7 WPAN

WPAN (*Wireless Personal Area Network*) je bežična personalna mreža koja omogućava komunikaciju između uređaja unutar malog geografskog područja, obično u radijusu od nekoliko metara do desetak metara. Glavni cilj WPAN-a je omogućavanje jednostavne i efikasne komunikaciju između uređaja unutar ličnog okruženja korisnika. Ove mreže često povezuju uređaje kao što su pametni telefoni, računari, bežične slušalice, pametni uređaji za kuću i drugi mobilni uređaji. WPAN koristi različite bežične tehnologije, kao što su Bluetooth, Zigbee, UWB (*Ultra-Wideband*), ili druge, u zavisnosti od specifičnih zahteva i primena.

Osnovne karakteristike WPAN mreža:

Mali domet: s obzirom na to što su namenjene komunikaciji u ličnom okruženju korisnika, WPAN mreže imaju ograničen domet, koje ne prelazi 10-tak metara, ili u nekim slučajevima maksimalno nekoliko desetina metara.

Niska potrošnja energije: uređaji u WPAN mreži su obično prenosivi (mobilni) i napajani baterijom. Iz tog razloga niska potrošnja energije je često ključni zahtev.

Jednostavno povezivanje: od WPAN mreža se očekuje da omoguće brzu i jednostavnu integraciju uređaja u mrežu, bez velikog angažovanja korisnika. Često podržavaju automatsko uparivanje i konfiguraciju uređaja.

Brzina prenosa podataka: obično se ne zahtevaju velike brzine prenosa podataka. U mnogim primenama i par desetina $Kbps$ je dovoljno da zadovolji komunikacione potrebe jednostavnih uređaja. Međutim, postoje i primene koje zahtevaju daleko više brzine prenosa (i do nekoliko desetina $Mbps$), kao što je to slučaj tamo gde se između bliskih uređaja prenosi audio ili video visoke rezolucije.

Sigurnost: kako bi se zaštitila privatnost korisnika i integritet podataka, od WPAN mreža se očekuje da implementiraju sigurnosne mehanizme, što uključuje šifrovanje podataka i autentifikaciju uređaja.

Fleksibilnost i prilagodljivost: od WPAN mreža se očekuje fleksibilnost i prilagodljivost različitim scenarijima primene. Različiti uređaji i aplikacije zahtevaju različite karakteristike, pa je važno da WPAN mreže podrže raznovrsne potrebe.

Različite oblasti primene WPAN-ova imaju značajno različite zahteve u pogledu brzine prenosa podataka, potrošnje energije i kvaliteta usluge. Zbog toga se WPAN mreže obično klasifikuju u sledeće tri kategorije:

WPAN velike brzine prenosa: koriste se u primenama koje zahtevaju prenos multimedijalnog sadržaja u realnom vremenu. Ova kategorija WPLAN je podržana standardom IEEE 802.15.3, sa maksimalnom brzinom prenosa podataka $55\ Mbps$.

WPAN srednje brzine prenosa: tipična primena je zamena žičanih kablova i potrošačka elektronika (npr. bežične slušalice i zvučnici). Odgovarajući standard je IEEE 802.15.1, tj. Bluetooth, sa brzinom prenosa od $1\ Mbs$, odnosno do $3\ Mbps$, u najnovijim verzijama.

WPAN male brzine prenosa: tipična primena je formiranje bežičnih mreža senzora, tj. bežičnih mreža jednostavnih pametnih uređaja. Za ovu WPAN kategoriju postoji više standarda, od kojih je u najširoj primeni IEEE 802.15.4, sa brzinom prenosa podataka do $250\ Kbps$.

U ovom predmetu, bliže ćemo se upoznati sa WPAN mrežama srednje i male brzine prenosa podataka, odnosno sa standardima IEEE 802.15.4 i IEEE 802.15.1. Standard 802.15.4 je obrađen u nastavku ovog poglavlja, dok je standardu 802.15.1, tj. Bluetooth, posvećeno posebno poglavlje.

7.1 IEEE 802.15.4

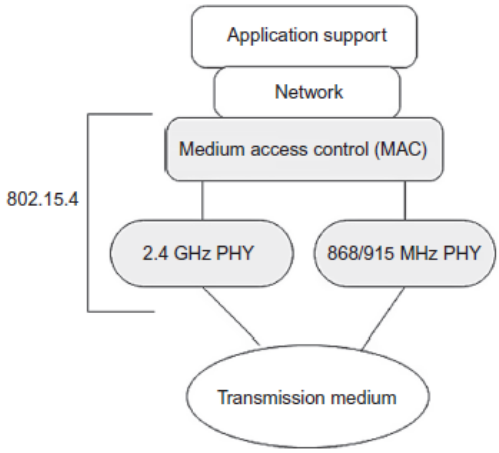
IEEE 802.15.4 je već duže vremena unazad (od početka 2000-tih god.) jedan od najpopularniji standard za WPAN mreže male brzine prenosa. Prilagođen je primenama za bežični monitoring i upravljanje jednostavnim uređajima, koji zahtevaju malu brzinu prenosa i veoma malu potrošnju energije. Tipične oblasti primene 802.15.4 su: pametne kući i automatizacija u zgradama, mreže u automobilima, Industrijske bežične senzorske mreže i interaktivne igračke i daljinsko upravljanje.

Potrebno je istaći da poslednjih godina (počev od npr. 2020), primat u ovoj oblasti postepeno preuzima *Bluetooth*, zahvaljujući unapređenim karakteristikama u pogledu potrošnje energije u novim verzijama ovog standarda, koje su poznate kao *Bluetooth Low Energy* (*BLE*).

Standard 802.15.4 pokriva dva najniža sloja OSI arhitekture: fizički i sloj veze. Izbor protokola višeg nivoa je ostavljen aplikaciji i zavisi od konkretnih zahteva. Proširenje na više slojeve dolazi preko nekoliko posebnih standarda, od kojih je najpoznatiji ZigBee. Često se između 802.15.4 i ZigBee stavlja znak jednakosti. Međutim, razgraničenje je veoma jasno: ZigBee koristi, tj. obuhvata 802.15.4 i dalje ga nadograđuje. 802.15.4 je takođe podloga i za WPAN standarde 6LoWPAN, ISA100.11a, WirelessHART i Thread.

7.1.1 Fizički sloj

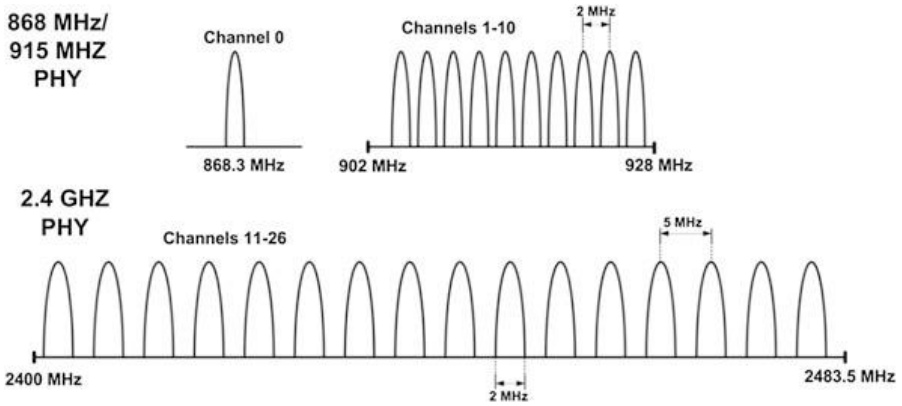
IEEE 802.15.4 sadrži, zapravo, dve specifikacije fizičkog sloja (Sl. 1). Oba su zasnovane na DSSS tehnici, dele istu strukturu paketa i optimizovane su za malu potrošnju i rad u *low-duty cycle* režimu. („*duty cycle*“ se odnosi na radni ciklus primopredajnika. Na primer, ako četvrtinu vremena primopredajnik provodi u aktivnom režimu, njegov radni ciklus je 25%). Razlika između dva fizička sloja je u frekventnom opsegu: jedan je predviđen za rad u $2.4\ GHz$ ISM bandu, i dostupan je za globalno korišćenje; drugi je vezan za opsege $868/915\ MHz$. Opseg $868\ MHz$ je dostupan u Evropi, a $915\ MHz$ u Americi.



Sl. 1 Protokol-stek 802.15.4: dva nezavisna fizička sloja i jedinstveni sloj veze (MAC)

Brzina prenosa podataka. Dva fizička sloja se takođe razlikuju i po brzini prenosa podataka. U $2.4\ GHz$ bandu, podržana je brzina prenosa od $250\ Kbps$, dok je u bandovima $868/915\ MHz$ samo 20 ili $40\ Kbps$. Obe opcije imaju svoje prednosti i nedostatke. Velika brzina prenosa u $2.4\ GHz$ bandu se može iskoristiti za smanjenje radnog ciklusa (zato što transmisije kraće traju), ali je domet komunikacije mali. Prenos pri nižim brzinama u bandovima $868/915\ MHz$ traje duže, ali je zato domet komunikacije značajno veći. Domet komunikacije takođe zavisi od izlazne snage predajnika i osetljivosti prijemnika. U bandu $2.4\ GHz$ izlazna snaga je ograničena na $1\ mW$, što je dovoljno za domet od $10 - 20\ m$. U bandovima $868/915\ MHz$, izlazna snaga može biti i veća (nekoliko desetina do nekoliko stotina mW), s tim što ograničenje zavisi od regulative u konkretnoj zemlji. Sa povećanom izlaznom snagom i malom brzinom prenosa, u ovim opsezima je moguće ostvariti komunikaciji i na rastojanjima do $1\ km$ na otvorenom prostoru, ili, u zatvorenom prostoru, pokriti jednu tipičnu kuću.

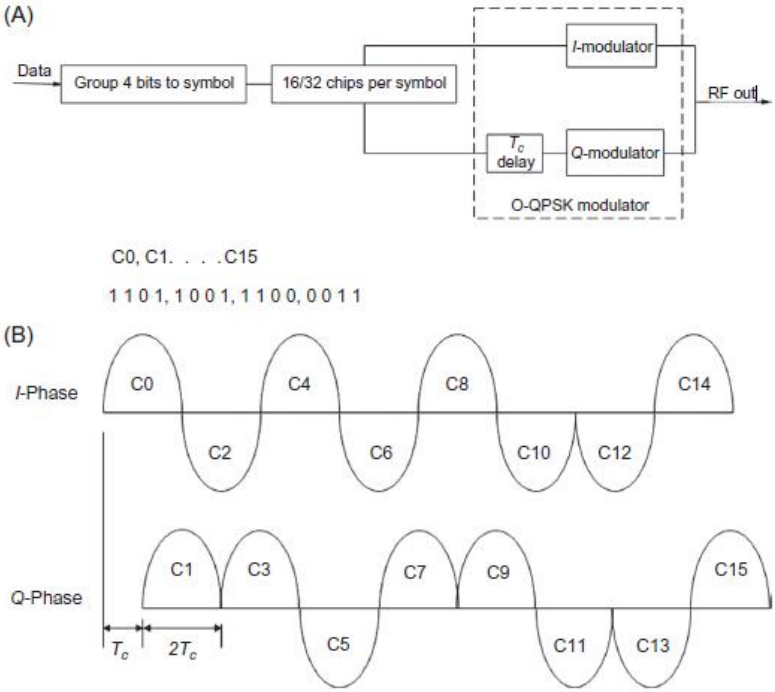
Frekventni kanali. U bandu $868\ MHz$ predviđenu je samo jedan frekventni kanal koji zahvata opseg od 868.0 do $868.6\ MHz$, dok su u bandu $915\ MHz$, koji zahvata frekventni opseg od 902.0 do $928.0\ MHz$, predviđena 10 kanala. Band $2.4\ GHz$ (opseg 2.4– $2.4835\ GHz$) podržava 16 kanala. Širina opsega kanala je $2\ MHz$ sa frekventnim razmakom između kanala od $5\ MHz$, kako bi se olakšalo filtriranje signala. Frekventni opsezi i kanali su prikazani na Sl. 2.



Sl. 2 Frekventni opsezi i kanali u standardu 802.15.4

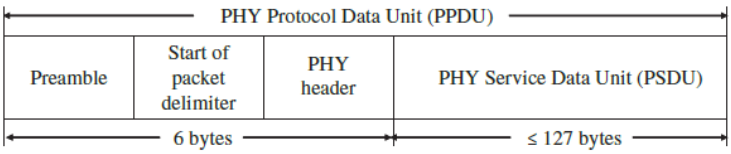
Za modulaciju u bandovima $868/915\ MHz$ (u okviru svakog kanala) koristi se DSSS (*direct sequence spread spectrum* - varijanta CDMA), gde se svaki bit informacije zamenjuje čip-sekvencom dužine 15 čipa. U zavisnosti od vrednosti bita, svaki čip sekvence se množi sa $+1$ ili -1, a rezultujuća sekvenca se moduliše u noseći signal BPSK šemom.

Modulacija. U bandu $2.4\ GHz$ koristi se takođe DSSS, ali na nešto drugačiji način. Binarna sekvenca se deli na grupe od po 4 bita. Drugim rečima, simboli su ovde dužine četiri bita. Svakom konkretnom simbolu odgovara jedna od 16 ortogonalnih 32-bitnih čip-sekvenci. Čip sekvence sukcesivnih simbola se nadovezuju i tako formirana čip sekvenca se moduliše u noseći signal korišćenjem modulacione šeme O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*). Prilikom modulacije, svaki čip, u zavisnosti od svoje vrednosti, 0 ili 1, zamenjuje se signalnim elementom oblika pozitivne ili negativne polu-sinusoide. Detalji O-QPSK modulacije su prikazani na Sl. 3. Niza bita koji treba preneti (*Data*) se deli na grupe od po 4 bita i svaka grupa se zamenjuje jedom od 16 čip-sekvenci dužine 32 čipa. Čipovi se alternativno šalju u I i Q granu modulatora. Na izlazu I- i Q-modulatora, za svaki čip se generiše jedna (pozitivna ili negativna) polu-period sinusnog oblika. „*Tc delay*“ unosi kašnjenje od $\pi/2$ u I grani (otuda „offset“ u skraćenici O-QPSK). Signali na izlazima I- i Q-modulatora se sabiraju i vode ka izlaznom RF pojačavaču.



Sl. 3 O-QPSK modulacija u standardu 802.15.4: Niza bita koji treba preneti (*Data*) se deli na grupe od po 4 bita i svaka grupa se zamenjuje jedom od 16 čip-sekvenci dužine 32 čipa. Čipovi se alternativno šalju u I i Q granu modulatora. Na izlazu I- i Q-modulatora, za svaki čip se generiše jedna (pozitivna ili negativna) polu-period sinusnog oblika. „*Tc delay*“ unosi kašnjenje od $\pi/2$ u I grani (otuda „offset“ u skraćenici O-QPSK). Signali na izlazima I- i Q-modulatora se sabiraju i vode ka izlaznom RF pojačavaču

Format paketa fizičkog sloja. 802.15.4 predviđa paketski prenos podataka – podaci se prenose upakovani u pakete definisanog formata (Sl. 4). Isti format paketa važi za oba banda. Paket počine preambulom i simbolom za početak paketa, nakon kojih sledi zaglavlje paketa, koje nosi informaciju o dužini paketa u bajtovima. Telo paketa, koje je u nastavku, nosi korisne podatke i njegova dužina ne može biti veća od 127 bajta. Mala dužina paketa obično ne predstavlja ograničene jer u većini primena uređaji razmenjuju poruke tipične dužine u opsegu $30 - 60$ bajta. Za prenos obimnijih podataka, podaci se mogu podeliti na više sukcesivnih paketa, što bi bio zadatak protokola višeg nivoa.



PHY packet fields:
- Preamble (32 bits)—synchronization
- Start of packet delimiter (8 bits)—signify end of preamble
- PHY header (8 bits)—specify length of PSDU
- PSDU (≤ 127 bytes)—PHY layer payload

Sl. 4 Format paketa fizičkog sloja u standardu 802.15.4

7.1.2 Tipovi uređaja i topologije

Standard 802.15.4 predviđa dva tipa uređaja (FFD i RFD), shodno njihovim funkcionalnim mogućnostima:

Uređaj pune funkcionalnosti (*FFD - Full Function Device*): ovo su uređaji koji implementiraju sve funkcije predviđene standardom 802.15.4, uključujuće predaju, prijem i prosleđivanje podataka. Mogu da komuniciraju direktno sa drugim FFD uređajima ili sa RFD uređajima. Takođe, mogu da funkcionišu kao koordinatori WPAN mreže. Puna funkcionalnost povećava cenu i potrošnju uređaja.

Uređaj smanjene funkcionalnosti (RFD - *Reduced Function Device*): implementiraju minimalni set funkcionalnosti i koriste za jednostavne zadatke. RFD uređaji mogu da komuniciraju samo sa FFD uređajima i ne mogu se koristiti za prosleđivanje podataka drugim uređajima. Imaju nižu cenu i potrošnju energije u poređenju sa FFD uređajima.

Shodno ulozi koju igraju u WPAN mreži, standard 802.15.4 predviđa sledeća tri tipa uređaja:

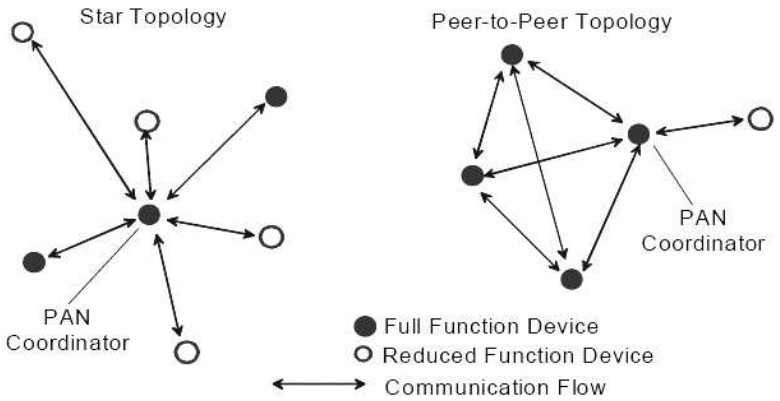
PAN koordinator (*Personal Area Network coordinator*): u WPAN mreži postoji tačno jedan uređaj u ulozi PAN koordinatora. Njegova uloga je, između ostalog, da uspostavi i upravlja mrežom, reguliše pristupanje mrežnih uređaji mreži, prosleđuje podatke između mrežnih uređaja, obezbeđuje servis vremenske sinhronizacije za sve mrežne čvorove itd.

(*Lokalni*) *koordinator*: postoji u složenijim mrežnim topologijama, poput topologije tipa stablo, u kojima igra ulogu koordinatora za podređene uređaje i učestvuje u prosleđivanju podatka između PAN koordinatora i udaljenih uređaja.

Krajnji uređaj (*End Device*): mrežni uređaj koji nema ulogu koordinatora i predstavlja krajnu tačku komunikacije u mreži.

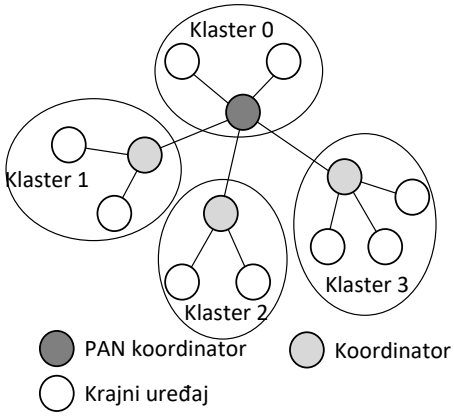
Ulogu PAN koordinatora i lokalnog koordinatora može preuzeti samo uređaj tipa FFD. Krajnji uređaj može biti tipa FFD ili RFD.

Standard 802.15.4 pruža mogućnost formiranja WPAN mreža različitih topologija. Dve osnove podržane topologije su: zvezda i *peer-to-peer* (P2P) - Sl. 5. Mreža može sadržati do $64K$ čvorova, od kojih tačno jedan igra ulogu PAN koordinatora. U mreži zvezdaste topologije, krajnji uređaji komunicira direktno sa PAN koordinatorom, ali ne i među sobom. Ukoliko postoji potreba za komunikacijom između krajnjih uređaja, ona se može obaviti isključivo posredstvom PAN koordinatora. PAN koordinator mora biti FFD uređaj, dok ostali uređaji mogu biti FFD ili RFD tipa. Zvezdasta topologija je pogodna onda kada mreža treba da pokrije manju oblast, tako da su svi krajnji uređaji u radio dometu PAN koordinatora. U P2P mreži, svaki FFD uređaj može komunicirati sa svakim drugim uređajem (FFD ili RDF) u svom radio dometu. Na ovaj način se zapravo može formirati mreža proizvoljne topologije, u kojoj FFD uređaji preuzimaju ulogu rutera za prenos podataka između udaljenih uređaja (zato što RDF mogu komunicirati samo sa FFD, ali ne i sa drugim RDF).



Sl. 5 Osnovne topologije 802.15.4 mreže

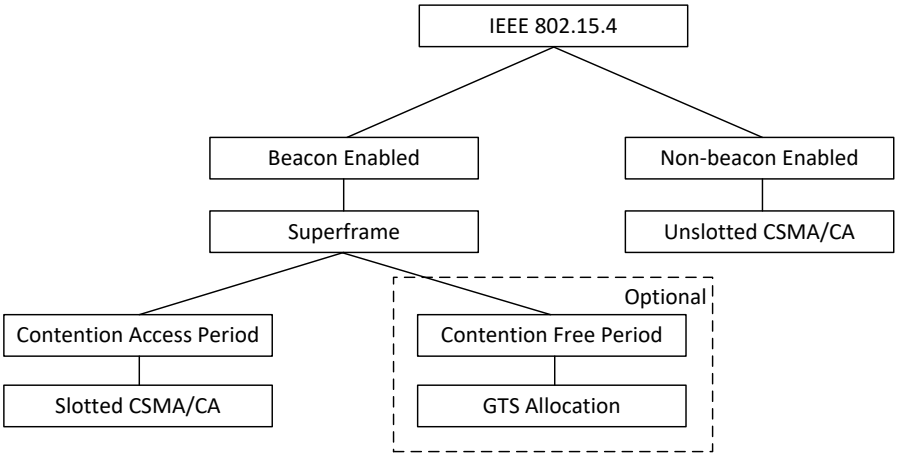
Kombinovanjem zvezdaste i P2P konfiguracije mogu se formirati mreže složenije topologije. Primer takve strukture je *cluster-tree* mreža (Sl. 6). Ovde, osim PAN koordinatori postoji i više lokalnih koordinatora, od kojih svaki opslužuje jedan „klaster“ krajnjih uređaja. Bitno je naglasiti da, bez obzira na topologiju i broj čvorova, u mreži uvek postoji samo jedan PAN koordinator. Takođe, treba napomenuti da 802.15.4 ne definiše protokole za rutiranje, već je taj aspekt umrežavanja prepušten višim slojevima protokol-steka.



Sl. 6 Topologija „*cluster-tree*“

7.1.3 MAC

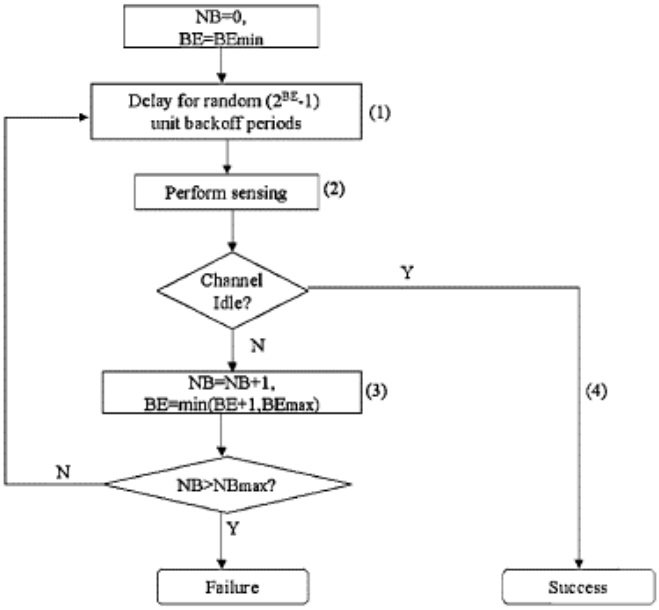
IEEE 802.15.4. definiše dva operativna režima rada mreže: *beacon-enabled* (sa bikonima) i *non beacon-enabled* (bez bikona) - Sl. 7. U ovim režimima, za upravljanje pristupom bežičnom medijumu, koriste se različiti MAC mehanizmi. U režimu rada bez bikona, uređaji u mreži se nadmeću za pristup medijumu primenom CSMA/CA procedure, tačnije *unslotted* CSMA/CA. Režim rada sa bikonima podrazumeva da FFD (PAN ili lokalni koordinator) periodično emituje tzv. bikon poruke radi sinhronizacije krajnjih uređaja koji su mu pridruženi. U ovom režimu, vreme je organizovano u tzv. superfrejmove, a za kontrolu pristupa medijumu tokom superfrejma se, u osnovi, koristi *slotted* CSMA/CA protokol. Takođe, postoji mogućnost da se uređajima, koji zahtevaju garantovanu propusnost, dodele vremenski slotovi (*GTS Allocation*) na ekskluzivno korišćenje, tokom kojih mogu da pristupaju medijumu bez nadmetanja (*Contention-free period*).



Sl. 7 IEEE 802.15.4 MAC

7.1.4 Režim rada bez bikona

U režimu rada bez bikona, čvorovi se nadmeću za pristup medijumu primenom protokola (algoritma) *unslotted* CSMA/CA. Dijagram toka na Sl. 8 prikazuje CSMA/CA mehanizam iz 802.15.4 uključujući korake od trenutka kada uređaj ima paket za slanje do trenutka kada dobija ili dozvolu za slanje (*Success*) ili indikaciju o tome da isporuka nije moguća (*Failure*). Kao što znamo, suštinski deo CSMA/CA je osluškivanje medijuma i povlačenje, na određeno vreme, u slučaju da je medijum zauzet. Kod 802.15.4 vreme na koje se uređaj povlači jednako je celobrojnom umnošku *backoff* perioda. Trajanje *backoff* perioda iznosi 20 simbola, pri čemu trajanje simbola zavisi od brzine prenosa podatka i tipa modulacije. Na primer, za brzinu od $250\ Kbps$ u $2.4GHz$ opsegu sa O-QPSK modulacijom, gde jedan simbol sadrži 4 bita, trajanje simbola je $16\ \mu s$, a trajanje *backoff* period $320\ \mu s$. Tokom CSMA/CA procedure, uređaj koristi dve promenljive, NB i BE. NB je broj uzastopnih povlačenja nakon detekcije zauzetog medijuma. NB se inicijalizuje na 0 i inkrementira za 1 pri svakom uzastopnom ponovnom pokušaju slanja istog paketa, ali ne može premašiti vrednost NB_{max}. Promenljiva BE je *backoff* eksponent i u vezi je sa izborom vremena povlačenja. BE se inicijalizuje na vrednost BE_{min} i ne može dobiti vrednost veću od BE_{max}.



Sl. 8 *Unslotted* CSMA/CA kod 802.15.4

Vratimo se algoritmu na Sl. 8. Nakon inicijalizacije promenljivih NB i BE, MAC pravi pauzu slučajnog trajanja iz opsega $[0 - 2^{BE} - 1] \times backoff_period$ (korak 1). Po isteku pauze, uređaj osluškuje kanal (korak 2). Ako je kanal zauzet, promenljive NB i BE se inkrementiraju za 1 (vodeći računa da BE ne postane veće od BE_{max}, korak 3). Ako je NB postalo veće od NB_{max}, algoritma završava rad sa indikacijom da prenos nije moguć. U suprotnom, ako NB nije veće od NB_{max}, algoritam se vraća na korak (1), odnosno ponovo pravi pauzu slučajnog trajanja pre ponovnog osluškivanja medijuma, ali sada izabranu u duplo dužem intervalu,. Onda kada osluškivanjem detektuje slobodan kanal, uređaj momentalno počinje transmisiju paketa („*Success*“).

CSMA/CA kod 802.15.4 je značajno jednostavniji od CSMA/CA iz standarda 802.11. Na primer, CSMA/CA kod 802.15.4 osluškivanje medijuma nije perzistentno (otuda odrednica *unslotted*), niti uređaj čeka na završetak tekuće transmisije da bi započeo *backoff*. Umesto toga, uređaj osluškuje medijum u veoma kratkom vremenskom intervalu, a zatim se povlači do sledećeg osluškivanja, sve dok ne detektuje slobodan medijum. Između dva osluškivanja, uređaj može da isključi RF transiver kako bi uštedeo energiju. Uz to, kod CSMA/CA za 802.15.4, ne postoji RTS/CTS procedura, kao ni NAV.

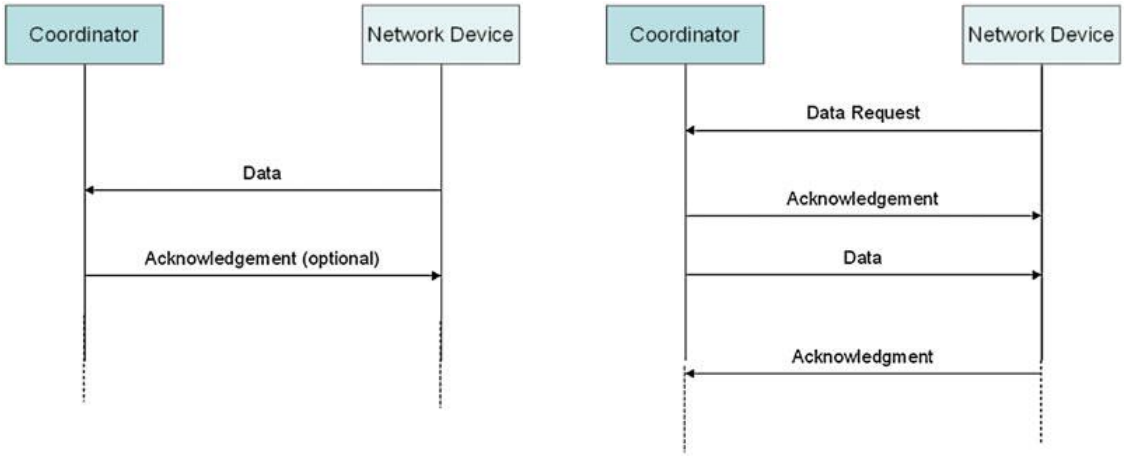
Režim rada bez bikona je pogodan za mreže zvezdaste topologije sa malim i sporadičnim saobraćajem, gde RFD uređaji tek povremeno imaju potrebu da komuniciraju sa FFD (npr. prekidač koji javlja da je upravo zatvoren/otvoren i sl., ili senzori sa velikom periodom merenja).

Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije

Razmatramo 802.15.4 mrežu zvezdaste topologije u režimu rada bez bikona. Mreža se sastoji iz PAN koordinatora i proizvoljnog broja mrežnih uređaja. Mrežni uređaji komuniciraju isključivo sa PAN koordinatorom. Postoje dva smera komunikacije, od uređaja ka PAN koordinatoru i od PAN koordinatora ka čvoru.

U režimu rada bez bikona, radi uštede energije, uobičajeno je da mrežni uređaji (*end-devices*) najveći deo vremena provode u mirnom režimu (tj. spavaju) i bude se samo povremeno da bi obavili svoj osnovni zadatak (npr. senzor izvršio merenje) i eventualno razmenili podatke sa PAN koordinatorom. Pri tom, mrežni uređaj ima slobodu da započne CSMA/CA proceduru kad kog poželi i da nakon što izbori pravo pristupa medijumu pošalje koordinatoru paket podataka. S druge strane, pošto se ne koriste bikoni, pa time ne postoji ni sinhronizacija između mrežnih uređaja i PAN koordinatora, koordinator mora neprekidno da drži svoj RF transiver u aktivnom režimu (da ne bi propustio poruku uređaja). Nakon prijema paketa, PAN koordinator odgovori slanjem (opcionog) ACK paketa uređaju koji je poslao paket. Ova procedura je prikazana na Sl. 9(a).

Razmotrimo sada slučaj kada PAN koordinator šalje paket podataka mrežnom uređaju. Pošto uređaji nisu sinhronizovani i PAN koordinator ne zna kada je koji uređaj budan, koordinator ne može da pošalje paket uređaju „kad kog poželi“. Umesto toga, mrežni uređaj ima obavezu da povremeno šalje koordinatoru poruku tipa „*Data Request*“. Po prijemu ove poruke, PAN koordinator prvo potvrđuje njen prijem (ACK), a zatim, odmah nakon toga, šalje uređaju i sam paket podataka. Konačno, uređaj potvrđuje prijem paketa, kao što prikazano na Sl. 9(b).



(a) Komunikacija u smeru od mrežnog uređaja ka PAN koordinatoru

(b) Komunikacija u smeru od PAN koordinatora ka mrežnom uređaju

Sl. 9 Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije bez bikona

7.1.5 Režim rada sa bikonima

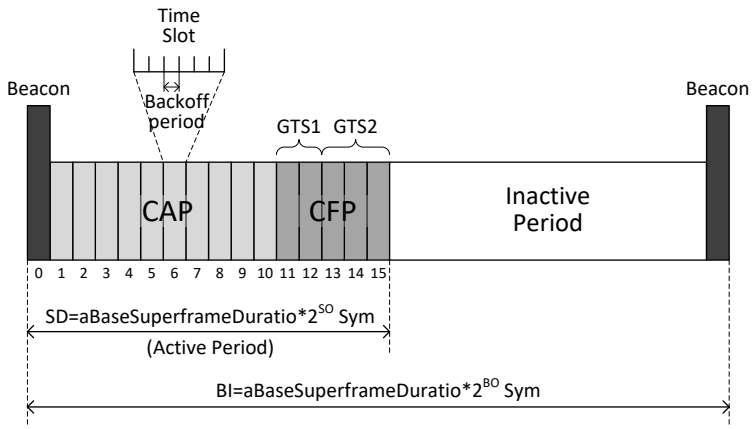
Režim rada sa bikonima uvodi striktnu sinhronizaciju uređaja u mreži. Bikone periodično emituje PAN koordinator da bi sinhronizovao uređaje i preneo im određene konfiguracione informacije. Perioda emitovanja bikona (*beacon interval*) je fiksna i može se podešavati u granicama od oko $15\ ms$ do $252\ s$. Za komunikaciju je predviđen prvi (aktivni) deo bikon-intervala, tzv. superfrejm (*superframe*). Drugi deo bikon-intervala je rezervisan za period neaktivnosti. U ovom periodu nema nikakve

komunikacije i RF transiveri uređaja su u režimu mirovanja. Superfrejm je podeljen na 16 vremenskih slotova istog, fiksnog trajanja, koji se razvrstavaju u tri celine (Sl. 10):

Bikon: bikon poruka se šalje u slotu 0.

CAP (*Contention-based Access Period*): U CAP periodu, uređaji se nadmeću za pristup primenom CSMA/CA procedure (koja je slična, ali ne i identična u odnosu na onu u režimu rada bez bikona). CAP period počine u slotu 1 i završava se pre početka CFP perioda (ukoliko CFP postoji). Ukoliko CFP ne postoji, CAP obuhvata celokupan aktivni period superfrejma (slotovi 1 - 16). Dakle, svakoj transmisiji u CAP periodu prethodni CSMA/CA. Pri tom, pakt potvrde (ACK), koji sledi nakon transmisije, kao i eventualni sukcesivni paket koji se, nakon potvrde, razmenjuju između konkretnog uređaja i koordinatora, prenose se bez nadmetanja. Transmisija koja ne može biti okončana pre kraja CAP perioda, odlaže se za sledeći superfrejm.

CFP (*Contention Free Period*) – počine odmah nakon završetka CAP i traje do kraja aktivnog perioda (tj. superfrejma). Vremenski slotovi iz CFP perioda su rezervisani za komunikaciju bez nadmetanja. Naime, koordinator može da pojedinim uređajima dodeli jedan ili više slova iz ove sekcije na ekskluzivno korišćenje. Slotovi koje koordinator dodeljuju konkretnom uređaju moraju biti sukcesivni i zajedno čine jedan GTS (GTS – *Guaranteed Access Timeslots*). Dužina CFP perioda zavisi od alociranih GTS. CFP neće postojati ukoliko ni jedan uređaj nije zahtevao GTS. Maksimalna dužina CFP-a je 7 vremenskih slotova.



Sl. 10 Organizacija vremena u režimu rada sa bikonima. Aktivni period (superfrejm) se koristi za komunikaciju; neaktivni za uštedu energije. Aktivni period traje 16 slotova. Prvi slot je rezervisan za bikon. CFP postoji ako postoje GTS-ovi. Na slici rezervisana su dva GTS, prvi trajanja 2 i drugi trajanja 3 slota. CFP uvek zahvata poslednji deo aktivnog perioda i njegova maksimalna dužina iznosi 7 slotova. CAP zauzima preostali deo aktivnog perioda. Konfiguriše se trajanje bikon-intervala (parametar BO) i trajanje superfrejma (parametar SO)

Vremenski parametri superfrejma su konfigurabilni, tj. mogu se podesiti shodno zahtevima konkretne primene. To uključuje:

- *Bikon interval* (BI) – vreme između emitovanja dva uzastopna bikona
- *Trajanje superfrejma* (SD – *Superframe Duration*) – trajanje aktivnog perioda bikon intervala. Kao što je prethodno rečeno, aktivni period je podeljen na 16 vremenskih slotova jednakog trajanja.

Vremena BI i SD su, zapravo, definisana parametrima BO (*Beacon Order*) i SO (*Superframe Order*), na sledeći način:

$$\left.\begin{aligned} BI &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \\ SD &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \end{aligned}\right\} za\ 0 \leq SO \leq BO \leq 14$$

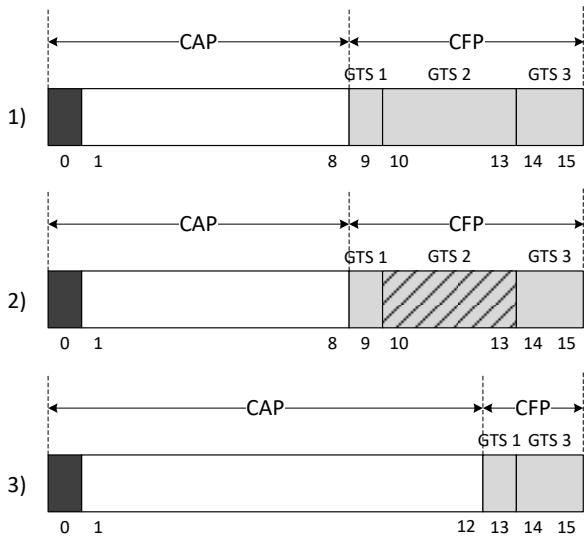
Vrednost parametra *aBaseSuperframeDuration* je fiksna i iznosi $15.36\ ms$ (za band $2.4\ GHz$ i brzinu prenosa $250\ kbps$), što ujedno predstavlja i najkraće trajanje superfrejma ($SO = 0$). Potrebno je da $BO \geq S0$, a što je BO veće od SO to je trajanje perioda neaktivnosti duži i *duty cycle* manje. Najduže trajanje bikon intervala je oko $251.66\ s$ ($BO = 14$). U mrežama složenije topologije, gde osim PAN koordinatora postoji još jedan ili više lokalnih koordinatora, svaki koordinator (PAN ili lokalni) može imati različiti *duty cycle*, koji se uz to može i dinamički menjati.

Napomena: parametar *aBaseSuperframeDuration* se, zapravo, izražava brojem simbola i njegova vrednost, po standardu, iznosi 960 simbola. U bandu $2.4\ GHz$, trajanje jednog simbola je $16\ \mu s$ što množenjem sa 960 upravo daje $15.36\ ms$.

Napomena: Takođe, na Sl. 10, treba uočiti da je vremenska podela superfrejma finija i da se zapravo svaki slot sastoji iz određenog broja *backoff* perioda. Superfrejm minimalne dužine ($SO = 0$), koji traje *aBaseSuperframeDuration*=960 simbola, sadrži $960/20 = 48$ *backoff* perioda, koji su raspoređeni na 16 slotova, odnosno 3 po slotu. Za veće SO, broj backoff perioda po slotu je veći ($\times\ 2^{SO}$).

CFP

GTS mehanizam omogućava uređajima da, tokom CFP perioda, pristupaju medijumu bez nadmetanja. GTS-ove uređajima dodeljuje koordinator i oni se mogu koristiti samo za komunikaciju između uređaja i koordinatora. Svaki GTS može obuhvatiti jedan ili više sukcesivnih slotova u CFP periodu i uvek je predviđen za komunikaciju u jednom smeru: od uređaja ka koordinatoru (predajni GTS) ili od koordinatora ka uređaju (prijemni GTS). Uređaj kome je dodeljen GTS ništa ne sprečava da koristi i CAP za komunikaciju; GTS je, prosto, garantovano vreme tokom kojeg uređaj može da komunicira sa koordinatorom bez potrebe da sprovodi CSMA/CA proceduru nadmetanja. Uređaj koji želi da ima svoj GTS, šalje odgovarajući zahtev koordinatoru. Koordinator proverava trenutnu zauzetost slotova i alocira traženi GTS ukoliko za to postoje mogućnosti. Svaki uređaj može da dobije najviše po jedan predajni i prijemni GTS. Jednom alociran GTS, kasnije se može i dealocirati. Zahtev za dealokaciju može da pošalje uređaj (GTS mu više nije potreban). Takođe, GTS može da dealocira i koordinator nakon što u određenom broju uzastopnih superfrejmova ne detektuju nikakvu aktivnost tokom GTS-a. Koordinator vodi evidenciju o odobrenim GTS-ovima, tako što za svaki GTS čuva informaciju o početnom slotu, broju slotova, smeru prenosa podataka i adresi uređaja kome je GTS dodeljen. Nakon dealokacije GTS-a, koordinator preuređuje CFP tako što preostale, još uvek aktivne GTS-ove pomera udesno, kao što je to ilustrovano primerom na Sl. 11. U prvom dijagramu vidimo da su alocirana tri GTS: GTS 1 dužine jedan, GTS 2 dužene 4, i GTS 2 dužine 2 slota. Dakle, dužina CFP period je maksimalnih 7 slotova, a dužina CAP 8 slotova. U nekom trenutku, dolazi zahtev za dealokaciju GTS 2 (dijagram 2). Koordinator oslobađa 4 slota koje zauzima GTS 2 i pomera GTS 1 za četiri slota udesno. Koordinator obaveštava uređaje sa dodeljenim GTS-ovima o nastaloj promeni. Kao što vidimo, sada je dužina CFP perioda 3, a dužina CAP 12 slotova.

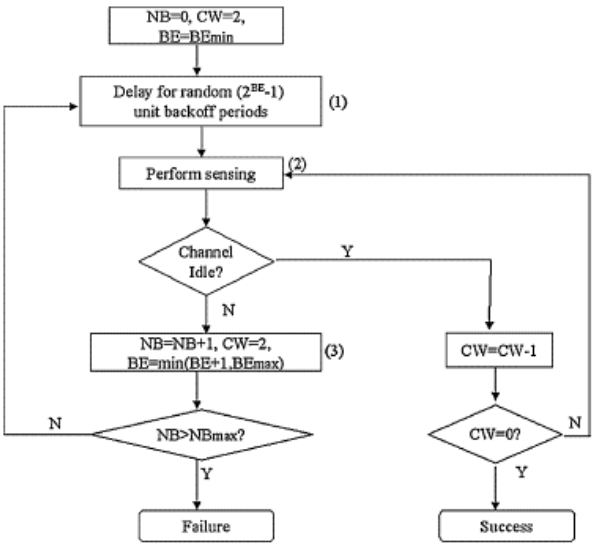


Sl. 11 Dealokacija GTS i defragmentacija CFP

CAP

Na Sl. 12 je prikazan dijagram toka CSMA/CA mehanizma za režim rada sa bikonima. Ova procedura se primenjuje tokom CAP perioda superfrejma. Jedina razlika u odnosu na CSMA/CA za režim bez bikona je u tome što uređaj, da bi dobio dozvolu emitovanja paketa, mora da detektuje slobodan medijum tokom dva uzastopna *backoff* perioda. Zbog toga, u algoritmu figuriše još jedna promenljiva, CW, koja je inicijalno postavljena na 2 i iznova se postavlja na 2 uvek kada čvor detektuje zauzet kanal. Kada uređaj detektuje slobodan kanal, CW se dekrementira za 1. Ako je CW još uvek veće od nule, uređaj nastavlja sa osluškivanjem kanala. Kada CW dobije vrednost 0, uređaj izlazi iz procedure nadmetanja sa dozvolom slanja paketa (*Success*). Postavlja se pitanje koja je svrha uvođenja CW? Razlog je sledeći. Kada bi se medijum osluškivao samo jedanput, moglo bi se desiti da se trenutak osluškivanja desi baš u kratkom vremenskom intervalu između upravo prenetog paketa podataka i pre početka emitovanja ACK paketa. U tom slučaju, uređaj bi detektovao slobodan medijum i počeo emitovanje svog paketa što bi izazvalo koliziju sa ACK paketom.

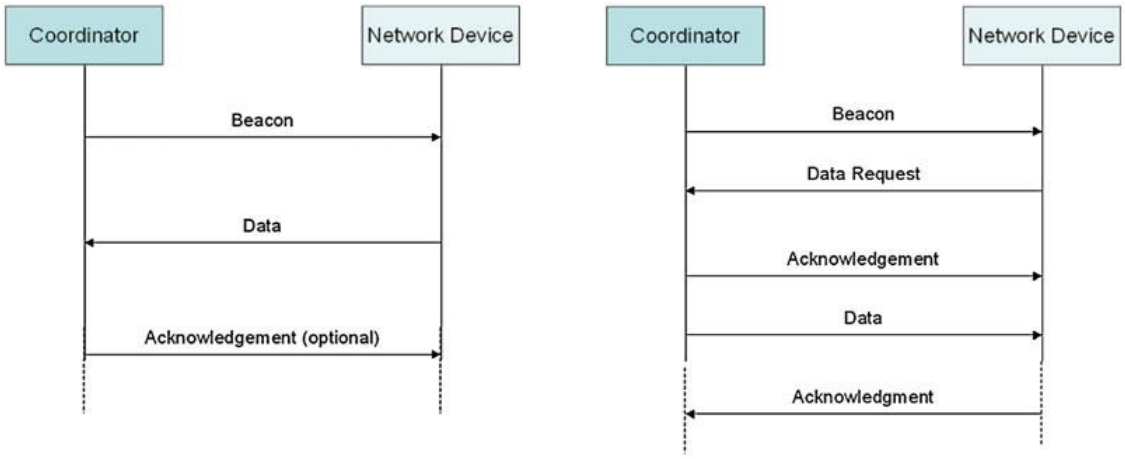
Još jedna razlika u odnosu na režim bez bikona je i to što je u režimu sa bikonima početak nadmetanja sinhronizovan sa početkom superfrejma. Takođe, operacija osluškivanja medijuma (korak *Perform sensing* u dijagramu na Sl. 12) je sinhronizovana sa početkom *backoff* perioda (otuda *slotted* CSMA/CA). Procedura nadmetanja mora da se završi tokom trajanja CAP perioda. Ukoliko uređaj ne uspe da se izbor za pravo pristupa medijumu tokom tekućeg CAP, on prekida nadmetanje i odlaže slanje svog paketa za sledeći superfrejm. U sledećem superfrejmu, nadmetanje počinje iz početka, tj. sve promenljive CSMA/CA se postavljaju na njihove početne vrednosti. Naravno, odlaganje transmisije za sledeći superfrejm povećava kašnjenje u isporuci paketa (povećava latenciju), zbog obaveznog perioda neaktivnosti. Međutim, to je cena koja se plaća radi uštede energije.



Sl. 12 *Slotted* CSMA/CA kod 802.15.4 (u režimu rada sa bikonima)

Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije

Razmatramo mrežnu konfiguraciju zvezdaste topologije koja radi u režimu sa bikonima. Pretpostavimo da mrežni uređaj želi da pošalje podatke PAN koordinatoru. Uređaj čeka na prijem bikona, odnosno na početak superfrejma. Ukoliko nema prethodno dodeljen GTS, uređaj šalje svoj paket podataka tokom CAP perioda primenjujući CSMA/CA proceduru. Ukoliko je uređaju dodeljen GTS slot, uređaj, prosto, čeka na početak odgovarajućeg GTS slota i tokom tog slota šalje paket PAN koordinatoru. Nakon primljenog paketa, PAN koordinator šalje uređaju paket potvrde prijema (ACK). Ova procedura je ilustrovana na Sl. 13(a).



(a) Komunikacija u smeru od mrežnog uređaja ka PAN koordinatoru

(b) Komunikacija u smeru od PAN koordinatora ka mrežnom uređaju

Sl. 13 Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije sa bikonima

Pretpostavimo sada da PAN koordinator želi da pošalje podatke određenom uređaju (Sl. 13(b)). PAN koordinator setuje određeni bit u bikon poruci, što predstavlja indikaciju uređaju da koordinator ima spreman paket za njega. Kada uređaj, nakon prijema bikona, sazna da postoji paket koji bi koordinator želeo da mu pošalje, uređaj šalje koordinatoru poruku tipa „*Data Request*“ (zahtev za podatke). Kao odgovor na ovu poruku, koordinator šalje uređaju prvo ACK poruku, a odmah zatim i paket podataka. Po prijemu paketa podataka, uređaj odgovara slanjem ACK poruke koordinatoru.

Ušteda energije

Energetska efikasnost je jedan od glavnih ciljeva standarda 802.15.4 i mnogi aspekti ovog standarda su podređeni ovom cilju. Režim rada sa bikonima može u velikoj meri da doprinese uštedi energije, kako na strani mrežnih uređaja, tako i na strani koordinatora. U mreži sa bikonima, aktivni i neaktivni periodi svih uređaji su sinhronizovani, što znači da koordinator može tokom neaktivnog perioda da isključi svoj RF transiver, bez bojazni da će propustiti poruku uređaja. S druge strane, mrežni uređaj ima obavezu da se nakratko probudi na početku svakog bikon intervala, radi prijem bikona, i da nakon toga isključi RF transiver, ili, ukoliko ima potrebu za tim, nastavi komunikaciju tokom superfrejma. Takođe, GTS mehanizam doprinosi uštedi energije uređaja, jer eliminiše potrebu za CSMA/CA nadmetanjem. Cena koja se plaća je povećana latencija. Na primer, prenos poruke koja nosi informaciju o događaju koji se desio tokom neaktivnog perioda, mora biti odložen za prvi naredni superfrejm.

Energetska efikasnost
Zamislimo sistem za zaštitu od požara, koji se sastoji od nekoliko senzor za detekciju dima i PAN koordinatora. Nakon što detektuje povećanu koncentraciju dima, senzor šalje obaveštenje PAN koordinatoru. Ovaj sistem je, po svojoj prirodu, tolerantan na latenciju, jer kašnjenje u dojavi alarma od $1s$, pa i nekoliko sekundi, nije kritično za njegovo pravilno funkcionisanje. Takođe, potrebe senzora za komunikacijom su male. Osim u veoma retkim situacijama kada treba da pošalje poruku alarma, senzor bi takođe trebalo povremeno da se javlja koordinatoru, kako bi potvrdio svoje prisustvo. Dakle, optimalno rešenje za sistem ovog tipa je režim rada sa bikonima, sa bikon-intervalom od okvirno $1s$. Pošto se ne očekuje intenzivna komunikacija, trajanje superfrejma bi moglo da bude oko $50ms$. Ovo se postiže postavljanjem parametra $BO = 6$ i $SO = 2$, čime se bikon-interval podešava na trajanje od $15.36 \times 2^6 = 983ms$ i superfrejm na $15.36 \times 2^2 = 61.44ms$. *Duty cycle* ovako podešene mreže je $1:16$, odnosno koordinator je aktivna samo $1/16$ vremena. S druge strane *duty cycle* senzora je mnogo manji i reda je $1:1000$ jer senzor uglavnom samo prima bikone. Zato nije neuobičajeno da se trajanje baterije uređaja u sistemima poput opisanog meri godinama. Na primer, ako je struja potrošnje RF transivera u režimu prijema $10mA$ i kapacitet baterije $1000mAh$, sa *duty cycle* $1:1000$, trajanje baterije biće približno 10 godina.

7.1.6 Adresiranje

Standard 802.15.4 predviđa dva tipa adresa uređaja: kratke i proširene.

Proširena adresa (*Extended Address*) je 64-bitni globalno jedinstveni identifikatori uređaja, koji je nepromenjiv i fiksno utisnut u hardver uređaja (u RF transiveru).

Kratka adresa (*Short Address*) je 16-bitni identifikator uređaja koji je jedinstven u okviru WPAN mreže. Ove adrese uređajima dodeljuje PAN koordinator prilikom njihovog pridruživanja mreži.

U WPAN mreži, adrese se koriste za komunikaciju, kao identifikatori uređaja. Postoje dve konfiguracione opcije. Ili se koriste isključivo kratke adrese (ukoliko je broj raspoloživih adresa dovoljan za sve uređaje), što vodi ka efikasnijoj komunikaciji jer je manji deo paketa zauzet adresama, ili se isključivo koriste proširene adrese (ako 16-bitne kratke adrese nisu dovoljne).

Standard 802.15.4, osim *unicast* komunikacije (jedan izvor, jedno odredište), podržava *broadcast* i multikast (*multicast*) komunikaciju. U prvom slučaju, poruka je namenjena svim čvorovima u WPAN mreži, dok je u drugom namenjena podskupu čvorova.

Broadcast adresa je jedinstvena i oblika je „sve nule“ (važi kako za kratke, tako i za proširene adrese). Dakle, ako čvor pošalje poruku na adresu „sve nule“, ta poruka biće preneta svim ostalim čvorovima u mreži. Takođe, *broadcast* adresiranje koristi uređaj koji se pridružuje mreži, dok još uvek nije deo mreže, pa time ni nema svoju kratku adresu. Nakon pridruživanja mreži, uređaj u komunikaciji koristi kratku adresu.

Multikast adrese su specifične adrese dodeljene grupi uređaja koji dele neko zajedničko interesovanje ili funkcionalnost. Selektivnije su od *broadcast* adrese i koriste u slučajevima kada samo određeni podskup uređaja treba da primi određenu poruku.

7.1.7 Formiranje mreže

Glavnu ulogu u formiranju (uspostavljanju) WPAN mreže ima PAN koordinator, koji bira frekventni kanal na kome će mreža raditi i reguliše pridruživanje mrežnih uređaja mreži. Izbor frekventnog kanala je prvi korak u formiranju mreže. PAN koordinator skenira raspoložive kanale u odgovarajućem frekventnom opsegu, pronalazi kanale koji su već zauzeti od strane postojećih 802.15.4 WPAN mreža u okolini (otkriva ih po bikonima koje emituju PAN koordinatori tih mreža) i te kanale eliminiše iz selekcije. U preostalim kanalima, PAN koordinator meri RF energiju i posebno energiju u pikovima, što ukazuje na RF transmisije na tim kanalima. Konačno bira frekventni kanal sa najmanjim nivoom RF energije.

U drugom koraku, potrebno je da se mrežni uređaji pridruže mreži. Generalno, procedura pridruživanja, iz perspektive mrežnog uređaja teče na sledeći način: (1) uređaj traga za WPAN mrežama tako što skenira frekventne kanale; (2) bira WPAN mrežu kojoj će se pridružiti; (3) inicira proceduru pridruživanja (asocijacije) sa PAN koordinatorom (ili sa lokalnim koordinatorom, koji se već pridružio mreži).

Tokom procedure pridruživanja, mrežnim uređajima stoje na raspolaganju dva načina skeniranja frekventnih kanala:

Pasivno skeniranje: primenljivo je u mrežama koje rade u režimu sa bikonima. U ovim mrežama, koordinatori periodično emituju bikone, tako da se do informacije o dostupnim WPAN mrežama može doći osluškivanjem frekventnih kanala i prijemom bikon poruka. Dakle, dovoljno je da uređaj, koji želi da se pridruži mreži, skenira frekventne kanale, odnosno osluškuje redom kanale i prima bikone koje se eventualno emituju na tim kanalima.

Aktivno skeniranje: primenjuje se u mrežama koje rade u režimu bez bikona i odnosi se na proces u kojem uređaj aktivno traži dostupne mreže. Uređaj emituje paket zahteva za skeniranje na kanalima koje želi istražiti. Koordinator koji primi ovaj zahtev, odgovara uređaju paketom koji sadrži informacije o mreži, kao što je identifikator (adresa) WPAN mreže, podržane mogućnosti i sl. Na ovaj način, uređaj može da prikupi informacije o više mreža koje su aktivne u njegovoj okolini i da za pridruživanje izabere jednu od njih.

7.2 ZigBee

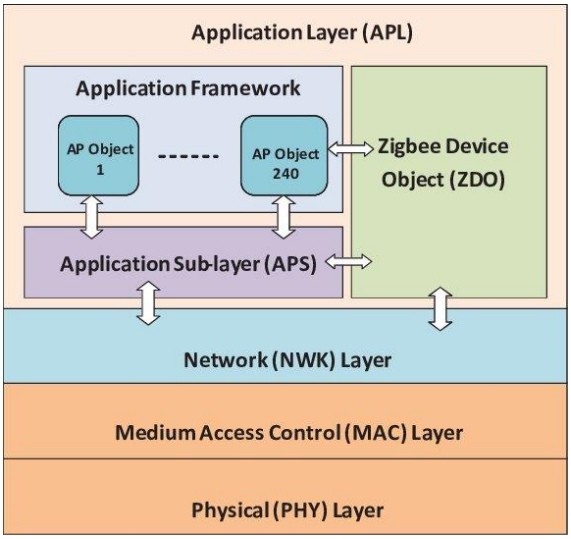
Standard 802.15.4 obuhvata samo dva najniža nivoa mrežne arhitekture: fizički i nivo veze i kao takav predstavlja podlogu za realizaciju WPAN mreža različitog nivoa složenosti i funkcionalnih specifičnosti. Ipak, mnogi izazovi koji prate formiranje WPAN mreža, upravljanje mrežom, rutiranje podataka u mrežama složenije topologije, bezbednost podataka, kao i interfejsi prema korisničkim aplikacijama, nisu obuhvaćeni standardom 802.15.4. Jedan pristup je da korisnik ili projektant samostalno implementira sve dodatne funkcionalnosti potrebne konkretnoj aplikaciji, oslanjajući se na podršku 802.15.4 za osnovne nivoe komunikacije. Međutim, ovakav pristup, iako moguć, nosi ozbiljne nedostatke: (1) projektant mora da uloži značajne napore i vreme u rešavanje mrežnih problema umesto da se fokusira na aplikacioni razvoj; (2) mrežni softver je po pravilu kompleksan, sa mnogo detalja i zahteva intenzivno testiranje, često sa teškoćama u otkrivanju grešaka; (3) Konačno rešenje

nije interoperabilno, što znači da nije moguće direktno povezati uređaje drugih proizvođača u formiranu mrežu.

Alternativni pristup je osloniti se na podršku kompletnog protokol-steka koji ne obuhvata samo niže slojeve, već se njegova podrška proteže sve do aplikacionog sloja, skrivajući tako mnoge detalje i specifičnosti komunikacije u složenim mrežnim topologijama. Sa ovakvom podrškom na raspolaganju, projektant može da se usredsredi na razvoj svoje aplikacije i razmišljanje u okvirima aplikacione logike. Na primer, umesto da se bavi detaljima protokola, projektant može da definiše funkcionalnost poput "pritisak na taster pored ulaznih vrata uključuje sve sijalice u hodniku i dnevnoj sobi". Protokol-stek će prevesti komande namenjene konkretnim uređajima u odgovarajuće poruke koje će sprovesti kroz mrežu do njihovih krajnjih odredišta. ZigBee je upravo primer jednog ovakvog protokol-steka.

7.2.1 Protokol-stek

Struktura ZigBee protokol-steka je prikazan na Sl. 14. Dva najniža nivoa (fizički i sloj veze) su pokrivena standardom 802.15.4, dok ZigBee standard uvodi dva viša nivoa, mrežni i aplikacioni sloj:



Sl. 14 ZigBee protokol-stek. Slojevi PHY i MAC su obuhvaćeni standardom 802.15.4; slojevi NWK i APL su nadogradnja koja dolazi kroz ZigBee

Aplikacioni sloj (APL - *Application Layer*) je najviši sloj ZigBee protokol steka i odgovoran je za interakciju aplikacija sa mrežom. Sastoji se od dva podsloja, APS i ZDO:

APS (*Application Support sub-layer*): pruža usluge kao što su fragmentacija i ponovno sastavljanje poruka, potvrđivanje prijema; definiše tipove podataka i formate poruka za različite klase usluga (npr., potvrđene, nepotvrđene, sa garancijom dostavljanja); omogućava upravljanje ključevima i šifriranje za zaštitu podataka.

ZDO (*Zigbee Device Objects*) Pruža standardne komande za uobičajene operacije kao što su: pronalaženje uređaja određenog tipa, povezivanje, priključivanje/napuštanje mreže, upravljanje mrežom, ažuriranje softvera i resetovanje uređaja. Takođe, definiše profile uređaja koji određuju specifične funkcionalnosti i ponašanje za različite tipove uređaja (npr., senzori, aktuatori, kontroleri), što omogućava interoperabilnost između različitih proizvođača.

Dodatne funkcionalnosti: grupisanje uređaja (omogućava upravljanje grupama uređaja kao jedinstvenom entitetom), scenariji (definiše unapred programirane sekvence akcija za automatizaciju kompleksnih zadataka), upravljanje energijom (optimizuje potrošnju baterije uređaja korišćenjem različitih tehnika, kao npr., režimi smanjene potrošnje).

Mrežni sloj (NWK - *Network Layer*). NWK je ključni sloj ZigBee protokol steka koji se bavi upravljanjem mrežom i rutiranjem podataka. Njegove funkcije uključuju:

Formiranje mreže: omogućava uređajima da se pridruže, napuste ili formiraju nove mreže; podržava različite topologije mreže, kao što su zvezda, stablo i rešetka; obezbeđuje koordinaciju i sinhronizaciju uređaja u mreži.

Rutiranje podataka: pronalazi optimalne putanje za rutiranje podataka između izvora i odredišta; obavlja dinamičko rutiranje, prilagođavajući se promenama u topologiji mreže; pruža podršku za prioritetni i pouzdan prenos podataka).

Adresiranje: dodeljuje jedinstvene identifikatore (ID) svim uređajima u mreži; omogućava efikasno adresiranje i rutiranje podataka prema određenim uređajima; podržava različite tipove adresa za *unicast*, *multicast* i *broadcast* komunikaciju.

Sigurnost: pruža mehanizme za autentifikaciju i šifrovanje podataka; osigurava zaštitu od neovlaštenog pristupa i napada na mrežu; podržava različite algoritme šifriranja i autentifikacije za različite nivoe sigurnosti.

U nastavku ove sekcije upoznaćemo se sa osnovnim funkcijama ZigBee mrežnog sloja. Aplikativno sloj je, generalno, bitna komponenta u WPAN mrežama i njegova svrha i odgovarajući principi biće obrazloženi u većoj meri u okviru poglavlja koje je posvećeno standardu Bluetooth.

7.2.2 Topologije i rutiranje

Standard 802.15.4 pruža osnovnu podršku za formiranje WPAN mreža zvezdaste i P2P topologije. ZigBee dalje usavršava i nadograđuje ove mehanizme. Standard 802.15.4 razlikuje tri tipa uređaja, prema njihovoj ulozi u mreži: PAN koordinator, lokalni koordinator i krajnji uređaj. ZigBee zadržava ovu podelu, s tim što konkretizuje ulogu lokalnih koordinatora, koji u ZigBee mreži dobijaju ulogu rutera i ključni su za formiranje mreža složenijih topologija. Dakle, u ZigBee mreži postoje sledeći tipovi uređaja:

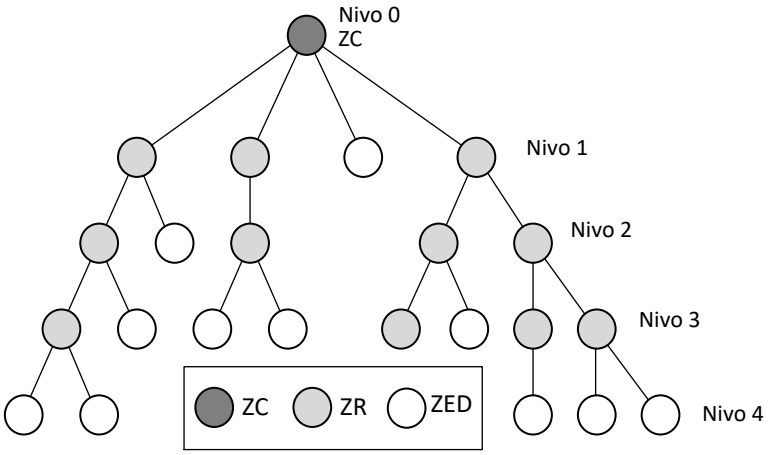
- ZigBee koordinator (ZC – *ZigBee Coordinator*),
- ZigBee ruter (ZR – *ZigBee Router*) i
- ZigBee krajnji uređaj (ZED – *ZigBee End Device*).

Prva dva moraju biti FFD, a treći može biti FFD ili RFD uređaj.

802.15.4 omogućava formiranje WPAN mreža topologije zvezda i P2P. ZigBee, pored zvezdaste topologije, pruža podršku za dve konkretne P2P topologije: rešetka (*mesh*) i stablo (*tree*). Mreže zvezdaste topologije su jednostavne, ali nisu skalabilne u pogledu broja čvorova u mreži i oblasti pokrivanja. *Mesh* i *tree* topologije su pogodne za veće mreže, čiji su čvorovi raspoređeni u većoj oblasti. *Tree* topologija je pogodna u primenama gde su izvori informacije (npr. senzori) jasno odvojeni od odredišta informacije (centralni uređaj ili kontroler). Glavna funkcija WPAN mreže u ovim primenama je prikupljanje podataka iz više izvora na jedno mesto. U takvim scenarijima, gde ne postoji potreba za komunikacijom između samih uređaja, mreža *tree* topologija je prirodan izbor, jer obezbeđuje jedinstvenu putanju od svakog uređaja do centralne tačke, odnosno rutiranje podataka je jednostavno. S druge strane, *tree* topologija može biti nepouzdana jer otkaz jednog linka prekida vezu sa svim uređajima koji se preko tog linka razgranavaju dublje u mrežu. Kod mreža *mesh* topologije, između svakog para uređaja može postojati više alternativnih putanja, što zahteva upotrebu složenijih protokola za rutiranje, ali je sama mreža pouzdanija i otpornija na otkaze pojedinih uređaja. Takođe, *mesh* mreža je efikasnije u obezbeđivanju komunikacije između proizvoljnog para uređaja u mreži.

7.2.2.1 Stablo

Standard ZigBee definiše topologiju stablo (*tree*) kao specijalan slučaj P2P topologije iz standarda 802.15.4 (Sl. 5). U ovoj topologiji, PAN koordinator, tj. ZC, igra ulogu korena stabla i njegov nivo je 0. Ostali čvorovi mreže su tipa ZR ili ZED i raspoređeni su u nivoe, počev od nivoa 1 (direktna veza sa ZC), zatim nivo 2 (direktna veza sa čvorovima nivoa 1), itd. Za razgranavanje stabla zaduženi su upravo ruteri (ZR). ZR sa bilo kog nivoa prosleđuje podatke između svojih potomaka sa prvog višeg nivoa i roditeljskog čvora na prvom nižem nivou. Krajnji uređaji (ZED) su listovi stabla, koji nemaju naslednike i mogu samo da komuniciraju sa svojim roditeljima, koji su tipa ZC ili ZR.



Sl. 15 ZigBee mreža topologije stabla

Formiranje topologije

Broj uređaja koji se mogu pridružiti ZigBee mreži nije striktno ograničen, ali ipak postoje određena ograničena, koja se moraju ispoštovati. Ova ograničenja su definisana konfiguracionim parametrima:

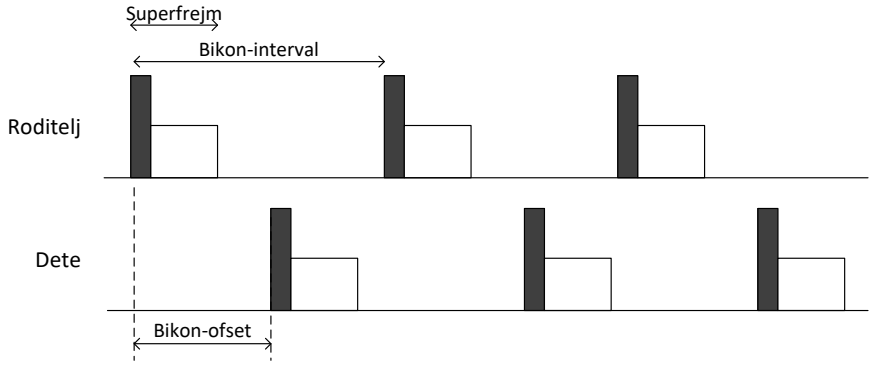
- C_m – maksimalno dozvoljeni broj dece koju uređaj tipa ZC/ZR može imati,
- R_m – maksimalni broj uređaja tipa ZR u skupu dece bilo kog čvora tipa ZC/ZR i
- L_m – maksimalni broj nivoa u mreži.

Dakle, uređaji se mogu pridruživati mreži sve dok se dostigne neko od prethodnih ograničenje. Uređaj koji traži pridruživanje roditeljskom čvoru kod koga je dostignut neki od maksimuma biće odbijen.

U ZigBee mreži topologije stabla, uređaji tipa ZC i ZR rade u režimu sa bikonima. Proces formiranja topologije startuje ZC, periodičnim emitovanjem bikon poruka. Ove poruke primaju uređaji koji su u radio dometu ZC-a i ako žele, mogu poslati zahtev ZC-u za pridruživanje mreži. Ako ZC dozvoli uređaju priključenje na mrežu, pridruženi uređaj, ako je reč o ruteru (ZR), počinje periodično da emituje svoje bikone, što će omogućiti i drugim uređajima, koji čuju ove emisije, da se preko rutera pridruže mreži. Ova procedura se rakurzivno nastavlja sve dok ima zainteresovanih uređaja.

Tokom normalnog rada mreže, svaki čvor mora da prati (prima) bikone svog roditeljskog čvora. Takođe, svaki čvor koji igra ulogu rutera (ZR), mora da emituje svoje bikone, namenjene njegovoj deci. To praktično znači da je ZR u dvostrukoj ulozi: tokom superfrejma svog roditelja komunicira sa roditeljom; tokom svog superfrejma, komunicira sa svojom decom. Suštinska postavka je da ZR mora da emituje svoje bikone sa pre-definisanim ofsetom (kašnjenjem) u odnosu na bikone svog roditelja. Ovaj ofset mora biti duži od trajanja superfrejma i kraći od bikon intervala roditeljskog čvora (Sl. 16). Time se obezbeđuje da se emitovanje bikona i superfrejm konkretnog ZR padaju u neaktivni deo bikon intervala roditeljskog čvora, odnosno, da ne postoji preklapanje između aktivnih delova bikon intervala „roditelja“ i „dece“. Ovaj koncept se dalje proširuje tako da obuhvati dva ili više ZR-a,

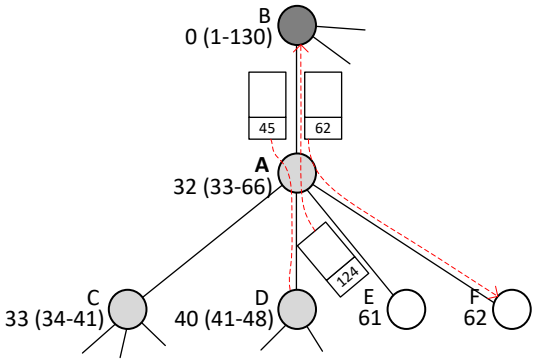
odnosno da se ofseti biraju na takav način da se izbegne preklapanje superfrejmova susednih ZR-ova (tj. onih koji nisu u relaciji „roditelj-dete“, ali su u radio dometu jedan drugom). Sve to podrazumeva da ZR mora da vodi evidenciju o vremenima emitovanja bikona svih svojih suseda (tj. svih čvorova čije emitovanje čuje), kako bi za svoj superfrejm mogao da izabere slobodan vremenski interval. Ova vrsta vremenskog usaglašavanja je, naravno, moguća samo ukoliko je trajanje neaktivnog perioda bikon-intervala značajno duže od trajanja superfrejma, što je najčešće i slučaj. Jasno je da se sve ovo odnosi samo na uređaje koji igraju ulogu rutera u mrežu (ZR), ali ne i za ZED uređaje koji nemaju decu, pa time ne moraju da emituju bikone i imaju svoje superfrejmove. ZED uređaj samo razmenjuje podatke sa svojim roditeljskim čvorom.



Sl. 16 Vremensko usaglašavanje roditelja i dece. Roditelj je uređaj tipa ZC ili ZR; dete je uređaj tipa ZR

Dodela adresa i rutiranje

Tokom procedure pridruživanja mreži, uređaj, između ostalog, od svog roditeljskog čvora dobija 16-bitnu kratku adresu, koju će koristiti kao svoj identifikator za sve vreme dok je član mreže. U ZigBee mreži topologije stabla, dodela adresa nije nasumična već se adresa koja se dodeljuje novom uređaju bira na način koji će kasnije pojednostaviti proces rutiranja. U tom cilju svakom uređaju tipa ZR je na raspolaganju opseg kratkih adresa za dodelu njegovoj deci.



Sl. 17 Dodela adresa i rutiranje u ZigBee mreži topologije stabla.

Opšti princip je ilustrovan na Sl. 17. Pratimo uređaj A, koji je tipa ZR; njegov roditeljski čvor je B, a njegova deca su C, D, E i F. Čvorovi C i D su takođe tipa ZR, dok su E i F tipa ZED. Kao što vidimo, svakom uređaju je dodeljena jedinstvena adresa. Čvor B je tipa ZC i njegova adresa je 0. Adresa čvora A je 32 itd. Uz to, svakom uređaju tipa ZR dodeljen je opseg adresa iz kojeg on uzima adrese koje dodeljuje svojoj deci kada se pridružuju mreži. Svaki uređaj zna adrese svojih suseda i zna opsege adresa koji su dodeljeni susedima tipa ZR. Pretpostavimo da je čvor A primio od čvora B paket sa odredišnom adresom 62. A prepoznaje da je to adresa njegovog deteta i zbog toga paket šalje direktno čvoru F. Pretpostavimo sada da je odredišna adresa primljenog paketa 45. Čvor A, prvo zaključuje da ni jedan njegov sused nema ovu adresu. Zbog toga, A proverava da li odredišna adresa pripada opsegu adresa nekog njegovog deteta tipa ZR. Pošto je 45 u opsegu $(41,48)$, čvor A šalje paket čvoru D, a

čvor D će, po sličnom postupku, proslediti paket nekom svom detetu. Treći slučaj je kada čvor A primi paket od svog deteta i pri tom odredišna adresa paketa nije adresa ni jednog susednog čvora niti pripada opsegu adresa ZR-dece (na Sl. 17 to je paket sa odredišnom adresom 124 koji šalje čvor E). U tom slučaju, čvor A šalje paket svom roditeljskom čvoru.

Razmotrimo sada, sa više detalja postupak dodele adresa. Kao što je prethodno rečeno, ograničenja u formiranju mreže određena su parametrima C_m, R_m i L_m. Ovi parametri su poznati svakom čvoru koji se pridružio mreži. Takođe, svaki čvor u mreži ima dubinu, d, koja je određena nivoom na kome je čvor. Dubina ZC-a je $d = 0$, dubina njegove dece je $d = 1$ itd.

Uređaju ZC/ZR je dopušteno da ima najviše C_m dece (koja mogu biti ZR ili ZED), od kojih najviše R_m u ulozi ZR. Svakom ZC/ZR je na raspolaganju opseg kratkih adresa za dodelu njegovoj deci. Ovaj opseg adresa se deli na $R_m + 1$ blokova. Poslednji blok je rezervisan za decu tipa ZED, dok se prvih R_m blokova dodeljuje deci ruterima (ZR). Preciznije rečeno, svako ZED-dete dobija jednu adresu iz poslednjeg bloka, dok svako ZR-dete dobija ne samo adresu za sebe već i jedan ceo blok adresa za raspodelu svojoj deci. Veličina svakog bloka je $C_{skip}(d)$, gde je d dubina ZC/ZR uređaja. Vrednost $C_{skip}(d)$ zavisi od dubine uređaja u mreži i fiksnih parametara C_m, R_m i L_m i izračunava se na sledeći način:

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1) & \text{if } R_m = 1; \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \cdot R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m} & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

Dodela adresa počinje od ZC koji sebi dodeljuje adresu 0 i dubinu $d = 0$. Za sve ostale uređaje važi sledeće: Nakon što se pridruži mreži, uređaj dobija kratku adresu i informaciju o dubini od svog roditeljskog čvora. Dubina novo-pridruženog čvora je za 1 veća od dubine njegovog roditelja. Neka je novo-pridruženi čvor tipa ZR i neka je njegova dubina d. Odmah nakon pridruživanja mreži ovaj čvor izračunava vrednost $C_{skip}(d)$ prema prethodnoj formuli. Ako kao rezultat dobije $C_{skip}(d) = 0$ to znači da su iscrpljene mogućnosti za dodavanje novih čvorova (zato što je dostignuto ograničenje koje se odnosi na maksimalni broj nivoa u mreži - L_m). U tom slučaju, uređaj, iako ima mogućnosti rutera, prelazi u ulogu ZED, što znači da neće prihvatati zahteve za pridruživanje (odnosno, neće imati decu). U suprotnom, ako važi $C_{skip}(d) > 0$, uređaj preuzima ulogu rutera i ima obavezu da prihvata zahteve od uređaja koji se pridružuju i da svakom svom (budućem) detetu dodeli kratku adresu, sve dok ne iscrpi rezervoar adresa koji za ovu namenu ima na raspolaganju (tj. dok broj ZED-dece i broj ZR-rutera ne dostigne vrednost C_m, odnosno R_m).

Dakle, posmatramo ZR sa kratkom adresom A na dubini d u mreži. Ovaj ruter prima zahteve za pridruživanje i svakom svom novom detetu dodeljuje adresu, na sledeći način. Prvom ZR-detetu dodeljuje adresu koja je za 1 veća od njegove adrese, tj. $A_{child} = A + 1$. Svakom sledećem, u opštem slučaju svom n-tom detetu-ruteru. dodeljuje adresu koju izračunava po sledećoj formuli:

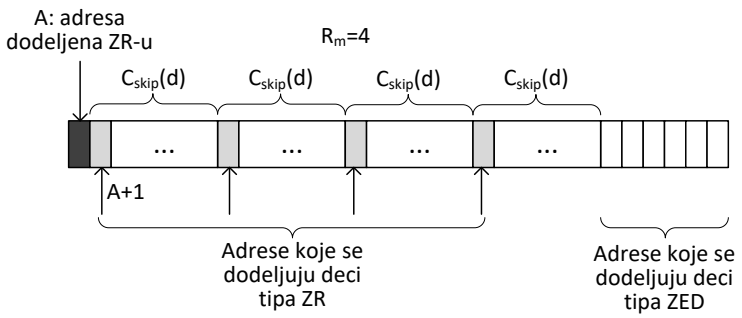
$$A_{child} = A + (n - 1) \times C_{skip}(d) + 1$$

Odnosno, adresa svakog sledećeg pridruženog rutera je za $C_{skip}(d)$ veća od prethodne. Ako je novo-pridruženo dete krajnji uređaj, ono dobija adresu iz poslednjeg bloka, po sledećoj formuli (n je sada redni broj deteta krajnjeg uređaja):

$$A_{child} = A + R_m \times C_{skip}(d) + n$$

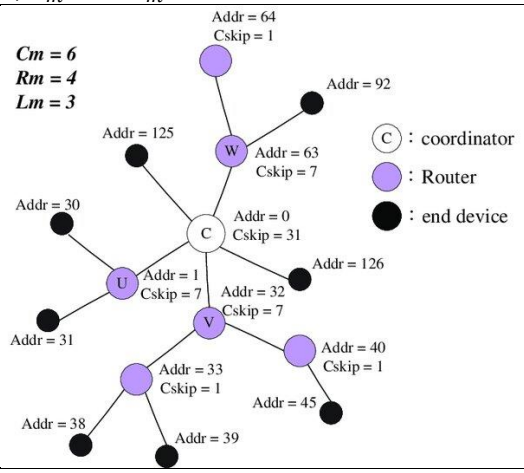
U suštini, svaki uređaj tipa ZR pored toga što, nakon pridruživanja mreži, od svog roditelja dobija kratku adresu, implicitno dobija i opseg (blok) adresa iz kojeg će birati adrese za svoju decu, zavisno od njihove uloge ZR/ZED, prema prethodnim pravilima. Na Sl. 18 je ilustrovan prethodni postupak. Prvu adresu iz bloka ZR zadržava za sebe; svojoj deci-ruterima dodeljuje adrese iz bloka sa korakom

$C_{skip}(d)$, dok deci-krajnjim uređajima dodeljuje sukcesivne adrese s kraja bloka. Razmak u dodeli adresa ZR-deci zapravo znači da će svako ZR-dete dobiti blok adresa dužine $C_{skip}(d)$ koje će raspodeljivati svojoj deci po istim pravilima.



Sl. 18 Dodela adresa. Pridruživanjem mreži, ZR dobija blok adresa. Prvu adresu u bloku zadržava za sebe; ZR-deci dodeljuje adrese sa korakom $C_{skip}(d)$; ZED-deci dodeljuje adrese s kraja bloka

Na slici ispod je prikazan primer dodele kratkih adresa u ZigBee mreži topologije stabla sa parametrima $C_m = 6$, $R_m = 4$ i $L_m = 3$.



An example of the ZigBee address assignment is shown in Fig. 1. The node c is the ZigBee coordinator and the nodes which have lighter color and darker colors are represented as router nodes and end devices respectively. The $Cskip$ of the ZigBee coordinator can be determined as 31 from Eq. (1) by setting $d = 0$, $Cm = 6$, $Rm = 4$, and $Lm = 3$. Then the 1st, 2nd, and 3rd child routers of the coordinator will be assigned to addresses $0+(1-1)\times 31+1 = 1$, $0+(2-1)\times 31+1 = 32$, and $0+(3-1)\times 31+1 = 63$, respectively and they are denoted as u, v, and w in Fig. 1. There are two end devices associated with the coordinator and their address are $0+4\times 31+1 = 125$ and $0 + 4 \times 31 + 2 = 126$, respectively.

Rutiranje

U kakvoj su vezi način dodele kratkih adresa i rutiranje? Nakon što ZR uređaj primi paket, on proverava odredišnu adresu paketa. Ako paket nije njemu namenjen, ZR mora da odluči kom susednom čvoru da ga prosledi. ZR prvo proverava da li je paket upućen nekom od susednih čvorova u stablu (susedi su roditeljski čvor, plus sva deca). Ako jeste, ZR prosleđuje paket odgovarajućem susedu i time je rutiranje okončano jer je paket stigao na svoje odredište. U suprotnom, ako krajnje odredište pakete nije ni jedan od ZR-ovih suseda, ZR treba da odluči kom susedu tipa ZR da pošalje paket radi daljeg prosleđivanja. Ovde je poenta u tome da ZR zna opseg adresa koji pokriva svako njegovo ZR-dete. Na primer, ako je adresa ZR-a A, tada njegovo prvo ZR-dete ima adresu $A + 1$ i pokriva opseg adresa od $A + 1$ do $A + C_{skip}(d)$ (videti sliku Sl. 18). Dakle, ako je paket upućen na adresu D i pri tom važi:

$$A < D \leq A + C_{skip}(d)$$

tada paket treba poslati prvom ZR-detetu. U opštem slučaju, potrebno je odrediti kome od ukupno R_m blokova adresa pripada adresa D i paket poslati odgovarajućem ZR-detetu. Ili, što je isto, paket treba poslati ZR-detetu sa adresom N:

$$N = A + 1 + \left\lfloor \frac{D - (A + 1)}{Cskip(d)} \right\rfloor \times Cskip(d).$$

U suprotnom, ako odredišna adresa ne pripada ni jednom od R_m opsega adresa, odnosno nije namenjen ni jednom nasledniku ZR-a, tada je jedina opcija za nastavak rutiranja prosleđivanje paketa roditeljskom čvoru.

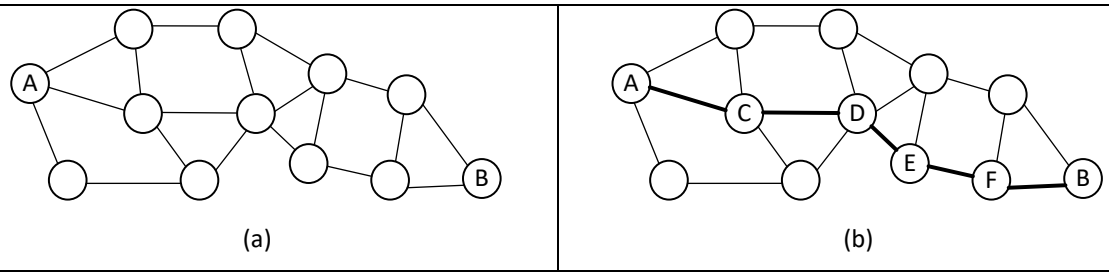
7.2.2.2 Rešetka

Za razliku od topologije stabla, gde svaki čvor ima tačno jedan roditeljski čvor, u mreži topologije rešetka (*mesh*) uređaji mogu slobodno da se povezuju. Ovo omogućava da između bilo koja dva uređaja u mreži postoji više od jedne putanje, što predstavlja glavnu prednost rešetka u odnosu na stablo (gde postoji samo jedna). U slučaju otkaza nekog rutera u rešetki, podaci se mogu rutirati alternativnim putanjama, čime se povećava otpornost i pouzdanost mreže. Ova dinamičnost i sposobnost automatskog prilagođavanja čine *mesh* topologiju efikasnom opcijom u scenarijima gde je važna stabilnost i neprekidnost komunikacije. Međutim, cena koja se plaća je složeniji postupak rutiranja. Još jedna razlika u načinu rada između ZigBee mreže *tree* i *mesh* topologije je u tome što *mesh* mreža podržava isključivo režim rada bez bikona.

Rutiranje u ZigBee mreži *mesh* topologije je usklađeno sa algoritmom AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*). Ovaj algoritam je razvijen za rutiranje u mobilnim *ad-hoc* mrežama, ali se koristi i u drugim kontekstima, pa i kod ZigBee. Ključna osobina ovog algoritma je sadržana u odrednici „*on-demand*“ (na zahtev), što ukazuje na to da se putanja između izvornog i odredišnog čvora uspostavlja po potrebi, na zahtev izvornog čvora. Drugim rečima, u mreži se ne čuvaju informacije o svim mogućim rutama, odnosno rutama između bilo koja dva čvora, već samo o rutama preko kojih se aktivno prenose podaci. Naime, kada uređaj A želi da pošalje poruku uređaju B, a pri tom ne zna kojim putem bi ta poruka mogla da stigne do B, A inicira proceduru otkrivanja putanje (*path discovery*). Rezultat ove procedure je uspostavljanje putanje u mreži između uređaja A i B, preko koje se nakon toga mogu prenositi poruke između ova dva uređaja, u oba smera. Procedura otkrivanja putanje vodi računa o optimalnosti i od više alternativnih mogućnosti bira onu koja je najbolja po izabranom kriterijumu, kao npr. dužina putanje, odnosno broj preskoka (otuda *distance vector*). Uspostavljena putanja ne traje beskonačno dugo, već se poništava ukoliko nije korišćena neki duži vremenski period. Takođe, putanja može biti prekinuta, ako otkaže neki čvor u mreži, što ponovo inicira proceduru otkrivanja putanje.

Rutiranje u mreži *mesh* topologije

Problem koji rešava algoritam AODV je ilustrovan na Sl. 19. Na ovoj slici, dva čvora (uređaja) su povezana linijom ako su jedan drugom u radio dometu, odnosno ukoliko mogu neposredno da komuniciraju. Čvor A želi da pošalje paket podataka čvoru B, ali ne zna kome od svojih suseda da prosledi paket. Zato A inicira proceduru pronalaženja putanje do čvora B. Ishod ove procedure, u kojoj učestvuju svi ili skoro svi čvorovi u mreži, je putanja prikazana podebljanim linijama na Sl. 19(b). Sada A zna da kad želi da pošalje paket čvoru B, taj paket treba da prosledi čvoru C; čvor C zna da pakete upućene čvoru B treba da prosleđuje čvoru D itd.



Sl. 19 Rutiranje u mreži *mesh* topologije

Informacije o putanjama se čuvaju u tabelama rutiranja čvorova. Svaki čvor ima svoju tabelu rutiranja, čija svaka stavka čuva podatke o jednoj od aktivnih putanja koje prolaze kroz taj čvor. Stavka u tabeli rutiranja sadrži sledeće podatke:

- *Adresa odredišta*: Kao i kod rutiranja na Internetu, u tabeli rutiranja se na čuva kompletna putanja (kompletan spisak čvorova na putanju), već samo adresa odredišnog (krajnjeg) čvora putanje i
- *Adresa sledećeg skoka*, odnosno adresa susednog čvora kome treba proslediti paket upućen na adresu odredišta. (Kada susedni čvor sa adresom sledećeg skoka primi prosleđen paket, on će ga proslediti dalje shodno adresi sledećeg skoka iz svoje tabele rutiranja.)
- *Redni broj odredišta*: *seq* broj odredišnog čvora. Ovaj broj ukazuje na aktuelnost informacije o putanju (biće jasnije kasnije).
- *Distanca*: broj preskoka do odredišta. Koristi se kao mera dužine putanje. Od dve putanje do istog odredišta bolja je ona sa manjom distancom.
- *Rok trajanja*: vreme kada ističe trajanje putanje. Nakon isteka ovog vremena, putanja se više ne smatra aktivnom i mora se obnoviti ukoliko je još uvek potrebna. Uvek kada se paket prosledi duž putanje, rok trajanja se vraća na početak.
- *Lista prethodnika*: spisak adresa susednih čvorova koji koriste ovu putanju za prenos paketa do istog odredišta. Ukoliko čvor primeti da je putanja u prekidu, o tome će obavestiti susede iz ove liste.
- *Indikator validnosti*: bit koji ukazuje da li je ova stavka validna.

Takođe, algoritam AODV predviđa tri tipa poruka koje se koriste za uspostavljanje i upravljanje putanjama:

- RREQ (*route request* – zahtev za putanjom): ovu poruku generiše izvorni čvor kada želi da inicira proceduru otkrivanje putanje do određenog odredišnog čvora. Poruka RREQ se prostire kroz mrežu „plavljenjem“ i konačno stiže do odredišnog čvora ili do čvora koji poseduje ažurnu informaciju o putanji do odredišta.
- RREP (*route reply* – odgovor na RREQ): ovu poruku generiše odredišni čvor, ili među-čvor koji ima informaciju o putanji do odredišta, nakon prijema poruke RREQ. Poruka RREP se vraća izvornom čvoru istom putanjom kojom je do čvora (odredišta ili među-čvora) stigla poruka RREQ, ali unazad. Čvor koji primi poruku RREP, na osnovu njenog sadržaja, ažurira odgovarajuću stavku u svojoj tabeli rutiranja koja se odnosi na putanju ka odredišnom čvoru.
- RERR (*route error* – greška na putanji): poruka RERR se koristi kao obaveštenje o prekidu aktivne putanje, nakon otkaza nekog linka ili čvora.

Svaki čvor poseduje dve promenljive, tačnije dva brojača koji se koriste kao indikatori aktuelnosti informacija koje čvor šalje u mrežu porukama RREQ i RREP:

- *Redni broj* (*seq* – *sequence number*): Čvor inkrementira svoj *seq* broj uvek kada primi RREQ poruku u kojoj je naveden kao odredište. Kao odgovor na RREQ, čvor šalje RREP poruku, koja, između ostalog, sadrži ažuriranu vrednost *seq* broja. Svaki čvor na povratnoj putanji ka izvornom čvoru, smešta *seq* broj iz RREP poruke u stavku tabele rutiranja za dati odredišni čvor.
- *Broadcast ID*: Čvor inkrementira ovaj brojač pre nego što generiše i pošalje poruku RREQ. Ažurirana vrednost brojača *Broadcast ID* je deo poruke RREQ.

Uz sve prethodno, svaki čvor održava još jednu tabelu, tzv. *tabelu za otkrivanje putanje*. Za razliku od tabele rutiranja, svaka stavka u ovoj tabeli je privremena i čuva se samo tokom procedure za otkrivanje putanje u kojoj učestvuje dati čvor.

Dakle, kako tačno radi algoritam AODV:

RREQ

Pretpostavićemo da čvor A (izvorni čvor) želi da pošalje paket podataka čvoru B (odredišni čvor). Čvor A traži u svojoj tabeli rutiranja stavku za čvor B. Ako takva stavka postoji i pri tom je validna, čvor A prosleđuje paket susednom čvoru čija je adresa navedena kao sledeći skok u toj stavci. U suprotnom, čvor A inicira proceduru pronalaženja putanje do čvora B. Zapravo, čvor A kreira i emituje poruku RREQ svim svojim susedima. RREQ poruka sadrži: adrese izvornog i odredišnog čvora (A i B), redni broj odredišnog čvora (seq, uzeto iz stavke tabele rutiranja za čvor B), redni broj izvornog čvora (A) i vrednost brojača *Broadcast_ID* (koji je upravo inkrementiran). Uočimo da par <izvorna adresa, *Broadcast_ID*> predstavlja jedinstveni identifikator RREQ poruke.

Poruka RREQ se prenosi u *broadcast* režimu, što znači da će je primiti svi susedi čvora A, odnosno svi oni čvorovi koji su u radio dometu čvora A. Čvor koji primi poruku RREQ, recimo da je to čvor C, ima tri opcije kako da postupi:

Prva opcija je da ignoriše poruku RREQ. To se dešava ukoliko je čvor C već primio istu RREQ poruku preko nekog drugog suseda. Ovo se lako prepoznaje po identifikatoru poruke RREQ - <izvorna adresa, *Broadcast_ID*>.

Druga opcija je da čvor C reemituje primljenu RREQ poruku. To se dešava u slučaju kada C ništa ne zna o putanju do odredišta B, ili kada u tabeli rutiranja ima stavku za B, ali je redni broj odredišta B (*seq*) u tabeli rutiranja manji od rednog broja odredišta iz RREQ poruke. Sadržaj reemitovane RREQ poruke je isti kao primljene, s tim što je sadržaj polja za broj preskoka u reemitovanoj poruci povećan za jedan. Uz to, ako čvor C odluči da reemituje RREQ poruku, on pravi zapis u svojoj privremenoj tabeli za otkrivanje putanje. Taj zapis sadrži podatak o tome od kog suseda je C primio RREQ poruku, zajedno sa sadržajem primljene RREQ poruke. (Ovaj zapis se kasnije koristi u postupku sprovođenja poruke odgovora (RREP) nazad do izvornog čvora A.) Takođe, zapis se koristi za filtriranje eventualnih budućih RREQ poruka (prva opcija). Reemitovanje je takođe *broadcast* tipa i dovodi do postepenog plavljenja mreže RREQ porukom. Eliminacija kopija pomaže u sprečavanju nekontrolisanog plavljenja.

Treći način kako čvor C može reagovati na prijem RREQ poruke je da, umesto reemitovanja, odgovori porukom RREP susedu od kojeg je primio RREQ poruku. To se dešava u dva slučaja: Prva mogućnost je ta da je čvor C odredište poruke RREQ. U tom slučaju, C kopira sadržaj primljene RREQ poruku u RREP poruku, s tim što u polje za seq smešta svoj seq broj (koji je upravo inkrementirao) i brojač preskoka inicijalizuje na vrednost 1. Poruku RREP može da kreira i pošalje nazad i među-čvor (tj. čvor-ruter, koji nije odredište), ako u svojoj tabeli rutiranja pronađe stavku za dato odredište u kojoj je seq broj veći od onog iz RREQ poruke. Pri tom, ovaj čvor u RREP poruku kopira seq broj i broj preskoka do odredišta iz svoje tabele rutiranja.

Dakle, cilj prethodno opisane procedure je da poruka RREQ, reemitovanjem, stigne do čvora koji će odgovoriti na nju slanjem RREQ poruke. To može biti samo jedan ili više čvorova. Uz sve to, još jedan efekat distribucije poruke RREQ je uspostavljanje inverznih putanja do izvornog čvora, A. Naime, svaki čvor koji primi poruku RREQ, a u svojoj tabeli rutiranja nema stavku o putanji do čvora A, kreiraće stavku za A, gde će kao adresu sledećeg skoka upisati adresu suseda od kojeg je upravo primio poruku RREQ. Takođe, čvor može imati u tabeli rutiranja podatak o putanji do A, ali je seq broj u odgovarajućoj stavci manji od onog u RREQ poruci. U tom slučaju, čvor, prosto, ažurira stavku za A seq brojem i brojem preskoka iz poruke RREQ.

RREP

Propratimo sada šta se dešava sa porukom RREP, koju, kao što je prethodno rečeno, generiše odredište ili među-čvor koji zna putanju do odredišta. Poruka RREP je *unicast* tipa, tj. šalje se samo onom susedu od kojeg je prethodno stigla odgovarajuća RREQ poruka. Među-čvor koji primi RREP poruku šalje je svom susedu od kojeg je prethodno primio odgovarajuću RREQ poruku i tako dalje, unazad, sve do izvornog čvora. Prilikom propagacije RREP poruke, čvorovi ažuriraju svoje tabele rutiranja, čime se, postepeno, uspostavlja putanja od izvora do odredišta.

Kada čvor primi RREP poruku, postupa na sledeći način. Prvo, ako je potrebno, ažurira stavku u svojoj tabeli rutiranja koja se odnosi na odredišni čvor iz RREP poruke, što se dešava ako je putanja kojom stiže RREP porukom aktuelnija (ima veći seq broj odredišta) ili ima isti seq broj, ali je bolja (ima manji broj preskoka) od postojeće putanje. Zatim, čvor pregledom tabele za otkrivanje putanje, pronalazi adresu suseda od kojeg je primio odgovarajuću RREQ poruku i prosleđuje mu RREQ poruku sa inkrementiranim brojem preskoka u odnosu na onaj iz primljene RREQ poruke. Ako je seq broj u tabeli rutiranja veći od seq broja u RREP poruci, čvor ignoriše RREP poruku (ne prosleđuje je dalje). Čvor može primiti više RREP poruka, poslatih od više čvorova kao odgovor na istu RREQ poruku. Svaka sledeća RREP poruka koja nosi bolju putanju do odredišta (broj preskoka) izazvaće ažuriranje tabele rutiranja i biće prosleđena unazad ka izvornom čvoru; u suprotnom biće ignorisana.

Konačno RREQ poruka stiže do izvornog čvora, koji ažurira tabelu rutiranja. Nakon toga, izvorni čvor može da šalje poruke podataka odredišnom čvoru.

RERR

Poruka RERR je namenjena za slanje obaveštenja o prekidu prethodno uspostavljene putanja. Čvor koji detektuje prekid veze sa svojim susedom, poništava u svojoj tabeli rutiranja sve stavke u kojima je taj sused naveden kao sledeći skok. Za svaku poništenu stavku, čvor šalje RERR poruku susedima iz liste prethodnika u toj stavci kako bi ih obavestio da prekinuta putanja više ne važi. Ovo će kasnije izazvati iniciranje procedura otkrivanja novih putanja. Ispravnost linkova između čvorova se proverava razmenom „hello“ poruka između susednih čvorova. Naime, ako čvor neko duže vreme nije komunicirao sa nekim svojim susedom, poslaće mu poruku „hello“, na koju ovaj odgovara. U slučaju izostanka odgovora, čvor zaključuje da je link prema tom susedu u prekidu. Uz to, stavka u tabeli rutiranja može biti poništena ako nije korišćena neko duže vreme. I u tom slučaju, čvor šalje RERR obaveštenje.

7.3 Vodič za učenje

Što su to WPAN mreže i koje su njihove osnovne karakteristike?

Podela WPAN mreža prema brzini prenosa podataka.

IEEE 802.15.4

Protokol-stek, MAC i dva fizička sloja (Sl. 1).

Fizički sloj

Brzine prenosa podataka i domet u bandovima $868/915\ MHz$ i $2.4\ GHz$

Frekventni kanali (koliko kanala u svakom bandu i frekventni razmak između kanala)

Modulacija. Potrebno je da znate osnovni princip rada O-QPSK modulacije (Sl. 3)

Format paketa. Dovoljno je da znate da je maksimalna dužina dela paketa jednaka 127 bajta

Tipovi uređaja i topologije

FFD i RFD uređaji

PAN koordinator, (lokalni) koordinator i krajnji uređaji

Osnovne topologije: zvezda i P2P (Sl. 5). Topologija „*cluster tree*“ (Sl. 6)

MAC

Režimi rada (Sl. 7)

Režim rada bez bikona

Unslotted CSMA/CA (Sl. 8) – princip rada. Nije neophodno da pamtite dijagram toka, ali bi trebalo da možete da objasnite rad ovog protokola, bez pamćenja brojčanih podataka iz teksta. Takođe, šta je to *backoff_period* i kako se određuje trajanje povlačenja. Po čemu se CSMA/CA iz 802.15.4 razlikuje od CSM/CA iz 802.11?

Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije, u smeru koordinator – krajnji uređaj i obrnuto (Sl. 9)

Režim rada sa bikonima

Bikon-interval (Sl. 10). Superfrejm, CAP, CFP. Vremenski parametri bikon-intervala, BO i SO (bez brojčanih vrednosti).

CFP. Princip beskonfliktne komunikacije u CFP periodu. GTS, dodela i dealokacija GTS-ova.

CAP. Slotted CSMA/CA (Sl. 12, sa napomenama kao kod Unslotted CSMA/CA)

Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije, u smeru koordinator – krajnji uređaj i obrnuto (Sl. 13)

Adresiranje. Proširene i kratke adrese

Formiranje mreže. Izbor frekventnog kanala. Pasivno i aktivno skeniranje frekventnih kanala

ZigBee

Protokol-stek. Slojevi: aplikacioni i mrežni. Nije potrebno pamtiti sve funkcije ova dva sloja (koje su nabrojane u materijalu), već samo njihovu generalnu funkcionalnost.

Topologije i rutiranje

Uloge uređaja kod ZigBee

Topologija stabla

Opis topologije (Sl. 15)

Formiranje topologije. Ograničenja, C_m, R_m i L_m. Bikon intervali i vremensko usaglašavanje između roditelja i dece (Sl. 16).

Dodela adresa i rutiranje. Potrebno je da znate opšti princip rutiranja, koji je objašnjen Sl. 17. Takođe, trebalo bi da znate (nije potrebno da pamtite

formulu, ali bi trebalo da možete da objasnite kako se dodeljuju adrese – SL. 18)

Rutiranje. Bez formule, već samo princip.

Topologija rešetke

Opšte karakteristike i poređenje sa ZigBee mrežom topologije stabla

ADVO – opšte karakteristike. („*On demand*“, „*distance vector*“)

Tabela rutiranja. Koje podatke sadrži i koja je svrha tih podataka.

Redni broj čvora (*seq*) i *Broadcast ID*.

Tipovi poruka, RREQ, RREP i REER

RREQ. Ko i kada generiše ovu poruku, koje podatke ona sadrži, kako se prostire kroz mrežu, kome je namenjena. Kako čvor reaguje na prijem poruke RREQ.

RREP. Ko generiše ovu poruku i kako se ona prenosi kroz mrežu. Kako čvor reaguje na prijem poruke RREP

REER. Koja je namena ove poruke, kada se generiše i kome se šalje?

- ♦ ♦ ♦ -