



**УНИВЕРЗИТЕТ
У НИШУ**

**Универзитетска
Библиотека
"Никола Тесла"**

**UNIVERSITY
OF NIŠ**

**University
Library
"Nikola Tesla"**



**ДИГИТАЛНИ
РЕПОЗИТОРИЈУМ
УНИВЕРЗИТЕТА
У НИШУ**

**Библиотека
Дисертације**

**DIGITAL
REPOSITORY
OF THE UNIVERSITY
OF NIŠ**

Ph.D. Theses

UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET

Milica D. Jovanović

**VIŠEKANALNI MAC PROTOKOLI ZA
BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE**

-magistarska teza-

Niš, 2011.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE	5
2.1. <i>Oblasti primene bežičnih senzorskih mreža</i>	6
2.2. <i>Arhitektura senzorskog čvora</i>	9
2.3. <i>Radio primopredajnici</i>	10
2.4. <i>Komunikaciona arhitektura bežične senzorske mreže</i>	11
3. MAC PROTOKOLI	13
3.1. <i>Osnovi bežičnih MAC protokola</i>	14
3.1.1. <i>Klasifikacija bežičnih MAC protokola</i>	16
3.2. <i>MAC protokoli za bežične senzorske mreže</i>	18
3.2.1. <i>Zahtevi pri dizajniranju MAC protokola za bežične senzorske mreže</i>	18
3.2.2. <i>Ustupci pri dizajniranju MAC protokola za bežične senzorske mreže</i>	23
3.3. <i>Postojeći MAC protokoli za bežične senzorske mreže</i>	23
3.3.1. <i>Protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu</i>	24
3.3.2. <i>Protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom</i>	27
3.3.3. <i>Protokoli sa semplovanjem preambule</i>	31
3.3.4. <i>Hibridni protokoli</i>	35
4. VIŠEKANALNI MAC PROTOKOLI	41
4.1. <i>Višekanalna komunikacija u bežičnim mrežama</i>	42
4.2. <i>Višekanalna komunikacija u bežičnim senzorskim mrežama</i>	45
4.3. <i>Višekanalni MAC protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu</i>	47
4.3.1. <i>TMMAC</i>	47
4.3.2. <i>HyMAC</i>	48
4.3.3. <i>MC-LMAC</i>	49
4.4. <i>Višekanalni MAC protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom</i>	51
4.4.1. <i>MMSN</i>	51
4.4.2. <i>SMC</i>	53
4.5. <i>Hibridni višekanalni MAC protokoli</i>	54
4.5.1. <i>Y-MAC</i>	54
4.5.2. <i>TMCP</i>	56
5. TFMAC	57
5.1. <i>Motivacija</i>	57
5.2. <i>Zahtevi</i>	59

5.3.	<i>Režimi rada</i>	59
5.4.	<i>Aktivni režim</i>	61
5.4.1.	Organizacija vremena	61
5.4.2.	Organizacija frejma	63
5.4.3.	Priključivanje novog čvora	64
5.4.4.	Otkaz čvora	65
5.5.	<i>Inicijalizacija</i>	65
5.5.1.	Faza pronalaženja suseda	66
5.5.2.	Faza dodele LID-ova i prijemnih kanala	66
5.5.3.	Faza dodele predajnih slotova	67
6.	REZULTATI SIMULACIJE	69
6.1.	<i>Simulacioni model</i>	69
6.2.	<i>Simulacija režima inicijalizacije</i>	71
6.3.	<i>Simulacija aktivnog režima</i>	79
7.	ZAKLJUČAK	85
8.	LITERATURA	87

1. UVOD

Motivacija

Bežična senzorska mreža (engl. *Wireless Sensor Network* - WSN) je skup velikog broja prostorno razuđenih senzorskih čvorova koji imaju sposobnost samoorganizacije u multihop bežičnu mrežu. Čvorovi međusobno saraduju na prikupljanju podataka i vrše detektovanje događaja i obradu i prenos podataka. Napredak u poluprovodničkoj tehnologiji je omogućio konstruisanje jeftinih, baterijski napajanih bežičnih senzorskih čvorova, koji se, po pravilu, sastoje iz jednog integrisanog kola, sa ugrađenim procesorom, memorijom i primopredajnikom malog dometa. Bežične senzorske mreže su tehnologija u razvoju, sa brojnim potencijalnim primenama (nadgledanje okoline, medicinski sistemi, vojne primene, građevinarstvo...) [1][2][3].

Bitna karakteristika bežičnih senzorskih mreža je da je nemoguće, ili bar nepraktično menjanje ili dopuna baterija senzorskih čvorova, tako da je glavni cilj u njihovom projektovanju da se maksimalno produži životni vek (tj. maksimalno smanji potrošnja energije) dok su ostale performanse obično u drugom planu. Pošto se na komunikaciju troši značajno više energije nego na procesiranje podataka, glavni cilj prilikom projektovanja bežične senzorske mreže je maksimalno smanjenje komunikacije.

MAC (prema engl. *Medium Access Control*) je komunikacioni protokol za upravljanje pristupom medijumu. MAC protokol je podnivo u sloju veze OSI referentnog modela, a njegov osnovni zadatak je koordinacija pristupa i transmisija u komunikacionom medijumu koji je zajednički za više čvorova. Bežični komunikacioni medium je difuznog karaktera, što znači da pri jednovremenom emitovanju dva ili više bliskih čvorova (odnosno čvorova na međusobnom rastojanju koje je manje od RF dometa predajnika) neizbežno dolazi do interferencije njihovih transmisija. Interferencija dovodi do kolizije paketa, odnosno do gubitka podataka koji se šalju. Zadatak MAC protokola je uvođenje "reda" u emitovanju, kako bi se minizovala interferencija i predupredile kolizije paketa. MAC protokoli za bežične senzorske mreže obično postižu energetske efikasnost po cenu izvesnog pogoršanja komunikacionih performansi (kašnjenja i propusne moći) i pri tom obezbeđuju *ad-hoc* proširenje mreže novim čvorovima i adaptivnost na promene topologije mreže. Generalno, MAC protokoli postižu energetske efikasnost redukujući potencijalne gubitke energije čiji uzroci mogu da budu: pasivno slušanje, kolizija paketa, preslušavanje (nepotreban prijem „tuđih“ poruka), višak saobraćaja zbog kontrolnih paketa, bespotrebno emitovanje i nagle promene u intenzitetu saobraćaja [4][5].

Pasivno slušanje je glavni uzrok energetske neefikasnosti konvencionalnih MAC protokola za bežične mreže, kao što je IEEE 802.11 [6]. Kod ovih protokola, primopredajnik mora biti neprekidno uključen, kako se ne bi desilo da čvor propusti poruku koja mu je poslata. Međutim, u većini primena bežičnih senzorskih mreža saobraćaj je promenljivo intenziteta, sa kratkim periodima intenzivnog saobraćaja i drugim periodima bez ikakvog ili sa saobraćajem veoma niskog intenziteta. S obzirom da savremni primopredajnici male snage, kakvi se primenjuju u bežičnim senzorskim mrežama, troše približno istu energiju na prijemu kao i na predaji [7][8], primena konvencionalnih MAC protokola u bežičnoj senzorskoj mreži dovela bi do značajnog gubitka energije samo na pasivno slušanje. U cilju racionalnog korišćenja raspoložive energije, primopredajnici u bežičnim senzorskim mrežama prelaze u režim smanjene potrošnje (odnosno uspravljaju) na što je duži mogući vremenski period, a vraćaju se u aktivni režim (odnosno bude) samo u kratkim vremenskim

intervalima kada treba da komuniciraju sa susedima. Tipično, radni ciklus primopredajnika (odnos između vremena koje čvor provodi u režimu smanjene potrošnje i u aktivnom režimu) iznosi od 1:10 do 1:100. Pošto čvorovi mogu da komuniciraju samo dok su njihovi primopredajnici uključeni, glavni zadatak MAC protokola je usaglašavanje aktivnih perioda rada čvorova, što se postiže na tri načina: semplovanjem preambule [9][10], uvođenjem zajedničkog aktivnog perioda [11][12][13] ili uvođenjem vremenskog rasporeda [14][15]. Kod MAC protokola sa semplovanjem preambule, predajnik pre emitovanja podataka, emituje preambulu čije je trajanje jednako trajanju perioda režima smanjene potrošnje prijemnika. Prijemnik se periodično aktivira da bi na kratko detektovao prisustvo signala u medijumu. Ukoliko ne detektuje signal, prijemnik se vraća u režim smanjene potrošnje; u suprotnom, prijemnik ostaje u aktivnom režimu sve dok ne primi kompletnu poruku. Rad MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom zasnovan je na sinhronizovanom periodičnom aktiviranju svih čvorova u mreži. U prvom delu aktivnog perioda, potencijalni predajnici se nadmeću za pravo pristupa medijumu (primenom nekog od mehanizama za nadmetanje u bežičnoj mreži, kao što je CSMA ili RTS/CTS). Čvorovi koji izbere pravo na prenos podataka ostaju u aktivnom režimu i nakon isteka vremena predviđenog za nadmetanja, dok preostali prelaze u režim smanjene potrošnje do početka sledećeg aktivnog perioda. Kod MAC protokola koji su zasnovani na vremenskom rasporedu, kanal se deli među čvorovima u vremenskom domenu (kreiranjem TDMA rasporeda). Vreme je podeljeno na frejmove sa fiksnim brojem vremenskih slotova, a svakom čvoru je dodeljen jedan slot u frejmu za emitovanje poruka. Raspored slotova po čvorovima je takav da garantuje komunikaciju bez kolizija.

Zahvaljujući radnom ciklusu sa dugim periodima smanjene potrošnje, MAC protokoli za bežične senzorske mreže smanjuju potrošnju energije za 10 do 100 puta u odnosu na konvencionalne MAC protokole. Međutim, energetska efikasnost se postiže na račun pogoršanja komunikacionih performansi, tako da se maksimalna propusna moć smanjuje i kašnjenje povećava u približno istom odnosu u kome je smanjena potrošnja energije. Na primer, u bežičnoj senzorskoj mreži kod koje je uštedom energije na MAC sloju obezbeđen životni vek od nekoliko godina, maksimalna propusna moć po pravilu ne prelazi nekoliko desetina do najviše nekoliko stotina bajtova po čvoru u sekundi, dok kašnjenje po jednom preskoku (od čvora do čvora) iznosi, tipično, od nekoliko stotih delova sekunde do nekoliko sekundi. Iako su propusna moć i kašnjenje u bežičnoj senzorskoj mreži od sekundarnog značaja, u odnosu na energetska efikasnost, ipak, postoje brojne primene u kojima je potrebno, bar u delu vremena, obezbediti povećanu propusnu moć. Primeri takvih primena su detekcija događaja ili praćenje ciljeva gde dolazi do naglog povećanja intenziteta saobraćaja u situacijama kada se na više mesta u oblasti nadgledanja desi događaj od interesa ili kad je cilj koji se prati pokretan. Jedan od načina za povećanje propusne moći i smanjenje kašnjenja uz neznatno povećanje potrošnje energije sastoji se u tome da se za komunikaciju između čvorova u bežičnoj senzorskoj mreži obezbedi više frekventnih kanala [16]. Raspoloživost više frekventnih kanala uvodi još jedan stepen slobode bežičnoj komunikaciji, koji može da se iskoristi za više istovremenih emitovanja bez interferencije nego što je to moguće kad se koristi samo jedan frekventni kanal. Ovim je potencijalno moguće povećati propusnu moć mreže i smanjiti kašnjenje. Međutim, treba istaći da je većina tradicionalnih MAC protokola za bežične senzorske mreže dizajnirana za rad na jednom kanalu uprkos tome što većina savremenih, komercijalno dostupnih primopredajnika male potrošnje već podržava rad na više frekvencija. Ovi primopredajnici ne mogu da emituju i primaju poruke istovremeno, ali mogu da dinamički menjaju frekvenciju prijema/predaje u okviru šireg frekventnog opsega.

Višekanalni MAC protokoli koriste više frekventnih kanala za povećanje propusne moći i smanjenje kašnjenja. Iako koriste u suštini iste principe za redukciju potrošnje energije

kao jednokanalni MAC protokoli (zajednički aktivni period, TDMA raspored...) višekanalni rad uvodi nove probleme, koji ne postoje u jednokanalnoj komunikaciji, kao što su: problem skrivenih terminala kod višekanalne komunikacije, problem nedostupnog prijemnika, problem podrške za brodkast (engl. *broadcast*), problem dodele kanala, problem konačnog vremena za promenu kanala... Višekanalni MAC protokoli za bežične senzorske mreže mogu da se svrstaju u jednu od tri grupe: višekanalni MAC protokoli sa vremenskim rasporedom, višekanalni MAC protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom i hibridni MAC protokoli.

Predmet istraživanja u okviru ove magistarske teze su višekanalni MAC protokoli za bežične senzorske mreže i projektovanje jednog konkretnog rešenja višekanalnog MAC protokola, koji koristi mogućnost višekanalnog rada savremenih primopredajnika male potrošnje, a u cilju povećanja propusne moći mreže. Da bi se obezbedila bezkonfliktna komunikacija, vreme se deli na vremenske slotove, a čvorovima je dozvoljeno da emituju poruke u svom slotu. Za razliku od tradicionalnih, jednokanalnih MAC protokola kod kojih se svakom čvoru dodeljuje jedan slot u frejmu za slanje poruka, u predloženom protokolu svakom čvoru se dodeljuje onoliko slotova koliko ima raspoloživih kanala. Time se postiže da čvor može da pošalje više od jedne poruke u svakom frejmu što dovodi do povećanja propusnosti i smanjenja latencije. Dodela slotova i frekventnih kanala čvorovima je postignuta na distribuirani način, razmenom ograničenog broja kontrolnih poruka za vreme trajanja inicijalizacije mreže, kao i za vreme kontrolnog frejma, koji se nalazi na početku svakog superfrejma.

Doprinos

Glavni doprinosi ove teze su:

- Klasifikacija i uporedna analiza jednokanalnih MAC protokola za bežične senzorske mreže
- Klasifikacija i uporedna analiza višekanalnih MAC protokola za bežične senzorske mreže
- Novi višekalani MAC protokol za bežične senzorske mreže - TFMAC (*Time-Frequency Medium Access Control*).
- Procedura za samoorganizaciju bežične senzorske mreže, što obuhvata dodelu vremenskih slotova i frekventnih kanala
- Namenski simulator bežičnih senzorskih mreža prilagođen analizi MAC protokola
- Analiza performansi protokola TFMAC

Struktura rada

Ova teza sadrži šest poglavlja, u kojima će biti opisane bežične senzorske mreže, MAC protokoli za bežične senzorske mreže, sa posebnim akcentom na višekanalne MAC protokole, projektovan višekanalni protokol i data analiza njegovih performansi.

U drugom poglavlju će biti dati osnovni pojmovi i predstavljene bežične senzorske mreže i senzorski čvorovi. Biće opisane potencijalne primene bežičnih senzorskih mreža kao i zahtevi i karakteristike konkretnih primena. Dalje će biti opisana arhitektura senzorskog čvora. Pošto sve komponente bežičnog senzorskog čvora moraju da ispune svoje zadatke uz minimalnu potrošnju energije, a najveći potrošač u okviru senzorskog čvora je radio

primopredajnik, posebna pažnja će biti posvećena karakteristikama primopredajnika za bežične senzorske mreže.

U trećem poglavlju će biti dat pregled postojećih MAC protokola za bežične senzorske mreže. Pre svega, biće opisani zahtevi prilikom projektovanja MAC protokola, kao što su skalabilnost, adaptabilnost, predvidljivo kašnjenje kašnjenja, energetska efikasnost, vreme života senzorskog čvora, pouzdanost, propusna moć i ustupci između ovih zahteva, koji moraju da se učine prilikom projektovanja protokola. Dalje, biće uvedena klasifikacija MAC protokola za bežične senzorske mreže na protokole za zajedničkim aktivnim periodom, protokole sa vremenskim rasporedom, protokole sa semplovanjem preambule i hibridne protokole. Za svaku grupu protokola biće navedene bitne karakteristike, prednosti i mane i predstavljeni glavni predstavnici.

U četvrtom poglavlju će biti predstavljeni višekanalni MAC protokoli za bežične senzorske mreže. Pre svega, biće objašnjeni razlozi za uvođenje više kanala. Dalje će biti opisani novi problemi koje treba rešiti, a koji su posledica upotrebe više kanala, kao i zahtevi koji se postavljaju prilikom projektovanja višekanalnih MAC protokola. Biće uvedena podela višekanalnih MAC protokola na: višekanalne MAC protokole sa vremenskim rasporedom, višekanalne MAC protokole sa zajedničkim aktivnim periodom i hibridne MAC protokole. Za svaku grupu će biti data analiza karakteristika i opisani reprezentativni protokoli.

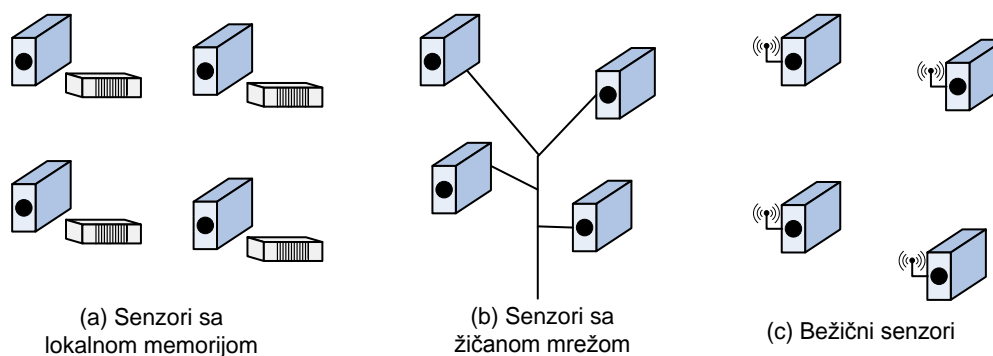
U petom poglavlju će biti opisan novi predloženi višekanalni MAC protokolo za bežične senzorske mreže, koji pripada grupi protokola sa vremenskim rasporedom, kod kojih se energetska efikasnost postiže korišćenjem TDMA mehanizma. Pre svega, biće data motivacija za projektovanje protokola, kao i zahtevi koji su uzeti u obzir prilikom projektovanja protokola. Dalje će biti opisani režimi rada kroz koje protokol prolazi u toku svog životnog veka: neaktivan režim, režim inicijalizacije i aktivan režim, kao i organizacija vremena u toku aktivnog režima.

U šestom poglavlju će biti dat uvid u rezultate simulacije predloženog protokola, koja je sprovedena u namenski razvijenom simulatoru bežičnih senzorskih mreža. Prva grupa rezultata se tiče performansi predloženog mehanizma inicijalizacije u pogledu vremenske efikasnosti, kao i izbora broja kanala i broja slotova. Druga grupa rezultata se odnosi na performanse protokola u aktivnom režimu. Akcenat će biti stavljen na prednosti korišćenja više kanala u pogledu propusnosti, kašnjenja i energetske efikasnosti.

U zaključku ove teze će biti data kratka rekapitulacija onoga što je urađeno i neka usmerenja za dalji rad na polju višekanalnih MAC protokola za bežične senzorske mreže.

2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE

Senzori se koriste za povezivanje fizičkog i digitalnog sveta. Oni detektuju fizičke pojave i prevode ih u digitalni oblik, koji može da se obrađuje, čuva i kasnije koristi. Grubo, senzore je moguće podeliti na senzore bez mogućnosti komunikacije i senzore koji mogu da komuniciraju (Slika 2.1) [16]. Ova podela je bitna sa stanovišta lakoće realizacije složenijih senzorskih sistema koji sadrže veći broj senzorskih jedinica raspoređenih u određenoj geografskoj oblasti. Primer senzora bez mogućnosti komunikacije (Slika 2.1 a) bi bili senzori raspoređeni u nekoj oblasti za praćenje seizmičkih aktivnosti, koji se posle nekog vremena skupljaju i iz njih se čitaju zapamćeni podaci. U mnogim primenama senzori mogu da komuniciraju, često posredstvom fiksne žičane mreže (Slika 2.1 b). Primer ove grupe bi bile meteorološke stanice koje periodično šalju svoje izveštaje centralnoj stanici. Mana ovog pristupa je visoka cena komunikacione infrastrukture i postavljanja senzora i nefleksibilnost. Treća varijanta su senzori koji imaju mogućnost da bežično komuniciraju – bežične senzorske mreže (Slika 2.1 c).



Slika 2.1 Podela senzora.

Bežične senzorske mreže podrazumevaju postojanje senzorskih čvorova sa autonomnim napajanjem (najčešće baterija) koji mogu da bežično komuniciraju i da vrše lokalnu obradu prikupljenih podataka. Ovakve mreže su jeftine i jednostavne za postavljanje, jer čvorovi sami uspostavljaju komunikacionu infrastrukturu. Takođe se podrazumeva da čvorovi mogu da vrše obradu i filtriranje irelevantnih podataka. Zbog male veličine senzorski čvorovi ne vrše veliki uticaj na objekat ili pojavu posmatranja, a mogu da budu postavljeni sa većom gustinom, čime daju preciznije podatke.

Za potpuno razumevanje problema kreiranja bežičnih senzorskih mreža, treba prvo sagledati zahteve i karakteristike konkretnih primena. Najčešći zahtevi su sledeći [18]:

Životni vek. U tipičnoj primeni, servisiranje i održavanje senzorskih čvorova je fizički neizvodljivo ili nepraktično zbog velikih pratećih troškova. To znači da moraju da ispunjavaju određene zahteve u pogledu trajanju baterije, da bi obezbedili željeni životni vek mreži.

Zamena firmvera. Kod nekih primena bežičnih senzorskih mreža je potrebno omogućiti daljinsko ažuriranje programa senzorskih čvorova. Razlog za ovo je taj da često ne postoji puno znanje o pojavi koja se posmatra, pa je za vreme rada mreže možda potrebno podešavanje.

Komunikacioni domet. Komunikacioni domet senzorskih čvorova je ograničen na nekoliko desetina do najviše nekoliko stotina metara. U zavisnosti od površine koju mreža obuhvata, moguće je da svi čvorovi neposredno komuniciraju kako među sobom tako i sa

centralnom jedinicom (egl. *singlehop*). Ukoliko to nije slučaj, čvorovi moraju da se organizuju tako da omoguće multihop komunikaciju. Sa ovim problemom je povezana i gustina čvorova, koja može da stvori dodatne probleme zbog kolizija itd.

Pokretljivost čvorova. Raspoređivanje senzorskih čvorova u fizičkom prostoru može imati nekoliko formi. Čvorovi mogu biti raspoređivani slučajnim razbacivanjem (npr. izbacivanjem iz aviona) ili instalirani na unapred određenim mestima. Takođe, moguće je zbog potreba dodavati senzorske čvorove tokom korišćenja mreže (npr. da se poboljša pokrivenost prostora). Pored toga, senzorski čvorovi mogu promeniti lokaciju posle inicijalnog postavljanja i korišćenja. Pomeranje može biti rezultat uticaja okoline kao što su vetar i voda, senzorski čvorovi mogu biti postavljeni na mobilne entitete (živa bića ili uređaje), a i sami senzorski čvorovi mogu biti mobilni. Pokretljivost senzorskih čvorova zahteva upotrebu specifičnih komunikacionih protokola. Na primer, putanje za multihop komunikaciju u mobilnoj bežičnoj senzorskoj mreži nisu fiksne, kao kod stacionarne mreže, već moraju periodično da se obnavljaju ili da se otkrivaju nove.

Samoorganizacija. Samoorganizacija predstavlja sposobnost mreže da se prilagodi na promene u topologiji koje mogu nastati usled: otkaza pojedinih čvorova, dodavanja novih čvorova, mobilnosti čvorova ili gubitka sinhronizma u radu susednih čvorova. Preduslov za samoorganizaciju je mogućnost čvorova da otkrivaju nove čvorove u svojoj okolini i detektuju one koji su otkazali.

Prikupljanje podataka. Jedan od osnovnih zadataka bežične senzorske mreže je da obezbedi dostavljanje prikupljanje podataka od svih čvorova centralnoj stanici. Različite primene imaju različite zahteve u pogledu frekvencije prikupljanja podataka. To znači da se u nekim primenama podaci prikupljaju veoma često, u nekim ređe (periodično) a u nekim samo po potrebi. Ovo utiče na projektovanje mreže, jer čvorovi koji imaju malu memoriju moraju brzo da se oslobode podataka, što znači da drugi čvorovi moraju da budu sposobni da te podatke prime i proslede dalje ka centralnoj stanici, što smanjuje vreme koje provode u režimu smanjene potrošnje i vodi ka većem utrošku energije. U nekim primenama toleriše se veliko kašnjenje u dostavljanju podataka, dok je u drugim je od presudne važnosti isporuka u realnom vremenu.

2.1. Oblasti primene bežičnih senzorskih mreža

Različite primene bežičnih senzorskih mreža postavljaju različite zahteve koji moraju biti ispunjeni. U daljem tekstu će biti nabrojani neke od mogućih oblasti primene bežičnih senzorskih mreža [18].

Podrška u saniranju posledica katastrofalnih događaja. Jedna od najčešće razmatranih oblasti primene bežičnih senzorskih mreža je oporavak od nesreće. Tipičan primer bi bio praćenje požara velikih razmera. Senzori se iz aviona bacaju u oblast zahvaćenu požarom. Opremljeni su termometrom i mogu da odrede svoj položaj (relativne koordinate u odnosu na susedne čvorove i apsolutne). Kolektivno mogu da generišu temperaturnu mapu, sa definisanim obodom visoke temperature, do kog vatrogasci smeju da dođu (vatrogasci su opremljeni PDA uređajima). Sličan scenario je primenjiv kod nesreća u hemijskim postrojenjima, ili kod vojnih primena, gde senzori detektuju neprijateljske trupe. Zajedničko za sve ove primene je da senzori treba da budu jeftini, zbog potrebnog velikog broja, a zahtevi za dužinom životnog veka senzora nisu preterano veliki.

Nadgledanje životne sredine i prirodnih staništa. Bežične senzorske mreže mogu da se koriste za nadgledanje okruženja, kao npr. praćenje nivoa hemijskog zagađenje na deponijama. Osim toga, mogu da se koriste za praćenje erozije morskog dna (razumevanja

procesa erozije je bitno za izgradnju farmi vetrenjača na moru) ili za praćenje broja biljnih i životinjskih vrsta u nekom staništu (biodiverzitet, engl. *biodiversity mapping*). Glavna prednost korišćenja bežičnih senzorskih mreža za ove primene je dug životni vek čvorova, bez potrebe nadgledanja. Prednost je i mala veličina senzora i bežična komunikacija, tako da ne ometaju objekat posmatranja. Kod ovih primena je potreban veliki broj čvorova sa dugim životnim vekom.

Inteligentne zgrade. Inteligentna zgrada je objekat u kome postoje složeni tehnički sistemi, koji međusobno povezani omogućavaju komfor i bezbednost objekta uz maksimalnu uštedu energije i broja ljudi koji rade u objektu. Jedna od mogućih primena bežične mreže u inteligentnoj zgradi je u sklopu sistema za kontrolu vlažnosti vazduha, ventilacije i klimatizacije (engl. *Humidity, Ventilation, Air Conditioning*, skraćeno HVAC) i to za merenje temperature, protoka i vlažnosti vazduha. Za ove primene su već razvijeni ili u fazi razvoja različiti žičani sistemi (BACnet, LonWorks, KNX [19]), koji predviđaju uvođenje i bežičnih komponenti. Osim ovoga, senzori mogu da nadgledaju mehaničko opterećenje zgrade u seizmički aktivnim oblastima. To znači da bi bežična senzorska mreža mogla da proceni da li je bezbedno da se uđe u zgradu koja je pretrpela zemljotres (isti sistem bi bio primenjiv i na mostove). Druga vrsta čvorova bi mogla da locira preživjele ljude u srušenim zgradama i da te informacije prenosi spasiocima. Zavisno od konkretne primene, senzori bi mogli da se ugrade u postojeće zgrade ili da se postavljaju u fazi izgradnje. Moguće je da dobijaju napajanje iz električne mreže ili da imaju lokalno napajanje sa veoma dugim životnim vekom (više desetina godina). Sa druge strane, broj i cena takvih čvorova bi bila mala, u odnosu na cenu cele zgrade.

Upravljanje poslovnim kompleksima. Još jedna od primena bežičnih senzorskih mreža je u velikim poslovnim kompleksima. Jednostavan primer bi bio nošenje bedževa od strane zaposlenih tako da bežična senzorska mreža može da dozvoli ili zabrani osobi ulaz u neku oblast. Scenario može da se proširi na detektovanje nedozvoljenih aktivnosti, recimo automobila koji se kreću van normalnog radnog vremena. Bežična senzorska mreža bi mogla da prati ovakvo vozilo i alarmira obezbeđenje. Izazovi kod ovakvih bežičnih senzorskih mreža su mnogobrojni: potreban je veliki broj čvorova, koji saraduju, a imaju dug vek trajanja.

Nadgledanje mašina i preventivno održavanje. Jedna od mogućnosti je postavljanje čvora na teško dostupni deo mašine, kako bi mogao da detektuje vibracije i promenu u vibracijama, da bi signalizirao potrebu za održavanjem. Moguća primena bi bila u robotici, ili u vozovima. Glavna prednost upotreba bežičnih senzorskih mreža je rad bez kablova, jednostavno postavljanje senzora i činjenica da se izbegavaju standardni problemi održavanja žičanih instalacija. Zavisno od scenarija, napajanje može da bude obezbeđeno iz električne mreže. U slučaju da nije obezbeđeno, baterija treba da ima dug životni vek. Veličina i cena nisu od presudnog uticaja.

Precizna poljoprivreda. Primena bežičnih senzorskih mreža u poljoprivredi omogućava precizno navodnjavanje ili đubrenje postavljanjem senzora za vlagu, odnosno sastav zemljišta na polja. Dovoljan je relativno mali broj senzora (jedan senzor na površini 100×100 m). Slično, detektovanje štetočina može da se sprovede pomoću guste mreže čvorova. Moguće je vršiti nadgledanje stoke, tako što bi se na svaku životinju prikačio senzor koji bi kontrolisao njeno zdravstveno stanje (temperaturu, broj koraka i sl.).

Medicina i zdravstvo. Primena bežičnih senzorskih mreža u medicini je potencijalno veoma korisna. Mogle bi da se koriste za postoperativnu i intenzivnu negu, gde su senzori direktno prikačeni na pacijenta, ali i za dugotrajno nadgledanje (obično starijih) pacijenata i za automatsko davanje lekova (senzor u pakovanju leka uključuje alarm ako se lek da

pogrešnom pacijentu). Osim toga, moguća primena je u sistemu za praćenje lekara i pacijenata.

Logistika. U različitim logističkim primenama, pogodno je da se roba opremi sensorima radi jednostavnog praćenja prilikom transporta, ili da bi se olakšalo praćenje inventara u skladištima i magacinima. U mnogim aplikacijama nije potrebno da čvorovi aktivno komuniciraju, dovoljno je da se sa njih očitaju podaci. U te svrhe se koriste RFID tagovi. U komplikovanijim aplikacijama se koriste složeniji senzorski čvorovi, recimo za lociranje objekta u magacinu ili za arhiviranje informacija o istoriji, recimo, gde se objekat nalazio.

Telemetrika. Delimično povezan sa problemom logistike je i problem saobraćaja, gde senzori ugrađeni u kolovoz ili saobraćajne znakove mogu da prikupljaju informacije o uslovima saobraćaja. Ovakvi, takozvani inteligentni saobraćajni znaci bi mogli da razmenjuju informacije sa automobilima o uslovima na putu i zakrčenjima.

Osim prethodno navedenih primena, moguće su i druge, kao što su: primena u postrojenjima za preradu otpadnih voda, za nadgledanje vodovoda, gasovoda, za praćenje aktivnih vulkana, za podzemna miniranja, za detekciju poplava, kao podrška za pametna okruženja, u pametnim vrtićima, gde igračke interaguju sa decom, za interaktivne muzeje, ugradnju senzora u ljudsko telo (za nadgledanje nivoa glukoze), itd.

Mnoge od pomenutih sistema je već sada moguće realizovati i bez upotrebe bežičnih senzorskih mreža. Ipak, mnogo bolji rezultati bi se dobili njihovom primenom. Upotreba bežičnih senzorskih mreža bi mnogim aplikacijama doprinela povećanjem rezolucije (vremenske i prostorne), uz minimalnu potrošnju energije i minimalno angažovanje resursa.

Mnoge od pomenutih primena imaju zajedničke karakteristike. U većini primena postoje jasne razlike između **izvora** podataka (konkretnog čvora koji detektuje događaje ili meri fizičke parametre okruženja) i **bazne stanice** (čvor kome se informacija isporučuje). Moguće je uočiti nekoliko različitih obrazaca ponašanja, a neki od najčešćih su:

Detekcija događaja. Kod ovog obrasca čvor obaveštava baznu stanicu da li je događaj od interesa nastupio. Događaj može da bude jednostavan (recimo temperatura je prešla maksimalno dozvoljenu vrednost) ili kompozitni (više susednih čvorova odlučuje o tome da li je događaj nastupio, recimo, da li se srednja temperatura u nekoj oblasti prebrzo povećava). Moguće je da postoji i filtriranje događaja, ukoliko je moguće da istovremeno nastupi više od jednog događaja.

Periodična merenja. Kod ovog obrasca, senzorski čvorovi periodično dostavljaju baznoj stanici rezultate merenja. Početak merenja može da bude detekcija događaja, a period u toku koga se vrše merenja zavisi od prirode primene.

Aproksimacija funkcije i detekcija ivice. Način na koji se neka fizička veličina (recimo temperatura) menja može da bude funkcija lokacije. Bežična senzorska mreža može da se koristi za aproksimiranje ove funkcije, na osnovu ograničenog skupa merenja u svakom čvoru. Čvorovi u kooperaciji vrše aproksimaciju, koja se šalje baznoj stanici. Način i vreme na koje se ovo radi zavisi od konkretne primene i željene preciznosti, a ograničeno je dozvoljenom potrošnjom energije. Sličan problem je detekcija ivice, odnosno nalaženje svih tačaka u oblasti nadgledanja sa istom vrednošću merene veličine (granica požara).

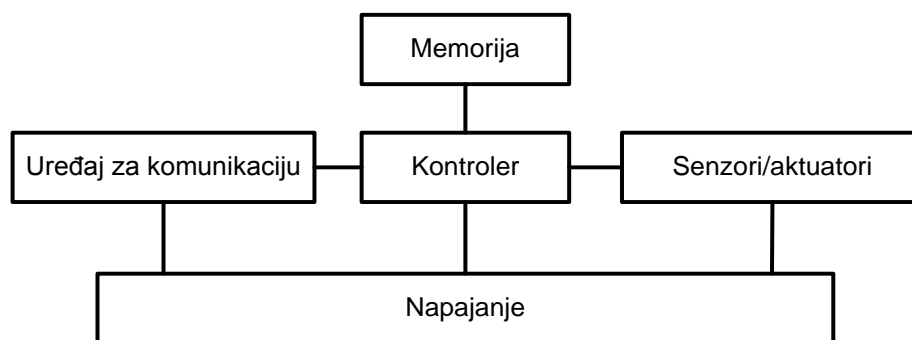
Praćenje. Izvor događaja može da bude pokretan. U tom slučaju, bežična senzorska mreža može da se koristi za određivanje trenutnog položaja, čak i za procenu brzine i smera kretanja objekta praćenja. Da bi se ovo postiglo, čvorovi trebaju da sarađuju pre slanja izveštaja baznoj stanici.

Dalje je moguće primetiti različite načine izveštavanja: izveštaji mogu da se šalju baznoj stanici samo tokom određenog vremenskog intervala, ili periodično tokom rada mreže; izveštaje mogu da šalju samo čvorovi iz određene oblasti, pa i samo konkretan čvor, ili svi čvorovi iz mreže. Ovi zahtevi mogu da se menjaju tokom vremena. To bi značilo da osim komunikacije od senzorskih čvorova ka baznoj stanici treba da postoji i mogućnost komunikacije od bazne stanice ka senzorskim čvorovima. Takođe, moguće je da u mreži postoji više od jedne bazne stanice.

U navedenim primenama može da se primeti da se zahteva različit raspored čvorova, od dobro isplaniranog, fiksnog rasporeda čvorova (u primenama na održavanju mašina), do nasumičnog rasporeda (ispuštanje čvorova iz aviona). Pored toga, čvorovi mogu i da budu pokretni, da bi poboljšali raspored dobijen nasumičnim ispuštanjem, ili da budu prikačeni za pokretan objekat. U oba slučaja mreža mora da se prilagođava nastalim promenama.

2.2. Arhitektura senzorskog čvora

Presudnu ulogu u izboru hardvera za bežični senzorski čvor igraju zahtevi aplikacije. Glavni zahtevi se tiču veličine, cene i potrošnje energije. Uprkos različitim zahtevima, arhitektura senzorskog čvora je slična kod većine primena. Slika 2.2 prikazuje arhitekturu tipičnog senzorskog čvora.



Slika 2.2 Arhitektura senzorskog čvora.

Kontroler ili centralna procesorska jedinica (engl. *Central Processing Unit*, CPU) senzorskog čvora ima zadatak da prikuplja podatke od senzora, odlučuje kada i kome da ih pošalje, prima podatke od drugih senzorskih čvorova i donosi odluke o ponašanju aktuatora. Kao kontroler mogu da se koriste razne arhitekture, u zavisnosti od zahteva kao što su: fleksibilnost, performanse, energetska efikasnost i cena. Jedna od mogućnosti je korišćenje procesora opšte namene (mikrokontrolera), koji je dobar izbor zbog fleksibilnosti prilikom povezivanja sa drugim uređajima (senzorima) i prilikom programiranja, širokog skupa instrukcija (koji odgovara vremenski zahtevnim izračunavanjima) i male potrošnja energije (mogućnost ulaska u stanja smanjene potrošnje). Takođe, često imaju ugrađenu memoriju. Druge mogućnosti su korišćenje FPGA (reprogramabilno kolo, ali je mikrokontroler jednostavnije reprogramirati) i ASIC kola (nefleksibilno rešenje, sa boljim performansama i manjom potrošnjom energije).

Memorija se koristi za čuvanje programa i podataka. Za čuvanje podataka dobijenih od senzora i paketa od drugih čvorova se koristi RAM memorija, a za čuvanje programa ROM, odnosno EEPROM i FLASH memorija. Izbor veličine i vrste memorije zavisi od zahteva konkretne aplikacije, potrošnje i cene.

Senzori i aktuatori su stvarna veza sa spoljašnjim svetom, pomoću koje se posmatra okolina i na nju utiče. Široka oblast primene bežičnih senzorskih mreža ukazuje na veliki broj

moćnih senzora. Senzori bi mogli da se podele u tri grupe: pasivni neusmereni senzori (termometri, svetlosni senzori, mikrofoni, senzori vlažnosti, vibracija, mehaničkog opterećenja, hemijski senzori, detektori dima...), pasivni usmereni senzori (sa jasno definisanim smerom merenja, kao što je kamera) i aktivni senzori (aktivno ispituju okruženje, recimo sonar, radar, neke grupe seizmičkih senzora). Aktuatori se retko koriste u bežičnim senzorskim mrežama, a ukoliko se koriste takođe mogu da budu različiti, zavisno od aplikacije. Najčešće su to prekidači ili releji. Radi obezbeđivanja pouzdanosti u radu, aktuator se obično uparuje sa senzorom (koji proverava da li aktuator pravilno funkcioniše).

Uređaj za komunikaciju se koristi za prenos podataka bežičnim putem. Za primenu u bežičnim senzorskim mrežama se najčešće koristi RF komunikacija. Ona obezbeđuje relativno veliki domet i brzinu prenosa, prihvatljiv procenat grešaka, prihvatljiv utrošak energije i ne zahteva optičku vidljivost pošiljaoca i primaoca. Za komunikaciju u bežičnim senzorskim mrežama se obično koriste frekvencije iz nelicenciranih frekventnih opsega: 433, 868 i 915 MHz i 2.4 GHz.

Napajanje je obično u vidu baterija, koje u nekim primenama mogu da se dopunjavaju (recimo solarne ćelije).

Sve komponente bežičnog senzorskog čvora moraju da ispune svoje zadatke uz minimalnu potrošnju energije. Ovo se postiže na razne načine, recimo isključivanjem komponenti kad nemaju potrebe za radom. Komponenta se uključuje po isteku zadatog vremena ili kada senzor generiše prekid kada poseduje informaciju.

2.3. Radio primopredajnici

Radio primopredajnik je uređaj za bežičnu komunikaciju koji kombinuje radio predajnik i radio prijemnik. Primopredajnici za bežične senzorske mreže realizuju se u vidu nezavisnih integrisanih kola sa interfejsom za direktno povezivanje sa mikrokontrolerom ili kao deo sistema na čipu koji osim primopredajnika sadrži mikrokontroler i memoriju. Zahtevi bežičnih senzorskih mreža, pre svega u pogledu energetske efikasnosti, fizičkih dimenzija i cene, nameću upotrebu primopredajnika specifičnih karakteristika.

Funkcionalne karakteristike. Osim funkcija koje se tiču fizičkog sloja bežične komunikacije (npr. modulacija i demodulacija), primopredajnici nove generacije realizuju i čitav niz dodatnih funkcija karakterističnih za sloj veze, kao što su: bafervanje podataka, uokviravanje, kontrola grešaka i adresiranje. Na taj način je komunikacioni softver, koji se izvršava na mikrokontroleru, rasterećen aktivnosti niskog nivoa. Da bi inicirao prenos jednog paketa, mikrokontroler treba da prenese podatke paketa iz glavne u bafersku memoriju primopredajnika i izda odgovarajuću komandu za početak emitovanja. U drugom smeru, dolazni podaci se smeštaju u prijemni bafer primopredajnika, koji postaje dostupan za čitanje po prijemu kompletnog paketa.

Potrošnja energije i energetska efikasnost. Primopredajnik je najveći pojedinačni potrošač energije u bežičnom senzorskom čvoru. Značajna energija se troši ne samo pri predaji već i pri prijemu. Iz tog razloga, primopredajnici za primene u bežičnim senzorskim mrežama poseduju više režima rada koji se razlikuju po nivou aktivnosti i potrošnji energije. Na primer, aktivan režim (puna operativnost, neophodna za prijem/predaju, sa potrošnjom struje reda desetak do nekoliko desetina miliampera), pasivan režim (redukovana operativnost, sa potrošnjom struje reda nekoliko miliampera) i režim smanjene potrošnje (minimalna operativnost, sa potrošnjom struje reda mikroampera). Pri tome, izvesno vreme, kao i energija je potrebna za prelazak između ovih režima.

Noseća frekvencija i rad na više frekvencija. Komercijalno su dostupni primopredajnici koji rade u različitim frekventnim opsezima, a izbor mora da odgovara zahtevima aplikacije i regulatornim ograničenjima. Takođe, većina savremenih primopredajnika poseduje mogućnost programskog konfigurisanja noseće frekvencije, odnosno kanala, u okviru izabranog frekventnog opsega, što je preduslov za višekanalnu komunikaciju.

Brzine prenosa podataka. Brzinu prenosa podataka određuje noseća frekvencija, korišćeni frekventni opseg, modulacija i kodiranje. Tipične vrednosti su reda desetina kilobita u sekundi, što je sasvim dovoljno za upotrebu u bežičnim senzorskim mrežama.

Modulacije. Transiveri obično podržavaju nekoliko vrsta modulacije: OOK, ASK, FSK.

Tabela 1 prikazuje osnovne karakteristike nekih komercijalno dostupnih primopredajnika.

Tabela 1 Karakteristike primopredajnika.

	TI CC2420 [7]	TI CC1100 [8]	Nordic nRF905 [20]	RFM TRC103 [21]	Infineon TDA5250 [22]
Frekventni opseg	2,4GHz	315/433/ 868/915MHz	433/868/915 MHz	868/915MHz	858MHz
Modulacija	O-QPSK, GFSK, OOK	2-FSK, GFSK, OOK	GFSK	OOK/FSK	ASK/FSK
Brzina prenosa podataka (max)	500kbs	500kbs	50kbs	200kbs	64kbs
Maksimalna izlazna snaga	1dBm	10dBm	10dBm	11dBm	13dBm
Osetljivost prijemnika	-104dBm	-111dBm	-100dBm	-108dBm	-109dBm
Struja pri predaji	21.5mA	27mA	30mA	25mA	9mA
Struja pri prijemu	13.3mA	15.9mA	12.5mA	3.3mA	12mA
Podrška za višekanalni način rada	+	+	+	+	-

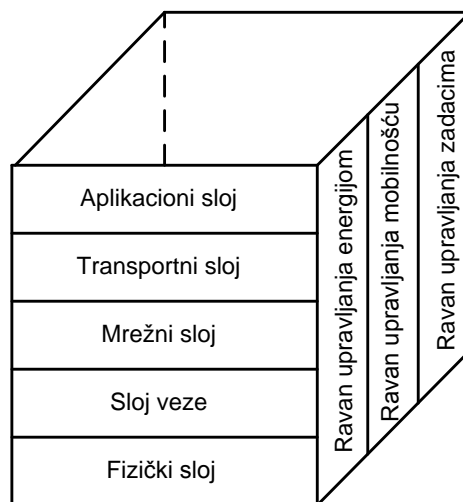
2.4. Komunikaciona arhitektura bežične senzorske mreže

Slika 2.3 prikazuje uopšteni prikaz komunikacione arhitekture bežične senzorske mreže koju čini pet slojeva protokol steka i tri ravni upravljanja [23]. Za razliku od konvencionalnih mrežnih arhitektura, koje prevashodno obuhvataju čisto komunikacione aspekte umrežavanja i prenosa informacija, komunikaciona arhitektura bežičnih senzorskih mreža kombinuje komunikacione protokole i funkcije neophodne za postizanje energetske efikasnosti, samoorganizaciju senzorskih čvorova i koordinaciju njihovih aktivnosti.

Aplikacioni sloj čini skup standardnih servisa, kao što su servisi za sinhronizaciju i lokalizaciju čvorova. Transportni sloj se bavi uspostavljanjem i održavanjem pouzdanih tokova podataka između udaljenih mrežnih čvorova, ukoliko to sistem zahteva. Mrežni sloj se bavi multihop rutiranjem podataka.. Sloj veze obezbeđuje pouzdanu komunikaciju između susednih čvorova, tj. povezuje mrežni i fizički sloj. Sastoji se iz dva dela: LLC (Logical Link Control) i MAC (Medium Access Control). LLC obezbeđuje interfejs ka mrežnom sloju tako što porukama sa mrežnog sloja dodaje heder sa podacima o sekvenciranju, bavi se

potvrđivanjem uspešno primljenih paketa i retransmisijom. MAC sloj obezbeđuje deljivi pristup medijumu, mogućnost za autentifikaciju, bezbednost i privatnost, uz minimalnu potrošnju energije i razmenu minimalnog broja kontrolnih poruka. Fizički sloj se bavi tehnikama modulacije, emitovanja i prijema. On služi kao interfejs između protokola višeg sloja i samog hardvera.

Ravni upravljanja predstavljaju dodatne funkcije, za postizanje optimalne potrošnje energije, upravljanje mobilnošću senzorskih čvorova i raspodelu zadataka (poslova) među čvorovima. Ravan upravljanja energijom upravlja načinom na koji čvorovi koriste energiju. Na primer, senzorski čvor može da isključi radio primopredajnik pošto je primio poruku od suseda. Takođe, kad je nivo energije kojom raspolaže čvor nizak, on o tome može da obavesti susede, da ga više ne bi koristili za rutiranje poruka. Preostalu energiju na taj način može da sačuva samo za rad senzora. Ravan upravljanja mobilnošću registruje pokrete čvorova, tako da čvor uvek može da sačuva rutu do bazne stanice i da ima informaciju o poziciji svih svojih suseda. Ravan upravljanja zadacima balansira radno opterećenje čvorova u određenoj oblasti. U jednoj oblasti nije neophodno da svi senzori rade u jednom trenutku, pa čvorovi mogu da rade više ili manje, u zavisnosti od nivoa raspoložive energije. Ovaj vid upravljanja je neophodan da bi mogla da se postigne energetska efikasnost, da bi poruke mogle da se rutiraju i da bi čvorovi uspešno delili resurse.



Slika 2.3 Komunikaciona arhitektura bežične senzorske mreže.

3. MAC PROTOKOLI

MAC protokol se svrstava u sloj veze protokol steka, a uključuje funkcije i procedure neophodne za uspešan prenos podataka između dva ili više mrežnih čvorova, što podrazumeva: (a) korekciju grešaka nastalih kao posledica anomalija u fizičkom sloju, (b) specifične aktivnosti, kao što su uokviravanje, fizičko adresiranje, kontrola protoka i kontrola grešaka, (c) razrešavanje konflikta između mrežnih čvorova pri istovremenom pristupu deljivom komunikacionom medijumu.

Potreba za MAC protokolom se javlja u svim komunikacionim mrežama, kako u žičanim, tako i u bežičnim. Pri tom ne postoji MAC protokol koji bi bio univerzalno primenljiv. To je zato što mehanizmi kojim se ostvaruju funkcije MAC sloja zavise od prirode komunikacionog medijuma (žičani, optički, bežični), mobilnosti mrežnih čvorova (stacionarni/mobilni), očekivanog intenziteta saobraćaja, zahtevanog nivoa kvaliteta servisa itd. U kontekstu bežičnih mreža, MAC protokoli su prevashodno odgovorni za koordinaciju pristupa bežičnom komunikacionom kanalu koji je po svojoj prirodi podložan greškama i karakterističnim problemima, kao što su problem skrivenih terminala, problem izloženih terminala i efekat slabljenja signala.

Kao posledica zahteva za energetsom efikasnošću rada bežične senzorske mreže nastao je veliki broj novih protokola na svim slojevima mrežne arhitekture. Pošto je radio primopredajnik najveći potrošač u senzorskom čvoru, velika ušteda može da se postigne na MAC sloju, koji se bavi kontrolom radio primopredajnika. Do sada je razvijeno puno energetski efikasnih MAC protokola, koji tipično vrše ustupke kod uobičajenih parametara performansi, kao što su propusna moć, kašnjenje i pravičnost, radi smanjenja potrošnje energije i maksimizovanja života mreže. Svaki MAC protokol ima svoj plan isključivanja radio primopredajnika, koji dovodi do drugačijih ustupaka. Osnovni protokoli uvode fiskalni raspored, dok se drugi prilagođavaju vremenskim i prostornim promenama. Pitanje da li dodatno smanjenje potrošnje opravdava povećanje kompleksnosti, zavisi od konkretne primene i stanja kanala. Generalno, efikasan MAC protokol za senzorsku mrežu treba da ima sledeće karakteristike:

- Protokol treba da bude skalabilan, pošto većina primena senzorskih mreža uključuje veliki broj senzorskih čvorova.
- Treba izbegavati kolizije koje nastaju kad prostorno bliski čvorovi istovremeno šalju pakete. Kolizija vodi gubitku paketa, a onda i njihovom ponovnom slanju, čime se smanjuje efektivna propusna moć mreže i izaziva nepotrebno trošenje energije.
- Treba minimizovati pasivno slušanje i preslušavanje (nepotreban prijem tuđih poruka), pošto je energija koju troši primopredajnik u režimu prijema približno jednaka energiji koju troši u režimu predaje.
- Treba minimizovati učestanost promene režima rada primopredajnika, pošto i sam prelaz iz aktivnog režima (prijem/predaja) u režim smanjene potrošnje troši dodatnu energiju.
- Treba da minimizuje dodatno angažovanje primopredajnika na sprovođenju protokola. Na primer, višak kontrolnih paketa i aktivno osluškivanje medijuma, koji su tipični za protokole zasnovane na nadmetanju, dodatno troše energiju.
- Treba izbeći gubitak paketa zbog ograničenog kapaciteta primo-predajnog bafera.
- Protokol treba da se prilagođava promenama mrežne topologije, tako da svi čvorovi imaju poštenu šansu za emitovanje.
- Prenos poruka treba da bude pouzdan, uz poštovanje garantovanog kašnjenja.

U ovom poglavlju će pre svega biti reči o osnovnim problemima i klasifikaciji bežičnih MAC protokola, čime se bavi sekcija 3.1. MAC protokolima za bežične senzorske mreže i osnovnim zahtevima i ustupcima koji se postavljaju prilikom njihovog projektovanja se bavi sekcija 3.2. Postojeće MAC protokole za bežične senzorske mreže je moguće podeliti na MAC protokole sa vremenskim rasporedom, MAC protokole sa zajedničkim aktivnim periodom i MAC protokole sa semplovanjem preambule. O ovoj klasifikaciji, kao i o konkretnim protokolima će biti reči u sekciji **Error! Reference source not found.**

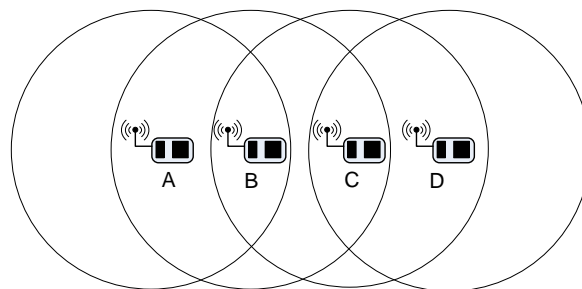
3.1. Osnovi bežičnih MAC protokola

U oblasti bežičnih MAC protokola se vrše istraživanja već više od 30 godina. Pošto se MAC protokoli za WSN oslanjaju na postojeća rešenja u ovoj oblasti, potrebno je prvo dati pregled zahteva i problema koji se sreću kod tradicionalnih MAC protokola.

Najbitniji zahtevi kod konstruisanja MAC protokola za bežičnu komunikaciju se tiču performansi, a to su [3]: propusna moć (engl. *throughput*), stabilnost, pravičnost (engl. *fairness*), vreme pristupa mreži (engl. *access delay*, vreme koje protekne od momenta kad je paket spreman za slanje do prvog pokušaja slanja), vreme prenosa (engl. *transmission delay*, vreme koje protekne od početka emitovanja paketa do njegove uspešne isporuke), višak saobraćaja (koji nastaje dodavanjem zaglavlja i završnog zapisa paketima, zbog gubitka paketa usled kolizije i zbog kontrolnih paketa).

Na funkcionisanje i performanse MAC nivoa veliki uticaj imaju karakteristike fizičkog sloja. Pošto bežični MAC protokoli koriste bežični medijum, kod njih se javljaju i svi postojeći problemi vezani za bežični prenos: kvalitet veze se menja u vremenu, javlja se velika količina smetnji, javlja se puno grešaka u prijemu, gube se poruke... Pošto snaga RF signala opada sa kvadratom rastojanja, a za demodulaciju signala na prijemu je potrebna neka minimalna snaga, govorimo o maksimalnom dometu predajnika. To znači da za razliku od komunikacija koje se odvijaju po žičanim vodovima, u okviru bežične mreže svi čvorovi ne mogu da se čuju međusobno, što dovodi do poznatih problema sakrivenih terminala i problem izloženih terminala [18].

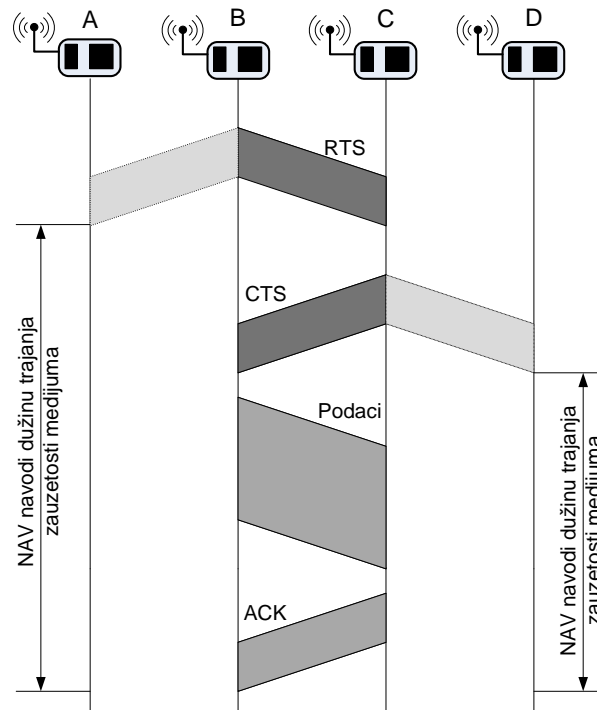
Problem sakrivenih terminala je izražen kod MAC protokola CSMA (engl. *Carrier Sense Multiple Access*) tipa, kod kojih čvor pre slanja poruke osluškuje medijum, da bi izbegao koliziju. Ukoliko ne čuje nista, može da emituje svoju poruku. Problem je moguće objasniti uz pomoć tri čvora, A, B i C (Slika 3.1). Kod ovog scenarija, čvorovi A i B su jedan drugom u dometu, takođe i čvorovi B i C, ali se čvorovi A i C međusobno ne čuju. Pretpostavimo da čvor A počne da šalje poruku čvoru B. U nekom trenutku, čvor C takođe želi da pošalje poruku. Osluškuje medijum i pošto ne može da čuje čvor A, počinje da šalje svoju poruku, koja izaziva koliziju sa porukom čvora A. Signali dve poruke se mešaju i čvor B ne može ispravno da primi ni jednu poruku.



Slika 3.1 Scenario sakrivenih terminala.

Problem izloženih terminala je moguće objasniti uz pomoć četiri čvora, A, B, C i D (Slika 3.1). U nekom trenutku, čvor B počinje da emituje poruku čvoru A. U nekom sledećem trenutku čvor C želi da pošalje poruku čvoru D, ali, pošto detektuje signal koji emituje čvor B, za njega je medijum zauzet, tako da čeka da čvor B završi, iako njegovo emitovanje ne bi ugrozilo prijem poruke na strani čvora A. Ovako se nepotrebno gubi vreme i smanjuje propusna moć.

Razvijen je veliki broj načina za prevazilaženje problem skrivenih i izloženih terminala. Dva karakteristična primera su: pomoću tona zauzeća (engl. *busy tone*, koriste se dve frekvencije, jedna za podatke i jedna kontrolna na kojoj čvor signalizira ostalima da je u toku prijem podataka) i pomoću RTS/CTS procedure (kod standarda IEEE 802.11 [6]).

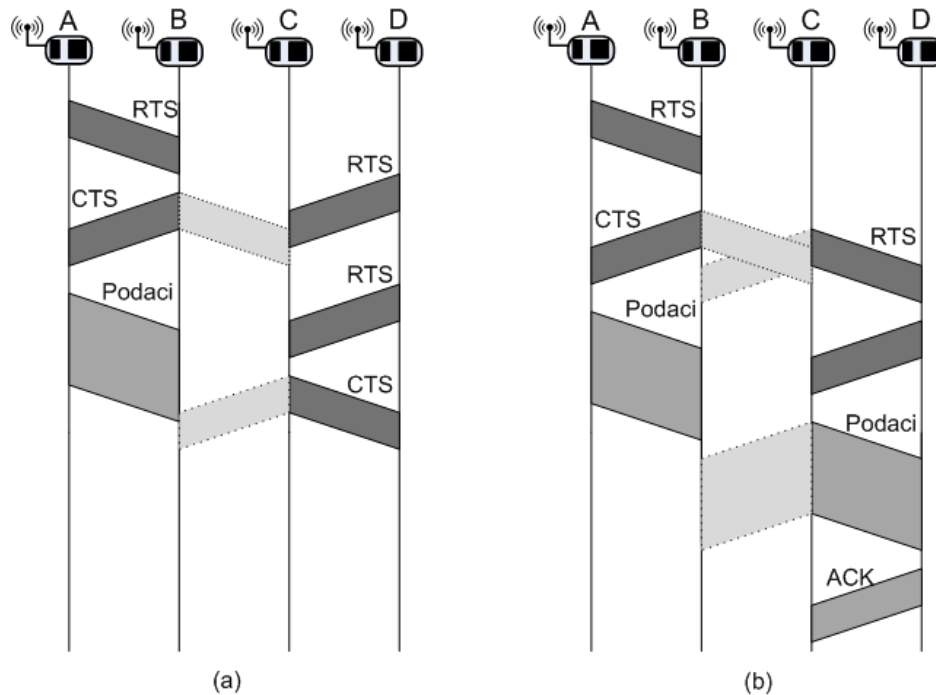


Slika 3.2 RTS/CTS procedura kod IEEE 802.11.

Slika 3.2 prikazuje **RTS/CTS proceduru**. Procedura koristi dva kontrolna paketa RTS (*Request to send*, zahtev za slanje) i CTS (*Clear to send*, slanje odobreno). Procedura funkcioniše na sledeći način: ako čvor B želi da pošalje poruku čvoru C, prvo mu šalje paket RTS. Paket RTS, između ostalog, sadrži i podatak o očekivanom trajanju cele transakcije (podatak NAV duž vremenske ose čvora A na Slici 3.2), sve do prijema kontrolnog paketa ACK (*Acknowledgement*, prijem potvrđen). Ukoliko je čvor C slobodan i nije detektovao drugi saobraćaj, odgovara paketom CTS, koji takođe sadrži i očekivano trajanje preostalog dela transakcije (podatak NAV duž vremenske ose čvora D na Slici 3.2). Kad čvor B primi paket CTS, šalje poruku. Po prijemu poruke, čvor C šalje kontrolni paket ACK (paket potvrde) i time je transakcija završena. Ova procedura smanjuje koliziju na sledeći način: čvorovi A i D, koji prime paket RTS ili CTS znaju koliko je vreme potrebno za tu transakciju, tako da za to vreme ne započnu emitovanje, niti šalju paket CTS.

RTS/CTS procedura značajno smanjuje verovatnoću kolizije podataka, ali ne eliminiše u potpunosti mogućnost da do kolizije dođe. Slika 3.3 (a) prikazuje sledeći mogući scenario kolizije: Čvor A započinje sekvencu RTS-CTS-podaci-ACK. Čvor C može da čuje paket CTS, ali u tom trenutku čvor D započinje sekvencu, tako da njegov paket RTS ometa C da čuje CTS koji potiče od čvora B i zbog toga ne prima poruku o dužini trajanja

komunikacije. Pošto je paket RTS koji potiče od čvora D takođe izgubljen, on ponavlja slanje. Čvor C mu odgovara paketom CTS. Ovaj paket se preklapa sa paketom podataka, tako da izaziva koliziju kod čvora B, koji ne uspeva da primi podatke od čvora A.



Slika 3.3 Dva problema kod RTS/CTS procedure.

Slika 3.3 (b) prikazuje još jedan od mogućih problema. Čvor C počinje slanje paketa RTS malo pre nego što može da primi paket CTS od čvora B, zbog čega nije svestan da će izazvati koliziju. On od čvora D dobija CTS i počinje slanje paketa podataka, dok čvor A još šalje podatke čvoru B, tako da izaziva koliziju i čvor B ne može da ispravno primi podatke koje mu šalje čvor A.

Jedan od načina da se eliminišu poslednja dva problema je da paket CTS traje duže od paketa RTS. Tako bi čvor C, u oba slučaja uspeo da ipak čuje sporan paket CTS i izbegla bi se kolizija.

Poslednji problem kod korišćenja RTS/CTS procedure je u velikom višku podataka koji se šalju, što je tri poruke viška po svakom paketu (RTS, CTS i ACK). Kada su paketi podataka mali, ovaj višak može da bude veći od samog podatka. To znači da ova procedura nije efikasna kod mreža u kojima se razmenjuju kratke poruke. Sa druge strane, kod velikih paketa, u svakom slučaju je veća verovatnoća da dodje do smetnji i gubitka. Dobar kompromis za ovaj slučaj bi bilo da se druge poruke dele na fragmente koji se nezavisno potvrđuju, a RTS/CTS koriste samo jednom za celu poruku.

3.1.1. Klasifikacija bežičnih MAC protokola

Postojeći bežični MAC protokoli mogu da se podele u tri grupe: protokoli sa fiksnom dodelom, protokoli sa dodelom na zahtev i protokoli sa proizvoljnim pristupom [18].

Protokoli sa fiksnom alokacijom resursa. Kod ovih protokola raspoloživi resurs komunikacionog medijuma se deli među čvorovima na duži vremenski period (reda minuta, sati, ili duže) tokom kojeg svaki čvor ima ekskluzivno pravo na resurs koji mu je dodeljen, bez straha od kolizije. Kod primene ovih protokola nastaje problem kad dođe do promene topologije mreže, recimo zbog isključenja čvora, dodavanja novog čvora, premeštanja čvora

na drugu lokaciju, pomeranja čvora. U tom slučaju je potreban neki mehanizam za signalizaciju da bi se izvršila nova podela resursa, što dovodi u pitanje skalabilnost ovih protokola. Tipični predstavnici klase protokola sa fiksnom dodelom su TDMA, FDMA i CDMA. Kod TDMA (*Time Division Multiple Access*) šema, podeli podleže vreme, koje se deli na cikluse fiksne dužine (tzv. *frejmove* ili *okvire*) a svaki frejm na slotove, koji se dodeljuju čvorovima. Svaki čvor ima jedan slot u okviru svakog frejma u kome može da emituje poruke. Mana TDMA šema je potreba za postojanjem mehanizma za vremensku sinhronizaciju, da bi se izbeglo preklapanje slotova dodeljenih susednim čvorovima. Kod FDMA šema (*Frequency Division Multiple Access*) raspoloživ frekventni opseg se deli na podopsege koji se dodeljuju čvorovima, tako da svaki čvor dobija frekvenciju na kojoj ima ekskluzivno pravo emitovanja. Rad na više frekvencija podrazumeva upotrebu primopredajnika koji imaju sposobnost podešavanja frekvencije emitovanja/prijema, što ih čini skupljim od onih koji rade u TDMA režimu. Kod CDMA (*Code Division Multiple Access*) šema, predajnik koristi pseudo-slučajnu sekvencu (tzv. CDMA kôd) za transformaciju izvornog podatka u binarnu sekvencu veće dužine, čijim emitovanjem zauzima mnogo širi propusni opseg nego što je neophodno. Prednost CDMA šeme je ta što se korišćenjem različitih kôdova mogu ostvariti istovremeni prenos bez kolizija - da bi povratio izvorni podatak prijemnik mora da zna kôd koji je predajnik koristio; pri tom svi ostali prenosi, koji koriste različite kôdove, deluju kao šum. Problemi koji prate CDMA šeme u vezi su sa upravljanjem, raspodelom i skadištenjem kôdova. Osim ovih, postoje i MAC protokoli zasnovani na kombinovanju različitih načina podele. Recimo, moguće je koristiti TDMA šemu za podelu vremena na slotove a FDMA (ili CDMA) za razdvajanje transmisija u okviru slotova.

Protokoli sa alokacijom resursa na zahtev. Kod ovih protokola medijum se dodeljuje na kratko vreme, obično za samo jednu transmisiju. Ovi protokoli mogu da se podele na centralizovane i distribuirane. Kod centralizovanih protokola (HIPERLAN/2 [24]) čvorovi šalju zahtev za dodelu resursa centralnom čvoru koji im dodeljuje resurs i šalje kontrolnu poruku koja sadrži detaljne podatke o dodeljenom resursu. Pri tom čvorovi zahteve mogu da šalju nasumično na posebnom, kontrolnom kanalu, centralni čvor može da vrši prozivku ili se zahtevi jednostavno pridodaju (*piggyback*) paketima podataka. Ovaj metod zahteva da centralni čvor bude stalno uključen, i da troši puno energije. Ovi protokoli su dobar izbor ukoliko u mreži postoji dovoljan broj čvorova kod kojih energija nije problem, pa uloga centralnog čvora može njima da se dodeli (kao kod protokola IEEE 802.15.4 [7]). Ukoliko nema ovakvih čvorova, dobar pristup bi bio da se uloga centralne stanice rotira među čvorovima, kao kod LEACH protokola [25].

Protokoli sa proizvoljnim pristupom. Ovi protokoli funkcionišu potpuno distribuirano, i obično ispoljavaju nedeterminizam u radu, recimo, postavljaju tajmer na proizvoljno vreme ili računaju sa proizvoljnim vremenom pristizanja paketa. Prvi i još uvek veoma važan protokol iz ove grupe je ALOHA [26] (i ALOHA sa vremenskim rasporedom [27]) protokol razvijen 70' godina prošlog veka na *University of Hawaii*. Kod ALOHA protokola, čvor koji želi da pošalje paket, šalje ga u tom trenutku, bez obzira na mogućnost kolizije. Čvor koji prima paket odmah odgovara potvrdom, ukoliko je ispravno primio paket. U nedostatku paketa potvrde prvi čvor smatra da je došlo do kolizije, povlači se na neko vreme (proizvoljno) i ponavlja slanje po isteku tog vremena. Ovaj jednostavan protokol je efikasan pri maloj gustini saobraćaja, ali potpuno neefikasan pri velikim gustinama saobraćaja. ALOHA sa vremenskim rasporedom deli vreme na slotove dovoljnog trajanja da se pošalje cela poruka, tako da čvor sme da šalje poruku samo na početku svakog slotova. Ovaj protokol je efikasniji od običnog ALOHA protokola, jer smanjuje mogućnost kolizije.

U grupu protokola sa proizvoljnim pristupom spadaju i CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*, višestruki pristup sa osluškivanjem nosioca) protokoli. Kod CSMA protokola čvor prvo osluškuje medijum (*carrier sensing*), pa počinje slanje samo ako je medijum slobodan. Ukoliko medijum nije slobodan, čvor se povlači na neko vreme, koje određuje po algoritmu za odustajanje (*backoff* algoritam). Kod neperzistentnih CSMA protokola, čvor se povlači na neko vreme, posle koga ponovo osluškuje medijum. Kod perzistentnog CSMA algoritama, čvor nastavlja da osluškuje medijum da bi detektovao kad medijum postane slobodan. Kod mnogih algoritama za odustajanje, vreme posle završetka prethodne poruke se deli na slotove, a čvor započinje slanje u tekućem slotu sa nekom verovatnoćom p (koju slučajno generiše svaki čvor), što znači da propušta tekući slot sa verovatnoćom $1-p$. Ukoliko neki drugi čvor započne slanje u međuvremenu, čvor se povlači, čeka da se završi poruka i ponovo primenjuje algoritam za odustajanje. Što je p manje, to je verovatnoća kolizije manja, ali je zato vreme pristupa mreži duže. Kod protokola IEEE 802.11 primenjuje se DCF (*Distributed Coordination Function*), po kojoj čvor koji želi da emituje proizvoljno bira vreme čekanja iz opsega intervala nadmetanja (*contention window*) i podešava svoj brojač na ovu vrednost. Brojač odbrojava slotove. Ukoliko neki drugi čvor započne slanje u međuvremenu, brojač se isključuje i nastavlja odbrojanje po završetku tog slanja. Kad brojač odbroji do nule, čvor počinje slanje poruke. Ako dođe do greške u prenosu (zbog kolizije), čvor produžava interval nadmetanja (ukoliko koristi modifikovani binarni algoritam za povlačenje, interval nadmetanja će biti dupliran). Što je interval nadmetanja duži, to je verovatnoća da dva čvora izaberu isti slot manja. Nakon uspešnog prenosa, interval nadmetanja se podešava na prvobitno trajanje.

Protokoli CSMA tipa su namenjeni singlhop mrežama sa centralizovanim upravljanjem i kod njih ispoljavaju željene performanse. Kad se primene na multihop mreže (kakve su bežične senzorske mreže), performanse su znatno lošije zbog izraženih problema, kao što je problem skrivenih terminala, koji mogu da dovedu do kolizije. Razvijeno je više metoda za smanjenje kolizije, a neki od metoda su ton zauzeća i RTS/CTS procedura.

3.2. MAC protokoli za bežične senzorske mreže

U slučaju bežičnih senzorskih mreža balans zahteva je drugačiji nego kod tradicionalnih bežičnih mreža. U poređenju sa tradicionalnim bežičnim mrežama, bežične senzorske mreže zahtevaju neuporedivo manji komunikacioni kapacitet i mogu da podnesu značajno duža kašnjenja u prenosu podataka. Zbog toga, zahtevi kao što su pravičnost, propusna moć ili kašnjenje prelaze u drugi plan. Međutim, pojavljuju se dodatni zahtevi, a najvažniji su energetska efikasnost, skalabilnost i adaptabilnost. Takođe, ograničeni hardverski resursi senzorskog čvora nameću potrebu za jednostavnim rešenjima na MAC nivou, koja će zahtevati minimalno angažovanje CPU-a i minimalno zauzeće memorije. Sve ovo sužava skup principa, tehnika i mehanizama, koji stoje na raspolaganju projektantima MAC protokola za bežične senzorske mreže. Uprkos tome, do danas je predložen veliki broj MAC protokola za primenu u bežičnim senzorskim mrežama, od kojih svaki na neki specifičan način postiže balans između potrošnje energije i performansi.

3.2.1. Zahtevi pri dizajniranju MAC protokola za bežične senzorske mreže

U ovom odeljku analizirani su glavni zahtevi koje treba da ispuni MAC protokol za bežične senzorske mreže. Primarni zahtev se odnosi na energetska efikasnost, dok relativna važnost ostalih zahteva zavisi od karakteristika konkretne primene. Veoma često, MAC protokol treba da obezbedi skalabilnost i adaptabilnost mreže. U nekim primenama se

očekuje povećana pouzdanost i predvidljivo vreme prenosa podataka. Ređe, od MAC protokola se zahteva visoka propusna moć.

Energetska efikasnost. Energija je deficitaran resurs kod senzorskih mreža. Glavna potrošnja energije potiče od pristupa medijumu, posebno kod prenosa na velikim udaljenostima i kad je radio prijemnik uključen neprekidno. Odnos između količine energije koju senzorski čvor troši na komunikaciju i energije koju troši na sve ostale aktivnosti je 10:1 i veći. Zbog toga je kod bežičnih senzorskih mreža energetska efikasna komunikacija od ključne važnosti.

Zadatak racionalnog korišćenja raspoložive energije raspodeljen je između više slojeva komunikacionog steka. Na primer, sloj upravljanja topologijom mreže zadužen je za regulaciju izlazne snage radio predajnika. Cilj je da se uz što manju izlaznu snagu postigne zahtevani nivo povezanosti čvorova. Na mrežnom sloju, ušteda energije se postiže izborom što kraćih putanja ili putanja kroz čvorove s najviše preostale energije. Ipak, najznačajnija ušteda energije se može ostvariti na MAC sloju. Za to postoje brojni načini, kao što su: uvođenje primopredajnika u režim smanjene potrošnje uz minimizovanje broja prelazaka između različitih režima rada, prenos podataka pri većoj bitskoj brzini, smanjenje veličine i frekvencije razmene kontrolnih paketa, smanjenje kolizija. Najveći efekat isključivanja primopredajnika se postiže u MAC protokolima TDMA tipa kod kojih se režim rada menja po preciznom planu. Tipično, za komunikaciju između svakog para susednih čvorova, recimo A i B, rezervisana su dva vremenska slota: S_{AB} , za prenos podataka od A do B i S_{BA} , za prenos podataka od B do A. Čvor A se budi na početku slota S_{BA} da bi primio paket koji će mu eventualno poslati čvor B. Trajanje slota, T_s je dovoljno dugo da se može preneti jedan paket podataka. Međutim, ukoliko B ne počne predaju u kratkom intervalu, t_l na početku slota S_{BA} , čvor A zaključuje da neće biti prenosa i vraća se u režim smanjene potrošnje. U mirnom stanju, kad u mreži nema prenosa podataka, čvor okružen sa n suseda budi se n puta u toku svakog ciklusa. Budući da je t_l mnogo manje od T_s , odnos između vremena aktivnog rada primopredajnika i vremena kad je on isključen može da dostigne 1 : 100. S druge strane, TDMA šema podrazumeva striktnu vremensku sinhronizaciju čvorova. Kako idealnu sinhronizaciju nije moguće postići, čvor mora da se probudi izvesno vreme pre planiranog početka prijemnog slota i da ostane budan nešto duže od minimalnog vremena koje je potrebno za detekciju početka prenosa paketa podataka. Takođe, kao što je već rečeno, TDMA šeme nisu efikasne u gustim mrežama zbog otežanog usaglašavanja čvorova.

Gubici energije usled kolizija karakteristični su za MAC protokole CSMA tipa. U pogledu energetske efikasnosti, kritične su kolizije između kontrolnih i paketa podataka. Uprkos tome što čvor šalje paket podataka tek nakon što je rezervisao kanal uz pomoć kontrolnih paketa, do kolizije u toku prenosa paketa podataka može doći zbog problema skrivenih terminala. Da bi se predupredile ovakve pojave, kod mnogih MAC protokola CSMA tipa uvodi se neka elementarna forma vremenskog planiranja. MAC radi u ciklusima koji su sinhronizovani između svih čvorova. Kontrolni paketi se razmenjuju samo u početnom delu ciklusa, dok se u preostalom delu ciklusa vrši prenos podataka. Radi izolovanja kontrolnog i saobraćaja podataka, u pojedinim MAC protokolima koriste se dva kanala, jedan za razmenu kontrolnih paketa, a drugi za prenos podataka. Očigledan nedostatak ovog pristupa je u zahtevu da svaki čvor poseduje dva primopredajnika.

Brzina prenosa podataka je još jedan faktor koji utiče na energetska efikasnost. Što je brzina prenosa veća, to će čvorovi manje vremena provoditi na prijemu/predaji. Međutim, brzina prenosa podataka ne može biti proizvoljno velika. Pri većim brzinama, uticaj smetnji je veći, što zahteva veću izlaznu snagu predajnika, rad na višim frekvencijama i primenu složenijih tehnika za digitalnu modulaciju.

Kao mera potrošnje energije uvodi se prosečna potrošnja energije po paketu. Ova mera je namenjena proceni efikasnosti senzorskog čvora u aktivnom režimu rada. Niska prosečna potrošnja energije po paketu ukazuje na to da MAC protokol zahteva razmenu malog broja kontrolnih paketa i da su kolizije usled nadmetanja retke. Nekad se umesto po paketu, prosečna potrošnja energije izražava po prenetom bajtu podataka i izražava u jedinicama $\mu\text{J}/\text{B}$.

Vreme života senzorskog čvora. S obzirom da je upotrebna vrednost bežične senzorske mreže određena dostupnošću dovoljno velikog broja operativnih senzorskih čvorova, produženje životnog veka svakog pojedinačnog senzorskog čvora je od velike važnosti. Idealno bi bilo kad bi svi senzorski čvorovi istovremeno prestali s radom. U tom slučaju, vreme života mreže bi bilo jednako vremenu života senzorskih čvorova. Naravno, to nikad neće biti slučaj jer će neki senzorski čvorovi istrošiti svoje baterije pre, a neki kasnije. Iako je bežična senzorska mreža otporna na otkaze pojedinih čvorova, postepeno otkazivanje čvorova neizostavno vodi ka preuranjenom prekidu rada mreže ili bar do pada njenih deklariranih performansi zbog npr. nedovoljne pokrivenosti pojedinih oblasti ili nedovoljne povezanosti. Zato je osim prosečnog vremena života i standardna devijacija vremena života bitna karakteristika senzorskog čvora. Minimizovanjem standardne devijacije vremena života senzorskog čvora poboljšava se predvidljivost životnog veka celokupne mreže. Treba istaći da na životni vek senzorskog čvora utiče mnoštvo faktora, kao što su protokol za rutiranje ili mehanizam za kontrolu topologije. Ipak, energetska neefikasnost MAC protokola ima dominantan negativan uticaj na ovu metriku.

Skalabilnost. Veličina bežične senzorske mreže (izražena ukupnim brojem senzorskih čvorova) i njena gustina (izražena brojem čvorova po jedinici površine) uslovljeni su zahtevima konkretne primene. U zavisnosti od primene, bežične senzorske mreže mogu da se sastoje iz velikog ili malog broja čvorova, koji ne moraju da budu uniformno raspoređeni u prostoru. U idealnom slučaju, MAC protokol bi trebalo da pruži isti nivo performansi nezavisno od veličine i gustine mreže. U realnosti nije tako. Pošto je raspoloživi komunikacioni kapacitet bežičnog medijuma isti u svim tačkama, u oblastima sa većom gustinom čvorova dolazi do pada komunikacionih performansi (veća je verovatnoća da dođe do kolizije, pa čak i do totalnog zagušenja), usled čega dolazi do veće potrošnje energije i zauzeća drugih resursa, kao što su memorija i procesorsko vreme. Kod protokola sa vremenskim rasporedom, čvor mora često da se budi ako je okružen velikim brojem suseda, tako da se povećava vreme nepotrebnog slušanja. Takođe, povećava se i veličina memorije potrebne za čuvanje podataka o susedima i vremenskom rasporedu.

Na skalabilnost MAC protokola, takođe, utiču arhitektura mreže i metod rutiranja. U hijerarhijskim mrežama čvorovi se grupišu u tzv. klastere pri čemu jedan čvor iz klastera igra ulogu kontrolera klastera. Ovakva, lokalno-centralizovana organizacija mreže omogućava bolje i efikasnije planiranje angažovanja resursa. S obzirom da se planiranjem bavi isključivo kontroler klastera, nema potrebe za intenzivnom razmenom kontrolnih paketa između čvorova. Takođe, komunikacioni kapacitet može racionalnije da se iskoristi tako što će se klasterima dodeliti nepreklapajući opsezi frekvencija, a unutar klastera implementirati TDMA ili CDMA šema. Osim toga, izbor metoda za rutiranje može da onemogući korišćenje nekih MAC šema. Na primer, kod rutiranja koje je zasnovano na plavljenju, prevladavajući oblik komunikacije je tipa multikast, "jedan ka više". Pod ovakvim okolnostima, MAC zasnovani na vremenskom rasporedu, kod kojih je razmena direktnih poruka (engl. *unicast*) dominantan oblik komunikacije, postaju izrazito neefikasni.

Adaptabilnost. Adaptabilnost je u bliskoj vezi sa skalabilnošću, a tiče se sposobnosti MAC protokola da se brzo prilagodi izmenjenim uslovima u mreži.

Tokom vremena neki čvorovi mogu da prestanu s radom, zbog otkaza ili potrošene baterije; mreži se mogu pridodati novi čvorovi, a postojeći se mogu premestiti na druge lokacije. Takođe, u većini primena senzorskih mreža gustina saobraćaja značajno varira tokom vremena i u različitim delovima mreže. Na primer, kod nadgledanja šumskih požara, u normalnim uslovima se samo periodično šalje status, dok u slučaju požara mnogo čvorova šalje izveštaje. Glavna funkcija mnogih bežičnih senzorskih mreža je periodično prikupljanje podataka od svih senzora, kad senzor šalje poruku samo kao odgovor na upit, u protivnom postoji vrlo malo saobraćaja. U periodima između dva očitavanja, u mreži postoji veoma malo saobraćaja, dok u periodima očitavanja u mreži nastaje lavina paketa koji treba da se sliju na jedno mesto, odnosno prikupe u baznoj stanici. Svaki senzorski čvor osim što šalje svoje podatke u obavezi je da prosleđuje podatke od senzora koji su dalje od bazne stanice ka onim koji su bliži baznoj stanici. U ovakvom režimu rada, gustina saobraćaja u blizini bazne stanice je veća nego na periferiji mreže. Osim toga, generisani podaci mogu da učestvuju u agregaciji na putu ka baznoj stanici. Agregacijom se bave samo pojedini čvorovi na uspostavljenim putanjama ka baznoj stanici tako što umesto da ka baznoj stanici prosleđuju sve prikupljene podatke šalju samo njihovu srednju vrednost ili maksimalnu vrednosti, ili brišu redundantne izveštaje. U nekim slučajevima, raspodela saobraćaja se ne menja u vremenu, ukoliko su čvorovi za agregaciju fiksirani u trenutku uspostavljanja putanja, a transformacija podataka je oblika više-u-jedan, recimo izračunavanje srednje vrednosti. Ipak, obično se agregacija vrši samo kad je to moguće, tako da dolazi do varijacija u saobraćaju. Primer za ovo su eliminisanje redundantnih očitavanja senzora i filtriranje ponavljanja. Protokoli za rutiranje su još jedan uzrok fluktuacije intenziteta saobraćaja u mreži. Pojedini protokoli za rutiranje prilikom određivanja optimalne putanje u obzir uzimaju i količinu preostale energije čvorova. Tako, protokol za rutiranje će kao sledeći čvor na putanji izabrati onaj kome je ostalo najviše energije od svih čvorova koji vode ka željenom odredištu. Vremenom, kako čvorovima na oformljenim putanjama ponestaju rezerve energije, protokol za rutiranje može da promeni putanju i uposli neke druge čvorove.

Bilo da se radi o promeni veličine, gustine ili topologije mreže, ili o promeni intenziteta saobraćaja, MAC protokol treba da je u stanju da se brzo adaptira na nastale promene s minimalnim padom performansi u prelaznom periodu. Na primer, kod MAC protokola s vremenskim rasporedom, neophodno je periodično obnavljanje rasporeda kako bi se novim rasporedom obuhvatile sve izmene koje su nastale u međuvremenu. Što je period obnavljanja rasporeda kraći, to će mreža biti u stanju da brže adaptira na novonastalu situaciju. Međutim, češće obnavljanje rasporeda znači i veći utrošak energije. U tom pogledu, efikasniji su oni MAC protokoli kod kojih se odluka o reorganizaciji donosi na osnovu praćenja intenziteta saobraćaja kroz senzorske čvorove. Na primer, ako se ustanovi da je čvor A počeo da šalje značajno veću količinu podataka čvoru B, svrsishodno je za komunikaciju od A ka B rezervisati veći broj slotova.

Predviđanje kašnjenja. Pojedine primene bežičnih senzorskih mreža, kao što je npr. praćenje ciljeva, zahtevaju dostavljanje podataka sa ograničenim kašnjenjem. Na primer, mreža koja treba da detektuje ulazak vozila u zaštićenu zonu trebalo bi da informaciju o detektovanom vozilu dostavi baznoj stanici brzinom koja je veća od brzine kretanja vozila. Osim toga, nemaju svi podaci isti značaj. Obično, stroga kontrola kašnjenja u prenosu je neophodna samo za urgentne informacije, dok je za preostale vreme prenosa u drugom planu. Upravljanjem protokom podataka kroz mrežu obično se brine više slojeva u komunikacionom steku. Na primer, na mrežnom sloju je moguće smanjiti vreme prenosa poruke izborom kraće putanje. Ipak, glavnu ulogu igra MAC sloj, pažljivim planiranjem slanja paketa i primenom predvidive strategije za arbitražu.

Na svom putu od izvora do odredišta paket prolazi kroz više čvorova. Ukupno vreme prenosa je zbir vremena potrebnog za prenos radio vezom i vremena čekanja paketa u primopredajnim baferima čvorova. Prvo od ova dva vremena je konstantno i određeno bitskom brzinom prenosa primopredajnika. Međutim, vreme čekanja u baferu čvora je u osnovi nepredvidljivo jer zavisi od trenutnog broja paketa u baferu. Ovo je naročito izraženo u delovima mreže sa gustim saobraćajem. Uvođenjem prioriteta moguće je u izvesnoj meri "ubrzati" prenos urgentnih paketa. Paket označen visokom prioritetoj dobiće prednost u prenosu bez obzira na to koliko ranije pristiglih paketa čeka u baferu čvora. Međutim, čak iako je u momentu prijema paketa bafer prazan, trenutak početka njegove predaje se ne može sa sigurnošću odrediti. Razlog za ovo leži u nedeterminističkom ponašanju mehanizama za arbitražu koji regulišu pristup medijumu. Na primer, mehanizmi arbitracije zasnovani na koliziji, kao što je CSMA, nisu odgovarajući za velike i guste mreže, pošto nije poznato koliko puta čvor treba da odustane pre nego što uspešno pošalje paket. S druge strane, pristup zasnovan na rezervaciji, kao što je TDMA, bio bi bolji izbor, uprkos problemima sa skalabilnošću. Kod TDMA pristupa kolizije su eliminisane uvođenjem preciznog plana emitovanja. Međutim, cena koja se plaća tiče se smanjene brzine prenosa podataka kroz mrežu. MAC protokoli TDMA tipa dele vreme na cikluse, a cikluse na vremenske slotove gde je svaki slot rezervisan isključivo za komunikaciju s jednim susedom. Paket koji čvor A primi od čvora B, a treba da ga prosledi čvoru C mora da čeka u baferu čvora A sve do vremena koje odgovara slotu rezervisanom za komunikaciju od A do C. U proseku, ovo vreme je jednako polovini trajanja jednog ciklusa. Trajanje ciklusa iznosi od 0.1s do nekoliko sekundi. Ukoliko paket treba da prođe kroz veći broj čvorova, kašnjenje u prenosu paketa od izvora do odredišta može postati nedopustivo veliko. Imajući ovo u vidu, MAC protokoli koji prilikom rezervacije slotova vode računa o intenzitetu saobraćaja tako što usaglašavaju redosled slotova duž putanja sa intenzivnim saobraćajem obezbeđuju prenos s manjim kašnjenjem.

Pouzdanost. Pouzdan prenos podataka je cilj pri dizajniranju svih mrežnih infrastruktura. Isporuka paketa se ne može garantovati naročito u bežičnoj komunikaciji zbog povećanog nivoa promenljivog šuma u komunikacionom kanalu. Međutim, zadovoljavajući nivo pouzdanosti se može postići izborom pouzdanog linka, izbegavanjem preopterećenih čvorova i otkrivanjem izgubljenih paketa i ponavljanjem prenosa. Obično postoje kompromisi između viška kontrolnog saobraćaja i nivoa pouzdanosti. Na primer, slanje paketa potvrde za svaki paket minimizuje vreme potrebno za oporavak nakon greške u prenosu, po cenu povećanja saobraćaja zbog kontrolnih paketa, što može da smanji efektivnu propusnu moć linka, da povećá kašnjenje i potrošnju energije.

Kod bežičnih mreža paketi se gube uglavnom zbog prekoračenja veličine bafera i interferencije RF signala. Izbegavanje prekoračenja veličine bafera je zajednički zadatak protokola za rutiranje i MAC protokola. Balansiranje opterećenja raspoloživih putanja može da smanji mogućnost da se prekorači kapacitet bafera. U isto vreme, implementirana šema za arbitražu određuje strategiju upravljanja baferom i treba da obezbedi da do prekoračenja bafera ne dođe. Posledica interferencije RF signala je porast nivoa šuma u medijumu što dovodi do narušavanja integriteta signala i otežanog dekodiranja sadržaja paketa na prijemu. Učestanost grešaka je manja kod MAC protokola koji sprečava pojavu kolizija, ili bar značajno smanjuju verovatnoću kolizije. Gubitak paketa zbog interferencije signala može da se minimizuje izborom dovoljno visoke snage transmisije, kao i sprečavanjem nadmetanja za pristup medijumu među čvorovima.

Propusna moć mreže. Definiše se kao ukupan broj paketa (ili bajtova) koje primi odredište (obično, bazna stanica) u jedinici vremena. Osim MAC protokola na ovu metriku utiču i brojni drugi faktori, kao npr. topologija mreže i protokol za rutiranje. Visoka propusna

moć mreže ukazuje na nisku učestanost grešaka u prenosu paketa i nizak nivo nadmetanja za pristup medijumu. Kod bežičnih senzorskih mreža, za razliku od tradicionalnih bežičnih mreža, propusna moć je u drugom planu.

3.2.2. Ustupci pri dizajniranju MAC protokola za bežične senzorske mreže

Na osnovu prethodne diskusije o atributima MAC protokola za senzorske mreže, jasno je da je teško naći protokol koji je u isto vreme skalabilan, izuzetno energetska efikasan, veoma adaptivan, pouzdan i predvidiv sa zagaranovanim kašnjenjem. Zato je potrebno izabrati odgovarajuće zahteve koje treba ispuniti, zavisno od aplikacije. Naravno, energetska efikasnost je obično na vrhu zahteva, imajući u vidu namenu i fizičku konstrukciju čvorova. Pored energetske efikasnosti, skalabilnost i adaptabilnost su takođe u vrhu zahteva kod većine aplikacija, dok su predvidivo kašnjenje, visoka pouzdanost i velika propusna moć retko zahtevi na kojima se insistira. Opšte karakteristike osnovnih tipova MAC protokola za bežične senzorske mreže u pogledu specifičnih zahteva su:

- MAC protokoli zasnovani na nadmetanju mogu da budu dobar izbor za *ad-hoc* bežične mreže, zbog toga što ne zahtevaju centralizovanu koordinaciju i komplikovanu podelu resursa. Mane MAC protokola zasnovanih na nadmetanju su, kao što je pokazano, problem skalabilnosti, nepredvidivost kašnjenja, veliki nivo interferencije signala i velika verovatnoća kolizije (koja povećava potrošnju energije).
- Jedna od metoda za smanjenje potrošnje je da se radio primopredajnik pošalje u režim smanjene potrošnje i da se ograniči broj prelazaka između dva režima rada. Ograničenje ovog pristupa je to da onda mora da se primeni TDMA, sa preciznom sinhronizacijom (ili da se koriste posebni kanali za podatke i kontrolne poruke). Iako TDMA ima prednosti, kao što su predvidivo kašnjenje, ne odgovara mnogim primenama bežičnih senzorskih mreža, pošto nije skalabilan i slabo je adaptabilan.
- CDMA zadovoljava mnoge zahteve koji se postavljaju kod bežičnih senzorskih mreža: izbegava pojavu kolizije, adaptabilan je, može da se predvidi kašnjenje. Međutim, CDMA nije odgovarajući izbor za bežične senzorske mreže, zbog toga što zahteva previše resursa za implementaciju. Zahteva postojanje velike memorije za čuvanje kodova, povećava vreme potrebno za dekodiranje signala, čime povećava potrošnju energije, zahteva složene antene, što sve ne odgovara minijaturnim dimenzijama i potrošnji koja se zahteva za bežične senzorske mreže.

3.3. Postojeći MAC protokoli za bežične senzorske mreže

MAC protokoli za tradicionalne bežične mreže ne odgovaraju zahtevima koje postavljaju bežične senzorske mreže. Ove šeme troše previše energije, pošto zahtevaju da mrežni čvorovi konstantno oslušuju medijum. Osim toga, zahtevaju i razmenu kontrolnih paketa da bi se izbegla kolizija. Veličina kontrolnih paketa je reda veličine paketa podataka, koji su kod većine senzorskih mreža mali. Sa druge strane, konvencionalni MAC protokoli bazirani na TDMA podrazumevaju da se svi čvorovi nalaze u opsegu transmisije jednog centralnog čvora, i zbog toga ne mogu da se primene na multihop način transmisije koji se obično primenjuje kod senzorskih mreža.

Pošto konstrukcija bežične senzorske mreže zavisi od konkretne primene, razvijeno je više različitih grupa MAC protokola, koji odgovaraju različitim primenama.

Tako je MAC protokole za bežične senzorske mreže moguće podeliti na četiri grupe [28]: (1) protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu (*scheduled protocols*) (optimizovani za gust, periodičan saobraćaj, tipično za multimediju), (2) protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom (optimizovani za saobraćaj srednje gustine, tipično za industrijsku primenu), (3) protokoli sa semplovanjem preambule (odgovarajući za retko slanje izveštaja, npr. razna merenja) i (4) hibridni protokoli (kombinuju prednosti više protokola).

3.3.1. Protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu

U primenama gde je saobraćaj periodičan i gust najbolje je koristiti MAC protokole zasnovane na alokaciji resursa, tj. sa fiksnim rasporedom. Kod bežičnih senzorskih mreža ovi protokoli se zasnivaju na TDMA, jer se time eliminišu kolizije, nepotrebno slušanje i preslušavanje. Radi postizanja boljih performansi, TDMA je moguće kombinovati sa FDMA.

Glavni problem kod TDMA protokola je uspostavljanje i održavanje vremenskog rasporeda koji definiše podelu vremena na slotove i dodelu slotova čvorovima na korišćenje. Postojeći MAC protokoli koriste jedan od sledeća tri pristupa:

- **Kreiranje rasporeda linkova.** Pod linkom se podrazumeva uređeni par susednih čvorova (N_A i N_B), gde je N_A pošiljaoc a N_B primaoca. Ova tehnika podrazumeva da se vremenski slotovi dodele svakom linku u mreži, tako da se u potpunosti eliminišu kolizije i nepotrebno slušanje, čime se minimizuje gubitak energije, ali zahteva strogu sinhronizaciju, za šta je neophodan dodatni saobraćaj, koji dodatno troši energiju.
- **Kreiranje rasporeda pošiljalaca.** Ova tehnika podrazumeva da se slot dodeljuje pošiljaocu. Ovim se eliminišu kolizije i minimizuje nepotrebno slušanje i delimično smanjuje potreba resinhronizacije (pošto promene na strani primaoca nisu bitne za raspored), ali ostaje problem povećane potrošnje energije usled prijema tuđih poruka, pošto se zahteva da svi primaoci budu budni u svakom slotu. Ovaj problem može da se smanji filtriranjem poruka na osnovu zaglavlja, da bi čvorovi koji nisu primaoci mogli da se vrate u stanje smanjene potrošnje.
- **Kreiranje rasporeda primaoca.** Ova tehnika podrazumeva da se vremenski slot dodeli primaocu. Ovo eliminiše prijem tuđeg saobraćaja, smanjuje nepotrebno slušanje i smanjuje potrebu resinhronizacije (pošto promene na strani pošiljaoca nisu bitne za raspored), ali ostaje problem kolizija.

Prve dve varijante TDMA protokola odgovaraju primenama sa gustim saobraćajem i sa ograničenim kašnjenjem a treća saobraćaju srednje gustine.

MAC protokoli sa fiksnim rasporedom imaju sledeće probleme:

- **Sinhronizacija:** preduslov za rad bilo koje TDMA šeme je mogućnost postizanja relativno čvrste sinhronizacije između svih čvorova u mreži. Potreba za sinhronizacijom povećava složenost protokola i dovodi do povećanog utroška energije.
- **Skalabilnost:** TDMA raspored je validan samo ukoliko garantuje ekskluzivnu dodelu slotu u *2-hop* okolini bilo kog čvora u mreži. Kreiranje validnog TDMA rasporeda na decentralizovan način se rešava složenim distribuiranim algoritmima. Vreme potrebno za kreiranje rasporeda i energija koja se za to troši je srazmerna veličini i gustini mreže.
- **Brodkast,** tj prenos podataka od jednog izvorišta do svih odredišta zahteva, osim u slučaju kreiranja rasporeda pošiljaoca, da se ista poruka emituje u više slotova, što nije energetski efikasno.

- **Fleksibilnost** je smanjena pošto svaka promena u topologiji mreže zahteva ponovno kreiranje rasporeda. Zbog toga ovi protokoli nisu primenjivi kod primena sa čestim promenama topologije, npr. kod bežičnih senzorskih mreža sa mobilnim čvorovima.
- **Veličina memorije** je problem, pošto se zahteva da svaki čvor poznaje vremenski raspored svih čvorova iz svoje *2-hop* okoline. Takođe, za pribavljanje ovih informacija troši se dodatna energija, čiji je iznos srazmeran gustini mreže.

Tabela 2 daje pregled MAC protokola zasnovanih na vremenskom rasporedu.

Tabela 2 Pregled protokola zasnovanih na vremenskom rasporedu.

Funkcija	Protokoli
Tipični predstavnici	IEEE 802.15.4 [14]
Centralizovano kreiranje rasporeda	Arisha [29], PEDAMACS [30], BitMAC [31], G-MAC [32]
Lokalizovano kreiranje rasporeda	TRAMA[33], FLAMA [34], μ MAC [35], EMACs [36], PMAC [37]
Rotiranje uloga čvorova	PACT [38], BMA [39]
Rad u mobilnom okruženju	MMAC [40], FlexiMAC [41]
Prilagođavanje promenama saobraćaja	PMAC [42]
Dodela slota prijemnicima	O-MAC [43]
Ostali	LMAC [15], AI-LMAC [44], SS-TDMA [45], RMAC [46]

EMACs (*Energy Efficient MAC*) [36] uvodi lokalizovano kreiranje vremenskog rasporeda bez kolizija. EMACs dozvoljava postojanje tri vrste čvorova: aktivnih, pasivnih i latentnih (čvorovi koji su istrošili bateriju ili im se baterija dopunjava). Aktivni čvorovi učestvuju u svemu a pasivni samo odgovaraju aktivnom čvoru kome pripadaju (ovde se radi o hijerarhijskoj organizaciji čvorova; aktivni čvorovi igraju ulogu kontrolera klastera, između ostalog i kreiraju vremenski raspored). Vreme je podeljeno u slotove koji su dodeljeni aktivnim čvorovima. Svaki slot se sastoji iz CR (*Communication Request*), TC (*Topology Control*), i DATA dela. U CR delu aktivni čvor sluša zahteve svojih pasivnih čvorova. U TC delu im šalje ACK pakete, podatke o sinhronizaciji i tabelu sa rasporedom. Pošto je moguće da više pasivnih čvorova pripada istom aktivnom, moguće je da dođe do kolizije prilikom slanja CR. Aktivni čvor ovo detektuje i o tome obaveštava pasivne. Ukoliko aktivni čvor nema podatke koje bi slao za vreme DATA, pasivnim čvorovima je dozvoljeno da se nadmeću za slanje u ovom periodu.

Aktivni čvor sluša sve svoje aktivne susede. Ako želi da nekom od njih pošalje paket, to najavljuje u TC delu slota. Aktivni čvorovi se biraju tako da zajedno čine povezan dominantni skup čvorova. To znači da je svaki mrežni čvor ili u ovoj grupi, ili ima suseda koji je u grupi.

Dodela slotova je distribuirana. Svaki čvor obaveštava susede o zauzeću slotova (svom i svojih suseda). Ovo omogućava susedima da izaberu slot tako da izbegnu kolizije u *2-hop* okolini. Mana EMACs-a je ta što su aktivni čvorovi uvek aktivni. Efekat ovoga se umanjuje tako što se rotira uloga aktivnog čvora među susedima, ali ovo dovodi do kreiranja neoptimalnog dominantnog skupa, što dovodi do dodatnog utroška energije.

TRAMA (*Traffic Adaptive Medium Access protocol*) [33] je takođe protokol sa lokalizovanim kreiranjem vremenskog rasporeda. Protokol radi u ciklusima. Svaki ciklus se sastoji iz dve faze: 1) kreiranje lokalizovane topologije (period sa proizvoljnim pristupom) i 2) rad čvorova po rasporedu (gde se čvorovi bude samo da bi emitovali ili primili paket). U prvoj fazi čvorovi razmenjuju podatke o susedima, čime upoznaju svoju *2-hop* okolinu. Čvorovi periodično razmenjuju i informaciju o rasporedu (odnosno spisak primaoca). Na osnovu ovih informacija čvor sprovodi distribuirani algoritam za kreiranje vremenskog rasporeda (za svaki slot druge faze određuje čvorove koji ostaju budni zbog prijema ili predaje i čvorove koji mogu da pređu u stanje smanjene potrošnje). Protokol potpuno eliminiše nepotrebno slušanje i preslušavanje. Mane su kompleksnost i potreba za sinhronizacijom cele mreže.

MMAC (*Mobility adaptive MAC*) [40] je protokol koji uzima u obzir i mobilnost i to obe: slabu dinamičnost (usled promena topologije i priključivanja novih čvorova) i intenzivnu dinamičnost (isključivanje čvorova koji izazivaju kolizije, fizička pokretljivost čvorova). MMAC kreira raspored bez kolizija zasnovan na proceni toka saobraćaja, mobilnosti i paterna dinamičnosti. Uvodi promenljivu dužinu frejma, koja je proporcionalna nivou mobilnosti. Očekuje se da su čvorovi sposobni da utvrde svoj položaj i patern mobilnosti. Glavni problem protokola je što ovo često nije moguće, ili troši previše energije.

PMAC (*Pattern MAC*) [42] je MAC protokol baziran na TDMA. Svaki čvor održava raspored prema kome prelazi u aktivno stanje (da bi razmenjivao pakete) ili u stanje smanjene potrošnje. Pre kreiranja rasporeda, čvorovi obaveštavaju susede o paternu svojih aktivnih i slotova sa smanjenom potrošnjom u okviru frejma (patern je binarna sekvenca u kojoj bitovi redom odgovaraju slotovima u frejmu; 1 ukazuje na aktivan a 0 na slot smanjene potrošnje). Odnos broja aktivnih i slotova smanjene potrošnje zavisi od intenziteta saobraćaja u okolini čvora. Ukoliko nema saobraćaja, čvor udvostručuje broj slotova smanjene potrošnje (do određenog broja, posle koga se broj linearno uvećava). Novokreirani patern se šalje susedima, da bi oni mogli da kreiraju svoje paterne. Stvarni vremenski raspored zavisi od paterna čvora, paterna njegovih suseda i realne potrebe za razmenom paketa. To znači da ako je slot na istim pozicijama u paternima predajnika i prijemnika aktivan i transponder želi da pošalje poruku, u konačnom rasporedu će taj slot biti aktivan. Ukoliko je u paternu prijemnika slot smanjene potrošnje a predajnika aktivan slot, taj slot će u konačnom rasporedu predajnika biti delimično aktivan (čvor će se probuditi na početku slotu da čuje da li neko želi da mu pošalje paket, i ukoliko to nije slučaj vratiće se u režim smanjene potrošnje).

PMAC ne eliminiše nepotrebno slušanje, zato što čvor, ako nema podataka za slanje ima obavezu da bude na prijemu tokom svakog aktivnog slotu. Pošto su aktivni slotovi dovoljno dugi za slanje cele poruke, utrošak energije zbog nepotrebno slušanja može da bude značajan. Slotovi fiksnog trajanja mogu da dovedu do kolizija, u slučaju veće gustine saobraćaja. Kao MAC protokol baziran na TDMA, PMAC ima problem sa mobilnim čvorovima i trošenjem energije na sinhronizaciju i razmenu podataka o vremenskom rasporedu.

LMAC (*Lightweight MAC*) [15] kreira TDMA raspored s ciljem da eliminiše *2-hop* kolizije. Kod njega se TDMA raspored kreira na distribuirani način, uzimajući u obzir podatke o zauzeću slotova u *2-hop* okolini čvora. Problem nastaje kod gustih mreža (*2-hop* okolina se sastoji od desetina čvorova) kad se zauzmu svi slotovi, pa novi čvor može da ostane bez slotu, a time i bez mogućnosti da komunicira sa okolinom.

AI-LMAC (*Adaptive Information-centric Lightweight MAC*) [44] poboljšava LMAC tako što predlaže da svaki čvor može da koristi više slotova. Broj slotova dodeljenih čvoru se

dinamički menja, zavisno od trenutnog intenziteta saobraćaja kroz čvor.

RMAC (*Randomized MAC*) [46] je TDMA protokol sa dodelom slotova na zahtev. Pretpostavlja se da svi čvorovi komuniciraju direktno sa baznom stanicom. Frejm se deli na tri dela: 1) period nadmetanja, kad čvorovi šalju zahtev baznoj stanici, 2) period potvrde, kad bazna stanica šalje potvrde čvorovima koji su dobili slotove i 3) period komunikacije, kad čvorovi koriste slot, koji im je dodelila bazna stanica, za komunikaciju. Dužina trajanja perioda nadmetanja (broj mini slotova) se utvrđuje dinamički (treba izabrati optimalnu dužinu, pošto duže trajanje smanjuje kolizije ali povećava potrošnju i obratno). Na osnovu broja praznih mini slotova, mini slotova sa kolizijom i uspešno iskorišćenih mini slotova RMAC procenjuje broj čvorova koji učestvuju u koliziji, broj čvorova koji će se nadmetati u sledećem krugu i na osnovu toga proračunava broj mini slotova u sledećem krugu, optimizujući i predviđeno kašnjenje.

3.3.2. Protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom

Kod ovog pristupa, čvorovi definišu zajedničke aktivne periode (za razmenu podataka) i periode smanjene potrošnje (za uštedu energije). Ovo zahteva određeni nivo sinhronizacije. Za vreme aktivnog perioda, čvorovi se nadmeću za medijum koristeći metod zasnovan na nadmetanju, kao što je CSMA, 802.11 DCF. Pristup zasnovan na nadmetanju postiže najbolje rezultate kod primena kod kojih saobraćaj postoji periodično, kao što je nadgledanje, ili se periodično razmenjuju poruke. Ovi protokoli nisu odgovarajući za primene kod kojih je saobraćaj neregularan, jer bi se u nekim periodima nepotrebno uključivali, a u drugim bi zbog pojačanog saobraćaja dolazilo do kolizije.

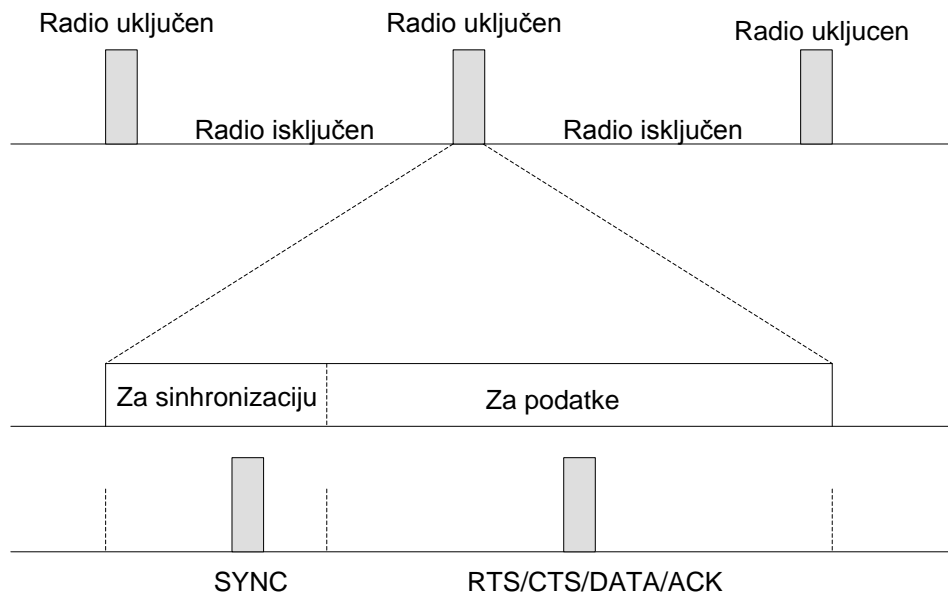
Tabela 3 daje pregled protokola sa zajedničkim aktivnim periodom prema cilju koji ispunjavaju.

Tabela 3 Pregled MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom.

Funkcija	Protokol
Tipičan predstavnik	S-MAC [11]
Povećana fleksibilnost	TMAC [12], E2MAC [47], SWMAC [48]
Minimizovanje kašnjenja usled prelaska u režim smanjene potrošnje	Adaptive Listening [49], nanoMAC [50], DSMAC [51], FPA [52], DMAC [13], QMAC [53]
Uzimanje mobilnosti u obzir	MSMAC [54]
Minimizovanje broja rasporeda	GSA [52]
Statički pristup	RL-MAC [55], U-MAC [56]
Korišćenje radija za buđenje	RMAC [57], E2RMAC [58]

S-MAC [11] je protokol zasnovan na nadmetanju za medijum. On smanjuje potrošnju energije na račun propusne moći i kašnjenja, tako što koristi režime rada smanjene potrošnje primopredajnika (engl. *sleep mode*) da bi smanjio nepotrebno slušanje (engl. *idle listening*). Aktivni periodi su fiksne dužine trajanja, dok dužina trajanja neaktivnog perioda zavisi od predefinisane parametra *duty cycle*. Aktivni i neaktivni period zajedno čine jedan frejm. Da bi čvorovi mogli da komuniciraju, potrebno je da im se aktivni periodi podudaraju, što zahteva redovnu sinhronizaciju. Zbog toga se aktivni period čvora sastoji iz dva dela (Slika 3.4): prvog, gde se razmenjuju paketi za sinhronizaciju (SYNC paket) i drugog, za razmenu paketa podataka. Svaki od ova dva dela je podeljen na mini slotove. U svakom od mini slotova čvorovi se nadmeću za medijum po modelu preuzetom iz protokola 802.11 DCF [6],

prvo osluškujaju medijum za vreme trajanja jednog, slučajno odabranog mini slota i onda šalju poruku u narednom mini slotu, ukoliko je kanal slobodan.



Slika 3.4 Princip rada S-MAC protokola.

Svaki čvor ima svoj raspored buđenja (trenutak početka aktivnog perioda). Kad se čvor uključi prvi put, prvo osluškuje medijum, neko vreme, najmanje za vreme trajanja jednog frejma. Ukoliko za to vreme primi SYNC paket, čvor se prilagođava postojećem rasporedu. U protivnom, usvaja svoj raspored i šalje ga u vidu SYNC paketa susednim čvorovima. Čvorovi koji su ga čuli, prihvataju novi raspored i šalju ga dalje kroz mrežu. Na ovaj način čvorovi formiraju virtuelne klasterne, sa sinhronizovanim rasporedima buđenja. Idealno bi bilo da svi čvorovi u mreži imaju isti raspored, tako da postoji samo jedan klaster. Međutim, mreža obično ima više klastera, koji nastaju usled grešaka u prenosu, kolizija, velikih kašnjenja, ili u slučaju kad se istovremeno uključi više čvorova, pa pošalju SYNC paket u isto vreme sa različitim rasporedima. Čvorovi koji prime dva ili više različita rasporeda se nazivaju granični čvorovi i u obavezi su da se priključe svim okolnim klasterima, pa tako imaju više aktivnih perioda, po jedan za svaki raspored, da bi se omogućio prenos podataka između klastera.

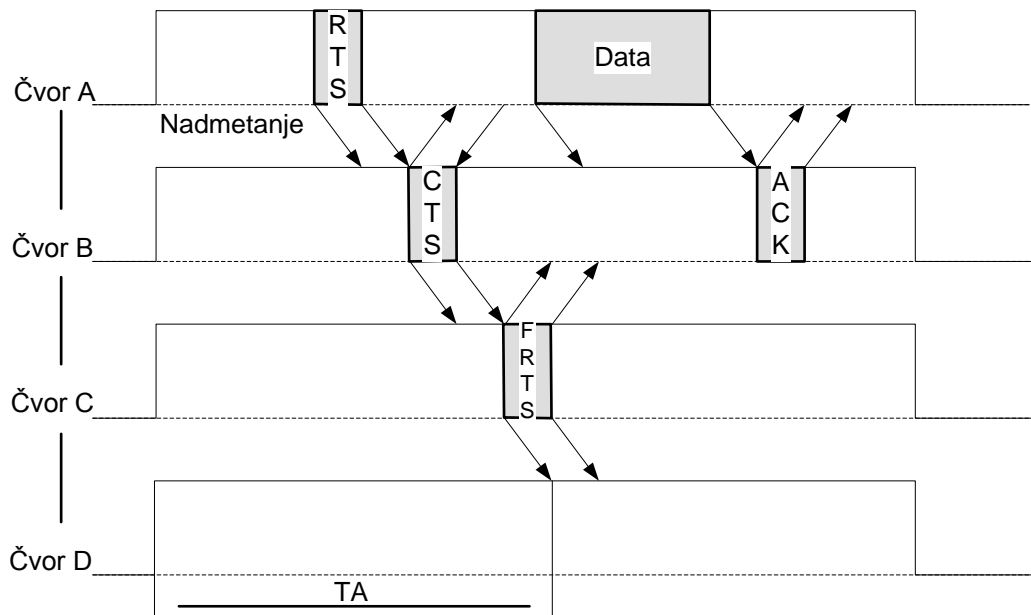
S-MAC poseduje mehanizme za razrešenje više problema. Pošto svi čvorovi iz klastera emituju samo u okviru aktivnog perioda, velika je verovatnoća da će doći do kolizije baš na početku tog perioda. S-MAC rešava ovaj problem tako što čvorovi čekaju neki slučajan vremenski period, pre nego što pokušaju slanje. Problem kolizije rešava korišćenjem RTS/CTS procedure i tehnike virtuelnog osluškivanja kanala – NAV (prema engl. *Network Allocation Vector*). NAV podrazumeva da zaglavlje svakog paketa sadrži polje koje ukazuje na vreme preostalo do kraja prenosa paketa. Ovo omogućava da čvor koji primi paket namenjen nekom drugom može da se povuče na odgovarajući period, posle koga može da ponovo pokuša da pošalje poruku. Takođe, da bi se izbeglo ponovno slanje velikih poruka, poruke se dele na manje pakete, tako da se slanje poruke počinje RTS/CTS procedurom, a onda šalju redom manji paketi. Zbog uvođenja perioda smanjene aktivnosti, dolazi do izvesnih problema. Propusna moć mreže se smanjuje pošto se samo aktivni deo frejma koristi za komunikaciju. Kašnjenje se povećava zato što kreiranje poruke može da se desi za vreme režima smanjene potrošnje, pa poruka mora da čeka do početka sledećeg aktivnog dela. Takođe, za S-MAC je karakteristično povećano komunikaciono kašnjenje pri prenosu poruka na veća rastojanja. Čvor koji je primio poruku za prosleđivanje pred kraj aktivnog perioda

mora da čeka na naredni aktivni period pre nego što poruku prosledi dalje. Ova pojava se naziva kašnjenje usled prelaska u režim smanjene potrošnje (engl. *sleep delay*).

Prilikom izbora optimalne dužine trajanja aktivnog perioda treba uzeti u obzir dva parametra: potrošnju energije usled nepotrebnog slušanja i kolizije. Kraći aktivni period smanjuje nepotrebno slušanje ali povećava verovatnoću da dođe do kolizije. Duži aktivni period radi suprotno, smanjuje koliziju, a povećava nepotrebno slušanje. Kod S-MAC protokola, trajanje aktivnog perioda je fiksno i postavlja se na osnovu očekivanog saobraćaja. Zbog toga ovaj protokol nije adaptivan na promene gustine saobraćaja u vremenu, koje su karakteristične za neke primene bežičnih senzorskih mreža. Takođe, problem se javlja usled toga što svi čvorovi nemaju isto opterećenje (čvorovi bliži baznoj stanici prenose više poruka od onih na ivicama), pa je teško naći optimalnu dužinu trajanja aktivnog perioda.

T-MAC [12] proširuje S-MAC tako što dinamički prilagođava trajanje aktivnog perioda, na osnovu intenziteta komunikacije među najbližim susedima. T-MAC smanjuje potrošnju energije na taj način što smanjuje dužinu trajanja aktivnog perioda. Da bi ovo postigao, pomera sav saobraćaj na početak aktivnog perioda. Čvor zatim čeka da istekne period TA. Ukoliko se za ovo vreme ne desi aktivacioni događaj (prijem paketa ili čak i šum), prelazi u režim smanjene potrošnje. Period TA se usvaja tako da bude dovoljno dug da obuhvata maksimalno vreme nadmetanja i razmenu RTS i CTS paketa. Nažalost, ovaj metod može da dovede do preranog prelaska u režim smanjene potrošnje (engl. *early sleep problem*), čime se delimično ruši sinhronizacija među čvorovima u klasteru. Rešava se uvođenjem FRTS (*Future Request To Send*) frejma koji se šalje ovom čvoru, pre nego što mu istekne TA period (Slika 3.5).

U slučajevima promenljivog saobraćaja, T-MAC troši oko pet puta manje energije od S-MAC-a, po cenu povećanog kašnjenja i smanjene propusne moći.



Slika 3.5 Emitovanje FRTS paketa, da bi čvor D ostao budan: omogućava 3-hop transmisiju u jednom ciklusu.

Osim T-MAC-a, postoje i drugi protokoli koji se trude da povećaju fleksibilnost S-MAC-a. **E2MAC** [47] koristi sličnu ideju kao T-MAC, samo što gomila pakete dok ne napuni bafer i onda ih šalje. Ovo takođe smanjuje potrošnju energije, ali povećava kašnjenje. **SWMAC** (*Separate Wakeup MAC*) [48] deli aktivni period u slotove dovoljne dužine da

zadovolje ceo prenos, uključujući RTS, CTS, podatke i ACK paket. Svakom čvoru se dodeljuje slot za prijem u toku koga se budi i prima podatke. SWMAC ima iste nedostatke kao S-MAC.

Problem kašnjenja usled prelaska u režim smanjene potrošnje može da se reši korišćenjem preslušavanja, kao što je slučaj kod protokola **Adaptive Listening** [49]. Ideja je da čvorovi koji čuju poruke od svojih suseda mogu da iz njih saznaju kad slanje prestaje, tako da odmah mogu da pređu u režim smanjene potrošnje, da bi se probudili u trenutku kad se slanje završi (čak i ako je to za vreme njegovog redovnog režima smanjene potrošnje). Na ovaj način susedi odmah mogu da im pošalju poruku, bez čekanja sledećeg aktivnog perioda. Ova ideja je predložena i kod protokola **nanoMAC** [50].

Protokoli T-MAC i *Adaptive listening* smanjuju samo kašnjenje usled prelaska u režim smanjene potrošnje na nivou suseda. To znači da ne mogu da smanje kašnjenje u multihop prenosu. Sledeći protokoli dalje smanjuju kašnjenje usled prelaska u režim smanjene potrošnje. **DSMAC** (*Dynamic S-MAC*) [51] uvodi dinamički *duty cycle*, tako što po potrebi umeće nove aktivne periode u period smanjene potrošnje, ukoliko se ukaže potreba (ukoliko se zahteva smanjenje kašnjenja ili se primeti gušći saobraćaj) i SYNC paketom o tome obaveštava susede, koji po potrebi produžavaju svoje *duty cycle*.

FPA (*Fast Path Algorithm*) [52] radi na sledeći način: prvi paket poruke sadrži podatak o putanji. Čvor koristi podatak o broju koraka od izvora, da bi procenio kad će njegov sused imati paket za njega i budi se u predviđeno vreme (čak i ako se desi u vreme režima smanjene potrošnje). FPA je efikasan u situacijama kad izvor šalje dugačku poruku koja se radi prenosa razbija na više paketa.

DMAC (*Data-gathering MAC*) [13] uvodi dodatne aktivne periode slično kao FPA, samo što je prilagođen specijalnom slučaju gde mnogo izvora šalje podatke na jedno odredište. Čvorovi su logički povezani u strukturu stabla sa korenom u odredišnom čvoru (tipično, to je bazna stanica). Na osnovu svoje pozicije u stablu svaki čvor podešava početak svog aktivnog perioda tako da se budi baš u momentu kad je njegov sused sa sledećeg višeg nivoa stabla spreman da mu prosledi paket.

Q-MAC (*Query MAC*) [53] je sličan DMAC-u po tome što uvodi korekcije u tajmingu aktivnih perioda. U početku, svi čvorovi imaju zajednički aktivni period (kao kod S-MAC-a). Čvorovi na jedan korak od odredišta zadržavaju svoj prvobitni raspored. Čvorovi na dva koraka od odredišta malo pomeraju aktivni period, da bi smanjili kašnjenje. Znači, Q-MAC koristi zajednički preklapajući aktivni period da bi omogućio komunikaciju između 1-hop i 2-hop suseda sa minimalnim kašnjenjem. Za razliku od DMAC-a, Q-MAC pomera aktivne periode tako da odgovaraju prenosu podataka od odredišta ka čvorovima (odgovara brokast komunikaciji). Za suprotan put, postoje dve opcije. Ako odredište zna tačnu dužinu puta do izvora, onda se čvorovi bude samo da bi primili i prosledili poruku. Ako je ne zna, čvorovi ostaju budni ceo aktivni period, da bi se smanjilo kašnjenje. Iako ovaj protokol smanjuje kašnjenje, diskutabilna je njegova energetska efikasnost, zbog predugog nepotrebnog slušanja, posebno u ovom drugom slučaju. Q-MAC se koristi kao podrška za model komunikacije upit-odziv (engl. *query-response*), gde se u prvoj fazi upit koji potiče od odredišta (bazne stanice) distribuira svim čvorovima u mreži, a u drugoj fazi se odredištu dostavlja odgovor koji potiče od čvora koji se prepoznaje u upitu.

S-MAC i srodni protokoli zasnovani na zajedničkom ili preklapajućim aktivnim periodima, kreirani su za mreže sa stacionarnim čvorovima. Kad se uvede mobilnost čvorova, raspored rada čvora više nije validan, jer je moguće da čvor pređe u drugi virtuelni klaster. **MSMAC** (*Mobility-aware SMAC*) [54] prilagođava *duty cycle* da bi smanjio vreme

uspostavljanja veze kod mobilnih čvorova. Čvor meri promenu nivoa signala primljenih SYNC paketa, da bi procenio brzinu u odnosu na svakog suseda. Podatak o relativnim brzinama šalje susedima u okviru svog SYNC paketa. Na osnovu ovih podataka, susedi kreiraju aktivnu zonu oko čvora. Čvorovi u aktivnoj zoni ostaju aktivni duže da bi smanjili vreme uspostavljanja veze.

Postojanje više klastera (što znači više od jednog rasporeda) podrazumeva veću potrošnju, pošto čvorovi koji usvoje više od jednog rasporeda provode više vremena u aktivnom stanju. **GSA** (*Globale Schedule Algorithm*) [52] smanjuje broj aktivnih rasporeda tako što svi čvorovi u mreži konvergiraju ka jednom zajedničkom rasporedu. Prilikom odlučivanja o izboru rasporeda, čvor uzima u obzir starost rasporeda i uvek bira stariji.

RL-MAC (*Reinforcement Learning MAC*) [55] optimizuje aktivne i periode smanjene potrošnje koristeći MDP (*Markov Decision Process*) za modeliranje procesa aktivne vremenske rezervacije. Cilj optimizacije je povećanje propusne moći i smanjenje potrošnje. Mana ovog protokola je što podrazumeva da je saobraćaj konstantan tokom dužeg vremenskog perioda.

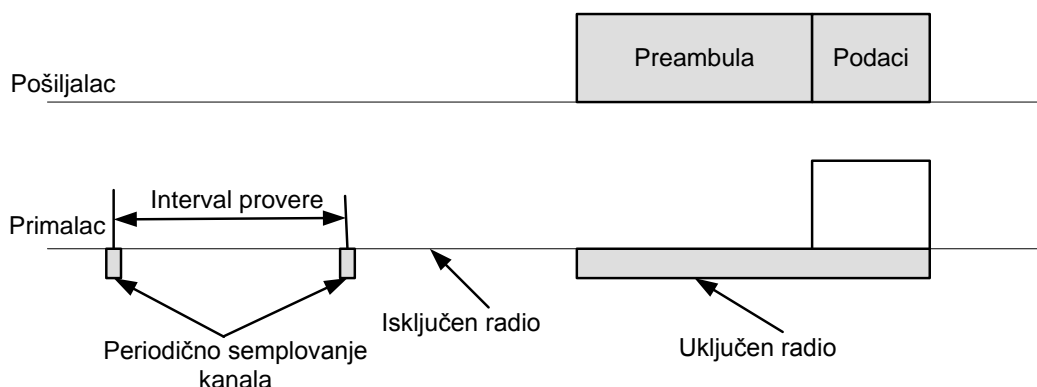
U-MAC (*Utilization-based MAC*) [56] optimizuje *duty cycle* za svaki čvor pojedinačno, koristeći funkciju iskorišćenosti, koja predstavlja odnos poslatih poruka i primljenih poruka za vreme aktivnog perioda. Vrednost ove funkcije je uvek manja od 1. Što je vrednost manja, čvor provodi više vremena u nepotrebnom radu. Svaki čvor čuva dve vrednosti, U_{max} i U_{min} i prilagođava trajanje aktivnog perioda tako da se vrednost funkcije iskorišćenosti nađe između ove dve vrednosti. Pošto je osnovna ideja U-MAC-a slična ideji T-MAC-a, i mane su im slične.

RMAC (*Reliable MAC*) [57] protokol se trudi da poveća pouzdanost prenosa podataka. Predlaže više tehnika za izbegavanje kolizija i zagušenja komunikacionog kanala korišćenjem implicitnih ACK paketa, adaptivnih retransmisija i kontrole učestanosti transmisija. Na primer, čvor koji je završio emitovanje ne emituje odmah dalje, već čeka da odredište završi prenos (da pošalje ACK paket), da ne bi došlo do kolizije sa njim.

E2RMAC (*Energy-Efficient Reliable MAC*) [58] povećava energetska efikasnost RMAC-a tako što smanjuje nepotrebno slušanje i preslušavanje. Princip se zasniva na korišćenju dodatnog radija za buđenje. Kad čvor ima podatke za slanje, šalje signal na ovom radiju sa niskom potrošnjom, koji budi sve susede. Čvor zatim šalje paket za „filtriranje“, da bi se čvorovi za koje nema poruku vratili u režim smanjene potrošnje. Nakon slanja poruke, čvor se vraća u režim smanjene potrošnje na period koji je dovoljan da odredište poruke poruku prosledi dalje, što je sličan princip kao kod protokola *Adaptive Listening*.

3.3.3. Protokoli sa semplovanjem preambule

Kod protokola sa semplovanjem preambule čvorovi nemaju zajednički aktivan period, već svaki čvor bira svoj raspored buđenja. Čvorovi provode veći deo vremena u stanju smanjene potrošnje i periodično se bude na kratak vremenski period da bi proverili da li neko želi da im pošalje poruku. Period na koji se budi čvor naziva se interval provere (engl. *check interval*). Slika 3.6 prikazuje primer funkcionisanja protokola. Ukoliko se ne detektuje preambula, čvor se veoma brzo vraća u režim smanjene potrošnje. Ukoliko se detektuje preambula, čvor ostaje u aktivnom stanju dok ne primi celu poruku, eventualno pošalje ACK paket i tek se tada vraća u stanje smanjene potrošnje. Trajanje preambule treba da bude najmanje dužine trajanja intervala provere, da bi se omogućilo da svi potencijalni prijemnici detektuju preambulu a onda i prime poruku.



Slika 3.6 Primer rada protokola WiseMAC. Protokol smanjuje potrošnju energije korišćenjem kratke preambule (svaki transiver zna vreme za buđenje prijemnika i počinje emitovanje preambule malo pre buđenja prijemnika).

CCA (*Clear Channel Assignment*) je postupak pomoću kojeg se utvrđuje da li je kanal slobodan. Koristi se kod CSMA pre emitovanja poruke da bi se utvrdilo da li je kanal zauzet, da ne bi došlo do kolizije. Obično se izvodi pomoću ispitivanja praga (engl. *thresholding*), kao kod IEEE 802.15.4, gde se sastoji iz merenja snage primljenog signala (RSS – *Received Signal Strength*) i upoređivanja dobijene vrednosti sa pragom šuma. Ukoliko je vrednost RSS-a manja od praga šuma, smatra se da je kanal slobodan. Ova tehnika daje puno lažnih pozitivnih rezultata, što dovodi do smanjenja propusne moći komunikacionog kanala.

Tipični predstavnici ove grupe MAC protokola su *Preamble-Sampling ALOHA*[9], *Preamble-Sampling CSMA* [59], *Cycled Receiver* [60], LPL [61] i *Channel Polling* [62]. Svi oni, sa malim varijacijama, realizuju prethodno opisan osnovni princip semplovanja preambule.

Korišćenje preambule smanjuje potrošnju energije usled razmene kontrolnih paketa (RTS/CTS) jer eliminiše potrebu za sinhronizacijom, ali uvodi dugotrajno emitovanje preambule, koje stvara dva nova problema:

Povećanje cene kolizija. Korišćenje preambule eliminiše problem nepotrebnog slušanja na strani prijemnika, ali povećava potrošnju na strani predajnika, zbog potrebe da se emituje duga preambula. Zbog toga su protokoli sa semplovanjem preambule efikasni samo kod primena kod kojih se poruke razmenjuju retko (kao što je slučaj sa nadgledanjem). U primenama sa većom frekvencijom emitovanja, kolizije se češće javljaju, što dovodi u pitanje energetska efikasnost ovih protokola, jer je cena retransmisije velika (ponavlja se ne samo poruka nego i preambula). Zbog toga se javlja potreba za proširenjem protokola sa semplovanjem preambule tehnikama za eliminisanje kolizija.

Ograničen duty cycle. Da bi se produžio životni vek čvorova, javlja se potreba za povećanjem *duty cycle*, tj. potreba da se produži vreme koje čvor provodi u stanju smanjene aktivnosti. Ovo podrazumeva produžavanje intervala provere. Iako se na ovaj način smanjuje potrošnja energije usled nepotrebnog slušanja na strani prijemnika, povećava se potrošnja na strani predajnika jer duži interval provere zahteva dužu preambulu, što povećava potrošnju. Postoji optimalna vrednost za dužinu trajanja intervala provere iznad koje su gubici energije potrebne za emitovanje veći od uštede kod prijema. Ova optimalna vrednost zavisi od više parametara, kao što su: snaga emitovanja, snaga prijema, gustina saobraćaja i vreme potrebno za promenu stanja radio primopredajnika.

Tabela 4 daje pregled protokola sa semplovanjem preambule i onih kod kojih je pokušano da se prevaziđu tipični problemi vezani za semplovanje preambule.

Tabela 4 Pregled MAC protokola sa semplovanjem preambule.

Funkcija	Protokoli
Tipični predstavnici	Preamble-Sampling ALOHA [9], Preamble-Sampling CSMA [59], Cycled Receiver [60], LPL [61], Channel Polling [62]
Poboljšanje CCA	BMAC [61]
Adaptive Duty Cycle	EA-ALPL [63]
Smanjenje dužine preambule pomoću paketizacije	CSMA-MPS [64], X-MAC[65], MH-MAC [66], DPS-MAC [67], CMAC [68], GeRAF [69], 1-hopMAC [70], RICER [60], SpeckMAC-D [71], MXMAC[72]
Smanjenje dužine preambule dodavanjem podatka o sinhronizaciji	WiseMAC[10], RATE EST [73], SyncWUF [74]
Korišćenje odvojenih kanala	STEM [75]
Izbegavanje nepotrebnih prijema	MFP[76], 1-hopMAC [70]

BMAC (*Berkley MAC*) [61] protokol za semplovanje preambule, umesto ispitivanja praga, na osnovu izolovanih uzoraka snage primljenog signala, predlaže praćenje promene snage signala u kraćem vremenskom intervalu, tzv. upotrebu detekcije odstupanja (engl. *outlier*), da bi se poboljšao CCA. Kod ove tehnike, čvor traži nagle promene snage primljenog signala, recimo gde snaga signala značajno pada ispod nivoa šuma. Ukoliko je ovakva promena detektovana, smatra se da je kanal slobodan. Ukoliko je snaga signala neprekidno iznad nivoa šuma, smatra se da je kanal zauzet. Uspeh ove metode zavisi od tačnosti procene vrednosti praga šuma. BMAC koristi automatsku kontrolu pojačanja za procenu praga šuma, da bi se prilagodio promenama šuma sredine. To znači da svaki čvor uzima uzorke vrednosti snage signala u trenucima kad se sa velikom izvesnošću pretpostavlja da je kanal slobodan (recimo odmah posle završetka emitovanja) i vrednost praga šuma se izračunava kao srednja vrednost ovih uzoraka.

Precizan CCA, pored izbegavanja kolizije i dobrog iskorišćenja kanala ima i druge prednosti. Omogućava da čvor koji osluškuje preambulu i očekuje da primi poruku, ukoliko utvrdi da je kanal oslobođen a da poruka nije poslata prekine osluškivanje i odmah pređe u režim smanjene potrošnje.

Utvrđivanje optimalnog intervala provere podrazumeva poznavanje gustine saobraćaja, što ne odgovara primenama kod kojih se gustina saobraćaja menja u toku vremena. Zbog toga BMAC predlaže da svaki čvor poseduje interfejs za dinamičko podešavanje nekoliko parametara, od kojih je jedan interval provere. BMAC predlaže postojanje osam različitih režima rada osluškivanja, za osam različitih vrednosti intervala provere. Čvor može da promeni režim rada dinamički, da bi se adaptirao na nastale promene.

EA-ALPL (*Energy-Aware Adaptive Low Power Listening*) [63] koristi rekonfigurabilne interfejse predložene kod BMAC-a da bi se prilagodio promenama gustine saobraćaja. Svaki čvor bira režim rada prema trenutnom intenzitetu saobraćaja. Mogućnost da menja režim rada koristi i da bi uticao na odluke prilikom rutiranja.

Pošto čvorovi za prosleđivanje saobraćaja biraju suseda koji ima najmanji period provere (radi uštede energije, jer kraći period provere zahteva kraću preambulu), čvorovi kroz koje se

prosleđuje previše poruka mogu da produže svoj period provere, da bi naveli susede da za prosleđivanje izaberu neki drugi čvor. Sličan princip koristi i **SEESAW** [77] protokol, kod koga je dozvoljeno da čvorovi sami podese svoj period provere.

STEM (*Sparse Topology and Energy Management*) [75] protokol koristi dva radio kanala: jedan za buđenje i jedan za podatke. Na kanalu za buđenje se samo emituje preambula, tako da on služi za “ugovaranje susreta između predajnog i prijemnog čvora”; kad je susret zakazan, podaci šalju na kanalu za podatke.

Protokol STEAM ima dve podvarijante, prema tipu preambule: STEAM-T i STEAM-B. Kod protokola STEAM-T kao preambula se koristi običan ton zauzeća, samo što se on emituje na posebnom kanalu. Preambula protokola STEAM-B se sastoji iz niza kratkih paketa, ili bikona (engl. *beacon*) a svaki bikon sadrži MAC adresu izvora i odredišta. Kad se probudi, čvor osluškuje kanal za buđenje. Ako primi bikon, iz njega saznaje da li je on očekivano odredište. Ukoliko jeste, šalje paket potvrde (bikon se ne šalju neprekidno, već postoje pauze za slanje signala potvrde), i prelazi na kanal za podatke da bi primio poruku. Pošiljalac takođe prelazi na kanal za podatke kad primi paket potvrde.

Prednost STEM-B protokola je što ne koristi preambulu maksimalnog trajanja, jer prekida emitovanje preambule čim primi paket potvrde. STEAM-T koristi jednostavan ton zauzeća, zbog čega je primopredajnik radija za buđenje jednostavniji, zbog čega je jeftiniji i troši manje energije.

Mnogi protokoli, kao što su **CSMA-MPS** (*CSMA with Minimum Preamble Sampling*) [64], **X-MAC** [65], and **MH-MAC** (*Multimod-Hybrid MAC*) [66] koriste sličnu tehniku kao BMAC, ali sa pauzama u preambuli, i to samo na jednom kanalu. Kod ovih protokola se preambula deli na pakete, sa pauzama, da bi prijemnik mogao da se javi paketom potvrde u pauzi, tako da ne moraju da emituju celu preambulu. Ovaj metod ne odgovara mrežama sa veoma retkim saobraćajem, pošto povećava vreme koje prijemnik treba da bude budan za dužinu trajanja pauze.

Sledeća grupa protokola, kao što su **SpeckMAC-D** [71] i **MX-MAC** [72], umesto paketa preambule ponavlja emitovanje paketa podataka dok ne dobije signal potvrde.

DPS-MAC (*Dual Preamble Sampling MAC*) [67] uvodi poboljšanja u STEM-B protokol tako što smanjuje vreme potrebno za semplovanja. Kod STEM-B protokola potrebno je da prijemnik bude budan tako da izbegne pauzu u preambuli, tj. duže od dužine trajanja pauze. Kod DPS-MAC-a čvor se budi na veoma kratko vreme (tj. vreme minimalno potrebno za proveru da li je kanal slobodan) i ako nije detektovao signal budi se još jednom, po isteku pauze, da bi ponovio proveru. Ukoliko je pri drugoj detekciji detektovao signal (što znači da se prva detekcija desila u vreme pauze), čvor se uključuje i po treći put, posle vremena pause, ali sad da bi primio paket preambule. Ovaj protokol dodatno optimizuje STEAM-B protokol kod mreža sa retkim saobraćajem, a stvarna ušteda zavisi od brzine promene režima rada radio primopredajnika.

CMAC (*Convergent MAC*) [68] funkcioniše slično X-MAC-u. Kod njega se preambula sastoji iz niza RTS paketa, sa pauzama dovoljno dugim za tri CTS paketa. CTS slotovi su sortirani da bi najbolji sledeći čvor mogao da se javi prvi. Najbolji sledeći čvor je onaj koji je geografski najudaljeniji, a time i najbliži krajnjem odredištu paketa. Pošto je moguće da postoji više od jednog najboljeg sledećeg čvora, moguće je da dođe do kolizije, za to je predviđeno postojanje prozora za nedmetanje na početku svakog CTS slotu. Zbog dugog trajanja pauze u preambuli prijemnici moraju da budu sigurni da nisu pogodili pauzu u slučaju da ne detektuju signal, tako da se bude po pet puta u svakom *duty cycle*, što povećava potrošnju energije, pa je ovaj protokol interesantan samo kao primer optimizacije

kombinovanjem više slojeva komunikacionog steka, konkretno MAC sloja i sloja rutiranja.

RICER (*Receiver Initiated Cycled Receiver*) [60] prebacuje inicijalizaciju prenosa sa predajnika na prijemnik. Prijemnik koji je spreman da primi poruku emituje bikon i počinje da osluškuje kanal neko vreme. Ako za to vreme ne počne emitovanje poruke, prijemnik prelazi u režim smanjene potrošnje i ponovo se budi posle nekog vremena. Predajnik koji ima poruku ostaje budan, osluškujući kanal, da bi primio bikon od prijemnika. Kad primi bikon, predajnik emituje poruku, a onda čeka na potvrdu (ACK) od prijemnika. Nakon primljene potvrde, predajnik prelazi u režim smanjene potrošnje. RICER postiže dobre rezultate za razmenu direktnih poruka i enikast tip prenosa (engl. *anycast*), ali nije primenjiv na multikast (engl. *multicast*) i brodkast. Ovde takođe postoji detektovanje preambule, samo što je ne emituje predajnik, već prijemnik. Ovaj metod takođe nije odgovarajući za mreže sa retkim saobraćajem, pošto slanje bikona svi prijemnici vrše periodično.

WiseMAC (*Wireless Sensor MAC*) [10] smanjuje potrošnju energije tako što dozvoljava da se za neke tipove razmene direktnih poruka koristi kraća preambula. Kod većine MAC protokola sa semplovanjem preambule predajnik emituje preambulu pune dužine, pošto ne zna trenutke buđenja suseda. Kod WiseMAC-a čvorovi razmenjuju podatke o sinronizaciji, tako da predajnik može da počne emitovanje preambule u trenutku kad se očekuje buđenje prijemnika. Jedini problem kod ovog metoda je drift takta, tako da se trajanje preambule uvećava za iznos maksimalnog očekivanog drifta. Svaki čvor čuva tabelu sa vremenima buđenja suseda. Svoje vreme buđenja svaki čvor šalje tako što ga dodaje ACK paketu koji se koristi za potvrdu prijema podataka. Ukoliko čvor nema podatak o vremenu buđenja nekog suseda, za njega koristi preambulu pune dužine.

Mnogi protokoli koriste istu tehniku za smanjenje trajanja preambule kao WiseMAC. **RATE EST** (*Rate Estimation MAC*) [73] radi isto, samo što koristi dva kanala (kao STEM-T). **SyncWUF** (*Synchronized Wake Up frame*) [74] zbog dalje optimizacije kombinuje ovu tehniku sa paketizacijom preambule.

MFP (*Micro Frame Preamble*) [76] prepoznaje dva tipa nepotrebnih prijema: jedan je opšti, tiče se prijema redundantnih paketa kod brodkast tipa komunikacije a drugi je tipičan za protokole sa semplovanjem i odnosi se na prijem dela preambule od detektovanja preambule do početka emitovanja podataka. Da bi ovo otklonio MFP deli preambulu na pakete, mikrofrejmove, od kojih svaki sadrži podatke o podacima, kao što su adresa odredišta ili abstrakt paketa i broj sekvence, tj. broj mikrofrejmova do paketa podataka. Čvor koji primi mikrofrejm iz njega sazna kad će biti emitovan paket podataka, i vraća se pređe u stanje smanjene potrošnje. Čvor se budi u vreme očekivano za prijem paketa podataka u slučaju da je potrebno da primi paket (ukoliko je on odredište kod razmene direktnih poruka, ili treba da primi paket koji nije već primio kod brodkast slanja).

3.3.4. Hibridni protokoli

Svi do sada obrađeni protokoli imaju neke prednosti, ali i nedostatke. Protokoli iz ove grupe pokušavaju da kombinuju postojeće protokole, da bi iskoristili sve prednosti i otklonili neke nedostatke, posebno u slučajevima kad je intenzitet saobraćaja promenljiv. Pri većim gustinama saobraćaja bolje performanse pokazuju protokoli zasnovani na rasporedu, dok pri malim gustinama saobraćaja bolje funkcionišu protokoli zasnovani na nadmetanju.

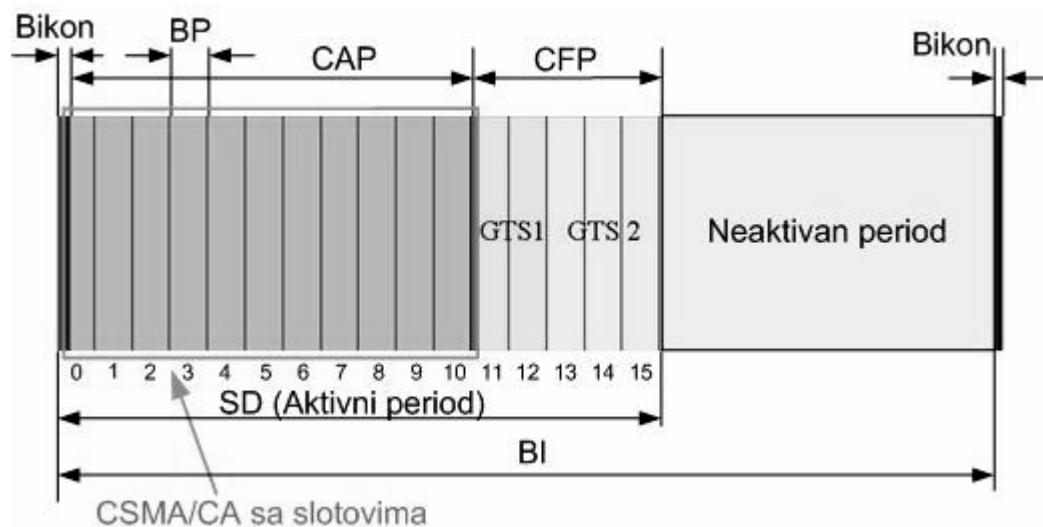
Tabela 5 daje pregled ključnih hibridnih MAC protokola.

Tabela 5 Pregled hibridnih MAC protokola.

Funkcija	Protokoli
MAC protokol fleksibilne strukture	IEEE 802.15.4 [14]
CSMA u okviru TDMA slota	ZMAC [78]
Minimizovanje convergecast efekta	Funneling MAC [79]
Slotted semplovanjem	SCP [61]
Raspored zasnovan na prijemniku	Crankshaft [80]

IEEE 802.15.4 [14] je fleksibilan protokol koji podržava postojanje puno različitih režima rada. Podržava dve klase bežičnih uređaja: 1) potpuno funkcionalni uređaji (FFD, engl. *Full Function Device*) koje mogu da se povežu u bilo koju topologiju i mogu da vrše funkciju koordinatora mreže i 2) uređaji sa redukovanom funkcijom (RFD, engl. *Reduced Function Device*), koji mogu da se povežu samo u topologiju zvezde, povezivanjem sa koordinatom mreže.

Protokol predviđa dva režima komunikacije: 1) sa omogućenim bikonima i 2) bez omogućenih bikona. Drugi režim se svodi na običan CSMA/CA MAC i primenjiv je na mreže sa jednostavnim čvorovima koji mogu da obavljaju samo jednostavne zadatke. Prvi režim se koristi kod mreža koje se sastoje od FFD-a, gde koordinatori šalju bikone i tako održavaju strukturu slota, slično protokolima zasnovanim na vremenskom rasporedu.



Slika 3.7 Struktura superfrejma kod IEEE 802.15.4.

Režim rada sa omogućenim bikonima koristi strukturu superfrejma, gde se frejm deli na aktivni i pasivni period (Slika 3.7). *Duty cycle* se dinamički podešava promenom dužine ova dva perioda. Pre svakog aktivnog perioda koordinatorska mreža emituje bikon frejm svakih 15 ms do 245 ms (BI). Bikon frejm se koristi za sinhronizaciju čvorova i definisanje organizacije superfrejma. Dužina aktivnog perioda je SD. Aktivni period se dalje deli na 16 slotova dužine BP. Aktivni period se sastoji iz: 1) bikona, 2) perioda za nadmetanje (CAP, engl. *Contention Access Period*) i 3) perioda bez kolizija (CFP, engl. *Collision Free Period*). Pristup bez kolizija je moguć samo ako koordinatorska mreža alokira GTS (engl. *Guaranteed Time Slots*) i to su bilo koji slotovi (više njih) između postojećih 16, a u jednom superfrejmu moguće je imati maksimalno 7 GTS-a. Svaki GTS se koristi za komunikaciju bez kolizija između koordinatorske mreže i jednog od okolnih čvorova.

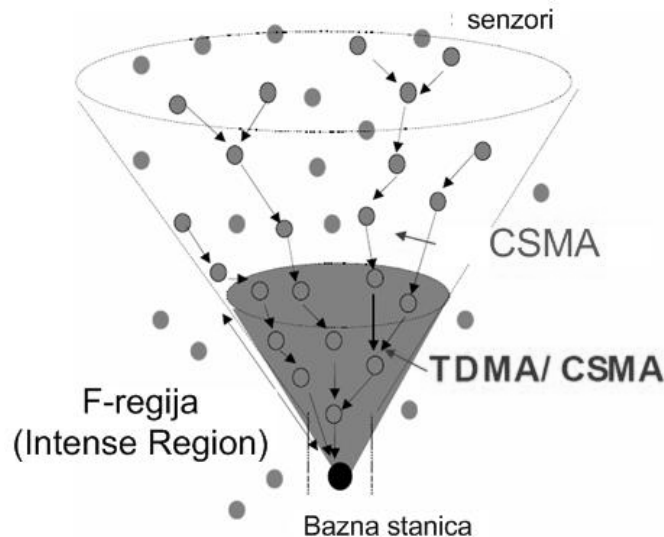
Princip rada je sledeći: čvor osluškuje bikon, da bi saznao da li je koordinator rezervisao GTS. Ako jeste, čvor prelazi u režim smanjene potrošnje, do trenutka rezervisanog za početak njegovog GTS-a. Ako koordinator nije rezervisao GTS, čvorovi za vreme CAP koriste CSMA/CA za pristup kanalu.

Glavni problem kod protokola sa rasporedom je uspostavljanje i održavanje sinhronizacije. Protokol IEEE 802.15.4 predviđa dva metoda sinhronizacije: 1) metoda praćenja bikona (čvorovi se sinhronizuju prvim bikonom, koji sadrži i informaciju o vremenu emitovanja sledećeg bikona, a čvorovi prilikom sledećeg buđenja uzimaju u obzir i drift takta) i 2) metoda bez praćenja (čvorovi se sinhronizuju samo kad je potrebno da se razmeni paket, što dovodi do toga da je radio za sinhronizaciju uključen u proseku polovinu trajanja superfrejma). Utvrđeno je da je potrošnja energije kod metode sinhronizacije sa praćenjem bikona ne zavisi od gustine saobraćaja, dok kod metode sa praćenjem zavisi skoro linearno, tako da postoji presečna tačka za vrednost gustine saobraćaja ispod koje se preporučuje metoda bez praćenja, a iznad koje se preporučuje metoda sa praćenjem bikona.

ZMAC (Zebra MAC) [78] nudi rešenja za povećanje propusne moći kod mreža sa promenljivom gustinom saobraćaja. Pri niskim gustinama saobraćaja primenjuje se CSMA, a prelazi se na TDMA pri višim gustinama saobraćaja. U početnoj fazi, čvorovi koriste distribuirani algoritam DRAND [80] za alokaciju slotova. Ovaj algoritam se trudi da eliminiše problem skrivenih terminala. Svaki slot je dovoljno dug za slanje više paketa, pa nema potrebe za strogom sinhronizacijom. Kad se uspostavi raspored, čvorovi emituju pakete u slotu koji im je dodeljen. Ako je čvoru potreban još jedan slot, on pokušava da iskoristi slot suseda koji se ne koristi. To podrazumeva da čvor ne zauzima slot odmah, već čeka neko nasumično odabrano vreme da bi dozvolio susedu da iskoristi svoj slot. Ukoliko je slot i dalje neiskorišćen po isteku ovog vremena, čvor ga koristi.

Ovaj protokol ima problem "drift rasporeda" (zbog promenljivih uslova za radio propagaciju dolazi do promena u 2-hop okolinama čvorova, čime se narušava uspostavljeni DRAND raspored), zbog čega je periodično potrebno ponovo sprovesti DRAND algoritam, čime se smanjuje njegova energetska efikasnost.

Funneling MAC [79] koristi TDMA kod čvorova bliskih baznoj stanici i CSMA u ostatku mreže (Slika 3.8), pošto se većina kolizija (više od 80%) dešava u 2-hop okolini bazne stanice, kad se koristi CSMA. Zato se u ovoj regiji, koja se naziva f-regija (regija većeg intenziteta, engl. *Intense Region*) koristi TDMA, a u ostatku mreže CSMA, jer ima bolji odnos potrošnja energije/propusna moć pri malom intenzitetu saobraćaja. Bazna stanica povremeno šalje bikone da bi se podesila dubina f-regije i da bi sinhronizovala čvorove unutar ove regije. Inicijalno, bazna stanica šalje bikon nekom snagom. Svi čvorovi koji čuju bikon pripadaju f-regiji. Čvorovi koji se nalaze na granici f-regije i pri tom prosleđuju podatke od čvorova izvan f-regije ka baznoj stanici su glave puteva (engl. *path head*). Oni šalju svoj identitet (identifikator i broj koraka od bazne stanice) baznoj stanici pomoću polja u MAC zaglavlju. Na osnovu ukupnog broja glava puteva i njihovih identiteta bazna stanica pravi TDMA raspored i šalje ga svim čvorovima u f-regiji.



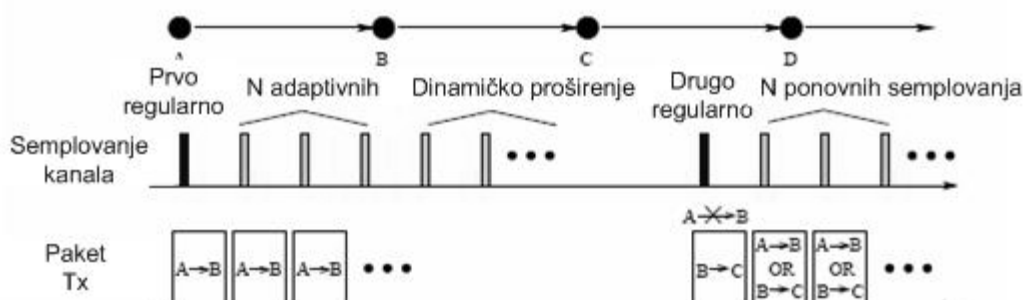
Slika 3.8 Funneling MAC.

Bazna stanica utvrđuje dubinu f-regije tako da se maksimizuje propusna moć i minimizuje gubitak paketa. Za konstruisanje f-regije optimalne dubine koristi se algoritam za podešavanje dubine (ako se želi veća dubina, pojača se energija emitovanja bikona, ako se želi manja dubina, smanji se snaga bikona).

Osim van f-regije, CSMA se koristi i u f-regiji, iz dva razloga: 1) ako je čvor izgubio sinhronizaciju i 2) ako se zbog podešavanja dubine našao u f-regiji. Osluškivanje u TDMA i CSMA slotovima se vrši pomoću tehnike semplovanja preambule. *Funneling* MAC definiše superfrejm kao TDMA slot praćen CSMA slotom. Bikoni se šalju između superfrejmova, a paketi sa ažuriranim TDMA rasporedom se povremeno šalju u slotovima posle slanja bikona. Pošto koristi TDMA, i *Funneling* MAC nije adaptivan, tj. ima problem sa mobilnošću čvorova.

SCP (*Scheduled Channel Polling*) [61] sinhronizuje susede sa zajedničkim rasporedom kao S-MAC, a nepotrebno slušanje eliminiše metodom semplovanja preambule (ako se čvor probudi za vreme zajedničkog aktivnog perioda i ne detektuje preambulu, može odmah da se vrati u stanje smanjene aktivnosti). SCP se prilagođava promenama gustine saobraćaja tako što u slučaju potrebe umeće dodatne aktivne periode između dva regularna (Slika 3.9).

Pošto se svi čvorovi bude u isto vreme, očekuje se gust saobraćaj (nadmetanje) na početku aktivnog perioda. Da bi se smanjilo ovo nadmetanje (i kolizije), period za nadmetanje se deli na dva perioda, CW1 i CW2. U prvoj fazi se čvorovi, koji imaju podatke za slanje, nadmeću za slanje tona za buđenje primaoca, tako što svaki od njih proizvoljno bira slot u okviru CW1, osluškuje kanal tokom ovog slota i emituje ton za buđenje ako je kanal slobodan (bitno je da početak preambule bude malo pre perioda uzorkovanja primaoca, da bi je čuo). U drugoj fazi se za slanje paketa podatka nadmeću samo čvorovi koji su u prvoj fazi uspeli da pošalju celu preambulu. Svaki takav čvor prvo osluškuje kanal u proizvoljno odabranom slotu u okviru CW2, a onda i šalje paket ukoliko je kanal slobodan.



Slika 3.9 Adaptivni slotovi kod SCP-a.

Uvođenje dva intervala za nadmetanje, $CW1$ i $CW2$, umesto jednog iste ukupne dužine ($CW1 + CW2$), kao što je to uobičajeno, smanjuje verovatnoću kolizije. Na primer, ako je dužina oba intervala za nadmetanje jednaka i iznosi $m/2$, tada je verovatnoća pojave kolizije: $4/m^2 (= 1/(m/2) * 1/(m/2))$, a to je manje od $1/m$, što predstavlja verovatnoću kolizije u intervalu za nadmetanje dužine m . Podatak o sinhronizaciji se dodaje u zaglavlje paketa podataka. Ako je saobraćaj podataka ređi od perioda sinhronizacije, šalje se eksplicitan paket za sinhronizaciju.

Sinhronizacija čvorova omogućava efikasniju brodkast komunikaciju od standardnih protokola sa semplovanjem preambule, ali opcija adaptivnog aktivnog perioda može da poveća nepotrebno slušanje, ako podaci staju u jedan paket, jer se tad podatak prima u regularnom aktivnom periodu, a čvor se nepotrebno budi u dodatim aktivnim periodima (Slika 3.9).

Crankshaft [80] deli vreme na frejmove, a frejmove na slotove. Slotovi na početku frejma su rezervisani za razmenu direktnih poruka, a na kraju frejma za brodkast emitovanje. U delu frejma za razmenu direktnih poruka, svaki čvor ima svoj sopstveni slot u kome se budi radi prijema podataka; u delu za brodkast, b u d n š u svi čvorovi. Slot t za p ijem se dodeljuje čvoru na osnovu njegove MAC adrese (MAC adresa po modulu n , ako postoji n slotova). Dozvoljeno je da dva čvora dele isti slot. Na početku slota svi čvorovi koji žele da pošalju poruku čvoru koji je vlasnik tog slota se takmiče za slanje, pobednik šalje poruku, a čvor-prijemnik odgovara ACK paketom (slot je odgovarajuće dužine da se sve ovo završi). Nadmetanje je slično kao kod SCP ili WiseMAC-a: predajnici počinju emitovanje preambule u slučajno izabranom trenutku u delu za nadmetanje. Pre nego što počne emitovanje preambule, čvor vrši osluškivanje kanala, tako da prednost ima čvor koji prvi pokuša, jer u slučaju da detektuje postojanje saobraćaja na kanalu, uopšte i ni emituje preambulu. Sinhronizacija se održava dodavanjem informacije o sinhronizaciji u zaglavlje paketa koji se razmenjuju.

Iako *Crankshaft* smanjuje nepotrebno slušanje, nepotrebno troši energiju zbog slotova za brodkast, kad se bude svi čvorovi. Drugi problem je što se zasniva na TDMA, što smanjuje fleksibilnost protokola.

4. VIŠEKANALNI MAC PROTOKOLI

Većina MAC protokola za bežične mreže je zasnovana na jednokanalnom modelu bežične komunikacije, koji podrazumeva da svi članovi mreže dele zajednički komunikacioni kanal. Međutim, sa povećanjem gustine mreže brzo dolazi do iscrpljivanja konačnog komunikacionog kapaciteta jednog kanala, a time i do drastičnog pada performansi mreže. Što je broj članova koji učestvuju u komunikaciji na zajedničkom kanalu veći, ili su njihovi zahtevi za komuniciranjem češći, to će i učestanost pojave konflikta i kolizija u bežičnom medijumu biti veća. Pri takvim uslovima dolazi do pada propusne moći mreže i naglog povećanja kašnjenja u prenosu poruka. Ovaj problem je zajednički za sve tipove bežičnih mreža, kako za *ad-hoc* i mobilne bežične mreže, tako i za bežične senzorske mreže. Problem ograničene propusne moći je posebno izražen kod bežičnih senzorskih mreža zbog toga što se kod ovih mreža značajan deo raspoloživog komunikacionog kapaciteta žrtvuje radi uštede energije i nemogućnosti postizanja striktno vremenske sinhronizacije čvorova.

Generalno govoreći, postoje dva pravca u istraživanjima koja su usmerena ka povećanju performansi bežičnih mreža. Prvi pravac vodi ka razvoju složenih mehanizama na MAC sloju koji treba da obezbede efikasnije izbegavanje kolizija u prisustvu skrivenih terminala i potpunije iskorišćenje komunikacionog kapaciteta bežičnog medijuma u prisustvu izloženih terminala. Drugi pravac istraživanja, koji je u fokusu ove magistarske teze, usmeren je ka razvoju višekanalnih MAC protokola, odnosno protokola koji će omogućiti da se za komunikaciju u bežičnoj mreži koriste dva ili više *ortogonalnih* kanala iz istog frekventnog opsega. Dva kanala su ortogonalna ukoliko komunikacija na jednom ne utiče na komunikaciju na drugom kanalu. Neposredne beneficije uvođenja višekanalne komunikacije su sledeće:

1. **Povećanje propusne moći mreže.** Dostupnost više kanala otvara mogućnost istovremenih transmisija po različitim kanalima. Idealno, propusna moć bežične, multihop mreže sa N kanala je N puta veća od propusne moći mreže u kojoj se koristi samo jedan kanal. Međutim, u realnim uslovima, faktor povećanja propusne moći je manji od N zbog drugih ograničavajućih faktora.
2. **Minimizovanje interferencije unutar mreže.** Zbog dufuzne (neusmerene) prirode bežičnog komunikacionog medijuma, istovremeno emitivanje po istom kanalu prostorno bliskih predajnika dovodi do kolizija i mogućeg gubitka podataka. Ovo je posebno izraženo u mrežama sa gusto raspoređenim čvorovima. Efekat uvođenja više kanala je takav da se mreža razlaže na više "preklopljenih" mreža manje gustine u kojima je i problem interferencije manje izražen.
3. **Izbegavanje spoljašnje interferencije.** Neretko se dešava da u istom geografskom prostoru funkcioniše više bežičnih mreža i sistema koji koriste isti nelicencirani frekventni opseg. Komunikacija u jednoj mreži deluje kao poremećaj u drugim mrežama. Takođe, komunikacija u bežičnoj mreži može biti pod uticajem elektromagnetske interferencije iz okolnih elektronskih sistema. Dostupnost više kanala pruža mogućnost da čvorovi u mreži biraju za međusobnu komunikaciju kanale na kojima je spoljašnja interferencija najmanje izražena.

Preduslov za primenu višekanalnih MAC protokola je je mogućnost mrežnih čvorova da fizički komuniciraju na različitim frekvencijama. Ovo se postiže na tri načina:

1. **Upotreba jednog simpleks primopredajnika sa mogućnošću podešavanja frekvencije emitovanja/prijema.** Takvi primopredajnici omogućavaju mrežnim čvorovima da u jednom trenutku mogu koristiti samo jedan kanal, za prijem ili za predaju poruka, uz

moгуćnost da kasnije promene kanal. Većina komercijalno dostupnih primopredajnika poseduje mogućnost izbora kanala, uključujući tu i one koji su namenjeni primeni u bežičnim senzorskim mrežama. Višekanalni primopredajnici, koji se danas standardno koriste u *ad-hoc* i mobilnim računarskim mrežama, poseduju mogućnost relativno brze promene kanala, reda nekoliko do nekoliko desetina mikrosekundi, što predstavlja jedan od bitnih preduslova za efikasnu višekanalnu komunikaciju. Vreme promene kanala kod primopredajnika za bežične senzorske mreže je značajno duže, reda do nekoliko stotina mikrosekundi.

2. **Upotreba višekanalnih dupleks primopredajnika**, odnosno primopredajnika koji su u stanju da u isto vreme dok emituju poruku na jednom kanalu, primaju poruku na nekom drugom kanalu.
3. **Upotreba dva ili više višekanalnih simpleks ili dupleks primopredajnika** koji simulatano, ali na različitim kanalima, emituju i primaju poruke.

Zbog svoje relativno visoke cene, rešenja zasnovana na višekanalnim dupleks primopredajnicima i više višekanalnih primopredajnika smatraju se nepraktičnim za primenu u bežičnim senzorskim mrežama.

Ovo poglavlje je posvećeno višekanalnim MAC protokolima, s naglaskom na onim koji su namenjeni bežičnim senzorskim mrežama. Pre svega, bavi se višekanalnom komunikacijom u bežičnim mrežama, posebno problemima koji nastaju pri njenoj upotrebi. Dalje, dat je pregled višekanalne komunikacije kod bežičnih senzorskih mreža, kao i podela višekanalnih MAC protokola za bežične senzorske mreže na višekanalne MAC protokole zasnovane na vremenskom rasporedu, sa zajedničkim aktivnim periodom i hibridne, kao i opis tipičnih predstavnika svake kategorije.

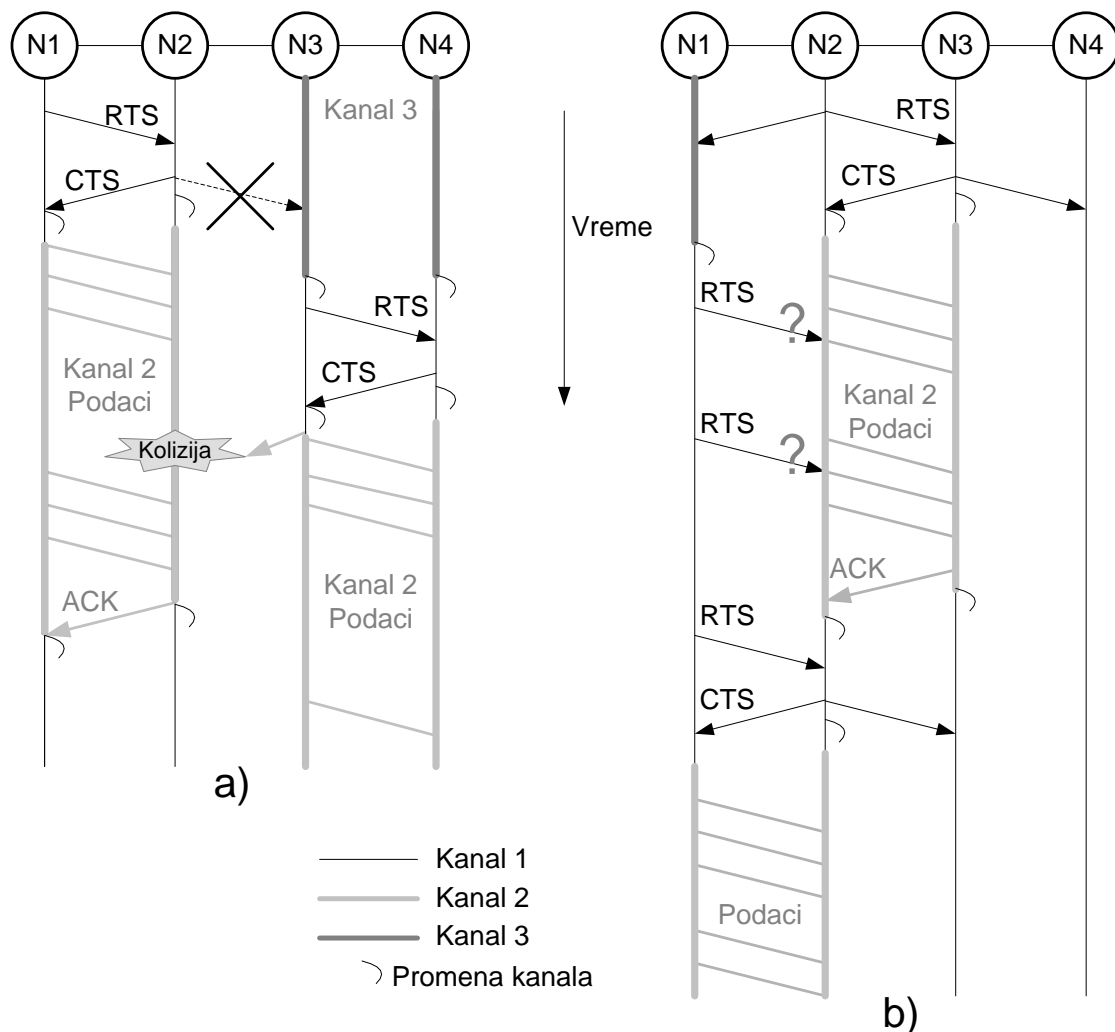
4.1. Višekanalna komunikacija u bežičnim mrežama

Višekanalna komunikacija omogućava povećanje propusne moći bežične mreže jer dozvoljava da se u istom prostoru obavi veći broj konkurentnih transmisija. Međutim, da bi se obavio prenos između dva čvora neophodno je da oni budu podešeni na isti kanal u isto vreme. Koordinacija distribuiranih bežičnih čvorova, koja osim vremenskog usaglašavanja obuhvata i usaglašavanje po kanalu je problem koji mora biti rešen na MAC sloju. Projektovanje efikasnog višekanalnog MAC protokola je težak zadatak jer osim standardnih problema koji se rešavaju na MAC sloju, a koji postoje i kod jednokanalne komunikacije, treba rešiti i niz novih problema koji postoje isključivo u višekanalnom okruženju. U tekstu koji sledi opisano je nekoliko takvih problema.

Problem skrivenih terminala kod višekanalne komunikacije. Problem skrivenih kanala kod jednokanalne komunikacije je detaljno obrađen u Poglavlju 3. Kod višekanalne komunikacije, problem dodatno nastaje kad je čvor zauzet na jednoj frekvenciji, pa ne uspe da čuje najavu drugog čvora na drugoj frekvenciji [81]. Slika 4.1 (a) ilustruje tipičnu situaciju u kojoj dolazi do problema skrivenog terminala pri višekanalnoj komunikaciji. Problem je ilustrovan na primeru višekanalne varijante protokola IEEE 802.11 DCF: Na kontrolnom kanalu se razmenjuju RTS/CTS paketi radi rezervacije kanala za prenos podataka; neposredno nakon što završe prenos podataka, čvorovi se vraćaju na kontrolni kanal.

Za vreme dok na kontrolnom kanalu traje razmena RTS/CTS poruka između čvorova N1 i N2, čvor N3, koji je sused čvora N2, zauzet je prenosom podataka na kanalu 3. Zbog toga čvor N3 nije u mogućnosti da primi CTS poruku čvora N2, koja nosi broj kanala za prenos podataka dogovoren između čvorova N1 i N2. Uskraćen za informaciju da je kanal 2 zauzet,

čvor N3 može da izabere isti ovaj kanal za prenos svoje sledeće poruke i tako izazove koliziju na čvoru N2.



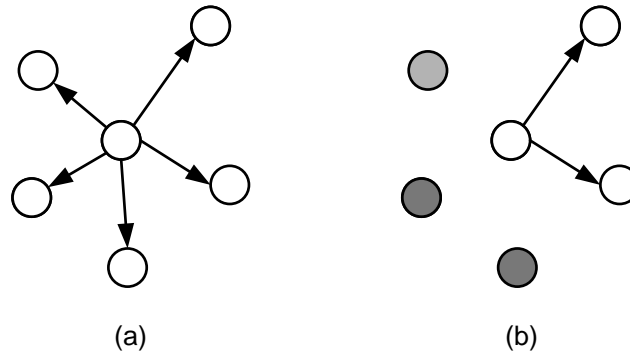
Slika 4.1 Višekanalni problemi:

(a) skrivenih terminala i (b) nedostupnog prijemnika.

Problem nedostupnog prijemnika (engl. *missing terminal problem*) nastaje kad paket poslat na kontrolnom kanalu ne dopire do određivnog prijemnika koji je trenutno zauzet prenosom podataka na nekom drugom kanalu [82]. Slika 4.1(b) prikazuje tipičnu situaciju. Za vreme dok na kontrolnom kanalu čvorovi N2 i N3 ugovaraju kanal za prenos podataka, čvor N1 je zauzet na kanalu 3 i zbog toga propušta da registruje prelazak čvora N2 na kanal 1. Pošto završi prenos podataka na kanalu 3, čvor N1 se vraća na kontrolni kanal s namerom da stupi u kontakt sa čvorom N2. N1 ne detektuje nikakvu aktivnost na kontrolnom kanalu, zaključuje da je N2 slobodan i šalje mu RTS paket koji ostaje bez odgovora (zato što je N2 na kanalu 2). Kontakt između čvorova N1 i N2 može biti uspostavljen tek kad N2 završi prenos podataka na kanalu 2 i vrati se na kontrolni kanal. Za to vreme, N1 može da pošalje više uzastopnih RTS paketa ili, u najgorem slučaju, da odustane od daljih pokušaja smatrajući da je čvor N2 ispao iz mreže.

Problem podrške za brodkast. Budući da je bežični medijum difuznog karaktera, brodkast se lako realizuje u bežičnim mrežama koje koriste jedan kanal - poruku koju emituje

neki mrežni čvor mogu da čuju svi okolni mrežni čvorovi (Slika 4.2 (a)). Međutim, u višekanalnoj komunikaciji čvorovima se po pravilu dodeljuju različiti kanali za prijem, tako da brodkast poruku koja se emituje na jednom kanalu mogu da prime samo oni susedni čvorovi koji oslušuju taj kanal (Slika 4.2 (b)). Čvorovi koji su podešeni na neki drugi kanal, propustiće brodkast poruku. Ovaj problem se rešava tako što se brodkast poruka uzastopno emituje na svim kanalima, ili se brodkast komunikacija obavlja uvek na istom, podrazumevanom kanalu.



Slika 4.2 Problem podrške za brodkast.

Problem dodele kanala. U višekanalnoj komunikaciji, prenos poruke između predajnog i prijemnog čvora je moguć samo ako su oba podešena na isti kanal. S tim u vezi, javlja se problem dodele kanala čvorovima, koji je posebno izražen ako mrežni čvorovi koriste samo jedan polu-dupleks primopredajnik. Strategija dodele kanala je bitna komponenta svakog višekanalnog MAC protokola. Efikasna strategija je ona koja ravnomerno distribuira raspoložive kanale po čvorovima i pri tom je u stanju da prevaziđe problem skrivenih terminala.

Uopšteno govoreći, kod višekanalnih MAC protokola za bežične mreže sa jednim polu-dupleks radio primopredajnikom po mrežnom čvoru koriste se sledeća tri principa dodele kanala:

- **Fiksna dodela.** Svakom mrežnom čvoru se dodeljuje kanal na stalnu upotrebu. Kanal se ne menja u toku komunikacije, ali je moguće da se ponovi proces dodele kanala.
- **Poludinamička dodela.** Svakom mrežnom čvoru se dodeljuje fiksni kanal, ali je moguće promeniti kanal za potrebe komunikacije sa susednim čvorovima kojima su dodeljeni drugi kanali.
- **Dinamička dodela kanala.** Mrežnim čvorovima se ne dodeljuju fiksni kanali, već je kanal moguće menjati u sukcesivnim emitovanjima podataka.

Fiksna dodela kanala podrazumeva postojanje bazne stanice koja bi se bavila raspodelom kanala i zato nije pogodna za bežične senzorske mreže, kao ni za bilo koji oblik multihop *ad-hoc* mreža, s obzirom na izraženu dinamiku ovih mreža i nemogućnost neposredne komunikacije između svih mrežnih čvorova i bazne stanice. Poludinamička dodela kanala je karakteristična za MAC protokole zasnovane na vremenskom rasporedu, kod kojih se čvorovima osim vremenskog slota dodeljuje i fiksni kanal za predaju (ili prijem). Čvorovi koriste dodeljeni kanal u svom slotu, dok u preostalim slotovima prelaze na kanale suseda. Dinamička dodela kanala se koristi u MAC protokolima zasnovanim na nadmetanju, kod kojih čvorovi, razmenom kontrolnih poruka, *ugovaraju* kanal za prenos svake pojedinačne poruke podataka.

Dinamičku dodelu kanala je moguće dalje podeliti na tri kategorije:

- **Namenski kontrolni kanal.** Za komunikaciju se koriste jedan kontrolni kanal i jedan ili više kanala za prenos podataka. Na kontrolnom kanalu, čvorovi razmenjuju isključivo kontrolne pakete (tipa RTS/CTS) radi međusobne sinhronizacije i pregovaranja o kanalu za razmenu podataka [83][84]. Čvorovi koji su ugovorili prenos podataka, prelaze na dogovoreni kanal, obavljaju razmenu podataka, a onda se vraćaju na kontrolni kanal.
- **Dvofazni ciklus (engl. *Split phase*).** Komunikacija se odvija u ciklusima. Svaki ciklus se sastoji iz dve faze: kontrolna faza i faza razmene podataka. Za vreme kontrolne faze, svi čvorovi prelaze na zajednički kontrolni kanal i dogovaraju se o kanalu za prenos podataka u sledećoj fazi. Pristup medijumu u prvoj fazi je obično zasnovan na nadmetanju a u drugoj fazi može biti zasnovan na nadmetanju [85] ili vremenskom rasporedu [86] [87].
- **Skokovita promena frekvencije (engl. *Frequency Hopping*).** Kod ovog pristupa čvor menja kanale, po unapred određenom redosledu, u toku emitovanja jedne poruke [88][89].

MAC protokoli sa namenskim kontrolnim kanalom nisu pogodni za bežične senzorske mreže jer zahtevaju da čvor bude neprekidno aktivan za vreme koje provodi na kontrolnom kanalu (što stvara problem pasivnog slušanja, koje nepotrebno troši energiju). Skokovita promena frekvencije takođe nije zastupljena kod bežičnih senzorskih mreža (česta promena kanala povećava potrošnju energije i povećava kašnjenje, a pamćenje sekvence zahteva dodatne resurse). Većina višekanalnih MAC protokola sa dinamičkom dodelom kanala koristi princip dvofaznog ciklusa, koji omogućava da nakon kontrolne faze svi oni čvorovi koji ne učestvuju u prenosu podataka provedu ostatak ciklusa u neaktivnom režimu.

Problem konačnog vremena promene kanala. Primopredajnik troši izvesno vreme za promenu kanala. Na primer, standard za bežičnu komunikaciju IEEE 802.11b propisuje vreme od 224 μ s za promenu sa jedne na drugu radnu frekvenciju [6]. Promena kanala kod primopredajnika CC2420, koji se često koristi u bežičnim senzorskim mrežama, traje 300 μ s [90]. Tokom ovog vremena, onemogućeni su prijem i predaja poruka, pa česta promena kanala vodi ka povećanom kašnjenju u prenosu poruka i degradaciji propusne moći. To je posebno problem kod bežičnih senzorskih mreža gde su poruke kratke, pa je vreme predaje poruke približno jednako vremenu potrebnom za promenu kanala. Osim gubitka vremena, promena kanala zahteva i utrošak izvesne količine energije.

4.2. Višekanalna komunikacija u bežičnim senzorskim mrežama

Većina postojećih MAC protokola za bežične senzorske mreže podrazumeva komunikaciju po jednom kanalu (poglavlje 3). Ovi protokoli postižu dobre performanse u smislu energetske efikasnosti, skalabilnosti i adaptivnosti. Neki od njih su projektovani da postignu visoku propusnu moć, kao što je slučaj sa protokolima zasnovanim na vremenskom rasporedu. Ipak, upotreba više kanala može da dalje poboljša propusnu moć minimiziranjem nadmetanja i ometanja.

Višekanalna komunikacija se primenjuje i kod celularnih i *ad-hoc* bežičnih mreža. Međutim, MAC protokoli razvijeni za ove mreže nisi direktno primenljivi kod bežičnih senzorskih mreža. Kod celularnih mreža, bazna stanica koristi različite frekventne domene u okviru ćelije, a klijenti dele vremenski domen. Ovaj princip zahteva postojanje infrastrukture ili funkcioniše samo u *1-hop* okruženju, tako da ne odgovara primeni kod bežičnih senzorskih

mreža, koje su po pravilu multihop. Kod multihop *ad-hoc* bežičnih mreža, višekanalni pristup se koristi za povećanje propusne moći. Ovi protokoli ne odgovaraju primeni kod bežičnih senzorskih mreža iz dva razloga. Prvo, da bi se smanjila potrošnja energije i veličina i cena senzorskih čvorova, obično se opremaju samo jednim poludupleks radio primopredajnikom, koji ne može da u isto vreme šalje i prima poruke, ni da radi na više frekvencija istovremeno. Drugo, širina propusnog opsega kod bežičnih senzorskih mreža je ograničena i veličina MAC paketa mala (reda veličine 30 do 50 bajtova, u poređenju sa 512 ili više bajtova kod bežičnih *ad-hoc* mreža). Većina višekanalnih MAC protokola za bežične *ad-hoc* mreže se bazira na protokolu IEEE 802.11, kod koga je veličina RTS/CTS paketa takva da troši previše energije da bio primenjiva na bežične senzorske mreže. Drugi se baziraju i na upotrebi više radio primopredajnika, ili na radio primopredajniku koji može da osluškuje više frekvencija istovremeno [91]. Treći koriste tehniku skokovite promene frekvencije (engl. *Frequency-hopping spread spectrum*) [92][93]. Kao što je već napomenuto, ove tehnike nisu primenjive kod bežičnih senzorskih mreža, pošto su senzorski čvorovi opremljeni jednostavnijim radio primopredajnicima.

Imajući u vidu ove razlike, postojeći višekanalni protokoli razvijeni za *ad-hoc* bežične mreže ne mogu da se direktno primene na bežične senzorske mreže, zbog njihovih specifičnih zahteva, kao što su energetska efikasnost i skalabilnost. Sa druge strane, moguće je zadržati osnovne ideje, pošto su osnovni zahtevi isti kao kod bežičnih *ad-hoc* mreža sa jednim radio primopredajnikom po mrežnom čvoru, kao što su podrška za brodkast i izbegavanje particionisanja mreže.

Pored postojećih opštih zahteva, koji postoje kod MAC protokola sa komunikacijom po jednom kanalu, kao što su energetska efikasnost i skalabilnost, prilikom projektovanja višekanalnih protokola za bežične senzorske mreže sa jednim primopredajnikom treba uzeti u obzir i dodatne zahteve i izazove:

- **Sinhronizacija.** Ukoliko se dodela kanala vrši dinamički (čvorovi mogu da menjaju kanal, umesto da im se dodeli fiksni kanal), potrebna je striktna koordinacija promene kanala između predajnika i prijemnika, da bi se obezbedilo da u isto vreme komuniciraju na istom kanalu. Kod višekanalnih MAC protokola sa fiksnom dodelom kanala ovaj problem ne postoji.
- **Izbegavanje particionisanja mreže.** Ukoliko se susednim čvorovima dodele različiti kanali, neće moći da komuniciraju međusobno. Zbog toga je potrebno, u fazi dodele kanala utvrditi koji čvorovi imaju potrebu da komuniciraju, da bi im se dodelili isti kanali. Takođe je poželjno da se dodela kanala periodično obnavlja, da bi se uzeli u obzir promenjeni uslovi u mreži.
- **Pridruživanje mreži.** Novi čvor koji se pridruži mreži može da poremeti organizaciju kanala u svom okruženju, ako nasumično bira kanal za sebe. Moguće rešenje ovog problema je da čvor presluša sve kanale, da bi pronašao odgovarajući kanal za emitovanje.
- **Podrška za brodkast.** Ukoliko čvorovi dinamički menjaju kanale, brodkast bi mogao da bude problem. Ovo je moguće rešiti tako što se informacija emituje na svim kanalima, ili se kanal za brodkast unapred dogovori.
- **Promena kanala.** Promena kanala se ne događa momentalno, već zahteva neko vreme. Veličina vremena predviđenog za emitovanje treba da se poveća toliko da uzme u obzir ovo dodatno vreme.

Dalje, iako raspoloživi radio primopredajnici za bežične senzorske mreže nude

moćnost podešavanja radne frekvencije na veliki broj kanala, broj raspoloživih ortogonalnih kanala se kreće oko 10. Na primer radio primopredajnik CC2420 [90] ima mogućnost podešavanja radne frekvencije na 16 različitih kanala u 2.4 GHz-nom frekventnom opsegu a Nordic NRF905 radio primopredajnik [20] može da radi na 512 kanala u 868/915 MHz frekventnom opsegu. Ipak, radio signali nisu podešeni na konkretnu frekvenciju, već na frekventni kanal, tj. opseg frekvencija, a spektar emitovanog signala je širi od frekventnog opsega jednog kanala. Zbog toga što se spektri signala emitovanih na susednim kanalima preklapaju, moguće je da dodje do interferencije, u zavisnosti od filtrirajućih karakteristika radio primopredajnika. Zbog toga, broj ortogonalnih kanala mora da bude ograničen. Recimo, eksperimenti sa interferencijom preklapajućih kanala, kod radio primopredajnika Nordic Nrf905 pokazuju da se od mogućih 512, u najgorem slučaju može koristiti najviše 10 kanala [94]. Isti je slučaj i sa radio primopredajnikom CC2420, kod koga se od raspoloživih 16 može koristiti 6-10 ortogonalnih kanala.

U daljem tekstu biće predstavljeni MAC protokoli za bežične senzorske mreže koji koriste višekanalnu komunikaciju. Ovi protokoli mogu da se podele na: višekanalne MAC protokole sa vremenskim rasporedom, višekanalne MAC protokole sa zajedničkim aktivnim periodom i hibridne MAC protokole.

4.3. Višekanalni MAC protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu

Kod višekanalnih MAC protokola zasnovanih na vremenskom rasporedu svakom čvoru se dodeljuje vremenski slot u TDMA frejmu, jedinstven u njegovoj *2-hop* okolini. Pošto svaki čvor poseduje ekskluzivan slot u *2-hop* okolini za emitovanje, garantovan mu je pristup medijumu bez kolizija, pa protokol ne troši energiju na nadmetanje i kolizije. Međutim, pošto čvor mora da budu aktivan na početku svog slota i na počecima slotova koji pripadaju njegovim susedima, ovi protokoli imaju povećanu potrošnju energije u odsustvu saobraćaja. Zajednički problem kod svih protokola zasnovanih na vremenskom rasporedu je otežano prilagođavanje na promene topologije, u slučaju priključenja novog čvora mreži. Broj slotova u frejmu zavisi od gustine mreže. Pošto veći broj slotova uzrokuje veće kašnjenje, uvođenjem više kanala može da smanji broj slotova, pa time da smanji i kašnjenje.

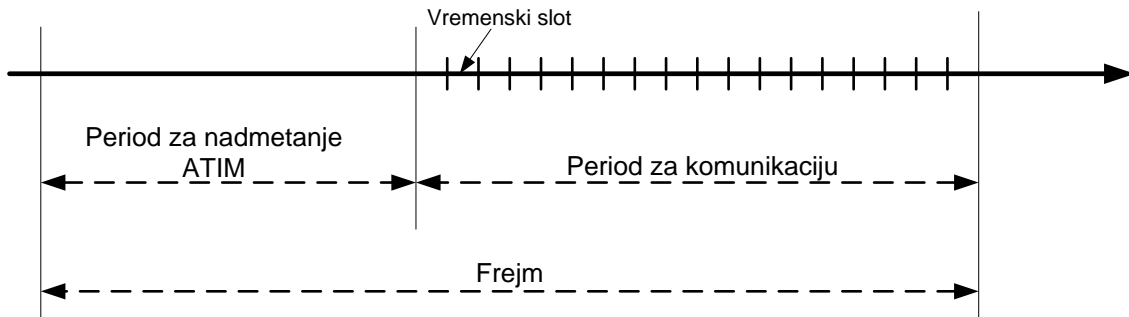
Pored standardnih izazova, koji postoje kod MAC protokola za bežične senzorske mreže zasnovanih na vremenskom rasporedu, kod višekanalnih MAC protokola se dodatno javlja i problem dodele kanala, pošto pošiljalac i primalac moraju da se nađu na istom kanalu da bi komunicirali. Dodela kanala treba da bude takva da su kanali što ravnomernije distribuirani po čvorovima i to na način koji će garantovati komunikaciju bez kolizija.

Problem dodele kanala može da se svede na problem bojenja grafa u kome čvorovi odgovaraju mrežnim čvorovima, a grane povezuju susedne čvorove [95]. Cilj je *obojiti* čvorove grafa različitim bojama (odnosno, dodeliti kanale čvorovima) tako da u *2-hop* okolini svakog čvora ne postoji čvor sa istom bojom. Problem je NP kompletan, što znači da je nemoguće naći efikasno rešenje, čak iako se dodela obavlja centralizovano, pa se kod bežičnih senzorskih mreža primenjuju distribuirani heuristički metodi. Ovi metodi su neoptimalni, ali dovoljno jednostavni za implementaciju.

4.3.1. TMMAC

Kod protokola TMMAC [96] vreme je podeljeno na frejmove fiksnog trajanja (Slika 4.3). Frejm se sastoji iz dva dela: perioda za nadmetanja (ATIM) i perioda za komunikaciju.

Trajanje perioda za nadmetanje može dinamički da se menja, da bi se postigla maksimalna propusna moć (poželjno je da veličina perioda za nadmetanje bude što manja, da bi se smanjila potrošnja energije, u slučaju slabijeg saobraćaja). Period za komunikaciju podeljen je na određeni, fiksni broj vremenskih slotova koji se koriste za prenos podataka između čvorova.



Slika 4.3 Organizacija frejma kod TMMAC protokola.

Tokom perioda za nadmetanje, čvorovi međusobno pregovaraju, razmenom kontrolnih poruka na podrazumevanom kanalu (kao kod protokola 802.11 DCF [6]), s ciljem da rezervišu kanale i vremenske slotove u komunikacionom periodu za bezkonfliktnu razmenu podataka u tekućem frejmu. Tokom ovog perioda, čvorovi neprekidno nadgledaju komunikaciju na podrazumevanom kanalu i preslušavaju sve poruke koje se razmenjuju između susednih čvorova. Na osnovu informacija iz preslušanih poruka, čvorovi dolaze do informacije koji su slotovi i na kojim kanalima već zauzeti od strane suseda. Pretpostavimo da čvor S želi da pošalje skup paketa čvoru R. Čvor S šalje poruku zahteva čvoru R koja sadrži podatke koje je S prikupio o zauzetim slotovima/kanalima. Na osnovu ovih podataka i svojih podataka o zauzeću slotova/kanalna, čvor R rezerviše odgovarajući broj slotova zajedno sa kanalom za svaki slot i svoj izbor saopštava čvoru S u poruci odgovora. Svi okolni čvorovi koji čuju ovaj odgovor, ažuriraju svoje lokalne podatke o zauzeću slotova/kanal.

Posle perioda za nadmetanje, čvorovi šalju pakete, primaju pakete ili prelaze u režim smanjene potrošnje, prema kreiranom rasporedu. Čvor koji je primio paket odgovara ACK porukom. Ukoliko ACK poruka ne stigne, smatra se da je paket izgubljen i ponovo se šalje, u sledećem slotu dogovorenom za prenos za taj par pošiljalac-primilac.

TMMAC obezbeđuje kompaktan raspored komuniciranja i visoku komunikacionu propusnu moć. Raspored komunikacije nije fiksna, već se menja iz frejma u frejm, što doprinosi potpunijem iskorišćenju raspoloživog komunikacionog kapaciteta. Međutim, TMMAC je prilagodjen zahtevima računarskih *ad-hoc* mreža, odnosno mrežama kod kojih se očekuje obimnija i učestalija razmena podataka nego što je to slučaj kod bežičnih senzorskih mreža.

4.3.2. HyMAC

HyMAC [97] je multikanalni MAC protokol za bežične senzorske mreže projektovan da obezbedi visoku propusnu moć, ograničeno kašnjenje u prenosu poruka između senzorskih čvorova i bazne stanice, komunikaciju bez kolizija i predvidiv životni vek mreže. Algoritam je centralizovan, vremenske slotove i frekvencije dodeljuje bazna stanica, na osnovu informacija o susedima koje joj dostavljaju čvorovi.

Vreme je podeljeno u frejmove, koji se sastoje iz vremenskih slotova. Određen broj vremenskih slotova na početku frejma je predviđen za komunikaciju prema fiksnom vremenskom rasporedu, dok je ostatak slotova predviđen za komunikaciju sa nadmetanjem.

Kreiranje rasporeda, tj. dodelu vremenskih slotova i kanala čvorovima, vrši bazna stanica, na osnovu podataka koje je dobila od čvorova. Svi čvorovi šalju tzv. HELLO poruku baznoj stanici (koja sadrži listu suseda), u slučajno odabranom slotu za nadmetanje. Uz to, svaki čvor prati komunikaciju u svim slotovima za nadmetanje i ukoliko čuje HELLO poruku novog suseda, dodaje ga u svoju listu suseda, koju će poslati u sledećem ciklusu. Na osnovu prikupljenih podataka, bazna stanica kreira raspored i šalje ga čvorovima u tzv. SCHEDULE poruci.

Raspored se kreira u baznoj stanici na sledeći način: Na osnovu pristiglih HELLO poruka se kreira graf povezanosti. Kreiranje rasporeda sa minimalnim kašnjenjem se svodi na problem bojenja grafa, za koji je potrebna odgovarajuća heuristika. Kod HyMAC-a je primenjena sledeća heuristika: čvorovi u grafu povezanosti čvorova se posećuju prema algoritmu pretraga u širinu (BFS, engl. *Breadth First Search*) [98]: kreće se od bazne stanice, koja postaje koren stabla, pa se posete redom svi neposredni susedi (koji su prvi nivo stabla pretrage), pa redom, za svaki čvor iz prethodnog nivoa posete svi njegovi neposredni susedi, sve dok u grafu povezanosti postoje neposećeni čvorovi. Time se kreira stablo pretrage. Kad se u obilasku stigne do nekog čvora, recimo N_i , dodeljuje mu se podrazumevani vremenski slot i podrazumevana frekvencija. Ujedno se proverava da li postoji mogućnost kolizije sa 1-hop i 2-hop susedima koji su prethodno dodati na istom nivou u stablu. Ukoliko se otkrije mogućnost kolizije sa nekim čvorom, recimo čvorom N_j , proverava se da li su N_i i N_j potomci istog čvora. Ukoliko jesu, čvoru N_i se dodeljuje neki drugi vremenski slot. Ukoliko N_i i N_j nisu potomci istog čvora, samo mu se dodeli druga frekvencija (tako da oba čvora mogu da komuniciraju sa svojim pretkom). Kad se prelazi na sledeći nivo u stablu, redni broj podrazumevanog vremenskog slota i redni broj podrazumevanog kanala se povećavaju za jedan. Pošto je proces kreiranja stabla završen, vrši se inverzija vremenskih slotova, koja obezbeđuje da vremenski slot naslednika prethodi vremenskom slotu roditelja. Ovo obezbeđuje efikasniju agregaciju podataka i prosleđivanje do bazne stanice u jednom vremenskom frejmu.

Centralizovano kreiranje rasporeda čini algoritam neodgovarajućim za primenu kod velikih bežičnih senzorskih mreža. Drugi nedostaci protokola su da ne predlaže rešenje za održavanje vremenske sinhronizacije, razrešenje kolizija i pridruživanje novog čvora mreži.

4.3.3. MC-LMAC

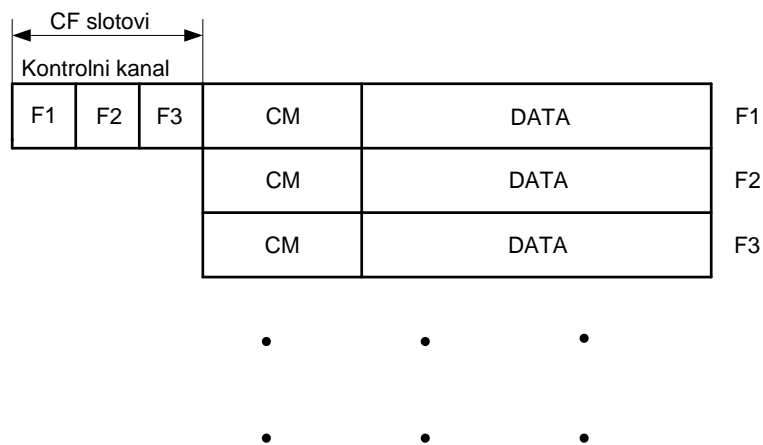
Multi-Channel LMAC, MC-LMAC [94] je višekanalni MAC protokol sa vremenskim rasporedom, koji se zasniva na jedнокanalnom LMAC protokolu [15] (sekcija 3.3.1).

Dodela slotova i kanala kod MC-LMAC-a se vrši po ugledu na dodelu vremenskih slotova kod jedнокanalnog protokola LMAC. Kod LMAC-a vremenski slotovi su organizovani u frejmove, a svakom čvoru se dodeljuje jedan slot u frejmu koji on koristi za emitovanje poruka. Da bi se sprečile kolizije, dodeljeni slot mora da bude jedinstven u 2-hop okolini čvora. MC-LMAC uopštava ovaj koncept i svakom čvoru ne dodeljuje samo vremenski slot već par slot/kanal koji on koristi za emitovanje svojih poruka. Par slot/kanal je jedinstven u 2-hop okolini čvora, što znači da se tokom istog vremenskog slota može prenositi više poruka u istoj 2-hop okolini, sve dok se ovi prenosi obavljaju na različitim kanalima i poruke nisu upućene istom prijemniku. Pošto su čvorovima dodeljeni slotovi i kanali komunikacija se odvija po uspostavljenom rasporedu koji garantuje prenos poruka podataka bez kolizija.

Čvor bira par slot/kanal tako što prvo prikupi informacije o već zauzetim slotovima na svim raspoloživim kanalima u svojoj 2-hop okolini, a onda bira proizvoljan slobodan par

slot/kanal. Deo ovih informacija čvor prikuplja sam, tako što prati komunikaciju na različitim kanalima. Kad detektuje aktivnost u medijumu tokom nekog vremenskog slota na nekom kanalu, čvor to registruje upisom jedinice na odgovarajuću bitsku poziciju u tzv. vektoru zauzetosti slotova za konkretan kanal. Da bi prikupio informacije o zauzetim slotovima/kanalima u *2-hop* okolini, čvor razmenjuje vektore zauzetosti slotova sa svojim neposrednim susedima. Onda kad stekne kompletan uvidu u stanje zauzetosti slotova po svim kanalima u svojoj *2-hop* okolini, čvor pristupa izboru slobodnog para slota/kanal. Pri tom, zbog pretpostavke korišćenja polu dupleks primopredajnika, čvor izuzima iz izbora sve slotove koje koriste njegovi neposredni susedi (bez obzira na kanal), a od preostalih slobodnih parova slot/kanal čvor slučajno bira jedan.

Pristup medijumu. Slika 4.4 prikazuje organizaciju vremenskog slota kakvu predviđa protokol MC-LMAC. Komunikacija u delu CF obavlja se na podrazumevanom kanalu, a zatim se "razgranava" na različite kanale. Deo CF je podeljen na onoliko vremenskih perioda koliko ima raspoloživih kanala. Svakom kanalu, F1, F2, ..., FN, odgovara jedan kratak vremenski period u ovom delu. Čvor koji u datom vremenskom slotu igra ulogu predajnika, a kome je dodeljen kanal Fi za emitovanje, proziva određeni prijemnik i poziva ga da pređe na kanal Fi slanjem kratke poruke u vremenskom periodu koji odgovara kanalu Fi u delu CF. S druge strane, čvor koji u datom vremenskom slotu igra ulogu prijemnika, tokom dela CF je na prijemu i ukoliko je adresiran prelazi na odgovarajući kanal, a ukoliko ne, prelaze u režim smanjene potrošnje. Prozivka prijemnika je neophodna iz razloga što u neposrednoj okolini prijemnika može postojati više predajnika kojim je na različitim kanalima dodeljen ovaj vremenski slot. U situaciji kad isti prijemnik proziva više predajnika, prijemnik mora da se odluči za jednog. Komunikacija na kanalu predajnika obuhvata period CM, tokom kojeg predajnik šalje tzv. kontrolnu poruku i deo DATA, za slanje poruke podataka. Kontrolna poruka sadrži informacije kao što su: ID pošiljaoca poruke, ID primaoca poruke, vektor zauzetosti slotova itd.



Slika 4.4 Struktura vremenskog slota kod MC LMAC protokola.

Višekanalna komunikacija, na način kako je uvedena u protokolu MC-LMAC, doprinosi povećanju propusnu moć mreže i potpunijem iskorišćenju raspoloživog komunikacionog kapaciteta medijuma. Cena koja se plaća je u izvesnom povećanju utroška energije zbog neophodnosti prozivke prijemnika i slanja kontrolne poruke na početku svakog vremenskog slota. Iako ovaj dodatni utrošak energije ne učestvuje u značajnom iznosu u ukupnoj potrošnji energije pri intenzivnom saobraćaju, on postoji i onda kad u mreži nema saobraćaja - prijemnici moraju da oslušuju medijum tokom celokupnog perioda CF, a predajnici moraju povremeno da šalju kontrolne poruke, radi sinhronizacije i pravovremenog ažuriranja informacija bitnih za rad protokola.

4.4. Višekanalni MAC protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom

Kod višekanalnih MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom ne postoji ustaljen raspored emitovanja, već su svi čvorovi aktivni u isto vreme i imaju dug zajednički period smanjene potrošnje, a pre prenosa svake poruke podataka se sprovodi procedura nadmetanja u kojoj učestvuju svi potencijalni pošiljaoci i primaoci poruka. Cilj nadmetanja je da se dâ pravo pristupa medijumu samo pojedinim pošiljaocima, a sa ciljem da se preduprede eventualne kolizije poruka podataka. Nadmetanje se ostvaruje razmenom kontrolnih paketa (tipa RTS/CTS) ili primenom tehnike CSMA.

Protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom imaju tu prednost da omogućavaju manje kašnjenje u slučaju retkog saobraćaja. Problem nastaje kod gušćeg saobraćaja, kad se propusna moć smanji zbog nadmetanja i kolizija kontrolnih paketa. Takođe, čvorovi troše izvesnu količinu energije za nadmetanje, što smanjuje njihovu efikasnost pri intenzivnom saobraćaju. Uz to, višekanalni MAC protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom su podložni problemima skrivenih terminala i nedostupnih prijemnika.

U nastavku su opisana dva višekanalna MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom. Kod prvog (MMSN [16]), svakom čvoru se dodeljuju kanali za prijem poruka podataka, a potencijalni pošiljoci se nadmeću na kanalu primaoca kako bi samo jedan dobio pravo emitovanja. Kod drugog protokola (SMC [100]), predviđa se jedan poseban kanal za nadmetanje i veći broj kanala za prenos podataka. Čvorovima se unapred ne dodeljuju kanali za prijem ili predaju, već procedura nadmetanja obuhvata i izbor trenutno raspoloživog kanala za prenos podataka.

4.4.1. MMSN

MMSN [16] je višekanalni MAC protokol za bežične senzorske mreže, baziran na CSMA sa vremenom podeljenim u slotove, gde se čvorovi na početku svakog slota nadmeću za pristup medijumu pre slanja poruke.

Svakom čvoru se dodeljuje kanal za prijem podataka. MMSN teži da što ravnomernije rasporedi raspoložive kanale po čvorovima s ciljem da se isti kanal što manji broj puta ponavlja u 2-hop okolini čvora. Za dodelu kanala predlaže četiri šeme.

1. **Ekskluzivna dodela frekvencija.** Kod ove šeme svi čvorovi razmene identifikatore (ID) u svojoj 2-hop okolini. To se radi u dva koraka: u prvom se brodkastuje sopstveni ID, u drugom ID-ovi svih suseda koji su prikupljeni u prethodnom koraku. Kad su podaci o 2-hop okruženju prikupljeni, vrši se raspodela kanala po rastućem redosledu ID-a čvora. Ukoliko čvor ima najmanji ID u svojoj 2-hop okolini, usvaja kanal sa najnižom frekvencijom i o tome obaveštava susede u 2-hop okruženju. Čvor koji nema najmanji ID u okolini, čeka da susedi sa nižim ID-om izaberu kanal, pa tek tada donosi odluku, tako što bira najniži kanal, od svih preostalih. Ova šema garantuje ekskluzivnu dodelu kanala u 2-hop okolini svakog čvora, ali funkcioniše samo ukoliko je broj raspoloživih kanala veći ili jednak maksimalnom broju čvorova u 2-hop okolini. Zbog puno brodkasta u 2-hop okolini troši puno energije.
2. **Ravnomerni izbor.** Šema je slična prethodnoj, samo što uvodi proširenje: ukoliko čvor nema na raspolaganju slobodan kanal, bira kanal koji je najmanji broj puta korišćen u njegovoj 2-hop okolini (za razliku od prethodne kod koje taj čvor jednostavno ostaje bez dodeljenog kanala). Ova šema takođe troši puno energije na brodkast poruke i podrazumeva postojanje puno kanala.

3. **Prisluškivanje.** Iako prethodna šema obezbeđuje ravnomernu raspoređenost čvorova po kanalima, troši puno energije na 2-hop broadcast poruke. Kod šeme "prisluškivanje" čvor se povlači na neki slučajno odabran vremenski period pre nego što emituje svoj izbor kanala. Za to vreme sluša odluke ostalih suseda, pa kad period istekne, bira jedan od najmanje korišćenih kanala. Šema troši manje energije na poruke, ali ne garantuje ekskluzivan izbor kanala u 2-hop okolini, zato što prisluškuje samo 1-hop susede.
4. **Implicitni konzensus.** Ova šema koristi generator pseudoslučajnih brojeva na način koji je prvi put korišćen u TDMA protokolu NAMA [100] za distribuiranu dodelu vremenskih slotova. Algoritam počinje isto: razmenom ID-a u 2-hop okolini. U prvoj fazi ove procedure, na način kao kod ekskluzivne dodele kanala, čvorovi razmenjuju ID-ove s ciljem da svaki čvor prikupi ID-ove suseda iz 2-hop okoline. U drugoj fazi, svaki čvor A autonomno izvršava algoritam za dodelu kanala, koji na osnovu ID-a čvora A i ID-ova njegovih 2-hop suseda određuje kanala koji će biti dodeljen čvoru A. Ovaj algoritam je koncipiran tako da garantuje ekskluzivnu dodelu kanala, pod uslovom da je broj raspoloživih kanala dovoljno veliki, i pri tom ne zahteva razmenu poruka između čvorova. Osnovna ideja algoritma je korišćenje generatora pseudoslučajnih brojeva za određivanje prioriteta čvorova prilikom izbora kanala.

Generator slučajnih brojeva je softverska funkcija koja se koristi za generisanje niza celih brojeva:

$$N_k = RndGen(seed, k)$$

Parametar *seed* je inicijalna vrednost (seme) generatora, a *k* indeks broja u generisanom nizu. Za različite vrednosti parametra *seed*, funkcija *RndGen* generiše različite sekvence brojeva N_k , $k = 1, 2, \dots$. U algoritmu za dodelu kanala, ID-ovi čvorova se koriste kao parametar *seed*, a redni broj kanala kao indeks *k*. Algoritam redom ispituje brojeve kanala, počev od $k=1$, dok ne pronađe prvi slobodan kanal. Da bi utvrdio da li je kanal *k* slobodan, algoritam generiše skup pseudoslučajnih brojeva pozivom funkcije *RndGen* za ID-a čvora A i ID-ove svih njegovih 2-hop suseda. Čvoru A se dodeljuje kanal *k* ako je broj generisan za njegov ID najveći od svih pseudoslučajnih brojeva generisanih u ovom koraku. U suprotnom, *k* se povećava za 1, i postupak generisanja pseudoslučajnih brojeva se ponavlja.

S obzirom da se u svim čvorovima koristi identična funkcija *RndGen*, pseudoslučajni niz za dato ID biće isti bez obzira u kom čvoru se generiše. To garantuje da ako čvor A izabere kanal *k*, ni jedan čvor iz njegove 2-hop okoline neće izabrati isti ovaj kanal.

Kod ove šeme može da se desi da čvor ne izabere kanal, zato što neki sused ima veći broj, iako je prethodno izabrao kanal, pa zahteva postojanje velikog broja kanala. Takođe ne garantuje da neće doći do kolizije pri izboru kanala.

Pošto su frekvencije izabrane, čvorovi pristupaju medijumu. Vreme je podeljeno u vremenske slotove. U prvom delu slota, trajanja T_{bc} , čvorovi se nadmeću za slanje broadcast poruka na podrazumevanom kanalu. Prenos broadcast poruka vrši se u drugom delu slota, trajanja T_{tran} . Ukoliko nije bilo zahteva za prenosom broadcast poruka, čvorovi se, u delu slota T_{tran} , prvo nadmeću, a onda i prenose direktne poruke. Nadmetanje i slanje direktne poruke se vrši na kanalu primaoca. Ponašanje čvora zavisi da li želi da pošalje poruku i kakvu poruku:

1. **Čvor nema paket za slanje.** Prvo osluškuje kanal za broadcast. Ukoliko je kanal zauzet, čvor prima broadcast poruku do kraja vremenskog slota. Ukoliko nije, u periodu T_{tran} prelazi na svoj kanal, gde osluškuje. Ukoliko detektuje aktivnost u medijumu, do kraja prima direktnu poruku namenjenu njemu, ukoliko ne, prelazi u režim smanjene potrošnje do početka narednog slota.
2. **Čvor ima broadcast paket za slanje.** Čvor čeka neki proizvoljan period od početka T_{bc} .

Ukoliko za to vreme detektuje aktivnost, povlači se, pa u T_{tran} vremenu prima poruku na kanalu za brodkast. Ukoliko ne, emituje svoj signal do kraja T_{bc} , pa u T_{tran} periodu emituje i poruku.

3. **Čvor ima paket za direktnu razmenu poruka.** Čvor prvo mora da za vreme T_{bc} detektuje da li postoji brodkast poruka i ukoliko postoji, odustaje od slanja i pristupa prijemu brodkast poruke. Ukoliko je nema, u prvom delu T_{tran} perioda pristupa nadmetanju. Prvo izabere slučajno vreme za koje naizmenično osluškuje svoj kanal i kanal odredišnog čvora svoje poruke. Ukoliko detektuje aktivnost na svom kanalu, odustaje od slanja i na svom kanalu u ostatku perioda T_{tran} prima poruku. Ukoliko detektuje aktivnost na kanalu potencijalnog primaoca, to znači da postoji bar još jedan potencijalni pošiljalac, pa odustaje od slanja i prelazi na svoj kanal. Ukoliko za taj period ne detektuje aktivnost ni na jednom od dva kanala koje prati, počinje da emituje signal na kanalu potencijalnog primaoca, da bi o svojoj nameri obavestio potencijalne pošiljoce i primaoca, pa po isteku vremena predviđenog za nadmetanje šalje poruku.

Kao i ostali protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom, MMSN obezbeđuje malo kašnjenje slučaju retkog saobraćaja, a ima problem sa gustim saobraćajem, zbog pada propusnosti i povećanja potrošnje energije usled povećanja broja kolizija i nadmetanja. Povećana potrošnja se javlja i zbog česte promene kanala, naročito tokom nadmetanja za slanje direktne poruke. Protokol MMSN rešava problem nedostupnog prijemnika, na taj način što naizmenično osluškuje svoj i kanal primaoca poruke.

4.4.2. SMC

Protokol SMC [100] koristi namenski kontrolni kanal za pregovaranje o kanalu za prenos podataka (jednom od osam raspoloživih). Kontrolni kanal predstavlja usko grlo ovog protokola, tako da je maksimalan broj raspoloživih kanala za prenos podataka 8. SMC protokol funkcioniše na sledeći način:

1. Inicijalno, svi čvorovi ostaju na kontrolnom kanalu, na kome se pregovaranje vrši razmenom RTS/CTS kontrolnih paketa.
2. Kad čvoru stigne poruka, čvor šalje RTS paket koji sadrži i polje status kanala (osmobitni podatak u kome svaki bit odgovara jednom kanalu - 0 predstavlja slobodan a 1 zauzet kanal).
3. Kad odredište primi RTS paket, među svojim i pošiljaočevim slobodnim kanalima bira prvi zajednički slobodan kanal, postavlja odgovarajući bit na jedan u svom polju statusa kanala, koji šalje zajedno sa CTS paketom.
4. Posle slanja CTS paketa primalac prelazi na izabrani kanal.
5. Po primanju CTS paketa i čvor kome je namenjen prelazi na izabrani kanal.
6. Po primanju CTS paketa čvor kome nije namenjen paket postavlja odgovarajući bit kanala na 1. Posle odgovarajućeg perioda (potrebnog za slanje poruke podataka i ACK paketa) taj bit se ponovo postavlja na 0.
7. Na izabranom kanalu se šalje DATA i ACK paket.

Protokol SMC je podložan problemu skrivenih terminala. Potencijalni problem nastaje kada čvor zauzet predajom/prijemom poruke na kanalu za prenos podataka propusti CTS paket emitovan na kanalu za nadmetanje i tako ostane uskraćen za informaciju da je neki kanal za prenos podataka u međuvremenu zauzet. Ovo otvara mogućnost da čvor prilikom narednog ciklusa nadmetanja izabere kanal koji je zauzet, što neminovno dovodi do kolizije. Da bi se ovaj problem prevazišao, SMC uvodi obavezu da čvor nakon završetka prenosa podataka, a pre povratka na kanal za nadmetanje, skenira sve kanale za prenos podataka, kako bi utvrdio njihov trenutni status (ova aktivnost odgovara koraku 8).

Skeniranje se obavlja merenjem jačine prijemnog signala (*Received Signal Streight Indicator - RSSI*) na svakom kanalu.

Takođe, kod protokola SMC se javlja i problem nedostupnog prijemnika, onda kad čvor pošalje RTS paket čvoru koji je trenutno zauzet na drugom kanalu. Ovo može da se desi u slučaju da je prvi čvor bio zauzet na prenosom podataka u trenutku kad je drugi čvor dogovorio prelazak na kanal za prenos podataka. Ovaj problem se kod SMC rešava povećanjem vremena čekanja na CTS paket nakon poslatog RTS paketa.

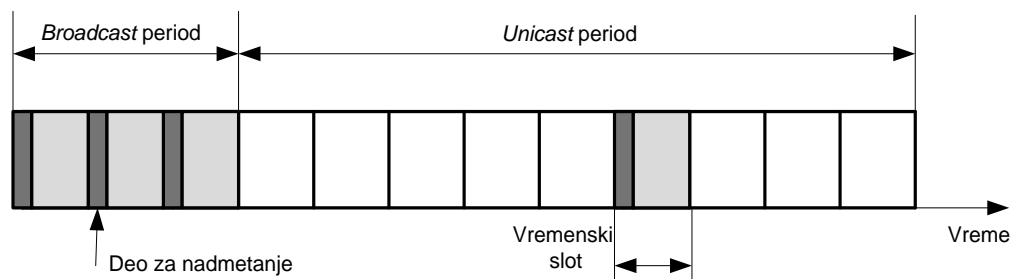
Protokol SMC obezbeđuje veću komunikacionu propusnu moć i manje kašnjenje u prenosu poruka u poređenju sa jednokanalnim MAC protokolima. Međutim, cena koja se plaća je značajno veći utrošak energije budući da SMC zahteva neprekidnu "budnost" čvora na kanalu za nadmetanje i potrebu skeniranja kanala nakon svakog završenog prenosa poruke podataka.

4.5. Hibridni višekanalni MAC protokoli

Hibridni višekanalni MAC protokoli kombinuju principe rada postojećih MAC protokola. Predstavnicima ove grupe protokola su Y-MAC [99], kod koga se vreme deli u vremenske slotove koji se dodeljuju za prijem umesto za predaju i TMCP [101], koji mrežu organizuje u topologije stabla (po jedno stablo za svaki kanal).

4.5.1. Y-MAC

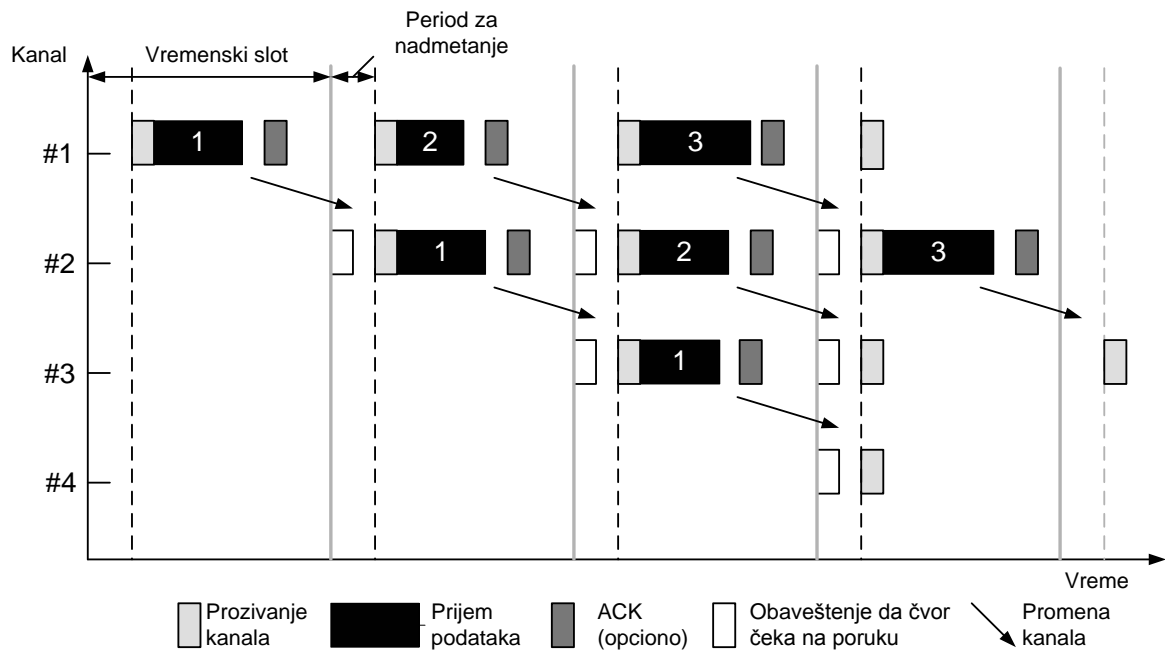
Y-MAC [99] je mehanizam sa skokovitom promenom frekvencija, koji izbegava redundantnu dodelu kanala čvorovima, tako što im ne dodeljuje fiksni kanal, već samo vremenski slot. Komunikacija se obavlja na podrazumevanom kanalu, a novi kanali se uvode tek pri povećanom intenzitetu saobraćaja.



Slika 4.5 Izgled vremenskog frejma kod Y-MAC protokola.

Y-MAC deli vreme u frejmove fiksne dužine (Slika 4.5). Frejmovi su podeljeni na vremenske slotove. Određeni broj vremenskih slotova na početku frejma je rezervisan za brodkast. Svi čvorovi se bude sinhronizovano, a početku svakog novog frejma. Oni koji imaju brodkast poruku namenjenu svojim susedima, nadmeću se za pristup medijumu, a oni koji nemaju takvu poruku, kao i oni koji izgube u nadmetanju, osluškuju medijum radi eventualnog prijema poruka. Komunikacija se odvija na podrazumevanom kanalu. Ostatak vremenskih slotova je predviđen za razmenu direktnih poruka, pa se svakom čvoru dodeljuje vremenski slot za prijem poruke, koji je jedinstven u 2-hop okolini čvora. U ovom delu su čvorovi aktivni samo u svom slotu, radi eventualnog prijema poruke, i u slotovima onih neposrednih suseda kojima žele da pošalju poruke. Dodela slota za prijem smanjuje gubitak energije zbog pasivnog slušanja i preslušavanja u uslovima slabog saobraćaja, u odnosu na raspodelu kad se slot dodeljuje za slanje poruke (tada svi čvorovi moraju da budu budni na počecima slotova svojih suseda, da provere da li su potencijalni primaoci). Y-MAC koristi

distribuirani algoritam dodele slotova predložen kod LMAC-a [15] i MMSN protokola [16]. Svaki čvor formira vektor zauzetosti slotova, koji inicijalno sadrži informaciju o tome koji slotovi su zauzeti od strane njegovih neposrednih suseda. Ovaj vektor se prosleđuje susedima u kontrolnoj poruci koja se šalje u delu frejma za brodkast. Na osnovu vektora prikupljenih od svih suseda, čvor ažurira svoj vektor zauzetosti slotova, tako da sadrži podatke o 2-hop okolini. Na kraju, kad ima kompletnu sliku o stanju zauzetosti slotova u svom 2-hop okruženju, čvor slučajno bira jedan od preostalih slobodnih slotova. U slučaju otkaza čvora, njegov alocirani slot se oslobađa u vektoru zauzetosti suseda, ukoliko njegova kontrolna poruka ne stigne za predviđeno vreme.



Slika 4.6 Mehanizam skokovite promene frekvencije.

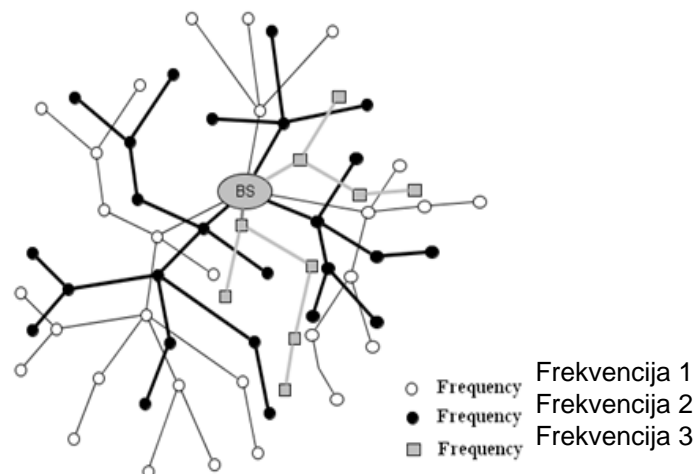
Treba zapaziti da iako se radi o višekanalnom protokolu, čvorovima se dodeljuju samo vremenski slotovi, a ne i kanali, već svaki čvor u svom dodeljenom slotu prima poruku na jedinstvenom podrazumevanom kanalu (kanal 1). Trajanje slota je dovoljna za prijem samo jedne poruke. Na početku slota potencijalni pošiljaoci se nadmeću, tako da samo jedan može da pošalje poruku. Ukoliko je primio poruku, čvor prelazi na sledeći kanal (kanal 2), prema sekvenci promene kanala (engl. *the hopping sequence*), i o tome obaveštava potencijalne predajnike kratkom porukom na početku sledećeg slota. Na sledeći kanal prelaze i preostali potencijalni pošiljaoci, gde se ponovo nadmeću za slanje. Ukoliko je primio poruku, čvor prelazi na sledeći kanal i tako sve dok ima kanala i/ili poruka koje prima (Slika 4.6).

U nedostatku saobraćaja, ovaj protokol troši manje energije od višekanalnih protokola zasnovanih na vremenskom rasporedu, pošto se svaki čvor budi samo jednom u frejmu da bi primio poruke. Takođe, protokol troši manje energije i zbog smanjenog broja promene kanala, pošto se novi kanali uvode samo po potrebi. Uvođenjem novih kanala po potrebi je implicitno svakom čvoru dodeljeno N slotova (N je broj raspoloživih kanala), što povećava propusnu moć u slučaju saobraćaja većeg intenziteta. Iako protokol zahteva nadmetanje potencijalnih pošiljalaca na početku svakog slota, mehanizam za nadmetanje je jednostavniji nego kod višekanalnih MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom, zato što postoji samo jedan primalac poruke, pa troši i manje energije. Nedostatak je u mehanizmu za nadmetanje na početku svakog slota, koji ne eliminiše kolizije u slučaju da se potencijalni pošiljaoci međusobno ne čuju. Poseban problem može da se javi u okolini bazne stanice, gde

je pojačano nadmetanje, zbog velike gustine saobraćaja, koje je teško razrešiti protokolima zasnovanim na nadmetanju. Još jedan nedostatak je da čvor kome se dodeli poslednji čvor u frejmu zbog prelaska na druge kanale gubi deo brodkast perioda novog frejma.

4.5.2. TMCP

Protokol TMCP [101] je višekanalni protokol zasnovan na topologiji stabla, koji koristi više kanala da bi redukovao interferenciju između čvorova u mreži. Interferencija nastaje kad je prijem ometen emitovanjem jednog ili više bliskih čvorova. Potencijalni čvorovi “ometači” su svi čvorovi u radijusu interferencije oko čvora prijemnika. Radijus interferencije je veći od radijusa komunikacije, tako da na prijem utiče značajno više okolnih čvorova od broja neposrednih suseda. TMCP raspodeljuje čvorove po različitim kanalima i na taj način deli mrežu na k podmreža, tako da svaka funkcioniše na jednom od k kanala (primer Slika 4.7). Pošto svaka od ovih podmreža ima manju gustinu čvorova, interferencija u svakoj od njih, pa time i na nivou cele mreže, je manja nego kad se koristi samo jedan kanal za komunikaciju.



Slika 4.7 Primer kreiranja podstabala kod TMCP algoritma.

Cilj protokola TMAC je da podeli WSN na po čvorovima i po kanalima na razdvojena podstabla. Bazna stanica je njihov zajednički koren (uz zahtev da bazna stanica poseduje onoliko prijemnika koliko ima raspolozivih kanala). Prilikom formiranja kanala teži se tome da se minimizira maksimalna interferencija na svaki čvor unutar svakog stabla.

Dodela kanala se obavlja sloj po sloj, počev od bazne stanice. Kada čvor bira kanal (tj. bira stablo kojem će se priključiti), on zapravo bira roditeljski čvor u skupu suseda sa prethodnog nivoa (jer su svi oni već izabrali kanal). Kriterijum izbora je da se čvor priključi stablu u kome je interferencija najmanja. Interferencija se procenjuje brojem čvorova iz tog stabla koji se nalaze u radijusu interferencije čvora. Protokol ne razrešava nadmetanje među čvorovima naslednicima, koji rade na istom kanalu.

Posle dodele kanala, mreža vrši prikupljanje podataka. Topologija stabla omogućava i *divergencast* saobraćaj. Osim naznake da je ovo slanje podataka jednostavi i bez potrebe za vremenskom sinhronizacijom, ali se autori se njime nisu posebno bavili.

5. TFMAC

U ovom poglavlju će biti predstavljen višekanalni MAC protokol za bežične senzorske mreže TFMAC [102]. TFMAC pripada grupi protokola sa vremenskim rasporedom, kod kojih se energetska efikasnost postiže korišćenjem TDMA mehanizma. Cilj projektovanja TFMAC protokola je bio da se poveća propusna moć mreže korišćenjem višekanalne komunikacije. Kod ovog protokola vreme je podeljeno u frejmove koji se ponavljaju. Svaki frejm je dalje podeljen u vremenske slotove. Trajanje vremenskog slota je dovoljno za prenos samo jedne poruke. Svakom čvoru se dodeljuje jedan kanal za prijem poruka i po jedan slot za slanje poruka na svakom kanalu. Dodeljeni slot za slanje poruka na kanalu k čvor u svakom frejmu koristi za slanje poruke jednom od suseda kojima je dodeljen kanal k za prijem. Prednost ovakve organizacije je što svaki čvor u jednom frejmu ne šalje jednu poruku, već može da pošalje onoliko poruka koliko mu je slotova dodeljeno za slanje. Na ovaj način se postiže povećanje propusne moći i smanjuje kašnjenje u prenosu poruke. Dodela slotova/kanala se obavlja distribuirano uz garanciju da se isti par slot/kanal koristi najviše jedanput u svakoj *2-hop* okolini.

TFMAC protokol je MAC protokol opšte namene, koji nije optimizovan za neku konkretnu aplikaciju ili kategoriju aplikacija, već se može primenjivati u različitim kontekstima. Sa obzirom na svoju opštost, TFMAC ne postavlja specifične hardverske i softverske zahteve, kao ni zahteve u pogledu topologije mreže.

Prilikom projektovanja protokola podrazumevalo se postojanje multihop bežične senzorske mreže, u kojoj ne postoji centralni entitet koji bi koordinirao pristup medijumu i obavljao alokaciju kanala i slotova. Ipak, protokol podrazumeva postojanje bazne stanice, preko koje se vrši pristup mreži: prikupljanje podataka u mreži i slanje zahteva. Svaki mrežni čvor je opremljen jednim polu-dupleks radio primopredajnikom, koji može da radi na više kanala, ali samo na jednom kanalu u jednom trenutku. Domet emitovanja čvorova je ograničen, tako da je svaki čvor u mogućnosti da direktno komunicira sa ograničenim brojem susednih čvorova. Komunikacija između udaljenih čvorova se obavlja posredno po putanji koju čine jedan ili više među-čvorova. Pretpostavka je da je mreža povezana u smislu da između svakog para čvorova postoji putanja koja ih povezuje. Svaki čvor poseduje jedinstven identifikator (ID) koji je utisnut u permanentnu memoriju čvora i koji se koristi kao njegova MAC adresa. Osim toga, čvorovi u mreži su stacionarni ili slabo pokretljivi.

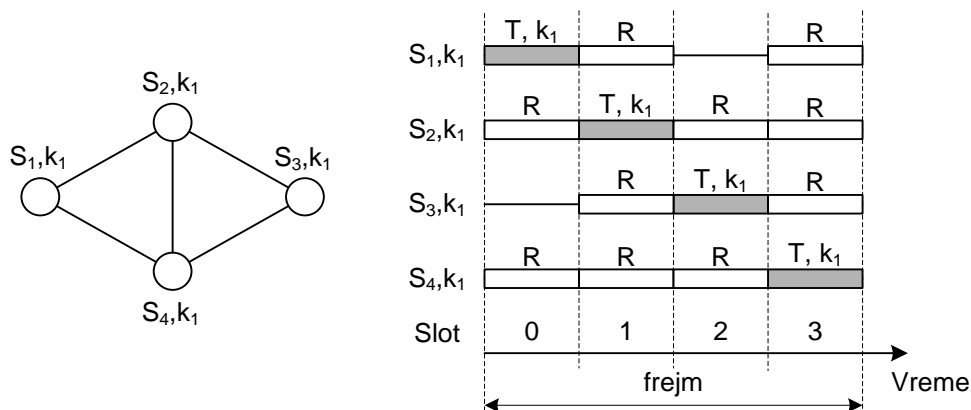
5.1. Motivacija

Slika 5.1 prikazuje primer kreiranja TFMAC rasporeda slotova za jednostavnu bežičnu senzorsku mrežu od 4 čvora, pod pretpostavkom da se za komunikaciju koristi jedan, odnosno dva kanala.

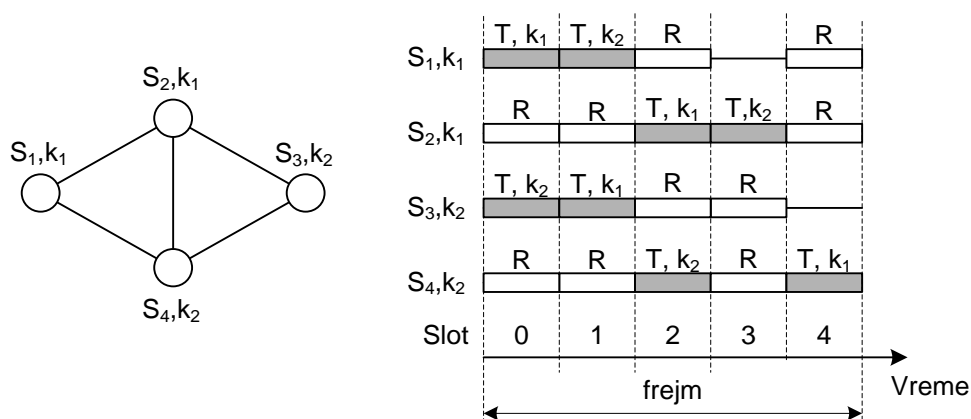
U slučaju rasporeda sa jednim kanalom (Slika 5.1 (a)), koji odgovara klasičnoj TDMA šemi, za uspostavljanje vremenskog rasporeda bez kolizija su dovoljna četiri slota. Svakom čvoru je dodeljen isti kanal, k_1 , i jedan slot za slanje poruka susedima. Tokom svakog slota, čvor igra ulogu predajnika (T) ili prijemnika (R), ili je neaktivan. Slotovi za slanje poruka ne smeju da se preklapaju, pošto se svi čvorovi u ovoj jednostavnoj bežičnoj senzorskoj mreži nalaze u *2-hop* susedstvu i koriste isti kanal. U konkretnom primeru u slotu 0, čvor S_1 ima status T, što znači da može da pošalje poruku jednom od svojih suseda, tj čvoru S_2 ili S_4 . Čvorovi S_2 i S_4 imaju status R u istom slotu, što znači da se na početku ovog slota bude i osluškujaju medijum. Ukoliko ne detektuju aktivnost, S_2 i S_4 se isključuju do

početka sledećeg slota. U suprotnom, S_2 i S_4 primaju, prvo, zaglavlje paketa, a kompletan paket prima samo adresirani čvor. Čvor S_3 je neaktivan u slotu 0 jer u ovom slotu ni jedan od njegovih suseda ne igra ulogu predajnika.

U slučaju vremenskog rasporeda sa dva kanala (Slika 5.1 (b)) svakom čvoru se dodeljuje kanal za prijem poruka i dva slota za emitovanje, po jedan za svaki postojeći kanal, k_1 i k_2 . Kao što je moguće primetiti, pod nekim okolnostima TFMAC omogućava istovremeno emitovanje u 2-hop susedstvu u okviru istog slota. Na primer, za vreme trajanja slota 0, dva čvora, S_1 i S_3 , smeju da šalju pakete, pošto koriste različite kanale i komuniciraju sa različitim podskupovima suseda. Čvor S_1 šalje paket čvoru S_2 na kanalu k_1 , a čvor S_3 šalje paket čvoru S_4 na kanalu k_2 . Ipak, kako se povećava broj raspoloživih kanala, povećava se i broj potrebnih slotova, zato što treba obezbediti da svaki čvor dobije po jedan slot za emitovanje na svakom kanalu (5 za naš primer sa dva kanala u poređenju sa 4 za primer sa jednim kanalom). Bez obzira na to, u slučaju korišćenja više kanala ukupno vreme dodeljeno čvoru za emitovanje je obično duže nego u slučaju korišćenja jednog kanala (u našem slučaju 2/5 frejma kod rasporeda sa dva kanala u poređenju sa 1/4 frejma kod rasporeda sa jednim kanalom).



(a) Raspored sa jednim kanalom



(b) Raspored sa dva kanala

Slika 5.1 Primeri kreiranja rasporeda slotova kod TFMAC-a.

5.2. Zahtevi

Prilikom projektovanja protokola TFMAC u obzir su uzeti sledeći zahtevi:

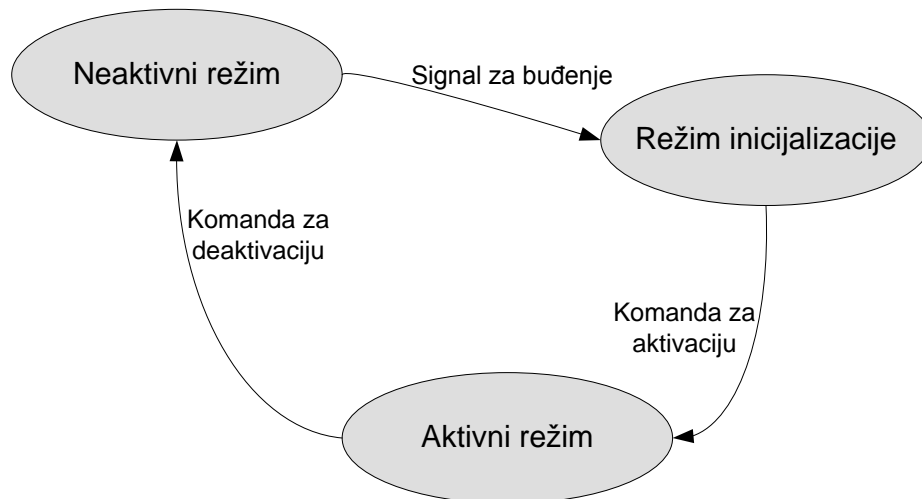
- Protokol treba da bude decentralizovan, tako da se identična kopija protokola izvršava u svakom čvoru. Jedini izuzetak je bazna stanica koja može imati proizvoljan broj dodatnih funkcija, vezanih za iniciranje konfigurisanja mreže. Decentralizovan pristup nalaže korišćenje isključivo lokalnih informacija, tj. informacija o stanju zauzetosti slotova/kanala u neposrednoj okolini čvora. Za razmenu ovih informacija između susednih čvorova je potrebno obezbediti efikasan mehanizam.
- Algoritam za dodelu kanala/slotova je ključna komponenta protokola TFMAC. Primarni zahtev prilikom projektovanja algoritma je sprečavanje kolizija. Sekundarni zahtev je ravnomerna distribucija raspoloživih kanala i slotova po čvorovima.
- TDMA princip, koji je u osnovi protokola TFMAC, zahteva sinhronizaciju čvorova. Zbog toga, neophodno je obezbediti mehanizam za vremensku sinhronizaciju, koji će biti jednostavan za implementaciju i koji će uz minimalan utrošak energije obezbediti zahtevani nivo sinhronizacije.
- Protokol treba da obezbedi mehanizam za samokonfiguraciju mreže, odnosno mehanizam koji će omogućiti da mreža pređe iz neuređenog stanja, odnosno stanja u kome nije uspostavljena sinhronizacija između čvorova niti je uspostavljen TDMA frejm, u uređeno stanje, odnosno u stanje u kome je izvršena dodela kanala/slotova, uspostavljena sinhronizacija i izvršena organizacija vremena. Proces samokonfiguracije treba da bude iniciran od strane bazne stanice, bilo na samom početku životnog veka mreže, bilo tokom životnog veka, onda kad se zahteva restartovanje mreže.
- Protokol treba da obezbedi mehanizam za priključivanje novih čvorova mreži, koji su naknadno dodati, i izbacivanje onih čvorova koji su prestali sa radom i to na način koji neće zahtevati ponovnu samokonfiguraciju celokupne mreže. Ova funkcija treba da se obavlja lokalno, tokom radnog režima, uz minimalno remećenje normalnog toka prenosa podataka.

5.3. Režimi rada

Protokol TFMAC predviđa da mreža tokom svog životnog veka prolazi kroz tri faze. Te faze, odnosno režimi bi bili (Slika 5.2):

- **Neaktivni režim.** Mreža započinje svoj životni vek u ovom režimu. U njemu čvorovi još nisu svesni postojanja drugih čvorova. Čvorovi u neaktivnom režimu periodično osluškaju medijum očekujući da čuju signal za buđenje, koji će ih prevesti u režim inicijalizacije.
- **Režim inicijalizacije.** U ovom režimu se sprovodi proces samokonfiguracije tokom koga se čvorovi samoorganizuju u multihop bežičnu mrežu. Samokonfiguracija podrazumeva da svaki čvor formira lokalnu mapu susedstva, tj. da otkrije koji se čvorovi nalaze u njegovom susedstvu i da se sa njima vremenski sinhronizuje. Tokom ove faze se uspostavlja TDMA frejm na nivou cele mreže. Uspostavljanje TDMA frejma podrazumeva i dodelu kanala i slotova čvorovima.

- **Aktivni režim.** Nakon obavljene samokonfiguracije, mreža ulazi u aktivni režim. Aktivni režim je ustaljeno stanje tokom kojeg je omogućena normalna razmena podataka između čvorova. Osim razmene podataka, tokom aktivnog režima se održava i vremenska sinhronizacija ostvarena tokom samokonfiguracije. Takođe je moguće i adaptiranje konfiguracije na sporadične promene u topologiji mreže. Ovo može da predstavlja situaciju kada otkazu pojedini čvorovi, ili kada mreža automatski prihvata i konfigurira nove.



Slika 5.2 Režimi rada TFMAC protokola.

Promene režima rada mreže inicira bazna stanica (Slika 5.2) emitovanjem signala za buđenje, i odgovarajućih komandnih poruka.

U neaktivnom režimu rada, čvorovi funkcionišu sa minimalnim nivoom aktivnosti. To znači da su primopredajnici čvorova isključeni najveći deo vremena i periodično se uključuju radi osluškivanja medijuma na podrazumevanom kanalu. Čvorovi ostaju u neaktivnom režimu sve dok ne detektuju prisustvo signala. Prelazak u režim inicijalizacije inicira bazna stanica emitovanjem signala za buđenje. Signal za buđenje je kontinualni ton, tj. nemodulisan signal na frekvenciji podrazumevanog kanala. Trajanje ovog signala je nešto duže od perioda osluškivanja, čime se garantuje da će svi čvorovi u dometu bazne stanice biti probuđeni. Neposredno po prelasku u režim inicijalizacije, čvor ima obavezu da reemituje signal za buđenje. Na ovaj način se postiže da signal za buđenje stigne do svih čvorova u mreži. Čime se garantuje da će po isteku određenog vremena svi čvorovi preći u režim inicijalizacije.

Tokom režima inicijalizacije, čvorovi su neprekidno aktivni, u smislu da su njihovi primopredajnici podrazumevano u stanju prijema, tj. ne isključuju se radi uštede energije. Inicijalizacija se ostvaruje razmenom poruka između susednih čvorova po odgovarajućem algoritmu. Sam proces traje određeno vreme, a završava se onda kad bazna stanica emituje komandnu poruku za prelazak u aktivni režim (komandu za aktivaciju). Čvor koji primi ovu poruku, ima obavezu da je reemituje, a onda, posle određene vremenske zadržke, prelazi u aktivan režim. Na sličan način, tokom aktivnog režima, bazna stanica može da inicira deaktiviranje mreže, emitovanjem komandne za deaktivaciju, koja se po istom principu kao komanda za aktivaciju, tj. *plavljenjem* distribuira do svih čvorova u mreži.

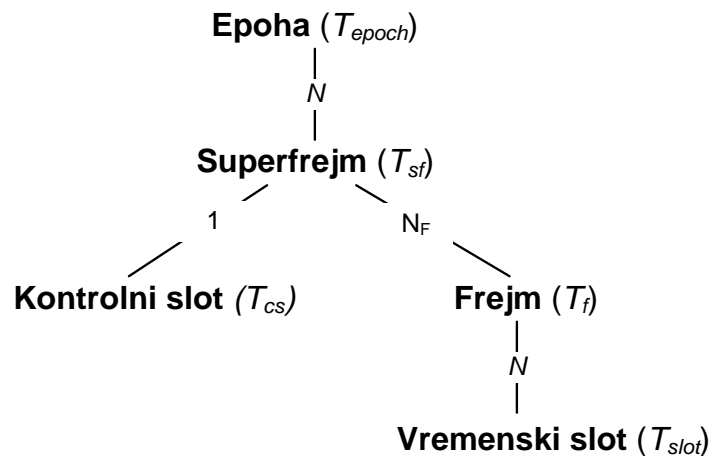
U nastavku poglavlja će biti detaljno opisani režim inicijalizacije i aktivni režim rada protokola TFMAC. Uprkos tome što režim inicijalizacije prethodi aktivnom režimu, prvo će biti opisan aktivni režim, zato što je za razumevanje procesa inicijalizacije neophodno poznavanje detalja vremenske organizacije koja važi u aktivnom režimu.

5.4. Aktivni režim

U aktivnom režimu, pored glavne funkcije, prenosa podataka, TFMAC treba da dodatno obezbedi dugoročnu sinhronizaciju čvorova i omogući priključenje novih čvorova mreži i izbacivanje. U ovoj sekciji je prvo opisana globalna vremenska organizacija aktivnog režima uključujući specifikaciju relevantnih vremenskih parametara. Zatim je predstavljena organizacija vremenskog rasporeda za TDMA prenos podataka zajedno sa ograničenjima koja moraju da budu poštovana prilikom dodele slotova i kanala čvorovima da bi raspored bio validan. Konačno, opisani su mehanizmi za priključenje novog čvora i izbacivanje čvora nakon otkaza.

5.4.1. Organizacija vremena

Tokom aktivnog režima, protokol TFMAC zahteva striktnu sinhronizaciju svih čvorova u mreži i uvodi specifičnu organizaciju vremena. Vreme je podeljeno u vremenske intervale fiksnog trajanja, takozvane epohe. Svaka epoha se sastoji iz N superfrejmova. Svaki superfrejm počinje kontrolnim slotom, posle koga sledi N_F frejmova, podeljenih na po N vremenskih slotova istog trajanja. Kontrolni slot se koristi za bezkonfliktnu distribuciju kontrolnih poruka između susednih čvorova u mreži, dok se deo vremena u okviru superfrejma koji odgovara frejmu koristi se za prenos podataka. U okviru svakog od N vremenskih slotova u frejmu, čvor šalje poruku bez nadmetanja, ukoliko mu je slot dodeljen za slanje, prima poruku ili ostaje u režimu smanjene potrošnje ukoliko ne mora da pošalje ili primi paket. Slika 5.3 prikazuje organizaciju vremena kod TFMAC protokola. Simboli na potezima dijagrama pokazuje koliko podintervala se sastoji u jednom roditeljskom intervalu. U zagradama pored naziva intervala navedeno je njegovo trajanje.



Slika 5.3 Organizacija vremena kod TFMAC protokola.

TFMAC zahteva da svaki čvor poseduje dva identifikatora: univerzalni identifikator (ID), koji se koristi kao MAC adresa jedinstvena u celoj mreži i lokalni identifikator (LID), koji se dinamički dodeljuje čvoru za vreme inicijalizacije mreže. LID je ceo broj iz intervala $[0, N-1]$, koji bi trebao da bude jedinstven u 2 -hop okolini čvora. LID ukazuje na redni broj kontrolnog slota u epohi koji pripada čvoru. Na taj način je čvor vlasnik samo jednog kontrolnog slota u epohi. Ovakav princip dodele kontrolnih slotova obezbeđuje emitovanje poruka bez konflikta za vreme kontrolnog slota, tako što garantuje da u 2 -hop okolini čvora ne postoji drugi čvor koji je vlasnik istog kontrolnog slota (ima isti LID). Čvor šalje kontrolnu poruku na podrazumevanom kanalu u svom kontrolnom slotu, tj. u kontrolnom slotu čiji redni broj odgovara njegovom LID broju, a prima kontrolne poruke u kontrolnim

slotovima koji pripadaju njegovim 1-hop susedima. Tokom nekorišćenih kontrolnih slotova, čvor je u obavezi da osluškuje medijum na podrazumevanom kanalu na početku slota radi eventualnog prijema kontrolne poruke novopriključenog čvora.

Kontrolna poruka sadrži sledeće informacije o čvoru koji je šalje: (a) oba identifikatora (ID i LID), (b) LID vektor, odnosno bit-vektor sa podacima o zauzetim LID brojevima od strane 1-hop suseda, (c) podatke o statusu vremenskih slotova u frejmu, tj. za svaki slot identifikaciju da li je predviđen za prijem, predaju ili neaktivan i (d) vremenski zapis sa lokalnim vremenom čvora. Podaci navedeni pod (a), (b) i (c) se koriste za lokalnu rekonfiguraciju mreže u situacijama kada umreženi čvor promeni poziciju u mreži, kada se mreži pridružuje novi čvor ili se izbacuje čvor koj je otkazao. Podatak naveden pod (d) je neophodan radi održavanja vremenske sinhronizacije.

Vremenski parametri

Trajanje pojedinih sekcija epohe određeno je vremenskim parametrima T_{CS} , T_{slot} , N i N_F . Pretpostavka je da su vrednosti ovih parametara upisane u permanentnu memoriju čvora pre njegove instalacije. Trajanje kontrolnog slota, T_{CS} , jednako je vremenu potrebnom za prenos jedne kontrolne poruke, dok se dužina trajanja vremenskog slota, T_{slot} , bira tako da je dovoljna za prenos samo jedne poruke podataka, maksimalno dozvoljene dužine. Dodatno, vremena T_{CS} i T_{slot} su uvećana za iznos Δt radi kompenzacije odstupanja u lokalnim vremenima čvorova usled nesavršene vremenske sinhronizacije. Izbor vrednosti parametra N , koji definiše broj superfrejmova u epohi i broj vremenskih slotova u frejmu, zavisi od gustine mreže, odnosno od očekivanog maksimalnog broja suseda proizvoljnog čvorova u mreži. Što je mreža gušća, to će biti neophodano veće N kako bi svaki čvor dobio kontrolni slot u epohi jedinstven u svojoj 2-hop okolini i obezbedio dovoljan broj vremenskih slotova u frejmu.

Parametar N_F , koji definiše broj frejmova u superfejmu, bitan je za sinhronizaciju čvorova. TFMAC ne nameće korišćenje nekog konkretnog algoritma za sinhronizaciju, već samo obezbeđuje mehanizam za razmenu informacija o lokalnom vremenu među susednim čvorovima, slanjem tzv. vremenskih zapisa u okviru kontrolnih poruka. U opštem slučaju, tačnost vremenske sinhronizacije zavisi od učestanosti slanja kontrolnih poruka. Ako je trajanje epohe predugo, razmak između slanja kontrolne poruke (i podatka o sinhronizaciji) može da bude prevelik da bi se postigao željeni nivo sinhronizacije. Sa druge strane, mala dužina trajanja epohe može da dovede do nepotrebnog gubitka energije zbog prečestog slanja kontrolnih poruka. Parametar N_F je uveden da bi se olakšalo podešavanje trajanja epohe na optimalnu veličinu. Shodno organizacionoj šemi sa Slika 5.3, izrazi koji definišu trajanje frejma, superfrejma i epohe u zavisnosti od vrednosti parametara T_{slot} , T_{CS} , N_F i N su oblika:

$$T_F = N \cdot T_{slot} \quad (1)$$

$$T_{SF} = T_{CS} + N_F \cdot N \cdot T_{slot} \quad (2)$$

$$T_{epoch} = N \cdot T_{CS} + N_F \cdot N^2 \cdot T_{slot} \quad (3)$$

Na osnovu izraza (3) sledi da je pomoću parametra N_F moguće menjati trajanje epohe u inkrementima od $T_{CS} + N^2 \cdot T_{slot}$. U suštini, N_F treba podesiti na maksimalnu vrednost koja garantuje dovoljno visoku tačnost sinhronizacije.

Trajanje epohe, takođe, utiče i na vreme adaptacije mreže, u slučaju dodavanja novog čvora ili izbacivanja čvora koji je otkazao. Za okončanje procesa rekonfiguracije nakon nastale potrebe potrebno je nekoliko epoha. Što je epoha duža, duži će biti i period adaptacije.

5.4.2. Organizacija frejma

Za razliku od kontrolnog slotu u kome se komunikacija odvija isključivo na jednom, podrazumevanom kanalu, za komunikaciju u frejmu na raspolaganju je N vremenskih slotova i N_K kanala. Komunikacija tokom frejma se obavlja shodno vremenskom planu koji za svaki čvor određuje način korišćenja svakog vremenskog slotu. Vremenski plan se ne kreira na jednom mestu u mreži, centralizovano, već u njegovom formiranju aktivno učestvuju svi čvorovi tokom faze inicijalizacije (sekcija 5.5). Takođe, globalni vremenski plan, usaglašen između čvorova, ne čuva se na jednom mestu u mreži, već su detalji globalnog plana distribuirani po čvorovima, tako da svaki čvor poseduje samo izolovani deo plana, koji se njega tiče. Struktura podataka u kojoj čvor čuva detalje plana naziva se *vremenskom tabelom*. U ovoj tabeli navedeni su sledeći podaci o svakom slotu u frejmu:

1. Redni broj slotu. Slotovi su numerisani rednim brojevima od 0 do $N_F - 1$.
2. Status slotu. Moguće opcije su: R - prijemni slot; T - predajni slot i I - neaktivan slot. Ako je status R, dodatno se navodi ID suseda kome je u ovom slotu dodeljena uloga predajnika. Ako je status T, dodatno se navode ID-ovi suseda kojima je u ovom slotu dodeljena uloga prijemnika.
3. Redni broj kanala. Kanali su numerisani rednim brojevima od 0 do $N_K - 1$.

Čvor prima poruke od susednih čvorova u slotovima sa statusom R, a šalje poruke susedima u slotovima sa statusom T. Za vreme trajanja slotu sa statusom R i T, primopredajnik čvorova je podešen na kanal koji je dodeljen tom slotu. U slotovima sa statusom I nisu predviđene nikakve komunikacione aktivnosti, pa primopredajnik može biti isključen radi uštede energije.

Globalni vremenski plan, tj. plan posmatran na nivou celokupne mreže, je korektan ukoliko obezbeđuje mogućnost dvosmerne višekanalne komunikacije bez konflikta između svakog para susednih čvorova. Svedeno na lokalni nivo, korektnost globalnog plana se svodi na sledeće zahteve: Za komunikaciju između svakog para susednih čvorova x i y postoje dva slotu u frejmu, jedan, sa rednim brojem i , za prenos poruka od čvorova x ka čvoru y , i drugi, sa rednim brojem j , za prenos poruka od y ka x . Pri tome važi $i \neq j$. Slot i ima status T u vremenskoj tabeli čvorova x , i status R u vremenskoj tabeli čvorova y . Za slot j važi obrnuto. Uz to, slotu i , kao i slotu j , dodeljen je isti kanal u obe vremenske tabele. Poruka će biti prenetu od čvorova x do čvorova y bez konflikta ako je x jedini sused čvorova y u čijoj vremenskoj tabeli slot i ima status T i dodeljen mu je isti kanal kao u vremenskoj tabeli čvorova x .

Osim prethodno navedenih opštih zahteva, protokol TFMAC uvodi i sledeća dva dodatna ograničenja:

1. Za svaki kanal k , u vremenskoj tabeli čvorova n postoji tačno jedan slot sa statusom T kome je dodeljen kanal k .
2. Svim slotovima sa statusom R u vremenskoj tabeli čvorova n dodeljen je isti kanal.

U protokolu TFMAC, čvor prima poruke samo na jednom od N_F raspoloživih kanala. Ovaj, tzv. prijemni kanal, dodeljuje se čvoru u fazi inicijalizacije (sekcija 5.5) i ne menja se tokom aktivnog rada. S druge strane, svakom čvoru se dodeljuje po jedan slot za predaju na svakom kanalu. Čvor x koristi slot kome je dodeljen status T i kanal k za slanje poruka svim svojim susedima kojima je dodeljen prijemni kanal k . Ako je redni broj ovog slotu i , tada je slot i označen statusom R u vremenskim tabelama svih suseda čvorova x kojim je dodeljen prijemni kanal k . Takođe, broj slotova sa statusom R u vremenskoj tabeli čvorova y jednak je broju 1-hop suseda ovog čvorova. Svaki slot sa statusom R se koristi za prijem poruka od

jednog suseda, i poklapa se po rednom broju i kanalu sa slotom kome je u vremenskoj tabeli odgovarajućeg suseda pridružen status T.

Dodatna ograničenja uvedena protokolom TFMAC u izvesnoj meri smanjuju slobodu izbora slota, ali značajno pojednostavljaju proceduru kreiranja plana, koja se može podeliti na dva aspekta: dodela prijemnih kanala čvorovima i dodela statusa slotovima.

5.4.3. Priključivanje novog čvora

TFMAC protokol je optimizovan za statičke bežične senzorske mreže sa niskim nivoom dinamike, odnosno za mreže čija se topologija ne menja tokom aktivnog režima ili su te promene male i retko se dešavaju. Zbog toga, TFMAC predviđa relativno jednostavan mehanizam za priključenje novih čvorova aktivnoj mreži, koji je zasnovan na sledećim pretpostavkama:

- Vreme trajanja priključenja novog čvora nije od bitnog značaja, pošto se položaj čvora ne menja u toku vremena.
- U svakom trenutku u svakoj *2-hop* okolini priključuje se najviše jedan čvor. Sve dok traje procedura njegovog priključenja, nije dozvoljeno da se u njegovoj *2-hop* okolini pojavi još jedan novi čvor. Time je isključena mogućnost pojave kolizija i nekonzistentnosti vremenskih tabela zbog interferencije novih čvorova.
- Mesto za novi čvor se ne pravi rekonfiguracijom postojećeg globalnog vremenskog rasporeda. Zbog toga je novi čvor moguće priključiti samo u one delove aktivne mreže gde postoji dovoljan nivo redundanse komunikacionih resursa, odnosno samo na onim mestima u mreži gde može da se pronađe bar jedan neiskorišćen LID i dovoljan broj neiskorišćenih vremenskih slotova u frejmu na različitim kanalima. Drugim rečima, i nakon priključenja novog čvora, svi postojeći čvorovi zadržavaju svoje kanale i slotove za emitovanje. Dodavanje novog čvora izaziva promenu samo u vremenskim tabelama *2-hop* suseda i ne širi se dalje po mreži.

Procedura priključenja počinje tako što novi čvor osluškuje podrazumevani kanal, radi prijema kontrolnih poruka aktivnih čvorova iz svog okruženja, u trajanju jedne epohe. Na ovaj način saznaje ID-ove, LID-ove i vremenske tabele svojih novih suseda. Pošto je kreirao kompletnu i konzistentnu sliku svog okruženja, novi čvor vrši izbor LID-a, prijemnog kanala i predajnih slotova, i to, u osnovi, na identičan način koji se primenjuje u režimu inicijalizacije: bira jedan od neiskorišćenih LID-ova u *2-hop* okolini, najmanje korišćen predajni kanal u *2-hop* okolini i po jedan vremenski slot za svaki kanal koji je označen kao neiskorišćen u vremenskim tabelama neposrednih suseda. Novi čvor uvek može da izabere prijemni kanal, zbog nepostojanja zahteva za njegovom ekskluzivnošću u *2-hop* okolini. Međutim, problem može nastati prilikom izbora LID-a ili predajnih kanala ukoliko su u *2-hop* okolini iskorišćeni svi LID-ovi ili svi vremenski slotovi na nekom kanalu. U takvoj situaciji, novi čvor odustaje od priključenja, deaktivira se i eventualno pokušava ponovo posle nekog vremena.

Nakon izvršenog izbora LID-a, prijemnog kanala i predajnih slotova, novi čvor počinje svoj aktivan rad emitovanjem kontrolne poruke u svom izabranom kontrolnom slotu, odnosno u kontrolnom slotu epohe čiji redni broj odgovara izabranom LID-u. Svi susedi primaju kontrolnu poruku novog čvora i ažuriraju svoje vremenske tabele. Za susedni čvor n koji prima pakete na kanalu k bitan je vremenski slot koji novi čvor koristi za emitovanje na kanalu k . To znači da čvor n odgovarajući slot obeležava kao slot za prijem (R) u svojoj vremenskoj tabeli. Novi čvor je spreman za razmenu podataka sa susednim čvorovima po isteku vremena jednakog jednoj epohi.

U slučaju da dva ili više novih čvorova započnu proces priključivanja u isto vreme, tj. tokom iste epohe i u okviru iste *2-hop* okoline, TFMAC ne garantuje da će njihov izbor LID-a i predajnih slotova biti korektan. Naime, moguće je da dva čvora koji se aktiviraju u isto vreme i imaju zajedničke susede izaberu isti LID ili isti slot za emitovanje na istom kanalu. Ako izaberu isti LID, doćiće do pojave kolizija kontrolnih poruka. Ako izaberu isti predajni slot na istom kanalu, doći će do kolizija poruka podataka. S obzirom na to da novo-aktivirani čvorovi nisu u mogućnosti da otkriju konflikte, odgovornost za prevazilaženje ovakvih situacija je na postojećim aktivnim čvorovima. Ukoliko su čvorovi izabrali isti LID, neki od aktivnih suseda to može da detektuje kao koliziju u kontrolnom slotu koji su oba čvora izabrala. Ukoliko su čvorovi izabrali isti slot u frejmu za emitovanje na istom kanalu, neki od aktivnih suseda će to detektovati u trenutku kad primi komandnu poruku, koja kao izabrani slot za emitovanje na nekom kanalu navodi slot koji je već zauzet u tabeli aktivnog suseda. U oba slučaja aktivni čvor koji je detektovao konflikt obaveštava problematične susede putem svoje kontrolne poruke. Kontrolna poruka sadrži LID kontrolnog slota u kome je primećena kolizija, odnosno LID čvora koji je poslao kontrolnu poruku sa vremenskom tabelom koja stvara konflikt. Čvor koji primi upozorenje ovog tipa se momentalno deaktivira, čeka neko proizvoljno vreme (da bi se smanjila verovatnoća da dva čvora ponovo započnu proces pridruživanja u isto vreme) i ponavlja proceduru priključenja.

5.4.4. Otkaz čvora

U toku rada mreže može da dođe do otkaza rada čvora. Razlog za otkaz čvora može da bude: ispražnjena baterija, otkaz u elektronici čvora, uništenje čvora pod dejstvom nekog spoljašnjeg uticaja i slično. Iako čvor u slučaju otkaza prestaje da komunicira, i dalje zadržava komunikacione resurse (LID, prijemni kanal, predajne slotove), pa je zato potrebno predvideti mehanizam za njihovu dealokaciju, odnosno za uklanjanje podataka koje o ovom čvoru čuvaju susedi.

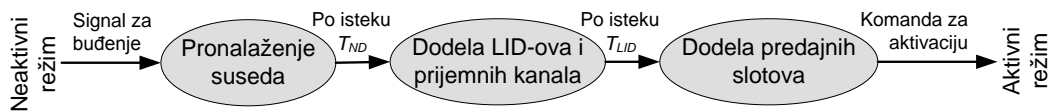
Otkaz čvora detektuju njegovi susedi, tako što u određenom periodu ne prime nikakvu poruku od njega. Čvor x , koji u tri susedne epohe ne primi kontrolnu poruku od suseda, čvora y , u njegovom kontrolnom slotu, pretpostavlja da je sused otkazao. Ažuriranje podataka nakon detektovanja da je čvor otkazao podrazumeva: ažuriranje vremenskih tabela i LID vektora. Iz vremenske tabele se uklanja svaka referenca na čvor koji je otkazao. To znači da se njegov ID briše iz listi susednih čvorova koje su pridružene prijemnim i predajnim slotovima. Ako je nakon izbacivanja *ID*-a iz liste, lista ostala prazna, status odgovarajućeg slota se menja na I (neaktivan slot). Ažuriranje LID vektora podrazumeva anuliranje bita koji odgovara LID-u čvora koji je otkazao. Ove promene u strukturama podataka preko kontrolnih poruka prenosi svojim *2-hop* susedima. Oslobođeni resursi mogu da se iskoriste prilikom priključenja novog čvora.

5.5. Inicijalizacija

Posle prijema signala za buđenje, čvor iz neaktivnog režima prelazi u režim inicijalizacije. Tokom režima inicijalizacije mreža se samokonfiguriše, odnosno čvorovi otkrivaju svoje susede, biraju kanal za prijem i slotove za emitovanje u okviru frejma. Tokom režima inicijalizacije, čvor prolazi kroz tri faze (Slika 5.4):

- a) Faza pronalaženja suseda, u kojoj čvorovi prikupljaju ID-ove *2-hop* suseda.
- b) Faza dodele LID-ova i prijemnih kanala, u kojoj čvorovi biraju prijemni kanal i LID, jedinstven u *2-hop* okolini.

- c) Faza dodele predajnih slotova, u kojoj svaki čvor bira po jedan slot za predaju na svakom kanalu.



Slika 5.4 Faze u okviru režima inicijalizacije.

Najvažnije u sve tri faze je mogućnost efikasne diseminacije informacija, takozvanih statusnih poruka, među *2-hop* susedima. Sadržaj statusne poruke zavisi od faze procesa inicijalizacije. U prve dve faze protokol koristi jednostavnu, nasumičnu (asinhronu) šemu diseminacije statusnih poruka, a u trećoj fazi prelazi na determinističku (sinhronu) šemu diseminacije zasnovanu na TDMA rasporedu. Za vreme asinhronne šeme diseminacije čvorovi šalju statusne poruke u slučajno izabranim trenucima. Kad završi emitovanje u trenutku t_i , čvor novo emitovanje zakazuje za trenutak $t_{i+1} = t_i + T_d$, gde je T_d slučajno izabrana vrednost iz intervala uniformne raspodele $[0, T_{dmax}]$. U trenutku t_{i+1} čvor prvo osluškuje medijum i odustaje od emitovanja ukoliko je medijum zauzet. Kod determinističke šeme diseminacije čvorovi su sinhronizovani i emituju svoje statusne poruke prema TDMA rasporedu. Komandni frejm se sastoji iz N slotova, a svakom mrežnom čvoru je dodeljen slot sa rednim brojem koji odgovara njegovom LID-u. Pošto su LID brojevi jedinstveni u *2-hop* okolini svakog čvora, ovim je garantovan pristup bez kolizija.

5.5.1. Faza pronalaženja suseda

Na početku inicijalizacije čvor nema nikakve podatke o mreži i prvo mora da prikupi informacije o neposrednom okruženju. Radi ovog, čvorovi prikupljaju podatke o susedima. Čvorovi periodično emituju statusnu poruku koja sadrži njegov ID i ID-ove njegovih, do tog trenutka "otkrivenih", neposrednih suseda. Kad čvor primi poruku od suseda, ažurira svoju listu *2-hop* suseda i listu neposrednih suseda koju će sledeći put emitovati.

Faza pronalaženja suseda počinje po prijemu prve statusne poruke i traje neko određeno vreme, T_{ND} . U okviru tog vremena čvor periodično emituje svoju poruku, koristeći asinhronu šemu diseminacije.

Izbor parametra T_{ND} direktno zavisi od izbora T_{dmax} , pošto ređe emitovanje statusnih poruka zahteva duže trajanja faze pronalaženja suseda. Vreme trajanja ove faze takođe zavisi i od gustine mreže, pošto gušća mreža zahteva duži period za otkrivanje suseda. Prilikom projektovanja protokola, nametnulo se pitanje je koliko ovaj period treba da traje da bi se sa nekim visokim procentom garantovalo da će svi čvorovi uspeti da prikupe ID-ove svih *2-hop* suseda. U poglavlju 6.1, posvećenom simulaciji režima inicijalizacije date su smernice za izbor T_{ND} i drugih vremenskih parametara koji definišu rad čvora u režimu inicijalizacije.

5.5.2. Faza dodele LID-ova i prijemnih kanala

U drugoj fazi inicijalizacije, vrši se dodela lokalnih ID-ova (LID) i izbor kanala za prijem. Oba ova parametra su bitna za rad čvora u aktivnom režimu. LID identifikuje kontrolni slot u epohi koji je dodeljen čvoru za slanje kontrolnih poruka. S obzirom na zahtev za bezkonfliktnom razmenom kontrolnih poruka, raspodela LID-ova među čvorovima mora biti takva da svaki čvor dobije LID koji je jedinstven u njegovoj *2-hop* okolini. LID se bira iz opsega $[0, N-1]$, gde je N sistemski parametar (sekcija 5.4.1). Uporedo sa izborom LID-a,

čvor bira i prijemni kanal, tj. kanal na kome će primati poruke tokom frejmova u aktivnom režimu. Prijemni kanal se bira iz skupa raspoloživih kanala $[1, N_K]$, a idealna raspodela bi bila ona gde bi svaki čvor dobio prijemni kanal koji je, kao i LID, jedinstven u njegovoj *2-hop* okolini. Međutim, za razliku od parametra N , koji se može podešavati prema očekivanoj gustini mreže, broj kanala N_K je određen karakteristikama primopredajnika i širinom frekventnog opsega koji je na raspolaganju za komunikaciju u mreži i po pravilu ne prelazi 10 (sekcija 4.2). S obzirom na relativno mali broj raspoloživih kanala, zahtev za ekskluzivošću prijemnog kanala u *2-hop* okolini najčešće nije moguće ostvariti. Zbog toga se usvaja kriterijum izbora po kome se teži što manjem broju preklapanja prijemnih kanala na nivou *2-hop* okolina u mreži.

Algoritam rada čvorova u ovoj fazi zasnovan je na sledećim principima:

- Čvor čuva podatke o LID-ovima *2-hop* suseda u tzv. LID tabeli. U ovoj tabeli, za svakog suseda iz *2-hop* okoline postoji stavka oblika (id, lid, k) , gde su lid i k LID i redni broj prijemnog kanala koji su dodeljeni susedu sa univerzalnim identifikatorom id . LID tabela je podeljena na dva dela. Prvi deo tabele je rezervisan za *1-hop* susede, a drugi za susede na *2-hop* rastojanju. Ova tabela je prazna na početku faze dodele LID-ova i prijemnih kanala.
- Susedni čvorovi razmenjuju među sobom statusne poruke poruke, korišćenje asinhronne šeme diseminacije. Statusne poruke poruka u ovoj fazi sadrži: (a) ID, LID i prijemni kanal čvora koji šalje poruku (pod pretpostavkom da je čvor već obavio izbor LID-a i prijemnog kanala), i (b) *1-hop* sekciju LID tabele. Čvor koji primi statusnu poruku, koristi njen sadržaj za ažuriranje svoje LID tabele.
- Čvor pristupa izboru LID-a i prijemnog kanala u momentu kada se u LID tabeli nađu stavke za sve *2-hop* susede sa manjim ID-om od njegovog. Na ovaj način se nameće sekvencijalnost u postupku izbora LID-ova na nivou *2-hop* okoline, što je preduslov za izbor jedinstvenog LID-a u *2-hop* okolini. Radi izbora LID-a, čvor, prvo, iz opsega $[0, N-1]$ eliminiše LID-ove koji postoje u LID tabeli, a onda slučajno bira jedan od preostalih. Čvor bira prijemni kanal koji se najmanji broj puta ponavlja u LID tabeli. Ukoliko postoji više od jednog kanala sa istim, najmanjim brojem pojavljivanja, čvor slučajno bira jedan od njih.
- Faza izbora LID-ova i prijemnih kanala traje fiksno vreme, T_{LID} , za sve čvorove u mreži. Proces započinje bazna stanica koja prva bira LID i prijemni kanal, a zatim šalje svoju prvu statusnu poruku, koja ujedno predstavlja i aktivacionu poruku za ovu fazu. Preostali čvorovi ulaze u ovu fazu u momentu prijema prve statusne poruke. Dinamika emitovanja statusnih poruka poruka je identična onoj koja se u fazi pronalaženja suseda koristi za razmenu ID poruka.

5.5.3. Faza dodele predajnih slotova

Poslednja faza u režimu inicijalizacije posvećena je uspostavljanju vremenskog rasporeda komunikacije u frejmu tokom aktivnog režima. Ovo podrazumeva kreiranje vremenskih tabela na nivou pojedinačnih čvorova, koje će definisati namenu i način korišćenja svakog slotu u frejmu, prema uslovima i ograničenjima koja su data u sekciji 5.4.2. U suštini, vremenski plan treba svakom čvoru da obezbedi po jedan slot u frejmu za emitovanje poruka na svakom kanalu.

Procedura za dodelu predajnih slotova zahteva sekvencijalnost na nivou *2-hop* okolina. Kao i u proceduri za dodelu LID-ova, sekvencijalnost se postiže tako što čvor pristupa izboru predajnih slotova tek nakon što su svi čvorovi iz njegovog *2-hop* okruženja sa manjim ID-om od njegovog obavili izbor. Takođe, procedura zahteva konstantnu razmenu

informacija o zauzetosti slotova između susednih čvorova. Statusna poruka kod faze dodele predajnih slotova sadrži sledeće podatke o čvoru koji je šalje: (a) vremenski zapis (lokalno vreme čvora), (b) LID, (c) listu ID-ova suseda koji su obavili izbor predajnih slotova uključujući i sam čvor i (d) vremensku tabelu, u formatu koji je predstavljen u sekciji 5.4.

Za razliku od prethodnih faza u režimu inicijalizacije, koje koriste asinhronu šemu diseminacije, u faza dodele predajnih kanala koristi se sinhrona šema diseminacije. Čvor ulazi u fazu dodele predajnih slotova onda kad primi prvu Statusnu poruku. Na osnovu vremenskog zapisa i LID-a iz ove poruke, čvor je u mogućnosti da se vremenski sinhroniše sa pošiljaocem poruke i momentalno se priključi statusnom frejmu, u smislu da može da odredi početak frejma i početke svih slotova u frejmu (na osnovu poznatih podataka o dužini trajanja slota T_{slot} i broja slotova N u frejmu trajanja T_F). Kao i u prethodnim fazama, bazna stanica prva bira predajne slotove, a zatim šalje svoju prvu statusnu poruku, koja kumulativno aktivira sve ostale čvorove u mreži. Celokupna faza dodele predajnih slotova za svaki čvor traje tačno $2N$ statusnih frejmova, odnosno N ciklusa po dva frejma. Izbor predajnih slotova se obavlja na početku svakog ciklusa. Izbor obavljaju samo oni čvorovi koji još uvek nisu obavili izbor, a čiji su svi $2-hop$ susedi sa manjim ID-om od njihovog već obavili izbor. Da bi se promene učinjene u vremenskim tabelama čvorova koji su obavili izbor u tekućem ciklusu prenele do svih njihovih $2-hop$ suseda, potrebna su dva frejma.

Informaciju o stanju zauzetosti slotova od strane neposrednih suseda, čvor čuva u tzv. tabeli zauzetosti slotova. Ova tabela je oblika binarne matrice dimenzija $N_F \times N$ u kojoj vrednost elementa sa indeksima (i,k) ukazuje na stanje zauzetosti slota i na kanalu k . Na početku, tabela zauzetosti slotova sadrži sve nule, što znači da su čvoru na raspolaganju svi slotovi na svim kanalima. Uvek kad primi statusnu poruku, čvor izdvaja iz nje vremensku tabelu i na osnovu njenog sadržaja ažurira tabelu zauzetosti slotova. Za svaku stavku u vremenskoj tabeli oblika (i,R,k) ili (i,T,k) , a koja znači da je slot sa rednim brojem i rezervisan za prijem (R), odnosno predaju (T) na kanalu k , čvor upisuje 1 u element sa indeksima (i,k) u tabeli zauzetosti slotova. Kako proces dodele predajnih slotova napreduje, tako se tabele zauzetosti slotova popunjavaju jedinicama.

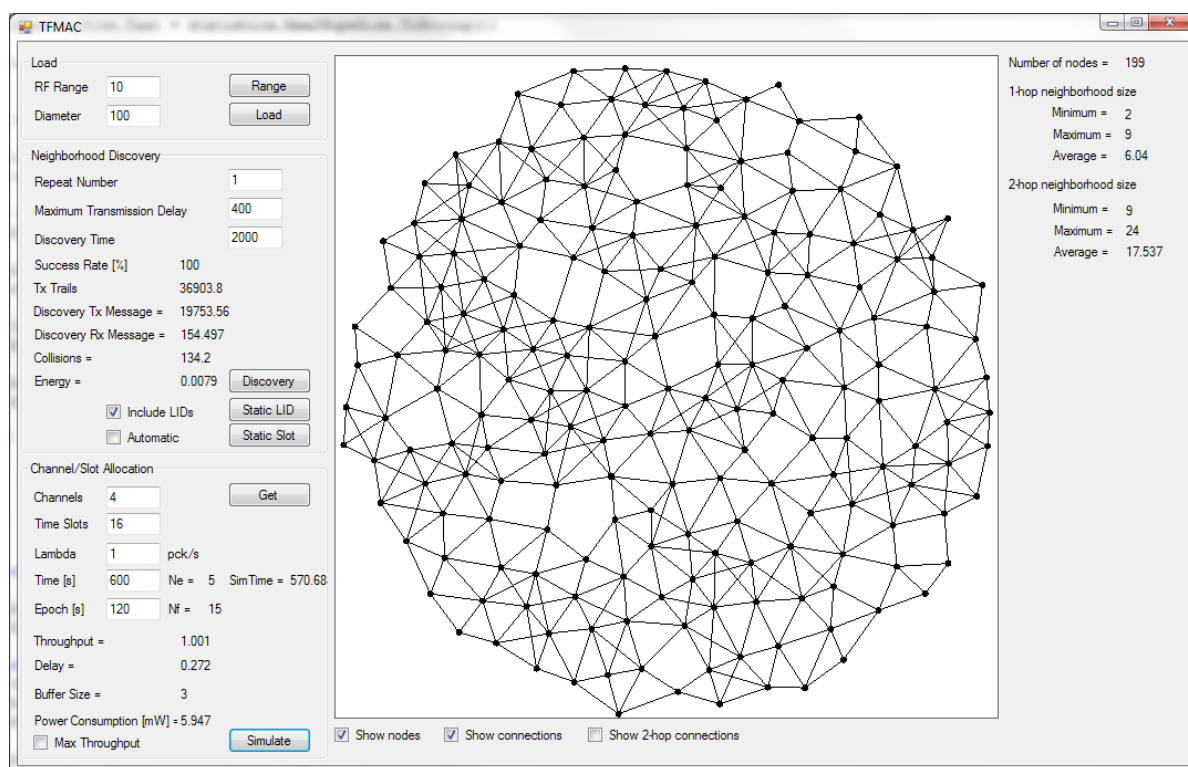
Na početku svakog ciklusa, čvor proverava da li su svi čvorovi iz $2-hop$ okoline sa manjim ID-om od njegovog obavili izbor predajnih slotova. Ako je to slučaj, čvor pristupa izboru svoji N_F predajnih slotova. Za svaki kanal, počev od kanala 1, pa redom do kanala N_F čvor bira jedan od slotova koji su slobodni na tom kanalu. Čvor bira predajni slot za kanal k tako što prvo izdvoji sve slobodne slotove iz k -te kolone tabele zauzetosti slotova, tj. one koji su označeni nulom u ovoj koloni, a zatim, na slučajan način bira jedan od njih. Zatim, čvor upisuje jedinice u sve elemente vrste tabele zauzetosti slotova koja odgovara izabranom slotu, kako bi se sprečilo da se isti slot izabere za neki od preostalih kanala, a onda upisuje u vremensku tabelu novu stavku oblika (i,T,k) , gde je i redni broj izabranog slota. Čvor ponavlja opisanu procedure izbora za svaki kanal.

Nakon $2N$ statusnih frejmova čvor prestaje da emituje statusne poruke, ali ostaje na prijemu u isčekivanju poruke za aktivaciju. Po prijemu poruke za aktivaciju čvor je reemituje i prelazi u aktivni režim.

6. REZULTATI SIMULACIJE

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati simulacione analize performansi protokola TFMAC. Analizom su obuhvaćeni režim inicijalizacije i aktivni režim. Režim inicijalizacije je analiziran sa stanovišta izbora optimalnih vrednosti vremenskih parametara koji utiču na vreme trajanja pojedinih faza inicijalizacije i potrošnju energije. Kao mere performansi protokola TFMAC u aktivnom režimu posmatrane su propusna moć, kašnjenje i potrošna energije u zavisnosti od komunikacionog opterećenja mreže i broja raspoloživih frekventnih kanala.

Simulaciona analiza je sprovedena uz pomoć namenski razvijenog simulatora bežičnih senzorskih mreža (Slika 6.1). Simulator omogućava izbor topologije mreže, izbor karakteristika saobraćaja u mreži i podešavanje svih bitnih parametara protokola TFMAC. Simulator izdaje izveštaje o ostvarenim prenosima paketa i proračunava performansne mere.

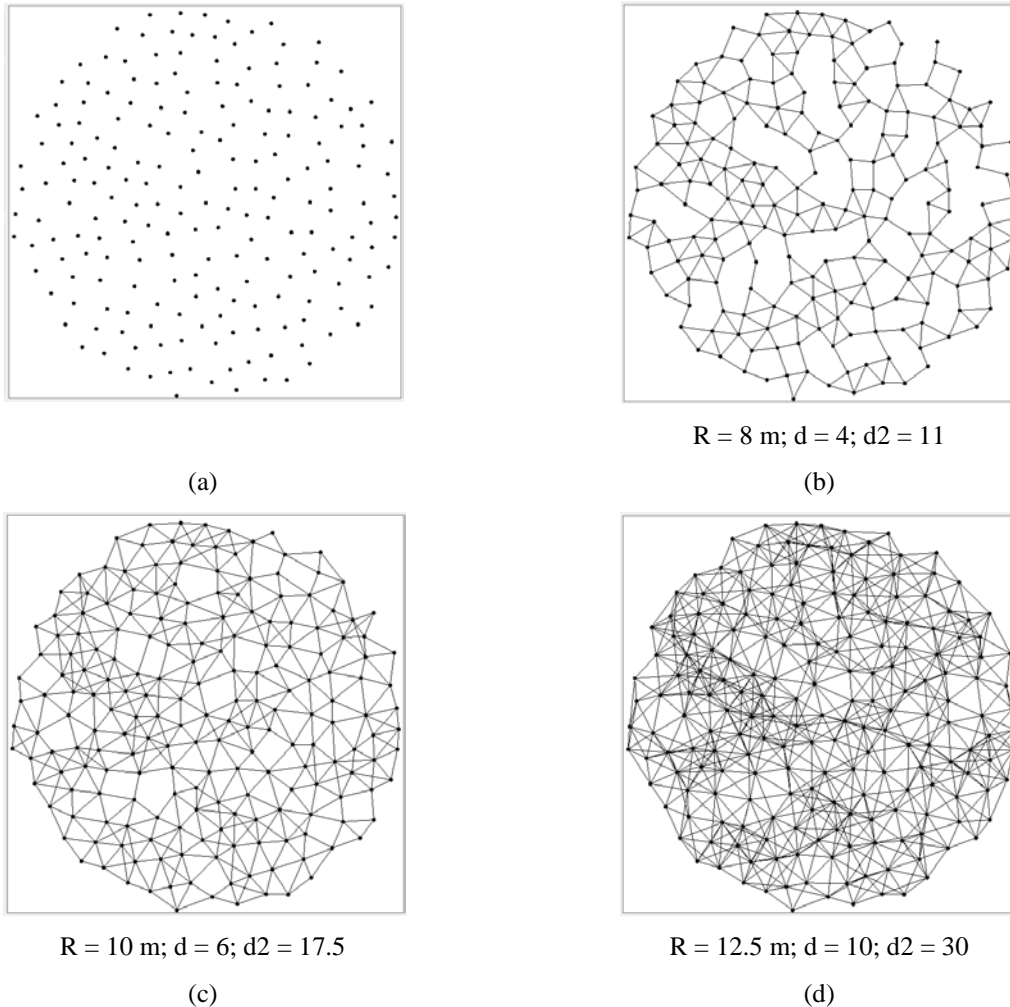


Slika 6.1 Izgled prozora simulatora bežičnih senzorskih mreža.

6.1. Simulacioni model

Evaluacija performansi protokola TFMAC se zasniva na simulaciji bežične senzorske mreže od 200 čvorova, slučajno raspoređenih u kružnoj oblasti prečnika 100 m. Slika 6.2(a) prikazuje prostorni raspored čvorova u mreži koja je korišćena u simulacijama. U simulacijama se uvek koristi ista mreža, ali se menja RF domet čvorova, pa se time indirektno menja komunikaciona gustina. Komunikaciona gustina mreže je prosečan broj susednih čvorova u RF dometu, odnosno prosečna veličina 1-hop okoline. Slika 6.2, takođe, prikazuje izgled komunikacionih grafova, gde su svi čvorovi povezani potezima sa svojim 1-hop susedima, u slučaju da je komunikacioni domet: $R = 8$ m (Slika 6.2(b)), $R = 10$ m (Slika

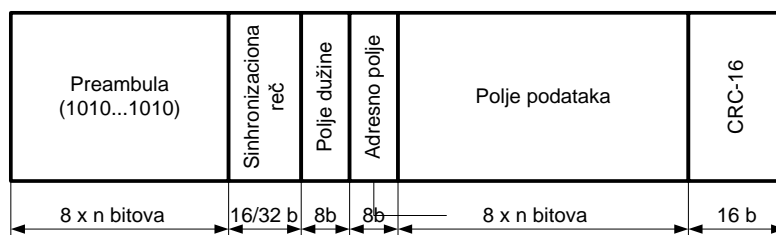
6.2(c)) i $R = 12.5$ m (Slika 6.2(d)). Ovim komunikacionim dometima odgovaraju komunikacione gustine od 4, 6 i 10, respektivno. Uporedo sa povećanjem RF dometa povećava se i broj *2-hop* suseda i to brže od broja *1-hop* suseda. Tako, za mrežu kod koje je prosečan broj *1-hop* suseda 4, prosečan broj *2-hop* suseda je 10, a u slučaju da je prosečan broj *1-hop* suseda 10, prosečan broj *2-hop* suseda je 30.



Slika 6.2 Topologija bežične senzorske mreže korišćene u simulaciji: (a) raspored čvorova, (b) komunikacioni graf za $R = 8$ m, (c) komunikacioni graf za $R = 10$ m, (d) komunikacioni graf za $R = 12,5$ m, Napomena: R - RF domet, d - prosečan broj *1-hop* suseda i d_2 - prosečan broj *2-hop* suseda.

Izvestan broj parametara protokola TFMAC je postavljen na konstantnu vrednost u svim simulacijama. Vrednosti ovih parametara određene su na osnovu karakteristika primopredajnika CC1100 [8]. Tabela 6 daje osnovne karakteristike primopredajnika CC1100 zajedno sa preračunatim vrednostima konstantnih parametara protokola TFMAC.

Slika 6.3 prikazuje format paketa koji se razmenjuju u toku rada mreže. Paket sadrži sledeće delove: preambulu (dužine $8 \times n$ bitova), sinhronizacionu reč (dužine 16 ili 32 bita), polja za dužinu i odredišnu adresu (dužine 8 bitova), polje za podatke i polje za proveru (CRC, dužine 16 bita). Maksimalna dužina polja za podatke je 64 bajta, što je i maksimalna dužina poruke koja može da se pošalje jednim paketom. Maksimalna dužina polja za podatke uslovljava da maksimalna dužina celog paketa bude 74 bajtova.



Slika 6.3 Format paketa poruke protokola TFMAC.

Prilikom simulacije, usvojeno je da je brzina prenosa podataka 20 Kb/s, na osnovu čega može da se izračuna da je maksimalno vreme prenosa paketa maksimalne dužine 29.6 ms. Ako na to dodamo vremensku rezervu zbog sinhronizacije i promene kanala, možemo da usvojimo da je vreme za prenos podataka, odnosno dužina trajanja slota, $T_{slot} = 32ms$. Ista vrednost se usvaja i za dužinu trajanja kontrolnog slota, pošto se usvaja da su u periodu inicijalizacije sve poruke maksimalne dužine. Potreba za osluškivanjem se javlja u aktivnom režimu, na početku prijemnog slota. Vreme osluškivanja je vreme koje je potrebno da primopredajnik provede na prijemu čekajući na paket. Pošto bi za to vreme trebalo primiti preambulu i sinhronizacionu reč (dužine 6 bajta), čija predaja traje 2.4 ms, a na to treba dodati vremensku rezervu zbog sinhronizacije, usvajamo da vreme osluškivanja iznosi 4 ms. Ukoliko čvor po isteku ovog vremena ne uspe da detektuje početak poruke, on isključuje primopredajnik. Iznosi energija potrebnih za osluškivanje, predaju i prijem jednog paketa su određeni na osnovu trajanja ovih aktivnosti, napona napajanja i struja u režimu predaje i prijema, i iznose 0.21 mJ, 2.93 mJ i 1.54 mJ, respektivno.

Tabela 6 Karakteristike primopredajnika CC1100 i konstantni parametri protokola TFMAC.

Napon napajanja	3.3V
Struja u režimu prijema	15.8 mA
Struja u režimu predaje	30 mA
Bitska brzina	20 Kb/s
Maksimalna dužina poruke	64 bajta
Maksimalna dužina paketa	74 bajta
Vreme prenosa paketa maksimalne dužine	29.6 ms
Vreme osluškivanja	4 ms
Dužina trajanja slota (T_{slot})	32ms
Energija za predaju paketa maksimalne dužine	2.93 mJ
Energija za prijem paketa maksimalne dužine	1.54 mJ
Energija za osluškivanje	0.21 mJ

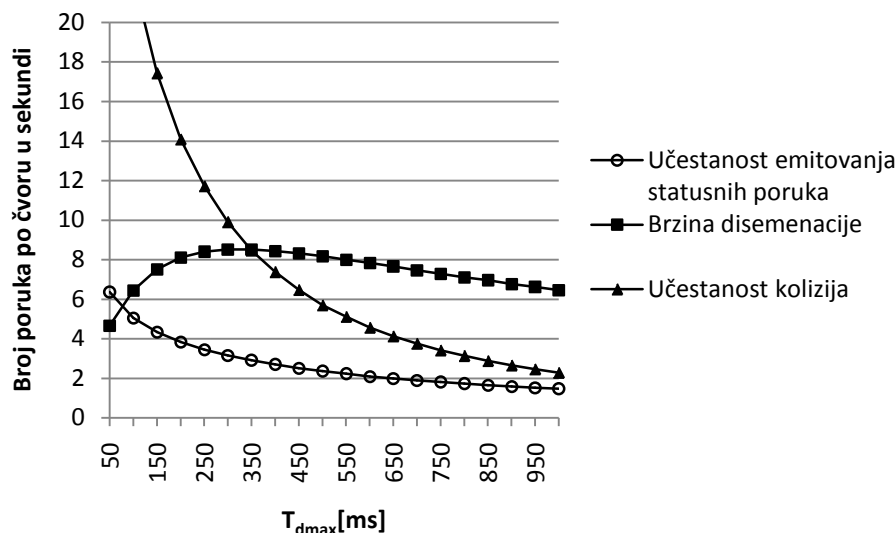
6.2. Simulacija režima inicijalizacije

U prvoj grupi eksperimenata analizirane su performanse predloženog mehanizma inicijalizacije, u pogledu vremenske i energetske efikasnosti. Vreme potrebno da se izvrši svaka od tri faze zavisi, pre svega, od efikasnosti mehanizma za diseminaciju informacije o trenutnom statusu čvora njegovim 2-hop susedima. U prve dve faze inicijalizacije (otkrivanje suseda i dodela LID-ova i prijemnih kanala) koristi se asinhrona šema diseminacije, u kojoj se čvorovi nadmeću za pristup medijumu. Kod ove šeme, čvor uvodi pauzu između dva uzastopna emitovanje statusne poruke, koja je slučajnog trajanja iz intervala $[0, T_{dmax}]$. Ako je

po isteku pauze medijum zauzet, čvor produžava pauzu za vreme koje je takođe slučajnog trajanja iz interval $[0, T_{dmax}]$. U suprotnom, ako je medijum slobodan, čvor emituje statusnu poruku (videti sekciju 5.5). Posledica probabilističke prirode asinhronne diseminacije je nederminističko trajanje prve dve faze inicijalizacije. To znači da vremenske parametre T_{ND} (trajanje faze otkrivanja suseda) i T_{LID} (trajanje faze dodele LID-ova i prijemnih kanala) treba postaviti na dovoljno veliku vrednost da se omogući da svaki čvor završi zadatak sa velikom verovatnoćom. Procena optimalnih vrednosti ovih parametara se oslanja na simulacije. U trećoj fazi inicijalizacije (dodela slotova) za diseminaciju informacija se koristi sinhroni TDMA mehanizam koji obezbeđuje prenos statusnih poruka bez kolizija (vidi sekciju 5.4). Vreme trajanja ove faze je determinističko i zavisi samo od broja slotova u TDMA frejmu.

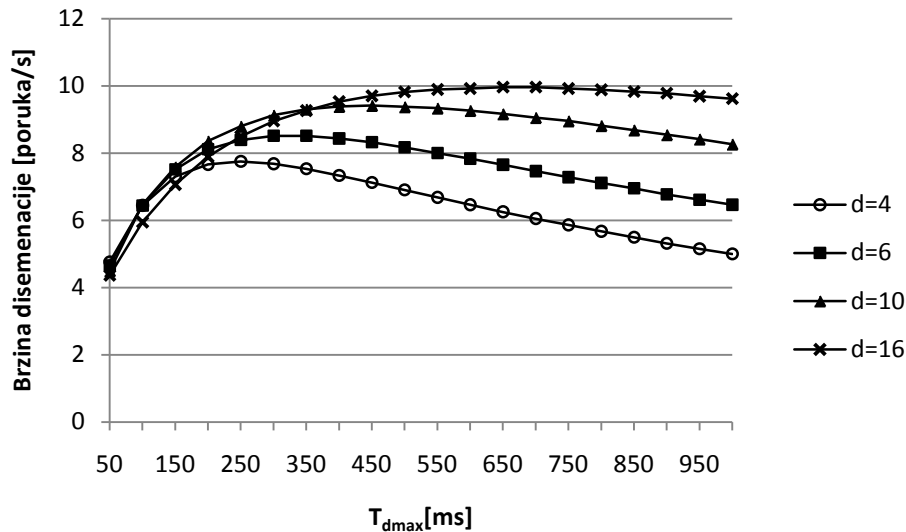
Prvi eksperiment se odnosi na određivanje optimalne vrednosti parametra T_{dmax} kojim se reguliše učestanost emitovanja statusnih poruka u asinhronoj šemi diseminacije. Optimalna vrednost parametra T_{dmax} je ona kojom se maksimizira brzina diseminacije informacija izražena prosečnim brojem statusnih poruka koje čvor primi u sekundi. Što je brzina diseminacije veća, to će trajanje prve dve faze inicijalizacije biti kraće.

Slika 6.4 prikazuje rezultate simulacije asinhronne šeme diseminacije informacija u bežičnoj senzorskoj mreži gustine $d = 6$. Ovaj grafikon prikazuje zavisnost brzine diseminacije, učestanosti emitovanja statusnih poruka i učestanosti kolizija od vrednosti parametra T_{dmax} . Ako je T_{dmax} postavljeno na malu vrednost, čvorovi će praviti kraće pauze između emitovanja statusnih poruka, ali će i broj kolizija biti veći, što dovodi do spore diseminacije informacija. S druge strane, ako se T_{dmax} postavi na veliku vrednost, učestanost kolizija će biti mala, pa će većina statusnih poruka biti ispravno primljena. Međutim, zbog male učestanosti emitovanja statusnih poruka, proces diseminacije informacija će takođe biti usporen. Kao što se može uočiti sa grafikona, optimalna vrednost parametra T_{dmax} iznosi 350 ms. Pri ovoj vrednosti, brzina diseminacije je najveća, a svaki čvor u mreži, u proseku, primi 8.2 statusnih poruka u sekundi. Pri tom, učestanost emitovanja statusnih čvorova iznosi 2.4 poruke u sekundi po čvoru, a učestanost kolizija je jednaka brzini diseminacije, što znači da, u proseku, na svaku upešno primljenu statusnu poruku dođe jedna poruka izgubljena usled kolizije.



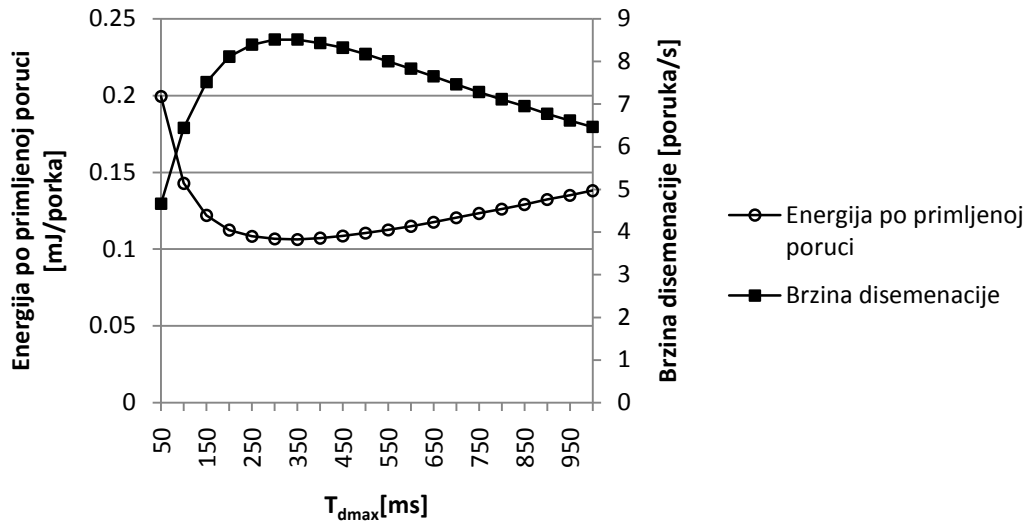
Slika 6.4 Zavisnost brzine diseminacije, učestanosti emitovanja statusnih poruka i učestanosti kolizija od vrednosti parametra T_{dmax} , za $d = 6$.

Slika 6.5 prikazuje zavisnost brzine diseminacije od parametra T_{dmax} , za različite gustine mreže. Sa povećanjem gustine mreže, povećava se broj suseda, pa pri istoj učestanosti emitovanja statusnih poruka nastaje veći broj kolizija. Iz tog razloga se sa povećanjem gustine mreže povećava i optimalna vrednost za T_{dmax} , za koju će brzina diseminacije biti najveća. Na slici može da se uoči da se maksimalna brzina diseminacije postiže za $T_{dmax} = 250, 350, 450$ i 650 ms za gustine 4, 6, 10 i 16, respektivno.



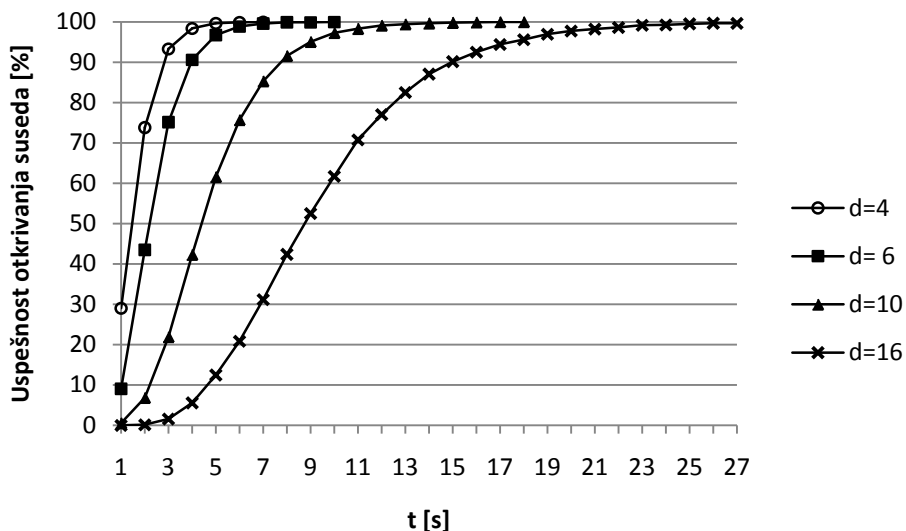
Slika 6.5 Zavisnost brzine diseminacije od parametra T_{dmax} za različite gustine mreže.

Racionalno korišćenje energije je, po pravilu, primarni zahtev prilikom projektovanja komunikacionih protokola za bežične senzorske mreže, a parametri protokola se često podešavaju tako da se maksimizira energetska efikasnost, čak i na račun pogoršanja nekih drugih karakteristika protokola. Imajući to u vidu, od interesa je ispitati zavisnost energetske efikasnosti asinhronne šeme diseminacije od vrednosti parametra T_{dmax} . Kao mera za energetska efikasnost procesa diseminacije korišćen je količnik ukupne količine energije koja se potroši u mreži tokom trajanja diseminacije i ukupnog broja uspešno preneti statusnih poruka između čvorova u mreži. Slika 6.6 prikazuje energiju po primljenoj poruci i brzinu diseminacije u zavisnosti od parametra T_{dmax} , za gustinu mreže $d=6$. Sa slike je moguće uočiti da se maksimalna brzina diseminacije skoro poklapa sa minimalnom energijom po poruci, tako da se pri izboru vrednosti parametra T_{dmax} za maksimalnu energetska efikasnost možemo voditi rezultatima dobijenim za maksimalnu brzinu diseminacije.



Slika 6.6 Zavisnost energetske efikasnosti i brzine diseminacije od T_{dmax} , za $d=6$.

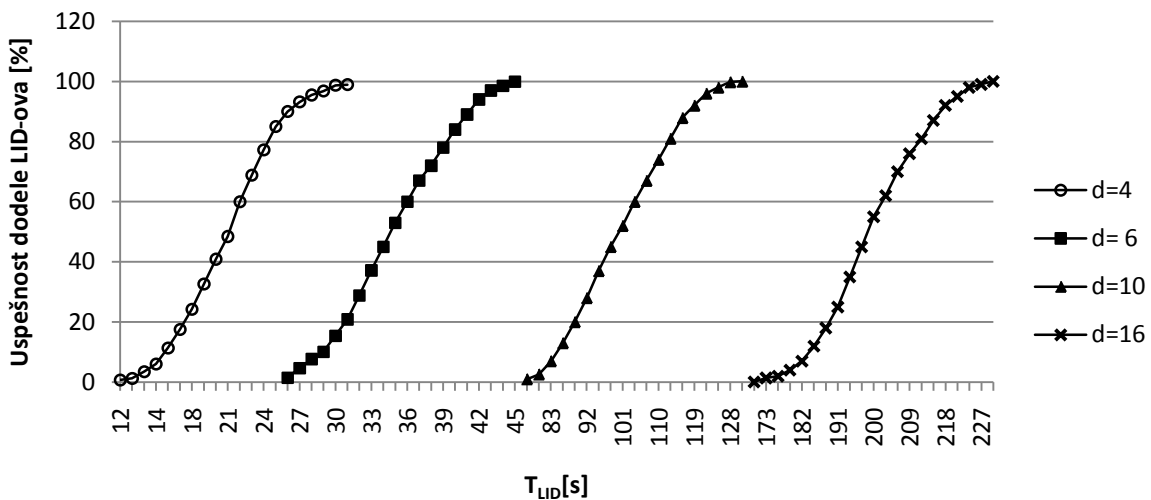
Kod asinhronne diseminacije, brzina diseminacije nije konstantna, već varira u vremenu na slučajan način. Zbog toga nije moguće egzaktno odrediti vremena trajanja prve dve faze inicijalizacije, već se prilikom određivanja vrednosti parametara T_{ND} i T_{LID} mora uračunati i izvesna vremenska rezerva. Slika 6.7 prikazuje procenat čvorova koji su uspešno završili fazu otkrivanja suseda, u zavisnosti od vremena, za različite gustine mreže. Eksperiment je izveden sa parametrom T_{dmax} podešenim na optimalnu vrednost za svaku gustinu mreže. Parametar T_{ND} može da se dobije kao vreme za koje je uspešnost otkrivanja suseda dostigla zadovoljavajuću vrednost. Prema slici, period trajanja T_{ND} veoma zavisi od gustine mreže. Na primer, za mrežu gustine $d=4$, T_{ND} treba podesiti na najmanje 5 s, da bi se obezbedilo da najmanje 99,5% čvorova otkrije sve svoje susede. Kako raste gustina mreže, i vreme potrebno za uspešno otkrivanje suseda raste, da bi dostiglo vrednost od $T_{ND} = 25$ s kod mreže gustine $d = 16$.



Slika 6.7 Uspešnost otkrivanja suseda u zavisnosti od T_{ND} , za različite gustine mreže.

Slika 6.8 prikazuje procenat čvorova koji su uspešno završili drugu fazu inicijalizacije, tj. dodelu LID-ova i prijemnih kanala, u zavisnosti od vremena, za različite gustine mreže. Ponovo, za svaku pojedinačnu gustinu mreže podešena je optimalna vrednost

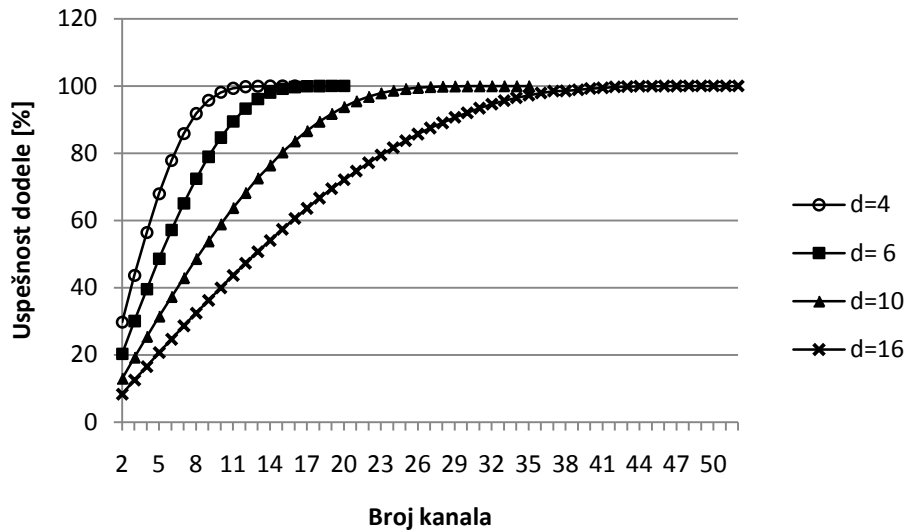
parametra T_{dmax} . Prema slici, period trajanja T_{LID} takođe veoma zavisi od gustine mreže. Na primer, za mrežu gustine $d=4$, T_{LID} treba podesiti na najmanje 3 s, da bi se obezbedila velika verovatnoća uspešne dodele LID-ova. Kako raste gustina mreže, i vreme potrebno za uspešno okončanje druge faze inicijalizacije raste, da bi dostiglo vrednost od $T_{LID} = 227s$ kod mreže gustine $d = 16$. Drastično povećanje potrebnog trajanje faze dodele LID-ova i prijemnih kanala, u poređenju sa trajanjem faze otkrivanja suseda je posledica toga što je broj iteracija u proceduri dodele LID-ova i prijemnih kanala srazmeran veličini $2-hop$ okoline, za razliku od procedure otkrivanja suseda, gde je broj iteracija srazmeran veličini $1-hop$ okoline.



Slika 6.8 Uspešnost dodele LID-ova u zavisnosti od T_{LID} , za različite gustine mreže.

Uspešnost dodele LID-ova zavisi i od broja raspoloživih LID-ova (N), zato što je posle nekog trenutka, kad se dodele svi LID-ovi, a postoji potreba za novim, nemoguće izvršiti dodelu, nezavisno od daljeg produžetka trajanja faze. Potreban i dovoljan broj LID-ova zavisi od topologije komunikacionog grafa mreže i algoritma dodele, a za datu mrežu, vrednost parametra N se uzima iz opsega $[d_{max}, d2_{max}]$, gde je d_{max} broj čvorova u najvećoj $1-hop$, a $d2_{max}$ broj čvorova u najvećoj $2-hop$ okolini u mreži. Ako je N manje od d_{max} uspešna dodela LID-ova garantovano nije moguća; ako je N veće od $d2_{max}$ dodela je garantovano moguća. Pri tom, poželjno je da broj LID-ova bude što manji, jer vrednost ovog parametra istovremeno određuje i broj slotova u frejmu, a produženje frejma dovodi do povećanja kašnjenja pri multihop prenosu poruka.

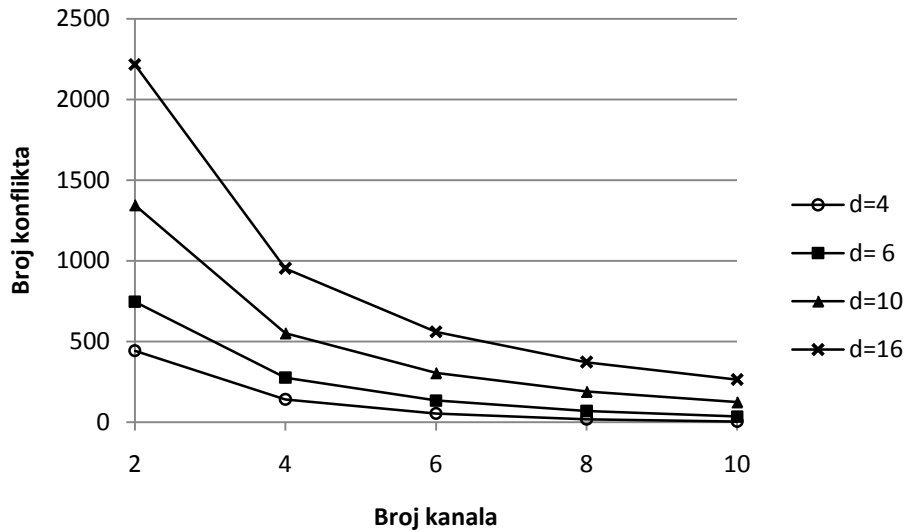
Slika 6.9 prikazuje zavisnost između broja raspoloživih LID-ova i procenta čvorova kojim je uspešno dodeljen LID u mrežama različite gustine. Kao što se može uočiti, u mreži gustine $d=4$, za koju važi $d_{max} = 6$ i $d2_{max} = 17$, stopostotna uspešnost dodele se postiže ako je $N=14$ i veće; za mrežu gustine $d=6$ ($d_{max} = 9$ i $d2_{max} = 24$,) važi $N = 16$, za gustinu $d=10$ ($d_{max} = 15$ i $d2_{max} = 44$,) važi $N=26$ i za gustinu $d=16$ ($d_{max} = 22$ i $d2_{max} = 71$) važi $N=44$. Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da je potreban broj raspoloživih LID-ova bliži donjoj nego gornjoj granici, što je svakako povoljno sa stanovišta komunikacionih performansi protokola.



Slika 6.9 Uspešnost dodele LID-ova u zavisnosti od broja raspoloživih LID-ova, za različite gustine mreže.

U drugoj fazi inicijalizacije, čvorovi se, osim izbora LID-a, bave i izborom prijemnog kanala. Pri tom, za razliku od izbora LID-a, ne postoji imperativ da izabrani prijemni kanal bude jedinstven u *2-hop* okolini čvora, već čvor pri izboru bira kanal koji je do tog momenta najmanji broj puta izabran od strane njegovih *2-hop* suseda. Međutim, zbog relativno malog broja raspoloživih kanala (tipično, 2 - 10) nije moguće izbeći konflikte kad dva ili više čvora iz iste *2-hop* okoline izaberu isti prijemni kanal. Posledica konflikta pri izboru prijemnog kanala je neuniformna raspodela komunikacione propusne moći u mreži. To je zato što u protokolu TFMAC čvorovi za slanje poruka na jednom kanalu uvek koriste samo jedan vremenski slot u frejmu, bez obzira na broj suseda kojim je taj kanal dodeljen za prijem. Na primer, ako čvor u svojoj *1-hop* okolini ima samo jednog suseda na nekom kanalu, onda će on biti u mogućnosti da tom susedu šalje jednu poruku u svakom frejmu. Međutim, ako postoje dva suseda na istom kanalu, broj poruka koje u jedinici vremena čvor može da pošalje svakom od njih biće dva puta manji.

Slika 6.10 prikazuje zavisnost između broja raspoloživih kanala i ukupnog broja konfliktnih izbora prijemnog kanala u mreži pri različitim gustinama analizirane bežične senzorske mreže. Kao što se može videti, broj konflikta (ukupan broj *2-hop* suseda koji su izabrali isti prijemni kanal) zavisi od broja raspoloživih kanala, zato što više raspoloživih kanala znači da je manje čvorova izabralo isti kanal, i od gustine mreže, zato što veća gustina mreže znači da ima više čvorova koji biraju. Brzi pad broja konflikta sa povećanjem broja kanala ukazuje na efikasnost algoritma izbora prijemnog kanala.

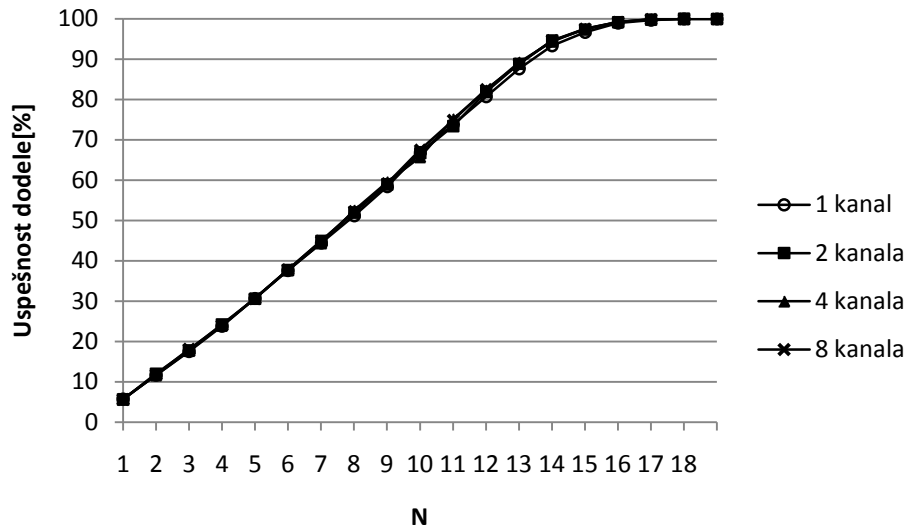


Slika 6.10 Ukupan broj konfliktinih izbora prijemnog kanala u zavisnosti od broja raspoloživih kanala, za različite gustine mreže.

Treća faza u procesu inicijalizacije je faza dodele predajnih slotova. Tokom ove faze čvor bira predajne slotove, odnosno bira po jedan vremenski slot u okviru frejma za predaju na svakom kanalu (Sekcija 5.5.3). Za razliku od prve dve faze inicijalizacije, u fazi dodele predajnih slotova koristi se sinhrona šema diseminacije informacija, koja obezbeđuje bezkonfliktnu razmenu statusnih poruka. Na početku ove faze uspostavlja se TDMA frejm od N slotova, a svaki čvor emituje svoju statusnu poruku u slotu sa rednim brojem jednakim njegovom LID-u. S obzirom da algoritam dodele predajnih slotova zahteva N iteracija, a u svakoj iteraciji je neophodno obaviti razmenu statusnih poruka između čvorova u svakoj 2-hop okolini, trajanje ove faze je determinističko i iznosi:

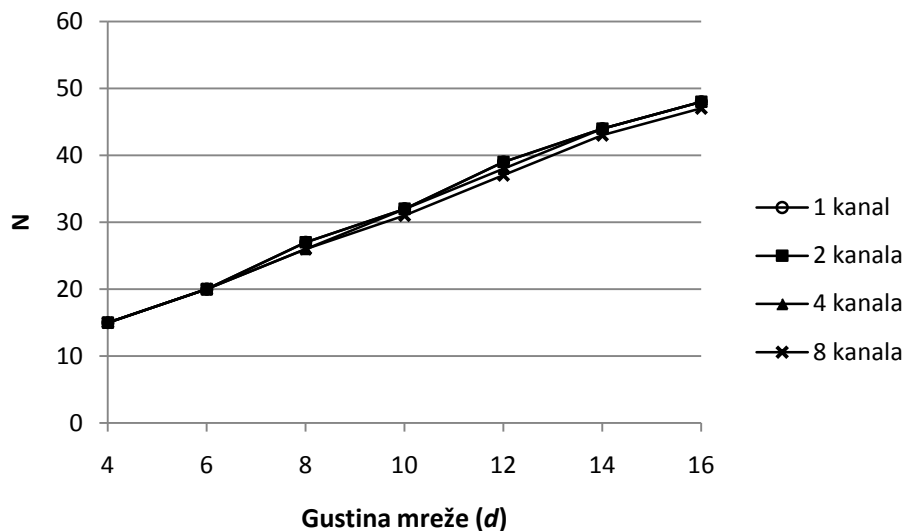
$$T_{SS} = 2 \times T_{slot} \times N^2$$

Dodela predajnih slotova je uspešna ukoliko svi čvorovi u mreži uspeju da izaberu N_K slotova shodno kriterijumima koji su uvedeni u sekciji 5.5.3. Uspešnost dodele zavisi od broja raspoloživih slotova, tj. od dužine frejma (N), gustine mreže i broja raspoloživih kanala (N_K). Slika 6.11 daje ovu zavisnost izraženu procentom čvorova koji su s uspehom završili fazu dodele predajnih slotova u mreži gustine $d=6$. Kao što se može uočiti, uspešnost dodele veoma malo zavisi od broja kanala. To je zato što se predajni slotovi biraju nezavisno za svaki kanal. Takođe, treba uočiti da se stopostotna uspešnost dodele postiže za $N=16$, što je ista vrednost koja je dobijena i za potreban broj LID-ova u mreži gustine 6 (Slika 6.9).



Slika 6.11 Uspešnost dodele predajnih slotova u zavisnosti od broja raspoloživih slotova, za različiti broj kanala u mreži gustine $d=6$.

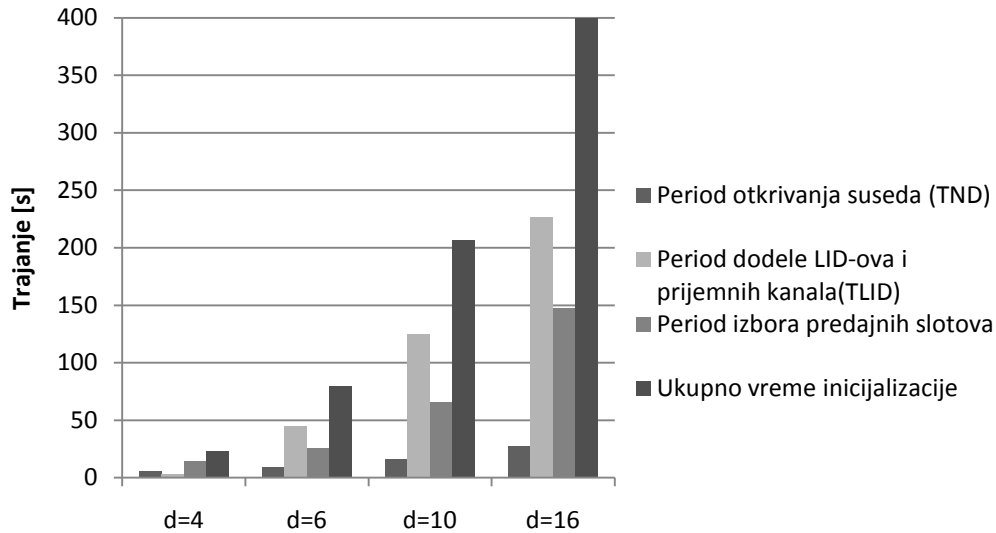
Slika 6.12 prikazuje zavisnost minimalnog broja vremenskih slotova u frejmu kojim se postiže stopostotna uspešnosti dodele predajnih slotova od gustine mreže. Može se primetiti da ni ona ne zavisi od broja raspoloživih kanala. Može se primetiti da dužina frejma veoma malo zavisi od broja raspoloživih kanala. Takođe, može da se uoči da je potrebna dužina frejma približno jednaka broju potrebnih LID-ova, tako da je u protokolu za oba usvojen jedan parametar, N .



Slika 6.12 Zavisnost broja potrebnih slotova od gustine mreže, za različiti broj kanala.

Na osnovu prethodnih eksperimenata može se doći do vrednosti vremenskih parametara u režimu inicijalizacije. Slika 6.13 prikazuje očekivana trajanja pojedinih faza režima inicijalizacije, za različite gustine mreže. Kao što je moguće videti na slici, najviše vremena je potrebno za fazu dodele LID-ova i prijemnih kanala, čak više od polovine ukupnog vremena potrebnog za celokupnu inicijalizaciju. Razlog za ovo je relativno kompleksan distribuirani algoritam za dodelu LID-ova, koji zahteva nekoliko iteracija razmene informacija među *2-hop* susedima. Zbog determinističke prirode algoritma za diseminaciju u trećoj fazi inicijalizacije, faza izbora predajnih slotova traje oko 30% kraće od

faze dodele LID-ova i prijemnih kanala, iako se u obe faze, u suštini, koristi isti algoritam dodele. Faza otkrivanja suseda zahteva manje vremena, pošto zahteva samo jednu iteraciju razmene informacija među *2-hop* susedima. Kao što je i bilo očekivano, ukupno vreme potrebno za inicijalizaciju mreže veoma zavisi od gustine mreže i kreće se od 25 s za mrežu male gustine ($d=4$) do čak 400 s za gustu mrežu ($d=16$).



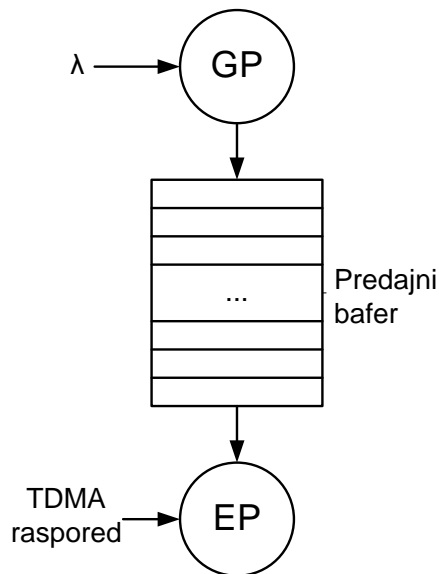
Slika 6.13 Dužina trajanja režima inicijalizacije i svih faza u zavisnosti od gustine mreže.

6.3. Simulacija aktivnog režima

Tokom aktivnog režima protokola TFMAC, vreme je podeljeno na epohe; epoha sadrži jedan komandni slot i N_F frejma, a svaki frem N vremenskih slotova (sekcija 5.4.1). U aktivnom režimu, čvorovi koriste TDMA raspored kreiran u režimu inicijalizacije, kojim se definiše aktivnost čvora u svakom slotu frejma. Efekat uvođenja više kanala ogleda se u povećanju broja predajnih slotova, odnosno u mogućnosti da čvor tokom jednog frejma emituje veći broj poruka - jednu na svakom kanalu. Time se stvaraju uslovi za povećanje propusne moći i smanjenje kašnjenja u prenosu poruka u poređenju sa klasičnom, jednokanalnom TDMA šemom, gde čvor ima mogućnost da emituje samo jednu poruku u frejmu. Simulacija aktivnog režima je sprovedena u cilju procene komunikacionih performansi i energetske efikasnosti protokola TFMAC u zavisnosti od karakteristika mrežnog saobraćaja, broja kanala i komunikacione gustine mreže.

U simulacijama je korišćen trivijalni, sintetički model mrežnog saobraćaja (*gossiping*) po kome poruke koje se razmenjuju između čvorova nisu produkt neke konkretne aplikacije, već se nasumično generišu u čvorovima i upućuju susedima. Model predviđa da čvor poseduje proces za generisanje poruka (GP), predajni bafer, i proces za emitovanje poruka (EP) (Slika 6.14). Proces GP generiše poruke u trenucima koje bira na osnovu eksponencijalne raspodele sa gustinom λ . Parametar λ je ulazni parametar simulacije kojim se reguliše komunikaciono opterećenje čvora. Vrednost ovog parametra predstavlja prosečan broj poruka generisanih u sekundi, tj. prosečno vreme između generisanja dve poruke iznosi W . Proces GP, takođe, definiše određeni čvor poruke koji na slučajan način bira iz skupa *1-hop* suseda. Nakon generisanja, poruka se upisuje na kraj predajnog bafera. Proces EP prosleđuje poruke iz predajnog bafera susednim čvorovima shodno TDMA rasporedu. Pri tom, proces EP ne uzima poruke iz bafera u strogo FIFO redosledu, već tokom svakog predajnog slotu, bira za emitovanje najkasnije generisnu poruku koja je upućena nekom od suseda koji dati

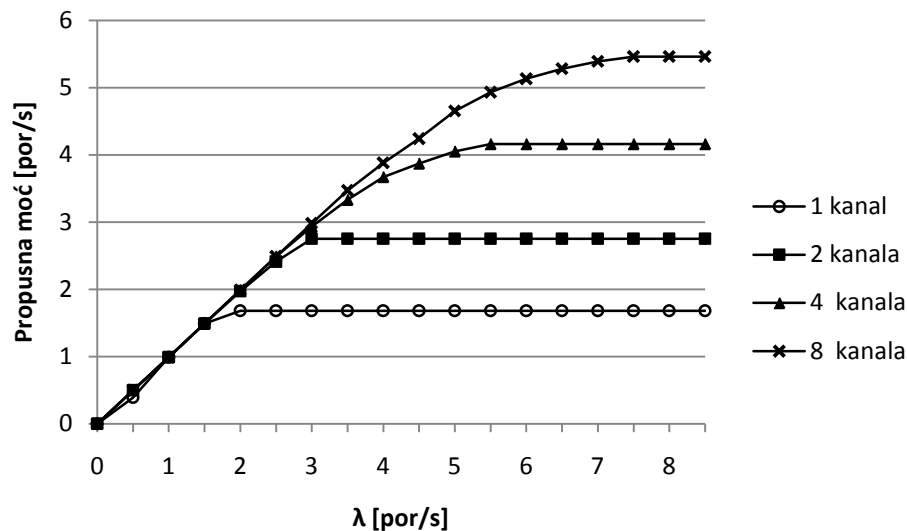
slot koriste za prijem. Ukoliko takva poruka postoji, EP je izbacuje iz bafera i prosleđuje određivom čvoru. Pretpostavka prilikom simulacije je da je predajni bafer neograničenog kapaciteta.



Slika 6.14 Pojednostavljeni simulacioni model senzorskog čvora.

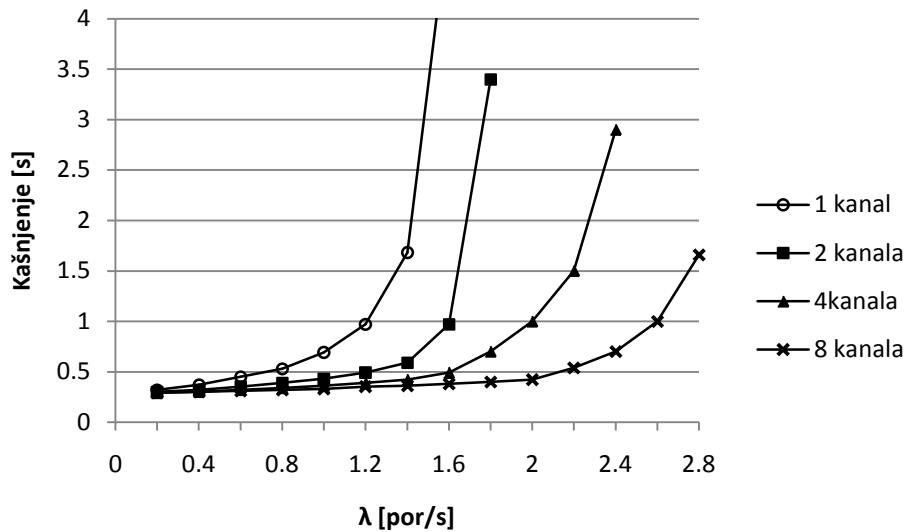
U prvom eksperimentu (Slika 6.15 prikazuje rezultate ovog eksperimenta), utvrđena je zavisnost između komunikacionog opterećenja čvora (λ) i propusne moći za različiti broj raspoloživih kanala. Propusna moć je definisana kao količnik prosečnog broja primljenih poruka po čvoru i ukupnog vremena simulacije, odnosno ukazuje na prosečan broj poruka koje čvor primi u jednoj sekundi. U simulacijama je korišćena mreža gustine 6, sa podešavanjima ostalih parametara na osnovu rezultata dobijenih simulacijom režima inicijalizacije ($N=16$). Moguće je primetiti da je propusna moć veća kada se koristi veći broj kanala, ali i da u nekom trenutku, zavisnom od broja kanala, dostiže zasićenje, tj. maksimalni broj poruka koji je moguće poslati u sekundi. U karakteristici zavisnosti propusne moći od komunikacionog opterećenja uočavaju se tri oblasti: linearna, prelazna i oblast zasićenja. Pri niskom nivou komunikacionog opterećenja (linearna oblast) protokol uspeva da prenese sve generisane poruke, tj. propusna moć je jednaka komunikacionom opterećenju. S porastom komunikacionog opterećenja dolazi do postepenog iscrpljivanja raspoloživog komunikacionog kapaciteta, što ima za posledicu zaostajanje propusne moći za komunikacionim opterećenjem (prelazna oblast). S daljim povećanjem komunikacionog opterećenja, karakteristika ulazi u oblast zasićenje - celokupan komunikacioni kapacitet se koristi za prenos poruka, a višak generisanih poruka se nagomilava u predajnom baferu. Iznos propusne moći u zasićenju odgovara maksimalnoj propusnoj moći protokola. Kao što se može uočiti, dobitak ostvaren uvođenjem više kanala ogleda se u povećanju maksimalne propusne moći. Na primer, sa osam raspoloživih kanala, protokol uspeva da prenese u proseku 5.4 poruke u sekundi po čvoru, što predstavlja trostruko povećanje maksimalne propusne moći u odnosu na jednokanalni TFMAC. Takođe, treba uočiti da maksimalna propusna moć ne raste srazmerno sa povećanjem broja kanala. Tako, faktor povećanja maksimalne propusne moći u odnosu na jednokanalni TFMAC iznosi 1.5 za 2-kanalni, 2.3 za 4-kanalni i 3 za 8-kanalni TFMAC. Takođe, maksimalna propusna moć po jednom kanalu opada s povećanjem broja kanala, počev od 1.5 por/sek za jedan kanal, preko 1.4 por/sek za 2 kanala i 1.04 por/sek za 4 kanala, do 0.67 por/sek za 8 kanala. Sve ovo ukazuje da bi sa daljim povećanjem broja kanala (više od 8) povećanje maksimalne propusne moći bilo minimalno. Razlog za ovu pojavu leži u činjenici da tokom jednog frejma čvor može da

pošalje najviše onoliko poruka koliko ima neposrednih suseda pod uslovom da svaki od njih koristi različiti prijemni kanal.



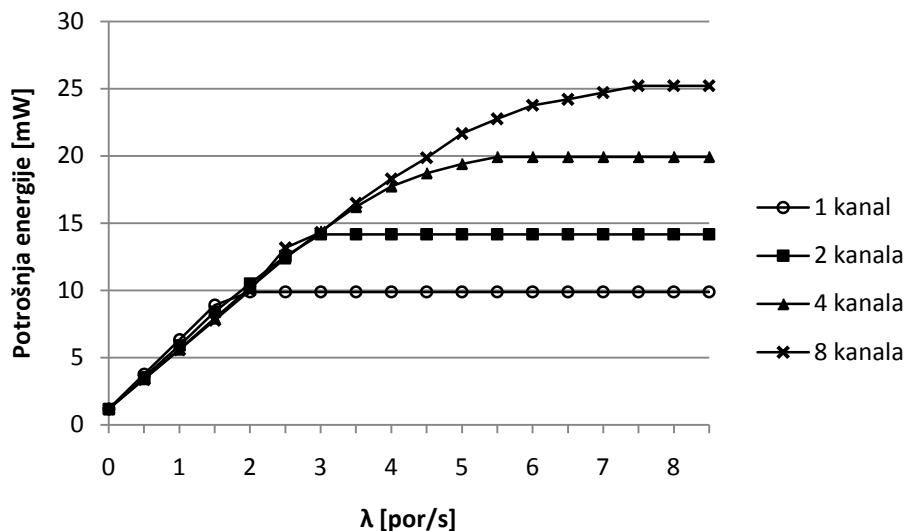
Slika 6.15 Propusna moć mreže u zavisnosti od komunikacionog opterećenja (λ), za različiti broj kanala.

U drugom eksperimentu sprovedena je analiza kašnjenja poruka u zavisnosti od komunikacionog opterećenja. Kašnjenje poruke je definisano kao vreme, u sekundama, od momenta generisanja poruke u izvornom čvoru do momenta pristizanja poruke u određeni čvor. Slika 6.16 prikazuje prosečno kašnjenje svih poruka koje su prenesene u mreži tokom simulacije u zavisnosti od komunikacionog opterećenja za različiti broj kanala. Kao i u prethodnom eksperimentu, korišćena je mreža gustine $d=6$, a broj slotova u frejmu je 16. Pri malom komunikacionom opterećenju (koje odgovara linearnoj oblasti u karakteristici sa Slika 6.16), vreme zadržavanja poruka u predajnom baferu je kratko. Tipično, u momentu generisanja poruke, predajni bafer je prazan, a poruka ostaje u baferu samo do nailaska odgovarajućeg predajnog slota, što traje, u proseku, polovinu trajanja frejma. Sa povećanjem komunikacionog opterećenja, javljaju se situacije kada je u predajnom baferu prisutno više poruka koje konkurišu za prenos u istom slotu. Prosečno kašnjenje raste, jer samo jedna od ovih poruka može biti preneti u jednom frejmu. Za komunikaciono opterećenje koje odgovara početku oblasti zasićenja u karakteristici propusne moći (Slika 6.15), prosečno kašnjenje poruka se naglo povećava. Za ovu vrednost parametra λ , prosečna brzina generisanja poruka postaje veća od brzine kojom mreža može da propušta poruke, što dovodi do konstantnog nagomilavanja poruka u predajnom baferu. U ovim uslovima, prosečno kašnjenje više nije relevantna mera, jer zavisi od trajanja simulacije, postajući sve veće kako simulacija duže traje. Sa slike se može uočiti da sa uvođenjem više kanala prosečno kašnjenje smanjuje u linearnoj oblasti i da se povećava vrednost komunikacionog opterećenja pri kojoj dolazi do naglog povećanja kašnjenja. Na primer, za $\lambda=0.8$ poruka/s, kad se broj kanala poveća sa 1 na 8, prosečno kašnjenje se smanji sa 0.53 s na 0.32 s. Takođe, pri povećanju broja kanala sa 1 na 8, kritična vrednost komunikacionog opterećenja se povećava sa 1.5 por/sek na 2.8 por/s. Ovi podaci mogu da se koriste prilikom izbora parametara mreže (broja kanala) u zavisnosti od predviđene upotrebe, odnosno očekivane gustine saobraćaja.



Slika 6.16 Kašnjenje poruka u zavisnosti od komunikacionog opterećenja (λ), za različiti broj kanala.

Slika 6.17 daje potrošnju energije po čvoru za iste uslove simulacije koji su važili prilikom procene propusne moći i kašnjenja. Oblik ove karakteristike je sličan obliku zavisnosti propusne moći od komunikacionog opterećenja. To je iz razloga što najveći deo utroška energije otpada na emitovanje i prijem poruka. Pri radu sa većim brojem kanala potrošnja energije je veća zato što je ukupan broj prenetih poruka veći nego kad se prenos obavlja na manjem broju kanala.

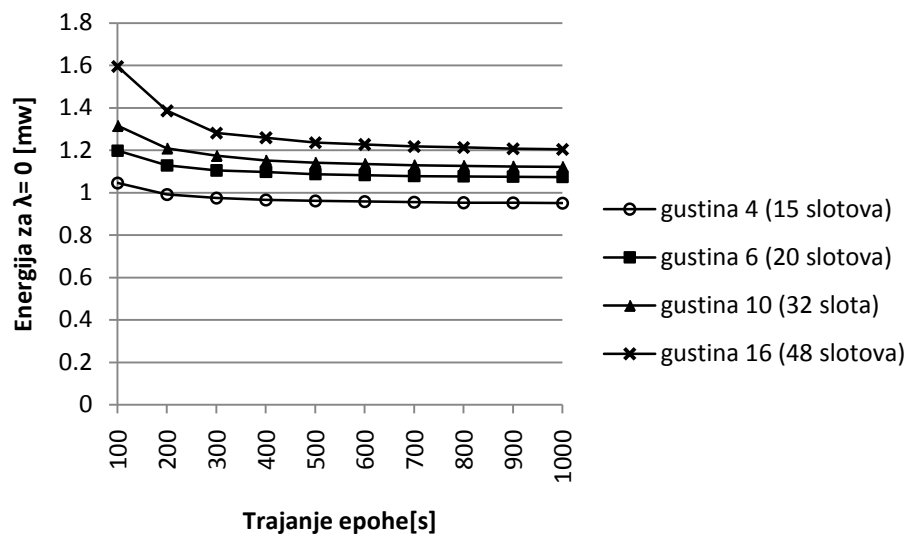


Slika 6.17 Potrošnja energije u zavisnosti od komunikacionog opterećenja, za različiti broj kanala.

Sa slike se, takođe, uočava da čvorovi troše izvesnu količinu energije i kad ne razmenjuju poruke. Potrošnja energije pri nultom komunikacionom opterećenju je bitna karakteristika komunikacionog protokola jer bežične senzorske mreže, po pravilu, najveći deo vremena provode u režimu smanjenog saobraćaja, a tek povremeno se intenzitet saobraćaja naglo povećava. Kod protokola TFMAC, potrošnja energije u odsustvu mrežnog saobraćaja potiče od obaveze čvora da: (a) osluškuje predajne slotove svojih suseda i (b) razmenjuje komandne poruke sa susedima. Shodno TDMA rasporedu, za prijem poruka od

svakog suseda, predviđen je jedan slot u frejmu. Čvor se "budi" na početku svakog takvog slota i postavlja svoj primopredajnik u režim prijema. Ukoliko za izvesno kreće vreme (vreme osluškivanja – videti

Tabela 5) ne detektuje signal, čvor odustaje od daljeg čekanja i vraća se u režim smanjenje potrošnje. Broj ovakvih osluškivanja kanala tokom jednog frejma jednak je broju neposrednih suseda. To znači da će u mreži veće gustine, potrošnja energije u odsustvu mrežnog saobraćaja biti veća. Uporedo sa razmenom poruka podataka, koja se obavlja tokom frejma, čvor je u obavezi da emituje i prima komandne poruke. Za razmenu komandnih poruka predviđen je jedan slot na početku svakog superfrejma u epohi (videti sekciju 5.4.). Deo ukupne potrošnje energije koji otpada na komandne poruke zavisi od trajanja epohe i gustine mreže s obzirom da tokom epohe čvor jedanput emituje svoju komandnu poruku i prima po jednu komandnu poruku od svakog suseda. Trajanje epohe zavisi od zahtevanog nivoa vremenske sinhronizacije čvorova. Slika 6.18 prikazuje zavisnost potrošnje energije po jednom čvoru koja se troši pri nultom komunikacionom opterećenju od dužine trajanja epohe za različite gustine mreže. Sa slike može da se uoči da potrošnja zbog razmene komandnih poruka značajnije utiče na ukupnu potrošnju u odsustvu mrežnog saobraćaja samo za relativno male vrednosti trajanje epohe (manje od 200 s) i u mreži veće gustine. Dominantan udeo u potrošnji energije uzima potrošnja usled osluškivanja prijemnih slotova. U zavisnosti od gustine mreže, ova potrošnja se kreće od 0.8 mW u mreži male gustine ($d=4$), pa do 1.2 mW, u mreži velike gustine ($d=16$).



Slika 6.18 Potrošnja energije pri nultom komunikacionom opterećenju, za različite gustine mreže.

7. ZAKLJUČAK

Ova magistarska teza je inspirisana intenzivnim istraživanjima u oblasti MAC protokola za bežične senzorske mreže. Potreba za dugim vremenom života senzorske mreže postavlja kao imperativ potrebu za energetsom efikasnošću MAC protokola, koji minimizuje potrošnju radio primopredajnika.

U tezi su, pre svega, predstavljene bežične senzorske mreže i senzorski čvorovi. Nabrojane su potencijalne oblasti primene bežičnih senzorskih mreža i opisana je arhitektura senzorskog čvora, sa posebnim akcentom na radio primopredajnik, koji je najveći potrošač energije u senzorskom čvoru. Takođe je opisana i komunikaciona arhitektura bežične senzorske mreže.

Pošto je MAC sloj komunikacione arhitekture zadužen za pristup medijumu i omogućava smanjenje potrošnje radioprimopredajnika, teza daje analizu MAC protokola za bežične senzorske mreže. Prilikom projektovanja MAC protokola je nemoguće ispoštovati sve zahteve, kao što su energetska efikasnost, skalabilnost, adaptabilnost, predvidljivo kašnjenje, pouzdanost, propusna moć, tako da je potrebno vršiti ustupke. Postojeći MAC protokoli za bežične senzorske mreže su klasifikovani na protokole za zajedničkim aktivnim periodom, protokole sa vremenskim rasporedom, protokole sa semplovanjem preambule i hibridne protokole. Pored karakteristika za svaku glupu protokola opisani su i glavni predstavnici.

Glavni zahtev pri projektovanju MAC protokola za bežične senzorske mreže, energetska efikasnost, uzrokuje smanjenje propusne moći i povećanje kašnjenja. Pošto postojeći radio primopredajnici koji se koriste kod bežičnih senzorskih mreža poseduju mogućnost rada na više kanala, upotreba više kanala za komunikaciju kod bežičnih senzorskih mreža se pokazala kao dobar način za povećanje propusne moći i smanjenje latencije saobraćaja u bežičnim senzorskim mrežama, uz očuvanje energetske efikasnosti kao primarnog zahteva. Zbog toga se u skorije vreme pojavila grupa MAC protokola koji koriste višekanalnu komunikaciju: višekanalni MAC protokoli za bežične senzorske mreže. U tezi je dat pregled ovih protokola: pre svega, razloga za njihovo uvođenje, problema koje njihovo uvođenje donosi, i novih zahteva koji se postavljaju prilikom njihovog projektovanja. U tezi je uvedena podela višekanalnih MAC protokola na: višekanalne MAC protokole sa vremenskim rasporedom, višekanalne MAC protokole sa zajedničkim aktivnim periodom i hibridne višekanalne MAC protokole i opisane su prednosti i mane postojećih višekanalnih MAC protokola za bežične senzorske mreže.

Glavni doprinos teze je novi višekanalni MAC protokol za bežične senzorske mreže: TFMAC. TFMAC pripada grupi višekanalnih MAC protokola sa vremenskim rasporedom. Cilj projektovanja TFMAC protokola je bio da se poveća propusna moć mreže korišćenjem višekanalne komunikacije uz minimalno povećanje potrošnje energije. Predloženi protokol je zasnovan na distribuiranom algoritmu za dodelu parova kanal/slot kojim se izbegavaju kolizije i parovi ravnomerno raspoređuju među čvorovima. Protokol podrazumeva samokonfiguraciju, tj. mreža sama uspostavlja raspored pristupa i omogućava pristup novih čvorova u toku rada mreže.

Protokol TFMAC predviđa da mreža, u toku svog životnog veka prolazi kroz tri režima rada: neaktivan režim, režim inicijalizacije i aktivan režim. Predloženi protokol omogućava samokonfiguraciju mreže u režimu inicijalizacije. U toku aktivnog rada,

TFMAC, osim prenosa podataka, obezbeđuje sinhronizaciju čvorova, dodavanje novih čvorova i izbacivanje čvorova koji su otkazali uz odgovarajuće automatske korekcije u vremenskom rasporedu.

Simulacijom rada TFMAC u namenski razvijenom simulatoru bežičnih senzorskih mreža dobijeni su rezultati, koji su takođe predstavljeni u ovoj tezi. Pre svega, simulacijom rada se došlo do vrednosti parametara potrebnih za period inicijalizacije mreže, tj. do potrebnih vremena trajanja pojedinih faza režima inicijalizacije, i minimalnog broja slotova u frejmu potrebnih za pravilnu konfiguraciju mreže date gustine. Utvrđeno je da je za samokonfiguraciju mreže gustine 6, potrebno skoro 80 s. Simulacije pokazuju da vreme inicijalizacije u najvećoj meri zavisi od gustine mreže, tako da za mrežu gustine 16 prelazi 400 s. Iako je vreme trajanja inicijalizacije relativno dugo, inicijalizacija se obavlja samo jedanput, na početku životnog veka mreže, pa se povećana potrošnja energije u ovoj fazi kompenzuje dugim životnim vekom mreže. Simulacijom rada mreže u aktivnom režimu dobijeni su rezultati koji pokazuju poboljšanje performansi rada mreže sa povećanjem broja kanala, u smislu povećanja propusne moći i smanjenje kašnjenja, uz minimalno smanjenje energetske efikasnosti. Utvrđeno je da je u slučaju upotrebe dva kanala maksimalna propusna moć u mreži gustine 6 1.64 puta veća od maksimalne propusnosti pri jednokanalnoj komunikaciji, dok u slučaju upotrebe četiri kanala faktor poboljšanja iznosi 2.48, a u slučaju upotrebe 8 kanala čak 3.25. Simulacije pokazuju da se poboljšanje performansi uočava do određenog graničnog broja kanal, nakon koga se sa povećanjem broja kanala postižu samo minimalna poboljšanja. Ovaj granični broj kanala zavisi od gustine mreže, tako da za mreže srednje gustine (tj. gustine od 6 - 12) ne prelazi 10 kanala. Ovi rezultati pokazuju da se optimalne performanse TFMAC protokola u mrežama srednje gustine mogu postići upotrebom standardnih višekanalnih radio primopredajnika (kod kojih se broj ortogonalnih kanala kreće između 8 i 16).

Višekanalni MAC protokoli su aktivna oblast istraživanja na polju bežičnih senzorskih mreža. Protokol predstavljen u ovoj tezi, zajedno sa nekolicinom protokola dostupnih u literaturi, predstavljaju početne rezultate u ovoj oblasti i potvrđuju opravdanost uvođenja višekanalne komunikacije kod bežičnih senzorskih mreža. Osnovni nedostatak višekanalnih protokola, uključujući i TFMAC, jeste u izvesnom povećanju potrošnje energije pri nultom komunikacionom opterećenju, zbog potrebe osluškivanja više kanala i/ili učestale promene kanala. S tim u vezi, kao jedan od pravaca daljeg razvoja protokola TFMAC nameće se usavršavanje mehanizma za osluškivanje kanala, radi smanjenja vremena pasivnog slušanja na počecima vremenskih slotova. Takođe, u planu je razvoj hibridne varijante protokola TFMAC u kojoj bi se vremenski slotovi dodeljivati prijemnicima, a ne predajnicima. Time bi broj osluškivanja biti smanjen, jer umesto da osluškuje slot svakog suseda, čvor bi osluškivao samo u svojim slotovima (čiji je broj jednak broju raspoloživih kanala).

U planu je, takođe, implementacija protokola u senzorskom čvoru standardnih hardverskih karakteristika. U tom cilju biće neophodno: (a) izabrati adekvatan algoritam za sinhronizaciju čvorova s obzirom da TFMAC ne definiše algoritam za sinhronizaciju već samo rezerviše vremenske intervale za prenos sinhronizacionih poruka između čvorova, (b) izvršiti optimizaciju protokola u smislu memorijskog zauzeća.

8. LITERATURA

- [1] I.F. Akyldiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, “Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Computer Networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [2] G.J. Pottie and W.J. Kaiser, “Wireless Integrated Network Sensors“, *Communications of the ACM*, Vol. 43, No. 5, pp. 51-58, May 2000.
- [3] H. Karl and A. Willig, “*Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*“, John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, England, 2005.
- [4] Demirkol, C. Ersoy, F. Alagoz, “Mac Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, No. 4, pp. 115-121, 2006.
- [5] K. Langendoen and G. Halkes, “Energy-Efficient Medium Access Control”, *Embedded Systems Handbook*, R. Zurawski, ed., CRC press, pp. 34.1-34.29, 2005.
- [6] IEEE 802.11 Working Group, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, 1997.
- [7] “CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver“, available at <http://www.chipcon.com/>
- [8] “CC1100 Low-Power Sub- 1 GHz RF Transceiver“, available at <http://www.ti.com>
- [9] A. El-Hoiydi. “Aloha with Preamble Sampling for Sporadic Traffic in Ad Hoc Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE ICC*, New York, April 2002.
- [10] A. El-Hoiydi, J-D. Decotignie, C. Enz, E. Le Roux, “Poster Abstract: WiseMac, an Ultra Low Power MAC Protocol for the WiseNET Wireless Sensor Networks”, In *proceedings of ACM SenSys*, pp 302–303, Los Angeles, CA, November 2003.
- [11] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE Infocom*, pp. 1567–1576, New York, NY, July 2002.
- [12] T. van Dam and K. Langendoen, “An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of ACM Sensys*, pp. 171–180, Los Angeles, CA, November 2003.
- [13] G. Lu, B. Krishnamachari and C. Raghavendra, “An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Sensor Networks”, In *Proceedings of the WMAN*, Santa Fe, NM, April 2004.
- [14] IEEE 802.15.4., “*Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*”, 2003.
- [15] L. van Hoesel, P. Havinga, “A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks: Reducing Preamble Transmissions and Transceiver State Switches”, In *Proceedings of International Conference on Networked Sensing Systems*, Tokyo, Japan 2004.
- [16] G. Zhou, C. Huang, T. Yan, T. He, J. Stankovic and T. Abdelzaher, “MMSN: Multi-Frequency Media Access Control for Wireless Sensor Networks”, In *IEEE Infocom*, April 2006.

- [17] M.B.Dydensborg, “*Connection Oriented Sensor networks*”, PhD thesis, Department of Computer Science, University of Copenhagen, Denmark, December 2004.
- [18] Holger Karl and Andreas Willig, “*Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*”, Wiley, 2005
- [19] D. Snoonian, “Smart Buildings”, *IEEE Spectrum*, vol 40, No. 8, pp. 18–23, 2003.
- [20] Nordic semi-conductors, “*NRF905 multiband transceiver*”, available at <http://www.nordicsemi.com>.
- [21] “*TRC103 - 868-960 MHz Transceiver*”, available at <http://www.rfm.com/>
- [22] “*TDA5250 - ASK/FSK 868MHz Wireless Transceiver*”, available at www.infineon.com
- [23] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*., pp.102-114, August 2002.
- [24] A. Doufexi, S. Armor, M. Butler, A. Nix, D. Bull, and J. McGeehan, “A Comparison of the HIPER-LAN2 and IEEE 802.11a Wireless LAN Standards”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, No. 5, pp. 172-180, 2002.
- [25] W. B. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, “An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Networking*, vol. 1, No. 4, pp. 660-670, 2002
- [26] N. Abramson, “The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications”, in *Proceedings Fall Joint Computer Conference*, Vol. 37, pp. 281-285, AFIPS Press, 1970.
- [27] L. G. Roberts, “Aloha packet system with and without slots and capture”, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 5, no. 2, pp. 28–42, 1975.
- [28] Abdelmalik Bachir et al., “MAC Essentials for Wireless Sensor Networks”, Accepted, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Second issue 2010.
- [29] K. Arisha, M. Youssef and M. Younis, “Energy-Aware TDMA-Based MAC for Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE IMPACCT*, New York City, NY, May 2002.
- [30] S. Coleri-Ergen and P. Varaiya, “PEDAMACS: Power Efficient and Delay Aware Medium Access Protocol for Sensor Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, No. 7, pp. 920–930, 2006.
- [31] M. Ringwald and K. Roemer, “BitMAC: A Deterministic, Collision-Free, and Robust MAC Protocol for Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE EWSN*, 2005.
- [32] M. Brownfield, K. Mehrjoo, A. Fayed, and N. Davis IV, “Wireless Sensor Network Energy-Adaptive MAC Protocol”, In *Proceedings of IEEE CCNC*, 2006.
- [33] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of ACM Sensys*, pp. 181–92, Los Angeles, CA, November 2003.
- [34] V. Rajendran, J. J. Garcia-Luna-Aceves, and K. Obraczka, “Energy-Efficient, Application-Aware Medium Access for Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE MASS*, 2005.

- [35] A. Barroso, U. Roedig, and C. Sreenan, “uMAC: an energy-efficient medium access control for wireless sensor networks”, In *Proceedings of IEEE EWSN*, 2005.
- [36] L. van Hoesel, P. Havinga, “Advantages of a TDMA based, energy-efficient, selforganizing MAC protocol for WSNs”, In *Proceedings of IEEE VTC*, 2004.
- [37] P. Cheong and I. Oppermann, “An Energy-Efficient Positioning-Enabled MAC Protocol (PMAC) for UWB Sensor Networks”, In *Proceedings of EURASIP IST*, Dresden, Germany 2005.
- [38] G. Pei and C. Chien, “Low Power TDMA in Large Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE MILCOM*, 2001.
- [39] J. Li and G. Lazarou, “A bit-map-assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor networks”, In *Proceedings of IEEE IPSN*, 2004.
- [40] M. Ali, T. Suleman and Z. Uzmi, “MMAC: A Mobility-Adaptive, Collision-Free MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE IPCCC*, 2005.
- [41] W. Lee, A. Datta, and R. Cardell-Oliver, “FlexiMAC: A flexible TDMA-based MAC protocol for fault-tolerant and energy-efficient wireless sensor networks”, In *Proceedings of IEEE ICON*, Singapore, September 2006.
- [42] T. Zheng, S. Radhakrishnan and V. Sarangan, “PMAC: an adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”, In *Proceedings of IPDPS*, April 2005.
- [43] H. Cao, K. Parker, and A. Arora, “O-MAC: A Receiver Centric Power Management Protocol”, In *Proceedings of IEEE ICNP*, Santa Barbara, CA, November 2006.
- [44] S. Chatterjea, L. van Hoesel, P. Havinga, “AI-LMAC: An Adaptive, Informationcentric and Lightweight MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE ISSNIP*, 2004.
- [45] S. Kulkarni and M. Arumugam, “SS-TDMA: A self-stabilizing MAC for sensor networks”, *Sensor network operations*, IEEE press edition, 2006.
- [46] S. Datta, “RMAC: a randomized adaptive access control algorithm for sensor networks”, In *Proceedings of SANPA*, Boston, MA, August 2006.
- [47] P. Havinga and G. Smit, “E2MaC: an energy efficient MAC protocol for multimedia traffic”, Technical Report, University of Twente, Netherlands, 1998.
- [48] J. Son J. Pak and K. Han, “A MAC Protocol Using Separate Wakeup Slots for Sensor Network”, In *Proceedings of ICCSA*, pp. 1159–1168, Glasgow, UK, May 2006.
- [49] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, “Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks”. *IEEE Trans. on Networking*, vol. 12, No. 3, pp. 493–506, June 2004.
- [50] P. Mahonen J. Haapola J. Ansari, J. Riihijarvi, “Implementation and Performance Evaluation of nanoMAC: A Low-Power MAC Solution for High Density Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE ICC*, Istanbul, Turkey, June 2006.

- [51] P. Lin, C. Qiao and X. Wang, “Medium Access Control with a Dynamic Duty Cycle for Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE WCNC*, Atlanta, GA, March 2004.
- [52] Y. Li, W. Ye, and J. Heidemann, “Energy and Latency Control in Low Duty Cycle MAC Protocols”, In *Proceedings of IEEE WCNC*, New Orleans, LA, March 2005.
- [53] N. Vasanthi and S. Annadurai, “Energy Efficient Sleep Schedule for Achieving Minimum Latency in Query based Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE SUTC*, 2006.
- [54] Huan Pham and Sanjay Jha, “An Adaptive Mobility-Aware MAC Protocol for Sensor Networks (MS-MAC)”, In *Proceedings of IEEE MASS*, pp. 588–60, Fort Lauderdale, FL, October 2004.
- [55] Z. Liu, I. Elhanany, “RL-MAC: a reinforcement learning based MAC protocol for wireless sensor networks”, *InderScience International Journal of Sensor Networks*, vol. 1, No. ¾, pp. 117–124, 2006.
- [56] S-H. Yang H-W. Tseng, E. Wu, and G-H. Chen, “Utilization based duty cycle tuning MAC protocol for wireless sensor networks”, In *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, 2005.
- [57] R. Biswas, V. Jain, C. Ghosh, and D. Agrawal, “On-Demand Reliable Medium Access in Sensor Networks”, In *proceedings of IEEE WoWMoM*, Buffalo, NY, June 2006.
- [58] V. Jain, R. Biswas and D. Agrawal, “Energy Efficient and Reliable Medium Access for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE WoWMoM*, Helsinki, Finland, June 2007.
- [59] J. Hill and D. Culler, “Mica: a wireless platform for deeply embedded systems”, *IEEE Micro*, vol. 22, No. 6, 2002.
- [60] E-Y. Lin, J. Rabaey, A. Wolisz, “Power-Efficient Rendez-vous Schemes for Dense Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE ICC, Paris*, France, June 2004.
- [61] J. Polastre, J. Hill and D. Culler, “Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of ACM SenSys*, 2004.
- [62] W. Ye, F. Silva and J. Heidemann, “Ultra-Low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling”, In *Proceedings of ACM SenSys*, Boulder, CO, November 2006.
- [63] R. Jurdak, P. Baldi, and C. V. Lopes, “Energy-Aware Adaptive Low Power Listening for Sensor Networks”. In *Proceedings of INSS*, pp. 24–29, San Diego, CA, June 2005.
- [64] S. Mahlknecht and M. Boeck, “CSMA-MPS: A Minimum Preamble Sampling MAC Protocol for Low Power Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE Workshop on Factory Communication Systems*, Vienna, Austria, September 2004.
- [65] M. Buettner et al, “X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol For Duty-Cycled Wireless Networks”, In *Proceedings of ACM SenSys*, Boulder, CO, November 2006.
- [66] M. Pereira M. Macedo P. Pinto L. Bernardo, R. Oliveira, “A Wireless Sensor MAC Protocol for Bursty Data Traffic”, In *Proceedings of IEEE PIMRC*, Athens, Greece, September 2007.

- [67] F. N-Abdesselam H. Wang, X. Zhang and A. Khokhar, “DPS-MAC: An Asynchronous MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of HIPC*, Goa, India, December 2007.
- [68] S. Liu, K-W. Fan, and P. Sinha, “CMAC: An Energy Efficient MAC Layer Protocol Using Convergent Packet Forwarding for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE SECON*, San Diego, CA, June 2007.
- [69] M. Zorzi and R. Rao, “Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Energy and Latency Performance”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, No. 4, pp. 349–365, 2003.
- [70] T. Watteyne et al, “1-hopMAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Avoiding 1- hop Neighborhood Knowledge”, In *Proceedings of IWWAN*, New York, NY, June 2006.
- [71] K.J. Wong, D. Arvind, “Speckmac: Low-power decentralized MAC protocol low data rate transmissions in Specknets,” *IEEE Int. Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: from Theory to Reality (REALMAN’06)*, May 2006.
- [72] C. J. Merlin, W. B. Heinzelman, “Network-aware adaptation of MAC scheduling for Wireless Sensor Networks,” *Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS’07 Poster Session)*, June 2007.
- [73] M. Miller and N. Vaidya, “A MAC Protocol to Reduce Sensor Network Energy Consumption Using a Wakeup Radio”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 4, No. 3, pp. 228–242, May/June 2005.
- [74] X. Shi, and G. Stromberg, “SyncWUF: An Ultra Low-Power MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, No. 1, pp. 115-125, January 2007.
- [75] C. Schurgers et al, “Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 1, No. 1, pp. 70–80, January-March 2002.
- [76] A. Bachir, D. Barthel, M. Heusse and A. Duda, “Micro-Frame Preamble MAC for Multihop Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of IEEE ICC*, Istanbul, Turkey, June 2006.
- [77] A. Silberstein R. Braynard and C. Ellis, “Extending Network Lifetime Using an Automatically Tuned Energy-Aware MAC Protocol”, In *Proceedings of EWSN*, 2006.
- [78] I. Rhee et al, “Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks”, In *Proceedings of ACM SenSys*, San Diego, CA, November 2005.
- [79] G-S. Ahn, E. Miluzzo, A. Campbell, S. Hong, and F. Cuomo, “Funneling-MAC: A Localized, Sink Oriented MAC for Boosting Fidelity in Sensor Networks”, In *Proceedings of ACM Sensys*, pp. 293-306, Boulder, Colorado, November 2006
- [80] G. Halkes and K. Langendoen, “Crankshaft: An Energy-Efficient MAC-Protocol For Dense Wireless Sensor Networks“, In *Proceedings of EWSN*, 2007.
- [81] J. So and N. Vaidya, “Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver”, In *Proc. ACM MobiHoc*, Tokyo, Japan, May 2004.

- [82] J. Shi, T. Salonidis, and E. Knightly, “Starvation Mitigation through Multi-Channel Coordination in CSMA Multi-Hop Wireless Networks,” In *Proc. ACM MobiHoc*, 2006.
- [83] N. Jain, S. Das, A. Nasipuri, “A multichannel csma mac protocol with receiver-based channel selection for multihop wireless networks”, in: *IC3N '01: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 432–439, 2001.
- [84] J. Li, Z. Haas, M. Sheng, Y. Chen, “Performance evaluation of modified ieee 802.11 mac for multi-channel multi-hop ad hoc network”, in: *AINA 2003: Proceedings of the 17th International Conference on Advanced Information Networking and Application,s* pp. 312–317, 2003.
- [85] J. So, N.H. Vaidya, “Multi-channel mac for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver”, in: *MobiHoc '04: Proceedings of the 5th ACM International MobiHoc '04: Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 222–233, 2004.
- [86] J. Chen, S. Sheu, C. Yang, “A new multichannel access protocol for ieee 802.11 ad hoc wireless lans”, in: *PIMRC' 03: Proceedings of the 14th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, pp.2291–2296, 2003.
- [87] J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S. Son, J. Stankovic, “Tmmac: an energy efficient multi-channel mac protocol for ad hoc networks”, in: *ICC multi-channel mac protocol for ad hoc networks*, in: *ICC'07: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, pp. 3554–3561, 2007.
- [88] Tzamaloukas, J. Garcia-Luna-Aceves, “Channel-hopping multiple access”, in: *ICC '00: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, pp. 415–419, 2000.
- [89] P. Bahl, R. Chandra, J. Dunagan, “Ssch: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in ieee 802.11 ad-hoc wireless networks”, in: *MobiCom '04: Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 216–230, 2004.
- [90] H. W. So, et. al, “Practical Synchronization Techniques for Multi-Channel MAC”, *ACM MobiCom '06*, September 2006.
- [91] A. Raniwala, T. Chiueh, “Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network”, in: *INFOCOM'05: Proceedings of the 24th IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 2223–2234, vol. 3, 2005
- [92] Z. Tang, J.J. Garcia-Luna-Aceves, “Hop reservation multiple access (hrma) for ad-hoc networks”, in: *INFOCOM '99: Proceedings of the 18th IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 194–201, 1999.
- [93] A. Tzamaloukas, J. Garcia-Luna-Aceves, “Channel-hopping multiple access”, in: *ICC '00: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, pp. 415–419, 2000.
- [94] S. Dulman O. Incel and P. Jansen, “Multi-channel Support for Dense Wireless Sensor Networking”, In *Proceedings of EuroSSC*, 2006.

- [95] Hari Balakrishnan et al, “The distance-2 matching problem and its relationship to the mac-layer capacity of ad hoc wireless networks,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 22, No. 6, pp. 1069-1079, August 2004.
- [96] J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S.H. Son, and J.A. Stankovic, “Tmmac: An energy efficient multi-channel mac protocol for ad hoc networks”, In *ICC '07: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, pp. 3554–3561, June 2007.
- [97] S. Aastooreh, S. Hamed, K. Antonis, “HyMAC: Hybrid TDMA/FDMA Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks”, in: *PIMRC' 07: Proceedings of the 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1-5, 2007
- [98] T. Cormen, C. Stein, R. Rivest, C. Leiserson, “*Introduction to Algorithms*”, McGraw-Hill Higher Education, 2001
- [99] Y. Kim, H. Shin, and H. Cha, “Y-mac: An energy-efficient multi-channel mac protocol for dense wireless sensor networks,” in *Proceedings of IPSN '08*, pp. 53–63, April 2008.
- [100] M. Ramakrishnan et. All, “MULTI CHANNEL MAC FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS”, *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, Vol.1, No.2, July 2009
- [101] Y. Wu, J. Stankovic, and T. He, “Realistic and Efficient Multi-Channel Communications in Dense Wireless Sensor Networks”, *INFOCOM*, April 2008.
- [102] M. D. Jovanovic, G. Lj. Djordjevic, “TFMAC: Multi-channel MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, in *Proc. of 8-th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, pp. 23-26, Nis, Serbia, September 2007.



Универзитет у Нишу
Универзитетска библиотека

Овај текст је део Дигиталног репозиторијума, јавно је доступан, и може се слободно користити за личне потребе, у образовне и научне сврхе. Ако користите текст, наведите извор.

Комерцијална употреба текста није дозвољена.

University of Niš
University Library

This text is a part of the Digital repository of public domain. Permission is granted for personal, educational and scientific use. If you do use the document, indicate the source.

No permission is granted for commercial use.

