan opseg frekventnog kanala, bez obzira na početnu frekvenciju. Osim početne, minimalne i maksimalne frekvencije, još jedan parametar *chirp*-a je trajanje, T_s. Trajanje *chirp*-a određuje brzinu porasta frekvencije.

Sada je potrebno da se podsetimo osnovnog principa digitalne modulacije. Digitalna informacija (niz bita) se konvertuje u analogni signal nadovezivanjem signalnih elemenata, gde svaki signalni element predstavlja jedan simbol, a simbol je niz od m uzastopnih bita digitalne informacije. Broj različitih signalnih elemenata, tj. simbola je 2^m.

Kod LoRa, signalni elementi su *chirp*-ovi sa različitom početnom frekvencijom. Na Sl. 4(a) je prikazan primer LoRa modulacione šeme u kojoj se koriste 4 *chirp*-a, svaki sa različitom početnom frekvencijom. Svaki *chirp* odgovara jednom simbolu, a pošto u ovom sistemu postoje 4 *chirp*-a, tj. 4 simbola, svaki simbol/*chirp* predstavlja 2 bita informacije. U LoRa terminologiji, broj bita po simbolu koji se koristi u modulaciji se zove faktor *proširenja*, tj. SF (*Spreading Factor*). Faktor proširenja modulacione šeme na Sl. 4(a) je $SF = 2$, što se zapisuje i kao $SF2$. U šemi $SF10$, svaki simbol (*chirp*) predstavlja 10 bita.

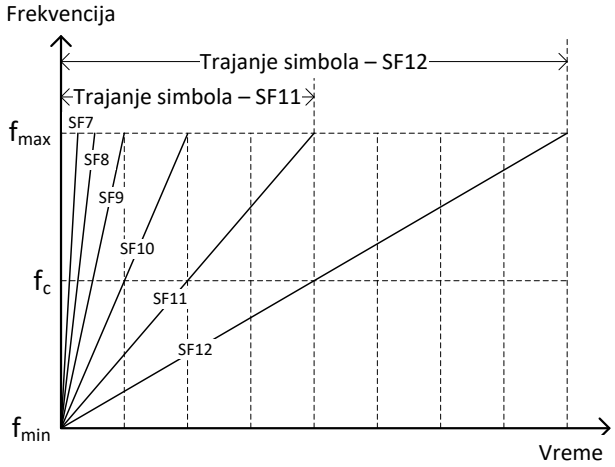


Sl. 4 Princip LoRa modulacije: (a) simboli u šemi SF2; (b) primer signala koji je generisan modulacijom SF2

Tokom transmisije, bitovi informacije koju treba preneti se grupišu u pakete od po SF bita. Svaki paket se predstavlja jednim određenim simbolom/*chirp*-om iz skupa 2^{SF} simbola. Jedina razlika između simbola je u početnoj frekvenciji odgovarajućih *chirp*-ova. Na Sl. 4(b) je prikazan primer signala (u frekventnom domenu) koji je generisan LoRa $SF2$ modulacijom.

Modulaciona šema SF2 je ovde data samo radi ilustracije osnovnog principa LoRa modulacije. Inače, LoRa standardu ne koristi SF2, već predviđa sledećih 6 faktora proširenja: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 i SF12.

Kod LoRa, trajanje simbola, odnosno vreme transmisije simbola (T_s) zavisi od faktora proširenja. Što je SF veće to je i trajanje simbola duže. Za isti propusni opseg, $BW = f_{max} - f_{min}$, simboli iz šeme $SF8$ traju duplo duže od simbola iz šeme $SF7$. Dupliranje trajanja simbola se nastavlja sve do $SF12$ (Sl. 5(a)).



(a)

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

(b)

Sl. 5 Vreme trajanja (transmisije) simbola: (a) trajanje simbola u zavisnosti od SF ; (b) trajanje simbola za $BW = 125KH$.

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

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

U tabeli na Sl. 5(b) navedena su trajanja simbola za različite faktore proširenja pod pretpostavkom da se prenos vrši na frekventnom kanalu širine opsega $BW = 125KHz$. S obzirom na to da svaki simbol nosi SF bita informacije, bitska brzina, odnosno brzina prenosa podataka, DR, LoRa modulacije iznosi:

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

Primera radi, razmotrimo dva slučaja. Za prvi slučaj važi $SF = 7$ i $BW = 125KHz$, a za drugi $SF = 12$ i $BW = 125KHz$. Primenom prethodne formule može se izračunati da je bitska brzina u prvom slučaju $6{,}836\ Kbps$, a u drugom samo $366\ bps$. Naime, iz same formule je jasno da povećanje faktora proširenja vodi ka manjoj brzini. Ako se faktor proširenja, SF, poveća za jedan, bitska brzina se smanjuje približno dva puta.

Postavlja se pitanje zašto bismo povećavali faktor proširenja i time usporavali komunikaciju? Pri tom treba imati na umu da bitska brzina određuje i vreme transmisije paketa podataka. Što je SF veće, DR je manje, pa je time i vreme emitovanja duže. Duže vreme emitovanja znači veći utrošak energije na strani predaje. Znači, povećanje SF ne samo što smanjuje brzinu prenosa podataka već i povećava utrošak energije. Razlog za korišćenje većih SF je u povećanju komunikacionog dometa. Što simbol duže traje to će prijemnik moći sa većom izvesnošću da otkrije o kom od 2^{SF} mogućih simbola se radi, pa čak iako je signal primljen sa velikim nivoom pridodatog šuma. BER (*Bit Error Rate*), kao što znamo zavisi od odnosa E_b/N_0, gde je E_b energija prijemnog signala po bitu i N_0 spektralna gustina snage šuma. Što je ovaj odnos veći, to će i pouzdanost komunikacije biti veća. E_b direktno zavisi od vremena trajanja simbola i što je SF veće to će i E_b biti veće, a BER manje (pogledati u 1. poglavlju).

Radi dodatnog povećanja pouzdanosti komunikacije (smanjenja BER-a), LoRa predviđa upotrebu kodova za korekciju grešaka – FEC (*Foreword Error Correction* – videti u 1. poglavlju). To znači da se bit sekvenci koju treba preneti pridodaje određeni broj bita, kako bi prijemnik mogao da lakše uoči i

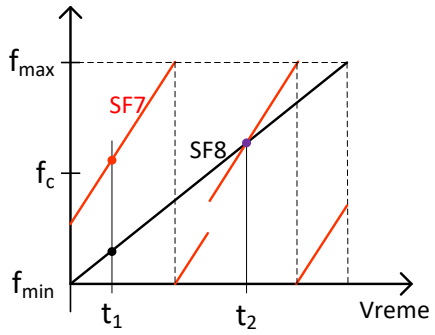
eventualno ispravi bit-greške nastale u prenosu. U opštem slučaju, umesto da se prenosi n bita, prenosi se m, gde je $m > n$. Brzina kôda, ili CR od *Code Rate* (misli se na kôd za korekciju grešaka) je odnos $CR = n/m$. Na primer $CR = 4/5$ znači da kôd za korekciju grešaka na svaka 4 korisna bita dodaje još jedan bit. Kada se LoRa koristi u sklopu LoRaWAN mreže, CR je fiksno i iznosi upravo 4/5. Imajući to u vidu, efektivna brzina prenosa podataka je zapravo:

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

Na primer, za slučaj $SF = 7$ i $BW = 125KHz$, efektivna brzina prenosa ne bi bila $6{,}836\ Kbps$, kako smo prethodno izračunali već $\frac{4}{5} \times 6{,}836 = 5{,}486\ Kbps$. Za slučaj $SF = 12$ i $BW = 125KHz$, umesto $366\ bps$, brzina prenosa korisnih podataka bi bila $292.8\ bps$.

Konkurentne transmisije

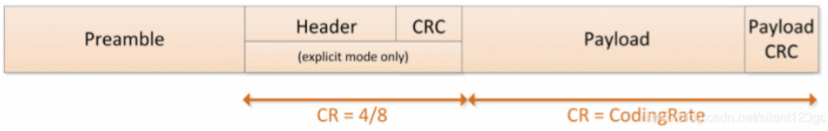
Jedna od glavnih karakteristika prenosa podataka u proširenom spektru je mogućnost istovremenih (konkurentnih) transmisija bez kolizije u okviru istog frekventnog opsega. Čak iako dva ili više predajnika emituju svoje „spektralno-proširene“ signale, to neće izazvati koliziju, jer će prijemnik imati mogućnost da iz tog „pomešanog“ signala izdvoji podatke koje šalje svaki pojedinačni predajnik. Da li ta osobina važi i za LoRa modulaciju? Zapravo važi, ali pod uslovom da svi istovremeno aktivni predajnici koriste različite faktore proširenja. Razmotrimo Sl. 6, koja prikazuje „spektogram“ dva LoRa signala: „crni“ – modulisan faktorom proširenja SF8 i „crveni“, modulisan faktorom proširenja SF7. Tajanje SF7 simbola je duplo kraće od SF8 simbola. Na grafikonu, zapravo, vidimo dva simbola SF7 i jedan simbol SF8. Dva signala menjaju frekvenciju svojim tempom i skoro nikada se ne dešava da su njihove frekvencije iste. Najveći deo vremena, situacija je kao u trenutku t_1 na Sl. 6. Iako prijemnik prima „pomešan“ signal, on može relativno lako da izvrši razdvajanje dva signala primenom FFT, odnosno može da nezavisno prati „kretanje“ u vremenu dve tačke, “crvenu“ i „crnu“, da rekonstruiše njihove „putanje“ u vremenu i da na osnovu taga prepozna simbole. Problem jedino postoji u trenutku t_2, kada oba signala imaju istu frekvenciju, što onemogućava razdvajanje. Međutim, ovo je samo jedan trenutak i već u sledećem trenutku, signali imaju različite frekvencije.



Sl. 6 Istovremeni prenos dva LoRa signala modulisana različitim faktorima proširenja

Format paket

LoRa predviđa dva formata paketa: eksplicitni i implicitni. U oba slučaja, paket počinje preambulom i sadrži polje za korisne podatke (*payload*). Razlika je u tome što eksplicitni format predviđa zaglavlje fizičkog nivoa, dok je kod implicitnog ovo zaglavlje izostavljeno (Sl. 7).

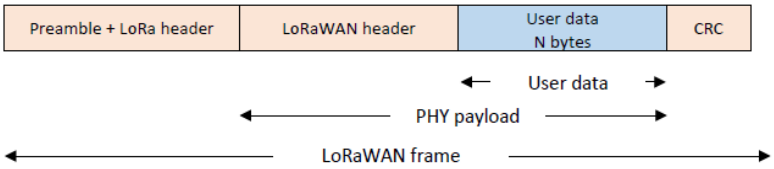


Sl. 7 Format LoRa paketa

Preambula (kao i uvek) omogućava sinhronizaciju prijemnika na dolazeći signal predajnika. LoRa dopušta podešavanje dužina preambule, ali, za primenu kod LoRaWAN, preambula je 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 kraj preambule i početak dela za podatke paketa. Zaglavlje fizičkog nivoa se sastoji iz tri polja ukupne dužine 8 bajta. Polje „*Payload Length*“ sadrži dužinu polja za korisne podatke (*Payload*), polje CR sadrži kôdnu brzinu koja se koristi za kodiranje korisnih podataka i polje „*CRC Present*?“ sadrži indikaciju da li u paketu postoji polje „*Payload CRC*“ (CRC za korisne podatke). Zaglavlje fizičkog nivoa ima svoj CRC i uvek se prenosi kodnom brzinom $CR = 4/8$.

U implicitnom formatu, zaglavlje fizičkog nivoa ne postoji, već se nakon preambule odmah šalju korisni podaci. Ova opcija je moguća samo ukoliko su predajnik i prijemnih unapred usaglašeni, tako da prijemnik zna kolika je dužina polja za korisne podatke, kojom kodnom brzinom se prenosi i da li u paketu postoji CRC.

Motiv za uvođenje implicitnog formata je smanjenje vremena emitovanja paketa, tj. ToA (*Time on Air*), jer je ušteda na svakom bajtu u paketu od značaja u uslovima kada se prenos obavlja na velike daljine, malom brzinom prenosa i malom izlaznom snagom predajnika. Pri tom, treba imati na umu da LoRaWAN unosi svoje zaglavlje i svoja polja za proveru (CRC) u delju „*Payload*“ LoRa paketa (Sl. 8). U realnim primenama, tipično, režijski troškovi (preambula, zaglavlja, CRC-ovi) značajno premašuju dužinu korisnih podataka. 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 $1155.1ms$.

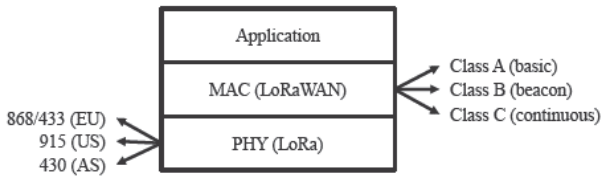


Sl. 8 Format LoRaWAN paketa

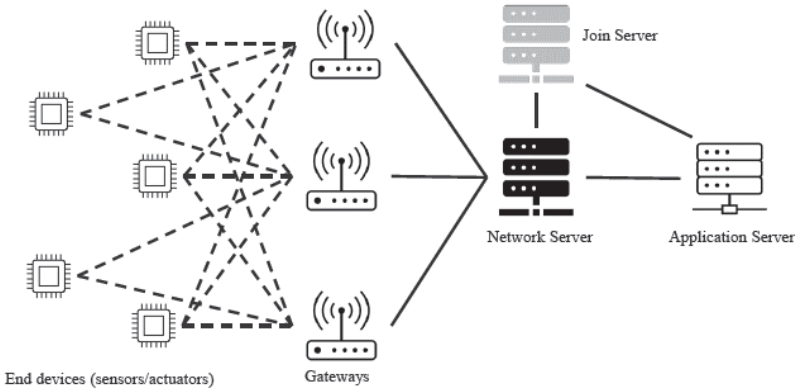
Dodatno ograničenje u brzini protoka podataka potiče od zakonske regulative koja u frekventnom opsegu $868\ MHz$ ograničava *duty cycle* uređaja na samo 1%. To znači da uređaj ima pravo da emituje svoje paketa samo 1% vremena. Na primer, ako je uređaj potrošio $46.3ms$ da bi poslao paket (prethodni primer), on mora biti „miran“ sledećih $99 \times 46.3ms = 4.58s$. Dakle, uređaj ima mogućnost da pošalje 1 bajt korisnih podataka na svake $4.58s$, odnosno efektivna brzina prenosa, za ovaj slučaj, iznosi $1.73\ bps$ (bita u sekundi). Ako bi se koristio faktor proširenja SF12, efektivna brzina prenosa bi bila samo $0.07\ bps$. Iako ove brzine prenosa deluju inferiorno, uvek treba imati na umu ciljne aplikacije LoRa tehnologije – npr. jednostavni senzorski uređaji koji svoja merenja dostavljaju nekoliko puta dnevno.

8.3.2 LoRaWAN

LoRaWAN je otvoreni standard za LPWAN mreže koji koristi LoRa fizički sloj za bežičnu komunikaciju. Ovaj standard je najvećim delom fokusiran na MAC sloj, ali definiše i dodatne servise za upravljanje mrežom i komunikacijom (Sl. 9(a)). Arhitektura LoRaWAN mreže je prikazana na Sl. 9(b). MAC sloj omogućava povezivanje LoRa krajnjih uređaja i LoRa *gateway*-a, koji su, pozadinskom mrežom, povezani sa mrežnim serverom.



(a)

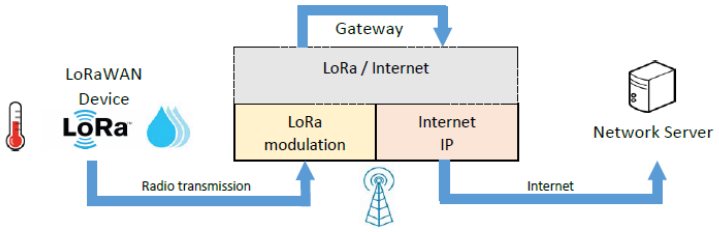


(b)

Sl. 9 LoRaWAN: (a) protokol-stek; (b) arhitektura

Gateway

Uloga *gateway*-a u LoRaWAN mreži je da prima LoRa modulisane radio poruke, sa jedne strane, i prosleđuje ih mrežnom serveru s druge strane (Sl. 10). Komunikacija *gateway*-mrežni server se po pravilu obavlja putem LAN mreže i interneta.



Sl. 10 Uloga *gateway*-a u LoRaWAN mreži

Gateway-i u LoRaWAN mreži nalikuju baznim stanicama u mrežama mobilne telefonije po tome da su strategijski raspoređeni u geografskoj oblasti koju mreža treba da pokrije i svi su povezani sa centralnim mrežnim serverom. Međutim, suštinska razlika između LoRaWAN *gateway*-a i baznih stanica je u tome što krajnji uređaj u LoRaWAN mreži nije pridružen jednom određenom *gateway*-u, za razliku od mobilnog telefona koji je uvek povezan sa tačno jednom baznom stanicom, odnosno onom u čijoj ćeliji se trenutno nalazi. U LoRaWAN mreži svi *gateway*-i primaju i procesiraju poruke koje šalju svi krajnji uređaji. To znači da poruku koju šalje krajnji uređaj mogu primiti svi *gateway*-i koji su u dometu radio komunikacije. Ova ključna karakteristika LoRaWAN mreže prikazana je isprekidanim linijama na Sl. 9(b). *Gateway* funkcioniše isključivo na fizičkom nivou: prima poruke i proverava njihov integritet (CRC). Ukoliko 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. Na taj način, *gateway*-i su uglavnom transparentni (nevidljivi) u komunikaciji između krajnjih uređaja i mrežnog servera. Pri tom, *gateway* osluškuje transmisije na više kanala istovremeno i u mogućnosti je da prima više poruka istovremeno čak i na istom kanalu ukoliko su one modulisane različitim faktorom proširenja (SF).

Mrežni server

MAC protokol se zapravo izvršava na mrežnom serveru. Prvi zadatak mrežnog servera je da eliminiše duplikate poruka, koji nastaju kada su poruku koju je poslao krajnji uređaj primila dva ili više *gateway*-a. Mrežni server otkriva duplikate na osnovu sadržaja poruka i meta-podataka koji su *gateway*-i pridodali porukama. LoRaWAN protokol predviđa da krajnji uređaj prebrojava poruke koje šalje i da u svaku poslatu poruku, u polje *Frame Counter* (*FCnt*), uvrsti njen redni broj. S druge strane, mrežni server vodi evidenciju o *FCnt* vrednostima za svaki pojedinačni krajnji uređaj, odnosno, server, za svaki krajnji uređaj pamti *FCnt* poslednje prihvaćene poruke tog uređaja. Ako primi poruku sa istom ili manjom *FCnt* vrednošću od *FCnt* poslednje prihvaćene poruke za konkretni uređaj, mrežni server odbacuje takvu poruku kao duplikat. Kada mrežni server primi prvu poruku sa *FCnt* koji je veći od *FCnt* vrednosti poslednje prihvaćene poruke za konkretni uređaj, server ne prihvata odmah ovu poruku, već ostavlja izvesno vreme za eventualni prijem poruka sa istim *FCnt* od istog uređaja preko nekih drugih *gateway*-a. Nakon što ovo vreme istekne, mrežni server analizira sve primljene poruke i konačno prihvata onu sa najvećom jačinom primljenog signala i odnosom signal-šum, a ostale odbacuje kao duplikate. Uz to, server, pamti i preko kog *gateway*-a je stigla prihvaćena poruka.

Sve prethodno se odnosi na komunikaciju u smeru od krajnjeg uređaja prema mrežnom serveru, odnosno, na *uplink* komunikaciju. LoRaWAN podržava i *downlink* komunikaciju, odnosno prenos podataka u smeru od mrežnog servera prema krajnjem uređaju. Za razliku od *uplink* komunikacije, u kojoj poruku krajnjeg uređaja prima jedan ili više *gateway*-a, kod *downlink* komunikacije, server isporučuje poruku uređaju preko tačno jednog *gateway*-a i to onog preko kojeg je primio poslednje prihvaćenu poruku od konkretnog krajnjeg uređaja. S obzirom na to da server prihvata poruke prema RSSI i SNR, pretpostavka je da je taj *gateway* najbliži krajnjem uređaju.

Osim eliminacije duplikata i izbora gateway-a,mrežni server je zadužen i za mnoštvo dugih funkcija koje se odnose na dodelu uređajima frekventnih kanala i faktora proširenja i potvrđivanje prijema. Ukoliko krajni uređaj to zahteva, mrežni server takođe može da implementira i adaptivnu brzinu prenosa (ADR) radi dinamičke kontroler faktora proširenja i predajne snage uređaja.

Aplikacioni server

Aplikacioni server u LoRaWAN arhitekturi je odgovoran za prijem, obradu i upotrebu podataka prikupljenih od krajnjih uređaja. Aplikacioni server prima podatke od mrežnog servera nakon što su prošli kroz *gateway*-e. Ovi podaci su najčešće korisnički podaci koje su uređaji poslali kao *uplink* poruke. Ako su podaci šifrovani, aplikacioni server vrši dekripciju koristeći *Application Session Key* (*AppSKey*). Nakon toga, podaci se analiziraju kako bi se izvukle korisne informacije. Podaci se integrišu u različite IoT servise koje mogu uključivati praćenje stanja senzora u realnom vremenu, automatizaciju procesa, kontrolu uređaja na daljinu, analitiku, izveštavanje, praćenje istorijskih podataka. Aplikacioni server može generisati komande ili konfiguracione poruke koje se šalju nazad krajnjim uređajima kao *downlink* poruke putem mrežnog servera i *gateway*-eva. Aplikacioni server često nudi API-je za programsku integraciju sa drugim sistemima i servisima, omogućavajući razmenu podataka i interoperabilnost (npr. MQTT). Takođe, omogućava podešavanje automatizovanih notifikacija putem email-a, SMS-a ili drugih komunikacionih kanala u slučaju specifičnih događaja ili alarma.

***„Join“* server**

Join server, ili server za priključene u LoRaWAN mreži, igra ključnu ulogu u procesu aktivacije uređaja, posebno kada se koristi metoda *Over-The-Air Activation* (OTAA). Kada se krajnji uređaj prvi put povezuje na mrežu ili ponovo aktivira, 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 jedinstvenu adresu uređaju, *DevAddr* (*Device Address,*) koja se koristi za identifikaciju uređaja za komunikaciju unutar mreže. Zatim, *Join* server generiše dva ključa za šifrovanje komunikacije: *NwkSKey* (*Network Session Key*) - ključ koji se koristi za proveru integritet podataka između krajnjeg uređaja i mrežnog servera i *AppSKey* (*Application Session Key*) - ključ koji se koristi za šifrovanje korisničkih podataka između uređaja i aplikacionog servera. Konačno, 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.

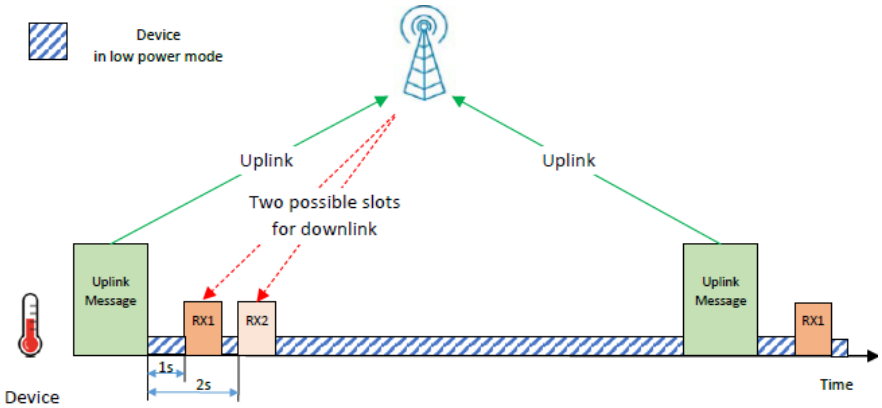
Klase uređaja

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.

Klasa A

LoRa uređaji klase A, najveći deo vremena provede u mirnom režimu i bude se tek povremeno radi komunikacije, ili, u slučaju senzorskog uređaja, samo onda kada je detektovan događaj koji se prati. Za svaku poslatu *uplink* poruku, uređaju će biti omogućeno da primi do dve kratke *downlink* poruke. Jedna od te dve poruke može biti ACK, dok druga može da nosi bilo koji tip informacije (npr. komanda koju aplikacija šalje uređaju kao reakciju na primljenu *uplink* poruku). Uređaj klase A ne može da primi nikakvu poruku sve dok ne pošalje sledeću *uplink* poruku, a onda ponovo dobija „kredit“ za *downlink* komunikaciju. Ovakav način rada se neprekidno ponavlja. Klasa A je prilagođena jednostavnim senzorskim uređajima, koji generišu malu količinu podataka i uređajima sa ograničenim mogućnostima za aktuaciju (delovanje na okružene) kojima se daljinski upravlja kratkim i sporadičnim komandama.

Za pristup komunikacionom kanalu, u klasi A se koristi „čista“ ALOHA, odnosno, uređaj može poslati *uplink* poruku u bilo kom trenutku, bez prethodnog osluškivanja medijuma ili usaglašavanja sa drugim uređajima. Kao što znamo, ALOHA je efikasna pri malom intenzitetu saobraćaja, međutim i veoma neefikasna (u smislu stope kolizija) pri velikom opterećenju.



Sl. 11 Prijemni slotovi za krajnje uređaje u klasi A

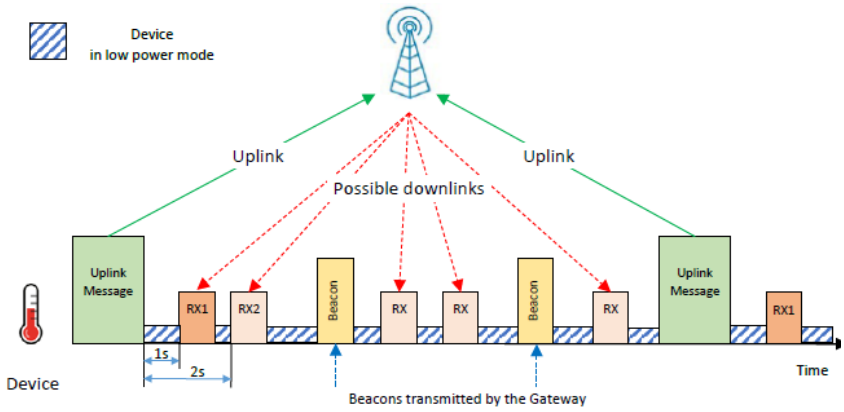
Na Sl. 11 su prikazani detalji komunikacije u klasi A. Dakle, nakon svake transmisije krajnjeg uređaja (*uplink message*) slede dva kratka „prijemna prozora“, odnosno slota, RX1 i RX2. Mrežni server može da pošalje *downlink* poruku krajnjem uređaju (naravno preko *gateway*-a) tokom slota RX1 ili RX2, ali ne i u oba. Ukoliko krajnji uređaj primi poruku u slotu RX1, tada se slot RX2 ne otvara za komunikaciju. Slot RX1 sledi tačno $1s$, a slot RX2 $2s$ nakon kraja *uplink* transmisije, mada se ovi vremenski pomaci

mogu podesiti i na druge vrednosti u konfiguraciji mrežnog servera. Za *downlink* komunikaciju u slotu RX1 koristi se isti faktor proširenja kojom je modulisana odgovarajuća *uplink* poruka. Faktor proširenja za slot RX2 je konfigurabilni parametar mrežnog servera.

Svi krajnji uređaji počinju rad u režimu klase A. Takođe, procedura pridruživanja mreži (*join*) se obavlja u ovom režimu. Uređaji klase B ili C mogu, nakon pridruživanja, na promene svoj režim rada.

Klasa B

Klasa B je u osnovi klasa A sa dodatnim periodičnim prozorima (slotovima) za prijem (Sl. 12). Ovi dodatni, tzv. *ping* slotovi (označeni sa RX na Sl. 12) se zakazuju u odnosu na bikon poruke *gateway*-a i nezavisni su od *uplink* poruka i slotova RX1 i RX2.

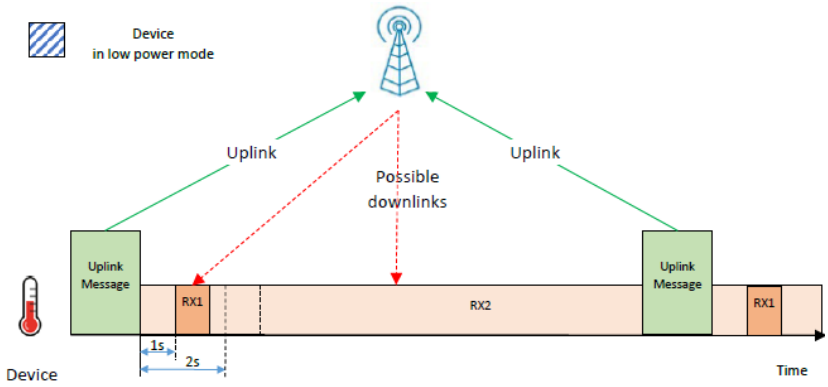


Sl. 12 Prijemni slotovi za krajnje uređaje u klasi B

Kao podrška uređajima u klasi B, na nivou LoRaWAN mreže, definisan je *bikon period* (tipično $128\ s$ ili $256\ s$), koji je dalje podeljen na bikon slotove i svakom *gateway* je dodeljen jedan takav slot. Na početku svakog bikon-slota, tačno jedan *gateway* u mreži emituje bikon poruku. G*ateway*-u su vremenski sinhronizovani (putem GPS-a), što omogućava precizno usklađivanje vremena slanja bikona. Ping slotovi su raspoređeni tokom bikon perioda i svaki uređaj može biti konfigurisan da osluškuje jedan ili više ping slotova, u zavisnosti od zahteva konkretne primene. Uređaju se dodeljuju ping slotovi prilikom registracije, a raspodelom ovih slotova se bavi mrežni server. Tokom normalnog režima rada, uređaj klase B ima obavezu da prima bikon poruke (na osnovu kojih usaglašava svoj lokalni časovnik sa mrežnim vremenom) i da se budi u svojim ping slotovima radi eventualnog prijema *downlink* poruka. *Uplink* poruke se šalju kao u klasi A, što se odnosi i na prijemne slotove RX1 i RX2.

Klasa C

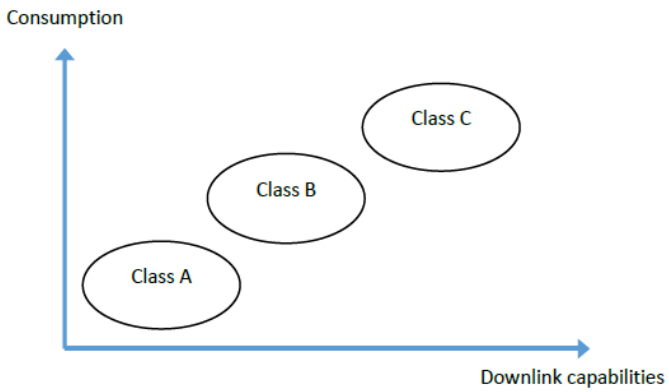
Uređaji u klasi C su uvek na prijemu, osim dok šalju *uplink* poruke. Uređaj iz klase C nikada ne isključuje svoj RF primopredajnik i dostupan je za prijem *downlink* poruke u bilo kom trenutku, osim u kratkim vremenskim intervalima dok emituje *uplink* poruku. Na ovaj način je na minimum smanjena latencija (kašnjenje) u dostavi poruka u smeru aplikacioni server – krajni uređaj. Imajući to u vidu, klasa C je prilagođena krajnjim uređajima koji moraju biti neprekidno nadgledani i upravljani od strane aplikacionog servera. Tipičan primer je upravljanje svetlosnom saobraćajnom signalizacijom u gradu. Cena koja se plaća za laku i brzu dostupnost uređaja u klasi C je, naravno, značajno veća potrošnja energije na strani krajnjeg uređaja.



Sl. 13 Prijemni slotovi za krajnje uređaje u klasi C

U klasi C, postoje prijemni slotovi RX1 i RX2, kao i u klasi A. Pri tom, za RX1 važi isto što i u klasi A: otvara se tipično $1s$ nakon završetka *uplink* poruke, a za prenos *downlink* poruke se koriste iste parametre prenosa (frekventni kanal, faktor proširenja) za *uplink* poruku. Za razliku od klase A, gde se slot RX2 otvara tipično 2s nakon završetka *uplink* poruke i traje tek toliko dugo koliko je potrebno za prenos jedne *downlink* poruke, RX2 slot u klasi C je otvoren sve vreme izuzev onda kada se prenosi *uplink* poruka ili je otvoren slot RX1. Kao i kod klase A, parametri prenosa u RX2 se ne vezuju za *uplink* poruke, već su statički konfigurisani na nivou cele mreže.

Na kraju, pogledajmo još samo sliku, koja daje poređenje tri klase LoRaWAN uređaja prema potrošnji energije i mogućnostima za *downlink* komunikaciju. Klasa A se odlikuje najmanjom potrošnjom energije, ali su mogućnosti za komunikaciju u smeru aplikacioni server – krajnji uređaj veoma ograničene i svedene samo na dva kratka prijemna slota nakon *uplink* poruke. Uređaji klase C konstantno dostupni za *downlink* komunikaciju, ali je njihova potrošnja energije višestruko veća od potrošnje uređaja u klasi A. Klasa B je kompromis između A i C, s obzirom da, po potrebi, omogućava uvođenje dodatnih kratkotrajnih prijemnih slotova.



Sl. 14 Prijemni slotovi za krajnje uređaje u klasi C

8.4 Vodič za učenje

WWAN

Osnovne karakteristike WWAN mreža

WWAN i IoT

Primene WWAN u IoT (nije neophodno da pamtite sve navedene primene, ali bi trebalo da možete da nabrojte bar nekoliko tipičnih primena)

Zašto mreže mobilne telefonije nisu uvek najbolji izbor za WWAN za IoT?

LPWAN

Osnovne karakteristike LPWAN mreža

Arhitektura LAWAN mreža (Sl. 2). Uloga pojedinih mrežnih komponenata.

NB-IoT i LTE-M

Treba znati da se ove mreže integrišu sa mrežama mobilne telefonije.

Koje su specifičnosti NB-IoT i LTE-M u odnosu na mreže mobilne telefonije (4G, tj. LTE)? (Nije neophodno da pamtite numeričke podatka, npr. brzine prenosa, ali bi trebalo da znate u kom odnosu su brzina prenosa podataka, potrošnja energije, latencija i domet NB-IoT i LTE-M mreža u odnosu na mreže mobilne telefonije.)

LoRa

Frekventni opsezi. Dovoljno je da znate da se koriste ISM opsezi. U Evropi EU868 i EU433. Za opseg EU868 postoji ograničenje u maksimalnom *duty cycle*.

Modulacija. Potrebno je da razumete princip *Chirp Spread Spectrum* (CSS) modulacije. *Chirp*; *up*- i *down-chirp*; simboli, faktor proširenja; koji SF se koriste kod LoRa; u kojoj vezi su trajanje simbola, T_s, SF i širina propusnog opsega (BW); brzina prenosa podataka u zavisnosti od SF i BW; uticaj codne brzine (CR) na brzinu prenosa podataka; mogućnost demodulacije konkurentnih transmisija.

Format LoRa paketa. Eksplicitni i implicitni format.

LoRaWAN

Arhitektura LoRaWAN mreže (Sl. 9)

Gateway. Uloga. Prijem paketa i meta-podaci.

Mrežni server. Kako mrežni server eliminiše duplikate *uplink* poruka; kako bira *gateway* za slanje *downlink* poruke.

Aplikacioni server. Uopšteno o ulozi aplikacionog servera (praktično, isto kao aplikacioni server u generalnoj LPWAN mreži).

Join server. Uloga. *Join request* i *Join accept* poruke i šta se dešava između.

Klase uređaja A, B i C. Slike 11, 12 i 13 ne treba pamtiti, one su tu da bi vam pomogle u razumevanju principa komunikacije u svakoj klasi.

- ♦ ♦ ♦ -