WPAN

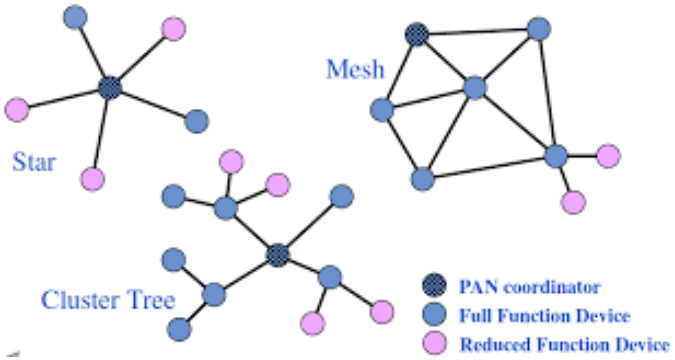
Wireless Personal Area Networks

– 802.15.4 –

– ZigBee -

WPAN

- WPAN (*Wireless Personal Area Network*):
  - Bežična personalna mreža koja omogućava komunikaciju između uređaja unutar malog geografskog područja (od nekoliko metara do desetak metara). Unutar ličnog okruženja korisnika
  - Povezivanje uređaja kao što su pametni telefoni, računari, bežične slušalice, pametni uređaji za kuću i drugi mobilni uređaji.
  - Bluetooth, Zigbee, UWB (*Ultra-Wideband*), ili druge, u zavisnosti od specifičnih zahteva i primena.



LoWPAN

UWB

THREAD

matter

WPAN
- osnovne karakteristike -

- *Mali domet*:
  - Lični prostor korisnika – neposredno okruženje, soba, stan, ...
  - 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.
- *Jednostavno povezivanje*:
  - Omogućavaju 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.
  - Par desetina $Kbps$ za jednostavne uređaje, do nekoliko desetina $Mbps$ (prenosi audio ili video visoke rezolucije).
- *Sigurnost*:
  - Zaštita privatnost korisnika i integritet podataka (šifrovanje podataka i autentifikaciju uređaja)
- *Fleksibilnost i prilagodljivost*:
  - Očekuje se fleksibilnost i prilagodljivost različitim scenarijima primene, zbog velike razrokosti uređaji i aplikacije.

WPAN
- podela -

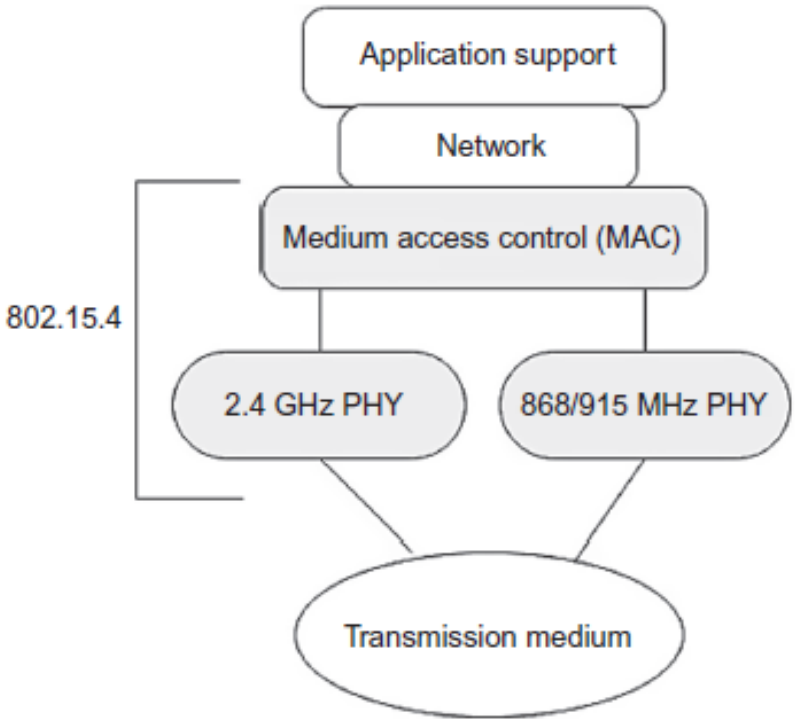
- *WPAN velike brzine prenosa*
  - IEEE 802.15.3
  - Prenos multimedijalnog sadržaja u realnom vremenu.
  - Max. $55\ Mbps$.
- *WPAN srednje brzine prenosa*
  - IEEE 802.15.1 (Bluetooth)
  - Zamena žičanih kablova i potrošačka elektronika (npr. bežične slušalice i zvučnici).
  - $1\ Mbs$, odnosno do $3\ Mbps$, u najnovijim verzijama.
- *WPAN male brzine prenosa*
  - IEEE 802.15.4
  - Bežične mreža senzora (jednostavnih pametnih uređaja).
  - Do $250\ Kbps$.

IEEE 802.15.4

- 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: pametne kući i automatizacija u zgradama, industrijske bežične senzorske mreže i interaktivne igračke i daljinsko upravljanje.
- Pokriva dva najniža sloja OSI arhitekture: fizički i sloj veze.
- Proširenje na više slojeve dolazi preko nekoliko posebnih standarda:
  - **ZigBee** (biće predstavljen u ovoj lekciji)
  - Osim toga: 6LoWPAN, ISA100.11a, WirelessHART i Thread.

IEEE 802.15.4
- protokol stek -

- Obuhvata:
  - MAC i
  - Dva nezavisna protokola fizičkog nivoa, za dva banda:
    - $2.4\ GHz$ ISM bandu, i dostupan je za globalno korišćenje;
    - $868/915\ MHz$. $868\ MHz$ u Evropi; $915\ MHz$ u Americi.

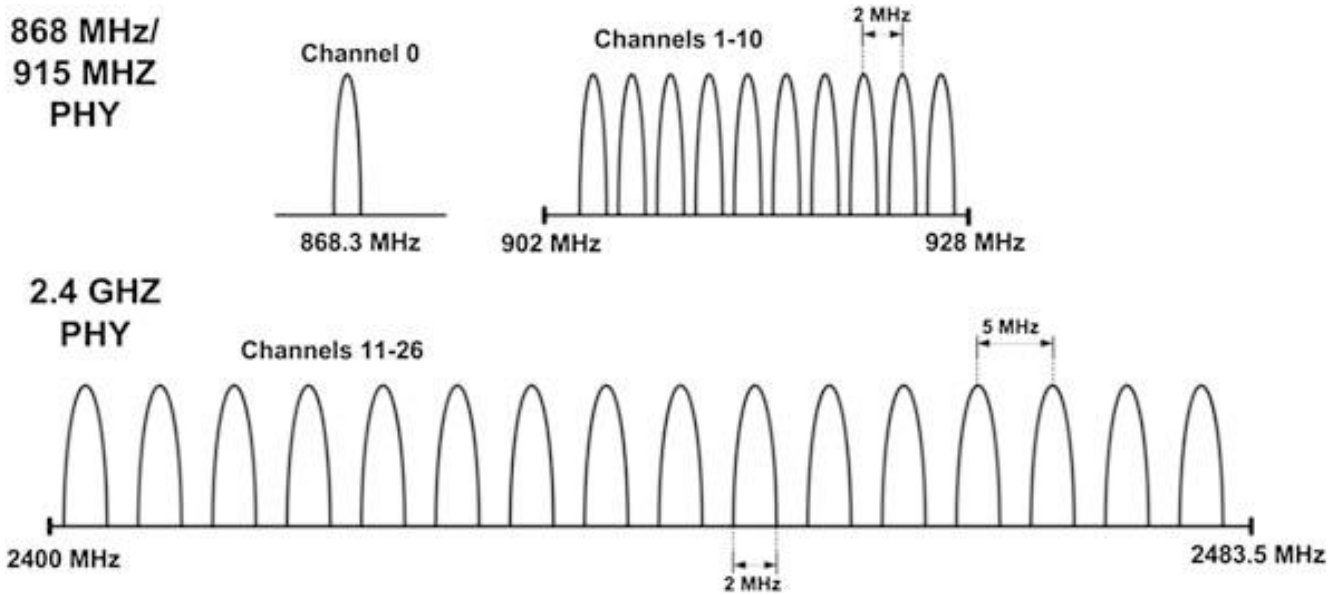


Fizički sloj
- Brzina prenosa podataka i domet -

- $2.4\ GHz$:
  - $250\ Kbps$
  - Velika brzina prenosa => Mali radni ciklus (*duty cycle*) (+)
  - Izlazna snaga ograničena na $1\ mW$
  - Mali domet: $10 - 20\ m$
- $868/915\ MHz$:
  - 20 ili $40\ Kbps$
  - Mala brzina prenosa => veliki radni ciklus
  - Izlazna snaga: nekoliko desetina do nekoliko stotina mW
  - Veći domet: do nekoliko stotina metara na otvorenom prostoru, ili tipična kuća u zatvorenom prostoru

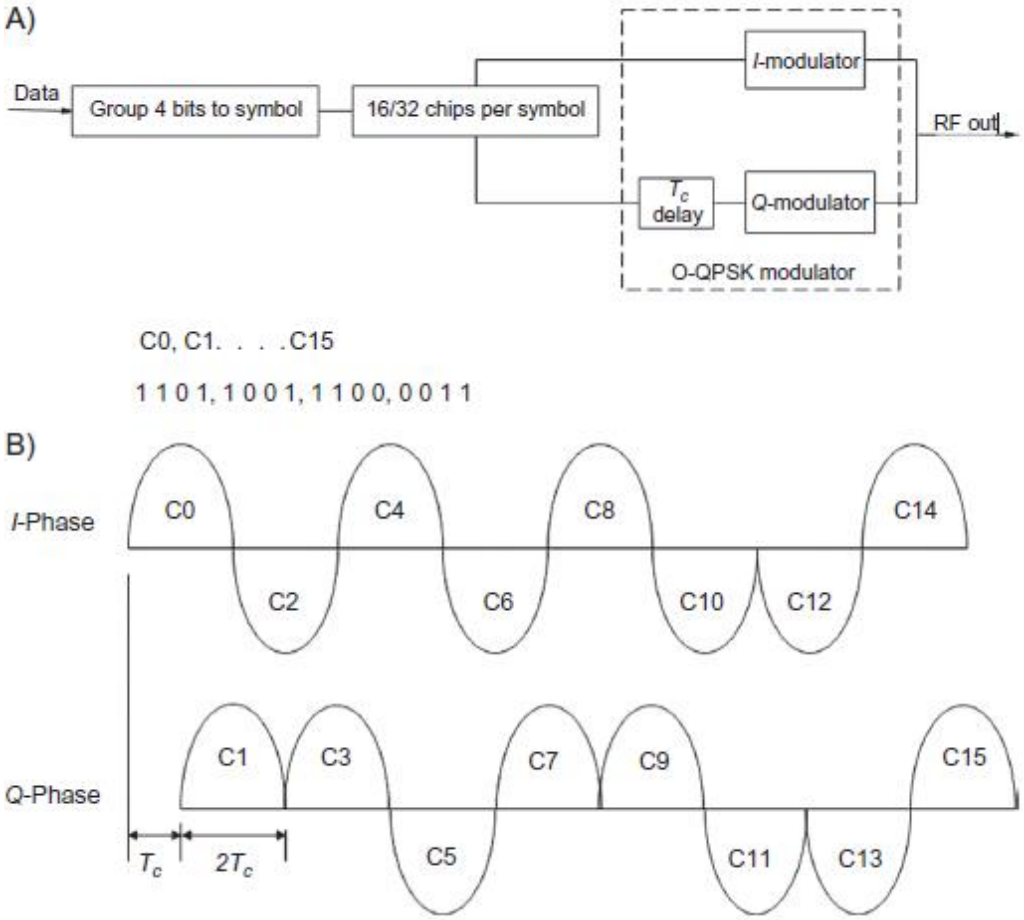
Fizički sloj
- Frekventni kanali -

- Band 868 MHz (868.0 - 868.6 MHz): samo jedan frekventni kanal,
- Band 915 MHz (902.0 - 928.0 MHz): 10 kanala
- Band 2.4 GHz (opseg 2.4– 2.4835 GHz): 16 kanala, sa širinom od 2 MHz i frekventnim razmakom između kanala od 5 MHz



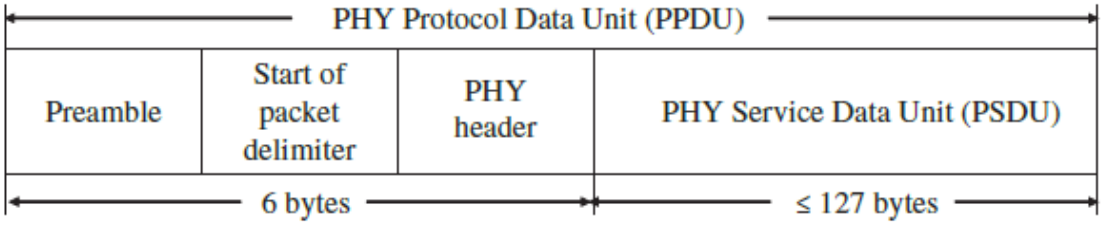
Fizički sloj
- Modulacija (2.4 GHz) -

- O-QPSK (Offset QPSK – varijanta DSSS (*direct sequence spread spectrum* - varijanta CDMA)
- Simbol = 4 bita
- Svaki simbol se zamenjuje jednom od 16 ortogonalnih 32-bitnih čip-sekvenci
- Svaki čip, u zavisnosti od svoje vrednosti, 0 ili 1, zamenjuje se signalnim elementom oblika pozitivne ili negativne polu-sinusoide.
- Nezavisno se nadovezuju signali elementi parnih i neparnih čipova
- Signal za neparne čipove kasni za $\pi/2$
- Izlazni signal je zbir signala za parne i neparne čipove



Fizički sloj
- Format (fizičkog) paketa -

- Podaci se prenose upakovani u pakete definisanog formata.
- Isti format paketa važi za oba banda.
- Paket počine preambulom i simbolom za početak paketa,
- Zaglavlje paketa - koje nosi informaciju o dužini tela paketa u bajtovima.
- Telo paketa: nosi korisne podatke, dužine do 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



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

Tipovi uređaja
- Prema funkcionalnim mogućnostima -

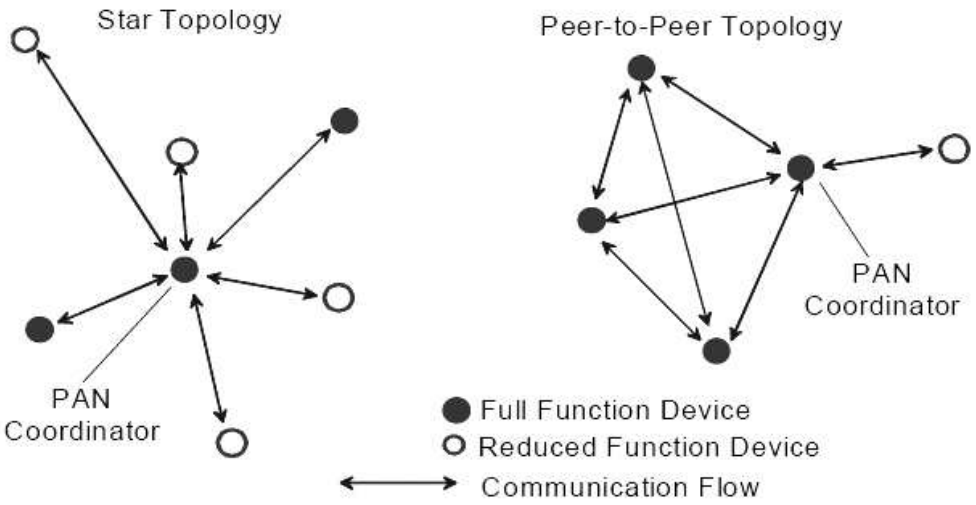
- *FFD - Uređaj pune funkcionalnosti* (*Full Function Device*):
  - Implementira sve funkcije predviđene standardom 802.15.4 (predaja, prijem i prosleđivanje podataka).
  - Može da komuniciraju direktno sa drugim FFD uređajima ili sa RFD uređajima.
  - Može da funkcionišu kao koordinatori WPAN mreže
  - Puna funkcionalnost povećava cenu i potrošnju uređaja
- *RFD - Uređaj smanjene funkcionalnosti* (*Reduced Function Device*):
  - Implemetira minimalni set funkcionalnosti
  - Koristi se za jednostavne zadatke.
  - Može da komuniciraju samo sa FFD uređajima
  - Ne može prosleđivati podatke drugih uređaja
  - Imaju nižu cenu i potrošnju energije u poređenju sa FFD uređajima.

Tipovi uređaja
- Prema ulozi u mreži -

- *PAN koordinator* (*Personal Area Network coordinator*):
  - WPAN mreži postoji tačno jedan uređaj u ulozi PAN koordinatora.
  - Uspostavlja i upravlja mrežom, reguliše pristupanje mrežnih uređaji mreži, prosleđuje podatke između mrežnih uređaja...
- (*Lokalni*) *koordinator*:
  - Postoji u složenijim mrežnim topologijama, poput topologije tipa stablo, u kojima igra ulogu koordinatora za podređene čvorove i učestvuje u prosleđivanju podatka između PAN koordinatora i udaljenih čvorova.
- *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.

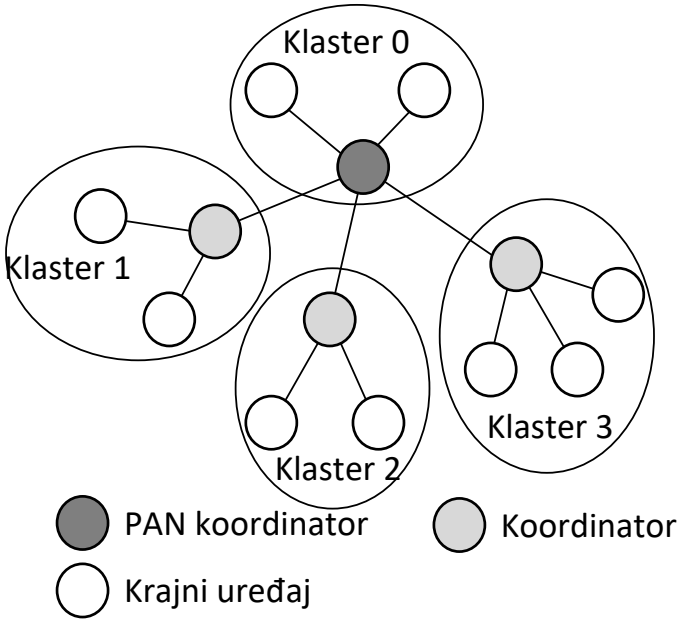
Mrežne topologije

- Zvezda:
  - Krajnji uređaji komunicira direktno sa PAN koordinatorom, ali ne i među sobom.
  - Komunikacija između mrežnih uređaja samo posredstvom PAN koordinatora.
  - PAN koordinator mora biti FFD uređaj,
  - 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.
- *Peer-to-peer* (P2P):
  - Omogućava da svaki FFD uređaj može komunicirati sa svakim drugim uređajem (FFD ili RDF) u svom radio dometu.
  - Osnova za formiranje mreža proizvoljne topologije, u kojoj FFD uređaji preuzimaju ulogu rutera za prenos podataka između udaljenih uređaja



Mrežne topologije

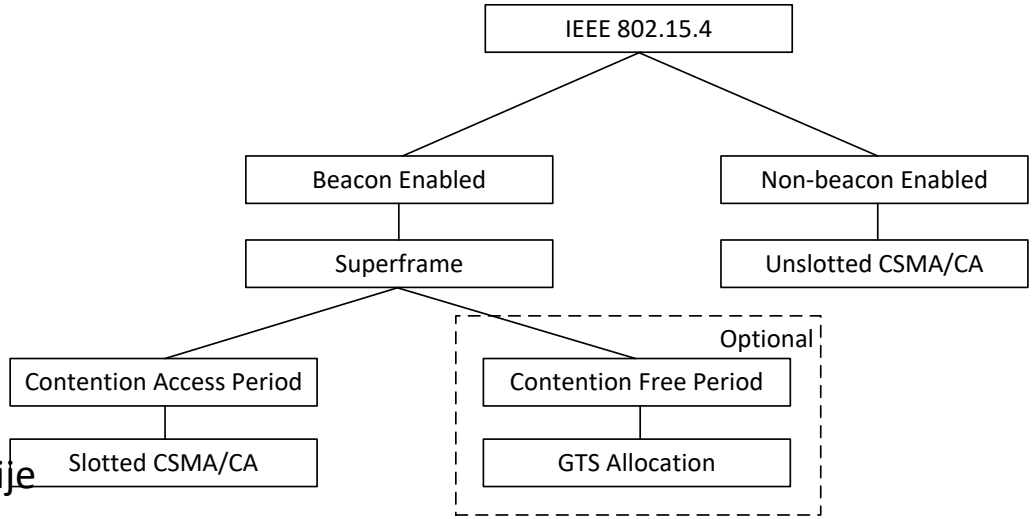
- *Clustered-tree* (primer složenije topologije): Osim PAN koordinatori postoji i više lokalnih koordinatora, od kojih svaki opslužuje jedan „klaster“ krajnjih uređaja.
- Bez obzira na topologiju i broj uređaja, u mreži uvek postoji samo jedan PAN koordinator.
- 802.15.4 ne definiše protokole za rutiranje, već je taj aspekt umrežavanja prepušten višim slojevima protokol-steka.



IEEE 802.15.4 MAC

IEEE 802.15.4. podržava dva operativna režima rada mreže:

- ***Non beacon-enabled*** (bez bikona) :
  - Pristup medijumu sa nadmetanjem
  - Unslotted CSMA/CA
- ***Beacon-enabled*** (sa bikonima):
  - PAN ili lokalni koordinator periodično emituje bikon poruke radi sinhronizacije pridruženih krajnjih uređaja.
  - Vreme je organizovano u tzv. superfrejmove
    - U prvom delu superfrejma: pristup medijumu sa nadmetanjem (*Slotted* CSMA/CA protokol).
    - U drugom delu superfrejma. Pristup medijumu bez nadmetanja (uređajima su dodeljeni vremenski slotovi (*GTS Allocation*).



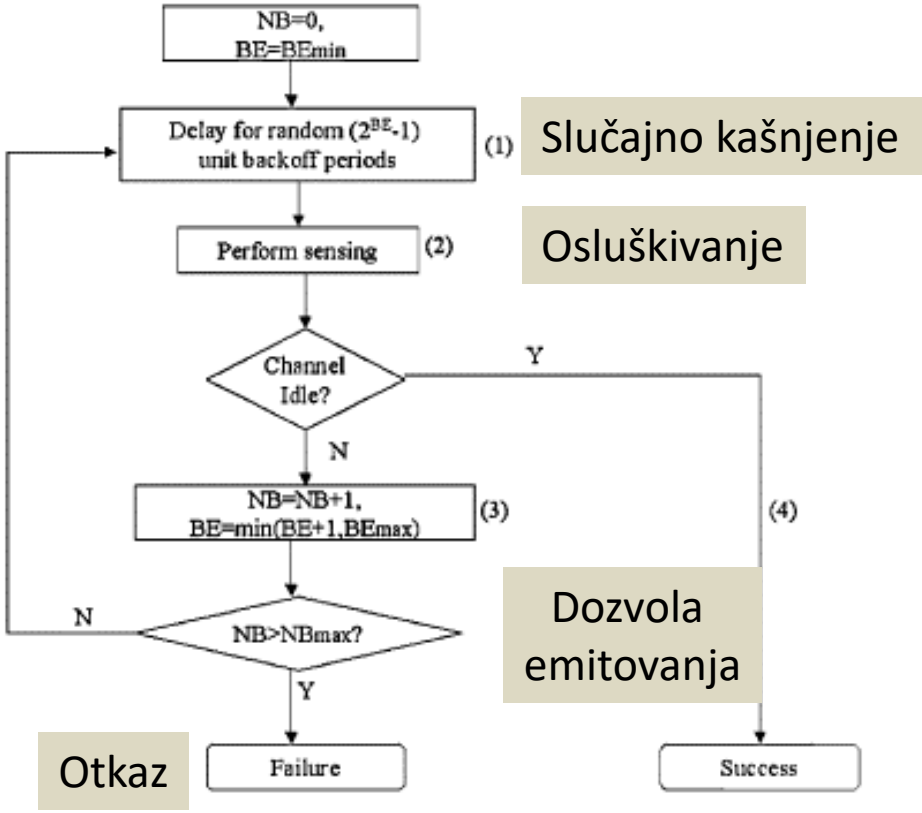
MAC
- Režim rada bez bikona-

- NB: broj uzastopnih povlačenja nakon detekcije zauzetog medijuma (ne može premašiti vrednost NB_{max})
- BE: *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}.

Vreme povlačenja:

- *N* x *backoff_period,* gde je
- N : slučajni broj iz opsega 0 do 2^{BE}-1
- *Backoff_period*=320 *us*

Unslotted CSMA/CA

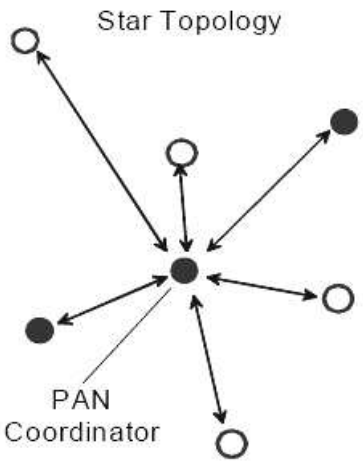


MAC
- Režim rada bez bikona-

Poređenja CSMA/CA kod 802.11 i 802.15.4

- CSMA/CA kod 802.15.4 je značajno jednostavniji od CSMA/CA iz standarda 802.11.
- Kod 802.15.4 osluškivanje medijuma nije perzistentno
  - Uređaj ne 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.
- Kod 802.15.4, ne postoji RTS/CTS procedura, kao ni NAV.

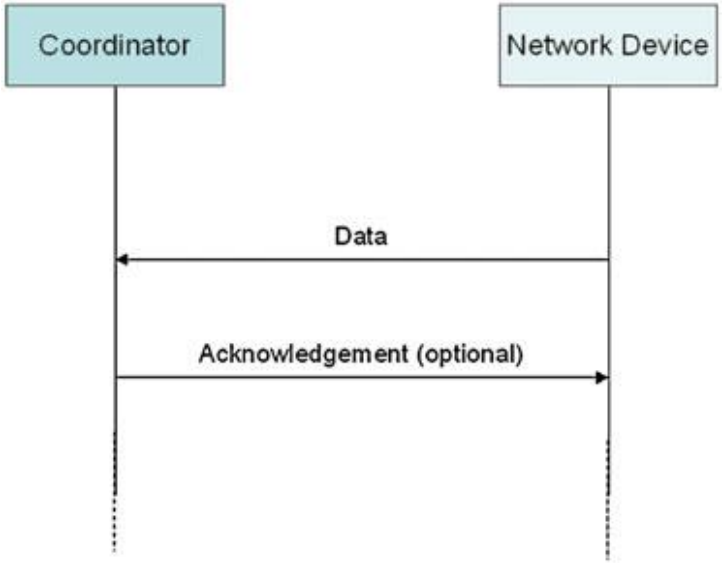
MAC
- Režim rada bez bikona-



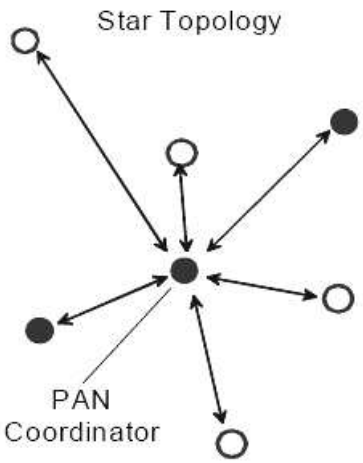
Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije

U smeru mrežni uređaj -> koordinator

- Mrežni uređaji:
  - Najveći deo vremena provode u mirnom režimu (spavanje – isključen RF transiver) i bude se samo radi komunikacije sa koordinatorom
  - Mogu da započnu CSMA/CA proceduru u bilo kom trenutku i da nakon što izbore pravo pristupa medijumu pošalju koordinatoru paket podataka (Data)
- Koordinator:
  - Neprekidno drži 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.



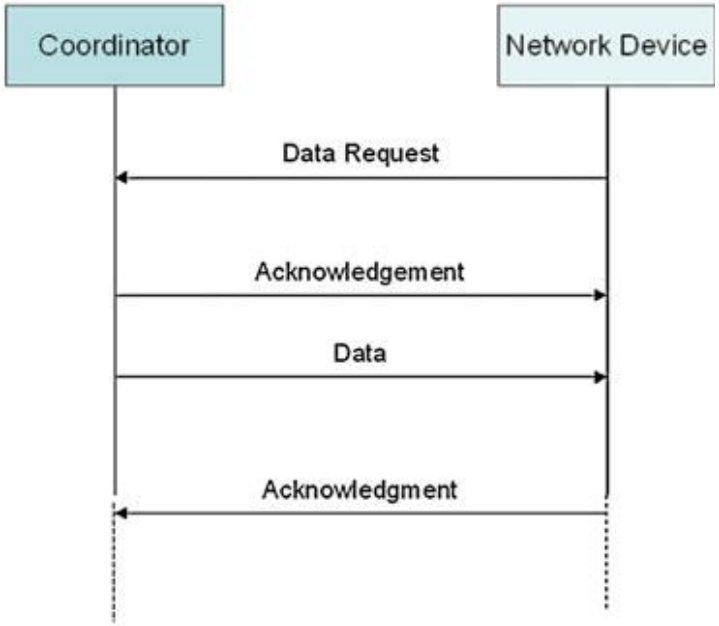
MAC
- Režim rada bez bikona-



Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije

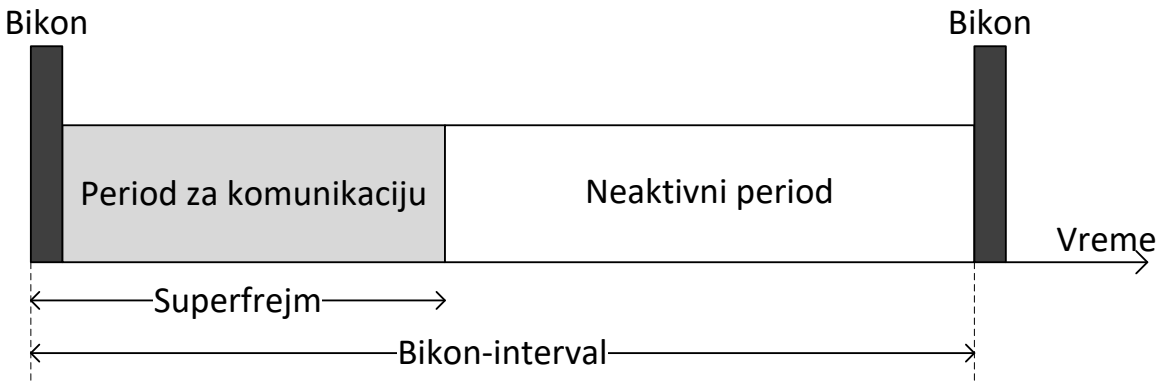
U smeru koordinator -> mrežni uređaj

- Koordinator ne može da pošalje paket uređaju „kad kog poželi“ (zato što ne zna kad je uređaj budan)
- 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,
  - Šalje uređaju i sam paket podataka (ako takav paket postoji).
  - Konačno, uređaj potvrđuje prijem paketa



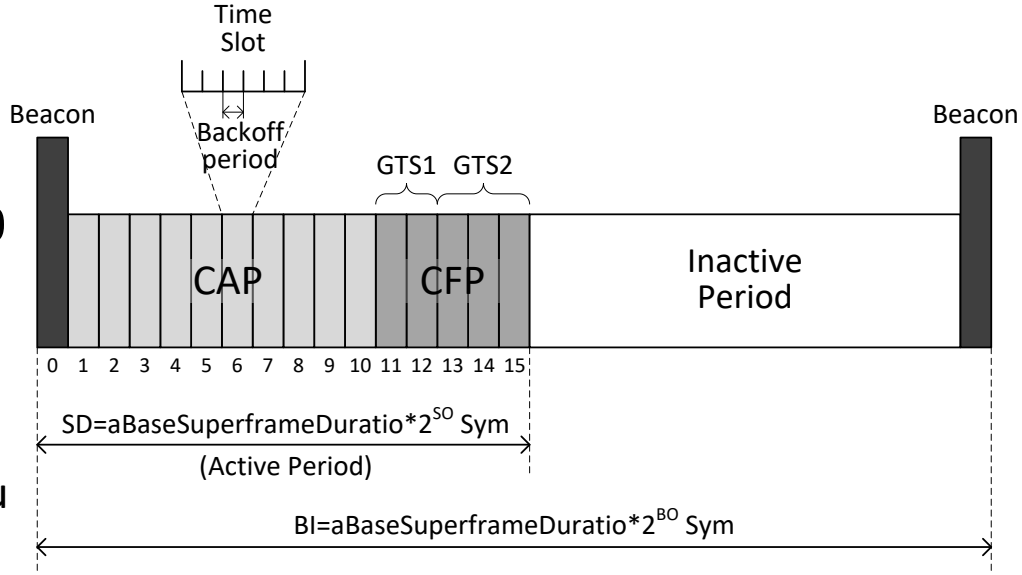
MAC
- Režim rada sa bikonima -

- PAN koordinator periodično emituje tzv. bikon (*beacon*) poruke 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.



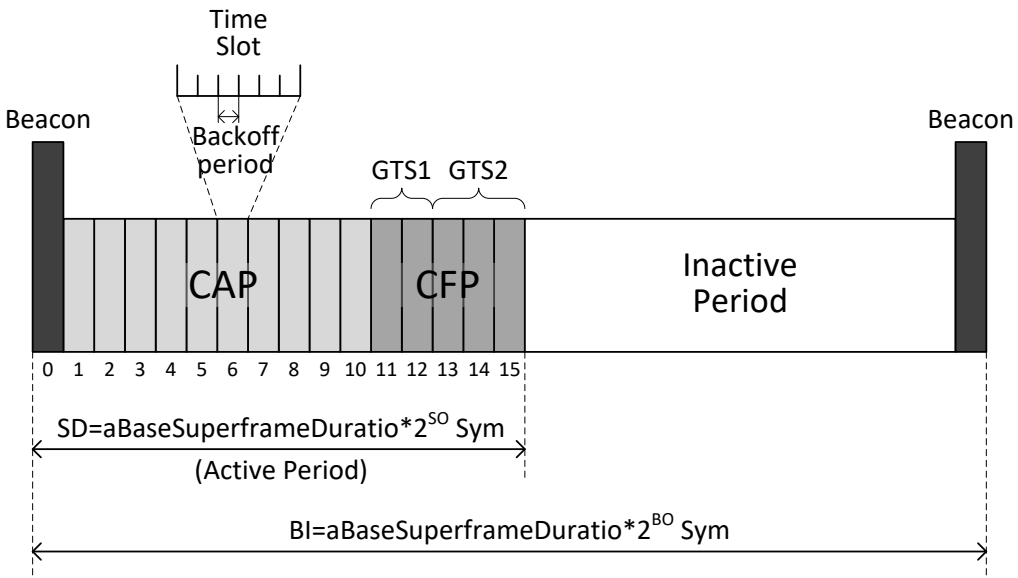
MAC
- Režim rada sa bikonima -

- Superfrejm je podeljen na 16 vremenskih slotova istog trajanja, koji se razvrstavaju u tri celine:
- *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 (slična, ali ne i identična u odnosu na onu u režimu rada bez bikona)
  - CAP period počinje 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)
  - Transmisija koja ne može biti okončana pre kraja CAP perioda, odlaže se za sledeći superfrejm



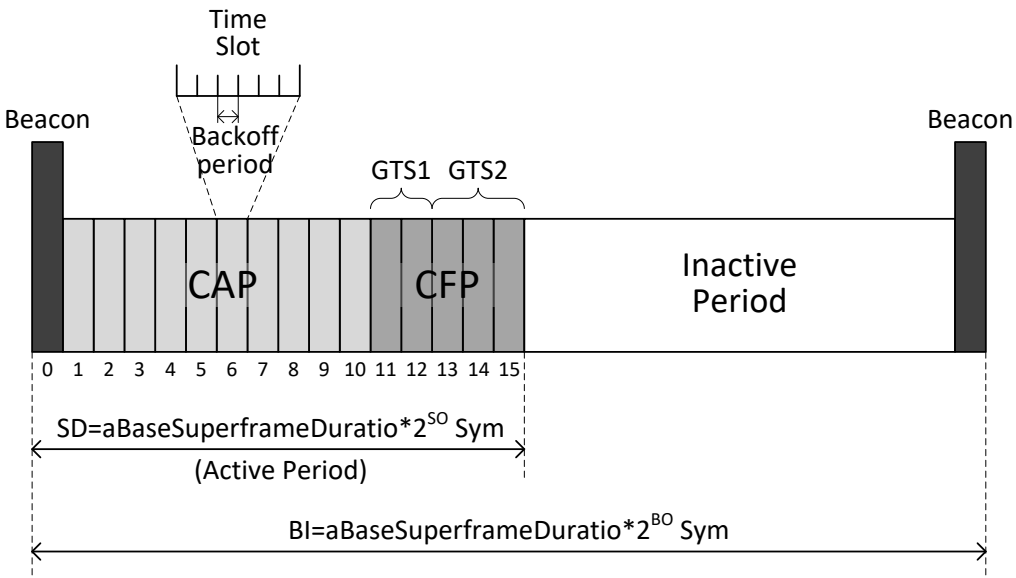
MAC
- Režim rada sa bikonima -

- *CFP* (*Contention Free Period*) – počine nakon završetka CAP i traje do isteka superfejma.
- CFP je rezervisan za komunikaciju bez nadmetanja
- Koordinator može da pojedinim uređajima, na njihov zahtev, 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, ali ne može biti duža od 7 vremenskih slotova
- CFP ne postoji ako ni jedan uređaj nije zahtevao GTS



MAC
- Režim rada sa bikonima -

- Vremenski parametri superfrejma:
  - *Bikon interval* (BI) – vreme između emitovanja dva uzastopna bikona
  - *Trajanje superfrejma* (SD – *Superframe Duration*) – trajanje aktivnog perioda bikon intervala
- Vremena BI i SD su definisana parametrima BO (*Beacon Order*) i SO (*Superframe Order*), na sledeći način:



aBaseSuperframeDuration= $15.36\ ms$
(za band $2.4\ GHz$ i brzinu prenosa $250\ kbps$)

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

MAC

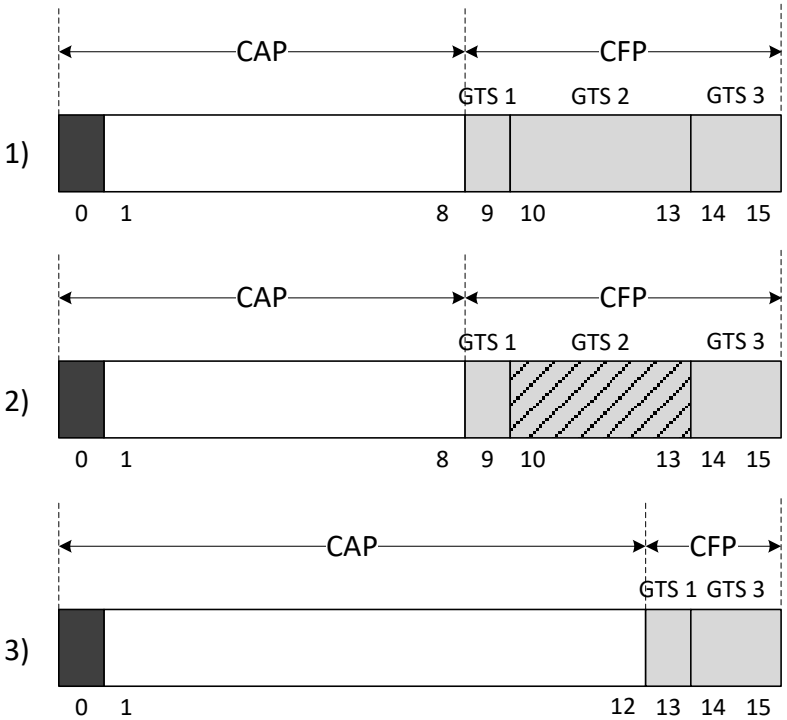
- Režim rada sa bikonima - CFP (još jedanput) -

- CFP (*Contention Free Period*) – omogućava pristup medijumu bez nadmetanja
- GTS se dodeljuju uređajima na zahtev
- Svaki uređaj može da dobije najviše jedan GTS za predaju i jedan za prijem.
- Jednom dodeljeni GSF može da se dealocira:
  - Na zahtev uređaja
  - Od strane koordinatora ako se GTS ne koristi u određenom broju uzastopnih superfrejmova
  - „Defragmentacija“ CFP-a (na slici)

Tri GTS, koji zajedno zauzimaju svih 7 raspoloživih CFP slotova

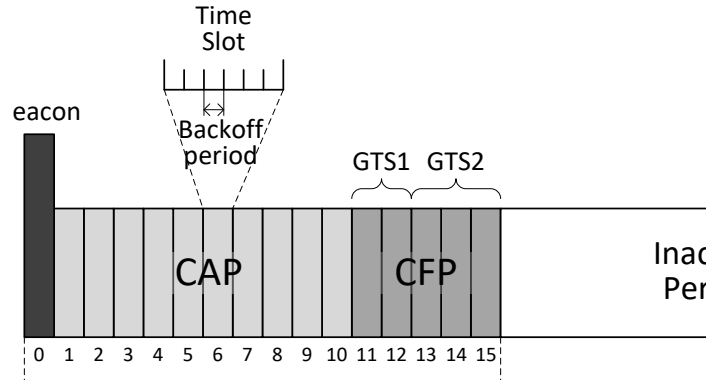
Koordinator je rešio da dealocira GTS2

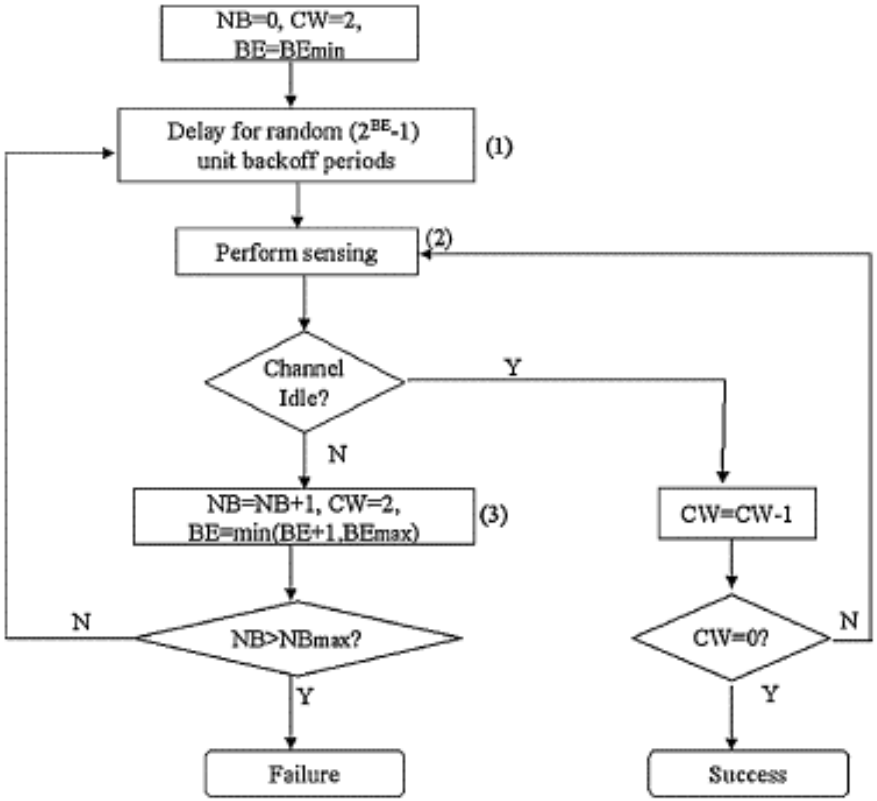
Koordinator premešta GTS1 tako da se spoji sa GTS3 (i obaveštava uređaj o promeni) Zašto? Da bi se produžio CAP



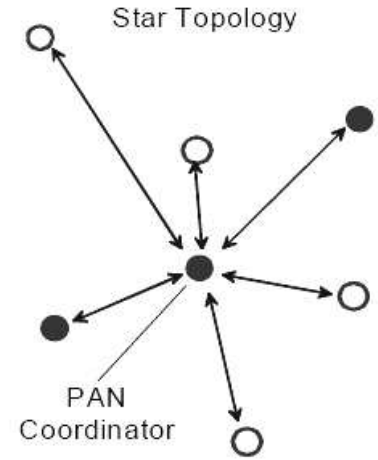
MAC
- Režim rada sa bikonima – CAP -

- Dve razlike u odnosu na CSMA/CA za režim rada bez bikona:
  - Uređaj mora da detektuje slobodan medijum tokom osluškivanja u dva uzastopna *backoff* perioda (promenljiva *CW*)
  - Operacija osluškivanja medijuma je sinhronizovana sa početkom *backoff* perioda (slotted CSMA/CA)
- 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
  - Potencijalni problem: povećana latencija



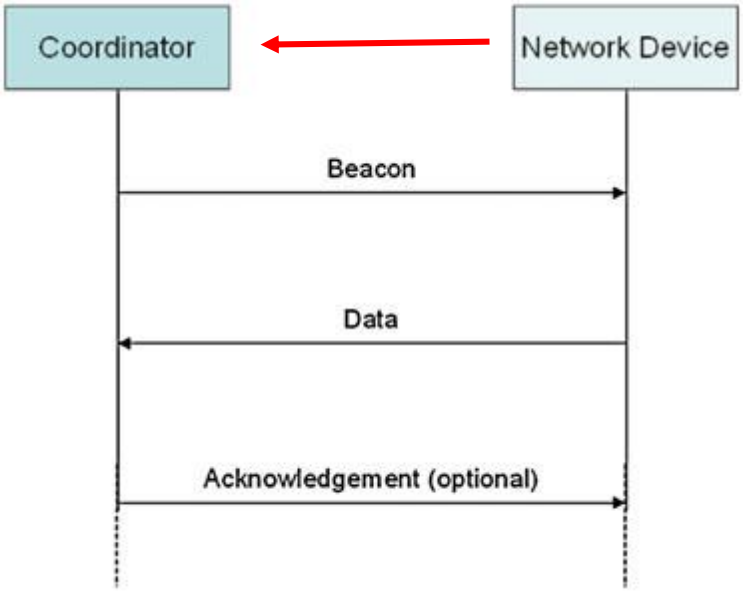


MAC
- Režim rada sa bikonima -



Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije

- Mrežni uređaj čeka na prijem bikona (početak superfrejma)
- Ukoliko nema dodeljen GTS, uređaj šalje svoj paket podataka tokom CAP perioda primenjujući CSMA/CA proceduru
- Ukoliko je uređaju dodeljen GTS, uređaj 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)

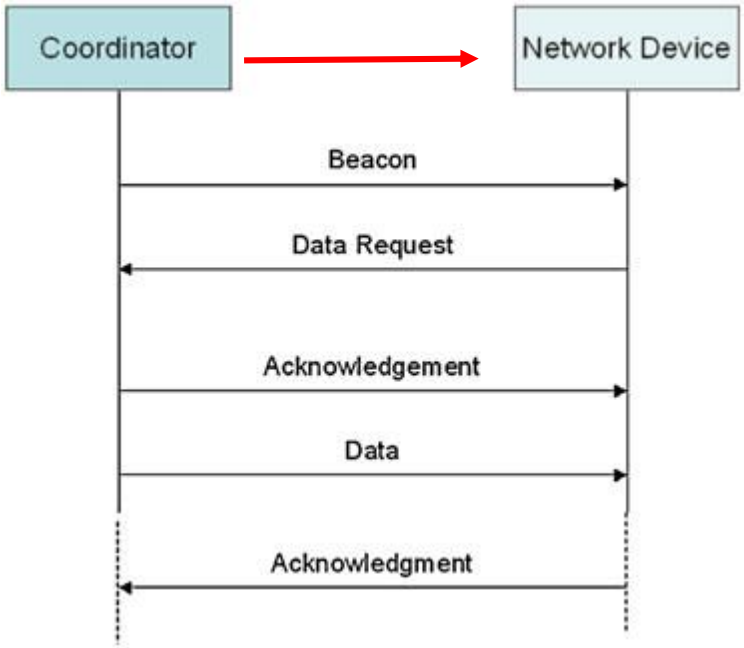


(a) Komunikacija u smeru od mrežnog uređaja ka PAN koordinatoru

MAC
- Režim rada sa bikonima -

Prenos podataka u mreži zvezdaste topologije

- PAN koordinator setuje određeni bit u bikon poruci kao indikaciju uređaju da koordinator ima spreman paket za njega.
- Uređaj šalje koordinatoru poruku tipa „*Data Request*“ (zahtev za podatke)
- Kao odgovor na ovu poruku, koordinator prvo šalje uređaju ACK poruku, a odmah zatim i
- Paket podataka.
- Po prijemu paketa podataka, uređaj odgovara slanjem ACK koordinatoru.



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

MAC
- Adresiranje -

- Standard 802.15.4 predviđa dva tipa adresa uređaja:
  - *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.
- Postoje dve konfiguracione opcije:
  - Koriste se isključivo kratke adrese (efikasnija komunikacija jer je manji deo paketa zauzet adresama)
  - Koriste se isključivo proširene adrese (ako 16-bitne kratke adrese nisu dovoljne za sve uređaje u mreži)
- Podrška za *bradcast* i *multicast* adrese

MAC
- Formiranje mreže -

- Dva koraka:
  1. Izbor frekventnog kanala na kome će mreža raditi;
  2. Pridruživanje uređaja mreži

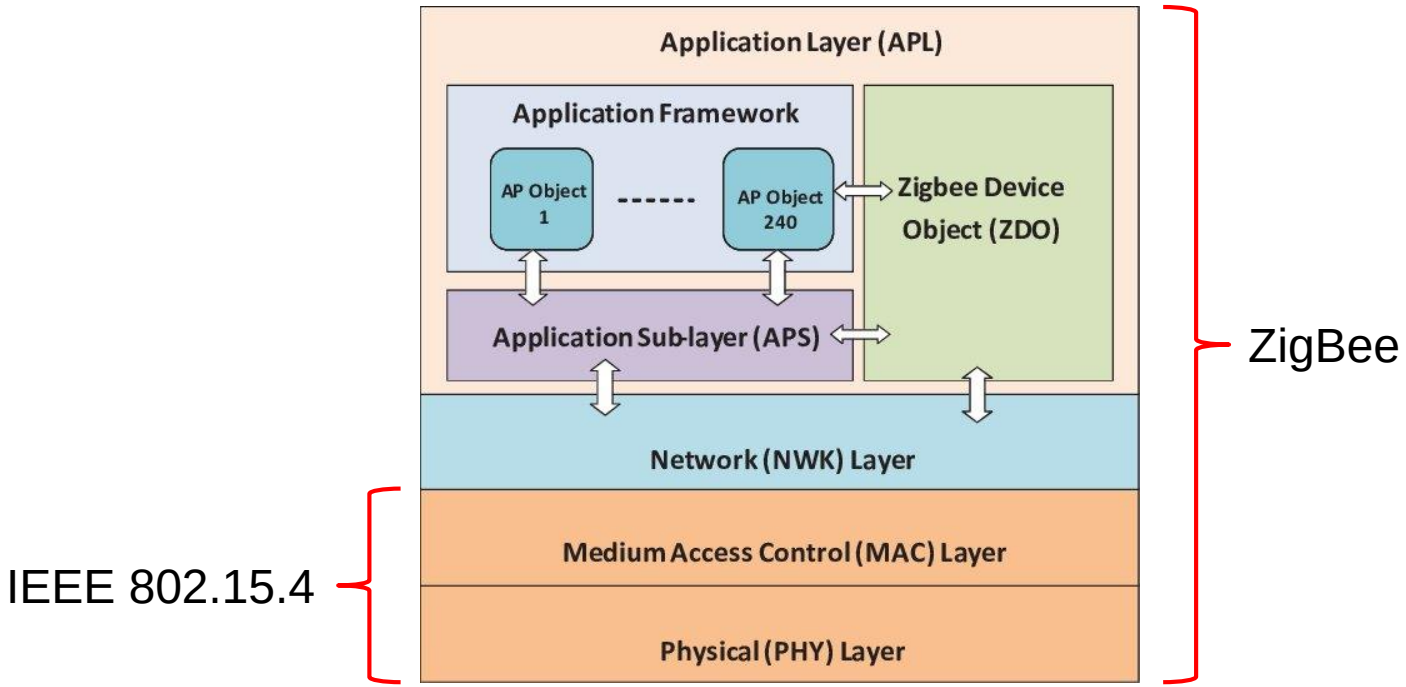
- Izbor frekventnog kanala:
  - PAN koordinator bira frekventni kanal (jedan od 10 u bandu 915 *MHz* ili jedan od 16 u bandu 2.4 *GHz*)
  - Skenira frekventne kanale i pronalazi one koji su zauzeti od strane postojećih 802.15.4 WPAN mreža u okolini (otkriva ih po bikonima koje emituju PAN koordinatori tih mreža) i te kanale eliminiše iz selekcije.
  - U preostalim kanalima, PAN koordinator meri RF energiju i bira frekventni kanal sa najmanjim nivoom RF energije

MAC
- Formiranje mreže -

- Pridruživanje uređaja mreži
  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)
- Korak 1 (skeniranje):
  - *Pasivno skeniranje*:
    - Primenljivo je u mrežama koje rade u režimu sa bikonima.
    - Uređaj 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
    - Uređaj aktivno traži dostupne mreže, tako što
    - Uređaj emituje paket zahteva za skeniranje na kanalima koje želi istražiti.
    - Koordinator koji primi ovaj zahtev, odgovara uređaju paketom koji sadrži informacije o mreži
    - Nakon što prikupi podatke o svim 802.15.4 mrežama u okolini, uređaj za pridruživanje bira jednu od njih.

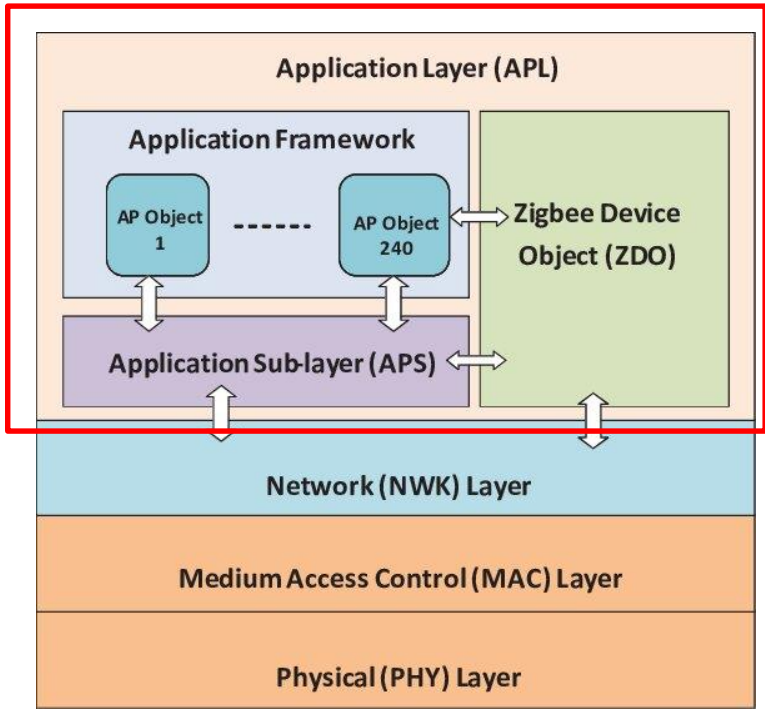
ZigBee

- Dopunjuje IEEE 802.15.4 slojevima višeg nivoa (mrežni + aplikacioni)



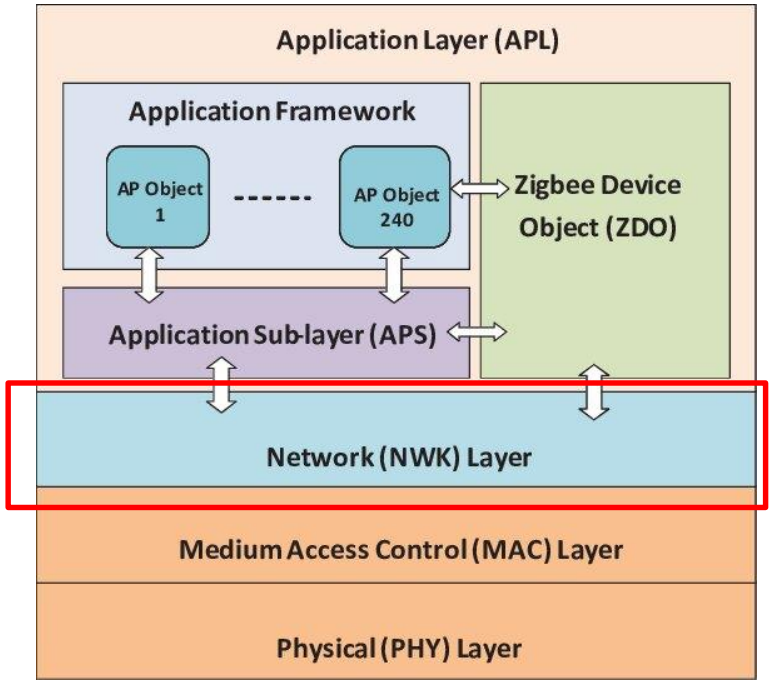
ZigBee
- Aplikacioni sloj -

- *APS* (*Application Support sub-layer*):
  - Fragmentacija i ponovno sastavljanje dužih poruka,
  - Definiše tipove podataka i formate poruka za različite klase usluga
  - Upravljanje ključevima i šifriranje za zaštitu podataka.
- *ZDO* (*Zigbee Device Objects*):
  - Pruža standardne komande za uobičajene operacije kao što su: pronalaženje uređaja određenog tipa, priključivanje/napuštanje mreže, upravljanje mrežom, ažuriranje softvera i resetovanje uređaja
  - Profili 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).



ZigBee
- Mrežni sloj -

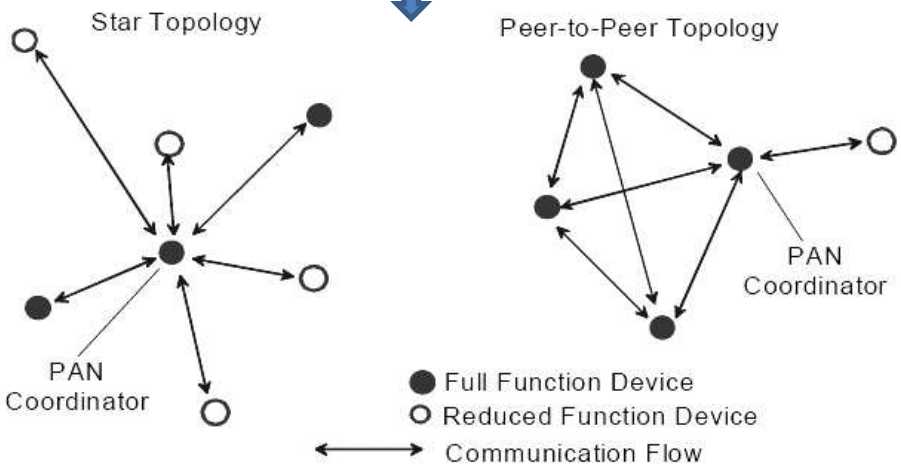
- *Formiranje mreže*:
  - Omogućava uređajima da se pridruže ili napuste mreže; podrška za različite topologije: zvezda, stablo i rešetka; koordinacija i sinhronizaciju uređaja u mreži.
- *Rutiranje podataka*:
  - Pronalazi optimalne putanje za rutiranje podataka između izvora i odredišta; obavlja dinamičko rutiranje (prilagođenje promenama u topologiji mreže)
- *Adresiranje*:
  - Dodeljuje jedinstvene identifikatore (ID – kratke adrese) svim uređajima u mreži; podrška za različite tipove adresa za *unicast*, *multicast* i *broadcast* komunikaciju.
- *Sigurnost*:
  - Mehanizmi za autentifikaciju i šifrovanje podataka; osigurava zaštitu od neovlaštenog pristupa i napada na mrežu; podržava različite algoritme šifriranja i autentifikacije za različite nivoe sigurnosti.



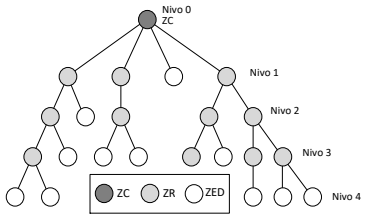
ZigBee
- Uloge uređaja -

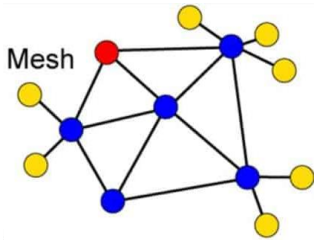
- U odnosu na 802.15.4, daje nova imena uređajima i konkretizuje ulogu lokalnog koordinatora, koji postaje ruter

IEEE 802.15.4	**ZigBee**
PAN koordinator	ZigBee koordinator (ZC – *ZigBee Coordinator*)
(Lokalni) koordinator	ZigBee ruter (ZR – *ZigBee Router*)
Krajnji uređaj	ZigBee krajnji uređaj (ZED – *ZigBee End Device*)



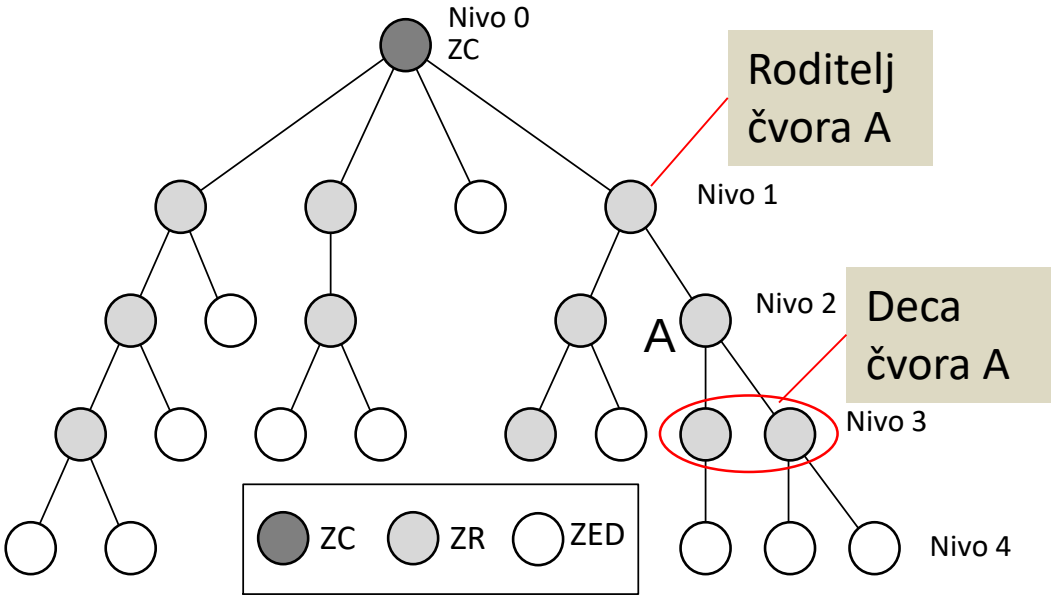
- Pruža podršku za formiranje mreža topologije:
  - Stablo (*tree*), i
  - Rešetka (*mesh*)





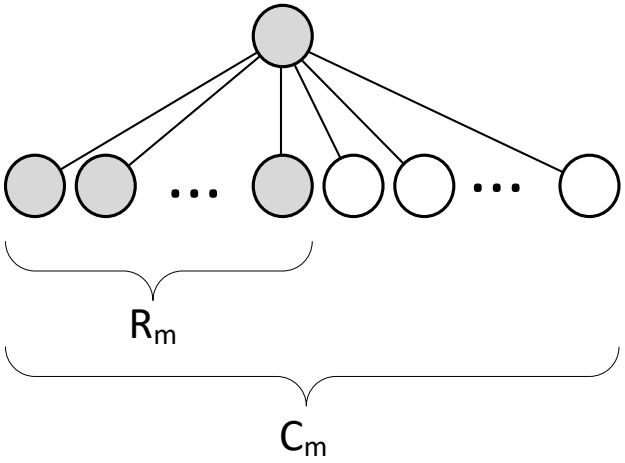
ZigBee
- Mreža topologije stabla -

- Standard ZigBee definiše topologiju stablo (*tree*) kao specijalan slučaj P2P topologije iz standarda 802.15.4.
- 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 ruteri (ZR)
- Krajnji uređaji (ZED) su listovi stabla, koji nemaju naslednike i mogu samo da komuniciraju sa svojim roditeljima, koji su tipa ZC ili ZR.



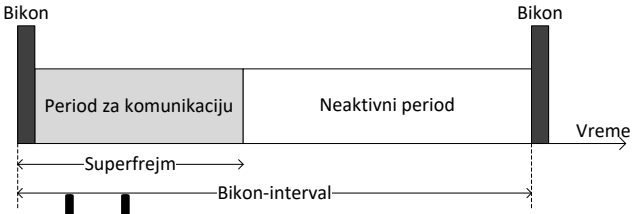
ZigBee
- Mreža topologije stabla -

- Parametri mreže:
  - C_m – maksimalno dozvoljeni broj dece koje čvor (ZC ili ZR) može imati,
  - R_m – maksimalni broj uređaja tipa ZR u skupu dece bilo kog čvora i
  - L_m – maksimalni broj nivoa u mreži.
- Uređaji se mogu pridruživati mreži sve dok se ne dostigne neko od ograničenje.
- U ZigBee mreži topologije stabla, uređaji tipa ZC i ZR rade u režimu sa bikonima.

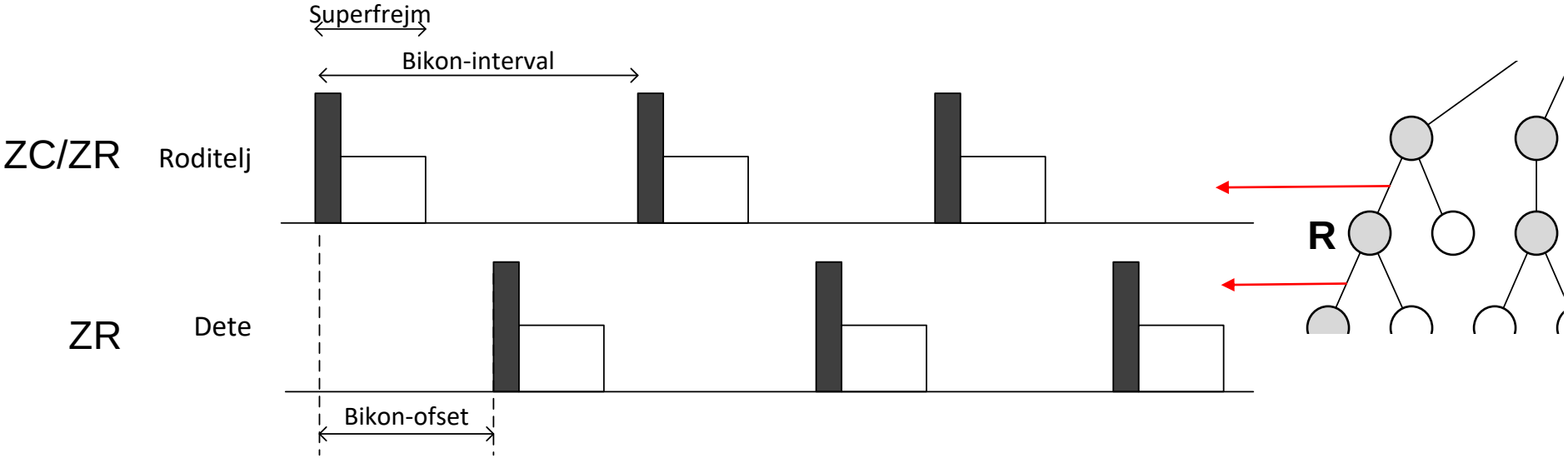


- Proces formiranja mreže startuje ZC, periodičnim emitovanjem bikon poruka.
- Bikone primaju uređaji koji su u radio dometu ZC-a i ako žele, mogu poslati zahtev ZC-u za pridruživanje mreži.
- Nakon pridruživanja mreži, ZR počinje periodično da emituje svoje bikone, što će omogućiti i drugim uređajima, koji čuju ove emisije, da se preko njega pridruže mreži
- Ova procedura se rakurzivno nastavlja sve dok ima zainteresovanih uređaja i/ili je dostignuto ograničenje

ZigBee
- Mreža topologije stabla -

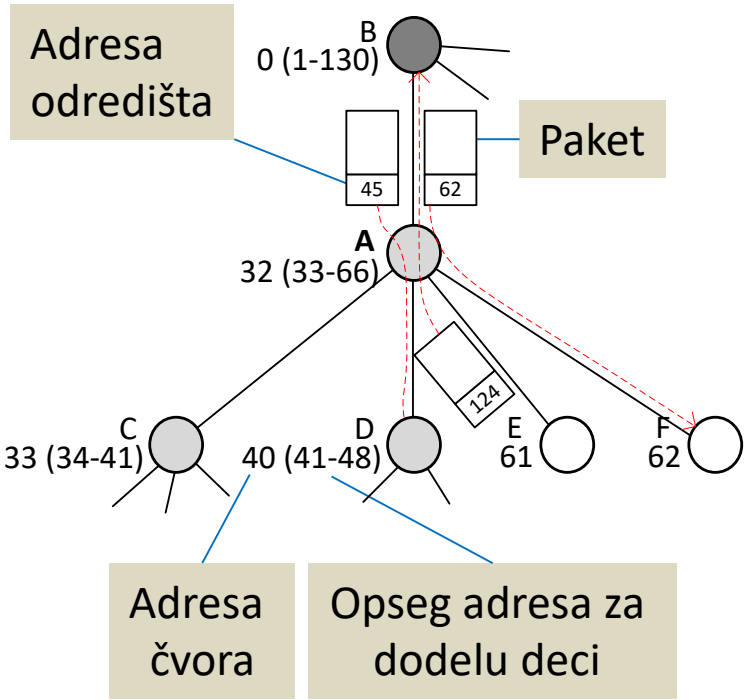


- Tokom normalnog rada, svaki čvor mora da prima bikone svog roditeljskog čvora.
- Čvor koji igra ulogu rutera (ZR), emituje svoje bikone, namenjene njegovoj deci.
- ZR je u dvostrukoj ulozi:
  - Tokom superfrejma svog roditelja komunicira sa roditeljom;
  - Tokom svog superfrejma, komunicira sa svojom decom.
- Da bi se izbegle kolizije, ZR mora da emituje svoje bikone sa pre-definisanim ofsetom (kašnjenjem) u odnosu na bikone svog roditelja.
- Ofset mora biti duži od trajanja superfrejma i kraći od bikon intervala roditeljskog čvora.
- ZED uređaj samo razmenjuje podatke sa svojim roditeljskim čvorom.



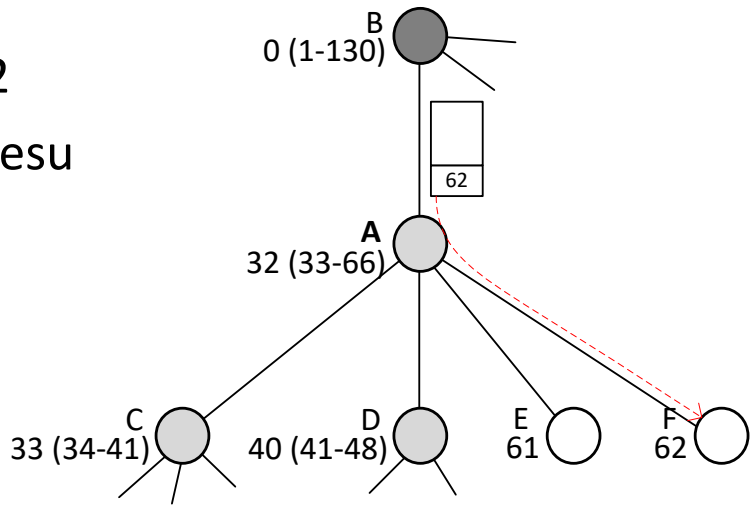
ZigBee
- Mreža topologije stabla -

- Svaki čvor ima svoju (kratku) adresu u mreži
- Adresa ZC-a je 0
- Prilikom pridruživanja mreži uređaj dobija adresu od roditelja
- ZR dodatno dobija opseg adresa za dodelu svojoj deci
- ZR zna adrese svih suseda (roditelja i dece) i opsege adresa svoje dece-rutera

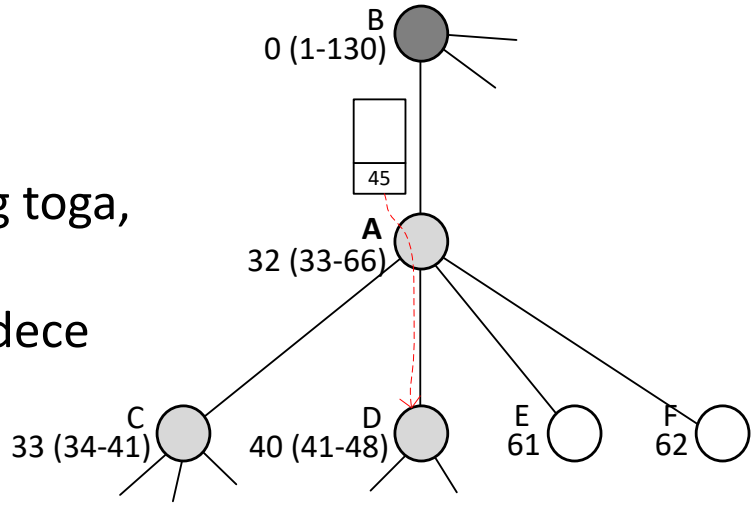


ZigBee
- Mreža topologije stabla -

- Čvor *A* je primio paket upućen na adresu 62
- *A* proverava da li neki njegov sused ima adresu 62 i šalje paket čvoru *F*, čija je to adresa.

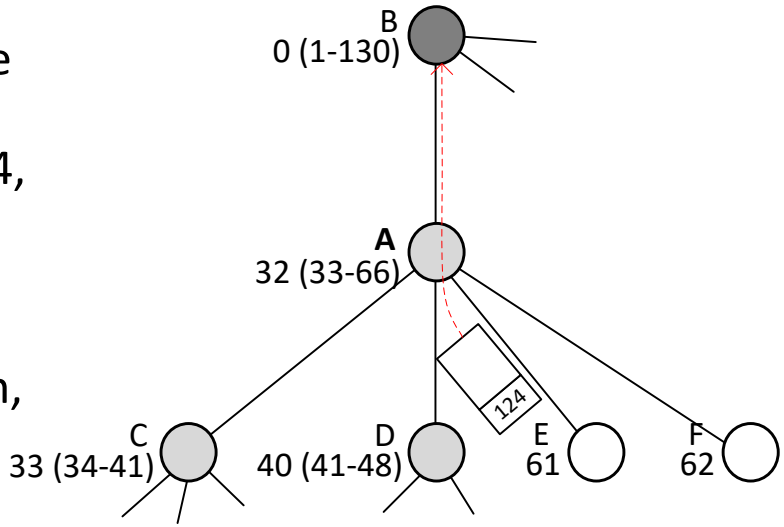


- Čvor *A* je primio paket upućen na adresu 45
- Ni jedan sused čvora *A* nema ovu adresu, ali
- Adresa 45 je u opsegu adresa čvora *D*, i zbog toga,
- *A* šalje paket čvoru *D*
- Čvor *D* će proslediti paket jednom od svoje dece primenjujući istu proceduru



ZigBee
- Mreža topologije stabla -

- Čvor *A* je primio paket od svog deteta *E*, koji je upućen na adresu 124
- Pošto ni jedan sused čvora *A* nema adresu 124, niti je adresa 124 u opsegu adresa nekog od njegovih ZR-deteta,
- *A* šalje paket svom roditeljskom čvoru *B*
- Drugim rečima: kada ne zna šta će sa paketom, ZR šalje paket svom roditelju

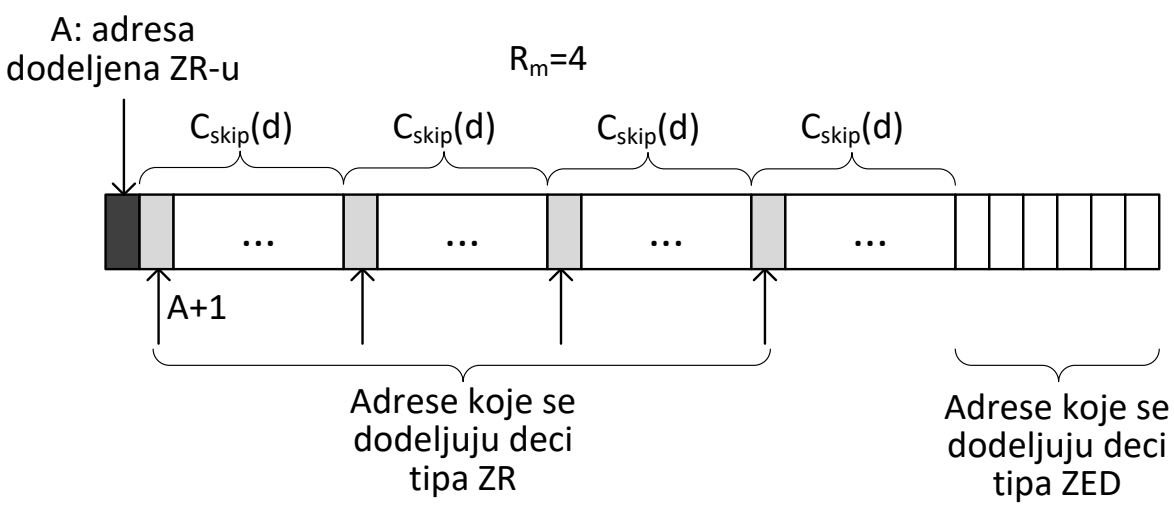


ZigBee
- Mreža topologije stabla -

- C_m – maksimalno broj dece koje čvor može imati,
- R_m – maksimalni broj ZR-dece među tom decom
- L_m – maksimalni broj nivoa u mreži
- d - nivo (konkretnog) čvora u mreži

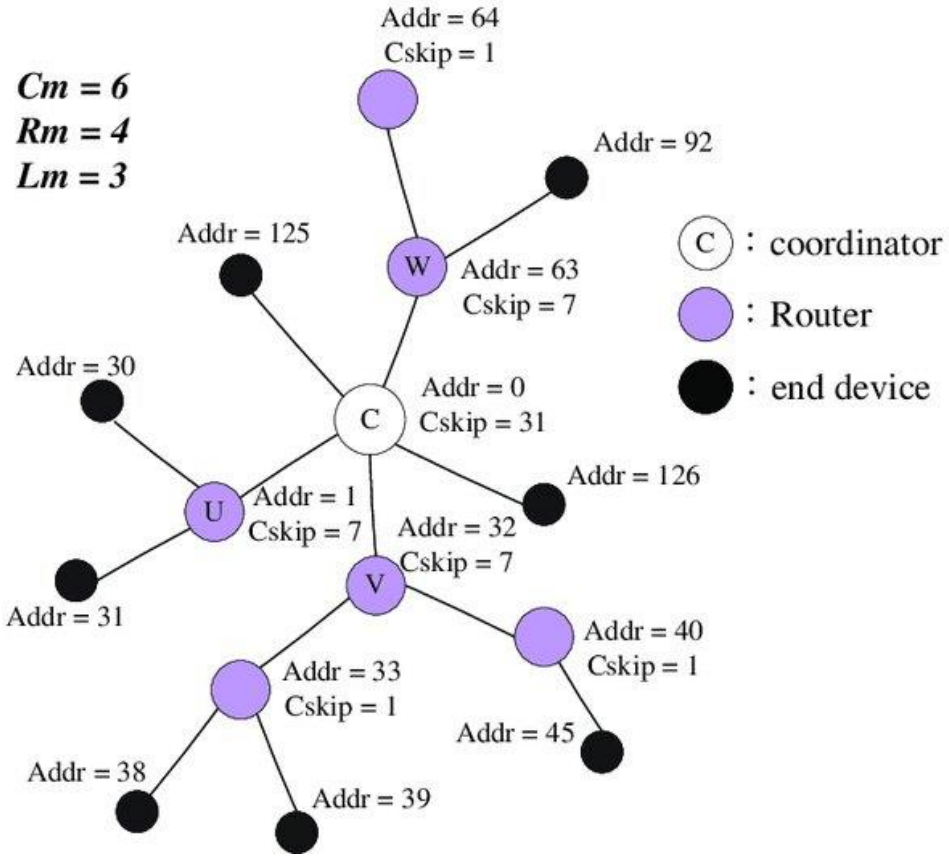
$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1) & \text{if } R_m = 1; \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \cdot R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m} & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

- Prilikom pridruživanja mreži, ZR je dobio adresu *A* i informaciju od svojoj dubini, *d*
- ZR izračunava *Cskip*(*d*), prema formuli (širina bloka adresa koje će dodeljivati svojoj deci)
- Svom prvom pridruženom ZR-detetu dodeljuje adresu *A*+1
- Drugom ZR-detetu dodeljuje adresu: *A*+*Cskip*(*d*)+1
- *n*-tom ZR-detetu dodeljuje adresu: *A*+(*n*-1)*Cskip*(*d*)+1
- ZED-deci dodeljuje sukcesivne adrese iz poslednjeg bloka dužine *Cskip*(*d*). Adresa n-tog krajnjeg uređaja je: A + R_m × Cskip + n



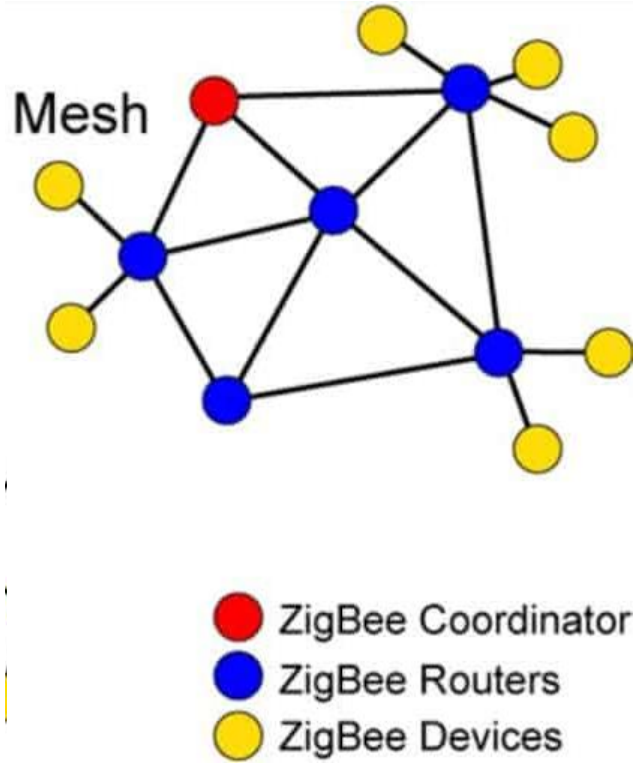
ZigBee
- Mreža topologije stabla -

- Primer dodele kratkih adresa u ZigBee mreži topologije stabla sa parametrima $C_m = 6$, $R_m = 4$ i $L_m = 3$.



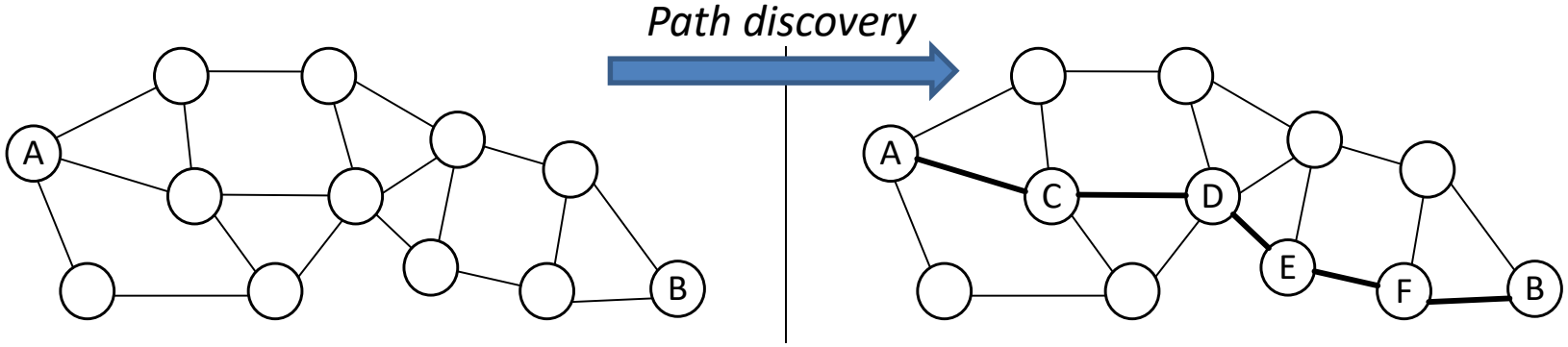
ZigBee
- Mreža topologije rešetke -

- U mreži topologije rešetka (*mesh*) uređaji mogu slobodno da se povezuju.
- Između bilo koja dva uređaja u mreži postoji više od jedne putanje (glavna prednost u odnosu na stablo - gde postoji samo jedna).
- U slučaju otkaza nekog rutera u rešetki, podaci se mogu rutirati alternativnim putanjama (povećava se otpornost i pouzdanost mreže)
- Međutim, cena koja se plaća je složeniji postupak rutiranja.
- U nastavku: rutiranje u ZigBee *mesh* mreži



ZigBee
- Mreža rešetkaste topologije -

- AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) – algoritam za rutiranje koji se koristi u ZigBee mreži *mesh* topologije.
- „*On-demand*“ (na zahtev): putanja između izvornog i odredišnog čvora uspostavlja se po potrebi, na zahtev izvornog čvora
- Kada uređaj A želi da pošalje poruku uređaju B, a pri tom ne zna putanju do B, A inicira proceduru otkrivanja putanje (*path discovery*)
- Rezultat procedure „*path discovery*“ je uspostavljanje putanje u mreži između A i B, preko koje se poruke mogu prenositi između ova dva uređaja, u oba smera.
- AODV vodi računa o optimalnosti i od više alternativnih putanja bira najkraću – sa najmanjim brojem preskoka (otuda *distance vector*)
- U mreži se čuvaju informacije samo o rutama preko kojih se aktivno prenose podaci.
- Uspostavljena putanja 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.



ZigBee
- AODV-

- Informacije o putanjama se čuvaju u **tabelama rutiranja** čvorova (Svaki čvor ima svoju tabelu rutiranja, a svaka stavka u tabeli sadrži podatke o jednoj od aktivnih putanja koje prolaze kroz taj čvor):
- Za svaku putanju se pamti:
  - *Adresa odredišta*: Ne čuva se kompletna putanja (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
  - *Redni broj odredišta*: *seq* broj odredišnog čvora. Ukazuje na aktuelnost informacije o putanju
  - *Distanca*: broj preskoka do odredišta
  - *Rok trajanja*: vreme kada ističe trajanje putanje. Nakon isteka ovog vremena, putanja se više ne smatra aktivnom i mora se obnoviti. 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 (putanja) validna

ZigBee
- AODV-

- 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
    - Prostire se 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):
    - Obaveštenje o prekidu aktivne putanje, nakon otkaza nekog linka ili čvora

ZigBee
- AODV-

- Svaki čvor poseduje dve promenljive (brojača) koje 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 i tzv. *tabelu za otkrivanje putanje*. Stavke u ovoj tabeli su privremene i čuvaju se samo tokom procedure za otkrivanje putanje u kojoj učestvuje dati čvor.

ZigBee
- AODV-

- RREQ
  - Čvor A (izvor) želi da pošalje paket podataka čvoru B (odredište).
  - 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 tako što kreira i emituje poruku RREQ svim svojim susedima. RREQ poruka sadrži:
    - Adrese izvornog i odredišnog čvora (A i B),
    - Redni broj odredišnog čvora (seq, iz stavke tabele rutiranja za čvor B),
    - Redni broj izvornog čvora (A) i
    - Vrednost brojača *Broadcast_ID* (koji je upravo inkrementiran).
  - Par <izvorna adresa, *Broadcast_ID*> predstavlja jedinstveni identifikator RREQ poruke.

ZigBee
- AODV-

- Poruku RREQ primaju svi susedi čvora A
- Čvor koji primi poruku RREQ, recimo da je to čvor C, ima tri opcije kako da postupi:

1. Ignoriše poruku RREQ:
   - ukoliko je čvor C već primio istu RREQ poruku preko nekog drugog suseda. Prepoznaje se po <izvorna adresa, *Broadcast_ID*>

1. Čvor C reemituje primljenu RREQ poruku:
   - Dešava se ako 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 *seq* broja 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
   - Čvor C pravi zapis u svojoj privremenoj tabeli za otkrivanje putanje koji sadrži podatak o tome od kog suseda je C primio RREQ poruku, zajedno sa sadržajem primljene RREQ poruke
   - Prethodni zapis se koristi za filtriranje eventualnih budućih RREQ poruka (prva opcija).

3. Odgovara porukom RREP susedu od kojeg je primio RREQ poruku. To se dešava u dva slučaja:
   - Čvor C je odredište poruke RREQ: C kopira sadržaj primljene RREQ poruku u RREP poruku, i u polje za seq smešta svoj seq broj (koji je upravo inkrementirao) i brojač preskoka inicijalizuje na vrednost 1.
   - Čvor C nije odredište ali u svojoj tabeli rutiranja ima stavku za dato odredište u kojoj je seq broj veći od onog iz RREQ poruke. Čvor *C* u RREP poruku kopira seq broj i broj preskoka do odredišta iz svoje tabele rutiranja.

ZigBee
- AODV-

- **RREP**
- Poruka RREP je *unicast* tipa, tj. šalje se samo onom susedu od kojeg je prethodno stigla odgovarajuća RREQ poruka.
- 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:
  - 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.
  - 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.

ZigBee
- AODV-

- **RERR**
- Za slanje obaveštenja o prekidu prethodno uspostavljene putanja.
- Čvor koji detektuje prekid veze sa svojim susedom, poništava u tabeli rutiranja sve stavke u kojima je taj sused naveden kao sledeći skok.
- Za svaku poništenu stavku, čvor RERR poruku susedima iz liste prethodnika u toj stavci kako bi ih obavestio da prekinuta putanja više ne važi.
- Ispravnost linkova između čvorova se proverava razmenom „Hello“ poruka između susednih čvorova.
- 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.