

PROJEKTOVANJE I ARHITEKTURA ZIGBEE MREŽA

DESIGN AND ARCHITECTURE OF ZIGBEE NETWORKS

Rava Filipović, ORAO a.d. Bijeljina
Verica Vasiljević, Slobomir P Univerzitet

Sadržaj - Projektovanje i arhitektura ZigBee mreža sadrži komponente infrastrukture, koje će pomoći bežičnoj senzorskoj mreži da radi bezbjedno i pouzdano na smetnje i promjene stanja. Ovaj rad je proistekao iz smjernica ZigBee Daintree Networks.

Ključne riječi: Wireless, ZigBee, ZigBee Daintree Networks

Abstract - Design and architecture of ZigBee network includes infrastructure components that will help senzorskoj wireless network to operate safely and reliably to disturbances and changes state. This work has resulted in guidelines ZigBee Daintree Networks.

Key words: Wireless, ZigBee, ZigBee Daintree Networks

1. UVOD

Tehnologija bežičnih senzorskih mreža pruža nove i izuzetno interesantne mogućnosti prikupljanja podataka o fizičkim parametrima okruženja (temperatura, vlažnost, vidljiva i infracrvena svetlost, zvuk, vibracije, pritisak, hemijske i mehaničke promjene, elektromagnetno polje,...), što je od presudnog značaja u mnogobrojnim oblastima primjene. Različiti načini umrežavanja senzora, aktuatora, elektronskih uređaja i sistema sa svojim svojstvima u mnogome utiču na performanse sistema. Zato se tehnikama prenosa podataka koji su danas u digitalnom obliku, i mrežnim protokolima posvećuje posebna pažnja, a sve u cilju izgradnje kako robusnih tako pouzdanih platformi bežičnih senzorskih mreža (WSN¹).

2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE

Bežične senzorske mreže sa svojim raznovrsnim primjenama predstavljaju veliki potencijal za dalje unapređenje života i okoline. Jednostavne su za instalaciju u raznim uslovima, to ih čini naročito pogodnim za zatvorene (embedded) sisteme gdje predstavljaju interfejs između čovjeka i njegove okoline. Dominantni korijeni su standardi **IEEE 802.15.4** i **ZigBee** za bežično prikupljanje podataka sa senzora i upravljanje aktuatorima. Protokol ZigBee namijenjen je bežičnim senzorskim mrežama s velikim brojem **čvorova** (Sensor Node - SN), koji razmjenjuju relativno malo podataka. Čvor je elektronski uređaj, koji mjeri fizičke veličine temperaturu, pritisak, ... i konvertuje ih u signal.

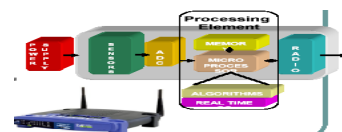


Sl.1. Struktura WSN mreže

Postavljanjem velikog broja čvorova, raspoređenih na malim rastojanjima (tipično do 10m), u samoj blizini ili unutar oblasti koja se posmatra, formira se **senzorsko polje**. Imajući u vidu da su senzorski moduli baterijsko napajani uređaji, i da je

dostupna energija od baterije ograničena, energetska efikasnost modula ima direktan uticaj na vrijeme života senzora. Kada modul prestane sa radom, ne prestaje samo njegovo prikupljanje podataka, nego mreža gubi raspoloživost modula da dalje prosljeđuje (rutira) podatke. Energetska efikasnost ima direktan uticaj na to koliko dugo će ne samo individualni senzori nego i cijela mreža uspješno funkcionisati. Čvorovi su razrudjeno rasporedjeni u senzorskom polju. Svaki čvor u stanju je da prikuplja podatke i usmjerava ih ka određištu. Strukturu pametnog senzorskog čvora (*smart sensor node*), čine sljedeća četiri osnovna gradivna bloka Sl.2.:

- **senzorska jedinica** (*sensing unit*): generator podataka,
- **radio primo-predajna jedinica** (*transceiver unit*): predaje svoje ili prosljeđuje kroz mrežu podatke koje je primio od svojih susjeda (rutira podatke),
- **jedan ili više mikroprocesora** (*processing unit*): kontrolišu rad senzora i primo-predajnika, procesiraju podatke i implementiraju mrežne protokole i protokole rutiranja,
- **jedinica za napajanje** (*power unit*): baterije, solarne ćelije.



Sl.2. Struktura senzorskog čvora

Osnovne karakteristike čvora su:

- ograničene rezerve energije,
 - male cijene izrade,
 - visoka integracija elektronskih komponenti i mogućnost autonomnog rada bez održavanja.
- Čvorovi većinu vremena "spavaju" – ne primaju i ne šalju poruke (informacije).

3. ŠTA JE TO ZIGBEE ?

ZigBee je bežični komunikacijski protokol višeg sloja, namjenjen WPAN² mrežama s malom propusnošću i malom potrošnjom energije, koje definiše udruženje kompanija pod nazivom ZigBee Alliance, temeljenih na IEEE 802.15.4

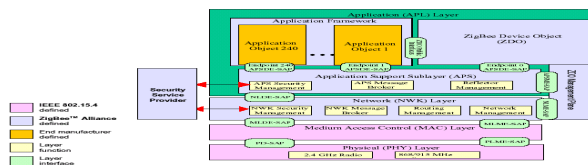
¹ WSN - Wireless Sensor Network -Bežična senzorska mreža

² WPAN -Wireless Personal Area Network -Bežična mreža kratkog dometa.

standardu. Naziv je dobio po pčelama koje lete *zig-zag* među cvjetovima tvoreći petljastu topologiju međusobno povezanih mreža (*mesh*), koja je najfleksibilniji i najrobusniji vid umrežavanja. Ciljane primjene ZigBee mreža su aplikacije za nadzor i upravljanje koje zahtijevaju umrežavanje velikog broja uređaja, prenos male količine podataka, brzina (maksimalno 250 kb/s), jednostavnost, nisku cijenu, upotreba frekvencijskih opsega bez posebnih dozvola slobodnih (nelicenciranih), malu potrošnju energije te visoku sigurnost, pouzdanost prenosa i sposobnost samoprilagodbe mreže i preusmjerenja poruka. ZigBee se temelji na IEEE 802.15.4, ali se često ova dva pojma poistovjećuju. ZigBee definiše programsko okruženje **ZigBee framework** i omogućuje raznim kompanijama jednostavnu realizaciju softvera. Primjenjuje se u kućnoj i poslovnoj automatizaciji, industrijskoj kontroli, sigurnosnim sistemima, PC periferijama, medicinskim senzorima, igračkama, itd. ZigBee se nudi kao rješenje onim korisnicima koji ne žele postati stručnjaci na području bežičnih tehnologija, nego jednostavno imaju potrebu za bežičnom mrežom koja je **pouzdana**. Takva mreža je i:

- *samo-organizirajuća (self-organizing)* čvorovi mreže imaju mogućnost detekcije novog čvora te obavljanja potrebne reorganizacije mreže u funkcionalnu mrežu s novim čvorovima bez ljudske intervencije;
- *samo-izlječiva (self-healing)* čvorovi imaju mogućnost otkrivanja greške do koje je došlo ili u nekom čvoru ili u međukomunikaciji bez ljudske intervencije;
- *sigurna* sa ugrađenim sigurnosnim mehanizmima (AES³ šifriranjem).

Osnovna zadaća ZigBee Alliance je definisanje mrežne, sigurnosne i aplikacijske arhitekture, temeljenih na globalnom otvorenom standardu. Definirani su slojevi protokola kao što je predstavljeno na Sl.3.



Sl.3. Zigbee skup protokola (Zigbee stek)

4. ARHITEKTURA ZIGBEE PROTOKOLA

Arhitekturu Zigbee protokola čine tri sloja:

- **Fizički sloji i sloj veze (definisan sa IEEE 802.15.4)** - Osnovno adresiranje, kontrola medija (odašiljanje),
- **ZigBee stog (stack)** - Umrežavanje (razne topologije), proslijeđivanje poruka, zaštita podataka (autentifikacija, šifriranje, razmjena ključeva),
- **Aplikacije** - Koriste usluge mreže za svoj rad, daju funkcionalnost čvoru, jedan čvor može sadržavati više aplikacija.

IEEE 802.15.4 standard definiše dva najniža sloja:

- **PHY (Physical)** sloj pruža podršku za fizički radio i ima dva podsloja koji rade na različitim frekvencijama: 868MHz (Evropa) / 915 MHz (SAD, Australija), 2.4 GHz – širom svijeta,
- **MAC (Medium Access Control)** sloj kontrolira pristup radio kanalu koristeći CSMA-CA⁴ mehanizam, emituje signalne ramove, obavlja sinhronizaciju, obezbjeđuje **pouzdan prenos**.

³ Advanced Encryption Standard

⁴ CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) – višestruki pristup sa osluškivanjem nosioca i izbjegavanjem kolizija.

ZigBee Alijansa definiše NWK (Network) sloj i APL (Application) sloj. Mrežni sloj je zadužen za pravilno formiranje mrežne topologije, konfiguriranje uređaja, uključivanje i isključivanje čvora s mreže, dostavljanje poruke pravom odredištu, pravilno adresiranje, otkrivanje susjeda i pravih puteva između dva čvora, proslijeđivanje i primanje podataka od aplikacijskog i MAC sloja. Aplikacijski sloj je zadužen za ispravnu komunikaciju između aplikacija koje koriste ZigBee mrežu kao sredstvo komunikacije među čvorovima. Sastoji se od tri podsloja:

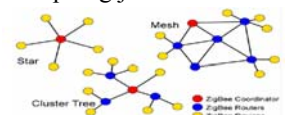
- **APS (Application Support) podsloj** predstavlja interfejs između NWK i APL sloja,
- **AF (Application Framework) podsloj** je okruženje u kojem su smješteni aplikacioni objekti,
- **ZDO (ZigBee™ Device Objects) podsloj** otkriva uređaje u mreži, započinje i/ili odgovara na zahtjeve za povezivanje, uspostavlja sigurnosne veze među uređajima u mreži i ima:
 - ZigBee Coordinator ZC,
 - ZigBee Ruter ZR,
 - ZigBee End Device ZED.

Svaka ZigBee mreža mora imati samo jednog **kordinatora**, čiji je zadatak: uspostavljanje mreže, dodjeljivanje mrežnih adresa čvorovima, briga za sigurnost i ispravnost razmjene podataka između čvorova. Sav promet se odvija preko ovog čvora i na njemu je implementiran cijeli ZigBee skup protokola. **Ruter** nije obavezan uređaj u mreži, njegovo dodavanje u mrežu omogućava povezivanje većeg broja čvorov i samim tim povećavate domet mreže. On proslijeđujući podatke između drugih *rutera*, *krajnjih uređaja (Zigbee End Device)* i *koordinatora*. **Krajnji uređaj** je uređaj koji komunicira s okolinom.

5. TOPOLOGIJE ZIGBEE MREŽE

ZigBee mreža podržava sljedeće topologije Sl.4.:

- *zvijezda (star);*
- *klaster (cluster, grozd) i*
- *mreža (mesh).*



Sl.4. topologije ZigBee mreža

Topologija mreže - **zvijezda**, mrežu kontrolira jedan uređaj ZigBee koordinator, svi ostali uređaji su krajnji uređaji. ZigBee koordinator inicijalizuje i upravlja uređajima u mreži. Krajnji uređaji međusobno komuniciraju posredstvom ZigBee koordinatora. **Klaster** topologija u kojoj su čvorišta uglavnom uređaji, koji imaju po nekoliko listova ispod sebe. Postoje dva tipa čvora: **potpuno funkcionalan** full-function device (FFD) može da radi i kao koordinator i kao običan i **redukovani** reduced-function devices (RFD) ekstremno pojednostavljeni sa ograničenim resursima i komunikacionim zahtjevima, mogu da komuniciraju samo sa FFD i ne mogu da budu koordinatori. Topologija **mesh** slična topologiji stabla, veze su gušće, a mreža otpornija na smetnje. Implementacija ovakve topologije zahtjeva mnogo više memorijskog prostora. U topologiji međusobno povezanih mreža svi uređaji mogu neposredno međusobno komunicirati, ako su jedno drugom u dometu. Glavna odlika im je povezivanje čvorišta preko više putanja, zbog čega su vrlo **efikasne i robusne**, a standardizacijom je omogućeno korišćenje komponenata različitih proizvođača, što je rezultat međusobne **kompatibilnosti**. **Hardversko softverski razvojni sistem sa senzorom**: Softver je projektovan tako da se lako koristi na malim, jeftinim procesorima. ZigBee je pažljivo optimiziran za nisku cijenu u velikim proizvodnjama. Većina proizvođača planira integraciju radija i procesora unutar jednog jedinog čipa Sl.5.



Sl.5. 2.4 GHz Zigbee mrežni procesor

6. SMJERNICE ZIGBEE DAINTREE NETWORKS

Osnovne smjernice prezentacije "Projektovanje i arhitektura ZigBee Networks" od strane predavača MC Smit odnose se na formulisanje i sprovođenje ZigBee strategije tehnologija Daintree Networks⁵ kompanije. Na Sl.6. prikazana je primjena ZigBee tehnologije: u kućnoj i poslovnoj automatizaciji, industrijskoj kontroli, sigurnosnim sistemima, PC periferijama, medicinskim sensorima, igračkama.



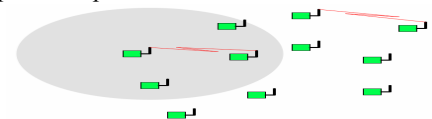
Sl.6. Primjena ZigBee tehnologije

Najavljena poboljšanja, *ZigBee-* za kućnu upotrebu i potrošačku elektroniku i *ZigBee Pro-* veća sigurnost, naprijeđen mehanizam preusmjerenja poruka, su stavljena na raspolaganje aplikativnim programerima. ZigBee je standardan protokol koji reguliše saradnju, a ne kompletnu specifikaciju ponašanja uređaja. **Interoperabilnost** ZigBee podrazumijeva sposobnost za zajednički rad različitih sistema od različitih proizvođača. ZigBee mreže imaju različite mehanizme **pouzdanosti i sigurnosti** koji imaju za cilj da obezbjede pouzdan rad mreže:

- **Selekcija kanala:** Nakon instaliranja ZigBee mreže za komunikaciju se bira onaj kanal koji je najmanje opterećen.
- **Osluškivanje prije slanja:** Da bi se izbjegli konflikti prilikom slanja poruka (različite poruke se prenose preko istog kanala u isto vrijeme), pre no što otpočne sa slanjem poruke, čvor osluškuje kanal. Tek pošto se uvjeri da se kanalom ne prenosi nikakva poruka, čvor otpočinje slanje poruke. U suprotnom, čvor čeka neko vrijeme i ponovo vrši osluškivanje kanala.
- **Kodiranje podataka:** Obavlja se sa ciljem da se poveća vjerovatnoća da poruka bude prenijeta do odgovarajućeg čvora, čak i u slučaju konflikta prilikom prenosa.
- **Potvrđivanje (acknowledgement):** Kad prijemni čvor primi poruku on predajnom čvoru šalje potvrdu da je poruka primljena. Ako predajni čvor ne primi poruku potvrde u određenom vremenskom intervalu, vrši ponovno slanje originalne poruke. Ova procedura se može ponoviti nekoliko puta, sve dok predajni čvor ne dobije poruku potvrde.
- **Određivanje putanje poruke:** ZigBee mreže mesh topologije imaju ugrađene algoritme pomoću kojih pronalaze alternativne putanje za slanje poruka između dva čvora, za slučaj da se default-nom putanjom poruka ne može prenijeti.
- **Bezbednost podataka** koji se prenose ZigBee mrežom osigurana je 128-bitnim AES (Advanced Encryption Standard) baziranim enkripcijama podataka. Zahvaljujući ovim mehanizmima pouzdanosti i sigurnosti ZigBee mreže

funkcionišu na istom prostoru i na istim RF⁶ opsezima kao i druge mreže bazirane na istim ili različitim standardima.

Razmatranja vezana za projektovanje sistema bila su usmjerena na pitanje koliko aplikacija može koristiti ZigBee? Sve zavisi kako će mreža izgledati. Preporuka projektantima je da treba da razmotre očekivan raspored u smislu očekivanja rastojanja između radija i očekivanja gustine mreže proizvođača. Ako mreža treba da sadrži mobilne uređaje, onda to treba pažljivo razmotriti. *Povećanje dimenzija mreže* nepovoljno utiče na pouzdanost, preciznost rada senzora i efikasnost algoritama za obradu podataka i samoorganizovanje bežičnih senzorskih mreža. Maksimalno rastojanje na kome dva čvora u mrežu uspješno mogu da komuniciraju zavisi od **okruženja**. Na otvorenom prostoru ovo rastojanje je najveće. U zatvorenom prostoru, usljed apsorpcije, refleksije i difrakcije radiotalasa ovo rastojanje se smanjuje. Maksimalni domet komunikacije zavisi od hardverske izvedbe i od snage radiotalasa. Što se tiče **raspona i pouzdanosti** uočeno je za svaki izgled uređaja u datom opsegu, jednom je prirodno očekivati da neki uređaji mogu da komuniciraju jasnije i pouzdanije nego drugi put, a što se odražava i na performanse mreže. Veze koje su prilično dobre u jednom smjeru mogu biti nepouzdanе ili skoro beskorisne u drugom smjeru. Takođe je primjećeno da, u mjeri u kojoj ovi efekti koreliraju sa daljinom, oni postaju primjetno uočljivi i ukratko ocjenjeni kao "idealni" opseg radio prijemnika. Pored toga, ono što može nazvati *pouzdanim opsegom* uređaja će zavistiti ne samo na performanse radija, ali i na dizajn hardvera, uključujući pakovanja, dizajna antena i PC-a izgleda kao i materijala u okruženju okoline. *Pouzdanost* se definiše u smislu pouzdanosti dostavljanja paketa i/ili informacije o događaju, kao i pouzdanosti u smislu dostavljanja paketa odgovarajućem skupu čvorova, zavisno od primjene. **Tolerancija na otkaze** predstavlja sposobnost bežične senzorske mreže da nastavi nesmetano da obavlja svoje funkcije bez obzira na prekid rada pojedinih čvorova. Nestanak energije ili oštećenje čvora, uticaj interferencije i efekata pri prenosu signala i prelaz čvora u neaktivno stanje, predstavljaju osnovne uzroke otkaza. Poenta je stavljena na **ublažavanje**, ako se očekuje promjena rastojanja između uređaja suviše velika da obezbjedi raznolikost veza, najbolja rješenja su da povećate pouzdan izbor radija koristeći različite antene dizajna ili bilo pojačanja na prenos strane, povećanje izlazne snage, ili na prijemu strane da se poveća osjetljivost. **Gustina** je faktor koji utiče na pouzdanost mreže. Sl.7. prikazuje dobru gustinu mreže u kojoj se može posmatrati broj uređaja po jedinici oblasti. U ovom slučaju, svaki uređaj ima nekoliko drugih uređaja unutar opsega, ali prenos je sa jednog uređaja na cijelu mrežu i, kao što je prikazano, uređaji izvan dometa jedni druge mogu komunicirati, čime se promoviše ono što je poznato kao *prostorno ponovo upotreba*.



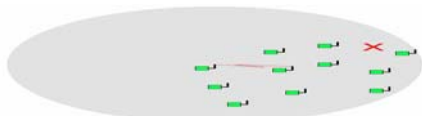
Sl.7. Dobra gustina mreže

Povećanjem gustine rasporeda čvorova poboljšava se pokrivanje (coverage). **Konektivnost** mreže definisana je mogućnošću ostvarivanja komunikacije između svaka dva elementa mreže. Velika gustina čvorova u senzorskom polju obezbjeđuje visoku konektivnost svih čvorova. Ipak, promjenljivost topologije, prelasci između aktivnog i neaktivnog stanja čvora i otkaz čvora izazivaju promjenu

⁵ Daintree je aktivni član ZigBee saveza, i njihov Sensor Network Analyzer (SNA) ZigBee Alijansa koristi za sertifikaciju proizvoda. Kompanija je vodeći provajder softverskih rješenja za razvoj i rad ugrađene bežične senzorske mreže i kontrole na osnovu ugrađenih bežičnih tehnologija

⁶ RF - Radio frequency

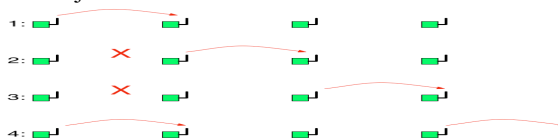
osobina konektivnosti u bežičnim senzorskim mrežama. Konektivnost mreže u velikoj mjeri utiče na zahtjeve pri realizaciji komunikacionih protokola i procesa agregacije podataka u mreži. Sl.8. pokazuje isti opšti izgled uređaja, ali u ovom slučaju, pouzdan opseg, svaki uređaj u osnovi pokriva cijelu mrežu. Ovdje samo jedan par uređaja mogu da komuniciraju u svakom trenutku.



Sl.8. Loša gustina mreže

Za guste mreže, obaranje snage smanjenjuje broj drugih uređaja koji su "pokrivenih" od jednim prenosom može biti bolja varijanta. U zavisnosti od gustine i rasporeda čvorova u prostoru, kao i karakteristika korišćenih senzora, ostvaruje se potpuno ili nepotpuno pokrivanje posmatrane oblasti u smislu mogućnosti prikupljanja informacija o posmatranim fenomenima. **Korišćenje** je važno kao korišćenje ovdje podrazumjevano propusnosti, kao i obrasci komunikacija koji će biti u upotrebi. Brzina i protok zavisi od tačnog sastava podataka okvira, kako u smislu korišćenja protokola i količine podataka u okviru, ali je sigurno da, u prosjeku, samo polovina od bilo koje poslate poruke, koristeći ZigBee, sadrži *korisne podatke*. Mrežni protokoli za bežične senzorske mreže moraju omogućiti umrežavanje velikog broja uređaja, visoku robusnost, malu potrošnju energije, te mali overhead u prenosu podataka. **Potrošnja** je problem trošenja rezervi energije i smanjenje vremena života mreže. Komunikacija je najveći potrošač energije, te se najveći dio procesorskog vremena potroši na obradu komunikacije. Važan cilj ZigBee IEEE 802.15.4 standarda je proizvodnja autonomnih uređaja koji malo troše energije. Ovi uređaji su napajani iz internog izvora kao što su baterije ili solarne ćelije, zato nije potreban vanjski izvor energije kao što je napojni kabal. Potrošnja energije ovih uređaja mora se pažljivo projektovati da bi se postigla optimalna upotreba veoma ograničenih izvora energije. **Mali odnos vremena aktivnosti** (duty cycle) - potrošnja energije bežičnih uređaja najviše zavisi od vremena u kojima su oni aktivni (predaju ili primaju) ili neaktivni. Omjer vremena kada je uređaj aktivan sa vremenskim intervalom između dva aktivna stanja zove se *ciklus aktivnosti*. Potrošnja je optimizirana korištenjem ekstremno mali ciklusa aktivnosti, tako da je uređaj aktivan samo mali dio vremena. Ovo se postiže tako što je vrijeme predaje/prijema kratko, a interval između predaje/prijema veoma dug. **Režim rada mirovanja (sleep mode)** je onaj u kome uređaj ne predaje ili ne prima uz minimalnu potrošnju energije. **Trajanje baterije** poželjno je da krajnji ZigBee uređaji koriste baterije, što je vrlo isplativo budući da im je potrošnja vrlo mala. Mijenjale bi se vrlo rijetko, jednom u nekoliko mjeseci ili godina. Ukoliko su krajnji uređaji zaduženi za nadzor, očito je da će veći dio vremena biti neaktivni (neaktivan režim rada). Kada detektuju traženo stanje, šalju signal dojavu do središnjeg uređaja. Druga mogućnost je da se krajnji uređaji aktiviraju u tačno određenim trenucima koje propisuje centralni uređaj i tada obavljaju zadane aktivnosti. Na takvim se mehanizmima temelji smanjenje potrošnje koje kod drugih standarda zbog njihove osnovne namjene i implementacije nije moguće. Broj čvorova u mreži kod ZigBee koncepta trebao bi biti velik jer ZigBee zapravo nudi jedinstven interface iza kojeg se nalaze nadzirani ili kontrolisani uređaji. **Propusnost** kod ZigBee standarda je daleko manja nego kod drugih. Ovo je u potpunosti u skladu s osnovnom namjenom ZigBee uređaja i osnovnim zahtjevima koji moraju biti zadovoljeni kod izrade uređaja i dizajna

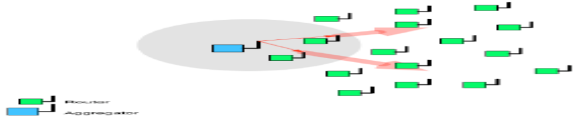
topologije mreže, te podešavanja performansi. Domet uređaja (snaga) zapravo i nije detalj koji daje prednost nekom od rješenja. Cilj ZigBee mreže je zamijeniti infracrvene uređaje sa uređajima koji rade u liniji vidljivosti (LOS line-of-sight) kojih tipično u mreži ima vrlo velik broj, te pružiti korisniku jedinstven i jednostavan interfejs za korištenje prema sistemu izuzetno male početne cijene, cijene održavanja i male potrošnje energije. Dalje, postoji malo suptilnija tačka rada međusobno uvezanih mreža (mesh). Sl.9. pokazuje 4 vremenske tačke u *hipotetičkoj mreži*. Saobraćaj počinje sa lijeve strane mreže i da je preneo pravo na maksimalnu stopu na raspolaganju. Nakon prenošenja rama u koraku 1, uređaj na lijevom kraju lanca mora da sačeka na korak 4 prenosi sljedeći ram, jer se blokira prenos u koracima 2 i 3 od aktivnosti u blizini uređaja.



Sl.9. Vremenske odrednice hipotetičke mreže

Jedan ka svima **broadcast** je važan način komunikacije, kao i skup protokola koji se koriste za emitovanje. Oba sloja i APS sloj u ZigBee, koriste broadcast u u operaciji otkrivanju putanja i usluga. Broadcast se ne koristi na NWK ili APS sloju. Razlozi za ovo bi trebalo da budu očigledni, ali to znači da primarni mehanizam kojim pošiljaoca poruka je sigurna da je poruka primljena je uklonjen. U odsustvu ovog mehanizam, projektanti mrežnog sloja pokušali su da osiguraju da svaki ruteri u mreži prima, odnosno korišćenja reemitovanje. Broadcast treba da se koristi oprezno i izbjegavati gde god je to moguće. Ovo uključuje broadcast koji se koristi na nižim slojevima. Tehnike za smanjenje ili izbjegavanje broadcast prometa je agregacija rutiranja: 2007 verzija je ZigBee specifikacija koja opisuje funkciju poznatu kao *agregacija rutiranja*. **Aggregacija podataka** prikupljanje senzorskih podataka u bežičnim senzorskim mrežama predstavlja sistematski proces sakupljanja rezultata senzorskih mjerenja velikog broja čvorova, i njihovo dostavljanje ka kordinatoru. Zavisno od primjene i broja senzora mreže, generiše se izuzetno veliki broj podataka koje treba prenijeti kroz mrežu korišćenjem energetski ograničenih resursa čvorova. Podaci prikupljeni od strane bliskih čvorova često su redundantni i veoma korelisani. Zbog zahtjeva energetske efikasnosti i sprečavanja zagušenja mreže koje nastaje usljed konvergencije prenosa ka kordinatoru, nije isplativo prenošenje podataka generisanih od strane svih čvorova. Iz navedenih razloga, nad podacima dobijenim od više čvorova, a pri njihovom prolasku kroz mrežu, primjenjuju se metodi za agregaciju podataka, čime se dobija znatno kvalitetnija informacija. Na ovaj način se smanjuje broj paketa koji se prenose ka kordinatoru i štede energija i komunikacioni resursi mreže. Realizacija procesa agregacije podataka usko je povezana sa procesom rutiranja paketa kroz bežičnu senzorsku mrežu, pri čemu ova dva procesa imaju izuzetno veliki uticaj na energetske efikasnost komunikacije i dužinu života mreže. Kašnjenje pri prenosu podataka mjerenja u određenim primjenama bežičnih senzorskih mreža predstavlja kritičan parametar, pa se o tome mora voditi računa i u procesu agregacije podataka. Osim toga, agregacije podataka mora se obavljati na takav način da se ne izgube važne informacije o pojavi koja se nadgleda. Zajednički komunikacioni model u kome svaki uređaj u mreži komunicira redovno sa jednim uređajem, poznat kao kordinator. Da bi kordinator bio generalno dostupan, svaki ruter u mreži mora da ima unos za njihovo usmjeravanje ka kordinatoru. Za velike

mreže, to znači da isti agregator mora biti otkriven mnogo puta, i ako broj rutera pokušavaju da otkriju agregator u isto vreme, usledi broadcast oluja može izazvati rute otkrića da propadne ili da proizvedu pod-optimalna ruta. 2007 specifikacija predlaže ZigBee Pro usvaja skup funkcija rutiranja izvora, gdje kompletna linija za svaki uređaj sa kojim se očekuje da su upisani u agregator i smješteni u odlaznom ramu zajedno sa podacima. Posredni ruteri nemaju informacije sve o ruti ovog rama. Kao dodatna prednost, izvor rute su otkriveni pomoću komande Unicast za ramove koji se ne emituju. Rješenje za ovaj problem je ZigBee skup funkcija, za korišćenje hijerarhijskog rutiranja Sl.10..



Sl.10. Ograničeno rutiranje iz agregatora

Vrijeme života mreže - čvorovi su malih dimenzija i raspolažu ograničenom rezervom električne energije, tipično baterijskim napajanjem (npr. 0,5Ah, 1,2V). U opštem slučaju nije moguća zamjena izvora energije, već usljed nestanka energije dolazi do prestanka rada čvorova. Otkaz pojedinih čvorova u okviru bežične senzorske mreže izaziva značajne promjene topologije i zahtjeva ponovno rutiranje paketa i reorganizaciju mreže. Iz ovog razloga, očuvanje i upravljanje potrošnjom energije predstavlja jedan od osnovnih zahtjeva pri razvoju ZigBee protokola, algoritama i uređaja za WSN. Energija se u okviru čvorova troši za rad senzora, komunikaciju i obradu podataka. Zavisno od primjene, vrijeme života mreže može da bude reda veličine od nekoliko sati do nekoliko godina, čime se implicitno zadaju zahtjevi u smislu energetske efikasnosti. Osnovni zahtjev od uređaja u bežičnim senzorskim mrežama jeste visoki stepen autonomije što bi značilo dug radni vijek iz baterijskog napajanja. Tolerancija na otkaze predstavlja sposobnost bežične senzorske mreže da nastavi nesmetano da obavlja svoje funkcije bez obzira na prekid rada pojedinih čvorova. **Mobilnost** u primjenama bežičnim senzorskim mrežama javlja se aktivna ili pasivna. Pasivna mobilnost čvora je rezultat prirodnih činilaca (vjetar, voda, ...) ili neplaniranog pomjeranja objekta na kojima se nalaze čvorovi. Aktivna, planska mobilnost se ostvaruje u cilju smještanja čvorova u oblasti od interesa, radi boljeg pokrivanja, ostvarivanja energetske efikasnosti, otklanjanja nedostataka početnog rasporeda ili praćenja pojava koje predstavljaju cilj rada bežičnih senzorskih mreža. S druge strane, mobilnost čvorova izaziva promjenu topologije i strukture saobraćaja u mreži, i postavlja dodatne probleme protokolima MAC sloja i rutiranja. Osim mobilnosti čvorova, može se posmatrati i mobilnost kordinatora. Kroz čvorove koji su najbliži stacionarnom kordinatoru platformi, prolazi cjelokupan saobraćaj između kordinatora i svih čvorova u mreži. Ovi čvorovi veoma brzo gube energiju i prestaju sa radom, usljed čega dolazi do razdvajanja kordinatora od ostatka mreže. Primjenom mobilne kordinator platforme sa kretanjem po obodu mreže, potrošnja energije se ravnomjernije raspoređuje na sve čvorove. Kako bi se postigla još veća energetska efikasnost, kordinator se može kretati kroz senzorsko polje i prikupljati podatke mjerenja koje čvorovi čuvaju do dolaska kordinatora u njihovu blizinu. Ako primjena bežične senzorske mreže to dozvoljava, moguće je planirati trajektorije kretanja kordinatora, pri čemu neki čvorovi, sabirne tačke, prikupljaju podatke iz mreže i predaju ih kordinatoru kada se ovi nađu u njihovoj blizini. **Skalabilnost** zavisno od primjene bežične senzorske mreže, broj čvorova koji se koristi u nekoj oblasti može da bude reda 100, 1000, 10000, pa i više

stotina hiljada u ekstremnim slučajevima. Postavljanjem čvorova na malom međusobnom rastojanju ostvaruje se bolje pokrivanje teritorije uslugom senzora, kao i smanjivanje potrošnje energije prilikom komunikacije. Pri radio prenosu, neophodna snaga signala na predaji raste sa povećanjem rastojanja između predajnika i prijemnika i to, zavisno od okruženja, sa drugim do četvrtim stepenom rastojanja. **Hardverska i softverska ograničenja** - tipična realizacija čvorova ima značajna hardverska i softverska ograničenja. Multifunkcionalne platforme čvorova odlikuju veoma ograničeni memorijski kapaciteti, male procesorske snage i ograničena energija. **Topologija i samoorganizovanje** pri realizaciji bežičnih senzorskih mreža primjenjuje se veliki broj čvorova u okviru senzorskog polja, sa velikim gustinama čvorova po jedinici površine, npr. 20 čvorova/m², a dimenzije bežične senzorske mreže su veoma male, reda desetak metara. Primjena brojnih, gusto postavljenih čvorova, zahtjeva pažljivo održavanje topologije mreže. Mogu se uočiti faze prije i za vrijeme postavljanja mreže, faza nakon postavljanja mreže i faza dopune/unapređenja mreže. Do promjena topologije u drugoj fazi dolazi usljed promjene pozicije, nedostupnosti, i otkaza čvorova. U trećoj fazi, usljed promjene primjene mreže ili dinamike pojave koja se nadgleda, dolazi do promjena topologije dodavanjem novih ili zamjenom neispravnih čvorova. Jedno rješenje bežične senzorske mreže mora da sadrži mehanizme za uspostavljanje i samoorganizovanje u fazi postavljanja, kao i rekonfiguracije, održavanja ispravnog rada i željene strukture mreže pri promjenama topologije. Po prestanku rada čvorova, mreža mora da se rekonfigurira, pri čemu mora da se održi visok nivo konektivnosti. **Ekonomičnost rješenja** primjene bežičnih senzorskih mreža predviđa izuzetno veliki broj čvorova. Pri razvoju komunikacionih i upravljačkih protokola, algoritama obrade podataka i primjena bežičnih senzorskih mreža, mora se voditi računa da cijena pojedinačnog čvora mora da bude veoma mala. Da bi upotreba bežične senzorske mreže bila ekonomski isplativa, cijena uređaja mora da bude manja od cijene uređaja drugih bežičnih tehnologija. Zahtjevi u smislu potrošnje energije, procesorske snage i komunikacionih mogućnosti moraju da se prilagode tehnologijama izrade i cijeni raspoloživih rješenja. **Radno okruženje i medijum prenosa** elementi bežične senzorske mreže postavljeni su u neposrednoj blizini ili unutar oblasti u kojoj se ispoljava posmatrana pojava. Rad čvora se često odvija bez mogućnosti održavanja i/ili u nedostupnim oblastima. Čvorovi mogu da se nalaze u veoma nepovoljnom radnom okruženju, hemijski i biološki zagađenom, unutar mašina ili iza neprijateljskih linija. Za potrebe komunikacije najčešće se razmatra primjena radio prenosa, korišćenjem nelicenciranih opsega učestanosti.

7. UMJESTO ZAKLJUČKA

U prethodnom, navedene su neke od osobina projektovanja i arhitekture pouzdanih i stabilnih ZigBee Daintree mreža, koje isporučuju interoperabilnost i lakoću korišćenja. Problem koji nastaje pri prelasku sa *teorijskog* na *eksperimentalni* rad se nalazi u odstupanju idelanih modela i potreba za prilagodavanjem algoritama stvarnim fizičkim uslovima.

8. LITERATURA

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
2. <http://www.daintree.net>
3. <http://www.ZigBee.org>
4. <http://www.ieee802.org/15>