



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Milica D. Jovanović

RAZREŠAVANJE KOMUNIKACIONIH KONFLIKATA U BEŽIČNIM SENZORSKIM MREŽAMA PRIMENOM RF TONOVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Tekst ove doktorske disertacije stavlja se na uvid javnosti, u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju ("Sl. glasnik RS", br. 76/2005, 100/2007 – autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010, 93/2012, 89/2013 i 99/2014)

NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:

Ovaj tekst smatra se rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim i srodnim pravima, "Sl. glasnik RS", BR. 104/2009, 99/2011 i 119/2012).

Nijedan deo ove doktorske disertacije ne sme se koristiti ni u kakve svrhe, osim za upoznavanje sa njenim sadržajem pre odbrane disertacije.

Niš, 2016



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Milica D. Jovanović

**TONE-BASED CONTENTION RESOLUTION
MECHANISM FOR WIRELESS SENSOR
NETWORKS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2016

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: dr Goran Lj. Đorđević, redovni profesor, Elektronski fakultet Niš, Univerzitet u Nišu

Naslov: Razrešavanje komunikacionih konflikata u bežičnim senzorskim mrežama primenom RF tonova

Rezime: Doktorskom disertacijom je obuhvaćena nova tehnika za razrešavanje komunikacionih konflikata u bežičnim senzorskim mrežama zasnovana na razmeni RF tonova između senzorskih čvorova. Originalnost predložene tehnike se ogleda u primeni novog algoritma za sukcesivnu eliminaciju senzorskih čvorova u procesu nadmetanja radi pristupa komunikacionom medijumu. Algoritam je zasnovan na binarnom odbrojavanju i garantuje komunikaciju bez kolizija uz minimalan broj emitovanih RF tonova. U poređenju sa poznatim tehnikama za razrešavanje komunikacionih konflikata, nova tehnika, nazvana TONE, pokazuje bolje performanse u smislu energetske efikasnosti i komunikacione propusnosti. Oblast primene TONE-a su MAC protokoli za kontrolu pristupa medijumu u bežičnim senzorskim mrežama. Predloženi TONE je primenjen u intraklasterskom MAC protokolu za zvezdaste topologije, gde pokazuje smanjenje prosečne potrošnje energije u toku perioda za nadmetanje od čak 44.5% u odnosu na postojeće mehanizme zasnovane na binarnom odbrojavanju. Predložena je i primena TONE-a kod TDMA MAC protokola sa rasporedom slotova za prijem, gde postiže istu propusnu moć kao TDMA protokoli sa rasporedom slotova za predaju, uz 3 puta manju potrošnju energije, i čak 4.5 puta manju potrošnju energije nego TDMA protokoli sa rasporedom slotova za prijem kod kojih se za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi standardni CSMA. Predložena je primena TONE-a i kod MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom. Upotreba TONE-a kod ovih protokola povećava normalizovanu propusnu moć za više od 100% u odnosu na postojeće MAC protokole sa zajedničkim aktivnim periodom, uz smanjenje potrošnje energije do čak 500%.

Naučna oblast: Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Naučna disciplina: Elektronika

Ključne reči: bežične senzorske mreže, kontrola pristupa medijumu, MAC protokoli, razrešavanje komunikacionih konflikata

UDK: (621.396+621.391):004.021

CERIF klasifikacija: T170

Tip licence
kreativne
zajednice:

CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral
Supervisor:

dr Goran Lj. Đorđević, full time professor, Faculty of Electronic Engineering, University of Niš

Title:

Tone-based contention resolution mechanism for wireless sensor networks

Abstract:

This doctoral dissertation comprises a novel contention resolution mechanism for wireless sensor networks, based on the exchange of short radio-frequency (RF) tones among sensor nodes. Originality of the proposed mechanism comes from the new algorithm for successive elimination of nodes during the contention resolution phase. The algorithm is based on binary countdown mechanism and guarantees collision-free communication with minimum number of RF tones transmitted. The proposed technique, called TONE, has better performances in terms of energy efficiency and communication throughput, compared to existing binary countdown based contention resolution mechanisms. The application area of the TONE are Medium Access Control (MAC) protocols for wireless sensor networks. In this dissertation, the proposed TONE is applied in intracluster MAC protocol for star topologies, where reduces the average energy consumption during contention period for up to 44.5% compared to the baseline countdown mechanism. When applied in receiver-driven TDMA MAC protocol, the proposed TONE achieves the same throughput as transmitter-driven TDMA MAC protocol with 3 times smaller energy consumption, and even 4.5 smaller energy consumption than receiver-driven TDMA MAC protocol with CSMA-based contention resolution mechanism. The proposed TONE is also applied in active period MAC protocols, where it increases normalized data throughput for more than 100% compared to existing active-tone MAC protocols, with reduction of energy consumption of up to 500%.

Scientific
Field:

Electrical and Computer Engineering

Scientific
Discipline:

Electronics

Key Words:

wireless sensor network, medium access control, MAC protocol, contention resolution

UDC:

(621.396+621.391):004.021

CERIF
Classification:

T170

Creative
Commons
License Type:

CC BY-NC-ND

Sadržaj

1.	UVOD.....	10
2.	BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE	18
2.1.	<i>Oblasti primene WSN.....</i>	<i>18</i>
2.2.	<i>Tipovi primena.....</i>	<i>21</i>
2.3.	<i>Zahtevi.....</i>	<i>22</i>
2.4.	<i>Osnovni principi.....</i>	<i>24</i>
2.5.	<i>Arhitektura senzorskog čvora</i>	<i>26</i>
2.6.	<i>RF primopredajnici.....</i>	<i>28</i>
2.7.	<i>Komunikaciona arhitektura WSN</i>	<i>31</i>
3.	MAC PROTOKOLI ZA WSN.....	34
3.1.	<i>Osnovi bežičnih MAC protokola.....</i>	<i>34</i>
3.2.	<i>Klasifikacija bežičnih MAC protokola.....</i>	<i>37</i>
3.2.1.	Protokoli sa fiksnom dodelom resursa.....	37
3.2.2.	Protokoli sa dodelom resursa na zahtev	38
3.2.3.	Protokoli sa proizvoljnim pristupom	39
3.3.	<i>MAC protokoli za WSN.....</i>	<i>43</i>
3.3.1.	Zahtevi pri dizajniranju MAC protokola za WSN.....	43
3.3.2.	Klasifikacija MAC protokola za WSN	46
3.3.3.	Protokoli sa semplovanjem preambule	47
3.3.4.	Protokoli zasnovani na zajedničkom aktivnom periodu	49
3.3.5.	Protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu	51
3.3.6.	Hibridni MAC protokoli	53
3.4.	<i>Razrešavanje komunikacionih konflikata upotrebom RF tonova</i>	<i>54</i>
3.4.1.	Ton zauzeća	54
3.4.2.	Ton zaglušenja	56
3.4.3.	Binarno odbrojavanje (BCD).....	56

4.	TONE – razrešavanje komunikacionih konflikata primenom RF tonova	59
4.1.	<i>Klasteri senzorskih čvorova</i>	59
4.2.	<i>Model sistema</i>	60
4.3.	<i>TONE – osnovni koncept</i>	61
4.4.	<i>Mehanizam za signalizaciju.....</i>	62
4.5.	<i>Algoritam podele grupa</i>	63
4.6.	<i>Funkcija podele grupa</i>	66
4.7.	<i>BM-BCD algoritam.....</i>	70
4.8.	<i>Simulacija rada algoritma za podelu grupa</i>	74
4.9.	<i>RF tonovi.....</i>	75
4.9.1.	Generisanje i detekcija RF tona	76
4.9.2.	Detekcija RF tona	80
4.10.	<i>Eksperimentalni rezultati analize RF tonova.....</i>	82
5.	Primena TONE u intraklasterskom MAC protokolu za zvezdaste topologije.....	86
5.1.	<i>Organizacija frejma</i>	86
5.2.	<i>Vremenska sinhronizacija i trajanje RF tona</i>	87
5.3.	<i>Brojevi za nadmetanje.....</i>	88
5.4.	<i>Parametri frejma.....</i>	88
5.5.	<i>Dužina perioda za nadmetanje i sinhronizaciona konstanta.....</i>	90
5.6.	<i>Rezultati simulacije rada STAR/TONE protokola</i>	91
5.6.1.	Konfiguracija klastera i parametara protokola.....	93
5.6.2.	PCO u uslovima periodičnog saobraćaja	93
5.6.3.	PCO u uslovima rafalnog saobraćaja	94
6.	Primena TONE kod TDMA MAC protokola.....	96
6.1.	<i>Model sistema</i>	96
6.2.	<i>Formiranje rasporeda slotova</i>	99
6.3.	<i>TDMA slot.....</i>	100
6.4.	<i>TD-TDMA protokoli.....</i>	101
6.5.	<i>RD-TDMA protokoli</i>	102
6.5.1.	RD-TDMA/CSMA	104
6.6.	<i>RD-TDMA/TONE.....</i>	106

6.6.1.	Vremenska organizacija slota	108
6.7.	<i>Rezultati simulacije protokola RD-TDMA/TONE</i>	109
6.7.1.	Propusna moć.....	110
6.7.2.	Energetska efikasnost.....	112
7.	Primena TONE kod MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom.....	116
7.1.	<i>Model sistema</i>	116
7.2.	<i>Razrešavanje komunikacionih konflikata kod AP MAC protokola</i>	117
7.2.1.	AP/CSMA.....	118
7.2.2.	AP/RTS-CTS	118
7.3.	<i>AP/TONE</i>	120
7.3.1.	Organizacija perioda za nadmetanje	121
7.3.2.	Status čvora.....	123
7.3.3.	Procedura nadmetanja u toku CW1	124
7.3.4.	Procedura nadmetanja u toku perioda za nadmetanje CW2:	132
7.4.	<i>Rezultati simulacije rada AP/TONE protokola</i>	134
7.4.1.	Propusna moć.....	135
7.4.2.	Energetska efikasnost.....	137
8.	ZAKLJUČAK	141
9.	LITERATURA.....	144

1. UVOD

Bežična senzorska mreža (engl. *Wireless Sensor Network* - WSN) je skup velikog broja autonomnih, prostorno razuđenih senzorskih čvorova koji imaju sposobnost samoorganizacije u multihop bežičnu mrežu. Senzorski čvorovi detektuju događaje i prikupljaju podatke iz okruženja i međusobno saraduju na obradi i prenosu 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 radio-primopredajnikom malog dometa. Neke od oblasti primene WSN su nadgledanje okoline, detekcija požara, automatizacija stambenih objekata, zaštita prostora, zvučna detekcija, seizmička detekcija, praćenje inventara, praćenje i kontrola saobraćaja, nadgledanja u medicini, pametni prostori i monitoring industrijskih postrojenja [1][2][3]. Iako su konceptualno formulisane pre gotovo dve decenije, WSN i danas predstavljaju tehnologiju u razvoju koja zaokuplja pažnju velikog broja istraživačkih grupa širom sveta. Savremena istraživanja u ovoj oblasti su između ostalog usmerena ka iznalaženju energetski-efikasnih bežičnih komunikacionih protokola, metoda za lokalizaciju i vremensku sinhronizaciju senzorskih jedinica i algoritama za samoorganizaciju.

Bitna karakteristika WSN 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 WSN je maksimalno smanjenje komunikacije.

Predmet istraživanja ove disertacije su WSN MAC protokoli. MAC (prema engl. *Medium Access Control*), podnivo u sloju veze OSI referentnog modela, je komunikacioni protokol za upravljanje pristupom medijumu. MAC protokol se bavi koordinacijom pristupa i transmisija u komunikacionom medijumu koji je zajednički za više čvorova. Bežični komunikacioni medium je difuznog karaktera, što znači da pri istovremenom emitovanju dva ili više prostorno bliskih čvorova 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, korišćenjem mehanizma za razrešenje konflikata (engl. *Contention Resolution Mechanism*). U kontekstu WSN, drugi, podjednako bitan zadatak MAC protokola tiče se postizanja zahtevanog nivoa energetske efikasnosti, koji obično za sobom povlači izvesno pogoršanje komunikacionih performansi (latencije, odnosno kašnjenja, i propusne moći). Energetska efikasnost se postiže redukcijom potencijalnih gubitaka energije koji prate komunikaciju, a čiji uzroci mogu da budu: pasivno slušanje (aktivan prijem u slučaju da nema poruka), kolizija paketa, preslušavanje (nepotreban prijem „tuđih“ poruka), višak saobraćaja zbog kontrolnih paketa, bespotrebno emitovanje i nagle promene u intenzitetu saobraćaja. Treći zadatak WSN MAC protokola je obezbeđivanje mogućnosti *ad-hoc* proširenja mreže novim čvorovima i adaptivnost na promene topologije mreže [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 promenljivog intenziteta, sa kratkim periodima intenzivnog saobraćaja i drugim periodima bez ikakvog ili sa saobraćajem veoma niskog intenziteta. S obzirom da savremeni 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 uspavljaju) 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. Ovakav način funkcionisanja smanjuje potrošnju u slučaju saobraćaja malog intenziteta i otklanjaju

potrebu za postojanjem sinhronizacije. Međutim, protokoli iz ove grupe su izrazito neefikasni u pogledu razrešavanja komunikacionih konflikata, pa zbog toga ispoljavaju loše performanse u slučaju pojačanog intenziteta saobraćaja. Druge dve kategorije protokola predviđaju postojanje efikasnijih mehanizma za razrešenje konflikta, a razlika je u načinu na koji su implementirani: protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu koriste statičko razrešenje konflikata, dok protokoli zasnovani na nadmetanju konflikte razrešavaju dinamički.

Za protokole koji se zasnivaju na nadmetanju karakteristično je postojanje radnog ciklusa, gde se susedni senzorski čvorovi sinhronizuju tako da su svi aktivni u isto vreme. Ovo su takozvani MAC protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom (eng. *Active Period*, AP). Aktivni period počinje kratkotrajnim periodom nadmetanja koji je rezervisan za razrešavanje komunikacionih konflikata između bliskih potencijalnih predajnika radi pristupa medijumu (primenom nekog od mehanizama za razrešavanje komunikacionih konflikata u bežičnoj mreži, kao što je CSMA ili RTS-CTS [16]). Nakon perioda nadmetanja budni ostaju samo senzorski čvorovi koji su izborili pravo pristupa medijumu i prijemni čvorovi a ostali se povlače u režim smanjene potrošnje, do sledećeg aktivnog perioda. Protokol S-MAC, na primer koristi mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata koji se zasniva na razmeni kontrolnih paketa tipa RTS-CTS [11]. Iako ovaj mehanizam sprečava većinu kolizija, uvodi dodatno opterećenje usled česte razmene kontrolnih paketa, imajući u vidu da senzorski čvorovi u bežičnim senzorskim mrežama, po pravilu, razmenjuju kratke pakete podataka.

TDMA protokoli uspostavljaju vremenski raspored kod koga je svakom senzorskom čvoru dodeljen jedan (ili više) vremenskih slotova u okviru globalnog frejma. Podela vremena na slotove smanjuje grupisanje komunikacije, čime se izbegavaju gubici energije usled kolizija, pasivnog slušanja i preslušavanja poruka. Kod tradicionalnih TDMA protokola za bežične senzorske mreže, takozvanih TDMA protokola sa rasporedom slotova za slanje poruka (engl. *Transmitter Driven TDMA*, TD-TDMA), kao što su LMAC [15], TF MAC [17], TRAMA [18], svakom senzorskom čvoru je dodeljen jedan slot za slanje poruka, jedinstven u njegovoj 2-hop okolini. Ovim se u potpunosti eliminišu kolizije i garantuje maksimalna propusna moć od jedne poruke po čvoru u svakom frejmu. Jedini preostali uzroci povećanja potrošnje energije su semplovanje kanala i preslušavanje, usled obaveze čvorova da se bude na početku slotova koji pripadaju svakom susedu i posebno dolazi do izražaja u gustim mrežama. Glavni zahtev kod TDMA protokola, formiranje rasporeda slotova ekskluzivnog u 2-hop okolini, obično zahteva da frejm ima veliki broj slotova, što dovodi do velikog kašnjenja u prenosu poruka između susednih senzorskih čvorova i nedovoljnog iskorišćenja kapaciteta komunikacionog kanala, zbog čega ovi protokoli nisu pogodni za guste mreže. Osim toga, u slučaju promene topologije

mreže teško je promeniti dužinu frejma ili raspored slotova. Ali, bez obzira na sve, TD-TDMA protokoli su pogodni za bežične senzorske mreže sa velikim intenzitetom saobraćaja i mogu da obezbede veću propusnu moć od protokola koji se zasnivaju na nadmetanju.

TDMA slotove je moguće dodeliti za prijem poruka, umesto za emitovanje, kao kod tzv. TDMA protokola sa rasporedom slotova za prijem poruka (engl. *Receiver Driven TDMA*, RD-TDMA) [19]. Tipični predstavnici ove grupe protokola su Crankshaft [20] i Y-MAC [21]. Kod ovih protokola, na početak svakog vremenskog slota se dodaje period za nadmetanje (engl. *contention period*), namenjen razrešavanju komunikacionih konflikata. Glavna prednost RD-TDMA u odnosu na TD-TDMA je izbegavanje preslušavanja poruka, čime se dodatno smanjuje potrošnja energije. Zbog toga RD-TDMA protokoli mogu da budu energetski efikasniji u slučaju saobraćaja male gustine, kada svaki senzorski čvor proverava kanal samo u svom vremenskom slotu. Međutim, da bi bio efikasna alternativa TD-TDMA protokolima, RD-TDMA protokol bi trebalo da koristi mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata koji je u mogućnosti da u što kraćem vremenskom periodu uz minimalan utrošak energije otkloni najveći broj komunikacionih konflikata.

Mehanizmi za razrešavanje komunikacionih konflikata koji se sreću kod AP i RD-TDMA protokola, poznatih iz literature, zasnovani su na principu CSMA (engl. *Carrier Sense Multiple Access*) ili RTS-CTS paketa. Kod CSMA, pošiljalac osluškuje kanal i počinje emitovanje samo ukoliko je kanal slobodan, inače, odustaje od emitovanja da bi pokušao kasnije. CSMA troši malo vremena i malo energije što ga, s te strane čini pogodnim za primenu u WSN MAC protokolima. Međutim, ovaj pristup pati od problema skrivenih i izloženih terminala. Problem skrivenih terminala (senzorskih čvorovi se u nadmetanju međusobno ne čuju) izaziva kolizije. Kolizije izazivaju velike gubitke energije. Problem izloženih terminala (čvorovi koji se međusobno čuju a ne nameravaju da pošalju poruku istom prijemnom čvoru) smanjuje propusnu moć mreže. Pri maloj gustini saobraćaja, kad se ovi problemi ređe javljaju, CSMA obezbeđuje malu potrošnju uz minimalno smanjenje propusne moći. Međutim, pri povećanju gustine saobraćaja, negativni efekti skrivenih i izloženih terminala značajno se pogoršavaju performanse MAC protokola. Upotreba RTS-CTS paketa, zamenjuje kolizije paketa podataka kolizijama kontrolnih paketa, pa se time smanjuje cenu kolizija i gubitak energije, ali ne rešava postojeće probleme CSMA, pa postiže istu propusnu moć kao CSMA.

Posebna klasa protokola za razrešavanje komunikacionih konflikata u WSN koristi RF tonove. Protokoli iz ove klase mogu da se podele na sledeći način: protokoli koji koriste ton zauzeća (eng. *busy tone*), ton zaglušenja (eng. *black burst*) i protokoli sa binarnim odbrojavanjem (eng. *binary-countdown*, BCD). MAC protokoli zasnovani na tonu zauzeća

(kao što su BTMA [22], RI-BTMA [23] i DBTMA [24]) za emitovanje tona zauzeća koriste dodatni frekventni kanal, što povećava cenu primopredajnika i potrošnju energije, zbog čega su nepodesni za upotrebu u WSN. MAC protokoli zasnovani na tonu zauzeća (Black burst [25], Priority MAC [26]) koriste signale za zaglušenje različitog trajanja, tako da je pobednik nadmetanja čvor koji emituje najduži signal. Kako u nadmetanju mogu da učestvuju samo čvorovi koji se međusobno čuju, ovaj pristup pati od efekata skrivenih i izloženih terminala, isto kao i CSMA, pa nije podesan za primenu u WSN. Protokoli sa binarnim odbrojanjem za WSN primenjuju princip arbitraže poznat iz CAN magistrala. CAN magistrale (*Controller Area Network*) kod žičanih mreža koriste bit-dominantnu arbitražu [27]. Prioriteti kod CAN magistrala se implementiraju dodelom jedinstvene binarne sekvence svakom čvoru. Prilikom arbitraže, svaki čvor emituje svoju sekvencu, a pobednik je čvor sa najvišim prioritetom (onaj koji je emitovao najviše dominantnih signala). Ovaj princip se kod WSN implementira emitovanjem, odnosno neemitovanjem RF tona. Kod CSMA/IC [28] i WiDom [29] protokola, dominantan signal se implementira emitovanjem signala, a recesivan neemitovanjem. Zbog ograničenog dometa RF signala u nadmetanju mogu da učestvuju samo čvorovi koji se međusobno čuju, isto kao kod CSMA, pa ovi protokoli takođe nisu pogodni za primenu kod WSN koje imaju više brodkast domena. CSMA/IC [30] predlaže uvođenje posebnog kanala za slanje RF tona i povećanje snage slanja tona ili osetljivosti prijemnika na tom kanalu, da bi se domet RF tona proširio na 2 hopa, što ne rešava problem skrivenih terminala usled fizičkih prepreka i povećava cenu RF primopredajnika kao i potrošnju. Sledeće rešenje predstavlja proširenje protokola WiDom na više brodkast domena [31]. U njemu se predlaže signaliziranje u dve faze: u prvoj fazi se emituju dominantan bit, a u drugoj fazi reemituje. Iako ovaj pristup uspešno rešava problem skrivenih terminala i dalje pati od problema izloženih terminala.

Glavni doprinos ove disertacije je nov mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata u bežičnim senzorskim mrežama primenom RF tonova, nazvan TONE. Mehanizam ima za cilj povećanje propusne moći i smanjenje potrošnje energije potrebne za razrešavanje komunikacionih konflikata. Glavne novine predloženog TONE-a su dvofazno signaliziranje upotrebom RF tonova i algoritam podele grupa za nadmetanje, koji smanjuje ukupan broj emitovanih tonova.

U predloženoj strategiji, problem razrešenja konflikata je posmatran kao problem traženja potencijalnog pošiljaoca u skupu suseda prijemnog čvora, na sličan način kao kod binarnog odbrojanja. Kod mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata TONE, ovo traženje se obavlja u više sukcesivnih eliminacionih rundi, do izbora pobednika koji stiče pravo da pošalje poruku. Procedura eliminacije predviđa da se na početku svake eliminacione

runde skup neeliminiranih suseda deli u dve grupe. Proverava se da li u prvoj grupi postoji bar jedan potencijalan pošiljalac i u tom slučaju svi čvorovi iz prve grupe nastavljaju nadmetanje a čvorovi iz druge grupe odustaju. U suprotnom, odustaju čvorovi iz prve grupe a nadmetanje nastavljaju čvorovi iz druge grupe. Kompletna interakcija između potencijalnih pošiljaoca se obavlja pomoću dvofaznog mehanizma za signalizaciju baziranog na emitovanju RF tonova. U prvoj fazi potencijalni pošiljaoci iz prve grupe (ukoliko ih ima) emituju RF ton čije postojanje detektuje prijemni čvor. Ukoliko detektuje RF ton, prijemni čvor će ga u drugoj fazi reemitovati susedima iz druge grupe. Prednosti upotrebe RF tonova umesto regularnih kontrolnih paketa (tipa RTS-CTS) su višestruke. Prvo, trajanje emitovanja RF tona je kraće od trajanja emitovanja kontrolnog paketa, čime se skraćuje proces eliminacije, i drugo, prijem više tonova od jednom kod prijemnog čvora ne izaziva koliziju, za razliku od prijema više kontrolnih paketa.

Dalji doprinosi disertacije su predložene primene TONE-a u različitim tipovima WSN MAC protokolima. Predloženi STAR/TONE, intraklasterski MAC protokol za WSN za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi mehanizam TONE i pokazuje bolje performanse i manju potrošnju od binarnog odbrojavanja [32]. Za razrešavanje komunikacionih konflikata u multihop mrežama, kod RD-TDMA i AP protokola su predložena dva nova mehanizma koji se zasnivaju na TONE-u: RD-TDMA/TONE [33] i AP/TONE, koji takođe pokazuju značajno bolje performanse i manju potrošnju od postojećih mehanizama. Prema dosadašnjim saznanjima ovo je prvi put da su RF tonovi korišćeni u RD-TDMA ili AP MAC protokolima za WSN.

Za potrebe istraživanja obuhvaćenih ovom disertacijom razvijeni su simulatori u SystemC programskom jeziku, koji omogućavaju verifikaciju ispravnog funkcionisanja predloženih mehanizama za razrešavanje komunikacionih konflikata, poređenje sa postojećim mehanizmima i procenu performansi. Simulatori omogućavaju brzu i efikasnu proveru funkcionisanja mehanizama, promenu parametara WSN i protokola, kao i analizu mehanizama u pogledu energetske efikasnosti i propusne moći.

Ova disertacija, pored uvodnog dela, sadrži sedam poglavlja. U drugom poglavlju se uvode bežične senzorske mreže, oblasti njihove primene i definišu zahtevi i opšti principi projektovanja. Takođe je predstavljena i arhitektura senzorskog čvora, sa posebnim akcentom na RF primopredajnike, kao i komunikaciona arhitektura.

U trećem poglavlju je dat pregled postojećih MAC protokola za bežične senzorske mreže. Pre svega, predstavljeni su bežični MAC protokoli i data je njihova klasifikacija. Nakon toga su predstavljeni MAC protokoli za bežične senzorske mreže, tj. opisani su zahtevi kao što

su skalabilnost, adaptabilnost, predvidljivost kašnjenja, energetska efikasnost, vreme života senzorskog čvora, pouzdanost, propusna moć i ustupci između ovih zahteva, koji moraju da se učine prilikom projektovanja protokola. Uvedena je klasifikacija WSN MAC protokola na: protokole sa zajedničkim aktivnim periodom, protokole sa vremenskim rasporedom, protokole sa semplovanjem preambule i hibridne protokole. Za svaku grupu protokola su navedene bitne karakteristike, prednosti i mane i opisani glavni predstavnici. U nastavku je uvedeno razrešavanje komunikacionih konflikata upotrebom RF tonova. Na kraju poglavlja su opisane postojeće metode za razrešavanje komunikacionih konflikata upotrebom RF tonova, podeljene na metode koje koriste ton zauzeća, ton zaglušenja i binarno odbrojavanje.

U četvrtom poglavlju je predstavljen TONE, dvofazni mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata upotrebom RF tonova. Objasnen je osnovni koncept, mehanizam za signalizaciju i algoritam podele grupa, kao i poređenje sa postojećim algoritmima, i prikazani su rezultati simulacije predloženog mehanizma, sa akcentom na poboljšanje performansi. U nastavku poglavlja je razmatrana problematika RF tonova. Objasnjene su metode generisanja i detekcije RF tonova. Predstavljena je razvojna platforma koja je korišćena, kao i eksperimentalni rezultati kojima je dokazana opravdanost korišćenja RF tonova.

U petom poglavlju je opisan jednostavan intraklasterski MAC protokol za WSN zvezdaste topologije, STAR/TONE, koji za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi TONE mehanizam. Data je analitička metoda za podešavanje parametara protokola. Na kraju poglavlja su predstavljeni rezultati simulacije STAR-TONE MAC protokola u uslovima periodičnog i rafalnog saobraćaja, za različita podešavanja radio primopredajnika i parametara protokola.

U šestom poglavlju je opisan RD-TDMA/TONE, TDMA MAC protokol za multihop WSN sa rasporedom slotova za prijem poruka, koji za razrešenje konflikata među potencijalnim pošiljaocima koristi predloženi TONE. Pre svega su opisani postojeći TDMA MAC protokoli, sa rasporedom slotova za prijem i slanje poruka. Opisani je i postojeći mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata koji se koristi kod RD-TDMA MAC protokola, CSMA. Zatim je opisan način implementacije TONE mehanizma kod RD-TDMA MAC protokola. Na kraju su predstavljeni rezultati simulacije RD-TDMA/TONE protokola, u poređenju sa RD-TDMA/CSMA protokolom za različita podešavanja radio primopredajnika i parametara protokola i za različite gustine saobraćaja. Prva grupa rezultata se tiče performansi u pogledu propusne moći, a druga u pogledu energetske efikasnosti.

Tema sedmog poglavlja su MAC protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom. Opisani su postojeći mehanizmi za razrešavanje komunikacionih konflikata, AP/CSMA i AP/RTS-CTS. Predložen je novi MAC protokol sa zajedničkim aktivnim periodom, AP/TONE, koji za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi nov dvofazni mehanizam, zasnovan na TONE-u. Objasnjena je procedura nadmetanja, i dokazana korektnost algoritma. Predstavljeni rezultati simulacije u vidu propusne moći i energetske efikasnosti pokazuju prednosti upotrebe AP/TONE nad AP/CSMA i AP/RTS-CTS za različita podešavanja radio primopredajnika i protokola pri različitim gustinama saobraćaja.

U zaključku je data kratka rekapitulacija onoga što je urađeno i sumirani su najvažniji rezultati. Takođe su data i neka usmerenja za moguća dalja istraživanja u ovoj oblasti.

2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE

Tipičan način obrade informacija je korišćenjem računara opšte namene. Za razliku od obrade informacija opšte namene, embedded sistemi su zaduženi za interakciju sa okruženjem, tj. izračunavanja su integrisana sa nadgledanjem/upravljanjem fizičkim procesima. Osim izračunavanja i upravljanja, komunikacije su takođe ključni aspekt u stvaranju distribuiranog embedded sistema. Svi izvori informacija moraju biti u mogućnosti da dostave svoje informacije na mesta gde su one potrebne, aktuatoru ili korisniku, ali i da međusobno sarađuju. Iako je u pojedinim namenama moguće koristiti postojeće „kablovske“ tehnologije za umrežavanje, u mnogim primenama je bežična komunikacija neizbežan zahtev.

Potreba za bežičnom komunikacijom u embedded sistemima dovela je do pojave novog oblika komunikacionih mreža, tzv. *bežične senzorske mreže* (eng. *Wireless Sensor Network - WSN*). Osnovne osobine WSN su: *a*) sastoji se od mnoštva (*senzorskih*) čvorova koji poseduju mogućnost interakcije sa svojim okruženjem, bilo putem senzora bilo putem neposrednog upravljanja fizičkim parametrima, *b*) čvorovi međusobno *sarađuju* na ostvarenju zajedničkog zadatka koji prevazilazi mogućnosti jednog čvora i *c*) saradnja (kolaboracija) između čvorova je omogućena bežičnom komunikacijom. Senzorski čvorovi poseduju funkcionalnosti izračunavanja, bežične komunikacije, prikupljanja informacija (putem senzora) ili upravljanja fizičkim okruženjem (putem aktuatora).

2.1. *Oblasti primene WSN*

Različite primene WSN postavljaju različite zahteve koji moraju biti ispunjeni. U daljem tekstu će biti nabrojane neke od mogućih oblasti primene WSN [3].

Podrška u saniranju posledica katastrofalnih događaja. Jedna od najčešće razmatranih oblasti primene WSN je oporavak od nesreće. Tipičan primer bi bio praćenje požara velikih razmera. Senzori se iz aviona bacaju u oblast zahvaćenu požarom. Opremljeni su senzorom temperature i mogu da odrede svoj položaj (relativne koordinate u odnosu na susedne čvorove ili apsolutne). Kolektivno mogu da generišu temperaturnu mapu, sa definisanim obodom visoke temperature, do kog vatrogasci smeju da dođu. 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. WSN mogu da se koriste za nadgledanje okruženja, kao npr. praćenje nivoa hemijskog zagađenja 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 prirodnom staništu (biodiverzitet, engl. biodiversity mapping). Glavni razlog za korišćenje WSN 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 na održavanju objekta. Jedna od mogućih primena WSN 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 [34]), koji predviđaju uvođenje i bežičnih komponenti. Osim ovoga, senzori mogu da nadgledaju mehaničko opterećenje zgrade u seizmički aktivnim oblastima. To znači da bi WSN 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 preživeli 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 trebalo da bude mala, u odnosu na cenu cele zgrade.

Upravljanje poslovnim kompleksima. Još jedna od primena WSN je u velikim poslovnim kompleksima. Jednostavan primer bi bio nošenje bedževa od strane zaposlenih tako da WSN 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. WSN bi mogla da prati ovakvo vozilo i alarmira

obezbeđenje. Izazovi kod ovakvih WSN su mnogobrojni: potreban je veliki broj čvorova, koji saraduju, a imaju dug vek trajanja.

Nadgledanje mašina i preventivno servisiranje. 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 servisiranje. Moguća primena bi bila u robotici, ili u vozovima. Glavna prednost upotreba WSN je rad bez kablova, jednostavno postavljanje senzora i činjenica da se izbegavaju standardni problemi servisiranja 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 senzorskog čvora nisu od presudnog uticaja.

Precizna poljoprivreda. Primena WSN 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 WSN 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 primenama nije potrebno da čvorovi aktivno međusobno komuniciraju, dovoljno je da se sa njih očitaju podaci. U te svrhe se koriste RFID tagovi. U komplikovanijim primenama se koriste složeniji senzorski čvorovi, recimo za lociranje objekta u magacinu ili za arhiviranje informacija o istoriji, recimo, gde se objekat nalazio.

Telemetrija. 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 WSN. Ipak, mnogo bolji rezultati bi se dobili njihovom primenom. Upotreba WSN bi mnogim aplikacijama doprinela povećanjem rezolucije merenja (vremenske i prostorne), uz minimalnu potrošnju energije i minimalno angažovanje resursa.

2.2. Tipovi primena

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). Broj baznih stanica je obično manji od broja izvora podataka.

Moguće je uočiti nekoliko različitih obrazaca ponašanja, a neki od najčešćih su [3]:

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). Može da postoji i filtriranje događaja, ukoliko postoji mogućnost 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 karakterisitka fizičke veličine koja se meri.

Aproksimacija funkcije i detekcija ivice. Način na koji se neka fizička veličina (recimo temperatura) menja može da bude funkcija lokacije. WSN 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, WSN 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.

2.3. Zahtevi

Sledeći projektantski zahtevi su zajednički za većinu primena WSN [3]:

Tip servisa. Osnovni tip servisa (usluge) koji pružaju konvencionalne komunikacione mreže jeste prenos podataka s jednog na neko drugo mesto. Kod WSN, prenos podataka je samo sredstvo, ali ne i glavna svrha. Od WSN se očekuje da pruži smislenu informaciju i/ili akciju u kontekstu konkretnog zadatka koji obavlja. Zadatak se tipično odnosi na prikupljanje podataka o određenoj pojavi u određenoj geografskoj oblasti. Cilj nije prikupljanje podataka od senzorskih čvorova samo po sebi, već stvaranje dovoljno tačne predstave (u prostornom i vremenskom smislu) o pojavi koja se nadgleda. Dodatno, kod WSN je primarna pokrivenost date geografske oblasti senzorskim čvorovima na način da je svaka tačka u dometu osmatranja bar jednog senzora. Slično, bitna je i pokrivenost vremena, budući da WSN vrši periodična očitavanja pojave koja se nadgleda.

Kvalitet servisa. U bliskom vezom sa tipom servisa koji mreža nudi je i kvalitet tog servisa. Kvalitet servisa konvencionalnih komunikacionih mreža se izražava parametrima kao

što je vreme prenosa podataka ili propusna moć mreže – mreža koja može da prenese veliku količinu podataka za kraće vreme i pri tom garantuje određeno maksimalno vreme prenosa svakog paketa je kvalitetnija od mreže koja nema takve osobine. Međutim, kod WSN ove tradicionalne mere kvaliteta su irelevantne ili sekundarne. U nekim slučajevima, dovoljan je tek povremeni prenos kratkih paketa. U nekim drugim slučajevima, mogu postajati strogi zahtevi u pogledu pouzdanosti prenosa ili zahtevi u pogledu garantovanog kašnjenja u prenosu ukoliko mreža upravlja aktuatorima u realnom vremenu. Procenat uspešno isporučenih paketa (kao mera koja karakteriše pouzdanost konvencionalnih komunikacionih mreža) ne odražava na pravi način pouzdanost WSN – kod WSN je bitna količina i kvalitet informacije koju bazna stanica može da dobije o objektu ili oblasti koja se nadgleda. S tim u vezi, kvalitet servisa WSN treba izražavati u zavisnosti od njene primene, kao na primer, pouzdana detekcija događaja, ili kvalitet aproksimacije pojave koja se nadgleda (npr. temperaturna mapa).

Otpornost na otkaze. S obzirom da se može desiti da čvorovi ostanu bez napajanja, da budu oštećeni ili da bežična komunikacije između dva čvora bude trajno prekinuta, važno je da WSN, kao celina, može da toleriše ovakve vrste otkaza. Tolerancija otkaza pojedinačnih čvorova se postiže uvođenjem redundanse, odnosno uključivanjem u mrežu većeg broja čvorova od minimalno potrebnog broja za korektno funkcionisanje u odsustvu otkaza.

Životni vek. U tipičnoj primeni, servisiranje i održavanje senzorskih čvorova je fizički neizvodljivo ili nepraktično zbog velikih pratećih troškova. To znači da senzorski čvorovi moraju da ispunjavaju određene zahteve u pogledu trajanju baterije, da bi obezbedili željeni životni vek mreži. Otuda, mala potrošna energije predstavlja jedan od primarnih zahtev koji treba ispuniti pri projektovanju senzorskog čvora.

U nekim slučajevima, za napajanje senzorskog čvora (potpuno ili delimično) moguće je koristiti obnovljive izvore energije (solarna energija, vibracije). Tipično ovi izvori energije nisu dovoljno snažni kako bi se osigurao neprekidni rad senzorskog čvora, ali mogu da obezbede izvesnu dopunu baterije i time produže životni vek mreže.

Između životnog veka i kvaliteta usluge postoji kompromis, budući da viši kvalitet usluge (npr. češća i preciznija očitavanja) tipično zahteva veći utrošak energije.

Precizna definicija životnog veka zavisi od konkretne primene. Moguće opcije su: vreme do otkaza (nestanka energije) prvog čvora, vreme do podele mreže na dva ili više

razdvojenih (nepovezanih) delova, vreme do otkaza 50% čvorova (ili neki drugi fiksni procenat), ili vreme do momenta kad neka konkretna oblast posmatranja više nije pokrivena ni jednim senzorom.

Skalabilnost (proširljivost). WSN može da sadrži veliki broj čvorova. Zbog toga arhitektura mreža i komunikacioni protokoli moraju biti takvi da omogućavaju dodavanje novih čvorova bez gubitka performansi mreže.

Gustina mreže. Gustina WSN, tj. broj čvorova po jedinici površine, može značajno da varira. Različite primene zahtevaju različite gustine mreže. Čak i u okviru jedne aplikacije, gustina može da varira u vremenu (zbog otkaza ili premeštanja čvorova) i/ili u prostoru (nije ista u svim delovima mreže). WSN treba da može da se prilagodi ovakvim varijacijama.

Programabilnost. Čvorovi WSN bi trebalo da budu programabilni, u smislu mogućnosti zamene programa tokom njihovog normalnog rada (tj. mogućnost daljinskog ažuriranja programa). Na ovaj način se postiže mogućnost pokretanja novih zadataka u istoj WSN (bez potrebe zamene čvorova).

2.4. Osnovni principi

Radi realizacije zahteva pobrojanih u prethodnoj sekciji neophodni su specifični mehanizmi, arhitekture i protokoli, koji ne postoje ili ne postoje u odgovarajućem obliku kod konvencionalnih komunikacionih mreža. Poseban izazov su mehanizmi koji treba da omoguće da se u konkretnoj primeni ostvare zahtevi u pogledu kvaliteta servisa, životnog veka, otpornosti na otkaze itd. S druge strane, mehanizmi o kojima je reč treba da poseduju i izvesnu opštost, kako bi mogli da se primenjuju u široj klasi WSN. U nastavku su navedeni neki od mehanizama koji leže u osnovi WSN [3].

Multihop bežična komunikacija. Uprkos tome što bežična komunikacija leži u osnovi WSN, direktna komunikacija između svih čvorova u mreži nije uvek moguća. Konkretno, komunikacija između čvorova na velikoj udaljenosti je jedino moguća upotrebom (neprihvatljivo) velike snage zračenja. Energija koja je potrebna za komunikaciju se može smanjiti korišćenjem među-čvorova kao relejnih stanica. Drugim rečima, umesto da dva udaljena čvora *A* i *B* direktno komuniciraju i pri tom troše veliku energiju za emitovanje svojih poruka, racionalnije je poruke prenositi preko više čvorova (kaže se u više hopova ili preskoka) koji su smešteni u prostoru između čvorova *A* i *B*. Ovo je

posledica činjenice da snaga zračenja opada sa kvadratom rastojanja. Ovo praktično znači da za dupliranje dometa komunikacije treba učtverostručiti snagu emitovanja. Međutim, ukoliko se uvede posrednik u komunikaciji (postavljen na pola puta između udaljenih čvorova) utrošak energije biće samo duplo veći.

Energetska efikasnost. Energetska efikasnost je ključ za postizanje dugog životnog veka mreže. Posebno je bitno ostvariti energetske-efikasnu komunikaciju (merenu u jedinicama J/bit) budući da bežična komunikacija zahteva srazmerno veći utrošak energije od izračunavanja.

Samo-konfiguracija. Zbog velikog broja čvorova i pojednostavljenog načina „instaliranja“ mreže (npr. razbacivanjem čvorova), WSN bi trebalo da je u stanju da samostalno konfiguriše većinu svojih radnih parametara (tj. bez neposrednog učešća administratora mreže). Na primer, senzorski čvor bi trebalo da je u mogućnosti da odredi svoju geografsku lokaciju, samostalno ili uz pomoć okolnih čvorova. Takođe, mreža bi trebalo da je u stanju da (automatski) toleriše otkaze čvorova i da prihvata nove čvorove.

Kolaboracija i obrada informacije u mreži. Kod nekih aplikacija, pojedinačni senzorski čvor nije u stanju da samostalno proceni da li se događaj od interesa desio ili nije. U takvim slučajevima, potrebno je da susedni čvorovi, kroz razmenu prikupljenih podataka, sarađuju radi ostvarenja zajedničkog zadatka. To znači da se informacija obrađuje u samoj mreži, za razliku od klasičnog koncepta po kome svaki čvor dostavlja sve svoje podatke baznoj stanici koja obavlja obradu objedinjenih podataka. Na primer, neka se zadatak WSN sastoji u određivanju najviše ili srednje temperature u nekoj oblasti. Umesto da se očitavanja svih čvorova šalju baznoj stanici, gde bi se izračunala tražena vrednost, efikasnije rešenje je korišćenje agregacije podataka tokom propagacije očitavanja pojedinačnih čvorova kroz mrežu. Na ovaj način značajno se smanjuje količina podataka koja se prenosi u mreži, a time i utrošak energije.

Orijentisanost ka podacima. Tradicionalne komunikacione mreže su orijentisane na prenos podataka između umreženih uređaja od kojih svaki poseduje jedinstvenu mrežnu adresu. Za razliku od toga, u WSN gde postoji redundansa u pogledu broja čvorova, bilo radi tolerisanja otkaza bilo radi kompenzacije niskog kvaliteta merenja pojedinačnih čvorova, identitet (adresa) čvora postaje irelevantan. Bitan je podatak, ali ne i koji čvor je generisao taj podatak. Na primer, korisnik je zainteresovan za

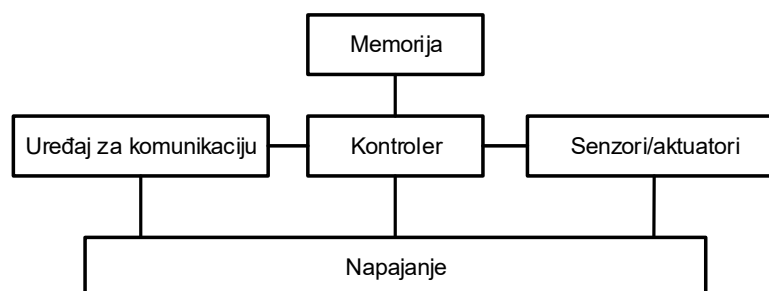
informaciju „kolika je srednja temperatura u nekoj konkretnoj oblasti nadgledanja“, ali ne i za pojedinačna očitavanja svih čvorova u toj oblasti. Ili, mreži može biti postavljen zadatak „aktivirati alarm ako temperatura u bilo kojoj tački nadgledane oblasti prekorači zadatu graničnu vrednost“ – očekivana informacija je alarm, a ne koji konkretni čvor je detektovao prekoračenje temperature. Na neki način, orijentisanost ka podacima nalikuje konceptu upita kod baza podataka i u bliskoj je vezi sa kolaboracijom, obradom podataka u mreži i agregacijom podataka.

Lokalnost. Odnosi se na zahtev da tokom sprovođenja neke aktivnosti (npr. komunikacionog protokola) senzorski čvor bude zaokupljen samo informacijama koje potiču od njegovih neposrednih suseda u mreži. Ovaj zahtev je bitan iz razloga što senzorski čvorovi poseduju ograničene resurse (npr. memorija). Takođe, tolerisanje otkaza i proširenje mreže novim čvorovima bilo bi značajno otežano ako bi postojao zahtev da čvor treba da poseduje informaciju o svim ostalim čvorovima u mreži.

Kompromisi. Brojni, uzajamno suprotstavljeni ciljevi koje WSN treba da ispuni nužno nameću potrebu za nalaženjem optimalnog kompromisa, kako prilikom projektovanja mreže i pratećih protokola tako i tokom normalnog operativnog režima. Na primer, veći utrošak energije omogućiće dobijanje preciznijih i kvalitetnijih podataka, ali će zato životni vek mreže biti kraći.

2.5. Arhitektura senzorskog čvora

Presudnu ulogu u izboru hardvera za bežični senzorski čvor igraju zahtevi konkretne aplikacije. Ipak, u najvećem broju slučajeva, senzorski čvor bi trebalo da poseduje sledeće osobine: male dimenzije i težina, niska cena, mala potrošnja energije, opremljenost odgovarajućim sensorima, neophodnim računarskim resursima (procesor + memorija) i sredstvima za komunikaciju. Uprkos različitim zahtevima, arhitektura senzorskog čvora je slična kod većine primena. Sl. 2.1 prikazuje arhitekturu tipičnog senzorskog čvora.



Sl. 2.1 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, ali 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 nadgleda okolina i na nju utiče. Široka oblast primene WSN ukazuje na veliki broj različitih vrsta 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 WSN, 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 WSN se najčešće koristi RF komunikacija. Ona obezbeđuje relativno veliki domet i brzinu prenosa, prihvatljiv nivo pouzdanosti prenosa podataka, prihvatljiv utrošak energije i ne zahteva optičku vidljivost pošiljaoca i primaoca. Za komunikaciju u WSN 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. Na primer, radi uštede energije, komunikacioni uređaj i kontroler bi trebalo da budu isključeni najveći deo vremena, a da se uključuju samo po potrebi. Kontroler bi mogao da se „budi“ (prebacuje u operativni režim) periodično, uz pomoć programabilnog tajmera. Senzore i komunikacioni uređaj bi trebalo programirati tako da ka kontroleru generišu zahteve za prekid u slučaju detekcije relevantnog događaja (koji zahteva dalju obradu od strane kontrolera) – npr. temperatura je prekoračila zadatu graničnu vrednost, ili je komunikacioni uređaj detektovao RF signal.

2.6. RF primopredajnici

RF primopredajnik je uređaj za bežičnu komunikaciju koji kombinuje RF predajnik i RF prijemnik. Primopredajnici za WSN 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 WSN, pre svega u pogledu energetske efikasnosti, fizičkih dimenzija i cene, nameću upotrebu primopredajnika specifičnih karakteristika.

Podrška višim nivoima komuniciranja. Osim funkcija koje se tiču fizičkog nivoa komunikacije (neposredna konverzija digitalne informacije u RF signal i obratno), tipičan primopredajnik realizuje i pojedine funkcije koje predstavljaju podršku višim nivoima komunikacije. Ovo se pre svega odnosi na podršku MAC (*Medium Access Control*) nivou, tj. nivou za pristup medijumu. U većini slučajeva, ova podrška je dostupna kroz *paket-orijentisani* interfejs prema mikrokontroleru, što znači da se interakcija između primopredajnika i mikrokontrolera odvija na nivou predaje/prijema pojedinačnih paketa (tj. poruka). (Kod starijih tipova primopredajnika sreću se *bajt-orijentisani* i *bit-orijentisani* interfejsi kod kojih je interakcija primopredajnik-mikrokontroler na nivou pojedinačnih bajtova, odnosno bitova.) Paket-orijentisani interfejs primopredajnika omogućava komunikacionom softveru MAC nivoa da inicira predaju i dostavi paket informacije koji treba poslati, npr. prenosom iz glavne memorije senzorskog čvora u internu memoriju primopredajnika. U suprotnom smeru,

primopredajnik obaveštava softver MAC nivoa da je primljen novi paket koji može da se prebaci iz interne memorije primopredajnika u glavnu memoriju senzorskog čvora.

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, RF primopredajnici za primene u WSN 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 kanali. 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 podešavanja noseće frekvencije, odnosno kanala, u okviru izabranog frekventnog opsega, što je preduslov za višekanalnu komunikaciju.

Energija i brzina promene stanja. Primopredajnik može da radi u različitim režimima rada: predaja ili prijem, može da koristi različite kanale ili da bude postavljen u različite režime smanjene potrošnje. Vreme i energija koja se utroši za promenu režima ili kanala nije zanemarljiva i predstavlja bitnu karakteristiku primopredajnika. Na primer, vreme potrebno za prebacivanje iz režima prijema u režim predaje i obrnuto je veoma bitno za pojedine MAC protokole (koji zahtevaju čestu promenu između ova dva režima).

Brzina prenosa podataka. Brzinu prenosa podataka određuje noseća frekvencija, korišćeni frekventni opseg, tip modulacije i kodiranja. Tipične vrednosti su reda desetina kilobita u sekundi, što je sasvim dovoljno za upotrebu u WSN.

Modulacija. Primopredajnici tipično pružaju izbor između nekoliko tipova modulacija: OOK, ASK, FSK i sličnih jednostavnih modulacionih šema. Modulacija se tipično bira nakon eksperimentisanja u realnim uslovima. Dinamička promena modulacije (tokom normalnog rada mreže) svakako nije praktična opcija.

Kontrola snage zračenja. Pojedini primopredajnici poseduju mogućnost kontrole snage zračenja, obično izborom jednog od nekoliko diskretnih nivoa. Maksimalna snaga zračenja u konkretnom frekventnom opsegu definisana je zakonskom regulativom.

Efikasnost. Efikasnost izlaznog RF stepena se definiše kao odnos emitovane snage i ukupne snage koja se troši u izlaznom stepenu primopredajnika.

Osetljivost prijemnika. Osetljivost prijemnika (izražena u jedinicama dBm) predstavlja minimalnu snagu prijemnog signala koja je neophodna za postizanje željenog BER (procenat bitova primljenih sa greškom u odnosu na ukupan broj primljenih bitova, eng. *bit-error rate*). Bolja osetljivost prijemnika znači i veći domet RF komunikacije.

Domet. Domet, tj. najveće rastojanje na kome je moguće ostvariti RF komunikaciju, zavisi od snage zračenja, karakteristika antene, slabljenja u komunikacionom medijumu, koje pak zavisi od noseće frekvencije, načina modulacije i kodiranja i BER-a koja se želi postići. Takođe, zavisi od kvaliteta prijemnika – pre svega od njegove osetljivosti. U praksi, domet primopredajnika za senzorske čvorove se kreće u opsegu od nekoliko metara do nekoliko stotina metara.

Performanse blokiranja. Performanse blokiranja prijemnika izražava se BER-om koji se može postići u prisustvu interferentnog (ometajućeg) signala. Preciznije, kolika je maksimalna snaga interferentnog signala date frekvencije (emitovan na fiksnoj distanci od prijemnika) pri kojoj se još uvek može postići željeni BER. Što je razlika u frekvenciji korisnog i interferentnog signala veća, to će prijemnik biti u stanju da toleriše veću snagu interferencije. Performanse blokiranja se mogu poboljšati umetanjem filtra između antene i primopredajnika. Bitan specijalni slučaj je interferentni signal na susednom kanalu.

Detekcija nosioca i RSSI. Kod mnogih MAC protokola, detekcija da li je bežični kanal slobodan ili zauzet (neki drugi čvor emituje) predstavlja kritičnu informaciju. Zadatak primopredajnika je da obezbedi ovu informaciju. Uslovi za razgraničenje između slobodnog i zauzetog kanala mogu biti različiti. Na primer, shodno standardu IEEE 802.15.4 razlikuju se sledeći slučajevi:

- Energija prijemnog signala je iznad granične vrednosti. Pri tom, nije bitno o kakvom signalu se radi – kako je modulisan i kakve mu je spektralna karakteristika – bitna je samo energija.
- Detektovan je nosilac, tj. signal na nosećoj frekvenciji modulisan na odgovarajući način.
- Detektovan je nosilac čija je energija iznad granične vrednosti (kombinuje prva dva uslova).

Takođe, korisna informacija je i jačina signala iz kojeg je primljen paket. Ova informacija je dostupna u registru primopredajnika koji je poznat pod skraćenicom RSSI (*Receiver Signal Strength Indicator*) i predstavlja grubu procenu udaljenosti između predajnika i prijemnika (pod pretpostavkom da je poznata snaga emitovanja).

Frekventna stabilnost. Frekventna stabilnost zavisi od nivoa odstupanja od nominalne centralne frekvencije pod uticajem promenjenih uslova u okruženju (npr. temperatura ili pritisak). U ekstremnim slučajevima, nedovoljna frekventna stabilnost može da dovede do prekida komunikacije kada se npr. kada se jedan senzorski čvor direktno izloži dejstvu sunčeve svetlosti, a drugi ostane u senci.

Opseg napona napajanja. Primopredajnici po pravilu mogu nesmetano da rade pri u relativno širokom opsegu napona napajanja (npr. 3 – 3.6V). Na ovaj način se izbegava upotreba energetski neefikasnih regulatora napajanja.

Tabela 1 prikazuje osnovne karakteristike nekih komercijalno dostupnih primopredajnika.

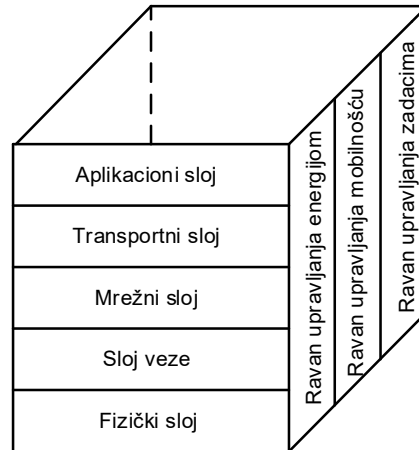
Tabela 1: Karakteristike primopredajnika.

	TI CC2420 [7]	TI CC1101 [8]	Nordic nRF905 [35]	RFM TRC103 [36]	Infineon TDA5250 [37]
Frekventni opseg	2,4 GHz	315/433/ 868/915 MHz	433/868/915 MHz	868/915 MHz	858 MHz
Modulacija	O-QPSK, GFSK, OOK	2-FSK, 4- FSK, GFSK, OOK	GFSK	OOK/FSK	ASK/FSK
Brzina prenosa podataka (max)	500 kbs	500 kbs	50 kbs	200 kbs	64 kbs
Maksimalna izlazna snaga	1 dBm	12 dBm	10 dBm	11 dBm	13 dBm
Osetljivost prijemnika	-104 dBm	-116 dBm	-100 dBm	-108 dBm	-109 dBm
Struja pri predaji	21.5 mA	16.4 mA	30 mA	25 mA	9 mA
Struja pri prijemu	13.3 mA	14.7 mA	12.5 mA	3.3 mA	12 mA
Podrška za višekanalni način rada	+	+	+	+	-

2.7. Komunikaciona arhitektura WSN

Sl. 2.2 prikazuje uopšteni prikaz komunikacione arhitekture WSN koju čini pet slojeva protokol steka i tri ravni upravljanja [1]. Za razliku od konvencionalnih mrežnih arhitektura,

koje pre svega obuhvataju čisto komunikacione aspekte umrežavanja i prenosa informacija, komunikaciona arhitektura WSN kombinuje komunikacione protokole i funkcije neophodne za postizanje energetske efikasnosti, samoorganizaciju senzorskih čvorova i koordinaciju njihovih aktivnosti.



Sl. 2.2 Komunikaciona arhitektura WSN

- **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 (sloj kontrole logičkog kanala, eng. *Logical Link Control*) i MAC (sloj kontrole pristupa medijumu, engl. *Medium Access Control*). LLC obezbeđuje interfejse 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 RF 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.

3. MAC PROTOKOLI ZA WSN

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 formiranje paketa podataka, fizičko adresiranje, kontrola protoka, (c) razrešavanje komunikacionih konflikata 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.

U ovom poglavlju će pre svega biti reči o osnovnim problemima i klasifikaciji bežičnih MAC protokola, čime se bave Sekcije 3.1 i 3.2. MAC protokolima za WSN, osnovnim zahtevima i ustupcima koji se postavljaju prilikom njihovog projektovanja i njihovom klasifikacijom se bavi Sekcija 3.3. Razrešavanjem konflikata upotrebom RF tonova i konkretnim rešenjima, kao što su ton zauzeća, black burst i binarno odbrojavanje, bavi se Sekcija 3.4.

3.1. Osnovi bežičnih MAC protokola

U oblasti bežičnih MAC protokola se vrše istraživanja već više od 40 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.

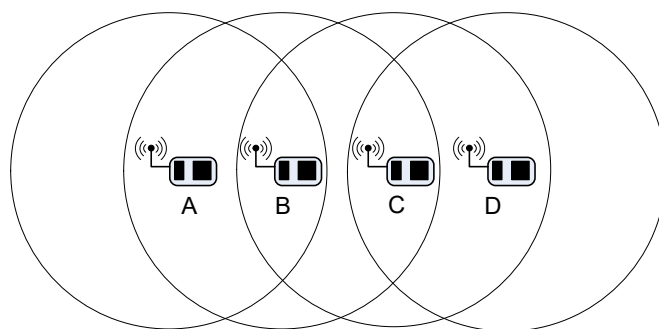
Najbitniji zahtevi kod konstruisanja MAC protokola za bežičnu komunikaciju se tiču performansi, a to su [3]: propusna moć (eng. *throughput*), stabilnost, pravičnost (eng. *fairness*), vreme pristupa mreži (eng. *access delay*, vreme koje protekne od momenta kad je paket spreman za slanje do početka emitovanja), vreme prenosa (eng. *transmission delay*, vreme koje

protekle od početka emitovanja paketa do njegove uspešne isporuke), i sve uz generisanje minimalnog dodatnog saobraćaja (eng. *overhead*). Dodatni saobraćaj nastaje zbog dodavanja zaglavlja i završnog zapisa paketima, zbog gubitka paketa usled kolizije i zbog razmene dodatnih kontrolnih paketa. Kolizija nastaje kad dva ili više čvorova šalje paket u isto vreme, što onemogućava prijemnik da dekodira paket i zahteva ponovo slanje paketa. Kod vremenski-kritičnih primena, važno je da postoje garancije (determinističke ili bar stohastičke) o vremenu isporuke paketa ili minimalno raspoloživoj brzini prenosa, što se tipično postiže uvođenjem prioriteta.

Na funkcionisanje i performanse MAC nivoa veliki uticaj imaju karakteristike fizičkog sloja. Fizičke pojave, kao što su brzi i spori fading, propagaciono slabljenje signala i šum dovode do toga da se kvalitet veze menja u vremenu, uz povremene značajne skokove u stopi grešaka. Propagaciono slabljenje (usled opadanja snage signala na prijemu sa rastojanjem između predajnika i prijemnika) u kombinaciji sa zahtevom da je za korektnu demodulaciju neophodan izvestan minimalni nivo signal na prijemu određuje maksimalno rastojanje na kome je moguće uspostaviti komunikaciju (tj. domet) pri datoj predajnoj snazi. 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 problema sakrivenih izloženih terminala [1].

Problem sakrivenih terminala (eng. *hidden terminal problem*) je izražen kod MAC protokola CSMA (eng. *Carrier Sense Multiple Access*) tipa, kod kojih čvor pre slanja poruke osluškuje medijum, da bi izbegao koliziju (i retransmisiju koja bi nakon toga usledila). Ukoliko ne čuje ništa, može da emituje svoju poruku, u suprotnom odlaže emitovanje. Problem je moguće objasniti uz pomoć tri čvora, *A*, *B* i *C* (Sl. 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* 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* u tački čvora *B*. Signali dve poruke se mešaju i čvor *B* ne može ispravno da primi ni jednu poruku.

Problem izloženih terminala (eng. *exposed terminal problem*) je moguće objasniti uz pomoć četiri čvora, *A*, *B*, *C* i *D* (Sl. 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.



Sl. 3.1 Scenario sakrivenih terminala

U žičanom medijumu, obično postoji mogućnost da predajnik detektuje pojavu koliziju u tački prijema i momentalno obustavi predaju. Ova mogućnost se naziva detekcijom kolizije (CD – *Collision Detection*) i u kombinaciji sa CSMA (CSMA/CD) se koristi radi povećanja propusnosti u protokolima za žičanu komunikaciju kao što je *Ethernet*. Detekcija kolizije je moguća zbog malog slabljenja žičanog medijuma – signal u tački predajnika je po nivou i obliku približan signalu u tački prijemnika. Dakle, ako predajnik primeti koliziju (signal na liniji ne odgovara signalu koji trenutno šalje), izvesno je da je kolizija prisutna i u tački prijema. Podjednako bitno, odsustvo kolizije u tački predaje znači da kolizije nema ni u tački prijema. Nažalost, ni jedan od ova dva zaključka ne važi u bežičnom komunikacionom medijumu – postojanje/nepostojanje interferencije u tački predaje ne govori mnogo o uslovima koji trenutno vladaju u tački prijema. Uz to, jednostavni RF primopredajnici rade isključivo u polu-dupleks režimu, što znači da je u bilo kom trenutku aktivan ili predajnik ili prijemnik, ali ne oba, što onemogućava oslušivanje medijuma tokom predaje. Dakle, MAC protokoli zasnovani na detekciji kolizija nisu primenljivi u bežičnoj komunikaciji.

Poseban problem nastaje u uslovima kada više bežičnih mreža (sistema) deli isti frekventni opseg (npr. ISM opsege). Zbog nemogućnosti koordinacije aktivnosti različitih sistema, iz perspektive jednog sistema svi ostali deluju kao izvori interferencije.

Konačno, projektovanje MAC protokola zavisi i od očekivanih karakteristika saobraćaja. Na primer, ukoliko WSN uglavnom nadgleda fizičko okruženje, može se očekivati periodični saobraćaj ujednačenog intenziteta. Međutim, raspodela saobraćaja u vremenu biće značajno drugačija ako je glavni zadatak mreže da detektuje događaje. Za vreme dok čeka da se događaj desi, što predstavlja najveći deo vremena, komunikacije u mreži su sporadične. U momentu kada detektuju događaj, čvorovi generišu veliki broj paketa koje treba što pre isporučiti baznoj stanici. Pod ovakvim uslovima, zadatak MAC protokol je značajno složeniji jer bi trebalo da obezbedi ekstremnu energetska efikasnost tokom mirnih perioda i dovoljno visoku komunikacionu propusnost tokom perioda povećanog intenziteta saobraćaja.

3.2. *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 [1].

3.2.1. Protokoli sa fiksnom dodelom resursa

Kod protokola sa fiksnom dodelom resursa 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 opasnosti 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 potrebno izvršiti preraspodelu resursa, što dovodi u pitanje skalabilnost ovih protokola. Tipični predstavnici klase protokola sa fiksnom dodelom resursa su TDMA, FDMA i CDMA.

TDMA (*Time Division Multiple Access*) - podeli podleže vreme, koje se deli na cikluse fiksne dužine, tzv. frejmove ili okvire a svaki frejm na slotove. Slotovi se dodeljuju čvorovima na ekskluzivno korišćenje, tako da 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.

FDMA (*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 preciznu frekventnu sinhronizaciju, upotrebu uskopojasnih filtera i primopredajnika koji imaju sposobnost biranja frekvencije emitovanja/prijema, što ih čini skupljim od onih koji rade u TDMA režimu.

CDMA (*Code Division Multiple Access*) - 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 CDMA kôdova može ostvariti istovremeni prenos više poruka 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 dodele resusa. Recimo, moguće je koristiti TDMA šemu za podelu vremena na slotove a FDMA (ili CDMA) za razdvajanje transmisija u okviru slotova.

3.2.2. Protokoli sa dodelom resursa na zahtev

Kod protokola sa dodelom resursa na zahtev medijum se dodeljuje na kratko vreme, obično za samo jednu transmisiju. Ovi protokoli mogu da se podele na centralizovane i distribuirane.

Centralizovani protokoli. Kod ovih protokola (kao što je, npr. HIPERLAN/2 [38]) 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 [39].

Distribuirani protokoli. Primer distribuiranog protokola sa dodelom resursa na zahtev su tzv. *token-passing* protokoli, poput IEEE 802.4 *Token Bus* (namenjen „žičanim“ lokalnim računarskim mrežama). Pravo transmisije je vezano za prijem jednog posebnog kratkog paketa, tzv. tokena. Token se rotira među čvorovima koji dele zajednički komunikacioni medijum, ali su logički povezani u prsten. Posebne procedure su predviđene za situacije kao što je dodavanje/odstranjivanje čvora i gubitak tokena. Postoje i varijante *token-passing* protokola za bežične mreže, međutim, one pate od problema uspostavljanja i održavanja dugačkog prstena u uslovima povećane stope grešaka. Uz to, čvor mora neprestano biti na prijemu kako ne bi propustio token, što bi dovelo do raskidanja logičkog prstena. Takođe, održavanje logičkog prstena u uslovima

čestih promena u topologiji mreže nije lak zadatak i osim tokena, zahteva uvođenje dodatnih paketa za signalizaciju.

3.2.3. Protokoli sa proizvoljnim pristupom

Protokoli sa proizvoljnim pristupom funkcionišu potpuno distribuirano, i obično ispoljavaju nedeterminizam u radu, recimo, postavljaju tajmer na proizvoljno vreme ili računaju sa proizvoljnim vremenom pristizanja paketa.

ALOHA – prvi i još uvek veoma važan protokol iz ove grupe, koji je razvijen 70' godina prošlog veka na *University of Hawaii* [40]. 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 (*Slotted Aloha*) [41] deli vreme na slotove dovoljnog trajanja da se pošalje cela poruka, tako da čvor sme da šalje poruku samo na početku svakog slota. Kolizija nastupa ako dva ili više čvorova koriste isti slot za slanje svojih paketa. Međutim, čvor koji je generisao paket tokom trajanja slota, odlaže slanje paketa do početka sledećeg slota i na taj način ne narušava prenos koji je u toku. Zahvaljujući sinhronizaciji verovatnoća kolizije je smanjena, što čini protokol *slotted ALOHA* efikasnijim od bazičnog ALOHA protokola.

CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*, višestruki pristup sa osluškivanjem nosioca) - 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 na osnovu jednog od nekoliko mogućih algoritama. Kod *neperzistentnih* CSMA protokola, čvor se povlači na neko proizvoljno vreme, posle koga ponovo osluškuje medijum. Dok čeka, čvor ne obraća pažnju na medijum. Kod *perzistentnog* CSMA protokola, čvor nastavlja da osluškuje medijum da bi detektovao kad medijum postane slobodan, a nakon toga se ponaša u skladu sa algoritmom za povlačenje. Postoje različite varijante CSMA algoritma, ali kod većine važi da se vreme posle završetka tekuće transmisije deli na slotove. Kod *p-perzistentnog CSMA*, čvor započinje slanje u tekućem slotu sa verovatnoćom p , što znači da propušta tekući slot sa verovatnoćom $1-$

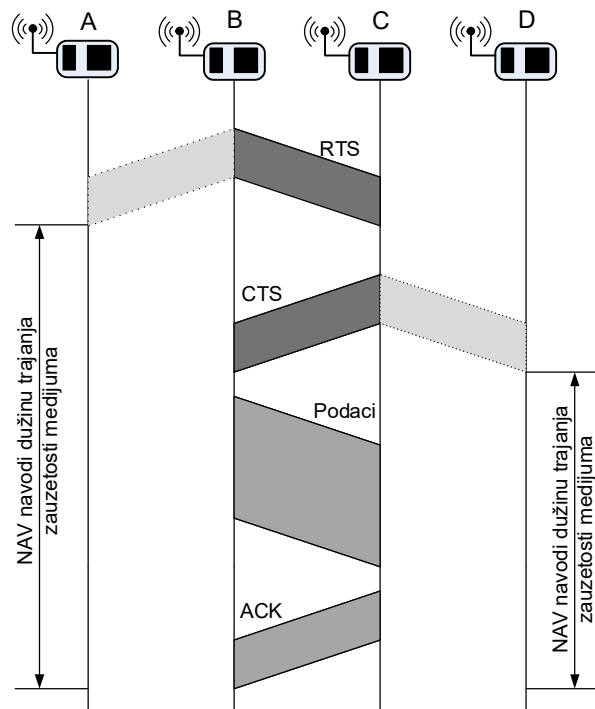
p . Ukoliko neki drugi čvor započne slanje u međuvremenu, čvor se povlači, čeka da se završi prenos i ponovo primenjuje algoritam za povlačenje. Što je p manje, to je verovatnoća kolizije manja, ali je zato vreme pristupa mreži duže.

Kod protokola IEEE 802.11 primenjuje se DCF (*Distributed Coordination Function*), po kojoj čvor koji želi da emituje proizvoljno bira broj iz opsega *intervala nadmetanja* (*contention window*) i podešava svoj brojač na ovu vrednost. Brojač odbrojava protekle vremenske slotove. Ukoliko neki drugi čvor započne slanje u međuvremenu, brojač se pauzira i nastavlja odbrojavanje po završetku tog slanja. Kad brojač odbroji do nule, čvor počinje slanje poruke. Ako dođe do greške u prenosu (na šta ukazuje npr. izostanak paketa potvrde prijema), 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. Uprkos tome što su i CSMA protokoli podložni koliziji paketa, oni obezbeđuju veću komunikacionu propusnost u poređenju sa ALOHA protokolima.

Kao što je već napomenuto, protokoli zasnovani na osluškivanju nosioca (ALOHA, CSMA) podložni su problemu skrivenih terminala s obzirom da predajnik nije u mogućnosti da detektuje interferenciju u tački prijemnika. Posledica ovog problema je mogućnost kolizije paketa. Energija koja je potrošena na emitovanje paketa uništenih kolizijom je bačena i paketi moraju ponovo da se šalju. Postoji nekoliko pristupa za rešavanje ili bar ublažavanje problema skrivenih terminala. Ovde će bit predstavljana dva takva pristupa: RTS-CTS procedura i ton zauzeća.

RTS-CTS procedura - Sl. 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) i sprovodi se na istom kanalu na kome se obavlja i prenos podataka. 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 Sl. 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 Sl. 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 verovatnoću kolizije na sledeći način: čvorovi A i D , kada prime paket RTS

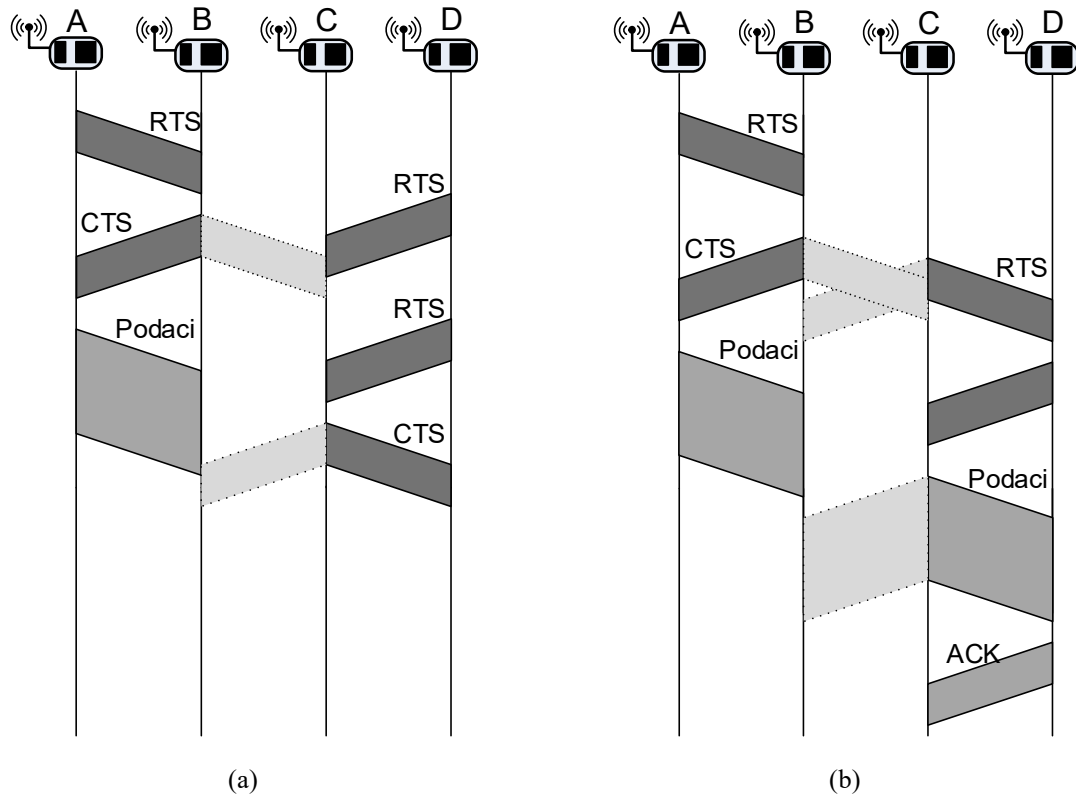
ili CTS znaju koliko je vremena preostalo za tu transakciju, tako da za to vreme ne započinju emitovanje, niti šalju CTS pakete.



Sl. 3.2 RTS-CTS procedura kod IEEE 802.11

RTS-CTS procedura značajno smanjuje verovatnoću kolizije podataka, ali ne eliminiše u potpunosti mogućnost da do kolizije dođe. Sl. 3.3(a) prikazuje sledeći mogući scenario kolizije: Čvor *A* započinje sekvencu RTS-CTS-podaci-ACK sa čvorom *B*. Čvor *C*, iako ne čuje RTS, može da čuje paket CTS, ali u tom trenutku čvor *D* započinje sekvencu sa čvorom *C*, tako da njegov paket RTS ometa *C* da čuje CTS koji potiče od čvora *B* i zbog toga *C* 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 izaziva koliziju kod čvora *B*, koji ne uspeva da primi podatke od čvora *A*.

Sl. 3.3(b) prikazuje još jedan od mogućih problema. Čvor *C* počinje slanje paketa RTS čvoru *D* malo pre nego što može da primi paket CTS od čvora *B*, zbog čega nije svestan da će izazvati koliziju. *C* 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*.



Sl. 3.3. Dva problema RTS-CTS procedure

Jedan od načina da se eliminišu poslednja dva problema je da paket CTS traje duže od paketa RTS. Razmotrimo, npr. scenario sa Sl. 3.3(b). Pod pretpostavkom da prenos paketa CTS duži od prenosa paketa RTS, u situaciji kad čvor *B* počne emitovanje CTS paket za vreme dok *C* emituje svoj RTS paket, *C* ima vremena da završi emitovanje, prebaci se na prijem i detektuje prisustvo signala čvora *B*. Uvodi se dodatno pravilo koje nalaže čvoru *C* da u ovakvoj situaciji obustavi transmisiju na vreme koje je dovoljno za prenos paketa podataka maksimalne dužine. Ako tako postupi, čvor *A* će uspeti da prenese paket podataka čvoru *B*.

Poslednji problem kod korišćenja RTS-CTS procedure je u velikom višku podataka koji se šalju, što je tri poruke viška po svakom paketu podataka (RTS, CTS i ACK). Kada su paketi podataka mali, ovaj višak može da bude veći od korisne informacije. To znači da RTS-CTS procedura nije efikasna kod mreža u kojima se razmenjuju kratke poruke. Ovaj problem bi mogao da se prevaziđe povećanjem dužine poruka. Međutim, prilikom slanja velikih paketa je veća verovatnoća da će paket biti izgubljen zbog smetnji koje uzrokuju greške u prenosu. Dobar kompromis za ovaj slučaj bi bilo da se duge poruke dele na fragmente koji se nezavisno potvrđuju, a RTS-CTS koriste samo jednom za celu poruku.

3.3. *MAC protokoli za WSN*

U slučaju MAC protokola za WSN balans zahteva je drugačiji nego kod tradicionalnih bežičnih mreža. U poređenju sa tradicionalnim bežičnim mrežama, WSN 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 WSN. Uprkos tome, do danas je predložen veliki broj MAC protokola za primenu u WSN, od kojih svaki na neki specifičan način postiže balans između potrošnje energije i performansi.

3.3.1. **Zahtevi pri dizajniranju MAC protokola za WSN**

U ovom odeljku su analizirani glavni zahtevi koje treba da ispuni MAC protokol za WSN. 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 RF 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 WSN energetska komunikacija od ključne važnosti. Glavni problemi koji povećavaju potrošnju energije, tj. smanjuju energetska efikasnost su:

- **Kolizije.** Posledice kolizije su: beskorisno trošenje energije na prijem na strani odredišnog čvora, beskorisno trošenje energije na predaju na strani izvornog čvora i potreba za retransmisijom izgubljenog paketa. Zbog toga, pojavu kolizija treba sprečiti, bilo tako što će mogućnosti za koliziju biti eliminisane dizajnom protokola (protokoli sa fiksnom dodelom resursa/TDMA ili protokoli sa dodelom resursa na

zahtev), bilo primenom procedura za izbegavanje kolizija i rešavanje problema skrivenih terminala kod CSMA protokola. Treba napomenuti da je stoprocentno sprečavanje kolizija praktično nemoguće u realnim uslovima i da problem kolizija posebno dolazi do izražaja pri povećanom intenzitetu saobraćaja. Međutim, ukoliko konkretna aplikacija generiše mrežni saobraćaj malog intenziteta, kolizije, pa čak i kada se povremeno javljaju, neće predstavljati bitan problem.

- **Preslušavanje** (*overhearing* - nepotreban prijem „tuđih“ paketa). Većina paketa koji se prenose u WSN ima jedan izvor i jedno odredište (tzv. *unicast* paketi). Međutim, budući da je bežični medijum difuznog karaktera, emitovani paket ne stiže samo do čvora kome je namenjen već i do svih ostalih suseda izvornog čvora, koji, ako su trenutno u režimu prijema, primaju paket, a onda ga odbacuju. (Dva čvora su *susedi* ako su jedan drugom u RF dometu.) Pojava da čvor prima pakete koji nisu njemu namenjeni naziva se preslušavanjem. Ukoliko se ne preduzmu odgovarajuće mere, preslušavanje može biti značajan izvor energetske gubitaka naročito u gustim mrežama. Na primer, ako čvor *A* šalje paket čvoru *B* i u RF dometu čvora *A* postoji 20 čvorova, i svi oni su u režimu prijema, na prenos paketa biće utrošena energija u iznosu $E_{tx} + 20E_{rx}$, gde je E_{tx} energija potreba za emitovanje paketa (čvor *A*) i E_{rx} energija za prijem paketa (čvor *B* plus 19 ostalih suseda čvora *A*). Sa stanovišta energetske efikasnosti, najbolje bi bilo da su tokom prenosa paketa između čvorova *A* i *B*, svi ostali susedi čvora *A* u režimu spavanja. Međutim, ukoliko to nije moguće postići, efekat preslušavanja se može ublažiti ako čvor odustaje od daljeg prijema nakon prijema zaglavlja paketa (adresa odredišnog čvora je sadržana u zaglavlju paketa). U nekim slučajevima, preslušavanje je poželjno, na primer, ako informacije prikupljene iz tuđih paketa mogu svrsishodno da se iskoriste (npr. otkrivanje novih suseda, procena trenutnog intenziteta saobraćaja i sl).
- **Režijski troškovi protokola** (*protocol overhead*) potiču od potrebe razmene dodatnih, kontrolnih paketa (poput paketa tipa RTS-CTS-ACK) i dodatnih podataka u okviru paketa podataka (zaglavlje i završni zapis paketa).
- **Pasivno slušanje** (*idle listening*). Čvor je u pasivnom (*idle*) režimu ukoliko je spreman za prijem paketa, ali trenutno ne prima nikakav signal (zato što ni jedan čvor koji je u njegovom RF dometu trenutno ne emituje paket). Kao što je to već napomenuto, potrošnja energije u pasivnom režimu je približna potrošnji u režimu

prijema. Zbog toga, pasivno slušanje je skupa i nepotrebna aktivnost, pre svega u uslovima malog intenziteta saobraćaja u mreži. Rešenje je da čvor provodi vreme u režimu spavanja ako nema šta da prima. Međutim, pošto buđenje primopredajnika takođe troši energiju, učestanost uspavlivanja bi trebalo držati na „razumno“ niskom nivou. Uz to, postavlja se pitanje kako čvor može da zna kad da očekuje poruku da bi se pravovremeno probudio. TDMA protokoli implicitno rešavaju ovaj problem – čvor razmenjuje (šalje/prima) podatke samo tokom vremenskog slota koji mu je dodeljen, dok tokom ostalih slotova može slobodno da isključi svoj primopredajnik.

Vreme života senzorskog čvora. Iako je WSN otporna na otkaze pojedinih čvorova, postepeno otkazivanje čvorova vodi padu performansi i preuranjenom prekidu rada mreže. Zato je osim prosečnog vremena života bitna karakteristika senzorskog čvora i standardna devijacija vremena života. Na životni vek senzorskog čvora utiče mnoštvo faktora, kao što su protokol za rutiranje ili mehanizam za kontrolu topologije, ali dominantan uticaj ima energetska neefikasnost MAC protokola.

Skalabilnost. U idealnom slučaju, MAC protokol bi trebalo da pruži isti nivo performansi nezavisno od veličine i gustine mreže, koje mogu da se veoma razlikuju u zavisnosti od konkretne primene. U realnosti to nije tako: u oblastima sa većom gustinom čvorova dolazi do pada komunikacionih performansi. Na skalabilnost MAC protokola može da se utiče izborom arhitekture mreže i metoda rutiranja.

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, 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. 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.

Garantovano kašnjenje. Pojedine primene WSN, kao što je npr. praćenje pokretnih ciljeva, zahtevaju dostavljanje podataka sa garantovanim kašnjenjem. Svi podaci nemaju isti značaj, tako da je obično stroga kontrola kašnjenja u prenosu 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.

Pouzdanost. Iako je pouzdan prenos podataka univerzalan zahtev, ne može se garantovati, posebno u bežičnim komunikacijama. Međutim, zadovoljavajući nivo pouzdanosti se može postići izborom frekventnog kanala koji nije zagušen, izbegavanjem preopterećenih čvorova i otkrivanjem izgubljenih paketa i ponavljanjem prenosa. Takođe, može se smanjiti i sprečavanjem kolizija ili bar smanjenjem verovatnoće da se kolizija desi. Obično postoje kompromisi između viška kontrolnog saobraćaja i nivoa pouzdanosti.

Propusna moć mreže. Definiše se kao ukupan broj paketa (ili bajtova) koje primi određište (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 WSN, za razliku od tradicionalnih bežičnih mreža, propusna moć je u drugom planu.

3.3.2. Klasifikacija MAC protokola za WSN

MAC protokoli za tradicionalne bežične mreže ne odgovaraju zahtevima koje postavljaju WSN. Ove šeme troše previše energije, pošto zahtevaju da mrežni čvorovi konstantno oslušuju medijum (što stvara problem pasivnog slušanja). Osim toga, zahtevaju i razmenu kontrolnih paketa da bi se izbegla kolizija (što dovodi do velikih režijskih troškova protokola). 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 direktno da se primene na multihop način transmisije koji je specifičan za WSN.

Pošto konstrukcija WSN zavisi od konkretne primene, razvijeno je više različitih grupa MAC protokola, koji odgovaraju različitim primenama. Tako je MAC protokole za WSN moguće podeliti na četiri grupe [42]:

- **Protokoli sa semplovanjem preambule** - odgovarajući za retko slanje izveštaja baznoj stanici, npr. periodična merenja;

- **Protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom** - optimizovani za saobraćaj srednje gustine, tipično za industrijsku primenu;
- **Protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu** - optimizovani za gust, periodičan saobraćaj, tipično za multimediju;
- **Hibridni protokoli** - kombinuju prednosti više protokola iz prethodne tri kategorije.

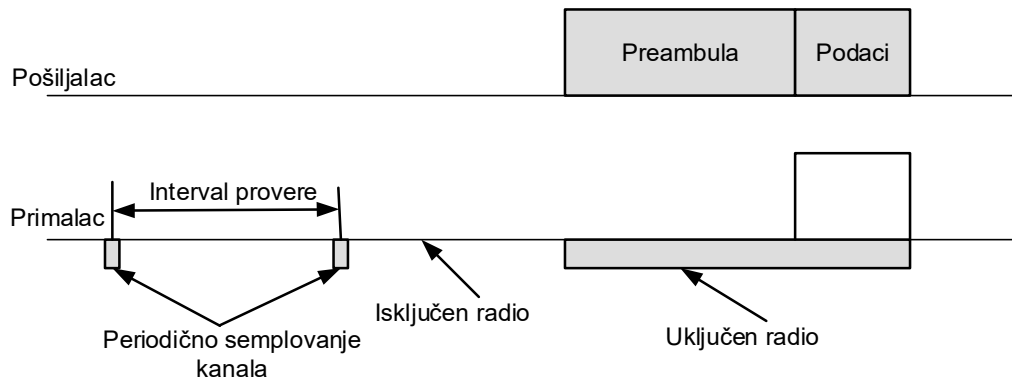
3.3.3. Protokoli sa semplovanjem preambule

MAC protokoli sa semplovanjem preambule teže smanjenju na minimum komunikacionih aktivnosti senzorskog čvora tako što izbegavaju trošenje (previše) vremena na pasivno slušanje. U idealnom slučaju, čvor bi trebalo da napušta režim spavanja samo onda kad treba da pošalje ili primi paket. Ovako nešto bi na principijelnom nivou bilo moguće ako bi predajnik imao mogućnost da na neki način probudi prijemnik neposredno pre početka emitovanja paketa. Nažalost, princip „daljinskog buđenja“ je teško izvodljiv na tehničkom nivou. Zbog toga, razvijeno je nekoliko alternativnih pristupa, zasnovanih na semplovanju preambule, koji u manjoj ili većoj meri „simuliraju“ koncept buđenja na daljinu.

Osnovni princip rada protokola sa semplovanjem preambule se sastoji u sledećem: Senzorski čvorovi provode veći deo vremena u režimu spavanja i periodično se bude na kratak vremenski period da bi oslušnuli kanal. Period na koji se budi čvor naziva se interval provere. Sl. 3.4 prikazuje primer funkcionisanja protokola. Ukoliko ne detektuje signal, čvor se veoma brzo vraća u režim spavanja. Ukoliko detektuje signal, čvor ostaje u aktivnom stanju dok ne primi ceo paket, zatim eventualno pošalje ACK paket i tek se tada vraća u režim spavanja. Čvor ispravno prima paket samo ako se probudio tokom trajanja preambule paketa (otuda pojam „semplovanje preambule“). Zbog toga, najmanje trajanje preambule treba da bude jednako dužini trajanja intervala provere. Možemo zamisliti da preambula deluje kao ton za buđenje okolnih čvorova. Da bi se sprečila kolizija, predajni čvor pre emitovanja preambule osluškuje kanal i povlači se ako detektuje signal.

CCA (*Clear Channel Assignment*) je postupak pomoću kojeg se utvrđuje da li je kanal slobodan/zauzet, tj. da li u kanalu postoji signal ili ne. Obično se izvodi pomoću ispitivanja praga, što podrazumeva merenje nivoa prijemnog 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 nije idealna jer može da da lažne pozitivne indikacije (indikacija da je kanal zauzet, a zapravo je slobodan), što dovodi do povećanja

vremena pasivnog slušanja. Tipični predstavnici ove grupe MAC protokola su *Preamble-Sampling ALOHA*[9], *Preamble-Sampling CSMA* [43], *Cycled Receiver* [44], *LPL* [45] i *Channel Polling* [46].



Sl. 3.4. Princip rada MAC protokola sa semplovanjem preambule

Tehnika semplovanja preambule ne zahteva uspostavljanje vremenske sinhronizacije između čvorova i uz to je veoma jednostavna. Tehnikom se postiže ekstremno niska potrošnja energije čvorova tokom mirnog režima (nemaju potrebu da šalju pakete) – radni ciklus primopredajnika „mirnog“ čvora je reda 1 : 2000 (npr., 0.5 ms za semplovanje preambule u intervalu provere od 1 s). Zbog toga, semplovanje preambule je pogodno za primene kao što je detekcija događaja u kojima je mreža najveći deo vremena neaktivna.

Međutim, u svom osnovnom obliku tehnika semplovanja preambule pati od nekoliko ozbiljnih problema. Prvo, zbog produženog trajanja preambule (duže od intervala provere prijemnika) povećana je potrošnja energije na strani predajnika (predajnik može da potroši više energije na emitovanje preambule nego na emitovanje ostatka paketa). Takođe, preambula ne budi samo čvor kome je paket namenjen, već budi sve čvorove u radio dometu predajnika, što dovodi do pojave preslušavanja paketa. Uz to, probuđeni čvor (jedan ili više njih) mora da „odsluša“ preambulu do kraja da ne bi propustio paket, što značajno povećava vreme provedeno na prijemu. Drugo, dok predajni čvor emituje preambulu, svi čvorovi u njegovom susedstvu su sprečeni da šalju svoje pakete (produžena preambula ne samo što troši energiju predajnog čvora već troši komunikacioni kapacitet bežičnog medijuma i smanjuje propusnu moć mreže). Šta više, tehnika semplovanja preambule pati od problema skrivenih terminala. Treće, latencija paketa (vreme od trenutka kada se u predajnom čvoru generiše paket do trenutka kad prijemnik primi paket) je velika. Da bi se otklonili nedostaci tehnike semplovanja preambule, razvijeno je nekoliko poboljšanja, kao što su: *WiseMAC* [10], koji uvodi

sinhronizaciju, X-MAC [47], koji paketizuje preambulu, RI-MAC, koji menja uloge predajniku i prijemniku, i mnogi drugi.

3.3.4. Protokoli zasnovani na zajedničkom aktivnom periodu

Osnovna karakteristika protokola zasnovanih na zajedničkom aktivnom periodu je postojanje zajedničkih aktivnih i neaktivnih perioda na nivou svih čvorova u mreži. Aktivni periodi se koriste za komunikaciju, a neaktivni za uštedu energije. Ovaj pristup zahteva uspostavljanje i održavanje vremenske sinhronizacije između čvorova. Možemo zamisliti da je tokom neaktivnog perioda celokupna mreža “isključena“, a tokom aktivnog „uključena“. Čvorovi provode neaktivni period u režimu spavanja. Na početku aktivnog perioda svi čvorovi se (istovremeno) bude, po potrebi komuniciraju i po isteku aktivnog perioda ponovo uspavljaju. Tokom aktivnih perioda, čvorovi se nadmeću za pristup kanalu korišćenjem mehanizama za razrešavanje komunikacionih konflikata kao npr. CSMA.

Protokoli sa zajedničkim aktivnim periodom postižu najbolje performanse u primenama sa periodičnim i ujednačenim saobraćajem, npr. nadgledanje okruženja, a manje su efikasni u uslovima saobraćaja promenljivog intenziteta: dok je saobraćaj niskog intenziteta, energija se nepotrebno troši na pasivno slušanje tokom aktivnog perioda; pri saobraćaju visokog intenziteta koncentrisanje komunikacija u okviru kratkog aktivnog perioda može da dovede do učestalih kolizija, a time i do povećanog gubitka energije.

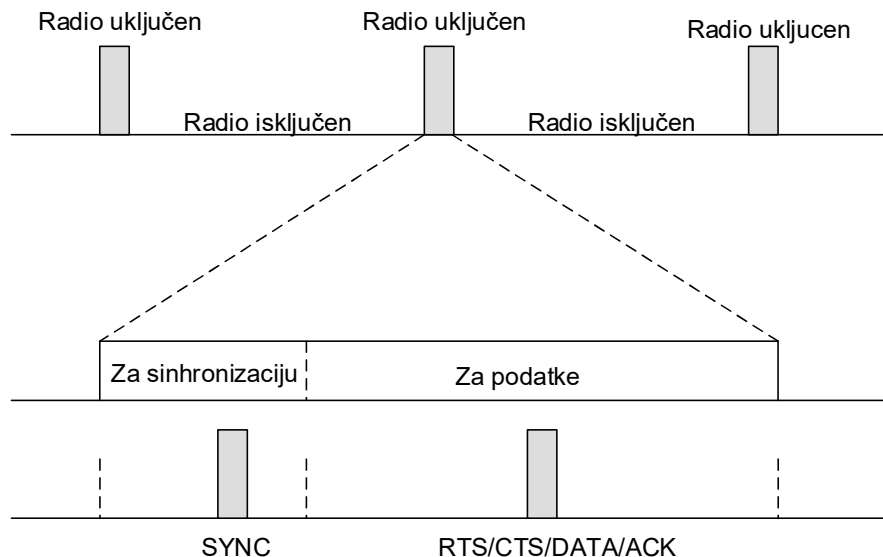
S-MAC (*Sensor-MAC*) je tipičan predstavnik ove grupe protokola [11]. On je jedan od prvih MAC protokola prvenstveno namenjenih WSN. Protokol redukuje pasivno slušanje naizmenično i sinhronizovano prebacujući čvorove iz aktivnog u neaktivni režim rada. Aktivni i neaktivni period zajedno čine jedan frejm (Sl. 3.5). Aktivni periodi su fiksnog trajanja, dok trajanje neaktivnih perioda zavisi od unapred zadate vrednosti radnog ciklusa (*duty cycle* - odnos između trajanja aktivnog perioda i trajanja frejma).

Aktivni period čvora x podeljen je u tri faze:

- **Faza za sinhronizaciju:** svaki čvor ima svoj raspored buđenja (trenutak početka aktivnog perioda), što zahteva redovnu sinhronizaciju između susednih čvorova. U ovoj fazi čvor prima SYNC pakete od svojih suseda, da bi znao tačan trenutak njihovih aktivnih perioda.
- **RTS faza:** čvor je na prijemu i očekuje RTS pakete od svojih suseda. Radi sprečavanja kolizije paketa podataka usled efekta skrivenih terminala koristi se RTS-CTS procedura

(opisana u 3.2.3) RTS faza je podeljena na vremenske slotove, a čvorovi koji žele da pošalju RTS paket čvoru x nadmeću se upotrebom CSMA mehanizma sa algoritmom za povlačenje.

- **CTS faza:** čvor emituje CTS paket ako je u prethodnoj fazi primio RTS paket. Posle toga sledi razmena paketa, uz mogućnost da se delom prenese u normalno neaktivni period čvora.



Sl. 3.5 Princip rada S-MAC protokola

Prilikom nadmetanja za pristup medijumu tokom faza RTS i CTS, čvorovi dodatno koriste i tehniku virtuelnog osluškivanja kanala – NAV (*Network Allocation Vector*). NAV podrazumeva da zaglavlje svakog RTS i CTS paketa sadrži polje koje ukazuje na vreme preostalo do kraja prenosa paketa podataka. Ovo omogućava da čvor koji primi RTS ili CTS paket namenjen nekom drugom može da se povuče na odgovarajući period i tako izbegne preslušavanje, a da po isteku ovog perioda ponovo pokuša da pošalje paket. U slučajevima kada čvor šalje paket svim susedima (brodcast), usaglašavanje RTS-CTS paketima izostaje, a umesto toga čvor-predajnik primenjuje CSMA sa algoritmom za povlačenje.

Protokol S-MAC omogućava susednim čvorovima da se usaglase oko zajedničkog rasporeda buđenja i tako kreiraju tzv. *virtuelni klaster*, čime se smanjuje broj SYNC poruka koje šalje svaki čvor svojim susedima. Virtuelni klaster predstavlja deo mreže u kome su rasporedi buđenja čvorova međusobno sinhronizovani (potpuno preklapanje aktivnih i neaktivnih perioda). Celokupna mreža može biti jedan virtuelni klaster ili može biti podeljena na više virtuelnih klastera.

Zbog uvođenja neaktivnog perioda, dolazi do izvesnih problema. Propusna moć mreže se smanjuje pošto se samo aktivni deo frejma koristi za komunikaciju. Kašnjenje se povećava

zato što generisanje poruke može da se desi za vreme neaktivnog perioda, pa poruka mora da čeka do početka sledećeg aktivnog dela. Takođe, za S-MAC je karakteristično povećano komunikaciono kašnjenje pri multihop prenosu poruka. Čvor koji je primio poruku za prosleđivanje pred kraj aktivnog perioda mora da čeka na naredni aktivni period pre nego što poruku prosledi dalje. Drugim rečima, kašnjenje po jednom preskoku približno je jednako trajanju neaktivnog perioda, pod pretpostavkom da svi čvorovi slede isti raspored buđenja.

Ozbiljan nedostatak protokola S-MAC je nemogućnost prilagođenja trajanja frejma a time i aktivnog perioda trenutnoj gustini saobraćaja u mreži. 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.

U cilju otklanjanja nedostataka S-MAC-a razvijeni su brojni protokoli, kao što je T-MAC [12], koji dinamički prilagođava trajanje aktivnog ciklusa potrebama saobraćaja.

3.3.5. Protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu

U primenama gde je saobraćaj periodičan i gust najbolji rezultati se postižu primenom MAC protokola koji su zasnovani na dodeli resursa, tj. na fiksnom rasporedu korišćenja medijuma u vremenskom (i/ili frekventnom) domenu. Kod WSN, većina protokola iz ove kategorije se zasnivaju na TDMA konceptu, po kome različiti čvorovi za komunikaciju koriste različite vremenske slotove. Na taj način se redukuju ili u potpunosti eliminišu kolizije, nepotrebno slušanje i preslušavanje. Radi postizanja boljih performansi, TDMA je moguće kombinovati sa FDMA, uvođenjem komunikacije po više frekventnih kanala u okviru istog vremenskog slotu. Dobre osobine TDMA koncept su garantovano kašnjenje (zbog izostanka nadmetanja), pravičnost (slotovi se dodeljuju čvorovima na ekskluzivno korišćenje) i visoka propusna moć u uslovima gustog saobraćaja.

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:

- **Rasporeda linkova.** Pod linkom se podrazumeva uređeni par susednih čvorova (N_A i N_B), gde je N_A predajnik a N_B prijemnik. 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. Međutim, raspored linkova zahteva veliki broj slotova u frejmu da bi se obezbedio beskonfliktni raspored slotova, što povećava latenciju, što je posebno nepovoljno u multihop komunikaciji.

- **Rasporeda predajnika.** Ova tehnika podrazumeva da čvorovi koriste dodeljene slotove za slanje poruka. Ovim se eliminišu kolizije i minimizuje nepotrebno slušanje, ali ostaje problem povećane potrošnje energije usled prijema tuđih poruka, pošto se zahteva da svaki čvor bude budan u slotovima svih svojih suseda. 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.
- **Rasporeda primaoca.** Ova tehnika podrazumeva da se vremenski slot dodeli čvoru za prijem poruka. Ovim se eliminiše prijem tuđih poruka, smanjuje nepotrebno slušanje i smanjuje potrebu resinhronizacije (pošto promene na strani pošiljaoca nisu bitne za raspored). Međutim, ostaje problem kolizija, pa zahteva postojanje nekog mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata između suseda vlasnika slotova.

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

Nepostojanje centralnog entiteta na 1-hop rastojanju od svih čvorova u mreži je srž svih problema koji prate implementaciju TDMA protokola u WSN. Ovo se pre svega ogleda u potrebi korišćenja distribuiranih algoritama za održavanje čvrste sinhronizacije između čvorova i uspostavljanja validnog rasporeda slotova. Distribuirani algoritmi za raspoređivanje slotova dobro rade u malim i mrežama srednje veličine. Međutim, uspostavljanje validnog rasporeda slotova u velikom mrežama je težak problem, koji negativno utiče na skalabilnost. Opšte karakteristike TDMA protokola su:

- **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 slotova 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 energetska 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 WSN 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.

Do sada je razvijeno više različitih protokola sa vremenskim rasporedom, kao što su LMAC [15] i Crankshaft [19]. LMAC je protokol sa kreiranjem rasporeda pošiljaoca, gde svi čvorovi na početku svog slota šalju kontrolnu poruku. U kontrolnoj poruci se šalje bit maska sa zauzećem slotova u frejmu, tako da novopriključeni čvorovi mogu za sebe da izaberu slobodan slot i da to objave ostalim susedima. Crankshaft je primer protokola sa rasporedom slotova za prijem poruka, čime se drastično smanjuje gubitak energije radi nepotrebnog slušanja i preslušavanja. Da bi se povećala propusna moć mreže, uvedeni su vešekanalni TDMA protokoli, kao što su višekanalni TDMA sa rasporedom predajnika (MC-LMAC [48], TF-MAC [17]) i višekanalni TDMA sa rasporedom predajnika (Y-MAC [21]).

3.3.6. Hibridni MAC protokoli

MAC protokoli iz kategorije hibridnih protokola kombinuju prethodno predstavljene protokole u cilju poboljšanja performansi, posebno u uslovima promenljivog intenziteta saobraćaja. Pri većim gustinama saobraćaja bolje performanse pokazuju protokoli zasnovani na vremenskom rasporedu, dok pri malim gustinama saobraćaja bolje funkcionišu protokoli zasnovani na nadmetanju.

Protokol Z-MAC (*Zebra MAC*) kombinuje CSMA i TDMA [49]. Inicijalno se izvrši ekskluzivna dodela predajnih slotova u 2-hop okolini. Čvorovi tada emituju pakete u slotu koji im je dodeljen. Ako je čvoru potrebno još slotova za završetak prenosa, on pokušava da iskoristi slotove koji mu nisu dodeljeni, ali se trenutno ne koriste, na taj način što prvo sačeka neko

vreme da bi dozvolio vlasniku slotu da iskoristi svoj slot, ako to želi. Ukoliko je slot i dalje neiskorišćen po isteku ovog vremena, čvor primenjuje CSMA da bi dobio pravo ga koristiti.

Funnelling MAC je protokol namenjen WSN koje se bave prikupljanjem podataka koji se dostavljaju baznoj stanici (tzv. *convergecast*) [50]. U ovakvim okolnostima, intenzitet saobraćaja raste kako se približavamo baznoj stanici: po obodu mreže saobraćaj je slab, a u neposrednoj blizini bazne stanice veoma intenzivan. Kod Funneling MAC protokola se za čvorove u okolini bazne stanice koristi TDMA (čime se sprečavaju kolizije čak i pri velikom intenzitetu saobraćaja), a u ostatku mreže CSMA (čime se garantuje dobar odnos energija/performanse).

SCP (*Scheduled Channel Polling*) sinhronizuje aktivne periode čvorova kao S-MAC, a RTS-CTS proceduru za nadmetanje zamenjuje semplovanjem preambule [51]. U mirnom stanju mreže, protokol SCP je energetski veoma efikasan budući da se aktivnost čvorova svodi na samo jedno semplovanje kanala u aktivnom periodu, što je odlika protokola sa semplovanjem preambule. U poređenju sa protokolima sa semplovanjem preambule trajanje preambule SCP može da bude značajno manje zahvaljujući sinhronizovanom buđenju svih čvorova u mreži. U poređenju sa protokolima sa zajedničkim aktivnim periodom, SCP troši znatno manje energije na nadmetanje. Međutim, SCP pati od problema skrivenih terminala, pa zbog mogućnosti kolizije, zahteva potvrdu prijemnika nakon prijema poruke podataka (ACK).

3.4. Razrešavanje komunikacionih konflikata upotrebom RF tonova

RF ton je signal ograničenog trajanja koji ne nosi nikakvu informaciju već se koristi za binarnu indikaciju određenog stanja predajnika. RF tonove za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi posebna klasa MAC protokola za WSN. RF tonovi mogu da se emituju na posebnom kanalu i da se koriste kao zaštita poruka od kolizije – kod tona zauzeća (eng. *busy tone*). Osim toga, mogu da se koriste i u procesu nadmetanja koji prethodi prenosu poruke – ton zauzeća (eng. *black burst*) i binarno odbrojavanje (eng. *binary-countdown*, BCD).

3.4.1. Ton zauzeća

MAC protokoli zasnovani na tonu zauzeća koriste dva frekventna kanala: kanal za prenos podataka i kontrolni kanal za emitovanje tona zauzeća. Ton zauzeća je ton koji

prijemnik emituje prijemnik na kontrolnom kanalu za vreme dok na osnovnom kanalu prima poruku. Emitovanjem tona zauzeća na kontrolnom kanalu prijemnik sprečava svoje susede da počnu emitovanje na kanalu za prenos podataka, čime bi izazvali koliziju. Međutim, uprkos uspešnom eliminisanju kolizija, svi protokoli zasnovani na upotrebi tona zauzeća imaju problem: povećanu potrošnju energije, što ih čini nepodesnim za upotrebu u WSN.

BTMA protokol je namenjen singlhop mrežama sa centralnom baznom stanicom [22]. Kod ovog protokola bazna stanica emituje ton zauzeća na kontrolnom kanalu ukoliko detektuje nosilac na kanalu za prenos podataka. Senzorski čvor koji želi da pošalje paket, prvo proverava da li se na kontrolnom kanalu čuje ton zauzeća i ukoliko je kontrolni kanal slobodan emituje svoju poruku. Ukoliko je kontrolni kanal zauzet, čvor se povlači da ne bi izazvao koliziju sa prenosom koji je u toku i nakon nekog vremenskog perioda (slučajno izabranog trajanja) pokušava ponovo. Iako rešava problem skrivenih terminala u multihop mrežama, ovako definisan BTMA ne rešava problem skrivenih i izloženih terminala u multihop mrežama.

RI-BTMA protokol takođe koristi odvojen kontrolni kanal [23]. Senzorski čvor koji želi da pošalje poruku prvo proverava kontrolni kanal. Ukoliko je slobodan, počinje emitovanje RTS paketa sa adresom prijemnika na kanalu za prenos podataka i čeka na signal zauzeća na kontrolnom kanalu. Prijemnik koji čuje svoju adresu na kanalu za prenos podataka počinje emitovanje tona zauzeća na kontrolnom kanalu i emituje ga do kraja prenosa podataka. Ukoliko predajnik čuje ton zauzeća, počinje slanje poruke na kanalu za prenos podataka; u suprotnom se povlači i pokušava prenos podataka kasnije. Na ovaj način ton zauzeća služi i kao CTS paket i kao ton rezervacije za kanal podataka, čime se rešava problem skrivenih terminala.

DBTMA protokol je distribuirano rešenje za *ad hoc* mreže [24]. Protokol koristi dva tona zauzeća na dva kontrolna kanala. Jedan emituje prijemnik prilikom prijema podataka (tzv. prijemni ton zauzeća), a drugi emituje predajnik u toku slanja RTS paketa, da bi se dodatno smanjila mogućnost kolizije (tzv. predajni ton zauzeća). Čvor koji želi da pošalje poruku prvo osluškuje oba kontrolna kanala. Ukoliko je bar jedan kanal zauzet, odustaje i pokušava ponovo kasnije; u protivnom, započinje proceduru slanja tako što šalje RTS paket na kanalu za prenos podataka i emituje predajni ton zauzeća. Kada je RTS paket poslat, prekida emitovanje predajnog tona zauzeća i čeka na prijemni ton zauzeća. Kada potencijalni prijemnik čuje predajni ton zauzeća počinje emitovanje prijemnog tona zauzeća i emituje ga do kraja perioda potrebnog za prijem celog paketa podatka. Predajnik koji čuje prijemni ton zauzeća emituje svoju poruku. Na ovaj način, DBTMA uspešno otklanja problem skrivenih i izloženih

terminala, ali po cenu dodatnog hardvera i dodatnog kašnjenja zbog generisanja i detektovanja dodatnog tona zauzeća na dodatnom kanalu.

3.4.2. Ton zaglušenja

Posebna grupa protokola koristi ton zaglušenja (eng. *jamming signal*), pošto detektuju da je kanal slobodan [25]. Ton zaglušenja se koristi za nadmetanje senzorskih čvorova za pravo pristupa medijumu. Svi čvorovi koji žele da pošalju poruku sinhronizovano počinju emitovanje tona zaglušenja različitog trajanja. Kada senzorski čvor završi emitovanje, osluškuje medijum. Ukoliko je medijum još uvek zauzet, to znači da neki drugi senzorski čvor emituje duži ton zaglušenja i da je čvor izgubio, u protivnom čvor smatra da je pobednik nadmetanja i može da emituje svoj paket podataka.

Black-Burst šema za nadmetanje kod singlhop mreža deli čvorove u dve grupe, na čvorove sa visokim prioritetom i čvorove sa niskim prioritetom [25]. Ton zaglušenja koriste čvorovi sa visokim prioritetom, na sledeći način: čvor koji želi da pošalje poruku osluškuje kanal i, ukoliko je slobodan, započinje emitovanje tona zaglušenja. Trajanje tona zaglušenja postavlja svaki čvor visokog prioriteta za sebe i zavisi od kašnjenja kroz mrežu koje taj čvor detektuje. Po završetku emitovanja čvor ponovo sempluje kanal i ukoliko je zauzet, odustaje od slanja. Ovim se omogućava da pobedi čvor sa najdužim tonom zaglušenja, tj. sa najdužim kašnjenjem. Čvorovi sa niskim prioritetom koriste običan CSMA/CA za nadmetanje ukoliko nema čvorova visokog prioriteta zainteresovanih za slanje.

Priority MAC protokol implementira prioritete kod bežičnih *ad-hoc* mreža na sličan način kao Black-Burst [26]. U mreži koja nudi K različitih klasa servisa, svakoj klasi je pridruženo trajanje tona zaglušenja srazmerno prioritetu. Na ovaj način, pobednik nadmetanja je uvek čvor koji ima najviši prioritet, jer je emitovao najduži ton zaglušenja.

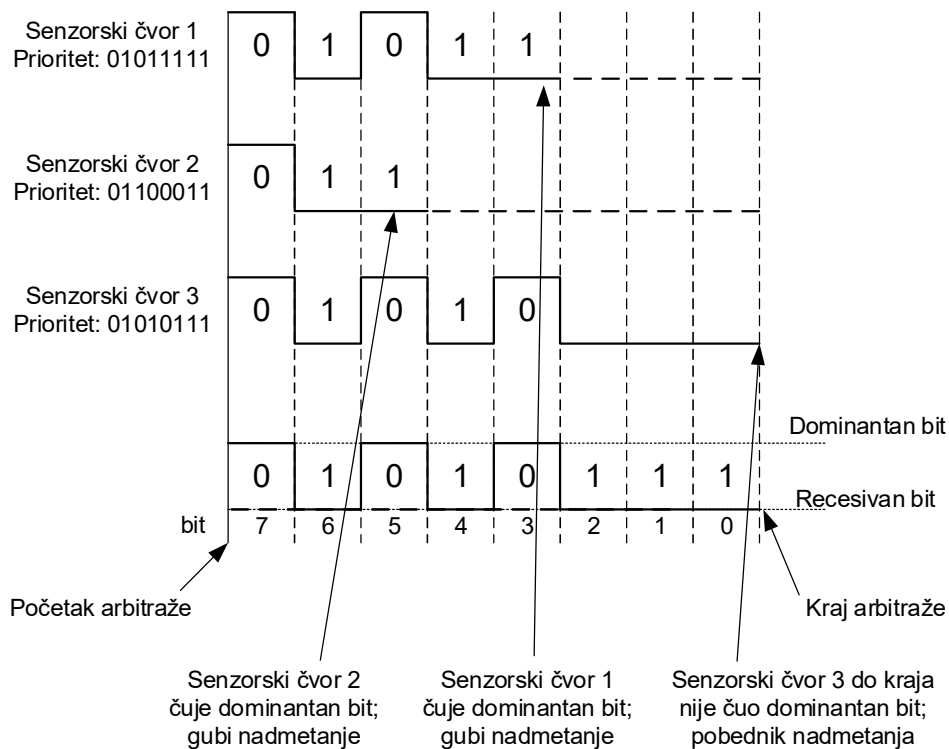
3.4.3. Binarno odbrojanje (BCD)

Protokoli sa binarnim odbrojanjem za bežične mreže primenjuju princip arbitraže poznat iz CAN magistrala (*Controller Area Network*). CAN magistrala [27] kod žičanih mreža koristi bit-dominantnu arbitražu. Kod CAN-a se prioritet čvorova kodira jedinstvenom binarnom sekvencom fiksne dužine. Princip arbitraže omogućava da čvor sa najvećom (ili najmanjom) binarnom sekvencom dobije pravo pristupa komunikacionom medijumu.

Arbitraža funkcioniše na sledeći način: čvorovi koji učestvuju u nadmetanju sinhronizovano šalju svoje binarne sekvence bit po bit u fiksnim vremenskim trenucima i to tako što se logička jedinica (ili nula) kodira dominantnim signalom, a logička nula (ili jedinica) recesivnim. Ukoliko je emitovan bar jedan dominantan signal, rezultujući signal na komunikacionoj liniji će biti dominantan, ukoliko su emitovani svi recesivni signali, rezultujući signal je recesivan. Čvorovi koji su emitovali dominantan bit nastavljaju nadmetanje, kao i čvorovi koji imaju recesivan bit, a nisu primili dominantan signal, dok se ostali povlače iz nadmetanja.

CAN se u bežičnim mrežama implementira na sledeći način: dominantan signal se implementira kao RF ton određenog trajanja, a recesivni kao odsustvo signala. Čvorovi u WSN ne mogu da istovremeno emituju signal i oslušuju medijum, pa ovakvo kodiranje recesivnog signala omogućava čvorovima koji treba da pošalju recesivan signal da za to vreme oslušuju kanal, da bi detektovali dominantan signal. Na Sl. 3.6 je prikazan tok arbitraže kod BCD algoritma. U arbitraži učestvuju tri čvora, sa različitim prioritetima. Binarna „0“ se kodira kao dominantan bit a binarna „1“ kao recesivan. Posledica ovakvog kodiranja je to da se veći prioritet kodira manjim binarnim brojem. Na slici vidimo da sva tri čvora emituju bit istog prioriteta u prve dve runde. Tačnije, u slučaju binarne „0“ čvor emituje ton tokom datog bit-intervala, a u slučaju binarne „1“ čvor oslušuje kanal radi detekcije tona. To znači da u prvoj rundi svi čvorovi emituju ton, pa nema nikoga ko bi čuo dominantan signal i odustao, a u drugoj rundi svi čvorovi oslušuju, pa pošto nema emitovanja tona, čvorovi ne odustaju. Zatim, u trećoj rundi senzorski čvor 2 čuje dominantan bit usled čega se povlači iz nadmetanja, isto kao i senzorski čvor 1 dve runde kasnije. Do kraja arbitraže ostaje samo senzorski čvor 3 koji je time postao pobednik arbitraže.

Tehnika binarnog odbrojavanja se koristi u protokolima CSMA/IC [28] i WiDom [29]. Međutim, ovi protokoli obezbeđuju determinističku arbitražu samo kod bežičnih jedinstvenih brodkast domena. Zbog toga ih je nemoguće direktno primeniti na mreže sa više brodkast domena, kakve su na multihop WSN ili 1-hop zvezdaste topologije, kod kojih se svi senzorski čvorovi ne nalaze u 1-hop okolini, usled čega se javlja problem skrivenih terminala.



Sl. 3.6 Primer rada BCD algoritma

Kao pokušaj rešavanja problema skrivenih terminala u mrežama sa više brodkast domena predložena je modifikacija CSMA/IC [30], koji predlaže uvođenje posebnog kanala za slanje tona i povećanje snage slanja tona ili osetljivosti prijemnika na tom kanalu, tako da se domet tona proširi na 2 hopa u odnosu na domet poruka. Ovaj pristup funkcioniše dobro u otvorenom prostoru, ali ne i u slučajevima kad se efekat skrivenih terminala javlja usled postojanja fizičkih prepreka. Osim toga, ovaj pristup povećava i cenu RF primopredajnika, kao i njihovu potrošnju.

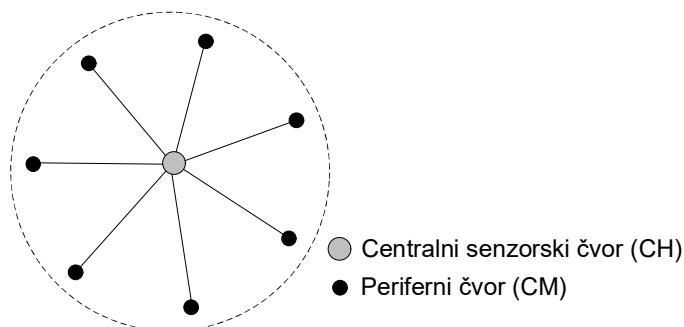
Proširenje protokola WiDom na više brodkast domena je dato u referenci [31]. Kod ovog proširenja, signaliziranje se vrši u dve faze: u prvoj fazi čvorovi emituju dominantan bit, odnosno osluškuju ukoliko imaju recesivan bit. U drugoj fazi čvorovi koji su čuli dominantan bit u prvoj fazi emituju dominantan bit. Na ovaj način, retransmisijom, domet bita se proširuje na 2 hopa. Ukoliko čvor emituje dominantan bit ili detektuje dominantan bit u jednoj od dve faze, to znači da je tekući bit dominantan. Iako ovaj protokol uspešno rešava problem skrivenih terminala, ostaje mu problem izloženih terminala.

4. TONE – razrešavanje komunikacionih konflikata primenom RF tonova

U ovom poglavlju će biti predstavljen TONE, energetske efikasan mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata u klasterima senzorskih čvorova. TONE za signalizaciju između senzorskih čvorova tokom nadmetanja koristi RF tonove i uvodi unapređen algoritam binarnog odbrojanja koji smanjuje broj emitovanih RF tonova tokom nadmetanja. Predloženi mehanizam uspešno rešava problem skrivenih terminala čime povećava propusnu moć i energetske efikasnost klastera. TONE je skalabilan, tako da ga je moguće efikasno primeniti na klaster sa malim, ali i velikim brojem čvorova.

4.1. Klasteri senzorskih čvorova

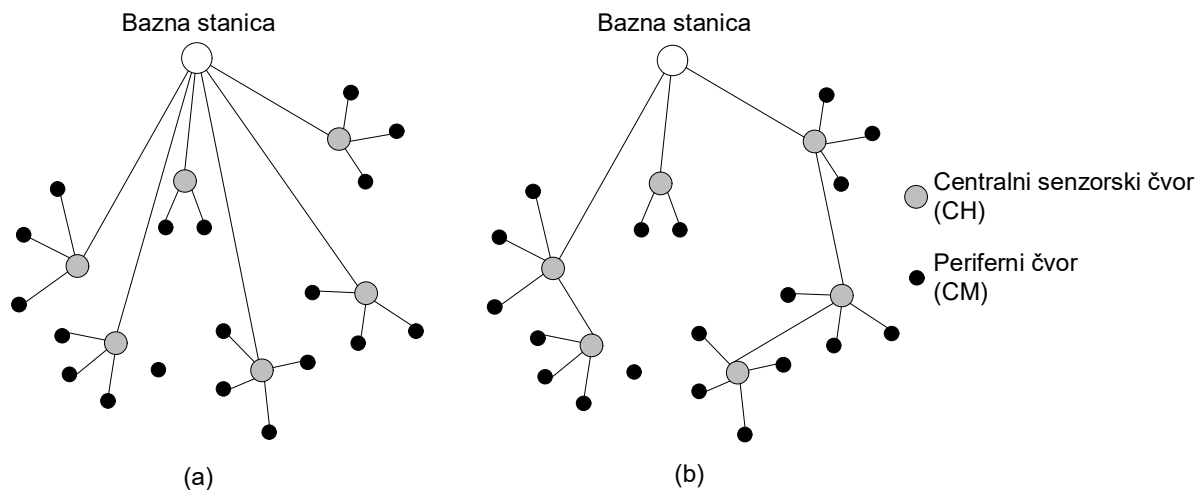
Na Sl. 4.1 je prikazan klaster, koji ima jedan centralni senzorski čvor (engl. *cluster head*, CH) i proizvoljan broj perifernih čvorova (engl. *cluster members*, CM). CM čvorovi, uz pomoć ugrađenih senzora, mere ili prate fizičke veličine ili detektuju određene događaje u svom neposrednom okruženju i povremeno šalju CH čvoru izveštaje o svojim merenjima/detekcijama.



Sl. 4.1 Klaster senzorskih čvorova

Klaster, kakav se razmatra u ovom poglavlju, javlja se u različitim kontekstima u WSN. Klaster može biti kompletna WSN i tada CH igra ulogu bazne stanice, koja predstavlja krajnje odredište podataka. Ovo odgovara WSN zvezdaste topologije, u kojoj senzorski čvorovi direktno komuniciraju sa baznom stanicom. Klaster može biti i samo jedan od mnoštva klastera formiranih u WSN prostorno razučdenih senzorskih čvorova. U slučaju hijerarhijskih WSN, CH čvor se prevashodno bavi agregacijom podataka koje dobija od CM čvorova iz svog klastera i eventualno prosleđuje rezultate agregacije dalje ka baznoj stanici, direktno ili posredno preko

CH čvorova susednih klastera (Sl. 4.2). Ovakvi klasteri mogu da se formiraju statički ili dinamički. Statički klasteri se uspostavljaju prilikom inicijalnog konfigurisanja mreže, tako da svaki čvor pripada samo jednom klasteru. Dinamički klasteri traju ograničeno vreme, nakon koga se formira nova grupa klastera. Primer dinamičkog formiranja klastera su hijerarhijske mreže, kod kojih se uloga CH rotira između senzorskih čvorova radi uravnoteženja potrošnje energije. Dinamički klasteri su karakteristični i za multihop WSN koje koriste TDMA MAC protokole, gde u svakom slotu u frejmu postoji podskup čvorova koji igraju ulogu CH, a njihovi susedi formiraju nepreklapajuće klasterne. Takvi klasteri traju tokom određenog slotu i zatim se gube sve do tog istog slotu u sledećem frejmu. Takođe, klasteri se dinamički formiraju i kod multihop WSN koji koriste MAC protokole sa zajedničkim aktivnim periodom. Ovakvi klasteri nisu vezani za vremenske slotove, već se kreiraju po potrebi, u zavisnosti od trenutnih komunikacionih zahteva senzorskih čvorova.



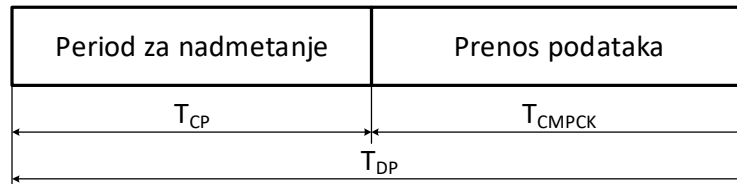
Sl. 4.2 Klasteri u hijerarhijskoj WSN: a) direktna (singlhop) komunikacija CH čvorova i bazne stanice; b) indirektna (multihop) komunikacija CH i bazne stanice

4.2. Model sistema

Nezavisno od šireg konteksta, fokus ovog poglavlja je na projektovanju energetski efikasnog mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata za primenu u intraklasterskom komunikacionom protokolu, odnosno protokolu koji reguliše komunikaciju između CM čvorova i CH čvora u istom klasteru. Pri tome, polazi se od sledećih pretpostavki:

- CM čvorovi komuniciraju isključivo sa CH čvorom, ali ne i među sobom. Komunikacija između CM čvorova s jedne i CH čvora s druge strane je direktna (singlhop) i dvosmerna. Ovo praktično znači da je CH čvor u komunikacionom dometu svakog CM čvora, i da je svaki CM čvor u komunikacionom dometu CH čvora.

- Transmisije bilo kog CM čvora mogu da detektuju neki, ali ne obavezno svi ostali CM čvorovi u klasteru. Ovo otvara mogućnost za pojavu skrivenih terminala.
- Komunikacija unutar klastera je strogo sinhronizovana. Vreme je podeljeno u vremenske slotove (trajanja T_{DP} na Sl. 4.3), predviđene za slanje najviše jednog paketa podataka.



Sl. 4.3 Organizacija frejma

- Slotovi nisu dodeljeni CM čvorovima i ne postoji bilo kakav prethodni raspored korišćenja slotova, već svaki CM čvor može da koristi bilo koji slot. Međutim, pošto u svakom slotu može da postoji više od jednog CM čvora koji želeli da pošalje svoj paket u istom vremenskom slotu, svi oni moraju da se nadmeću za pravo korišćenja slota. Nadmetanje između zainteresovanih CM čvorova, tzv. *potencijalnih pošiljaoca*, sprovodi se na početku slota, tokom perioda za nadmetanje (Sl. 4.3). CM čvor koji pobedi u ovom nadmetanju stiće pravo da u delu slota „Prenos podataka“ pošalje svoj paketa CH čvoru.

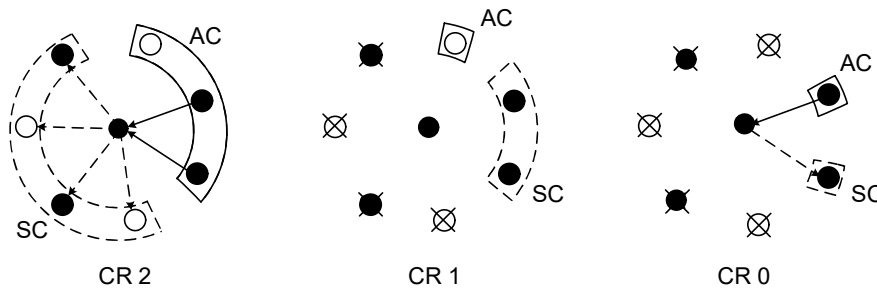
4.3. *TONE* – osnovni koncept

Predloženi TONE je mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata, zasnovan na RF tonovima, koji se koristi za nadmetanje između potencijalnih pošiljaoca tokom perioda za nadmetanje. Cilj TONE-a je da se iz skupa potencijalnih pošiljaoca izabere jedan koji će poslati svoj paket podataka u tekućem slotu.

Procedura razrešavanja konflikata kod TONE-a se odvija kroz više eliminacionih rundi (engl. *competition rounds*, CR). U toku svake eliminacione runde se grupa neeliminiranih CM čvorova rekurzivno deli u dve podgrupe: grupu aktivnih CMčvorova (engl. *active contenders*, AC) i grupu neaktivnih CM čvorova (engl. *silent contenders*, SC) i proverava se da li u AC grupi postoji bar jedan potencijalni pošiljalac. Ukoliko AC grupa nije prazna (tj. postoji bar jedan potencijalni pošiljalac), SC grupa se eliminiše i ukoliko u njoj postoje potencijalni pošiljaoci, povlače se iz nadmetanja. U suprotnom, eliminiše se AC grupa i ostaje SC grupa. Algoritam se završava kad u grupi neeliminiranih CM čvorova ostane samo jedan CM, koji je ujedno i pobednik nadmetanja.

Primer 4.1

Primer rada TONE-a je prikazan na Sl. 4.4. U ovom primeru se proces razrešenja konflikata odvija u klasteru koji sadrži 7 CM čvorova, od kojih su četiri potencijalni pošiljaoci (predstavljani crnim tačkama). U prvoj rundi (CR 2) u AC grupi se nalaze tri CM čvorova, od kojih su dva potencijalni pošiljaoci. Zbog toga se u ovoj rundi eliminiše SC grupa, pri čemu se potencijalni pošiljaoci iz ove grupe povlače iz daljeg nadmetanja a u narednu rundu prelaze čvorovi iz AC grupe. U drugoj rundi (CR 1) u AC grupi se nalazi samo jedan CM, koji nije potencijalni pošiljaoc, tako da se u ovoj rundi eliminiše AC grupa, a u narednu rundu nadmetanja prelaze CM čvorovi iz SC grupe. U trećoj rundi (CR 0) u obe grupe se nalazi samo po jedan CM. Pošto je CM iz AC grupe potencijalni pošiljaoc, u ovoj rundi se eliminiše SC grupa. Pošto je u grupi neeliminiranih čvorova ostao samo jedan CM, on je ujedno i pobednik nadmetanja a nadmetanje je završeno za 3 eliminacione runde.



Sl. 4.4 Primer 4.1: Razrešavanje komunikacionih konflikata kod TONE-a u grupi od 7 CM-a

Mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata TONE čine dve glavne komponente:

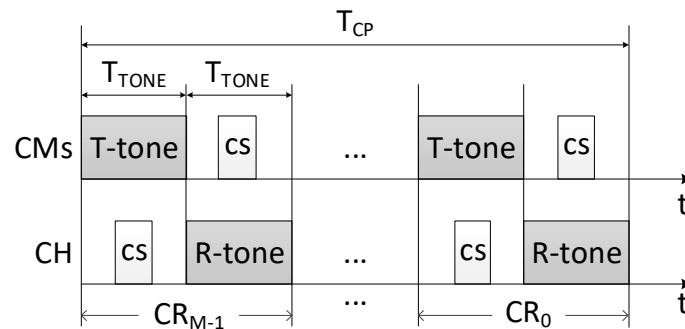
- (a) Algoritam podele grupa, i
- (b) Mehanizam za signalizaciju baziran na razmeni RF tonova.

Algoritam podele grupa deli grupu neeleminiranih CM čvorova na AC i SC grupu na početku svake eliminacione runde. Izvršava se lokalno, u neeliminiranim potencijalnim pošiljaocima, bez interakcije među njima. Mehanizam za signalizaciju proverava da li u AC grupi postoje potencijalni pošiljaoci i o tome obaveštava čvorove iz SC grupe.

4.4. Mehanizam za signalizaciju

Mehanizam za signalizaciju se koristi u svakoj eliminacionoj rundi nakon izvršene podele CM čvorova na AC i SC grupu. Za potrebe ovog mehanizma, period za nadmetanje je podeljen na M eliminacionih rundi. Svakoju rundi je dodeljen indeks r u opsegu $M - 1$ do 0. Takođe, svaka runda je podeljena na dve faze, odnosno dva mini slota trajanja T_{TONE} , kao na

Sl. 4.5. Na slici, osenčeni segmenti odgovaraju emitovanju RF tona a neosenčeni semplovanju kanala, odnosno detektovanju tona (engl. *Channel Sampling*, CS).



Sl. 4.5 Period za nadmetanje

Učesnici u sprovođenju mehanizma za signalizaciju tokom runde r su: CM čvorovi, potencijalni pošiljaoci, koji nisu eliminisani u prethodnim rundama, raspodeljeni u AC i SC grupu, i CH čvor. Svaki potencijalni pošiljalac iz AC grupe emituje RF ton tokom prvog mini slotu, neaktivan je u drugom mini slotu, a onda nastavlja nadmetanje u sledećoj rundi. RF tonove emitovane u prvom mini slotu zvaćemo T-tonovima (eng. *Transmitter-tone*, *T-tone*). CH čvor osluškuje kanal u prvom mini slotu (aktivnost označena sa CS na Sl. 4.5). Ukoliko detektuje T-ton u prvom mini slogu, CH čvor emituje ton u drugom mini slotu. Ovaj ton zvaćemo R-ton (eng. *Receiver-tone*, *R-tone*). Potencijalni pošiljaoci iz SC grupe su neaktivni u prvom mini slotu, a osluškuju kanal u drugom mini slotu. Ukoliko u drugom mini slotu detektuje R-ton, potencijalni pošiljalac iz SC grupe se povlači iz nadmetanja. U suprotnom, ukoliko ne detektuje R-ton, nastavlja nadmetanje u sledećoj rundi. Trajanje T-slota jednako je trajanju R-slota i iznosi T_{TONE} tj. jednako je vremenu emitovanja RF tona.

Iako je moguće da se svi CM međusobno ne čuju, reemitovanjem T-tona od strane CH čvora se obezbeđuje da svi predajnici budu obavešteni o nameri drugih predajnika o emitovanju poruke. Na ovaj način se domet T-tona proširuje na ceo klaster, zbog toga što CH emitovanjem R-tona dobija ulogu repetitora, jer njega mogu da čuju svi CM. Proširenjem dometa T-tona na ceo klaster se potpuno eliminiše problem skrivenih terminala, a time i mogućnost pojave kolizija.

4.5. Algoritam podele grupa

Algoritam podele grupa se izvršava na početku svake eliminacione runde radi podele skupa neeliminiranih CM čvorova na AC i SC grupu.

Za potrebe algoritma podele grupa, svakom CM čvoru su potrebne sledeće informacije:

1. N - veličina klastera izražena brojem CM čvoru u klasteru.
2. CN - broj za nadmetanje (engl. *competition number*). CN je ceo broj između 0 i $N - 1$ koji mora biti jedinstven u klasteru.
3. M - dužina perioda za nadmetanje, odnosno trajanje nadmetanja izraženo brojem rundi. Dužina perioda za nadmetanje je fiksni parametar protokola.

Grupa neeliminiranih CM čvorova koji učestvuju u konkretnoj rundi je predstavljena intervalom za nadmetanje, tj. intervalom $CI = [c_{min}, c_{max}]$ brojeva za nadmetanje, gde je c_{min} najmanji a c_{max} najveći broj za nadmetanje u grupi. Veličina intervala za nadmetanje je jednaka $c = c_{max} - c_{min} + 1$. Inicijalno, interval za nadmetanje uključuje sve CM u klasteru, pa je $c_{min} = 0$, i $c_{max} = N - 1$. Algoritam podele grupe deli interval za nadmetanje u dva podintervala na početku svake runde. Levi predstavlja grupu neaktivnih čvorova, tj. $SC = [c_{min}, c_{max} - g]$; desni predstavlja grupu aktivnih čvorova, tj. $AC = [c_{max} - g + 1, c_{max}]$. Ovde, g predstavlja broj aktivnih čvorova, tj. veličinu AC grupe. Veličina SC grupe je $c - g$. Na kraju svake runde, interval za nadmetanje se ažurira. Ukoliko nema potencijalnih pošiljaoca u AC grupi, eliminiše se desni podinterval, tj. $c_{max} = c_{max} - g$; u protivnom, eliminiše se levi podinterval, tj. $c_{min} = c_{max} - g + 1$. Nadmetanje se završava kad se interval za nadmetanje smanji na jedan broj za nadmetanje, tj. $c_{min} = c_{max}$. CM sa tim brojem za nadmetanje je pobednik nadmetanja koji stiće pravo na slanje poruke u tom slotu.

Koristeći ovaj koncept određivanja intervala za nadmetanje u svakoj rundi, algoritam podele grupa treba samo da odredi veličinu AC grupe, g , a ne da eksplicitno odlučuje o tome koji CM pripadaju kojoj podgrupi. Svaki pojedinačni CM sam odlučuje o tome kojoj podgrupi pripada na osnovu svog broja za nadmetanje, graničnih vrednosti intervala za nadmetanje i veličine AC grupe.

Pseudo kôd algoritma podele grupa dat je na Sl. 4.6. Ovaj algoritam se izvršava u svakom potencijalnom pošiljaocu. Izlaz algoritma je status CM čvora nakon nadmetanja: pobednik nadmetanja, WIN (engl. *winner of the competition*) ili gubitnik nadmetanja, LOSE (engl. *loser of the competition*). Svaka iteracija *do-while* petlje algoritma odgovara jednoj rundi. CM koji se nadmeće nastavlja nadmetanje sve dok mu se ne odredi krajnji status, tj. sve dok mu je status nedefinisan, ND (engl. *not defined*). Ključni deo algoritma je funkcija podele grupa (engl. *group splitting function*, GSF) u liniji 15, koja određuje veličinu AC grupe u svakoj rundi. Definisanjem različitih GSF moguće je definisati različite varijante algoritma podele grupa sa različitim karakteristikama.


```

1  Input: CN;           //broj za nadmetanje
2          M;           //dužina perioda za nadmetanje
3          N;           //veličina klastera
4  Output: status ∈ {WIN, LOSE, ND}
5
6  begin
7      Cmin = 0;
8      Cmax = N - 1;
9      r = M;           // brojač nadole, eliminacionih rundi
10     status = ND;
11
12     do
13         r = r - 1;
14         c = Cmax - Cmin + 1;           //veličina intervala za nadmetanje
15         g = GSF(c, r);           //određivanje veličine AC grupe
16         AC = [Cmax - g + 1, Cmax];
17
18         if (CN ∈ AC) then
19             //aktivni CM
20             emitovanje T-tona u prvom mini-slotu;
21             Cmin = Cmax - g + 1;           //eliminisanje SC grupe
22             if (Cmin = Cmax) then
23                 status = WIN;
24             end if;
25         else
26             //neaktivni CM
27             detekcija R-tona u drugom mini-slotu;
28             if (detektovan R-ton) then
29                 status = LOSE;
30             else
31                 Cmax = Cmax - g;           //eliminisanje AC grupe
32                 if (Cmin = Cmax) then
33                     status = WIN;
34                 end if;
35             end if;
36         end if;
37     while (status = ND);
38 end.

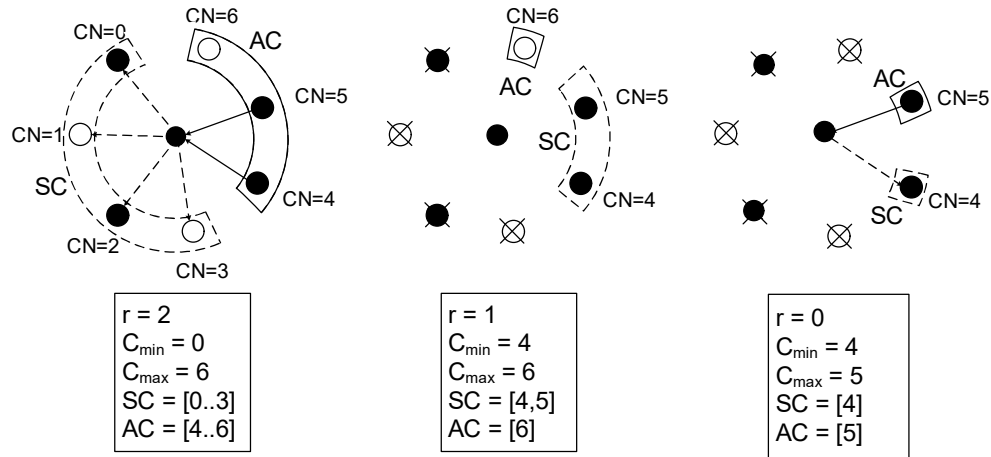
```

Sl. 4.6 Pseudo-kôd generalnog algoritma podele grupa

Primer 4.2.

Na Sl. 4.4 je prikazan tok algoritma podele grupa na primeru klastera (Isti klaster koji obradjuje Primer 4.1) od $N = 7$ CM čvorova, sa brojevima za nadmetanje iz opsega $CN \in [0,6]$. Usvojeno je da nadmetanje traje $M = 3$ runde. Na početku nadmetanja, interval nadmetanja obuhvata svih 7 CM čvorova, odnosno $c_{min} = 0$ i $c_{max} = 6$. Pretpostavimo da je u prvoj rundi, $r = 2$, GSF vraća vrednost $g = 3$, što znači da je polazni interval nadmetanja podeljen da dva podintervala, pri čemu levi podinterval odgovara neaktivnoj grupi $SC = [c_{min}, c_{max} - g] = [0, 3]$, a desni aktivnoj grupi $AC = [c_{max} - g + 1, c_{min}] = [4, 6]$. Pošto u AC grupi CM čvorovi 5 i 4 jesu potencijalni pošiljaoci, biće eliminisana SC grupa i ažurirane granične vrednosti intervala nadmetanja na $c_{min} = 4$ i $c_{max} = 6$. U sledećoj rundi, $r = 1$, GSF vraća $g = 1$, što dovodi do podele intervala nadmetanja na $SC = [4, 5]$ i $AC = [6]$. S obzirom

da CM 6 nije potencijalni pošiljalac, eliminiše se AC grupa i interval nadmetanja sužava na $CI = [4, 5]$. U poslednjoj rundi, $r = 1$, jedina mogućnost za GSF je $g = 1$, što raspoređuje CM 4 u SC, a CM 5 u AC grupu. CM 5 jeste potencijalni pošiljalac, zbog čega se eliminiše SC grupa, a jedini preostali CM, sa $CN=5$, time postaje pobednik ovog nadmetanja.



Sl. 4.7 Primer 4.2: razrešavanja konflikata u grupi od $N = 7$ CM-ova u $M = 3$ runde

U slučaju da algoritam podele implementira drugačiju funkciju podele grupa, GSF, nadmetanje može da teče drugim tokom. Recimo, ako se u prvoj rundi izabere $g = 4$, AC-u je pridružen i CM sa $CN = 4$ što u rundi $r = 1$ nameće $g = 2$, pa CM čvor sa $CN = 5$ zajedno sa CM čvorom sa $CN = 6$ pripada AC grupi. U poslednjoj rundi, pobeđuje CM sa $CN = 5$. U svakom slučaju, bez obzira na tok nadmetanja, pobednik je uvek potencijalni pošiljalac sa najvećim brojem za nadmetanje.

4.6. Funkcija podele grupa

Izbor funkcije podele grupa ne utiče na krajnji ishod nadmetanja, što znači da je pobednik nadmetanja uvek čvor sa najvećim brojem za nadmetanje, kao što je ilustrovano u Primeru 2. Međutim, izbor funkcije podele grupa utiče na vremensku i energetska efikasnost mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata. Vremenska efikasnost se odnosi na dužinu trajanja perioda za nadmetanje, koja zavisi od broja potrebnih rundi. Funkcija podele grupa koja zahteva veliki broj eliminacionih rundi može da smanji propusnu moć protokola zbog dužeg trajanja perioda za nadmetanje. Energetska efikasnost zavisi od broja emitovanja RF tonova i broja semplovanje kanala potrebnih za završetak nadmetanja. Pošto je energija potrebna za emitovanje RF tona značajno veća od energije potrebne za uzorkovanje kanala, energetska efikasnost primarno zavisi od broja emitovanih tonova. Takođe, pošto je CH manje energetska ugrožen u odnosu na CM čvorove, primarni cilj je minimizovanje emitovanja T-

tonova. U daljem tekstu će biti pokazano da postoje ustupci između vremenske i energetske efikasnosti, tj. da funkcija podele grupa koji se fokusira na ubrzavanje nadmetanja generiše veći broj tonova od funkcije koji koristi veći broj eliminacionih rundi od minimalnog.

Ako je data veličina intervala za nadmetanje, c , i broj preostalih rundi do kraja nadmetanja, r , funkcija podele grupa $GSF(c, r)$ određuje veličinu AC grupe, g , u tekućoj rundi. U opštem slučaju, veličina AC grupe može da bude bilo koji prirodan broj u opsegu:

$$G_{min} \leq GSF(c, r) \leq G_{max}, \text{ gde je} \quad (1)$$

$$G_{min} = \begin{cases} 0 & \text{if } c \leq 2^r \\ c - 2^r & \text{else} \end{cases} \quad (a)$$

$$G_{max} = \lfloor c/2 \rfloor \quad (b)$$

Shodno nejednačini (1), gornja granica za veličinu AC grupe G_{max} , jednaka je polovini trenutnog intervala za nadmetanje. Ovim ograničenjem se minimizuje maksimalni broj CM čvorova koji mogu da prežive tekuću rundu, tj. minimizuje se maksimalna veličina intervala za nadmetanje u sledećoj rundi. Maksimalna veličina intervala za nadmetanje u sledećoj rundi, c_{next} , jednaka je veličini većeg od intervala AC ili SC iz tekuće runde, odnosno $c_{next} = \max\{g, c - g\}$. Minimalno c_{next} se dobija za $g = G_{max} = \lfloor c/2 \rfloor$ budući da za bilo koje drugo g jedan od članova g ili $c - g$ je veći od $\lfloor c/2 \rfloor$.

Ukoliko se funkcija podele grupa $GSF(c, r) = \lfloor c/2 \rfloor$ dosledno primenjuje u svakoj rundi, nadmetanje se završava u minimalnom broju rundi. Ako klaster sadrži N CM čvorova i u svakoj rundi se prepolovi interval za nadmetanje, tada se do intervala za nadmetanje veličine 1 dolazi posle tačno $M_{min} = \lceil \log_2 N \rceil$ rundi. Algoritam podele grupa koji koristi $GSF(c, r) = \lfloor c/2 \rfloor$ odgovara standardnom binarnom algoritmu (BIN).

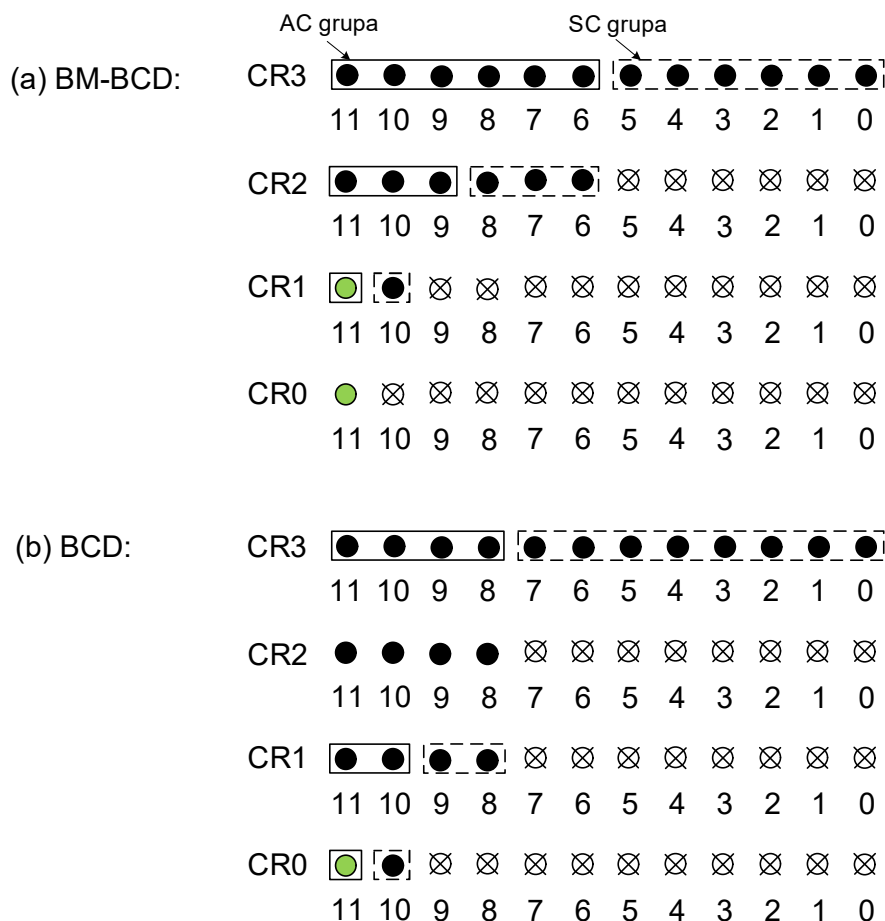
Donja granica za veličinu AC grupe, G_{min} , je uslovljena konačnim brojem raspoloživih rundi. Prilikom izbora veličine AC grupe, GSF mora da obezbedi da broj CM čvorova koji prežive rundu r bude manji ili jednak 2^r , odnosno ne veći od maksimalne veličine intervala za nadmetanje koji se uzastopnim polovljenjem u preostalih r rundi može svesti na veličinu 1. Zato je trenutnu eliminacionu rundu moguće i preskočiti ($g = 0$), ali samo ako je veličina trenutnog intervala za nadmetanje manja ili jednaka 2^r ; u protivnom, veličina AC grupe mora da bude najmanje $c - 2^r$. Algoritam podele grupa sa $GSF(c, r) = G_{min}$ odgovara BCD algoritmu (Sekcija 3.4.3). Kao i BIN algoritmu, BCD algoritmu je potreban period za nadmetanje dužine M_{min} rundi. Iako oba algoritma, BIN i BCD, zahtevaju minimalnu dužinu perioda za nadmetanje, prednost BCD algoritma je u manjem broju emitovanja T-tonova.

Primer 4.3

U klasteru sa $N = 12$ CM čvorova, gde su svi CM čvorovi potencijalni pošiljaoci, potrebno je primeniti BIN i BCD algoritam. Za nadmetanje je u oba slučaja potrebno $M = M_{min} = 4$ rundi. Na Sl. 4.8 je prikazan tok nadmetanja u slučaju primene ova dva algoritma podele grupa. Crnim tačkama su predstavljeni potencijalni pošiljaoci, belim tačkama neaktivni CM čvorovi a precrtanim tačkama CM čvorovi koji su eliminisani iz nadmetanja, dok je pobednik nadmetanja predstavljen zelenom tačkom. Pun pravougaonik obuhvata AC grupu a isprekidan SC grupu. Sl. 4.8(a) prikazuje tok nadmetanja kada se koristi BIN algoritam. Kod primene BIN algoritma AC grupa uvek sadrži polovinu neeliminiranih CM čvorova, odnosno u prvoj rundi 6 CM čvora, u drugoj 3 CM čvora i u trećoj 1 CM. Ukupan broj emitovanih T-tonova u toku celog nadmetanja jednak je zbiru veličina AC grupa u svim rundama nadmetanja i u ovom slučaju iznosi 10. Sl. 4.8(b) prikazuje rad BCD algoritma, koji počinje nadmetanje sa 4 CM u AC grupi u prvoj rundi (prema drugoj opciji za G_{min} u (1a)). Pošto preostaju 4 CM i 2 runde do kraja nadmetanja, druga runda se preskače (prema prvoj opciji za G_{min} u (1a)) i nadmetanje se nastavlja tako da je veličina AC grupe u trećoj rundi 2 i u četvrtoj 1. Ukupan broj emitovanja T-tonova u slučaju primene BCD algoritma je 7, što predstavlja uštedu od 3 T-ona u odnosu na algoritam BIN.

Produžetak perioda za nadmetanje preko vrednosti M_{min} eliminacionih rundi ne menja način rada ni BIN ni BCD algoritma: BIN algoritam koristi samo prvih M_{min} rundi i preskače ostatak, BCD algoritam preskače prvih $M - M_{min}$ i vrši nadmetanje u preostalim M_{min} .

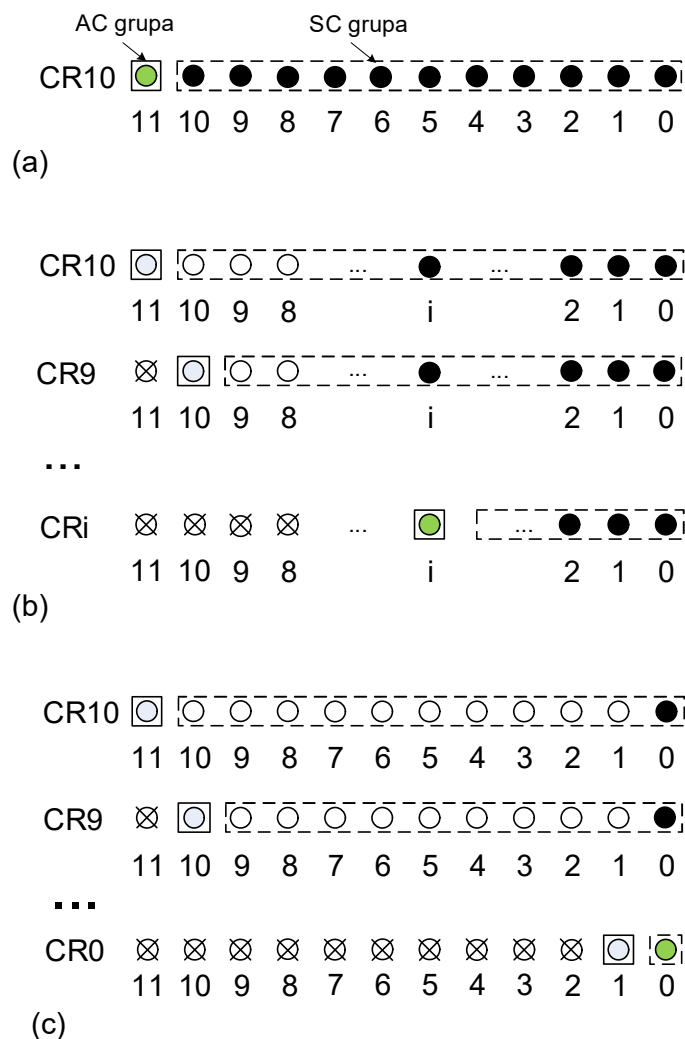
Specijalni slučaj funkcije podele grupa je $GSF(c, r) = 1$. Algoritam podele grupa sa ovom GSF odgovara standardnom *bit-map* (BM) algoritmu. Kod BM algoritma, AC grupa uvek sadrži samo jedan CM, sa najvećim brojem za nadmetanje u tekućem intervalu nadmetanja, usled čega se celo nadmetanje uvek završava uz emitovanje najviše jednog T-ona, što ga čini energetske najefikasnijim. Međutim, za rad ovog algoritma potrebno je da nadmetanje traje čak $M = N - 1$ rundi, što ga čini izuzetno vremenski neefikasnim.



Sl. 4.8 Primer 4.3: BIN i BCD algoritam za grupu od 12 CM-a

Primer 4.4.

U klasteru sa 12 CM čvorova, gde su svi CM čvorovi potencijalni pošiljaoci, potrebno je primeniti BM algoritam. U ovom slučaju nadmetanje se završava u prvoj rundi: CM sa najvećim brojem za nadmetanje, $CN = 11$, koji jedini pripada AC grupi, emituje T-ton, svi CM čvorovi iz SC grupe se povlače iz nadmetanja a taj CM je pobednik nadmetanja (Sl. 4.9(a)). Ukoliko CM čvor sa najvećim brojem za nadmetanje nije potencijalan pošiljalac, kao ni CM čvorovi do broja za nadmetanje $i + 1$ (obojeni belo), za nadmetanje bi bilo potrebno i rundi (Sl. 4.9(b)). U ovom slučaju se u toku celog nadmetanja emituje samo jedan T-ton. Ukoliko je CM sa najmanjim brojem za nadmetanje ($CN = 0$) jedini potencijalni pošiljalac, za nadmetanje je potrebno celih 11 rundi, bez emitovan i jednog tona (Sl. 4.9(c)).



Sl. 4.9 Primer 4.4: BM algoritam za grupu od 12 CM-a: a) (a) kada su svi CM-ovi potencijalni pošiljaoci; b) kada je i-ti CM potencijalni pošiljaoc; c) kada je poslednji CM potencijalni pošiljaoc

4.7. BM-BCD algoritam

U cilju poboljšanja energetske efikasnosti smanjenjem ukupnog broja emitovanih T-tonova, u ovoj disertaciji se predlaže nova funkcija podele grupa: *bit map-binary countdown* (BM-BCD) algoritam. BM-BCD kombinuje algoritme BM i BCD, tako što u svakoj rundi primenjuje jedan od ova dva algoritma na osnovu sledećeg kriterijuma. Ako je broj preostalih rundi do kraja nadmetanja veći od minimalnog broja potrebnih rundi, BM-BCD primenjuje BM algoritam; u suprotnom, primenjuje algoritam BCD. Dakle, ako je veličina intervala za nadmetanje c i do kraja nadmetanja je ostalo r rundi, tada važi:

$$\text{BM} - \text{BCD} \equiv \begin{cases} \text{BM} & \text{if } c \leq 2^r \\ \text{BCD} & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

Imajući u vidu da je veličina AC grupe kod algoritma BM uvek jednaka 1, dok je kod algoritma BCD jednaka G_{min} , funkcija podele grupa algoritma BM-BCD je oblika:

$$GSF(c, r) = \begin{cases} 1 & \text{if } c \leq 2^r \\ c - 2^r & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

S obzirom da prema (1a) u slučaju $c \leq 2^r$ važi $G_{min} = 0$, funkcija podele grupa algoritma BM-BCD se može predstaviti i na sledeći način:

$$GSF(c, r) = \max\{G_{min}, 1\} \quad (4)$$

Shodno (4), algoritam BM-BCD se može posmatrati i kao modifikacija algoritma BCD koja ne dopušta preskakanje rundi. Runde koje BCD preskače zbog $G_{min} = 0$, BM-BCD koristi za nadmetanje, tako što u takvim rundama bira AC grupe veličine 1. Na ovaj način, nadmetanje može i da se završi i emitovanjem samo 1 tona, ukoliko je CM iz takve AC grupe potencijalni pošiljalac.

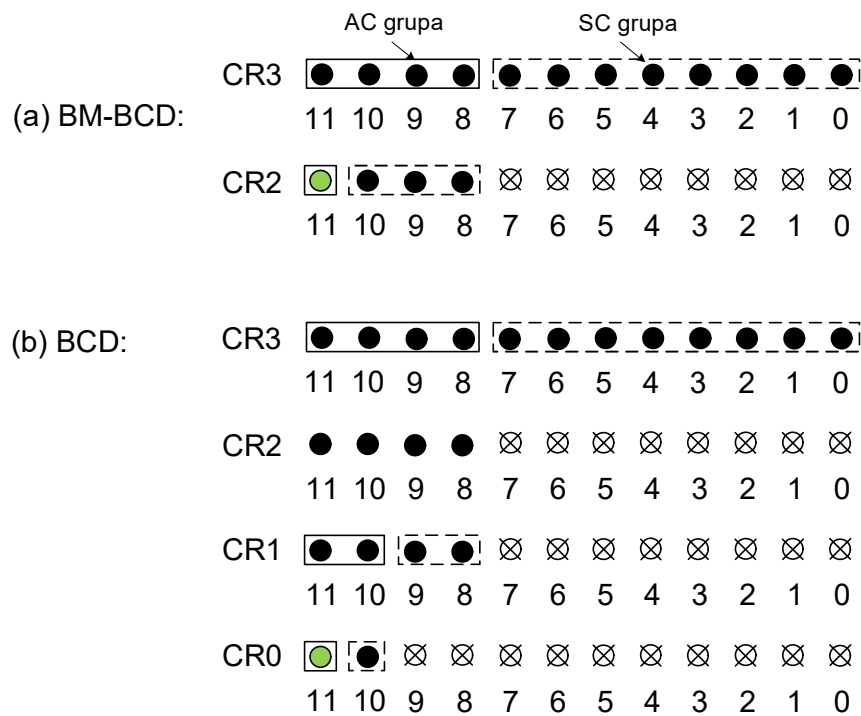
Zahvaljujući osobini nepreskakanja rundi, period za nadmetanje kod BM-BCD algoritma se može podesiti na bilo koju vrednost iz opsega $M \in [M_{min}, M_{max}]$. U slučaju $M > M_{min}$ BM-BCD počinje nadmetanje u BM režimu, dajući šansu CM čvoru sa najvećim brojem za nadmetanje da već u prvoj rundi okonča nadmetanje. Ukoliko CM sa najvećim brojem za nadmetanje nije potencijalni pošiljalac, u sledećoj rundi šansu dobija CM pa prvim manjim brojem za nadmetanje i tako redom. Ukoliko se nadmetanje završi tokom BM režima, što je prilično verovatno u slučaju saobraćaja velikog intenziteta, biće emitovan samo jedan T-ton. U protivnim, kada zbog smanjenja broja preostalih rundi G_{min} više nije jednako 0, BM-BCD prelazi u BCD režim biranja veličine AC grupe, čime se garantuje da će nadmetanje biti završeno u raspoloživom broju rundi.

U opštem slučaju, produženje perioda za nadmetanje smanjuje broj T-tonova, na taj način što smanjuje veličinu AC grupe tokom nadmetanja. U ekstremnom slučaju, $M = N - 1$, BM-BCD se ponaša kao BM algoritam: AC grupa uvek sadrži samo jedan CM, sa najvećim CN u tekućem intervalu za nadmetanje. Ovo rešenje uvek generiše najviše jedan T-ton, ali je vremenski najneefikasnije, jer zahteva veoma dug period za nadmetanje, posebno u klasteru sa velikim brojem CM čvorova.

Primer 4.5

Sl. 4.10 (a) prikazuje primer rada BM-BCD algoritma u klasteru od 12 CM čvorova, koji su svi potencijalni pošiljaoci, kada je dužina perioda za nadmetanje $M = M_{min} = 4$ rundi. U prvoj rundi, BM-BCD radi u BCD režimu (primenjuje drugu opciju u (3)) i bira AC grupu od 4 CM čvora. Pošto su u ovom primeru svi CM čvorovi potencijalni pošiljaoci, u sledeću rundu prelazi AC grupa, od 4 čvora. U drugoj rundi, sa 4 CM čvora i 3 preostale runde, BM-

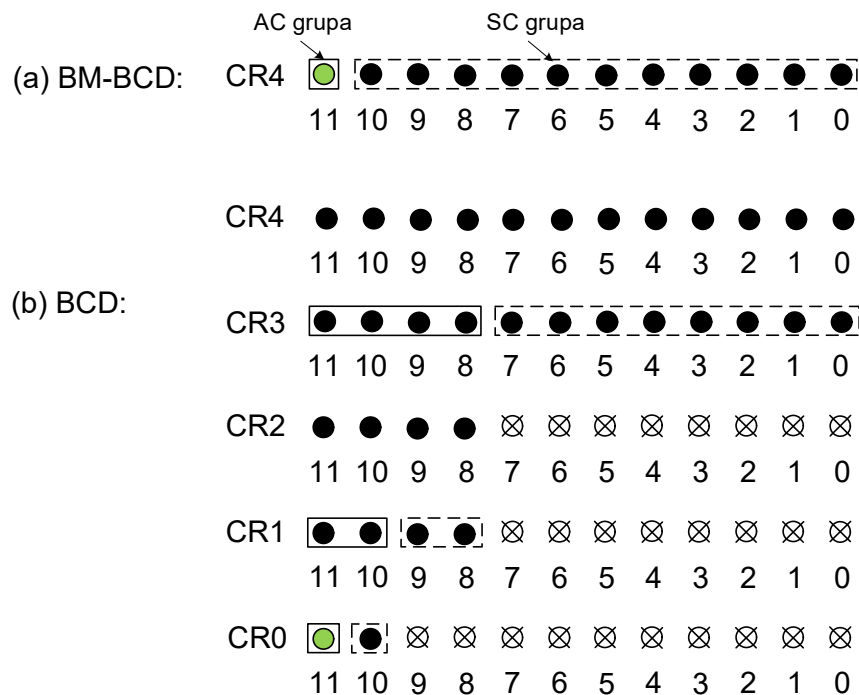
BCD može da pređe u BM režim rada (primenjujući prvu opciju u (3)) tako da AC grupa sadrži samo jedan CM, koji je potencijalni pošiljaoc. Pošto je taj čvor jedini čvor u grupi, on postaje pobednik nadmetanja. Za vreme ovog kratkog nadmetanja emitovano je ukupno 5 T-tonova: četiri u prvoj i jedan u drugoj rundi, što je manje od 10 T-tona emitovana u slučaju da je korišćen BIN (Sl. 4.8(a)), ili 7 tona emitovana u slučaju da je korišćen BCD algoritam podele grupa (Sl. 4.10 (b)).



Sl. 4.10 Primer 4.5. GSF za grupu od 12 CM-ova i M=4 rundi

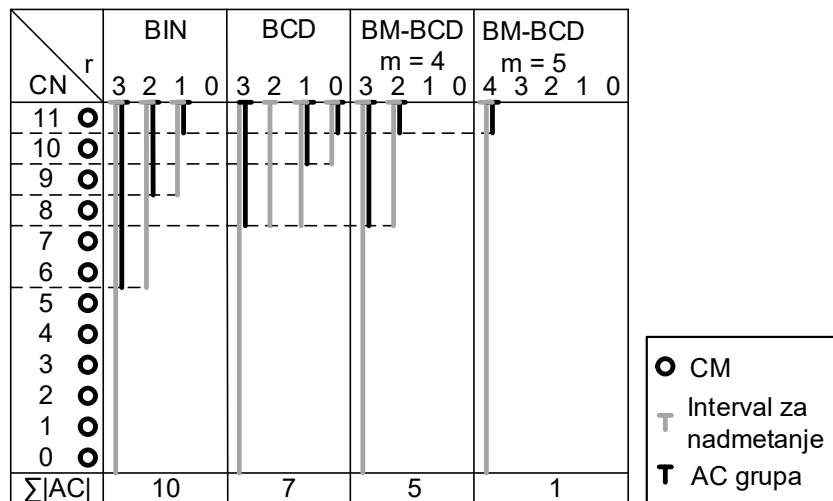
Efekat smanjenja broja generisanih T-tonova je evidentniji kada se produži period za nadmetanje, čak i samo za jednu eliminacionu rundu. U slučaju da je algoritam podele grupa konfigurisan sa $M = 5$ rundi, BM-BCD algoritam počinje nadmetanje među 12 čvorova u BM režimu, odnosno sa AC grupom koja sadrži samo jedan CM (Sl. 4.11(a)). Pošto su svi čvorovi potencijalni pošiljaoci, izabrani CM (sa brojem za nadmetanje 11) postaje pobednik nadmetanja uz emitovanje samo jednog T-tona. Ukoliko CM sa brojem za nadmetanje 11 nije potencijalni pošiljalac, ulazi se u sledeću rundu, gde je veličina AC grupe 3, pa zatim nastavlja u čistom BCD režimu. Ako se period za nadmetanje produži na $M = 6$, AC grupa u prve dve runde će biti veličine 1, a u trećoj veličine 2. Lako je primetiti da se sa povećanjem ukupnog broja eliminacionih rundi povećava i broj rundi na početku u kojima je veličina AC grupe 1, čime se povećava i verovatnoća da se nadmetanje završi u BM režimu sa samo jednim emitovanim T-tonom. Kada dužina perioda za nadmetanje dostigne 11 rundi, BM-BIN se svodi na BM algoritam. Treba primetiti da je BCD algoritam (kao i BIN algoritam) za iste primere

potpuno neosetljiv na produženje perioda nadmetanja, jer se nadmetanje završava uvek na isti način kao za $M = 4$ runde, sa jednakim brojem emitovanih T-tonova, dok se sve dodatne runde jednostavno preskoče (Sl. 4.11 (b)).



Sl. 4.11 Primer 4.5: GSF za grupu od 12 CM-ova i $M=5$ rundi

Rezultati prethodnih primera su radi bolje preglednosti objedinjeni na Sl. 4.12.



Sl. 4.12 Poređenje broja čvorova u aktivnoj grupi kod različitih GSF u slučaju klastera od 12 CM-a koji su svi potencijalni pošiljaoci

Kao što je već pokazano, najveći broj emitovanih T-tonova ima BIN, ukupno 10. BCD je nešto efikasniji, sa ukupno 7 emitovana T-tona. Predloženi BM-BCD postiže poboljšanje (ukupno 5 T-tona) čak i u slučaju da ne koristi dodatne runde za nadmetanje, a dodavanjem

samo jedne runde za nadmetanje pokazuje znatno poboljšanje, tako što celo nadmetanje završava emitovanjem samo jednog T-tona.

4.8. Simulacija rada algoritma za podelu grupa

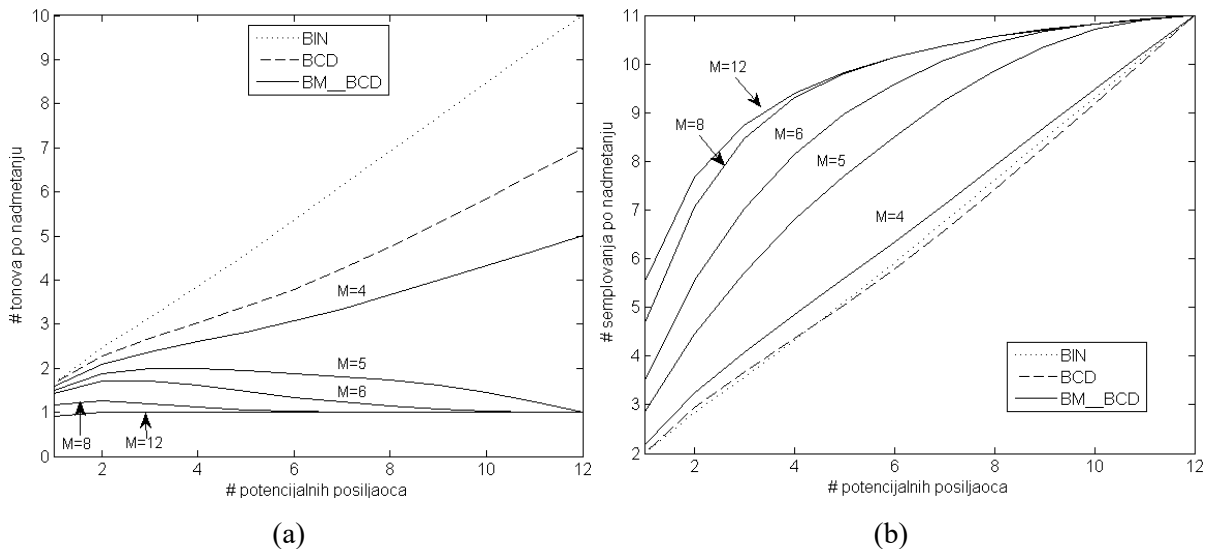
Da bi stekli potpuniji uvid u unapređenje mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata uvođenjem BM-BCD algoritma umesto postojećih BCD i BM, simuliran je njihov rad u klasteru od $N = 12$ CM čvorova. Za svaku kombinaciju funkcije podele grupe $GSF \in \{BIN, BCD, BM - BCD\}$, dužine perioda za nadmetanje $M \in \{4, 5, \dots, 11\}$ i broja potencijalnih pošiljaoca $k \in \{1, 2, \dots, 11\}$, simulacija je ponovljena 10^4 puta, tako što je u svakom ciklusu simulacije slučajno izabran novi podskup od k potencijalnih pošiljaoca u skupu od 12 CM čvora. Prosečan broj emitovanja T-tonova i semplovanja kanala po nadmetanju u zavisnosti od k je prikazan na Sl. 4.13.

Kao što može da se vidi na Sl. 4.13(a), za period za nadmetanje minimalne dužine (BIN, BCD i BM-BCD konfigurisano sa $M = 4$), broj emitovanja T-tonova i semplovanja raste skoro linearno sa porastom broja potencijalnih pošiljaoca. Iako sve tri GSF daju slične rezultate za broj semplovanja, osetno se razlikuju u broju emitovanih T-tonova. Na primer, BM-BCD sa $M = 4$ rundi generiše 28.5% manje T-tonova od BCD, a čak 50% manje T-tonova od BIN algoritma.

Produženje perioda za nadmetanje ($M > 4$) kod BM-BCD algoritma dalje smanjuje broj emitovanja T-tonova. Kao što je moguće videti na Sl. 4.13(a), čak i sa dodatkom jedne eliminacione runde, broj tonova je značajno smanjen. Smanjenje broja T-tonova je posebno uočljivo u slučajevima saobraćaja velike gustine, kada su CM čvorovi većinom potencijalni pošiljaoci. Kako se broj potencijalnih pošiljaoca povećava, broj T-tonova se smanjuje i pada na vrednost od 1 tona po nadmetanju u slučaju da svi CM čvorovi učestvuju u nadmetanju.

Ipak, smanjenje broja emitovanih T-tonova kod BM-BCD algoritma dolazi po cenu povećanja broja semplovanja kanala, jer tendencija smanjenja AC grupe dovodi do povećanja veličine SC grupe, a time i do povećanja broja semplovanja u odnosu na ostale strategije podele grupe, kao što može da se vidi na Sl. 4.13(b). Za minimalnu dužinu perioda za nadmetanje $M = 4$ sva tri algoritma daju slične rezultate. Međutim, svako proširenje perioda za nadmetanje dodatnim eliminacionim rundama povećava broj semplovanja kanala. Na primer, nadmetanje između $k = 6$ potencijalnih pošiljaoca u $M = 5$ rundi generiše u proseku 1.88 T-tonova po nadmetanju, što predstavlja smanjenje od 1.18 T-tonova u odnosu na slučaj kada je $M = 4$. U isto vreme, broj semplovanja kanala je povećan sa 6.34 na 8.51. Imajući u vidu da je energija

potrebna za emitovanje T-tona značajno veća od energije potrebne za semplovanje kanala, može se očekivati smanjenje ukupne energije utrošene tokom nadmetanja, jer je moguće naći kompromis za svaku primenu kojim bi se postiglo da ukupna energija potrebna za nadmetanje bude minimalna.)

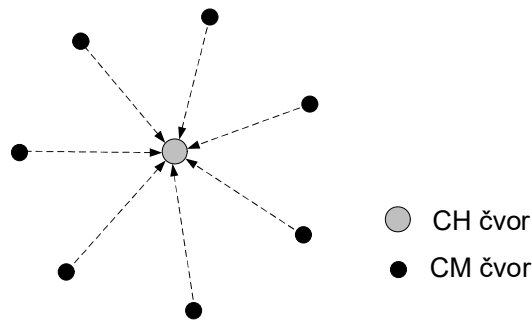


Sl. 4.13 Simulacija rada BIN, BCD i BM-BCD algoritma u klasteru od 12 CM-a za različito M i broj aktivnih čvorova: a) broj T-tonova; b) broj semplovanja

4.9. RF tonovi

Mehanizam za sinhronizaciju kod TONE-a je zasnovan na razmeni RF tonova između CM čvorova sa jedne i CH čvora sa druge strane, kao što je predstavljeno u sekciji 4.5. RF ton je modulisan ili nedomulisan signal ograničenog trajanja i amplitude na određenoj frekvenciji nosioca. Kod TONE-a, frekvencija RF tona je ista kao frekvencija na kojoj se prenose podaci. Amplituda RF signala određuje snagu RF tona a time i njegov dolet. Trajanje RF tona mora da bude kratko, da bi se obezbedile vremenska i energetska efikasnost, ali dovoljno dugo da ga je moguće detektovati čak i u slučaju velikog pomeranja takta u sistemu.

RF ton ne prenosi nikakvu poruku, već samo binarnu informaciju (ton je prisutan/ton nije prisutan). Iz tog razloga, na prijemu nije potrebna njegova demodulacija. Prisustvo RF tona se jednostavno detektuje merenjem nivoa prijemnog RF signala, tzv. semplovanjem kanala. Ovaj princip detekcije signala obezbeđuje otpornost na kolizije. U slučaju istovremenog prijema više RF tonova (Sl. 4.14), CH čvor detektuje OR operaciju svih tonova, tj. prisustvo ili odsustvo bar jednog tona. Zahvaljujući tome, kolizija, koja je u prenosu podataka mana, upotrebom RF tonova postaje prednost.



Sl. 4.14 Istovremeni prijem više RF tonova

4.9.1. Generisanje i detekcija RF tona

Komercijalno dostupni RF primopredajnici ne poseduju neposrednu podršku za generisanje i detekciju RF tonova. Međutim, kod većine primopredajnika tonove je moguće generisati na indirektan način, programskim putem oslanjajući se na raspoložive funkcije primopredajnika. U ovom poglavlju biće predstavljene tehnike za generisanje i detekciju RF tonova koje su prilagođene RF primopredajniku CC1101 [8]. Uz manje modifikacije, ove tehnike se lako mogu prilagoditi većini komercijalno dostupnih RF primopredajnika za WSN.

Razvojna platforma

Za razvoj i validaciju predloženih tehnika korišćen je senzorski čvor zasnovan na sistemu na čipu CC430 firme Texas Instruments [53]. CC430 je integrisano kolo koje objedinjuje mikrokontroler MPS430 i RF primopredajnik iz porodice CC1101, zajedno sa skupom standardnih mikroprocesorskih periferija. Zahvaljujući kompaktnim dimenzijama, maloj potrošnji i bogatom skupu funkcija CC430 je pogodna za razvoj bežičnih mrežnih aplikacija, kao što je automatizacija zgrada i u industriji, nadgledanje poseda, prikupljanje energije iz okruženja, industrijsko nadgledanje, personalne bežične mreže, alarmni i bezbednosni sistemi. Na Sl. 4.15 je prikazana razvojna pločica koja osim CC430 sadrži i antenu zajedno sa elektronikom za prilagođenje, kao i nekoliko konektora za napajanje, vezu sa host računarom i hardverska proširenja.



Sl. 4.15 CC430: SoC zasnovan na MSP430 sa integrisanim RF primopredajnikom CC1101

MSP430

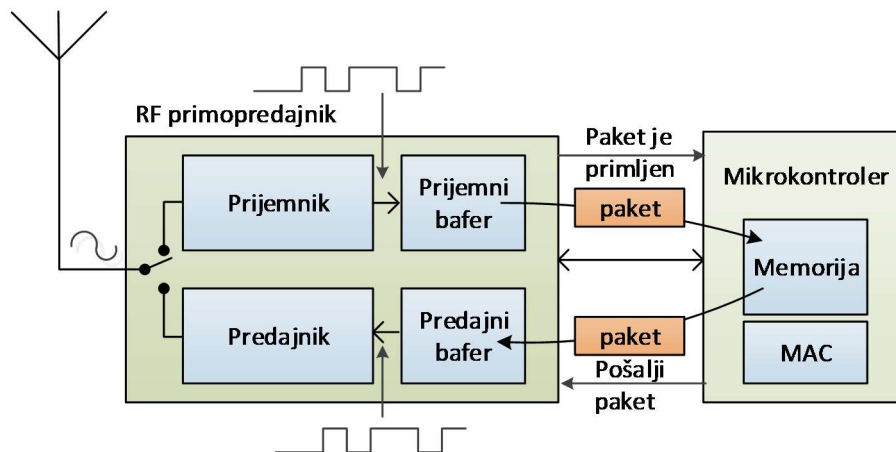
Integrisan mikrokontroler iz porodice MSP430 zasnovan je na CPU 16-bitne RISC arhitekture optimizovane za malu potrošnju. Moguće ga je konfigurisati tako da radi na različitim naponima napajanja od 1.8V do 3.6V i na različitim frekvencijama, do 20MHz. Posедуje 32KB fleš memorije i 4KB RAM memorije. Opremljen je velikim skupom periferija, od kojih mnoge mogu da funkcionišu autonomno, zahvaljujući prekidima na niskom nivou. Ovim se minimizuje vreme koje CPU mora da provede u aktivnom režimu rada.

CC1101

CC1101 je RF primopredajnik malog dometa i male potrošnje za komunikaciju na frekvencijama ispod 1 GHz. CC1101 je moguće konfigurisati da radi na različitim naponima napajanja i na više frekventnih opsega: 300 MHz - 348 MHz, 389 MHz - 464 MHz i 779 MHz - 928 MHz. Bitsku brzinu je moguće programirati u opsegu 0.6 kBaud-500 kBaud. Osetljivost prijemnika je od -117 dBm - -111 dBm u zavisnosti od bitske brzine i frekventnog opsega. Programabilna izlazna snaga mu je do +12 dBm na svim frekvencijama. Podržava različite vrste modulacije: 2-FSK, 2-GFSK, MSK, OOK. Režimi rada primopredajnika CC1101 su IDLE, SLEEP, TRANSMIT i RECEIVE. IDLE je početno stanje, u kome se ne radi ni prijem ni predaja podataka, sa tipičnom strujom od 1.7 mA. SLEEP je režim sa najmanjom potrošnjom energije, tipično 200 nA, u kome je primopredajnik isključen a čuva se trenutno stanje većine registara. U TRANSMIT režimu se šalju paketi koji se nalaze u predajnom baferu, ili emituje neprekidna preambula, ukoliko je bafer prazan, a tipična potrošnja je 16.8 mA - 34.2 mA, u zavisnosti od definisane snage izlaza. U RECEIVE režimu rada se vrši prijem paketa a tipična potrošnja je 14.7 mA.

RF primopredajnik CC1101 ima ugrađenu hardversku podršku za paketski orijentisane protokole, što značajno pojednostavljuje interakciju primopredajnika i mikroprocesora i

oslobađa mikroprocesor niza aktivnosti niskog nivoa. Paketski režim rada znači da je interakcija između mikroprocesora i primopredajnika na nivou paketa (Sl. 4.16). Zadatak mikroprocesora je da nakon što u svojoj radnoj memoriji pripremi paket za slanje, prenese paket u predajni bafer primopredajnika i izda komandu za slanje paketa primopredajniku, koji konvertuje sadržaj paketa u RF signal. U režimu prijema, primopredajnik demoduliše prijemni RF signal i primljene bitove smešta u prijemni bafer. Nakon prijema kompletnog paketa, primopredajnik obaveštava mikroprocesor, koji kopira paket u svoju lokalnu memoriju.

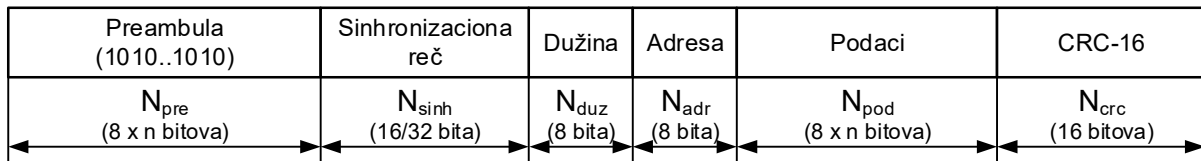


Sl. 4.16 Razmena paketa između mikrokontrolera i RF primopredajnika

Na Sl. 4.17 je prikazan format paketa kod ovog primopredajnika, čije je pojedine elemente moguće konfigurisati. Paket čine sledeći elementi:

- Preambula: niz koji sadrži naizmenično '0' i '1'; dužina preambule izražena brojem bajtova može da se zada, a minimalna dužina preambule je 1 bajt.
- Sinhronizaciona reč: polje dužine dva bajta (koje je moguće produžiti na četiri bajta) koje označava kraj preambule i početak paketa.
- Dužina: polje koje sadrži informaciju o dužini polja za podatke i koristi se ukoliko primopredajnik radi u režimu sa promenljivom dužinom paketa podataka.
- Adresa: polje dužine jednog bajta koje sadrži adresu odredišnog čvora.
- Podaci: sadrži podatke koji se prenose paketom; minimalna dužina ovog polja je jedan bajt.
- CRC-16: polje dužine dva bajta koje sadrži kontrolnu sumu paketa; kontrolna suma se formira na osnovu polja Dužina, Adresa i Podaci.

Preambulu, Sinhronizacionu reč i CRC-16 prilikom formiranja paketa za slanje automatski dodaje predajnik a uklanja prijemnik. Polja Dužina i Adresa su opcione i procesiraju se u prijemniku i predajniku, ali ih prijemnik ne uklanja.



Sl. 4.17 Format paketa kod RF primopredajnika CC1101

Generisanje RF tona

Osnovni zahtev prilikom generisanja RF tona je mogućnost precizne regulacije trajanja tona. Međutim, pošto primopredajnik CC1101 može da radi samo u paketskom režimu, nemoguće je generisati RF ton tako što bi se direktno upravljalo predajnikom. Zbog toga je potrebno naći posredan način regulisanja dužine trajanja tona. Postoje dva načina na koje je ipak moguće generisati ton željenog trajanja.

Paket-ton

RF ton je moguće generisati u obliku regularnog paketa tačno određene dužine i proizvoljnog sadržaja. Na ovaj način, ukupna dužina trajanja tona je

$$T_{TONE} = \frac{N_{paketa}}{bit_rate}$$

Gde je je $N_{paketa} = N_{pre} + N_{sinh} + N_{pod} + N_{crc}$. Za minimalne dužine polja Preambula, Sinhronizaciona reč i CRC-16, a promenljivo trajanje polja Podaci, dužina paketa može da se zada u obliku $N_{paketa} = (5 + N)$ bajtova, gde je $N \geq 1$ broj bajtova polja Podaci. Pošto je minimalna dužina podataka $1 B$, za bitsku brzinu od $19.2 \frac{kb}{s}$, minimalno T_{TONE} iznosi $2.5 ms$. Pošto je dužinu podataka moguće zadavati samo u diskretnim vrednostima, sa korakom $1 B$, trajanje tona može da se zadaje u kvantima od $0.42 ms$. Prednost ovog metoda je mogućnost precizne regulacije dužine trajanja RF tona (u kvantovima od po $0.42 ms$), a nedostatak relativno veliko angažovanje procesora, koji mora da puni predajni bafer primopredajnika sadržajem paketa za svaki RF ton koji emituje, kao i relativno veliko minimalno trajanje i korak kvantizacije.

Preambula-ton

Drugi način generisanja RF ton je korišćenjem osobine CC1101 da nakon ulaska u režim predaje neprekidno emituje preambulu ukoliko je predajni bafer prazan. Generisanje RF

tona korišćenjem ove osobine se vrši na sledeći način: u trenutku kad je potrebno početi emitovanje RF tona, mikrokontroler dozvoljava emitovanje (čime predajnik počne emitovanje preambule) i startuje tajmer sa tajmautom podešenim na vreme trajanja tona. Po isteku tajmauta mikroprocesor zabranjuje emitovanje, čime se prekida emitovanje preambule. Za sve vreme emitovanja preambule, predajni bafer ostaje prazan. Ovaj metod je pogodan zato što omogućava generisanje RF tona veoma kratkog trajanja i koraka kvantizacije, uz minimalno angažovanje mikroprocesora. Nedostatak je u izvesnoj nepreciznosti određivanja trajanja tona, zbog latencije prekida. Ipak, prednosti ovog metoda nadilaze nedostatke, pa je za generisanje RF tona u ovoj disertaciji korišćen baš ovaj metod.

4.9.2. Detekcija RF tona

Cilj detekcije RF tona je obezbeđivanje mogućnosti pouzdane detekcije prisustva prijemnog signala u datom trenutku. Izabrani metod za detekciju bi trebalo da bude: pouzdan (sa malom verovatnoćom greške), brz (čime se obezbeđuje kratko trajanje RF tona), da troši malo energije i da bude otporan na interferencije (jer je kolizija RF tonova normalna pojava u komunikaciji unutar klastera).

Zbog toga što nosi samo binarnu informaciju, prirodan način detekcije RF tona bi bio merenjem nivoa prijemnog signala na frekvenciji nosioca, u očekivanom vremenu emitovanja RF tona. Ako je nivo signala koji se prima manji od zadatog graničnog nivoa, smatra se da RF ton ne postoji, ako je nivo veći, smatra se da RF ton postoji. Jedan od mogućih načina merenja nivoa prijemnog signala je semplovanje kanala. Većina postojećih primopredajnika za WSN poseduje podršku za semplovanje kanala u obliku elektronskog kola za merenje snage prijemnog signala, odnosno RSSI (indikacija snage prijemnog signala, eng. *Receiver Strength Signal Indication*).

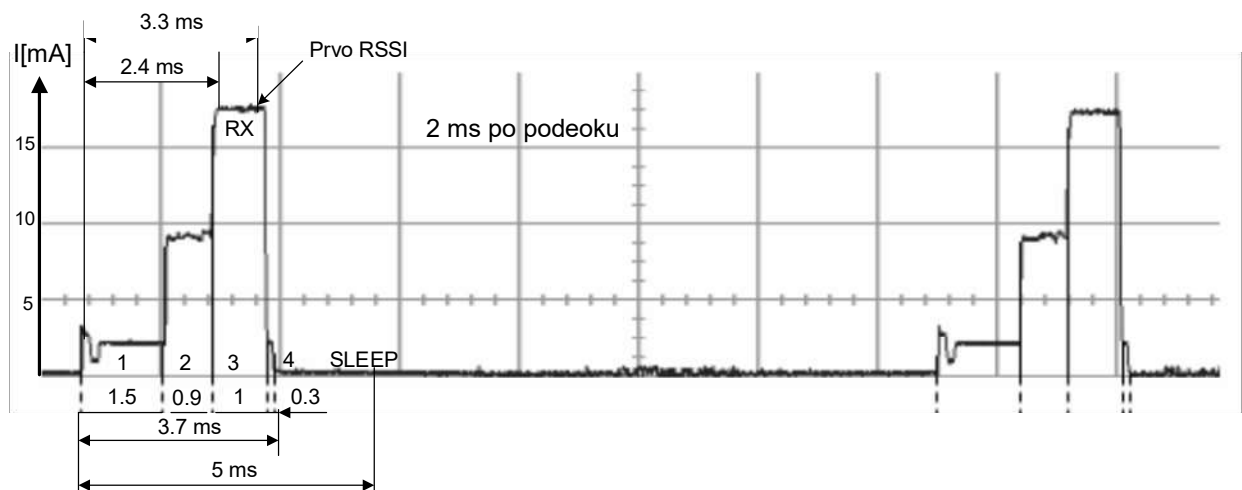
Kod CC1101, RSSI je dostupan u digitalnom obliku preko 8-bitnog RSSI registra u jedinicama *dBm*. Vrednosti za RSS mogu da se kreću u opsegu $[-138, -10.5]$ *dBm* a merenje je sa rezolucijom 0.5 *dB* .

Procedura za semplovanje kanala sa stanovišta mikroprocesora ima sledeće korake:

- 1) mikroprocesor postavlja RF primopredajnik, koji je do bio u SLEEP režimu, u RECEIVE režim
- 2) posle pauze trajanja 2.4 *ms* očitava RSSI
- 3) mikroprocesor isključuje primopredajnik

Sl. 4.18 prikazuje struju napajanja primopredajnika CC1101 tokom semplovanja kanala [54]. Nakon što u trenutku $t = 0$ mikroprocesor prebaci primopredajnik iz režima SLEEP u režim RECEIVE, potrebno je izvesno vreme da prijemnik postigne puni operativni režim. Polje na Sl. 4.18 označeno sa 1 odgovara periodu potrebnom za prelazak u IDLE stanje, polje 2 periodu kalibracije a polje 3 odgovara radu prijemnika. U ovom stanju, potrebno je da protekne neko vreme potrebno za podešavanje PLL-a na frekvenciju nosioca pre prvog merenja RSS-a. Kao što može da se vidi, prijem počinje u trenutku $t = 2.4 \text{ ms}$ od iniciranja prijema, a prva validna vrednost RSSI je dostupna za očitavanje u trenutku $t = 3.3 \text{ ms}$. Nakon što je preuzeo RSSI, mikroprocesor vraća primopredajnik u režim SLEEP (period 4), a ceo proces traje određeno vreme, minimalno $t = 3.7 \text{ ms}$. Nakon isključivanja predajnika, potrebno je da primopredajnik bude u stanju SLEEP neko minimalno vreme, tako da je minimalno trajanje jednog perioda očitavanja sa vraćanjem u stanje SLEEP približno $t = 5 \text{ ms}$.

Na osnovu vremenskih parametara naznačenih na Sl. 4.18 moguće je postaviti osnovna vremenska ograničenja u generalnoj proceduri za razmenu tonova (sekcija 4.4). Ukupno trajanje procedure semplovanja, koje odgovara jednom periodu očitavanja i iznosi $t = 5 \text{ ms}$ definiše minimalno trajanje mini-slota. Vreme od početka prijema do trenutka kada je dostupna prva RSS vrednost (polje 3 na Sl. 4.18) definiše minimalno trajanje tona (1 ms), a ujedno određuje i poziciju tona unutar mini-slota (3.3 ms od početka slota).

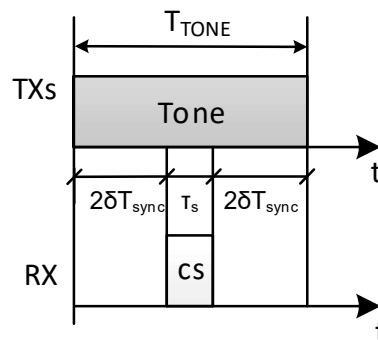


Sl. 4.18 Struje napajanja primopredajnika CC1101 prilikom merenja RSS-a

Trajanje tona

Minimalno trajanje tona je uslovljeno zahtevima za mogućnost detekcije tona, tj. vremenom potrebnim za semplovanje kanala τ_s (Sl. 4.19). Međutim, minimalno trajanje od oko 1 ms važi samo u uslovima idealne vremenske sinhronizacije predajnika i prijemnika. U realnosti uvek postoji razdešavanje, tako da ceo princip signalizacije RF tonovima zahteva

metode za vremensku sinhronizaciju koje će da održava u zadatim granicama ofset takta između bilo koja dva senzorska čvora u klasteru. Mehanizmi za sinhronizaciju će biti razmatrani u narednim poglavljima disertacije, a za sada se samo smatra da između predajnika i prijemnika postoji periodična sinhronizacija. Neka je T_{sync} vremenski period na koji se obavlja sinhronizacija i brzina drifta oscilatora δ ppm (eng. *parts per milion*, milionitih delova sekunde). Maksimalni offset takta između bilo koja dva senzorska čvora u klasteru koji obezbeđuje ovakva sinhronizacija je $\theta = \delta T_{sync}$.



Sl. 4.19 Dužina trajanja tona T_{TONE}

Dužina trajanja RF tona, T_{TONE} , mora da bude dovoljna da obezbedi preklapanje emitovanja tona sa semplovanjem kanala čak i pri maksimalnom ofsetu takta. U najnepovoljnijem slučaju, na kraju sinhronizacionog perioda, lokalni sat jednog čvora može da kasni za θ a drugog da žuri za θ . Zbog toga, da bi se garantovalo preklapanje tona i semplovanje kanala, neophodno je da predajnik počne emitovanje tona 2θ ranije i da završi emitovanje 2θ kasnije u odnosu na slučaj idealne sinhronizacije. Na osnovu Sl. 4.19 dužina trajanja tona može da se odredi na osnovu (5):

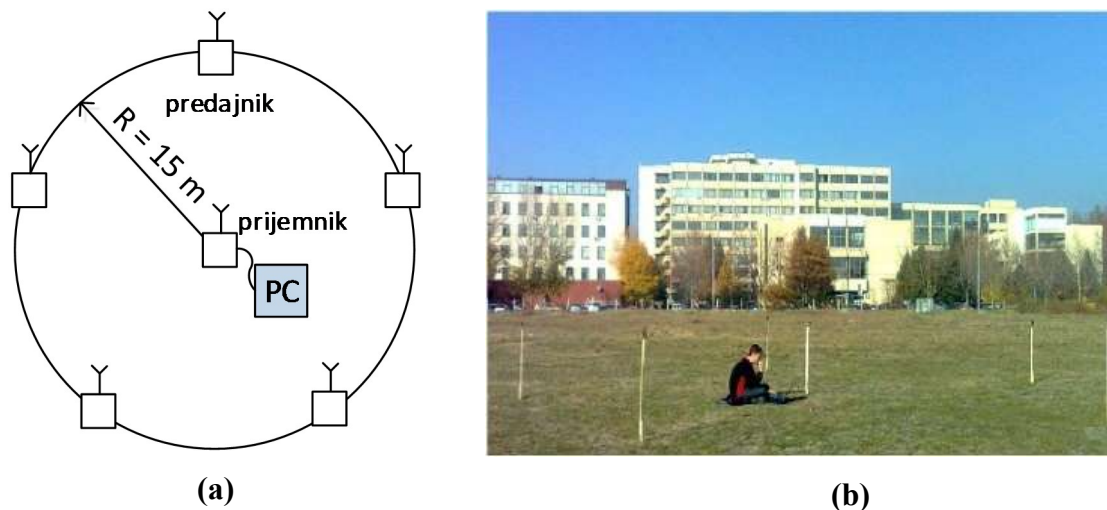
$$T_{TONE} = 4\theta + \tau_s = 4\delta T_{sync} + \tau_s \quad (5)$$

gde je τ_s vreme potrebno za jedno semplovanje kanala.

4.10. Eksperimentalni rezultati analize RF tonova

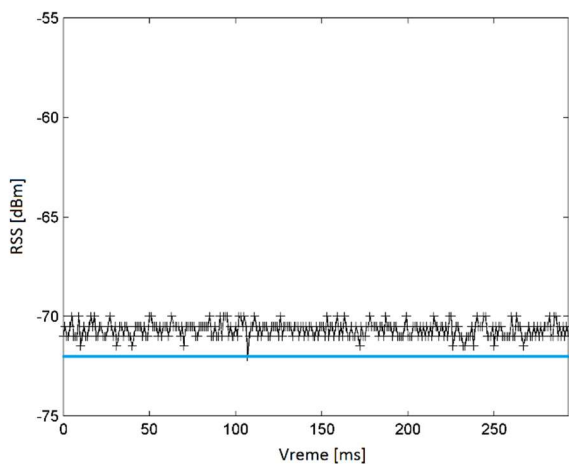
Osnovna pretpostavka MAC protokola zasnovanih na tonovima je mogućnost pouzdane detekcije tonova u prisustvu kolizija (tj. kad više predajnika u isto vreme emituje ton) upotrebom RSS-a. U opštem slučaju, kolizije dovode do superpozicije signala, što u normalnim uslovima dovodi do gubitka informacija, koje su kodirane talasnim oblikom signala. Kod tonova je informacija samo prisustvo signala, koje se detektuje merenjem nivoa prijemnog signala. Zbog toga glavno pitanje glasi: kako kolizija tonova utiče na nivo prijemnog signala.

Da bi se proverila pretpostavka o nedestruktivnoj koliziji tonova, sproveden je sledeći eksperiment (Sl. 4.20). U eksperimentu je korišćena razvojna platforma CC430, opisana na početku ovog poglavlja. Sistem se sastoji od centralnog čvora koji je u vezi sa host računaram i pet perifernih čvorova, raspoređenih u krugu poluprečnika 15 metara. Centralni čvor periodično emituje brodkast poruke koje primaju svi čvorovi. U brodkast poruci centralni čvor proziva podskup od $k \in \{1, \dots, 5\}$ perifernih čvorova. Po prijemu poruke, prozvani čvorovi sinhronizovano emituju kratak RF ton. Centralni čvor odmerava RSS i vrednost prosleđuje hostu, koji rezultate merenja pamti u fajl, radi naknadne obrade. Eksperiment je ponovljen po 1500 puta za svaki podskup aktivnih čvorova.

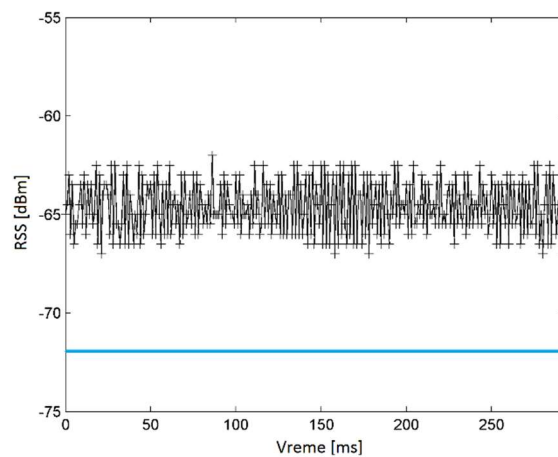


Sl. 4.20 Postavka eksperimenta (a) raspored predajnika i prijemnika (b) realni izgled eksperimenta

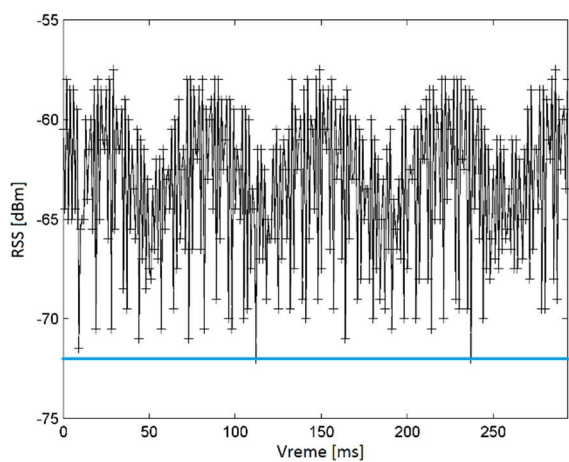
Na Sl. 4.21 prikazane su vrednosti RSS-a izmerene u toku eksperimenta. Sl. 4.21(a) prikazuje rezultate dobijene kada je u svakom trenutku aktivan samo jedan predajnik, a Sl. 4.21(b), Sl. 4.21(c), Sl. 4.21(d) i Sl. 4.21(e) vrednosti izmerenog RSS-a kada su u svakom trenutku aktivna 2, 3, 4 i 5 predajnika, respektivno. Kada je aktivan samo jedan predajnik (Sl. 4.21(a)), sukcesivni rezultati merenja su relativno ujednačeni. RSSI se kreće oko -71 dBm , sa maksimalnim odstupanjem od samo $\pm 1 \text{ dBm}$. Ove varijacije su posledica ambijentalnog šuma. Sa povećanjem broja aktivnih predajnika, uočavaju se dve tendencije. Prvo, srednja RSSI vrednost je veća. Ovo je posledica veće ukupne energije zračenja koja dolazi do centralnog čvora. Drugo, sa povećanjem broja istovremeno aktivnih prijemnika povećava se rasipanje u vrednostima rezultata, što je posledica interferencije RF signala u tački prijema. Kao što je moguće primetiti, izmerena vrednost RSS je u svim merenjima iznad vrednosti -72 dBm (prikazane plavom linijom na slikama), što znači da se ova vrednost RSSI može usvojiti kao prag za detekciju tona.



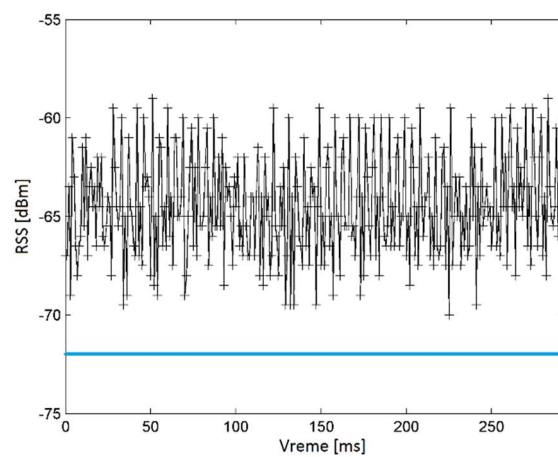
(a)



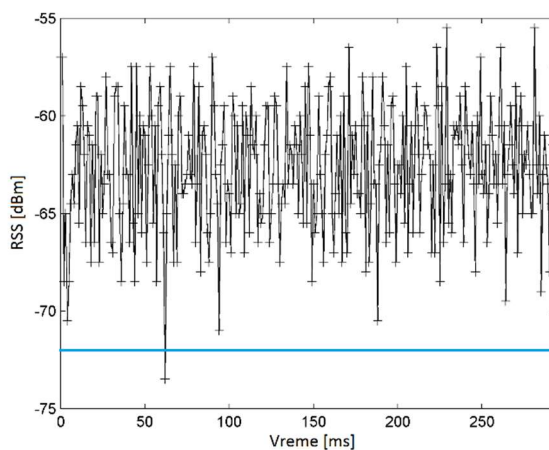
(b)



(c)



(d)



(e)

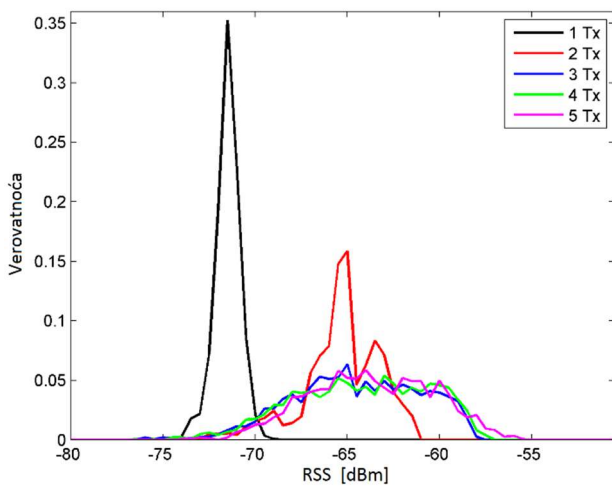
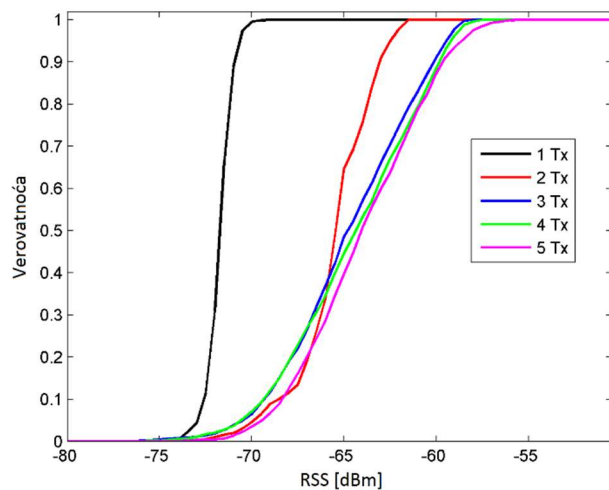
**Sl. 4.21 Izmerene vrednosti RSS-a za različit broj istovremeno aktivnih predajnika:
(a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 i (e) 5 istovremeno aktivnih predajnika**

Tabela 2 prikazuje srednje vrednosti (μ) i standardne devijacije (σ), izračunate na osnovu ovih izmerenih vrednosti. Kao što je moguće primetiti iz tabele, povećanje broja istovremeno aktivnih predajnika povećava srednju vrednost, čime se kompenzuje povećanje devijacije.

Tabela 2. Srednje vrednosti i standardne devijacije izmerenih RSS-ova

Broj istovremeno aktivnih transmitera	Srednja vrednost [dBm]	Standardna devijacija [dBm]
1	$\mu = -71$	$\sigma = 0.68$
2	$\mu = -64.84$	$\sigma = 2.12$
3	$\mu = -64.02$	$\sigma = 3.47$
4	$\mu = -63.77$	$\sigma = 3.61$
5	$\mu = -63.23$	$\sigma = 3.34$

Sledeća dva grafika, prikazana na Sl. 4.22 i Sl. 4.23 prikazuju gustinu verovatnoće i raspodelu verovatnoće RSS-a dobijene na osnovu prethodnih merenja. Ovde je slikovito prikazano da vrednost RSS ostaje u granicama iznad vrednosti praga u svim merenjima za različiti broj istovremeno aktivnih čvorova, čime je potvrđena početna pretpostavka da je moguće pouzdano detektovanje tonova čak i u slučaju kolizije tonova, čime se opravdava korišćenje tonova za potrebe razrešavanja konflikata kod klastera WSN.

**Sl. 4.22 Gustina verovatnoće****Sl. 4.23 Raspodela verovatnoće**

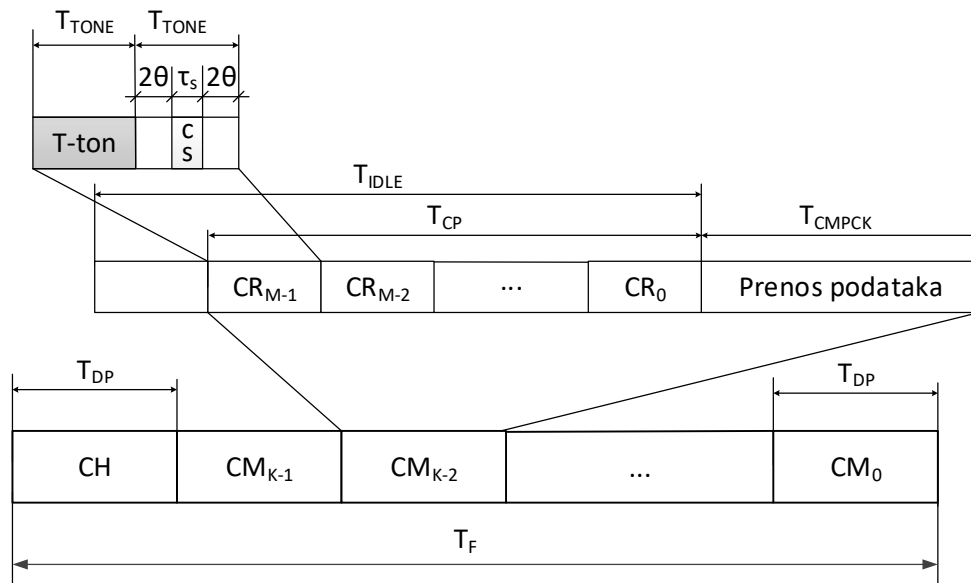
5. Primena TONE u intraklasterskom MAC protokolu za zvezdaste topologije

Radi detaljnije analize TONE-a u realnijim uslovima predložen je jednostavni intraklasterski MAC protokol, koji je nazvan STAR/TONE, koji koristi TONE mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata [32]. Intraklasterski MAC protokol može da se koristi u WSN zvezdaste topologije, kod kojih klaster obuhvata celu mrežu, ili kod hijerarhijskih mreža, za komunikaciju unutar klastera.

STAR/TONE protokol je prilagođen modelu zvezdaste WSN koji je predstavljen prilikom razvoja TONE mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata (Sekcija 4.2). Osim ovog opšteg modela WSN, STAR/TONE uvodi podelu vremena na frejmove i podršku za vremensku sinhronizaciju. STAR/TONE definiše i nekoliko sistemskih parametara, kao i proceduru za njihovo podešavanje u cilju prilagođenja različitim mrežnim konfiguracijama i aplikacionim zahtevima.

5.1. Organizacija frejma

STAR/TONE je intraklasterski MAC protokol kod koga je vreme podeljeno na frejmove (Sl. 5.1). Svaki frejm se sastoji od jednog CH slota i K CM slotova, CM_{K-1}, \dots, CM_0 , gde je broj slotova manji ili jednak broju CM čvorova u klasteru ($K \leq N$). CH slot koristi CH čvor za slanje unicast ili brodcast poruka CM čvorovima. Ove poruke se šalju relativno retko i služe za upravljanje klasterom i vremensku sinhronizaciju. CM slot se sastoji od perioda za nadmetanje, tokom koga se za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi TONE, i perioda za prenos podataka. Period za nadmetanje je podeljen na M slotova, CR_{M-1}, \dots, CR_0 , a svaki slot na dva mini slota, kao što je definisano kod TONE mehanizma (Sekcija 4.4). CM čvor može da koristi bilo koji od CM slotova za slanje poruke CH čvoru, ali samo ukoliko pobedi u nadmetanju sa ostalim potencijalnim pošiljaocima u toku perioda za nadmetanje. Parametri K i M su sistemski parametri STAR/TONE protokola.



Sl. 5.1 Struktura frejma kod STAR/TONE protokola

5.2. Vremenska sinhronizacija i trajanje RF tona

Lokalno vreme senzorskog čvorova se zasniva se taktu koji se generiše kvarcnim oscilatorom. Pošto na frekvenciju oscilovanja oscilatora utiče više različitih faktora, kao što su tehnologija proizvodnje, temperatura, vazdušni pritisak, napon napajanja, starost kvarcnog oscilatora, ona se neznatno razlikuje kod većine čvorova. Pošto je usaglašenost lokalnih časovnika CM čvorova preduslov za uspešno functionisanje STAR/TONE protokola, potrebno je eliminisati ove razlike. Upravo zato je neophodno primeniti odgovarajući sinhronizacioni protokol, kako bi se razlika između lokalnih vremena čvorova u klasteru održala u zadatim granicama.

STAR/TONE koristi master-slejev mehanizam za vremensku sinhronizaciju, tako što svakoj CH poruci dodaje referentni vremeski žig (engl. *timestamp*), da bi CM čvorovi prema njemu mogli da podese lokalne časovnike. Ukoliko nema poruka za slanje, da bi održao željeni nivo preciznosti sinhronizacije, CH čvor je u obavezi da emituje sinhronizacionu poruku na svakih K_s frejmova, odnosno poruku čija je isključiva namena sinhronizacija časovnika CM čvorova. Ako se pretpostavi da su svi čvorovi u mreži opremljeni oscilatorima sa brzinom drifta δ ppm, i trajanje frejma T_F , tada ova jednostavna šema za sinhronizaciju garantuje maksimalni razliku između časovnika CH i CM čvorova (engl. *clock offset*) od $\theta = \delta K_s T_F$. Primera radi, ako je trajanje frejma $T_F = 1$ s i $\delta = 20$ ppm, tada se slanjem sinhronizacione poruke na svakih $K_s = 10$ frejmova garantuje da θ neće biti veće od 0.2 ms.

Preciznost sinhronizacije neposredno utiče i na trajanje RF tona, kao što je već pokazano u Sekciji 4.9.2. Trajanje RF tona, T_{TONE} , mora da bude dovoljno dugo da omogući preklapanje emitovanja T-tona i semplovanje kanala i pri maksimalnoj razlici između taktova. Prema Sl. 5.1, trajanje RF tona može da se odredi kao:

$$T_{TONE} = 4\theta + \tau_s = 4\delta T_{sync} + \tau_s = 4\delta K_S T_F + \tau_s, \quad (6)$$

gde je τ_s vreme potrebno za semplovanje kanala. Minimalno trajanje RF tona $T_{TONE}^{MIN} = 4\delta T_F + \tau_s$ se postiže za $K_S = 1$, kada CH šalje sinhronizacionu poruku u svakom frejmu. Pod pretpostavkom da je za semplovanje kanala potrebno $\tau_s = 1 \text{ ms}$, za slučaj $T_F = 1 \text{ s}$ i $\delta = 20 \text{ ppm}$ minimalno trajanje RF tona bi iznosilo $T_{TONE}^{MIN} = 1.08 \text{ ms}$. Ako se sinhronizaciona poruka umesto u svakom šalje u svakom desetom frejmu ($K_S = 10$), trajanje RF tona se produžava na $T_{TONE} = 1.8 \text{ ms}$.

5.3. Brojevi za nadmetanje

Kod TONE mehanizma, brojevi za nadmetanje određuju prioritet CM čvorova, kao što je pokazano u Poglavlju 0, tako što CM sa najvećim brojem za nadmetanje ima najviši prioritet. Ovakva, statička dodela brojeva za nadmetanje bi moglo da dovede do pojave nepravilnosti, jer bi uvek pobeđivali CM čvorovi sa većim brojem za nadmetanje. Da bi se izbegla nepravilnost, koja bi u uslovima saobraćaja velikog intenziteta mogla da blokira CM čvorove sa malim prioritetom, STAR/TONE uvodi dinamičke brojeve za nadmetanje. Primenom ove modifikacije, inicijalno dodeljeni brojevi za nadmetanje se rotiraju među CM čvorovima na početku svakog CM slota. Konkretno, ako je CM čvoru v dodeljen broj za nadmetanje $CN = i$ u tekućem CM slotu, tada će čvoru v biti dodeljen $CN = (i - 1) \bmod N$ u narednom CM slotu, gde je N broj CM čvorova u klasteru.

5.4. Parametri frejma

Kod STAR/TONE protokola, niz vremenskih slotova formira dva odvojena logička kanala preko zajedničkog fizičkog (bežičnog) kanala: jedan logički kanal se sastoji od CH slotova, a drugi od CM slotova. Ukupan kapacitet fizičkog kanala, C , određen je (fizičkom) brzinom kojom podaci mogu da se šalju duž kanala. Sa druge strane, kapacitet CH logičkog kanala, B_{CH} , i kapacitet CM logičkog kanala, B_{CM} , su određeni zahtevima primene. U većini realnih primena važi:

1. Ukupan kapacitet logičkih CH i CM kanala je mnogo manji od kapaciteta fizičkog kanala ($C \gg B_{CM} + B_{CH}$)
2. Kapacitet logičkog CM kanala je mnogo veći od kapaciteta logičkog CH kanala ($B_{CM} \gg B_{CH}$).

Prva pretpostavka znači da veći deo vremena fizički kanal nije zauzet prenosom podataka, što ostavlja dosta slobodnog vremena koje se može koristiti za druge namene, konkretno za razrešavanje komunikacionih konflikata. Druga pretpostavka potiče od osobine WSN da primarno prikupljaju podatke, zbog čega je protok podataka od CM čvorova ka CH čvoru značajno veći od protoka podataka od CH ka CM čvorovima. Posledica ove pretpostavke je da u frejmu treba predvideti mnogo veći broj CM slotova od CH slotova. Imajući to u vidu, uvedeno je ograničenje da frejm uvek sadrži samo jedan CH slot. Na taj način, zahtevani kapacitet logičkog CH kanala direktno određuje trajanje frejma kao $T_F = 1/B_{CH}$. Broj CM slotova u frejmu je određen odnosom kapaciteta logičkog CM i CH kanala kao $K = \lfloor B_{CM}/B_{CH} \rfloor$.

Neka je po frejmu raspoloživo K CM slotova, a vreme potrebno za prenos jedne poruke od CM do CH čvora jednako vremenu potrebnom za prenos poruke u suprotnom smeru, od CH ka CM čvoru i iznosi T_{DP} . Tada u toku frejma može da se prenese $K + 1$ poruka, a preostalo slobodno vreme se ravnomerno raspoređuje na K CM slotova, za potrebe razrešavanja konflikata i važi da je $T_F = (K + 1)T_{DP} + KT_{IDLE}$. To znači da je u svakom slotu frejma raspoloživo T_{IDLE} slobodnog vremena:

$$T_{IDLE} = \frac{T_F - (K + 1)T_{DP}}{K} \quad (7)$$

T_{IDLE} predstavlja maksimalan iznos vremena koje je raspoloživo za nadmetanje u svakom CM slotu. Pošto je trajanje perioda za nadmetanje, T_{CP} , određeno brojem rundi za nadmetanje, M , i trajanjem RF tona, T_{TONE} , na sledeći način: $T_{CP} = 2MT_{TONE}$, i period za nadmetanje mora da bude kraći ili jednak trajanju slobodnog perioda $T_{CP} \leq T_{IDLE}$, iz jednačina (6) i (7) je moguće izvesti sledeću nejednakost:

$$T_F > \frac{(K + 1)T_{DP} + 2MK\tau_s}{1 - 8KK_sM\delta} \quad (8)$$

Iz ovog sledi da je STAR/TONE protokol moguće konfigurisati različitim vrednostima parametra M i K_s , pod uslovom da zadovoljavaju (8). Ukoliko ne postoji par vrednosti M i K_s za koje je (8) zadovoljeno, tada je nemoguće implementirati TONE mehanizam zbog manjka slobodnog vremena. Ovakva situacija može da nastupi samo u tri slučaja: 1) ukoliko aplikacija

zahteva veoma veliku propusnu moć, što dovodi do kratkog trajanja frejma i/ili do velikog broja slotova po frejmu, 2) ukoliko je broj čvorova u klasteru veliki, što zahteva dug period za nadmetanje, i 3) ukoliko je brzina drifta oscilatora velika, što dovodi do velikog trajanje RF tona.

5.5. Dužina perioda za nadmetanje i sinhronizaciona konstanta

Kod TONE mehanizma, dužina perioda za nadmetanje u klasteru od N CM čvorova može da se konfigurise na različiti broj rundi za nadmetanje u opsegu od $M = \lceil \log_2 N \rceil$ do $M = N - 1$. Međutim, kod STAR/TONE protokola dužina perioda za nadmetanje je dodatno ograničena iznosom raspoloživog slobodnog vremena slotu, T_{IDLE} , i minimalnom dužinom trajanja RF tona, T_{TONE}^{MIN} . Zbog toga je opseg dozvoljenih vrednosti za parametar M :

$$[M^{MIN}, M^{MAX}] = [\lceil \log_2 N \rceil, \min\left\{\left\lceil \frac{T_{IDLE}}{2T_{TONE}^{MIN}} \right\rceil, N - 1\right\}] \quad (9)$$

Kada je izabrano M iz opseg dozvoljenih vrednosti, treba proračunati sinhronizacionu konstantu K_S . Ovaj parametar utiče na trajanje tona, kao što je prikazano u (6), a minimalna vrednost koju može da ima je $K_S^{MIN} = 1$, za slučaj kada se sinhronizacija vrši u svakom frejmu. Maksimalna vrednost parametra K_S je uslovljena zahtevom da kompletno nadmetanje mora da bude završeno u toku slobodnog vremena slotu. Zbog toga, za dato $M \in [M^{MIN}, M^{MAX}]$, sinhronizaciona konstanta može da uzme bilo koju celobrojnu vrednost iz opsega:

$$[K_S^{MIN}, K_S^{MAX}] = \left[1, \left\lceil \frac{1}{4\delta T_F} \left(\frac{T_{IDLE}}{2M} + \tau_s \right) \right\rceil \right] \quad (10)$$

Primer 5.1

Radi boljeg razumevanja prethodnih proračuna, u ovom primeru se proračunavaju parametri protokola za jednu realnu aplikaciju. Neka se klaster sastoji od $N = 32$ CM čvorova i neka aplikacija zahteva propusnu moć od $B_{CH} = 1$ mps (poruka u sekundi, engl. *messages per second*) za CH čvor i $B_{CM} = 1$ mps za svaki CM čvor. Zahtevana propusna moć se postiže za trajanje frejma od $T_F = 1/B_{CH} = 1$ s, i $K = \lceil B_{CM}/B_{CH} \rceil = 32$ CM slotu po frejmu. Ako se pretpostavi da je potrebno preneti 40 bajtova poruka pri bitskoj brzini od 19.2 Kbps, tada je potrebno da period za prenos podataka u svakom (CH or CM) slotu traje $T_{DP} = 16.3$ ms. Prema (7), preostalo slobodno vreme u svakom slotu iznosi $T_{IDLE} = 14.44$ ms i može da se iskoristi za primenu TONE mehanizma. Neka je svaki čvor opremljen: oscilatorom sa brzinom

drifta od $\delta = 20 \text{ ppm}$ i RF primopredajnikom sa ugrađenim kolom za merenje RSSI kome je potrebno $\tau_s = 0.5 \text{ ms}$ za jednu operaciju semplovanja kanala. Prema (6), da bi mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata funkcionisao i pri najvećoj razlici između časovnika senzorskih čvorova u mreži, trajanje tona mora biti duže od $T_{TONE}^{MIN} = 0.58 \text{ ms}$. Na osnovu svih ovih podataka, moguće je na osnovu nejednakosti (8) proveriti da li je moguće primeniti STAR/TONE protokol. Desna strana nejednakosti (8) iznosi 0.716 s , i predstavlja minimalno trajanje frejma koje je potrebno da bi moglo da se završi razrešenje konflikata sa najmanjim brojem rundi i koristeći najkraće moguće tonove. Pošto je ova vrednost manja od trajanja frejma određenog na osnovu zahteva primene, protokol je moguće primeniti. Nakon ovoga, moguće je dimenzionisati ostale parametre protokola M i K_s . Prema (9) BM-BCD algoritam može da se konfiguriše sa različitim brojem rundi, iz opsega $[5, 12]$. Za svako M iz ovog opsega je moguće dalje odrediti sinhronizacionu konstantu koristeći (10). Na primer, za $M = 5$, sinhronizaciona konstanta K_s može da ima bilo koju celobrojnu vrednost iz opsega $[1, 25]$. Kako se M povećava, maksimalna dozvoljena vrednost za K_s se smanjuje, jer tonovi moraju da budu kraći, da bi veći broj rundi mogao da se smesti u slobodan period fiksnog trajanja. Recimo, $M = 6$ zahteva da K_s bude u opsegu $[1, 22]$, dok $M = 31$ smanjuje opseg dozvoljenih vrednosti za K_s na $[1, 10]$. Imajući ovo u vidu, postoji ukupno 358 dozvoljenih kombinacija parova parametara (M, K_s) .

5.6. Rezultati simulacije rada STAR/TONE protokola

Kao što je pokazano u Sekciji 5.5, STAR/TONE protokol dozvoljava izvesnu slobodu u dimenzionisanju dva međusobno zavisna parametra protokola: M i K_s . Iako je za pravilno funkcionisanje protokola dozvoljena bilo koja kombinacija vrednosti parametara M i K_s koji zadovoljavaju uslov (8), izbor njihovih vrednosti može da utiče na potrošnju energije CM čvorova u toku perioda za nadmetanje. Ako se izabere manja vrednost za K_s , povećaće se energija potrebna za sinhronizaciju, ali će se smanjiti trajanje tona, što smanjuje energiju potrebnu za emitovanje RF tonaova. Ako se izabere veliko M , smanjiće se potrošnja energije zbog smanjenja broja emitovanja T-tona (kao što je pokazano u Sekciji 5.5), ali će se povećati broj semplovanja kanala. Takođe, veliki broj rundi za nadmetanje može da zahteva skraćenje trajanja tona, što za posledicu može da ima zahtev za češćom sinhronizacijom. Pored svega ovoga, energetska efikasnost zavisi i od karakteristika saobraćaja, posebno od raspodele intenziteta saobraćaja u vremenu.

Za analiziranje ovih kompleksnih zavisnosti za različita podešavanja radio primopredajnika i protokola i za različite modele saobraćaja razvijeno je okruženje za simulaciju u SystemC-u. Tabela 3 prikazuje vrednosti parametara korišćenih u simulacijama. Za radio parametre je kao hardverska referenca korišćen primopredajnik CC1101 *Low-Power Sub-1 GHz RF* [8].

Tabela 3 Parametri korišćeni u simulaciji

Parametri:	Vrednost:
Bitska brzina	19.2 kbps
Snaga emitovanja (P_{tx})	50.7 mW
Snaga prijema (P_{rx})	49.2 mW
Energija semplovanja (E_{CS})	17.4 μ J
Vreme semplovanja (τ_s)	0.5 ms
Brzina drifta (δ)	20 ppm
Propusna moć CH (B_{CH})	2 mps/s
Propusna moć CM-ova (B_{CM})	3 mps/s
Dužina poruke (<i>bajtova</i>)	40
Veličina klastera (N)	12

Performanse STAR/TONE protokola su analizirane u smislu prosečne potrošnje energije CM čvorova tokom perioda za nadmetanje (eng. *power consumption overhead*, PCO), kao što je objašnjeno u narednom tekstu: Zbog toga što korišćeni mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata obezbeđuje prenos podataka bez kolizija, jedini izvori gubitka energije kod STAR/TONE protokola tokom perioda za nadmetanje su razrešavanje komunikacionih konflikata i vremenska sinhronizacija. Neka je dužina trajanja simulacije T_{sim} i klaster sadrži N CM čvorova. Ako je u toku simulacije emitovano ukupno N_T T-tonova, izvršeno N_{CS} semplovanja kanala i primljeno N_{SM} sinhronizacionih poruka, tada PCO može da se izračuna kao:

$$PCO = \frac{N_T T_{TONE} P_{tx} + N_{CS} E_{CS} + N_{SM} T_{SM} P_{rx}}{N T_{sim}}$$

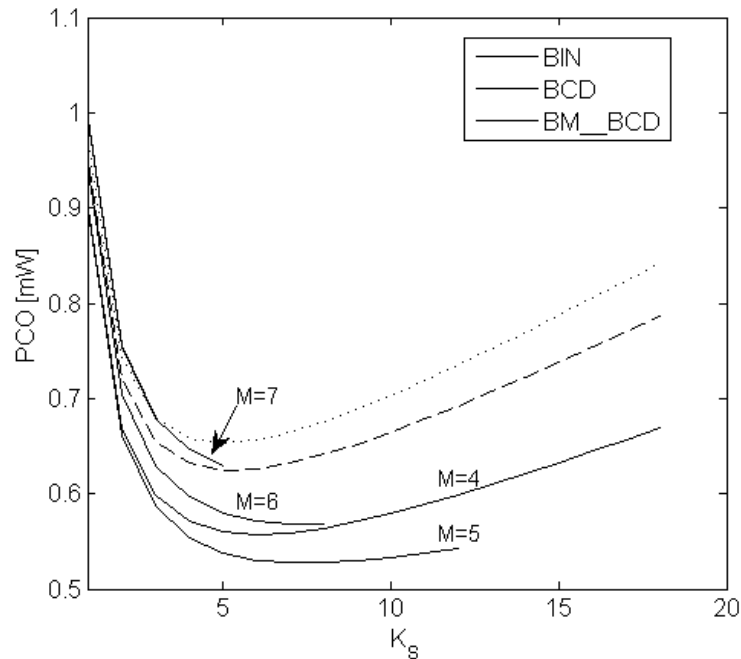
gde su P_{tx} , P_{rx} , i E_{CS} snaga emitovanja, snaga prijema i energija potrebna za jednu operaciju semplovanja kanala, respektivno. T_{TONE} je trajanje tona i T_{SM} trajanje sinhronizacione poruke.

5.6.1. Konfiguracija klastera i parametara protokola

U narednim simulacijama korišćene su sledeće postavke: simuliran je klaster od $N = 12$ CM čvorova, u kome se zahteva da propusna moć CH čvora bude $B_{CH} = 2 \text{ mps}$ i propusna moć CM čvorova bude $B_{CM} = 3 \text{ mps}$ za svaki CM. Na osnovu zahtevane propusne moći izračunati su osnovni parametri protokola, tako da trajanje frejma iznosi $T_F = 1/B_{CH} = 0.5 \text{ s}$, a broj CM slotova u frejmu iznosi $K = \lceil B_{CM}/B_{CH} \rceil = 18$. Prema (9), izračunato je da je dozvoljeni broj rundi za nadmetanje kod BM-BCD algoritma u opsegu $M \in [4, 9]$ za razliku od BCD i BIN, kod kojih je $M = 4$ jedina moguća vrednost za trajanje perioda za nadmetanje. Svaka izabrana vrednost M određuje maksimalnu vrednost za sinhronizacionu konstantu, K_S , prema (10). Na primer, za $M = 4$, maksimalni sinhronizacioni period iznosi $K_S^{MAX} = 18$ frejmova. Za veće M , tonovi moraju da budu kraći, a posledica toga je skraćenje K_S^{MAX} . Kada je $M = 9$, sinhronizacija mora da bude obavljena u svakom frejmu ($K_S^{MAX} = 1$). Simulacije su ponavljane za sve kombinacije dozvoljenih vrednosti M i K_S a dobijene vrednosti za PCO u zavisnosti od K_S za različite dužine perioda za nadmetanje su prikazane na Sl. 5.2 i Sl. 5.3.

5.6.2. PCO u uslovima periodičnog saobraćaja

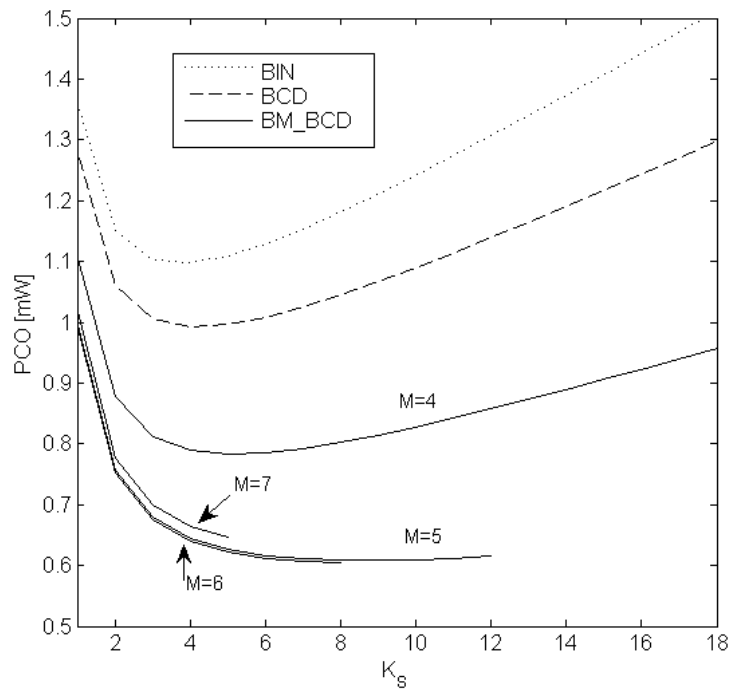
U prvom scenariju za simulaciju, čiji su rezultati prikazani na Sl. 5.2, modelovano je periodično generisanje saobraćaja. Pretpostavljeno je da CM čvorovi generišu poruke podataka prema Poasonovoj raspodeli sa brzinom pristizanja poruka od $\lambda = 3 \text{ msg/s}$. Kao što je moguće primetiti, za malo K_S , energija za sinhronizaciju je dominantna komponenta kod PCO. Sa povećanjem sinhronizacionog perioda, ova komponenta PCO se osetno smanjuje. U isto vreme, kako se K_S povećava, povećava se i trajanje tona, čime se povećava energija potrebna za emitovanje T-tonova. Kao posledica toga, za svako M postoji optimalna vrednost K_S -a za koju je PCO minimalno. Treća komponenta PCO, energija potrebna za semplovanje zavisi samo od vrednosti parametra M . Za fiksno K_S , povećanje vrednosti M dovodi do smanjenja broja emitovanja T-tonova ali i do povećanja broja semplovanja kanala. Kao što može da se vidi na Sl. 5.2, za periodični saobraćaj, minimalno PCO iznosi 0.52 mW , i postiže se kada se koristi BM-BCD algoritam konfigurisan sa $M = 5$ i $K_S = 7$. Ovo je poboljšanje od 15.7% u poređenju sa minimalnim PCO koji može da se postigne kada se koristi BCD i čak poboljšanje od 19.2% u poređenju sa BIN.



Sl. 5.2 PCO u uslovima periodičnog saobraćaja

5.6.3. PCO u uslovima rafalnog saobraćaja

U drugom scenariju za simulaciju je modelovan rafalni saobraćaj, kod koga se smenjuju periodi smanjene aktivnosti i periodi povećane aktivnosti. Pretpostavlja se da CM čvorovi generišu poruke sa brzinom pristizanja poruka od $\lambda_L = 2.88 \text{ mps}$ za vreme perioda smanjene aktivnosti u trajanju od $T_L = 9 \text{ s}$, i sa brzinom pristizanja poruka od $\lambda_H = 4 \text{ mps}$ za vreme perioda povećane aktivnosti u trajanju $T_H = 1 \text{ s}$, čime se postiže prosečna vrednost brzine pristizanja poruka od $\lambda = \frac{\lambda_L T_L + \lambda_H T_H}{T_L + T_H} = 3 \text{ mps}$. Rezultati za PCO su prikazani na Sl. 5.3. Kao što je moguće primetiti na slici, BM-BCD algoritam osetno poboljšava energetska efikasnost u poređenju sa BCD i BIN. Poboljšanje je posebno izraženo kad je BM-BCD konfigurisan sa produženim periodom za nadmetanje ($M > 4$). Minimalno PCO sada iznosi 0.61 mW i postiže se za $M = 6$ i $K_S = 8$, što je vrednost za 39% niža od BCD algoritma, i čak za 44.5% niža od BIN. Ovo poboljšanje je posledica toga što u periodima povećane aktivnosti broj generisanih poruka prevazilazi raspoloživu propusnu moć, zbog čega većina CM čvorova učestvuje u nadmetanju u svakom frejmu. U takvim okolnostima postoji velika verovatnoća da BM-BCD sa produženim periodom za nadmetanje razreši nadmetanje u prvoj rundi uz emitovanje samo jednog T-tona. Sa druge strane, BIN i BCD sa konfigurisanom minimalnim trajanjem perioda za nadmetanje zahtevaju nekoliko rundi da bi izabrali pobednika nadmetanja.



Sl. 5.3 PCO u slučaju rafalnog saobraćaja

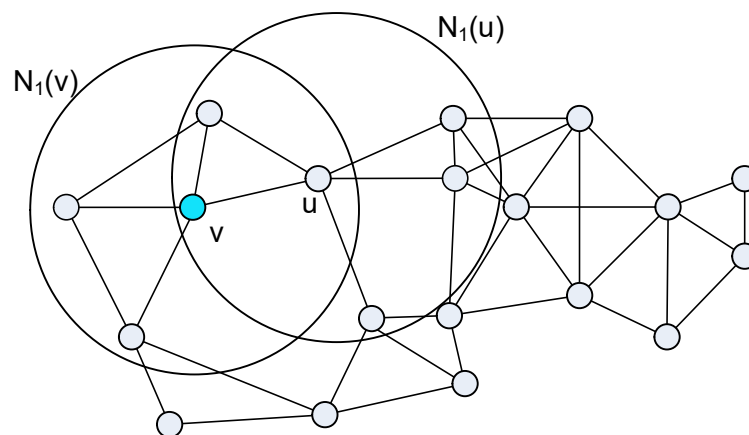
6. Primena TONE kod TDMA MAC protokola

WSN, po pravilu, sadrže veliki broj senzorskih čvorova opremljenih radio primopredajnicima malog dometa koji su na ad-hoc način raspoređeni u većem geografskom prostoru i zbog toga ih je nemoguće organizovati u vidu jednog klastera. Ovakve WSN se organizuju u vidu multihop mreže gde svaki čvor svaki čvor ima dvostruku ulogu, tj. ponaša se kao izvor podataka i relejna stanica. MAC protokoli za multihop mreže su složeniji od MAC protokola za klastere i kod njih je problem komunikacionih konflikata izraženiji. Generalno, postoje dva različita pristupa za razrešavanje komunikacionih konflikata u multihop WSN: jedan se pristup koristi kod TDMA protokola a drugi kod protokola sa zajedničkim aktivnim periodom. Kod većine TDMA MAC protokola za WSN, konflikti se razrešavaju uspostavljanjem striktnog vremenskog rasporeda korišćenja komunikacionog medijuma od strane pojedinačnih senzorskih čvorova. Postojeći TDMA MAC protokoli za WSN tradicionalno dodeljuju TDMA slotove senzorskim čvorovima za slanje poruka, na način koji eliminiše mogućnost nastanka kolizija. Međutim, kod njih se energija nepotrebno troši na preslušavanje s obzirom da svaki čvor mora da bude u režimu prijema u slotovima svih svojih suseda. Problem preslušavanja se otklanja dodelom TDMA slotova za prijem poruka. Kod TDMA protokola sa rasporedom slotova za prijem poruka, moguće je postoji više od jednog potencijalnog pošiljaoca u svakom slotu, tako da na početku svakog slota treba razrešiti nadmetanje. Postojeći TDMA protokoli sa rasporedom slotova za prijem poruka za razrešavanje komunikacionih konflikata koriste CSMA, koji pati od problema skrivenih i izloženih terminala, čime su ovi protokoli ograničeni samo na uslove saobraćaja niskog intenziteta. U ovom poglavlju će biti predložena upotreba TONE mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata umesto CSMA, na način koji u potpunosti otklanja probleme skrivenih i izloženih terminala u protokolu [33]. Upotreba TONE mehanizma umesto CSMA poboljšava performanse TDMA protokola sa rasporedom slotova za prijem poruka, tako da mogu da se koriste u uslovima saobraćaja velikog intenziteta, i troši manje energije od protokola sa rasporedom slotova za prijem poruka.

6.1. Model sistema

WSN se sastoji od N senzorskih čvorova koji čine skup V (Sl. 4.1). Senzorski čvorovi su opremljeni radio primopredajnicima male potrošnje i dometa manjeg od maksimalnog

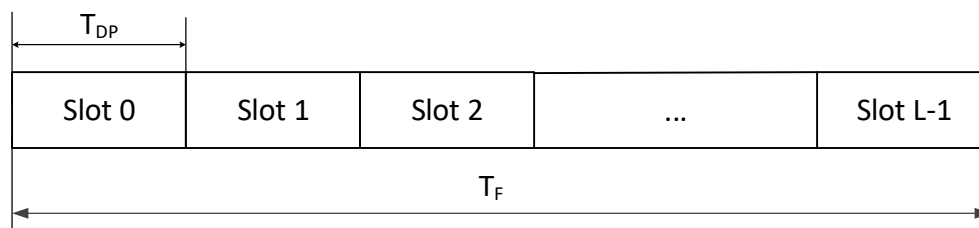
rastojanja bilo koja dva senzorska čvora u mreži. Usled ovoga se komunikacija u WSN odvija na multihop način. Svaki senzorski čvor $v \in V$ može da komunicira samo sa podskupom $N_1(v) \subseteq V$ čvorova koji mu se nalaze u dometu radio primopredajnika. Kaže se da je senzorski čvor $u \in N_1(v)$ 1-hop sused senzorskog čvora v , odnosno njegov sused. Pretpostavlja se da je komunikacija dvosmerna, tj. ako je $u \in N_1(v)$ tada je i $v \in N_1(u)$. Veličina skupa $N_1(v)$ predstavlja stepen čvora v i označava se sa $\delta(v)$. Maksimalni i prosečan stepen čvorova u WSN se obeležavaju sa δ_{max} i δ_{avr} respektivno. Čvor iz 2-hop okoline čvora v ($N_{\leq 2}(v)$) je sused čvora v ili sused nekog od njegovih suseda. U opštem slučaju, čvor iz k -hop okoline čvora v ($N_{\leq k}(v)$) je bilo koji sused čvora v ili nekog od njegovih $(k - 1)$ -hop suseda.



Sl. 6.1 Multihop WSN

Za komunikaciju unutar WSN koristi se TDMA MAC protokol. Pri tome važe sledeće pretpostavke:

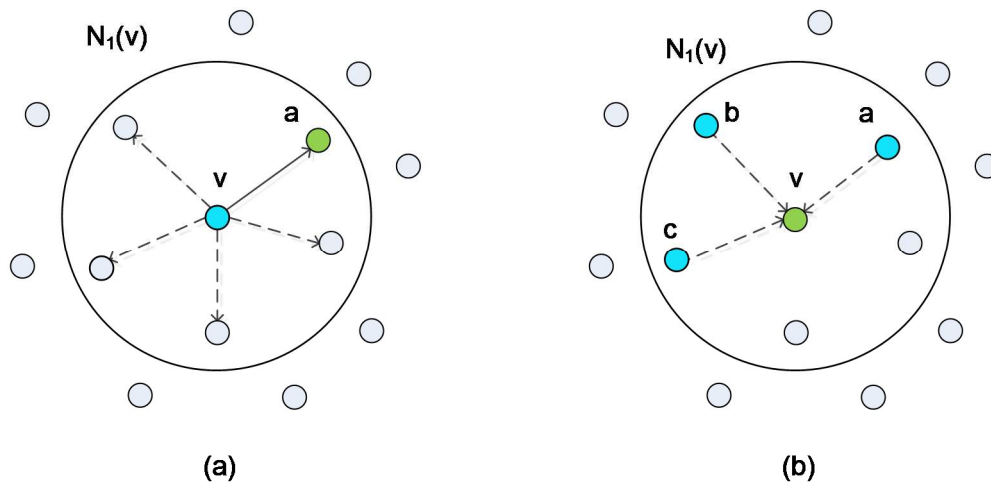
- Komunikacija u WSN je strogo sinhronizovana. Vreme je podeljeno u frejmove trajanja T_F (Sl. 6.2). Svaki frejm je podeljen na L TDMA slotova trajanja T_{DP} . Svaki frejm je predviđen za slanje najviše jednog paketa podataka.



Sl. 6.2 Organizacija frejma kod TDMA

- TDMA slotovi se dodeljuju senzorskim čvorovima, tako da se svakom senzorskom čvoru v dodeljuje jedan slot $S(v) \in \{1, \dots, L\}$ iz frejma. Tačnije, kaže se da je senzorski čvor v vlasnik slota $S(v)$. Prema načinu na koji senzorski čvor koristi svoj slot, razlikuju se dve vrste TDMA protokola: a) TDMA sa rasporedom slotova za slanje

poruka (TD-TDMA, eng. *Transmitter-Driven TDMA*), kod koga senzorski čvor v koristi slot $S(v)$ za slanje poruka svojim 1-hop susedima (Sl. 6.3(a)) i b) TDMA sa rasporedom slotova za prijem poruka (RD-TDMA, eng. *Receiver-Driven TDMA*) kod koga senzorski čvor v koristi slot $S(v)$ za prijem poruka od svojih 1-hop suseda (Sl. 6.3(b)). Pošto su u slučaju RD-TDMA protokola, kad postoji više potencijalnih pošiljaoca za svakog vlasnika čvora, moguće kolizije, ove je protokole potrebno dopuniti mehanizmom za razrešenje konflikata. Za ove potrebe se obično koristi CSMA (kod RD-TDMA/CSMA protokola), a u ovom poglavlju će biti predložen RD-TDMA/TONE protokol.



Sl. 6.3 Načini za korišćenja slotova: (a) Raspored slotova za slanje poruka: čvor v koristi svoj slot za slanje poruke čvoru a ; ovu poruku primaju (a onda odbacuju) svi čvorovi u dometu (1-hop okolini) čvora v ; (b) raspored slotova za prijem poruka: čvor v koristi svoj slot za prijem poruka od svojih suseda. Susedi moraju da se nadmeću za pristup medijumu da bi poslali poruku čvoru v . CSMA može da spreči koliziju između a i b , kao i između b i c , ali ne i između a i c (jer ne čuju jedan drugog).

- Ukupan broj čvorova u mreži je obično veći od broja slotova u frejmu. Zbog toga isti slot mora da koristi više prostorno udaljenih senzorskih čvorova. Istovremeno korišćenje jednog slota od strane više senzorskih čvorova izaziva takozvanu konfliktnu dodelu slota (KDS). KDS stepena k nastaje kada dva senzorska čvora na rastojanju k hopa koriste isti slot. Postojanje KDS stepena $k \leq 2$ izaziva interferenciju RF signala i može da dovede do kolizija ukoliko se ispravno ne tretira. Raspored slotova se definiše kao beskonfliktni u 2-hop okolini ukoliko se slot $S(v)$ ne koristi u 2-hop okolini čvora v , $N_{\leq 2}(v)$. Za formiranje rasporeda slotova se koristi distribuirani algoritam, koji će biti detaljnije analiziran u narednoj sekciji.

6.2. *Formiranje rasporeda slotova*

TDMA protokoli se oslanjaju na postojanje validnog rasporeda slotova. Raspored slotova je validan ukoliko isti slot koriste samo senzorski čvorovi koji se nalaze na rastojanju ne manjem od 2-hopa. Tipično, ne postoji samo jedan validan raspored, već veliki broj alternativnih rasporeda od kojih svaki zadovoljava uslov validnosti, a razlika postoji u ukupnom broju upotrebljenih slotova. Raspored je optimalan ako je validan i pri tom koristi najmanji mogući broj slotova. Manji broj slotova znači da će trajanje frejma biti kraće, čime će i latencija biti manja a propusnost mreže veća. Kod centralizovanog kreiranja rasporeda slotova, centralni entitet kreira raspored i distribuira ga svim čvorovima u mreži. Zbog decentralizovane prirode WSN, centralizovano kreiranje rasporeda nije moguće, pa se kod njih raspored slotova formira distribuirano. Kod distribuiranog formiranja rasporeda, svaki senzorski čvor bira slot za sebe na osnovu informacija iz svog okruženja. Pošto svaki čvor bira slot samo na osnovu lokalnih informacija, dobijeni raspored po pravilu nije optimalan, jer koristi veći broj slotova nego raspored kreiran u centralizovanom sistemu.

U nastavku je predstavljena skica jednog distribuiranog algoritma za formiranje rasporeda slotova [55]. Zahtev je da svaki senzorski čvor poseduje jedinstveni identifikator, u vidu celog broja. Celokupan postupak obuhvata tri faze. U prvoj fazi vrši se otkrivanje suseda, u drugoj izbor slotova, a u trećoj kreiranje tabele slotova.

Prva faza. Tokom prve faze (otkrivanje suseda - *neighborhood discovery*) svaki senzorski čvor formira dve liste koje sadrže identifikatore suseda: listu 1-hop suseda i listu 2-hop suseda (obuhvata 1-hop susede i sve njihove susede). Senzorski čvor je podrazumevano na prijemu i povremeno emituje brodcast poruku sa svojim identifikatorom i listom identifikatora do tog momenta otkrivenih 1-hop suseda. Između dva emitovanja poruke, senzorski čvor pravi pauzu slučajno izabranog trajanja, čime se smanjuje verovatnoća kolizije sa porukama drugih senzorskih čvorova. Senzorski čvor v po prijemu poruke od senzorskog čvora u , ažurira svoje liste, tako što u listu 1-hop suseda stavlja identifikator senzorskog čvora u , a u listu 2-hop suseda sve susede senzorskog čvora u (uz vođenje računa da se identifikatori ne dupliraju). Trajanje faze otkrivanja suseda je unapred definisano, a treba da bude dovoljno dugo da se sa velikom verovatnoćom može garantovati da je svaki senzorski čvor uspeo da popuni svoje dve liste.

Druga faza. U drugoj fazi se vrši izbor slotova. Za ovu namenu koristi se **distribuirani izborni algoritam** (*distributed election algorithm*). Procedura je slična kao u prvoj fazi – svaki senzorski čvor povremeno emituje poruke sa informacijom o sebi i trenutno dostupnim

informacijama o svom 1-hop okruženju. Razlika je u tome što je sada svakom identifikatoru susednog senzorskog čvora pridružen redni broj slota koji je taj senzorski čvor izabrao. Ukoliko informacija o izabranom slotu nekog 1-hop suseda nije dostupna, odgovarajuća stavka u poruci ostaje prazna. Nakon prijema poruke, senzorski čvor ažurira listu 2-hop suseda, tako što identifikatorima u listi pridružuje primljene brojeve slotova. Nakon ažuriranja liste 2-hop suseda, senzorski čvor proverava da li u 2-hop listi postoji senzorski čvor sa manjim identifikatorom od njegovog kojem još uvek nije dodeljen slot. Ukoliko takav 2-hop sused ne postoji, senzorski čvor bira slot za sebe iz skupa nezauzetih slotova. Informacija o učinjenom izboru naći će se u prvoj sledećoj poruci koju senzorski čvor emituje i time će biti distribuirana svim 2-hop susedima. To će omogućiti da neki drugi senzorski čvor postane senzorski čvor sa najmanjim identifikatorom među svojim 2-hop susedima koji još uvek nema dodeljen slot i da shodno tome izabere slot za sebe. Ova faza se završava posle unapred definisanog vremena, koje je dovoljno dugog trajanja da se sa velikom izvesnošću može smatrati da su svi senzorski čvorovi uspeali da izaberu slot.

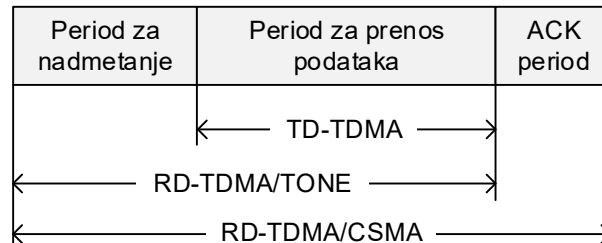
Treća faza. U trećoj fazi, svaki senzorski čvor, lokalno, formira tabelu slotova. U ovoj tabeli svaki slot je označen statusom: sopstveni, susedni ili neaktivni. Sopstveni slot je onaj koji je senzorski čvor izabrao za sebe u prethodnoj fazi. Slot je susedni ukoliko postoji 1-hop sused koji ga je izabrao za sebe. Svi ostali slotovi su neaktivni.

Postoji nekoliko varijanti implementacije opisanog algoritma za formiranje rasporeda slotova. Jedna mogućnost je da su formiranje rasporeda slotova i prenos podataka po uspostavljenom rasporedu dva vremenski razdvojena režima rada. Formiranje rasporeda slotova se sprovodi na početku rada mreže i nakon značajnih promene u topologiji mreže (zbog otkaza i/ili dodavanja novih čvorova). Druga mogućnost je da se formiranje, a onda i modifikovanje rasporeda slotova odvija uporedo sa prenosom podataka. Pri tom postoje dva pristupa. Prvi je da svaki frejm počinje vremenskim slotom sa slobodnim pristupom (podrazumeva upotrebu CSMA), tokom kojeg se sprovodi algoritam za formiranje rasporeda slotova. Drugi pristup se sastoji u tome da čvor pridodaje informaciju o rasporedu slotova (lista 1-hop suseda i njihovih slotova) zaglavljju svake poruke podataka koju šalje.

6.3. TDMA slot

U opštem slučaju, svaki slot TDMA frejma je podeljen na tri dela: *a*) period za nadmetanje, *b*) period za prenos podataka, i *c*) ACK period. Sve vrste TDMA protokola ne zahtevaju postojanje sva tri perioda, kao što je prikazano na Sl. 6.4. Kod TD-TDMA protokola

potreban je samo period za prenos podataka, dok RD-TDMA/CSMA i RD-TDMA/TONE zahtevaju i postojanje perioda za nadmetanje. Zbog mogućnosti nastajanja kolizija, RD-TDMA/CSMA protokolu je potreban i ACK period, koji nije potreban u slučaju druga dva protokola, koji garantuju prenos podataka bez kolizija.

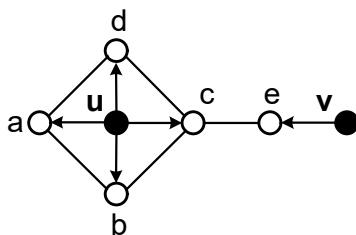


Sl. 6.4. Struktura TDMA slota

TD-TDMA i RD-TDMA protokoli zahtevaju različite mehanizme za pristup kanalu u svom rezervisanom slotu. Kod TD-TDMA protokola čvorovi direktno pristupaju kanalu bez nadmetanja i bez mogućnosti pojave kolizija, čime se znatno pojednostavljuje projektovanje mehanizma za pristup kanalu. Zbog mogućnosti nastanka kolizija, kod RD-TDMA protokola je potreban komplikovaniji mehanizam za pristup kanalu, koji uključuje proceduru za razrešenje konflikata na početku svakog slota.

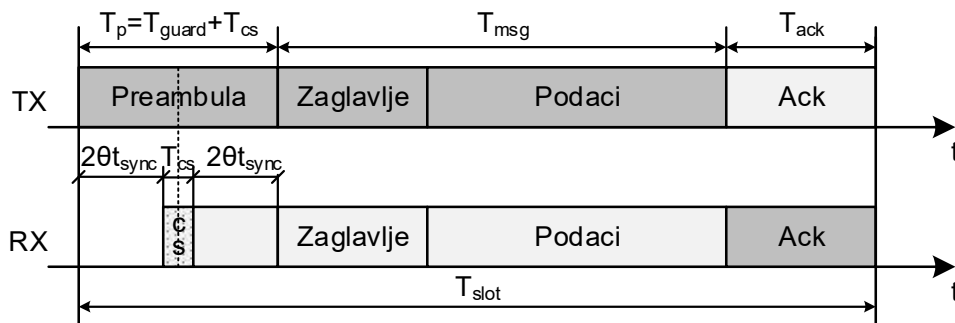
6.4. TD-TDMA protokoli

Formiranje rasporeda slotova beskonfliktnog u 2-hop okolini kod TD-TDMA protokola maksimizuje propusnu moć mreže u uslovima velike gustine saobraćaja. Uzmimo za primer dodelu slotova prikazanu na Sl. 6.5. Na slici su crnim tačkama prikazani senzorski čvorovi u i v koji dele isti slot za emitovanje. Zbog toga što ova dva senzorska čvora nemaju zajedničke susede, u slučajevima kad emituju poruku u isto vreme ne može da dođe do kolizije, pa ovakvo formiranje rasporeda slotova smanjuje potencijalne gubitke energije usled nadmetanja i kolizija. Osim toga, TD-TDMA raspored slotova može da garantuje istu propusnu moć svim senzorskim čvorovima u mreži, tako što svaki senzorski čvor u mreži može da koristi svoj slot u svakom frejmu, nezavisno od trenutne gustine saobraćaja. Međutim, ovakvo kreiranje rasporeda povećava potrošnju energije potrebne za semplovanje kanala čak i u odsustvu saobraćaja, jer svaki senzorski čvor mora da se budi u svakom slotu koji pripada nekom od njegovih suseda, da ne bi propustio dolaznu poruku. Osim toga, buđenje u svakom slotu svojih suseda dovodi do preslušavanja, što je posebno problem u mrežama velike gustine.



Sl. 6.5 Primer dodele TDMA slotova za predaju

Na Sl. 6.6 je prikazan vremenski dijagram aktivnosti predajnika i prijemnika kod TD-TDMA protokola. Predajnik u svom slotu šalje poruku jednom od svojih suseda. Poruka počinje preambulom, zatim se šalje zaglavlje, pa podaci. Da bi se izbeglo dugo nepotrebno slušanje kada predajnik nema podatke za slanje, prijemnici kratko sempljuju preambulu na početku slota. Trajanje preambule je izabrano tako da se kompenzuje drift oscilatora. Ukoliko nema poruke, prijemnici se odmah vraćaju u režim smanjene potrošnje. U protivnom, ukoliko je detektovan signal, prijemnici ostaju budni i čekaju poruku. Da bi se izbeglo preslušavanje cele poruke, prijemnici ispituju određi adresu poruke čim prime zaglavlje. Svi senzorski čvorovi kojima poruka nije namenjena odmah prelaze u režim smanjene potrošnje a budan ostaje samo određi čvor. Po uspešnom prijemu poruke, određi čvor može da opciono odgovori ACK porukom.

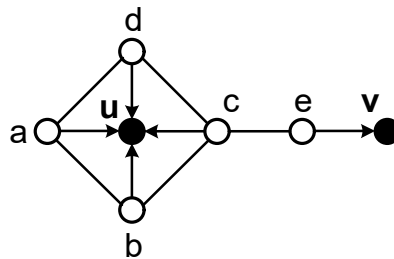


Sl. 6.6 Razmena podataka kod TD-TDMA protokola

6.5. RD-TDMA protokoli

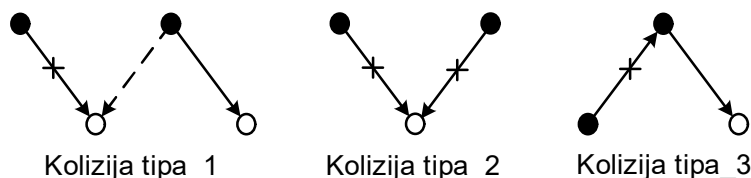
Kod RD-TDMA protokola svakom senzorskom čvoru je dodeljen jedinstven slot u 2-hop okolini za prijem poruke. U uslovima saobraćaja male gustine RD-TDMA je energetski efikasniji od TD-TDMA protokola, zato što svaki senzorski čvor sempljuje kanal samo jednom u toku frejma, odnosno samo u svom slotu. Takođe, formiranje rasporeda slotova beskonfliktnog u 2-hop okolini potpuno eliminiše preslušavanje nepotrebnih poruka, zato što je u svakom slučaju potencijalni prijemnik istovremeno i jedini aktivan prijemnik u okolini predajnika. Kod ovakve dodele slotova, postoji mogućnost da dva ili više suseda pokuša da

pošalje poruku istom senzorskom čvoru u istom slotu, tj. moguće je da nastupi kolizija. Na primer, ako dva senzorska čvora, a i b , iz 1-hop okoline senzorskog čvora u , $a \in N_1(v)$ i $b \in N_1(v)$, emituju poruke istovremeno, senzorski čvor u neće primiti ispravno ni jednu poruku (Sl. 6.7).



Sl. 6.7 Primer dodele TDMA slotova za prijem

Generalno, u multihop mrežama je moguće da nastane jedan od tri tipa kolizija, kao što je prikazano na Sl. 6.8. Kolizija tipa_1 nastaje kada je prijemnik konkretnog prenosa u dometu drugog prenosa namenjenog drugom čvoru. Kolizija tipa_2 nastaje kad dva ili više senzorskih čvorova pokuša da istovremeno pošalje poruku istom senzorskom čvoru. Kolizija tipa_3 nastaje kao posledica poludupleks režima rada primopredajnika, kad potencijalni pošiljalac ne čuje poruku, zato što za to vreme šalje poruku drugom senzorskom čvoru. Kod RD-TDMA protokola se kolizije tipa_1 i tipa_3 uspešno eliminišu formiranjem rasporeda slotova ekskluzivnog u 2-hop okolini, ali ostaje problem kolizije tipa_2.



Sl. 6.8 Tipovi kolizija

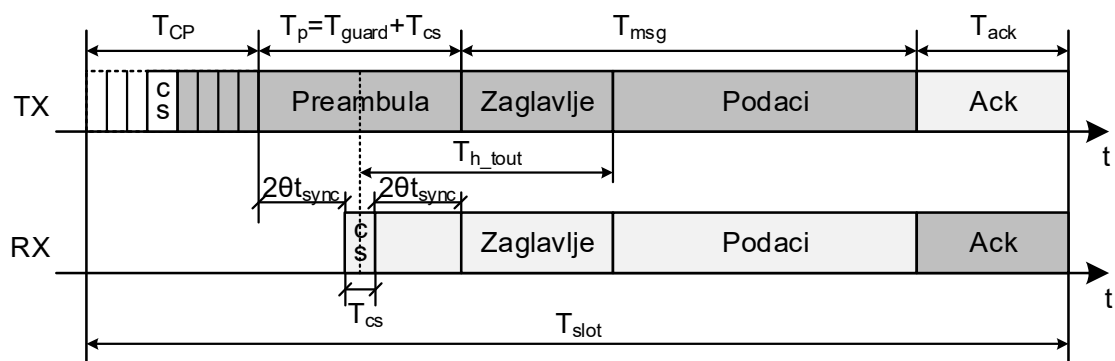
Za razrešenje konflikata u kontekstu RD-TDMA protokola važna su tri koncepta: transmitterska grupa, potencijalni pošiljalac i grupa za nadmetanje. *Transmitterska grupa* je skup senzorskih čvorova sa zajedničkim prijemnikom. Kod WSN zasnovanih na RD-TDMA transmitterska grupa odgovara 1-hop okolini vlasnika slotu. Na Sl. 6.7 senzorski čvorovi a , b , c i d čine transmittersku grupu tokom slotu čiji je vlasnik senzorski čvor u . Zbog formiranja rasporeda slotova ekskluzivnog u 2-hop okolini, svaki senzorski čvor u svakom slotu može da pripada najviše jednoj transmitterskoj grupi. *Potencijalni pošiljalac* je senzorski čvor u transmitterskoj grupi koji želi da pošalje poruku vlasniku slotu. Svako simultano emitovanje dva ili više potencijalna pošiljaoca iz transmitterske grupe izaziva koliziju na strani prijemnog

čvora. *Grupa za nadmetanje* se definiše kao maksimalni skup potencijalnih pošiljalaca koji mogu da se međusobno nadmeću za pristup kanalu. Svrha mehanizma za razrešenje konflikata je da se izabere najviše jedan od potencijalnih pošiljalaca iz grupe za nadmetanje na potpuno distribuiran način.

Zbog činjenice da je razrešenje konflikata lokalizovano na pojedinačne grupe za nadmetanje, emitovanje podataka bez kolizija može da se garantuje samo ukoliko svi senzorski čvorovi iz transmitterske grupe pripadaju istoj grupi za nadmetanje. U protivnom bi pobednici nadmetanja iz različitih grupa za nadmetanje emitovali poruke simultano što bi izazvalo koliziju na strani prijemnog čvora, tj. izazvali bi problem skrivenih terminala. Osim toga, moguće je da se u jednoj grupi za nadmetanje nađu senzorski čvorovi iz dve ili više transmitterskih grupa. Ovo vodi do pojave izloženih terminala, kad senzorski čvor gubi nadmetanje i odustaje od emitovanja, što takođe jedino može da se razreši upotrebom mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata kod koga je transmitterska grupa jednaka grupi za nadmetanje.

6.5.1. RD-TDMA/CSMA

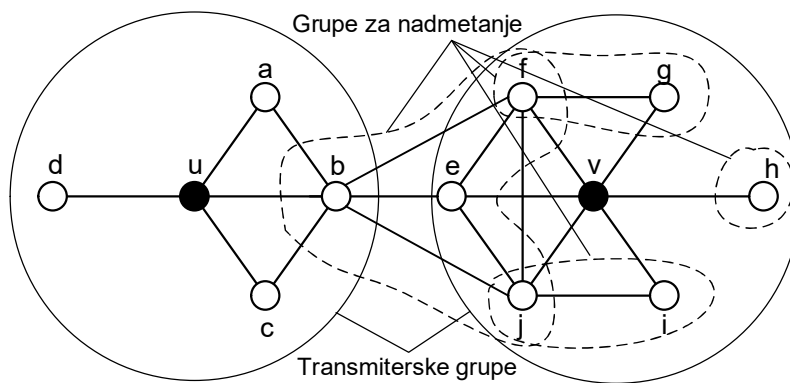
Da bi se razrešio problem mogućih kolizija tipa_2, RD-TDMA protokoli koriste mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata, tipično zasnovan na CSMA. Svaki TDMA slot je proširen periodom za nadmetanje (T_{CP}), koji je podeljen u više kratkih slotova za nadmetanje (Sl. 6.9). Senzorski čvor koji želi da pošalje poruku u konkretnom slotu slučajno bira jedan od slotova za nadmetanje i sempluje kanal. Ukoliko je kanal slobodan, senzorski čvor nastavlja proceduru tako što počinje da šalje preambulu u preostalom delu perioda za nadmetanje i do kraja perioda za slanje preambule. U protivnom, ukoliko senzorski čvor detektuje zauzet kanal, kada je neki drugi senzorski čvor počeo emitovanje preambule pre njega, odustaje od slanja. Na taj način, samo pobednik nadmetanja može da pošalje poruku, dok ostali potencijalni pošiljaoci odlažu svoje slanje. Sa druge strane, vlasnik slotova se ponaša isto kao potencijalni prijemnik kod TD-TDMA protokola. Da bi izbegao nepotrebno slušanje, vlasnik slotova prekida slušanje ukoliko ne primi zaglavlje neko vreme posle semplovanja kanala ($T_{h,out}$). Moguć je i slučaj da senzorski čvor detektuje preambulu ali ne primi zaglavlje (u slučaju kolizije). Po uspešnom prijemu poruke prijemnik u istom slotu odgovara ACK paketom. Jedina indikacija predajniku da je došlo do kolizije je izostanak ACK paketa.



Sl. 6.9 Razmena podataka kod RD-TDMA/CSMA protokola

Kod CSMA mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata, grupa za nadmetanje obuhvata maksimalan skup predajnika koji su 1-hop susedi. Kao posledica toga, u grupa za nadmetanje mogu da se nađu senzorski čvorovi iz različitih transmitterskih grupa. Takođe, senzorski čvorovi iz jedne transmitterske grupe mogu da budu grupisani u nekoliko grupa za nadmetanje, zbog toga što je maksimalno rastojanje između senzorskih čvorova u transmitterskoj grupi 2 hopa. Na primer, sedam senzorskih čvorova iz transmitterske grupe oko čvora v na Sl. 6.10 formiraju četiri grupe za nadmetanje. Čvorovi u okviru iste grupe za nadmetanje su svi u međusobnom dometu a grupe za nadmetanje mogu da se preklapaju. Pošto se nadmetanje obavlja samo u okviru grupe za nadmetanje, moguće je da nakon nadmetanja postoji do čak četiri pobednika, usled čega će doći do kolizija. Jedan od mogućih scenarija je da su čvorovi e , g , h i i jedini potencijalni pošiljaoci u okolini čvora v i da iz nadmetanja svi izađu kao pobednici. Osim toga, čvorovi f , e i j iz transmitterske grupe oko senzorskog čvora v pripadaju grupi za nadmetanje u kojoj je i senzorski čvor b iz druge transmitterske grupe. Pošto se ograničenje o dodeli slotova za nadmetanje odnosi na 2-hop okolinu, senzorski čvorovi u i v , koji su na rastojanju od 3 hopa, mogu da koriste isti slot. To znači da bi pobeda nekog od senzorskih čvorova f , e ili j sprečila senzorski čvor b da emituje, uprkos tome što njegovo emitovanje ne bi remetilo prijem senzorskog čvora v . Na isti način bi pobeda senzorskog čvora b sprečila senzorske čvorove f , e i j da emituju u svojoj grupi.

Zbog mogućnosti nastupanja kolizija, svaki pošiljalac mora da baferuje poslate poruke sve dok ne primi odgovarajući ACK. Ukoliko ne primi odgovarajući ACK paket, pošiljalac mora da ponovo pošalje istu poruku. Da bi se izbegla ponovna pojava kolizije, pošiljalac čeka slučajan broj frejmova (takozvani interval za povlačenje) pre nego što pokuša da pošalje poruku istom prijemniku.



Sl. 6.10 Primer podele čvorova na transmitterske grupe i grupe za nadmetanje kod RD-TDMA/CSMA protokola

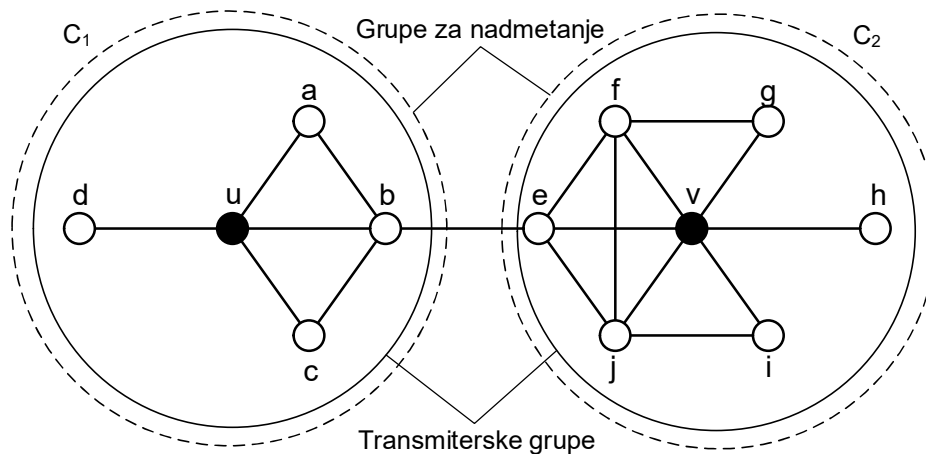
Zbog efekata skrivenih i izloženih terminala i potrebe za emitovanjem ACK paketa CSMA ima problem sa povećanjem potrošnje usled kolizija i dodatnog saobraćaja, kao i sa smanjenjem propusne moći. Zbog svih pobrojanih problema CSMA je neprikladan za upotrebu kod RD-TDMA protokola pa postoji potreba za uvođenjem novih mehanizama za razrešenje konflikata, kao što je predloženi TONE.

6.6. RD-TDMA/TONE

U toku svakog slota s u frejmu u WSN se formira određeni broj klastera sa vlasnicima slota s u ulozi CH čvora. Zbog ekskluzivne dodele slotova u 2-hop okolini, minimalno rastojanje između bilo koja dva aktivna CH čvora je najmanje 3 hopa, što praktično znači da su klasteri međusobno izolovani (svaki čvor koji nije vlasnik slota s pripada najviše jednom klasteru). Zbog toga je na takve međusobno izolovane klasterne moguće primeniti TONE mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata koji je originalno projektovan za mreže zvezdaste topologije (Poglavlje 5). U ovoj disertaciji se predlaže novi TDMA protokol, nazvan RD-TDMA/TONE protokol, sa rasporedom slotova za prijem poruka, koji koristi TONE mehanizam sa BM-BCD algoritmom.

Dvofazni način signaliziranja RF tonovima kod TONE-a praktično proširuje grupu za nadmetanje na ceo klaster, odnosno, grupa za nadmetanje i transmitterska grupa se izjednačavaju, kao što je prikazano na Sl. 6.11. Ovim se potpuno eliminišu problemi skrivenih i izloženih terminala. Izbegavanje skrivenih terminala je postignuto emitovanjem R-tona od strane CH čvora, čime se svi senzorski čvorovi iz transmitterske grupe spajaju u jednu grupu za nadmetanje. Izbegavanje izloženih terminala je objašnjeno pomoću primera na Sl. 6.11, u kome su prikazane dve susedne transmitterske grupe, C_1 i C_2 , u kojima su prijemni čvorovi v i u , respektivno, vlasnici istog slota. Zbog minimalnog rastojanja od 3 hopa između istovremeno

aktivnih prijemnih čvorova, T-tonove koje emituju potencijalni pošiljaoci u jednoj transmitterskoj grupi ne može da čuje prijemni čvor iz druge transmitterske grupe. Slično, R-tonove koje emituje neki od prijemnih čvorova ne mogu da čuju potencijalni pošiljaoci iz druge transmitterske grupe, zato što se nalaze na najmanje 2 hopa od njega. Na ovaj način, susedne transmitterske grupe su praktično izolovane jedna od druge, tj. ne ometaju jedna drugu čak i kada su istovremeno aktivne.



Sl. 6.11 Primer podele senzorskih čvorova na transmitterske grupe i grupe za nadmetanje kod RD-TDMA/TONE protokola

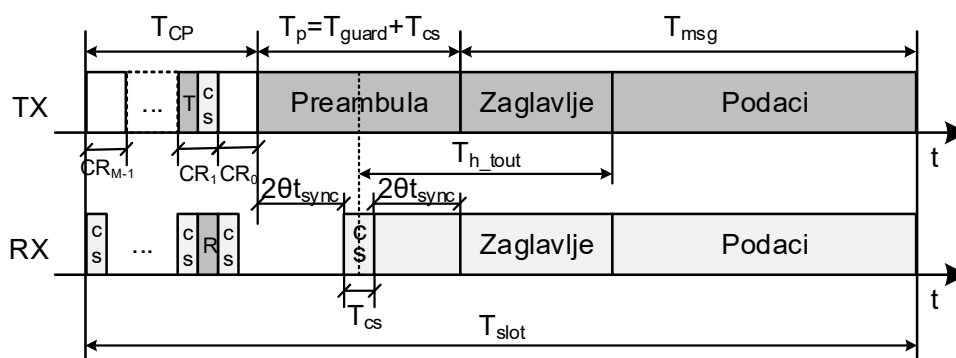
BM-BCD algoritam zahteva uvođenje brojeva za nadmetanje i definisanje dužine perioda za nadmetanje. Dodelu brojeva za nadmetanje je moguće obaviti malim proširenjem procedure za formiranje rasporeda slotova tako što svaki čvor, nakon otkrivanja suseda, dodeljuje brojeve za nadmetanje svojim susedima. Nakon ove dodele svaki čvor ima poseban broj za nadmetanje u svakom klasteru kome pripada. Dužina perioda za nadmetanje zavisi od broja čvorova u klasteru, a klasteri koji se dinamički kreiraju u svakom slotu kod RD-TDMA/TONE protokola nisu iste veličine. U WSN u kojoj je maksimalan stepen senzorskog čvora δ_{max} , tj. maksimalna veličina klastera iznosi δ_{max} , BM-BCD algoritam može da se konfigurise bilo kojom dužinom perioda za nadmetanje iz opsega $M \in [\lceil \log_2 \delta_{max} \rceil, \delta_{max} - 1]$. Činjenica da BM-BCD može da iskoristi kompletan period za nadmetanje (za razliku od BCD algoritma), je važan iz dva razloga. Prvo, dozvoljava optimizovanje komunikacionih performansi i energetske efikasnosti u isto vreme (Poglavlje 5). Drugo, posebno je povoljan kod mreža sa neravnomernom prostornom raspodelom senzorskih čvorova. Čak i kada je period za nadmetanje podešen na minimalnu dužinu $\lceil \log_2 \delta_{max} \rceil$, u delovima mreže sa manjom gustinom se može ostvariti znatna ušteda energije, jer BM-BCD može da radi u BM režimu rada, ili bar u režimu bliskom njemu zbog toga što su transmitterske grupe male, čime se troši

mного manje energije nego u veoma gustim delovima mreže, gde bi morao da radi u režimu bliskom BCD režimu.

Kako su brojevi slotova jedinstveni u 2-hop okolini, pa samim tim i u 1-hop okolini, tj. klasteru, kao brojevi za nadmetanje bi mogli da se koriste brojevi slotova ($(CN(v) = S(v))$). Ovaj pristup ne bi zahtevao uvođenje novih brojeva, ali bi zahtevao veći broj rundi za nadmetanje jer je broj slotova veći od najveće 1-hop okoline u mreži. U WSN u kojoj je broj slotova L , BM-BCD algoritam bi u ovom slučaju mogao da se konfigurise bilo kojom dužinom perioda za nadmetanje, iz opsega $M \in [\lceil \log_2 L \rceil, L - 1]$.

6.6.1. Vremenska organizacija slota

Vremenska organizacija slota je slična organizaciji kod RD-TDMA/CSMA protokola prikazanoj na Sl. 6.9, uz dve razlike. RD-TDMA/TONE tokom perioda za nadmetanje koristi TONE mehanizam, tako da je ovaj period podeljen na M rundi. Osim toga, TONE mehanizam u potpunosti eliminiše kolizije, tako da nema potrebe za slanjem ACK paketa (Sl. 6.12).



Sl. 6.12 Razmena podataka kod RD-TDMA/TONE protokola

Aktivno učešće centralnog čvora u procesu razrešavanja konflikata omogućava da se izbegne detektovanje i emitovanje preambule za vreme perioda za prenos podataka. Svrha preambule je izbegavanje dugog nepotrebnog slušanja u slučaju da nema poruka podataka. Međutim, pošto je centralni čvor već detektovao RF ton za vreme perioda za nadmetanje, nema potrebe za detektovanjem i preambule, niti pobednik nadmetanja mora da emituje preambulu, ako je već emitovao RF ton. Jedini predajni čvor koji može da pobedi a da nije emitovao RF ton je čvor sa najmanjim brojem za nadmetanje u grupi potencijalnih pošiljaoca. Čvor sa najmanjim brojem za nadmetanje ima najniži prioritet, pa je zbog toga uvek pripadao SC grupi. Ovaj senzorski čvor može da bude pobednik nadmetanja samo ukoliko je jedini potencijalni pošiljaoc u transmitterskoj grupi. Zbog toga su pravila za emitovanje/detektovanje preambule sledeća:

- a) Pobednik emituje preambulu samo ako mu je dodeljen najmanji broj za nadmetanje u transmitterskoj grupi
- b) CH čvor detektuje preambulu samo ako nije detektovao RF ton u toku perioda za nadmetanje

6.7. Rezultati simulacije protokola RD-TDMA/TONE

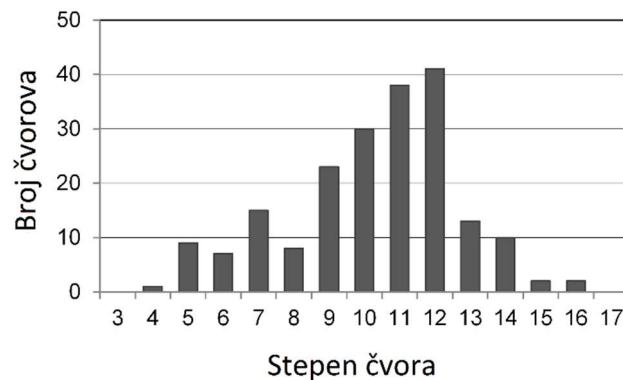
Performanse RD-TDMA/TONE protokola su analizirane poređenjem sa dve postojeće TDMA šeme: TD-TDMA i RD-TDMA/CSMA, za različita podešavanja radio primopredajnika i parametara protokola i za različite gustine saobraćaja. Za potrebe analiziranja performansi protokola u SystemC-u je razvijeno okruženje za simulaciju. Tabela 4 prikazuje vrednosti parametara korišćenih u simulacijama. Za radio parametre je kao hardverska referenca korišćen primopredajnik CC1101 [8].

Tabela 4: Parametri korišćeni u simulaciji RD-TDMA protokola

Parametri:	Vrednost:
Parametri RF primopredajnika:	
Bitska brzina	19.2 kbps
Snaga emitovanja (P_{tx})	50.7 mW
Snaga prijema (P_{rx})	49.2 mW
Energija semplovanja (E_{CS})	17.4 μ J
Vreme semplovanja (τ_s)	0.3 ms
Brzina drifta (δ)	20 ppm
MAC parametri:	
Dužina preambule	6 B
Dodatni deo poruke (header +CRC)	10 B
Veličina ACK paketa (CSMA)	16 B
Period za nadmetanje (CSMA)	8 slotova
Trajanje slota za nadmetanje (CSMA)	0.62 ms
Maksimalni interval za povlačenje (CSMA)	16 frejmova

U svim simulacijama korišćene su sledeće postavke: simulirana je mreža od $N = 200$ senzorskih čvorova, slučajno raspoređenih po uniformnoj raspodeli unutar kružne oblasti prečnika 100 m. Domet emitovanja svih senzorskih čvorova je fiksiran na 12.8 m, usled čega

se došlo do mrežne topologije sa raspodelom stepena senzorskih čvorova prikazanim na Sl. 6.13. Kao što može da se vidi sa slike, minimalni stepen senzorskog čvora je $\delta_{min} = 4$ a maksimalni $\delta_{max} = 16$, dok prosečna vrednost za stepen senzorskog čvora iznosi $\delta_{avr} = 10.3$. Sa takvom raspodelom gustine senzorskih čvorova, potrebno je da se TDMA frejm sastoji od najmanje 25 slotova da bi bilo moguće izvršiti 2-hop ekskluzivnu dodelu slotova, dok se period za nadmetanje RD-TDMA/TONE protokola može konfigurisati na bilo koju dužinu iz opsega $M \in [4,16]$ pod pretpostavkom da svaki čvor ima poseban broj za nadmetanje u svakom klasteru kome pripada.



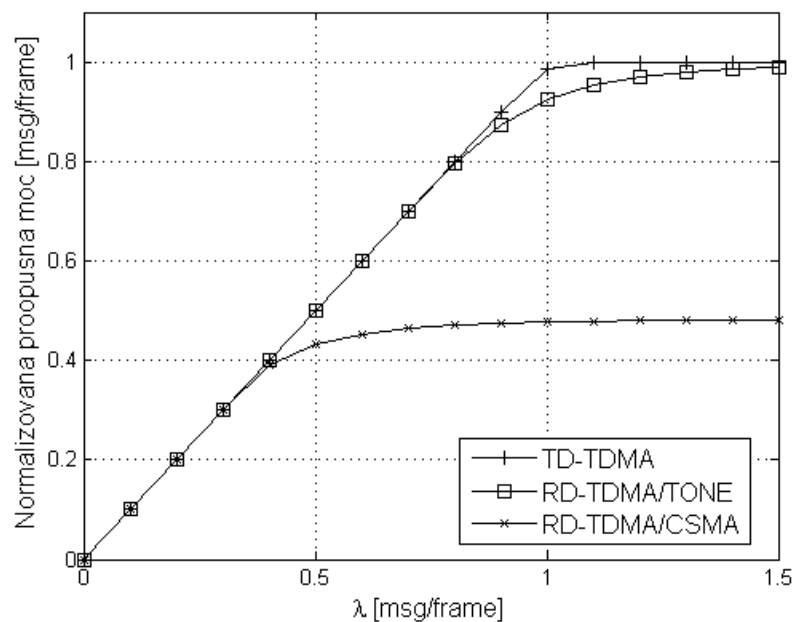
Sl. 6.13. Raspodela stepena senzorskih čvorova u simuliranoj mreži za domet emitovanja od 12.8 m

6.7.1. Propusna moć

Propusna moć je analizirana u smislu sledeće dve metrike: normalizovana propusna moć (eng. *normalized throughput*) i propusna moć podataka (eng. *data throughput*). Neka simulacija traje N_{fr} TDMA frejmova trajanja T_{fr} sekundi, a mreža se sastoji od N_{nodes} senzorskih čvorova. U toku simulacije je uspešno primljeno N_{msg} poruka podataka, a svaka poruka se sastoji od L_{msg} bajtova. *Normalizovana propusna moć* predstavlja prosečan broj poruka koje senzorski čvor primi u jednom frejmu, definiše se kao $N_{msg}/(N_{nodes}N_{fr})$ i izražava brojem poruka po frejmu (*msg/frame*). *Propusna moć podataka* predstavlja prosečan broj bajtova podataka koje senzorski čvor primi u sekundi i definiše se kao $(N_{msg}L_{msg})/(N_{nodes}N_{fr}T_{fr})$, a izražava se u broju bajtova u sekundi. Poruke se generišu u svakom čvoru po Puasonovoj raspodeli, gde je λ brzina pristizanja poruka. Svaka generisana poruka se šalje jednom, slučajno odabranom susedu iz skupa 1-hop suseda.

Normalizovana propusna moć u zavisnosti od brzine pristizanja poruka za različite TDMA šeme je prikazana na Sl. 6.14. Treba primetiti da normalizovana propusna moć ukazuje

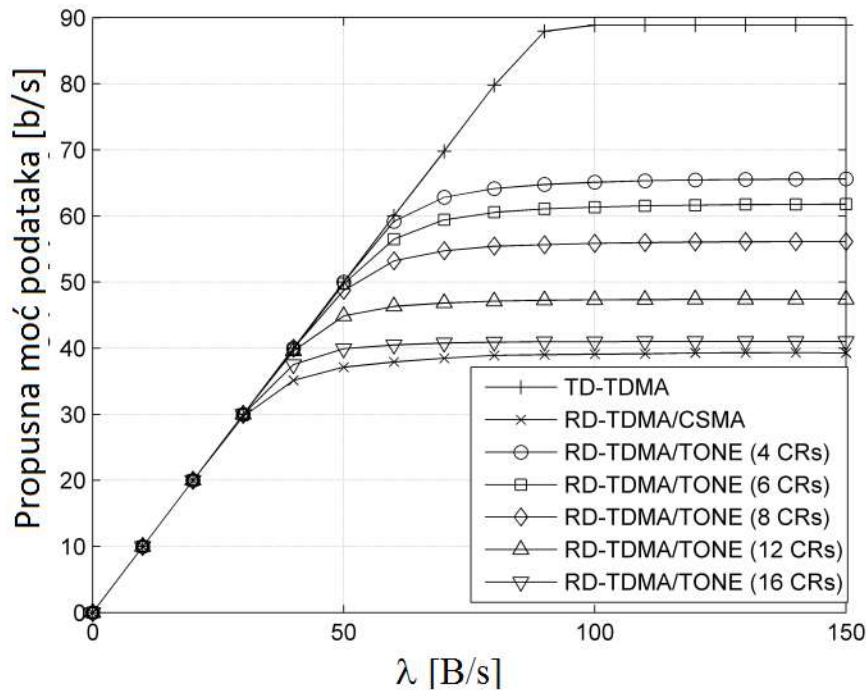
na to koliko efikasno senzorski čvorovi mogu da koriste propusni opseg zavisno od opterećenja, a nezavisno od trajanje frejma. U analiziranoj klasi TDMA protokola, maksimalna normalizovana propusna moć iznosi 1 msg/frame , zbog ograničenja da svaki senzorski čvor može da poseduje samo jedan slot u frejmu. Normalizovana propusna moć kod RD-TDMA/CSMA protokola raste linearno do vrednosti od 0.481 msg/frame . Razlog za rani ulazak u zasićenje su kolizije koje nastaju usled kombinovanih efekata skrivenih i izloženih terminala, čak i sa implementiranim algoritmom za povlačenje. Sa druge strane, posle linearnog rasta za male brzine pristizanja poruka, normalizovana propusna moć kod TD-TDMA i RD-TDMA/TONE dostiže vrednost od čak 1 msg/frame . Na osnovu ovih rezultata moguće je zaključiti da se uvođenje TONE umesto CSMA mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata postiže znatno poboljšanje performansi u smislu normalizovane propusne moći RD-TDMA protokola, tako da normalizovana propusna moć dostiže vrednosti uporedive sa vrednostima koje se postižu korišćenjem TD-TDMA protokola.



Sl. 6.14 Normalizovana propusna moć TDMA protokola za različite gustine saobraćaja

Propusna moć podataka u zavisnosti od brzine pristizanja poruka za različite TDMA šeme je prikazana na Sl. 6.15. Za razliku od normalizovane propusne moći, propusna moć podataka uzima u obzir i trajanje frejma i dužinu poruke podataka. Zbog toga ova metrika pokazuje i uticaj dodatnog utroška vremena potrebnog za nadmetanje i slanje ACK poruke. U ovom setu simulacija je pretpostavljeno da je veličina poruke podataka $256 B$. Od svih simuliranih protokola, TD-TDMA ima najvišu vrednost propusne moći podataka zbog najkraćeg trajanja slot, koji sadrži samo period za prenos podataka. Propusna moć podataka

kod RD-TDMA/TONE protokola sa najkraćim mogućim periodom za nadmetanje (4 runde za nadmetanje) je niži za oko 35% u odnosu na njega. Sa produženjem dužine perioda za nadmetanje propusna moć podataka opada, i konačno za maksimalnu vrednost (16 rundi) pada na vrednost propusne moći podataka kod RD-TDMA/CSMA protokola.



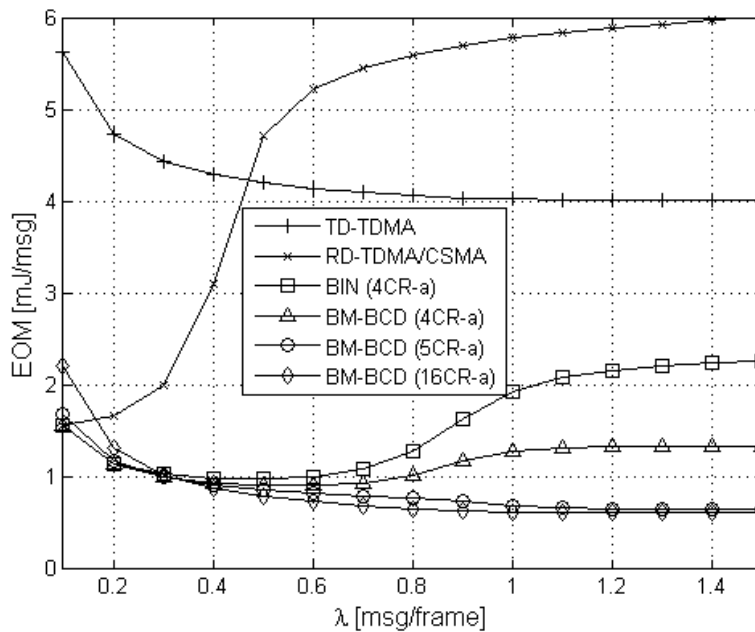
Sl. 6.15 Propusna moć podataka TDMA protokola za različite gustine saobraćaja

6.7.2. Energetska efikasnost

Energetska efikasnost TDMA protokola je analizirana koristeći metriku *dodatna energija po poruci* (EOM, eng. *energy overhead per message*), koja meri dodatni utrošak energije po svim uspešno primljenim porukama $(E_{tot} - N_{msg}E_{msg})/N_{msg}$. Ukupna dodatna energija uključuje energiju potrošenu usled pojave kolizija, nadmetanja, semplovanja kanala i nepotrebnog slušanja. Računa se kao razlika između ukupne energije koju su potrošili svi senzorski čvorovi za vreme simulacije (E_{tot}) i energije potrebne za prenos jedne poruke u slučaju idealne vremenske sinhronizacije u odsustvu kolizija (E_{msg}) pomnoženo ukupnim brojem primljenih poruka (N_{msg}). Vrednost E_{msg} je procenjena na osnovu radio parametara datih u Tabela 4, pod pretpostavkom da se koristi poruka formata kao na Sl. 6.6.

Na Sl. 6.16 je prikazana EOM u zavisnosti od brzine pristizanja poruka za različite TDMA protokole. Zbog mogućih kolizija, EOM kod RD-TDMA/CSMA zavisi od dužine poruke podataka. U simulacijama smo pretpostavili da su poruke podataka dužine $64B$. EOM

kod TD-TDMA i RD-TDMA/TONE protokola ne zavisi od dužine poruke, zbog toga što oba protokola u potpunosti eliminišu kolizije.



Sl. 6.16 Dodatna energija po poruci za TDMA protokole za različite gustine saobraćaja

Na EOM kod različitih protokola utiču različiti uzroci. Dominantni uzroci gubitka energije su: preslušavanje (kod TD-TDMA protokola), kolizije (kod RD-TDMA/CSMA protokola) i nadmetanje, tj. emitovanje RF tonova (kod RD-TDMA/TONE protokola). Među sekundarnim uzrocima gubitka energije najvažniji je semplovanje kanala, koje se koristi kod sve tri varijante protokola za detektovanje RF tona ili preambule. Oblik svake od krivih na Sl. 6.16 je posledica relativnog udela energije potrebne za semplovanje kanala i dominantnog uzroka utroška energije, karakterističnog za konkretan protokol, u vrednosti EOM. Pri manjim brzinama pristizanja poruka dominantan udeo u EOM ima semplovanje kanala, dok pri većim brzinama pristizanja poruka dolazi do izražaja dominantan uzrok gubitka energije, karakterističan za konkretan protokol.

Iako pojedinačno semplovanje kanala ne troši puno energije ($17.4 \mu J$), ukupan doprinos vrednosti EOM pri malim brzinama pristizanja poruka nije zanemariv. Takođe, semplovanje kanala predstavlja jedini izvor gubitka energije u slučaju da nema saobraćaja. Kod TD-TDMA protokola senzorski čvor v mora da sempluje kanal u svakom slotu koji pripada nekom od njegovih suseda, tj. $\delta(v)$ puta po frejmu. Kod RD-TDMA/TONE, CH čvor mora da sempluje kanal u svakoj rundi za vreme perioda za nadmetanje plus još jednom u toku perioda za prenos podataka, što ukupno iznosi $M + 1$ semplovanja po frejmu. RD-TDMA/CSMA ima najmanju potrošnju u slučaju da nema saobraćaja, jer kod njega svaki senzorski čvor sempluje kanal

samo jednom po frejmu. Kod TD-TDMA, broj semplovanja kanala po frejmu ne zavisi od brzine pristizanja poruka. Kod RD-TDMA protokola se broj semplovanja kanala povećava sa povećanjem broja generisanih poruka zbog toga što pored prijemnika i potencijalni predajnici moraju da sempluju kanal. Ipak, sa povećanjem brzine pristizanja poruka cena semplovanja kanala se amortizuje povećanjem broja prenetih poruka, da bi pri većim brzinama pristizanja poruka postala neznatna u odnosu na druge uzroke gubitka energije.

Kod TD-TDMA protokola se energija ne gubi na nadmetanja i kolizije. Kod ovog pristupa se značajna količina energije troši i na preslušavanje poruka. Prijemnik može da prepozna kome je upućena poruka tek kad primi zaglavljive poruke. Zbog toga poruku koju senzorski čvor u šalje senzorskom čvoru v delimično primaju i svi ostali senzorski čvorovi iz okoline senzorskog čvora $u \in (N_1 \setminus \{v\})$. Deo EOM koji je posledica preslušavanja ne zavisi od gustine saobraćaja. Kao što može da se vidi na Sl. 6.16, iako se EOM TD-TDMA protokola smanjuje sa povećanjem brzine pristizanja poruka zbog povećanja broja prenetih poruka, minimalna vrednost pri maksimalnom opterećenju ostaje relativno visoka i iznosi 4 mJ/msg .

Glavna prednost upotrebe RD-TDMA je ta što se senzorski čvorovi bude samo jednom radi prijema. Zbog toga, u poređenju sa TD-TDMA protokolom, RD pristup kompletno eliminiše gubitak energije usled preslušavanja. Osim toga, u kombinaciji sa CSMA-mehanizmom za razrešavanje komunikacionih konflikata, RD-TDMA protokol ima izuzetno malu potrošnju energije u odsustvu saobraćaja (jedno semplovanje kanala po frejmu). Ipak, kod RD-TDMA/CSMA protokola sa porastom brzine pristizanja poruka kolizije postaju ozbiljan problem. Kolizija na strani prijemnika dovodi do nepotrebnog slušanja, jer je nemoguće razlučiti koliziju od pozadinskog šuma. Na strani predajnika je cena kolizije još veća, pošto se kolizija detektuje tek posle emitovanja cele poruke, ukoliko se ne primi ACK paket. Osim toga, i emitovanje ACK paketa, kao deo mehanizma za izbegavanje kolizija, doprinosi nepotrebnom trošenju energije. Pri malim brzinama pristizanja poruka manja je verovatnoća da kolizija nastupi, pa EOM kod RD-TDMA/CSMA ima relativno nisku vrednost. Međutim, kako se brzina pristizanja poruka povećava i približava maksimalnoj propusnoj moći protokola, kolizije postaju sve češće, tako da se vrednost EOM naglo povećava. Kad brzina pristizanja poruka pređe maksimalnu propusnu moć, EOM ulazi u zasićenje na nivou od oko 6 mJ/msg . Zbog tako visoke vrednosti EOM i niske propusne moći CSMA nije pogodna za upotrebu u slučaju velike brzine pristizanja poruka.

RD-TDMA/TONE pokazuje najbolje performanse od svih simuliranih protokola, kao što je moguće videti na Sl. 6.16. Ovo je tačno čak i sa TONE konfigurisanim na najkraći period

za nadmetanje, za koji je potrošnja energije najveća. Na primer, pri maksimalnoj brzini pristizanja poruka RD-TDMA/TONE sa dužinom perioda za nadmetanje $M = 4$ ima EOM od 1.3 mJ/msg , što je čak tri puta manje od TD-TDMA i čak 4.5 puta niže od RD-TDMA/CSMA. Pri tome, pri velikim brzinama pristizanja poruka EOM kod RD-TDMA/TONE sa BM-BCD je 42% niži od EOM kod RD-TDMA/TONE koji koristi BIN algoritam. Na Sl. 6.16 takođe može da se vidi kako produženje perioda za nadmetanje dalje poboljšava energetska efikasnost protokola. Produžetak perioda za nadmetanje za samo nekoliko rundi prepolovljava vrednost EOM kod RD-TDMA/TONE pri maksimalnom opterećenju. Ipak, dalje produženje perioda za nadmetanje nema značajan uticaj na EOM. Sa $M = 8$ rundi, EOM pri maksimalnoj brzini pristizanja poruka vrednost od 0.6 mJ/msg , i nakon toga praktično zadržava istu vrednost (što odgovara BM algoritmu).

Na osnovu rezultata prikazanih na Sl. 6.16 se može zaključiti da je u kontekstu TDMA protokola efikasnije koristiti RD šemu i emitovati nekoliko RF tonova u svakom slotu da bi se razrešile kolizije (kao kod RD-TDMA/TONE), nego da se kolizije potpuno izbegnu statički, kreiranjem beskonfliktnog rasporeda slotova, ali neprekidno trošiti energiju na preslušavanje poruka (kao kod TD-TDMA). Takođe, na osnovu Sl. 6.16 se može zaključiti da je bolje potrošiti i malo više energije na nadmetanje ali u potpunosti eliminisati kolizije (kao kod RD-TDMA/TONE), nego se oslanjati na jednostavni mehanizam za razrešenje konflikata, ali gubiti energiju (i propusnu moć) na kolizije i ponovno slanje poruka (kao kod RD-TDMA/CSMA).

7. Primena TONE kod MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom

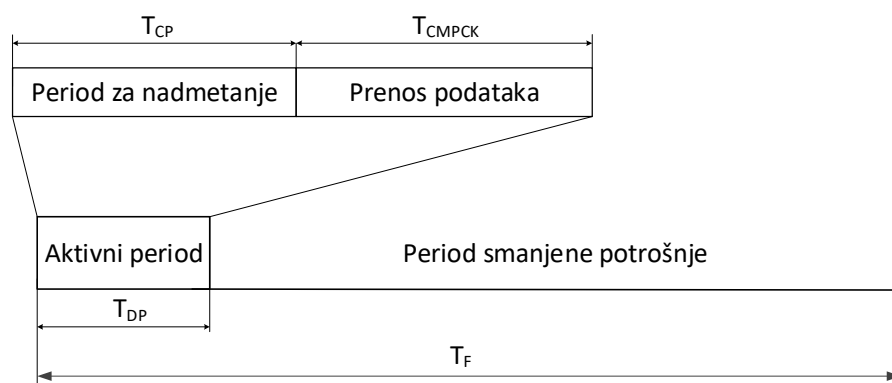
Kod MAC protokola sa zajedničkim aktivnim periodom (AP MAC), razrešavanje komunikacionih konflikata je prepušteno čvorovima koji se u međusobnoj interakciji nadmeću za pravo korišćenja medijuma. Kod ovih protokola se radi uštede energije vreme deli na aktivne i neaktivne periode. Tokom aktivnog perioda se obavlja komunikacija među senzorskim čvorovima a tokom neaktivnog perioda čvorovi miruju. Ovi protokoli su jednostavniji od TDMA protokola jer ne zahtevaju dodelu vremenskih slotova. Međutim, zbog toga što na početku svakog aktivnog perioda u razrešavanju komunikacionih konflikata učestvuju svi aktivni čvorovi, potreban je efikasan mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata.

Postojeći AP MAC protokoli za razrešavanje komunikacionih konflikata obično koriste CSMA, RTS-CTS ili neku modifikaciju ovih tehnika. Međutim, predložene tehnike pate od problema skrivenih i izloženih terminala, koji im smanjuju energetska efikasnost. U ovom poglavlju će biti predložena upotreba TONE mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata (predloženog u Poglavlju 5), koji u potpunosti otklanja probleme skrivenih i izloženih terminala. Upotreba TONE mehanizma kod AP MAC protokola poboljšava performanse protokola tako da mogu da se koriste u uslovima saobraćaja velike gustine, i troši manje energije od postojećih mehanizama za razrešavanje komunikacionih konflikata.

7.1. Model sistema

Domen primene AP MAC protokola je celokupna bežična senzorska mreža, isto kao kod TDMA protokola iz Poglavlja 6. U ovom poglavlju će se koristiti model multihop bežične senzorske mreže predstavljene u Sekciji 6.1. Za komunikaciju unutar bežične senzorske mreže koristi se AP MAC protokol. Pri tome važe sledeće pretpostavke:

- Komunikacija u bežičnoj senzorskoj mreži je sinhronizovana. Vreme je podeljeno u frejmove (trajanja T_F). Svaki frejm počinje aktivnim periodom (trajanja T_{DP} na Sl. 6.2), tokom koga su aktivni svi čvorovi. Aktivni period počinje periodom za nadmetanje, u toku koga se za slanje poruke nadmeću svi potencijalni pošiljaoci, dok ostatak aktivnog perioda služi da pobednici nadmetanja pošalju svoje poruke. U ostatku frejma se čvorovi nalaze u režimu smanjene potrošnje, radi uštede energije.



Sl. 7.1 Organizacija frejma

- U toku perioda za nadmetanje se primenjuje mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata. Cilj je da se obezbedi beskonfliktni prenos podataka u delu prenos podatka.

7.2. Razrešavanje komunikacionih konflikata kod AP MAC protokola

AP MAC protokoli dele izvesne sličnosti sa RD-TDMA protokolima: imaju isti domen primene (multihop WSN) i oslanjaju se na striktnu vremensku sinhronizaciju čvorova radi uštede energije. Međutim, za razliku od RD-TDMA, kod AP MAC protokola ne postoji podela frejma na slotove, već su sve komunikacione aktivnosti grupisane u kratak aktivni period na početku frejma. Usled toga, u nadmetanju tokom aktivnog perioda učestvuju svi potencijalni pošiljaoci u mreži, a ne samo potencijalni pošiljaoci poruka namenjenih vlasniku tekućeg slotova. Ovo dovodi do značajnog povećanja intenziteta nadmetanja, čak i pri saobraćaju relativno niskog intenziteta. Uz to, pored kolizija *tipa_2*, AP MAC protokoli pate i od kolizija *tipa_1*, za razliku od RD-TDMA gde su kolizije eliminisane odgovarajućom dodelom prijemnih slotova čvorovima. Iz ovih razloga, razrešenje konflikata kod AP MAC protokola je kompleksniji problem nego kod RD-TDMA protokola. Odgovarajući mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata bi trebalo da bude efikasan u razrešavanju konflikata različitih tipova u uslovima velikog intenziteta nadmetanja, da troši malo energije u aktivnom periodu i da pri tom obezbedi što veću komunikacionu propusnost.

U ovoj sekciji će biti predstavljena dva standardna mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata koji su prilagođeni primeni kod AP MAC protokola: AP/CSMA i AP/RTS-CTS. AP/CSMA je zasnovan na bazičnom CSMA mehanizmu, koji se odlikuje malom složenošću, ali i malom efikasnošću u razrešavanju konflikata. AP/RTS-CTS je

adaptirani RTS-CTS mehanizam koji u potpunosti eliminiše kolizije poruka podataka, ali po cenu većeg utroška energije tokom aktivnog perioda.

7.2.1. AP/CSMA

AP/CSMA je u osnovi identičan RD-TDMA/CSMA mehanizmu koji je predstavljen u Sekciji 6.5.1, s tom razlikom što se primenjuje na početku aktivnog perioda frejma, a ne na početku svakog TDMA slotu. Prednosti upotrebe CSMA su: i) veoma mala potrošnja u odsustvu saobraćaja, jer u tom slučaju u svakom frejmu svaki senzorski čvor sempluje kanal samo po jednom i ii) kratak period za nadmetanje. Međutim, mogućnost da se nadmetanje obavi u kratkom vremenu gubi na značaju kod AP MAC protokola, jer se čvorovi nadmeću samo jednom u svakom frejmu, za razliku od RD-TDMA, kod koga se razrešavanje komunikacionih konflikata obavlja u svakom slotu frejma. Dok je kod RD-TDMA opterećenje CSMA ravnomerno raspodeljeno na više slotova, kod AP MAC protokola je zbog grupisanja komunikacije na početak frejma celokupno opterećenje CSMA mnogo veće. Veliko opterećenje CSMA mehanizma dovodi do ispoljavanja njegovih glavnih nedostataka: pojave efekata skrivenih i izloženih terminala. Efekat skrivenih terminala dovodi do povećanja stope kolizija već pri relativno malom intenzitetu saobraćaja. Neuspeh u razrešavanju konflikata dovodi do kolizije poruka podatka i značajnog gubitka energije. Osim toga, zbog implementiranog algoritma za povlačenje, po kome se u slučaju kolizija propušta određeni broj frejmova pre ponovnog pokušaja slanja poruke, usled kolizija dolazi do povećanja latencije poruka podataka koje ima za posledicu i smanjenje propusne moći. Osim usled kolizija, propusna moć je takođe redukovana i usled efekta izloženih terminala.

7.2.2. AP/RTS-CTS

U cilju izbegavanja kolizija paketa podataka, koje su glavni uzrok smanjenja propusne moći i energetske efikasnosti CSMA mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata, predložena je upotreba RTS-CTS paketa. Standardni RTC/CTS je predstavljen u Sekciji 3.2.3 i predviđen za upotrebu u MAC protokolima za *ad-hoc* mreže (npr. IEEE 802.11), gde čvorovi nikada ne isključuju svoje primopredajnike, što omogućava primenu NAV mehanizma. NAV mehanizam dopušta čvoru da se privremeno povuče iz nadmetanja nakon što primi RTS ili CTS paket koji nije njemu namenjen. Međutim, kod AP MAC protokola primena NAV-a nije moguća zbog ograničenog trajanja aktivnog perioda. Zbog toga se kod AP/RTS-CTS-a ne

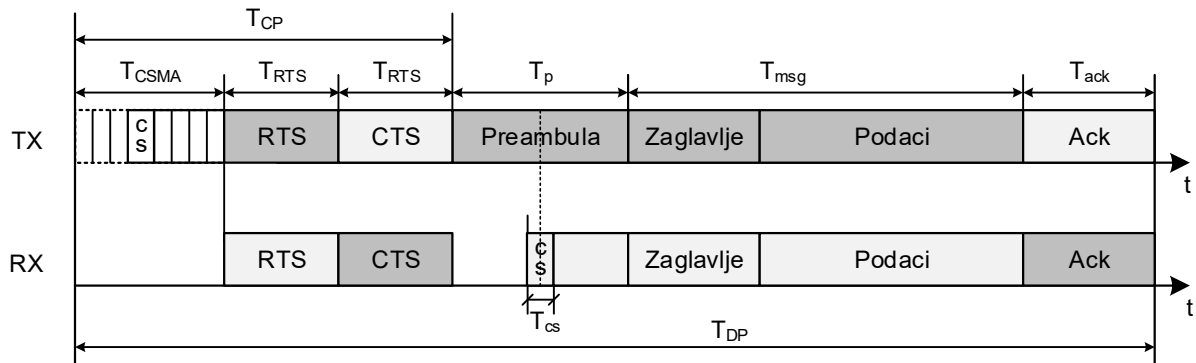
koristi NAV, pa su RTS i CTS poruke smanjene dužine jer sadrže samo izvorišnu i odredišnu adresu.

Skriveni terminali su glavni problem AP/CSMA, koji ne poseduje mehanizam za njihovo otklanjanja jer je zasnovan na osluškivanju kanala. Da bi se rešio ovaj problem, AP/RTS-CTS proširuje AP/CSMA tako što nakon nadmetanja u CSMA režimu, a pre slanja poruke podataka, testira dostupnost kanala razmenom para kratkih poruka, RTS i CTS, između potencijalnog pošiljaoca (koji je sa svoje tačke gledišta uspešno prošao prethodnu fazu nadmetanja) i primaoca. Ukoliko se ova razmena obavi uspešno, to znači da ne postoje skriveni terminali i da se poruka podataka može preneti bez opasnosti od pojave kolizije. U suprotnom se potencijalni pošiljaoci povlače iz nadmetanja na određeni broj frejmova, shodno algoritmu za povlačenje.

Razmena podataka kod AP/RTS-CTS mehanizma za razrešenje konflikata prikazana je na Sl. 7.2. Aktivni period počinje periodom za nadmetanje trajanja T_{CW} . Period za nadmetanje počinje CSMA prozorom za nadmetanje (trajanja T_{CSMA}), koji odgovara periodu za nadmetanje kod AP/CSMA. Senzorski čvor koji želi da pošalje poruku u konkretnom frejmu slučajno bira jedan od slotova za nadmetanje i sempluje kanal, na isti način kao kod AP/CSMA. Ukoliko senzorski čvor detektuje zauzet kanal, zato što je neki drugi senzorski čvor počeo emitovanje preambule pre njega, čvor odustaje od pokušaja slanja. Ukoliko je kanal slobodan, senzorski čvor nastavlja proceduru tako što nakon emitovanja preambule do kraja CSMA prozora za nadmetanje (T_{CSMA}) emituje RTS paket, koji sadrži adrese izvorišnog i odredišnog senzorskog čvora. Sa druge strane, potencijalni prijemnik se budi tek na kraju perioda T_{CW} i prima RTS paket. Ukoliko je on odredišni čvor RTS paketa, odmah nakon toga emituje CTS paket (koji sadrži adrese odredišnog i izvorišnog čvora); u protivnom se isključuje do sledećeg frejma. Potencijalni predajnik za to vreme ostaje budan, da bi primio CTS paket. Ukoliko primi CTS paket, koji je namenjen njemu, prelazi u emitovanje preambule i poruke podataka; ukoliko ne primi CTS paket (usled kolizije RTS paketa) ili CTS paket nije namenjen njemu, odustaje od slanja poruke u tekućem frejmu. Po uspešnom prijemu poruke prijemnik u istom frejmu odgovara ACK paketom.

Upotreba RTS i CTS paketa sprečava kolizije poruka podataka u slučaju postojanja skrivenih terminala na taj način što, umesto kolizije poruke podatka, dolazi do kolizije RTS paketa. Na ovaj način se gubi manje energije usled kolizije nego kod AP/CSMA, u slučaju da važi da su poruke podataka duže od RTS paketa. Međutim, sama razmena RTS i CTS paketa povećava potrošnju energije. Osim toga, procedura nadmetanja je ista, bez obzira da li se za

razrešavanje komunikacionih konflikata koristi AP/CSMA ili AP/RTS-CTS, pa AP/RTS-CTS ne rešava problem izloženih terminala, koji dovodi do nepotrebnog povlačenja čvorova iz nadmetanja i gubitka tekućeg frejma. Zbog toga, AP/RTS-CTS uz manji utrošak energije postiže isti nivo komunikacionih performansi u smislu propusnosti kao AP/CSMA.



Sl. 7.2 Razmena podataka kod AP/RTS-CTS

7.3. AP/TONE

Standardni mehanizmi za razrešavanje komunikacionih konflikata kod AP MAC protokola za bežične senzorske mreže imaju ograničen domen primene. Iako je AP/CSMA efikasan pri veoma niskom intenzitetu saobraćaja, sa povećanjem njegovog intenziteta dolazi do naglog povećanja stope kolizija, a time i energetske gubitaka. AP/RTS-CTS smanjuje utrošak energije pri srednjim nivoima intenziteta saobraćaja po cenu povećanih gubitaka energije pri malom intenzitetu, zadržavajući relativno nizak nivo maksimalne komunikacione propusnosti. Imajući to u vidu, od interesa je mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata koji bi obezbedio ujednačen nivo efikasnosti u širem opsegu intenziteta saobraćaja. Ovo bi podrazumevalo stopostotno sprečavanje kolizija poruka podataka, poput AP/RTS-CTS, manji utrošak energije i neosetljivost na izložene terminale, uz povećanja maksimalne propusnosti.

U ovoj sekciji će biti predstavljen energetski efikasan mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata u bežičnim senzorskim mrežama sa zajedničkim aktivnim periodom, nazvan AP/TONE. Predstavljeni mehanizam koristi RF tonove predstavljene u Poglavlju 4 za signalizaciju, čijom razmenom se troši manje energije nego razmenom RTS i CTS paketa i oslanja se na principe predstavljene u STAR/TONE (Poglavlje 5). Zbog toga što STAR/TONE razrešava samo kolizije *tipa_2*, AP/TONE predstavlja njegovo uopštenje, koje je u mogućnosti da razreši i kolizije *tipa_1* i *tipa_3*.

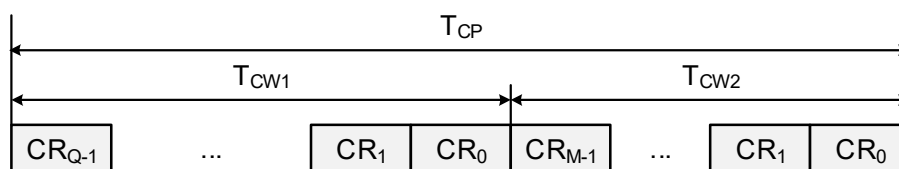
AP/TONE zahteva postojanje brojeva za nadmetanje jedinstvenih u 1-hop okolini, isto kao i STAR/TONE i RD-TDMA/TONE. Zbog toga što kompletna mreža inicijalno učestvuje u nadmetanju, uslov jedinstvenosti CN-ova u 1-hop okolini se postiže na taj način što se obezbeđuje da CN-ovi budu jedinstveni u 2-hop okolini. Brojevi za nadmetanje mogu da se dodele u fazi otkrivanja suseda, na sličan način na koji se formira raspored slotova kod RD-TDMA/TONE (Sekcija 6.2). Da bi se izbegla nepravilnost zbog statičke dodele CN-ova, i kod AP/TONE je uvedena dinamička dodela brojeva za nadmetanje, na isti način kao kod STAR/TONE (Sekcija 5.3).

7.3.1. Organizacija perioda za nadmetanje

AP/TONE mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata se odvija u dve faze, CW1 i CW2. Cilj prve faze nadmetanja je da se izaberu *kandidati* pošiljaoci i primaoci, dok je cilj druge faze nadmetanja da se za svakog primaoca izabere po jedan pošiljaoc, tako da se izbegnu moguće kolizije i preslušavanja poruka podataka. Kandidati pošiljaoci i primaoci se u toku CW1 biraju tako da za svaki izabrani par (u, v) , gde je u potencijalni pošiljalac i v njegov potencijalni primalac, važi da je v jedini kandidat-primalac u 1-hop okolini čvora u . Na ovaj način se obezbeđuje da poruka koju bi čvor u poslao ne može da ometa poruku namenjenu nekom njegovom susedu različitom od v . Nakon nadmetanja u CW1 moguće je da za svakog kandidata primaoca postoji više od jednog kandidata pošiljaoca. Zbog toga se u narednoj fazi CW2 iz skupa kandidata pošiljaoca za svakog kandidata primaoca bira najviše jedan.

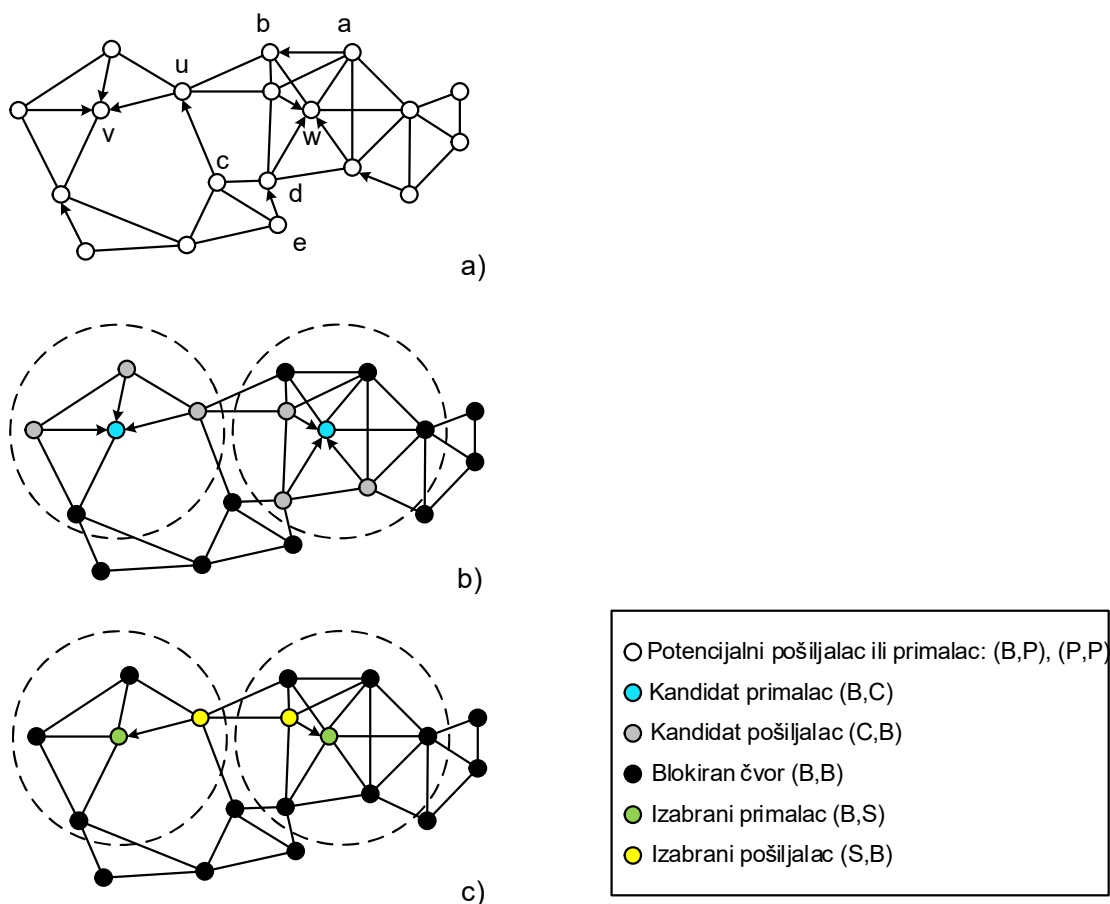
Svaka od faza CW1 i CW2 je podeljena na slotove (Sl. 7.3). Svaki slot čine dva mini slota, R i T, trajanja T_{TONE} , namenjena za dvofazno signaliziranje primenom RF tonova (Sekcija 5.3). U prvoj fazi nadmetanja, CW1, učestvuju svi čvorovi, u različitim ulogama u zavisnosti od toga da li su u frejm ušli kao potencijalni pošiljaoci ili ne. Faza CW1 traje Q slotova. Svaki čvor je vlasnik jednog slota u CW1, shodno svom broju za nadmetanje (CN). Cilj prve faze nadmetanja je da se razreše kolizije *tipa_1*. U drugoj fazi nadmetanja, CW2, učestvuju samo čvorovi koji nisu isključeni iz nadmetanja u CW1. U toku CW2 se za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi ranije predstavljen STAR/TONE, čime se uspešno otklanjaju kolizije *tipa_2*. Kako je za rad STAR/TONE-a potrebno $\log_2 Q$ slotova, trajanje CW2 je $M = \log_2 Q$ slotova. U period za prenos podataka ulaze samo čvorovi pobednici nadmetanja u CW2. U mreži sa N čvorova ukupno trajanje perioda za nadmetanje iznosi:

$$T_{CP} = T_{CW1} + T_{CW2} = Q \cdot 2T_{TONE} + \log_2 Q \cdot 2T_{TONE} = 2(Q + \log_2 Q) T_{TONE}$$



Sl. 7.3 Period za nadmetanje kod AP/TONE

Primer rada AP/TONE mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata dat je na Sl. 7.4. Na Sl. 7.4(a) je prikazano stanje u mreži pre početka razrešavanja konflikata. Svi čvorovi učestvuju u nadmetanju, a strelice povezuju potencijalne pošiljaoce sa njihovim potencijalnim primaocima.



Sl. 7.4 Primer funkcionisanja AP/TONE: a) na početku nadmetanja; b) nakon CW1; c) nakon CW2

U konkretnom primeru postoje sva tri tipa kolizija. Kolizije *tipa_1* nastaju jer poruka koju bi čvor *u* poslao može da ometa poruku koju bi nekom čvoru *b* iz njegove 1-hop okoline poslao drugi potencijalni pošiljaoc *a*. Kolizije *tipa_2* su vezani za čvorove *v* i *w*, za koje postoji više potencijalnih pošiljaoca. Kolizije *tipa_3* postoje na više mesta u mreži. Na primer: čvor *u* je potencijalni primalac za čvor *c*, ali ne može da ga čuje zato što pokušava da pošalje poruku čvoru *v*; na isti način, čvor *d* je potencijalni primalac za čvor *e*, dok pokušava da pošalje poruku

čvoru w . Tokom faze CW1 se iz nadmetanja isključuju pojedini čvorovi, odnosno blokiraju, da bi se eliminisale kolizije *tipa_1* (čvor u) i kolizije *tipa_3* (čvorovi c i e). Stanje nakon CW1 je prikazano na Sl. 7.4(b): formirani su disjunktne klasteri, sa po jednim kandidatom primaocem (na slici obojeni plavo) kao CH čvorom i njegovim kandidatima pošiljaocima (obojeni sivo). Ostali čvorovi su blokirani (obojeni crno). Na ovaj način su eliminisane kolizije *tipa_1* i *tipa_3*, a svi kandidati primaoci su na međusobnom rastojanju većem od 2 hopa. U toku CW2 se eliminišu kolizije *tipa_2*, tako što se iz skupa kandidata pošiljaoca bira samo jedan. Stanje nakon nadmetanja u CW2 je prikazano na Sl. 7.4(c): aktivni su još parovi izabrani primalac (obojen zeleno) i njegov izabrani pošiljalac (obojen žuto), dok su svi ostali čvorovi blokirani.

7.3.2. Status čvora

U svakom slotu tokom nadmetanja u fazama CW1 i CW2 status senzorskog čvora predstavljen je uređenim parom $Status = (RSt, SSt)$, gde je RSt prijemni, a SSt predajni status. Statusne promenljive RSt i SSt dobijaju vrednost iz skupa $\{Potential, Candidate, Blocked, Selected\}$. *Potential* (P) je inicijalno stanje koje ukazuje na spremnost čvora da tokom tekućeg frejma prima, odnosno šalje poruku. Čvorovi kojima je tokom nadmetanja oduzeto pravo prijema/predaje, svoj prijemni/predajni status postavljaju na *Blocked* (B). *Candidate* (C) je prijemni/predajni status koji označava da je čvor izašao kao pobednik u nadmetanju tokom CW1. *Selected* (S) je konačni status čvorova koji su dobili pravo da u tekućem frejmu prime/pošalju poruku.

Svi čvorovi ulaze u proces nadmetanja kao potencijalni primaoci, tj. $RSt = P$. Čvorovi koji imaju poruke za slanje su potencijalni pošiljaoci, pa postavljaju i predajni status na $SSt = P$, ostali na $SSt = B$. Dakle, u nadmetanju u fazi CW1 učestvuju svi čvorovi, a u nadmetanje ulaze sa statusom $Status \in \{(P, P), (P, B)\}$, odnosno kao potencijalni prijemnik i predajnik, ili samo potencijalni prijemnik. U toku nadmetanja čvorovi menjaju svoj status, tako da im prijemni i predajni status na kraju CW1 može da bude samo *Candidate* ili *Blocked*, odnosno $Status \in \{(C, B), (B, C), (B, B)\}$. U CW2 prelaze samo kandidati predajnici ili prijemnici tj. čvorovi sa statusom $Status \in \{(C, B), (B, C)\}$. Tokom nadmetanja u CW2, čvorovi mogu da odustanu i tada im se status promeni u blokirani, $Status = (B, B)$, a iz CW2 kao pobednici izlaze samo čvorovi izabrani pošiljaoci ili primaoci, $Status \in \{(S, B), (B, S)\}$ i oni prelaze u fazu prenosa poruke.

7.3.3. Procedura nadmetanja u toku CW1

Proces nadmetanja se odvija slot po slot, tako da senzorski čvor preskače slotove koji nisu dodeljeni njemu ili nekom od njegovih suseda. Senzorski čvor koristi svoj slot za prijem zahteva, dok svoje zahteve šalje u slotovima svojih suseda. Ukoliko je u svom slotu primio zahtev, senzorski čvor nastavlja da sluša i u slotovima svojih suseda, da bi se eventualno povukao iz nadmetanja ukoliko neki od suseda takođe treba da primi poruku, u cilju izbegavanja kolizija *tipa_1*.

CW1 je podeljen na Q slotova, numerisanih sa $Q - 1 \dots 1, 0$ gde je Q maksimalan broj različitih CN -ova u mreži. Slot s u CW1 pripada senzorskom čvoru v ako važi da je $CN(v) = s$. U svakom slotu čvor bira ulogu iz definisanog skupa pravila za nadmetanje, na osnovu svog prijemnog i predajnog statusa, rednog broja tekućeg slota, CN -a svog potencijalnog primaoca i CN -ova svojih preostalih suseda.

Pravila za nadmetanje

U svakom slotu tokom faze CW1 svaki senzorski čvor primenjuje se jedno od sledećih pravila:

P1 (Prijem zahteva): Ukoliko je prijemni status čvora $RSt = P$ i redni broj slota jednak njegovom CN -u, tada čvor:

Prvi mini slot: Detektuje T-ton

Drugi mini slot: Ukoliko je detektovan T-ton, čvor odgovara emitovanjem R-tona i postavlja prijemni status $RSt = C$ i predajni status $SSt = B$. U protivnom preskače ovaj mini slot i postavlja $RSt = B$.

P2 (Slanje zahteva): Ukoliko je predajni status čvora $SSt = P$ i redni broj slota jednak CN -u njegovog potencijalnog primaoca, tada čvor:

Prvi mini slot: Emituje T-ton,

Drugi mini slot: Detektuje R-ton. Ukoliko je R-ton detektovan, čvor postavlja svoj predajni status $SSt = C$ i prijemni status $RSt = B$, u protivnom postavlja $SSt = B$.

P3 (Naknadno povlačenje): Ukoliko je predajni status čvora $SSt \in \{P, C\}$, i redni broj slota jednak CN -u nekog od njegovih suseda, koji nije potencijalni primaoc, tada čvor:

Prvi mini slot: preskače,

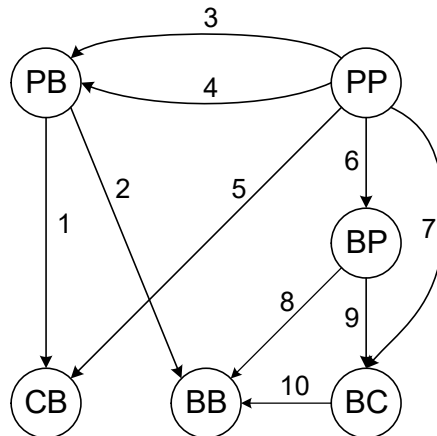
Drugi mini slot: Detektuje R-ton. Ukoliko je R-ton detektovan, čvor postavlja svoj predajni status $SSt = B$. U protivnom, ne menja se ništa.

P4 (Preskakanje slota): Ukoliko ne može da se primeni ni jedno od prethodnih pravila, čvor preskače tekući slot.

Pravila 1 i 2 regulišu signalizaciju između potencijalnog primaoca i jednog ili više potencijalnih pošiljaoca. Signalizacija se odvija u slotu koji pripada potencijalnom primaocu. Nakon uspešne razmene RF tonova potencijalni prijemnik postaje kandidat prijemnik a svi potencijalni pošiljaoci postaju kandidati pošiljaoci. Dalje razrešenje konflikata među kandidatima pošiljaocima se odlaže za CW2. Prema pravilu 3, svi čvorovi kojima status pošiljaoca nije blokiran odustaju od slanja ukoliko detektuju kandidata primaoca u svojoj okolini. Na ovaj način se eliminišu potencijalne kolizije *tipa_1*. Ovo pravilo se ne odnosi samo na potencijalne pošiljaoce, već i na kandidate pošiljaoce, koji su već prošli nadmetanje u nekom od prethodnih slotova.

Dijagram stanja

Rad mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata u fazi CW1 predstavljen je dijagramom stanja sa Sl. 7.5. Stanja (P, B) i (P, P) su inicijalna, a (C, B) , (B, B) i (B, C) konačna stanja čvora u fazi CW1. Jedina aktivnost čvora koji u nadmetanje ulazi kao potencijalni primalac, (P, B) , je detekcija T-tona u svom slotu (pravilo P1). U zavisnosti od ishoda ove detekcije, čvor menja status na (C, B) ili (B, B) i povlači se iz nadmetanja sve do početka faze CW2 (prelazi 1 i 2). Aktivnosti čvora koji u nadmetanje ulazi i kao potencijalni pošiljalac, (P, P) su složenije. Ovakav čvor ne mora da vodi računa samo o svom predajnom, već i o prijemnom statusu. Neka potencijalni pošiljalac u ima poruku namenjenu čvoru v . Ako $CN(u) < CN(v)$, odnosno ako slot čvora u prethodi slotu čvora v , tada je čvor u u situaciji da pre slanja zahteva čvoru v , prima zahteve u svom slotu. Ukoliko primi takav zahtev, čvor odustaje od uloge potencijalnog pošiljaoca i prelazi u stanje (C, B) , prelaz 5. Ukoliko u svom slotu ne detektuje zahtev, čvor blokira prijemni status, (B, P) i nastavlja nadmetanje (prelaz 6). Potencijalni pošiljalac u ima obavezu da osluškuje R-tonove u slotovima svih svojih suseda i da blokira svoj predajni status u slučaju detekcije RF tona (pravilo P3, prelazi 3 i 8). Ukoliko u međuvremenu nije odustao od uloge potencijalnog pošiljaoca, čvor u emituje T-ton u slotu čvora v . Ako ne primi odziv u vidu R-tona, čvor u blokira svoj predajni status (prelazi 3 i 8). Ako primi R-ton, čvor u menja svoj predajni status u *Candidate* (prelazi 7, ili 9), ali i ostaje u nadmetanju sa obavezom da se isključi iz nadmetanja ukoliko detektuje R-ton u slotu nekog od svojih preostalih suseda (prelaz 10).



Sl. 7.5 Dijagram stanja mehanizma za nadmetanje AP/TONE u fazi CW1

Pseudo kôd

Pseudo kôd algoritma za razrešavanje komunikacionih konflikata koji se koristi u CW1 prikazan je na Sl. 4.6. Ovaj algoritam se izvršava u svakom čvoru tokom perioda za nadmetanje u svakom frejmu. Ulaz algoritma su broj za nadmetanje čvora (CN), poruka za slanje ($MsgToSend$), skup CN -ova 1-hop suseda ($Neighbours$) i dužina perioda za nadmetanje (Q). Broj za nadmetanje određiškog čvora poruke je $MsgToSend.CN$. Izlaz algoritma je status čvora nakon nadmetanja u fazi CW1: (B, C) (kandidat pošiljalac), (C, B) (kandidat primalac) ili (B, B) (blokirano). Svaka iteracija *for* petlje algoritma odgovara jednom slotu. U svakoj iteraciji se prvo utvrdi pravilo koje će čvor da primeni, a zatim se prema njemu postupa.

Diskusija algoritma

Osnovna ideja iza nadmetanja u CW1 je da se smanji aktivnost potencijalnih primaoca što je moguće više i da se odgovornost za izbegavanje kolizija i preslušavanja prebaci na potencijalne pošiljaoce. Zbog toga se potencijalan primalac budi samo jednom, u svom slotu i ukoliko ne čuje T-ton može da se isključi do sledećeg frejma. Ukoliko čuje T-ton, treba da odgovori emitovanjem R-tona i ponovo je slobodan do CW2. Na ovaj način se troši malo energije u slučaju saobraćaja malog intenziteta, kada se većina čvorova nema poruke za slanje i bude se samo jednom po frejmu, radi semplovanja kanala.

```

1  Input: CN;           // broj za nadmetanje
2          MsgToSend;    // poruka za slanje
3          Neighbours;   // skup CN-ova 1-hop suseda
4          Q;            // dužina perioda za nadmetanje CW1
5  Output: status  $\in \{(C,B), (B,C), (B,B)\}$ 
6
7  begin
8      RSt = P;          // prijemni status: potencijalni primalac
9      if (MsgToSend == NULL) then
10         SSt = B; // predajni status: blokiran
11     else
12         SSt = P; // predajni status: potencijalni pošiljalac
13     end if;
14
15     for (i = Q-1; i<=0; --i) do // prolazak kroz sve slotove
16
17         // izbor pravila
18         if (RSt = P && i = CN) then
19             rule = 1;
20         elseif (SSt = P && i = MsgToSend.CN) then
21             rule = 2;
22         elseif ((SSt = P || SSt = C) && i!= MsgToSend.CN && i  $\in$  Neighbours)
23         then
24             rule = 3;
25         else
26             rule = 4;
27         end if;
28
29         // akcija na osnovu izabranog pravila
30         switch (rule)
31             case 1:
32                 detekcija T-tona u prvom mini slotu;
33                 if (detektovan R-ton) then
34                     emitovanje R-tona u drugom mini-slotu;
35                     RSt = C; SSt = B;
36                 else
37                     RSt = B;
38                 end if;
39             case 2:
40                 emitovanje T-tona u prvom mini slotu;
41                 detekcija R-tona u drugom mini slotu;
42                 if (detektovan R-ton) then
43                     SSt = C; RSt = B;
44                 else
45                     SSt = B;
46                 end if;
47             case 3:
48                 detekcija R-tona u drugom mini slotu;
49                 if (detektovan R-ton) then
50                     SSt = B;
51                 end if;
52             case 4:
53         end switch;
54     end for;
55 end.

```

Sl. 7.6 Pseudo- kôd nadmetanja u toku CW1.

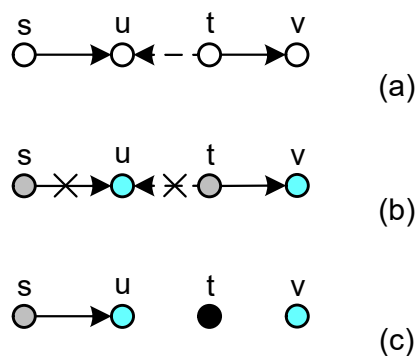
Nakon završenog nadmetanja u CW1 kandidati čvorovi su podeljeni u disjunktne klustere, sa po jednim kandidatom primaocem i nula ili više kandidata pošiljaoca. Zahvaljujući

pravilu P_3 , u 1-hop okolini kandidata primaoca nema kandidata pošiljaoca koji imaju poruku za nekog drugog kandidata primaoca, što praktično znači da je minimalno rastojanje između bilo koja dva kandidata primaoca 3 hopa. Na ovaj način su formirani klasteri međusobno izolovani i nalikuju klasterima koji se formiraju u svakom slotu protokola RD-TDMA/TONE, gde se zahvaljujući odgovarajućoj dodeli TDMA slotova, takođe postiže rastojanje od najmanje 3 hopa između bilo koja dva vlasnika istog slota. Međutim, kod RD-TDMA/TONE raspored slotova je fiksiran i svaki čvor se budi u svom slotu, tj. jedanput tokom svakog frejma, da bi eventualno primio poruku od jednog od svojih suseda. Pri ovakvoj organizaciji, ne postoji mogućnost da čvor, kome ni jedan sused trenutno ne želi da pošalje poruku, ustupi svoj slot nekom drugom čvoru, niti da čvor, kome više od jednog suseda trenutno želi da pošalje poruku, koristi neiskorišćene slotove drugih čvorova. S druge strane, kod AP/TONE-a se klasteri formiraju dinamički, a čvor dobija ulogu kandidata primaoca samo ukoliko postoje zainteresovani pošiljaoci. Takođe, čvor koji je primio poruku u tekućem frejmu (koji po trajanju odgovara jednom slotu kod protokola RD-TDMA/TONE), nije sprečen da u sledećem frejmu učestvuje u nadmetanju i ponovo izbori ulogu kandidat-primaoca.

Eliminisanje efekta skrivenih terminala

Efikasnost eliminisanja efekta skrivenih terminala AP/TONE-a može da se vidi na Sl. 7.8. Na početku nadmetanja (Sl. 7.8(a)), prikazana su dva potencijalna pošiljaoca, s i t i dva potencijalna primaoca, u i v , gde se jedan od potencijalnih primaoca, u , nalazi u komunikacionom dometu oba potencijalna pošiljaoca. Čvor s želi da pošalje poruku čvoru u , a čvor t želi da pošalje poruku čvoru v . Čvorovi s i t ovde čine par skrivenih terminala u odnosu na čvor u , čime stvaraju koliziju *tipa 1*. U slučaju da se za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi AP/CSMA ili AP/RTS-CTS, čvor t , koji je van dometa čvora s , detektuje slobodan kanal i može da pošalje poruku čvoru v , čime izaziva koliziju u tački čvora u sa porukom čvora s , kao što je prikazano na Sl. 7.8(b). Posledica toga je povećanje potrošnje energije, jer je čvor s nepotrebno emitovao paket (u slučaju AP/CSMA ceo paket podataka, u slučaju AP/RTS-CTS RTS paket). Šteta bi bila još veća da je čvor t svoj paket takođe slao čvoru u , jer bi došlo do gubitka čak dva paketa. Osim smanjenja energetske efikasnosti usled efekta skrivenih terminala, čvor u je nepotrebno ostao na prijemu i time propustio tekući frejm, koji je mogao da iskoristi za eventualno slanje paketa nekom svom susedu. Kod AP/TONE svaki čvor ima svoj slot u periodu za nadmetanje u kome prima zahteve od potencijalnih pošiljaoca, a zahvaljujući 2-hop ekskluzivnoj dodeli slotova nikada ne dolazi

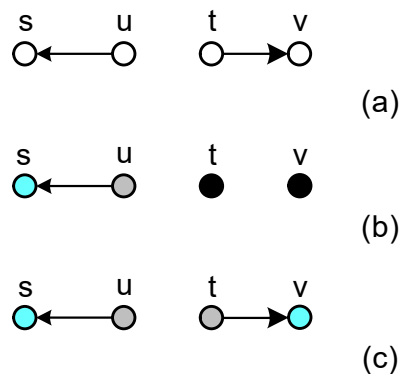
do preklapanja zahteva (T-tonova) koji su upućeni različitim primaocima. Drugim rečima, čvor u na Sl. 7.8(c) čuje samo T-tonove koji su njemu namenjeni, a ne čuje tonove koji se šalju čvoru v . Nakon što u svom slotu primi T-ton od čvora s , čvor u odgovara R-tonom, dok čvor t , koji ima obavezu da osluškuje slot svakog svog suseda, odustaje od predaje jer je detektovao R-ton čvora u . Broj uspešno prenetih poruka je isti kao kad se koristi AP/CSMA ili AP/RTS-CTS. Međutim, kada se koristi AP/TONE čvorovi ne moraju da se blokiraju, tako da čvor v nije sprečen da eventualno primi poruku od nekog drugog suseda, za razliku od čvora u iz predhodnog slučaja koji je u tekućem frejmu bio zauzet zbog prijema poruke od čvora t . Druga prednost upotrebe AP/TONE-a je da pošto do kolizije nije došlo, nema ni gubitaka energije.



Sl. 7.7 Razrešavanje efekta skrivenih terminala kod AP MAC protokola: a) stanje na početku nadmetanja; b) razrešenje primenom AP/CSMA ili AP/RTS-CTS; c) razrešenje primenom AP/TONE

Eliminisanje efekta izloženih terminala

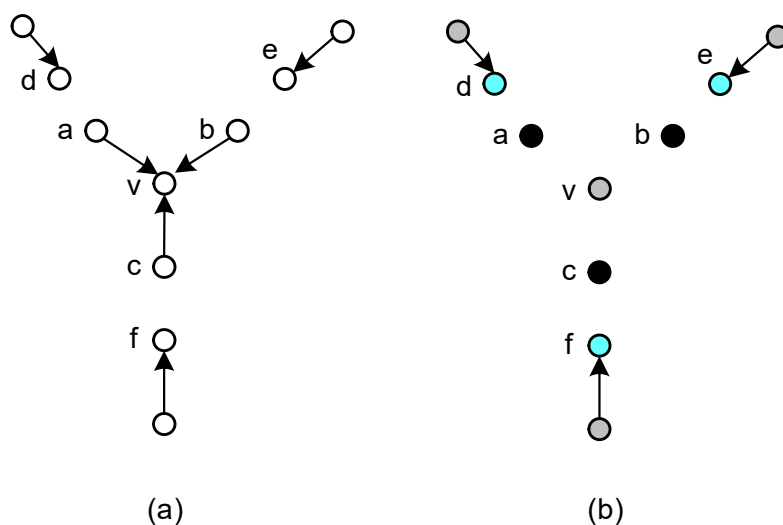
Efikasnost eliminisanja efekta izloženih terminala je prikazana na Sl. 7.8. Na početku Sl. 7.8(a), potencijalni pošiljaoci su čvorovi u i t . Ako se za razrešavanje komunikacionih konflikata koristi AP/CSMA, kao na Sl. 7.8(b), čvor t čuje čvor u i odustaje od emitovanja, iako njegovo emitovanje ne bi izazvalo koliziju kod čvora s , čime dovodi do efekta izloženih terminala. Pošto su u slučaju primene AP/TONE interakcije između čvorova u i s i t i v razdvojena u vremenu, ne mogu da utiču jedna na drugu, pa time ne postoji ni mogućnost da se međusobno ometaju. Zbog toga nakon nadmetanja u CW1 oba čvora, u i t , ostaju kandidati pošiljaoci (Sl. 7.8c), ne dolazi do efekta skrivenih terminala, pa ni do smanjenja propusne moći mreže.



Sl. 7.8 Razrešavanje efekta izloženih terminala kod AP MAC protokola: a) stanje na početku nadmetanja; b) razrešenje primenom AP/CSMA; c) razrešenje primenom AP/TONE

Efekat izolovanih kandidata primaoca

Uprkos tome što efikasno eliminiše problem skrivenih i izloženih terminala, AP/TONE pati od novog problema: takozvanog efekta izolovanog kandidata primaoca. Efekat izolovanog kandidata primaoca nastaje kad kandidat primalac ostane bez svojih kandidata pošiljaoca koji su se naknadno povukli primenom pravila P3. Ovaj problem je moguće uočiti na primeru sa Sl. 7.9. Na početku nadmetanja, Sl. 7.9(a), potencijalni pošiljaoci su čvorovi a, b, c, d, e i f . U toku nadmetanja, u slotu $s = CN(v)$ čvor v postaje kandidat primalac, a čvorovi a, b i c njegovi kandidati pošiljaoci. Ukoliko se desi da važi $CN(v) > CN(d)$, $CN(v) > CN(e)$ i $CN(v) > CN(f)$, tada će u narednim slotovima čvorovi a, b i c čuti R-ton i naknadno se povući (primenom pravila P3). Na ovaj način, čvor v postaje izolovani kandidat primaoc, jer nakon CW1 neće imati ni jednog kandidata pošiljaoca, kao što je prikazano na Sl. 7.9(b).



Sl. 7.9 Efekat izolovanih kandidata primaoca kod AP/TONE: a) početno stanje; b) nakon CW1

Pojava izolovanih primaoca dovodi do nepotrebnog gubljenja energije za nadmetanje u slotu primaoca. U konkretnom primeru, u slotu čvora v emitovana su 3 T-tona i jedan R-ton. Takodje, čvorovi iz klastera izolovanog kandidata primaoca ostaju blokirani, bez mogućnosti da preuzmu neku drugi, alternativnu ulogu, čime se smanjuje propusna moć. Na sreću, do pojave izolovanog primaoca dolazi retko, tako da nema veliki uticaj na energetska efikasnost i propusnu moć AP/TONE-a.

Korektnost algoritma CW1

U cilju dokazivanja korektnosti predloženog algoritma za razrešavanje komunikacionih konflikata koji se koristi u CW1, dokazane su sledeće leme:

Lema 1 (eliminacija kolizija tipa I). Neka je v senzorski čvor koji završava fazu CW1 kao kandidat primalac, a A skup njegovi 1-hop suseda koji završavaju fazu CW1 kao kandidati pošiljaoci. Tada je A ili prazan skup, ili je v potencijalni primalac svih senzorskih čvorova iz skupa A .

Dokaz: Pretpostavimo da senzorskom čvoru v pripada slot s u CW1. Na početku slotu s , skup v -ovih suseda može da se podeli na tri disjunktne podskupa: skup $S1$ v -ovih suseda koji imaju status potencijalnog pošiljaoca, $status \in \{(P, P), (B, P)\}$ i koji žele da pošalju poruku čvoru v ; skup $S2$ koji imaju status potencijalnog pošiljaoca, $status \in \{(P, P), (B, P)\}$, ali određište njihovih poruka nije senzorski čvor v , i skup $S3$ koji sadrži sve preostale susede sa blokiranim statusom potencijalnog pošiljaoca, $status \in \{(P, B), (C, B), (B, B)\}$. Za vreme prvog mini slotu u toku s svi senzorski čvorovi iz $S1$ emituju T-ton; v sempluje kanal. Zbog toga što je v jedini vlasnik slotu s u svojoj 2-hop okolini, on jedini od svih svojih prima T-ton. U drugom mini slotu, čvor v odgovara emitovanjem R-tona. R-ton detektuju senzorski čvorovi iz skupova $S1$ i $S2$. Na kraju slotu s , v postaje kandidat primalac, $status = (C, B)$, senzorski čvorovi iz skupa $S1$ postaju kandidati pošiljaoci $status = (B, C)$, a senzorski čvorovi iz $S2$ odustaju od svog statusa potencijalnog ili kandidata pošiljaoca (pravilo P3). Posledica ovoga je da na kraju slotu s od svih suseda čvora v samo senzorski čvorovi iz skupa $S1$ nemaju blokirani status pošiljaoca. Do kraja CW1 mora da važi sledeće: (a) senzorski čvor v će zadržati svoj status kandidata primaoca, (b) u okolini senzorskog čvora v neće biti novih kandidata pošiljaoca jer je status pošiljaoca svih njegovih suseda, osim onih iz skupa $S1$, već blokirani i (c) proizvoljan broj suseda iz $S1$ može da blokira svoj status pošiljaoca zbog efekta naknadnog povlačenja. Zbog toga, konačan skup A može samo da bude podskup $S1$.

Lema 2 (nepostojanje uzajamne blokade). Ukoliko na početku CW1 u mreži postoji bar jedan potencijalni pošiljalac, tada će nakon CW1 biti izabran bar jedan neizolovani kandidat-primalac.

Dokaz: Neka je A neprazan skup čvorova koji ulaze u period za nadmetanje kao potencijalni pošiljaoci. Neka je B skup njihovih potencijalnih primaoca. Pošto svaki potencijalni pošiljaoc ima tačno jednog potencijalnog primaoca, važi $1 \leq |B| \leq |A|$. Neka je CN_{max} najveći broj za nadmetanje bilo kog čvora u B , i neka je L skup senzorskih čvorova sa brojem za nadmetanje CN_{max} . Tada važi $1 \leq |L| \leq |B|$. Neka je C skup neizolovanih kandidata primaoca, koji je inicijalno prazan. Pošto su slotovi u CW1 numerisani u opadajućem redosledu, slot $s = CN_{max}$ je prvi aktivni slot, odnosno prvi slot u CW1 u kome se vrši izbor kandidata-primaoca i pošiljaoca. U slotu s svi čvorovi iz skupa L postaju neizolovani kandidati primaoci, $C = L$, a svi njihovi potencijalni pošiljaoci kandidati pošiljaoci, čime se formira $|L|$ klastera, odnosno u tom trenutku postoji ukupno $1 \leq |C|$ neizolovanih kandidata primaoca. Ukoliko se desi da u narednim slotovima neki od kandidata primaoca postane izolovani kandidat, zato što su se svi njegovi kandidati pošiljaoci naknadno povukli, to neće smanjiti ukupan broj klastera, jer se za svakog naknadno povučenog kandidata-pošiljaoca formira novi klaster sa neizolovanim kandidatom-primaocem. Praktično, za svakog novog izolovanog kandidata primaoca, za koga se $|C|$ smanji za jedan, formira se bar jedan novi klaster, tj. povećava se ukupan broj neizolovanih kandidata primaoca za najmanje jedan, tako da ukupan broj neizolovanih kandidata primaoca, $|C|$, može samo da se poveća, ili da ostane isti. Na ovaj način, u svakom slotu tokom CW1 važi $1 \leq |L| \leq |C|$. To znači da će na kraju CW1 preostati bar jedan klaster sa bar jednim parom kandidat primalac-pošiljalac, tj. da će biti izabran bar jedan neizolovani kandidat-primalac.

7.3.4. Procedura nadmetanja u toku perioda za nadmetanje CW2:

Procedura za nadmetanje u toku perioda za nadmetanje CW1 garantuje da je rastojanje između bilo koja dva kandidata primaoca najmanje 2 hopa, pa grupe koje čine kandidati-primaoci sa pridruženim kandidatima pošiljaocima predstavljaju praktično izolovane klastera, poput onih koji se javljaju u protokolu RD-TDMA/TONE. Zahvaljujući ovome, za razrešavanje komunikacionih konflikata unutar formiranih klastera je moguće primeniti mehanizam TONE.

Kod AP/TONE se ne koristi mogućnost fleksibilnog podešavanja trajanja perioda za nadmetanje, već je dužina CW2 postavljena na minimalnu vrednost, $M = \log_2 Q$ slotova, a

prilikom nadmetanja se koriste isti brojevi za nadmetanje kao u CW1. Prethodno je pokazano da produženje perioda za nadmetanje iznad minimalne dužine dovodi do smanjenja energije. Međutim, kako je Q , broj različitih CN-ova veći od 1-hop okoline, odnosno u klasteru nisu iskorišćeni svi CN-ovi, i sa minimalnim M se postiže isti efekat kao kad se period za nadmetanje produži. Osim toga, odloženo povlačenje dodatno smanjuje broj potencijalnih pošiljaoca, tako da nema potrebe za produženjem perioda za nadmetanje CW2.

U nadmetanju u toku CW2 učestvuju samo kandidati pošiljaoci i kandidati primaoci, tj. samo čvorovi sa statusom $status = (C, B)$ ili $status = (B, C)$. Nadmetanje se odvija slot po slot, razmenom T-tonova i R-tonova, na sledeći način: Kandidati pošiljaoci učestvuju svakoj rundi, tako što u toku prvog mini slota oslušuju T-ton i u slučaju da su ga čuli, emituju R-ton u toku drugog mini slota i menjaju svoj status u izabrani primalac ($status = (S, B)$). Čvorovi kandidati pošiljaoci se ponašaju u skladu sa STAR/TONE mehanizmom, tj. izvršavaju algoritam za podelu grupa (Sl. 4.6), sa BM-BCD algoritmom (Sekcija 4.7). Čvorovi koji su izašli iz nadmetanja kao pobednici, dobijaju status izabranog pošiljaoca $status = (B, S)$, ostali odustaju $status = (B, B)$. Takođe, potencijalni primaoci koji do kraja CW2 nisu postali izabrani primaoci, takođe odustaju, $stat = (B, B)$. Kako STAR/TONE mehanizam garantuje da će na kraju za svakog aktivnog primaoca postojati tačno jedan pošiljalac, rezultat nadmetanja u CW2 će biti tačno po jedan pošiljalac za svakog primaoca.

Korektnost algoritma CW2

Lema 3 (eliminacija kolizija *tipa_2*). Neka je v senzorski čvor koji ulazi u fazu emitovanja poruke kao izabrani prijemnik. Tada među susedima senzorskog čvora v postoji tačno jedan izabrani pošiljalac u , i v je primalac senzorskog čvora u .

Dokaz: Čvor može da dođe do statusa izabranog pošiljaoca ili primaoca na kraju CW2 faze, samo ako je CW1 fazu nadmetanja završio kao kandidat pošiljalac, odnosno primalac. Procedura za nadmetanje u toku CW2 blokira izolovanog kandidata primaoca (ukoliko je zbog efekta naknadnog povlačenja izgubio sve svoje kandidate pošiljaoce). U protivnom, senzorski čvor v dobija status izabranog primaoca i prelazi u fazu prenosa poruke, zajedno sa svojim kandidatom pošiljaocem koji ima najveći CN (tokom CW2 se koristi TONE mehanizam, tako da će pobednik nadmetanja biti baš kandidat pošiljaoc sa najvećim CN). Zbog toga što su CN-ovi jedinstveni u svakoj 2-hop okolini, postojaće tačno jedan pobednik nadmetanja u , koji dobija status izabranog pošiljaoca i prelazi u fazu prenosa poruke. Prema Lemi 1, v mora da bude primalac senzorskog čvora u .

7.4. Rezultati simulacije rada AP/TONE protokola

Performanse predloženog AP/TONE MAC protokola su analizirane poređenjem sa dva standardna mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata u MAC protokolima sa zajedničkim aktivnim periodom, AP/CSMA i AP/RTS-CTS. Performanse su analizirane u zavisnosti od intenziteta i režima saobraćaja sa jedne i gustine multihop mreže sa druge strane. Za potrebe analiziranja performansi protokola u SystemC-u je razvijeno okruženje za simulaciju. Parametri radio primopredajnika i većina MAC parametara su fiksirani u svim simulacijama. Za radio parametre su korišćene vrednosti date u Tabela 4, a Tabela 5 prikazuje vrednosti MAC parametara korišćenih u simulacijama.

Tabela 5: MAC parametri korišćeni u simulaciji

Parametri:	Protokol:	Vrednost:
Dužina preambule		6 B
Dužina je poruke		100 B
Dodatni deo poruke (zaglavljje+CRC)		10 B
Veličina ACK paketa (CSMA)		16 B
Veličina RTS paketa		9B
Period za nadmetanje	CSMA, RTS-CTS	16 slotova
Trajanje slota za nadmetanje		1.24 ms
Maksimalni interval za povlačenje	CSMA, RTS-CTS	16 frejmova
Trajanje CW1	TONE	Q slotova
Trajanje CW2	TONE	$\log_2 Q$

Simulirana je multihop mreža od $N = 100$ senzorskih čvorova, slučajno raspoređenih po uniformnoj raspodeli unutar kružne oblasti prečnika $100m$. Domet emitovanja svih senzorskih čvorova je postavljen na istu vrednosti a menja se po potrebi, da bi se postigle različite gustine mreže. Gustina mreže (jednaka prosečnom stepenu senzorskog čvora, δ_{avr}) je topološka karakteristika mreže i zavisi od konkretnog rasporeda čvorova u prostoru i od njihove povezanosti. U narednim simulacijama je stepen povezanosti čvorova menjan promenom RF dometa. Trajanje intervala CW1 kod protokola AP/TONE, izraženo brojem slotova, jednako je broju različitih CN u mreži, Q , i takođe zavisi od gustine i topologije mreže. Zavisnost stepena čvora i trajanja intervala CW1 faze od RF dometa za simuliranu mrežu je prikazana u Tabela 6. Minimalan domet koji garantuje povezanost mreže je $10.2m$. Pri tom dometu gustina mreže

iznosi 4, a potreban broj CW1 rundi 9. Što je veća gustina mreže, veći je i broj brojeva za nadmetanje potrebnih da bi se zadovoljio uslov 2-hop ekskluzivnosti. Tako je za RF domete 12.4m, 14.5m i 15.8m potrebno 13, 17 i 21 CN-ova, respektivno.

Tabela 6: Gustina mreže u zavisnosti od RF dometa

RF domet[m]:	10.2	11.3	12.4	13.5	14.5	15.2	15.8	16.75	17.43	18.1
δ_{avr}:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Q:cw1	9	11	13	15	17	21	21	22	22	25

Performanse koje se odnose na propusnu moć i energetska efikasnost su procenjene za dva režima saobraćaja. Prvi je uniformni režim, kod koga se poruke generišu po Puasonovoj raspodeli. Drugi je režim zasićenja. U ovom režimu svaki čvor nakon uspešno poslate poruke trenutno generiše novu poruku namenjenu slučajno izabranom susedu. Ovaj režim simulira ekstremne uslove velikog opterećenja.

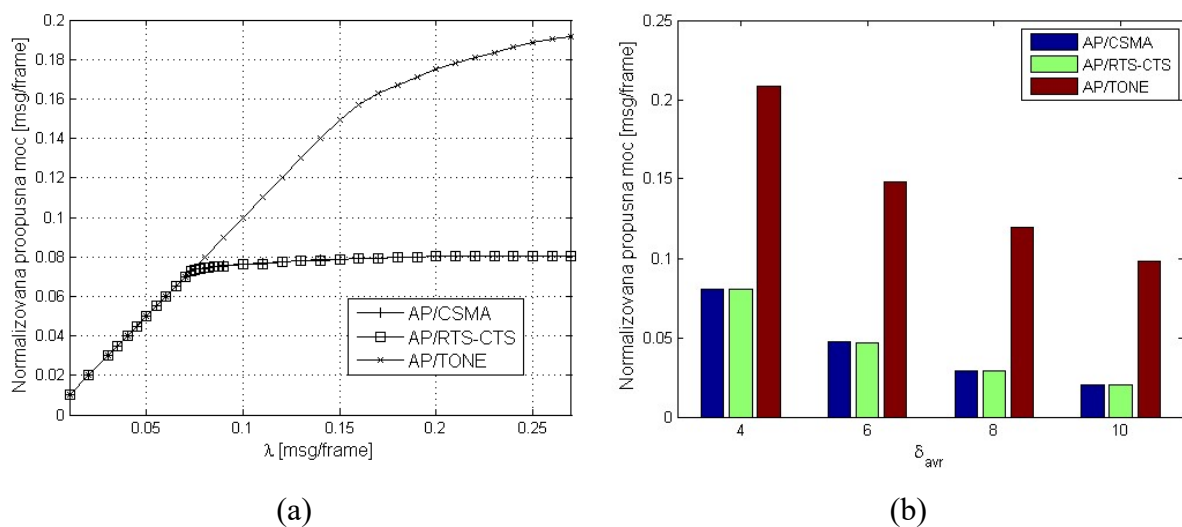
7.4.1. Propusna moć

Propusna moć je analizirana u smislu normalizovane propusne moći (eng. *normalized throughput*), u uniformnom režimu i režimu zasićenja. Neka simulacija traje N_{fr} frejmova trajanja T_{fr} sekundi, a mreža se sastoji od N_{nodes} senzorskih čvorova. U toku simulacije je uspešno primljeno N_{msg} poruka podataka. *Normalizovana propusna moć* predstavlja prosečan broj poruka koje senzorski čvor primi u jednom frejmu, definiše se kao $N_{msg}/(N_{nodes}N_{fr})$ i izražava brojem poruka po frejmu po čvoru (*msg/frame*), kao što je već definisano u Sekciji 6.7.1.

Uniformni režim

Normalizovana propusna moć pri uniformnom saobraćaju u zavisnosti od brzine pristizanja poruka, λ , za različite mehanizme za razrešavanje komunikacionih konflikata u slučaju mreže sa $\delta_{avr} = 4$ je prikazana na Sl. 7.10(a). Normalizovana propusna moć kod AP/CSMA i AP/RTS-CTS se praktično poklapaju, zato što se oba mehanizma oslanjaju na CSMA mehanizam za nadmetanje. Kod AP/CSMA CSMA se koristi za sprečavanje kolizija poruka podataka, dok se kod AP/RTS-CTS koristi za sprečavanje kolizija RTS paketa. Ako se zbog efekta skrivenih terminala desi kolizija, kod AP/CSMA će biti izgubljena poruka podataka a kod AP/RTS-CTS poruka neće biti ni poslana. Kad je u pitanju propusna moć,

krajnji efekat je isti. Na sličan način, efekat izloženih terminala isto utiče na propusnu moć kod oba mehanizma. Ukoliko kanal nije slobodan, čvor odustaje od slanja poruke podataka kod AP/CSMA, odnosno od slanja RTS paketa kod AP/RTS-CTS a time i od slanja poruke podataka. Sa porastom intenziteta saobraćaja, kad većina čvorova ulaze u frejm kao potencijalni pošiljaoci, oba ova mehanizma se oslanjaju na algoritam za povlačenje kako bi se izbeglo prerano zagušenje. Međutim, čak i sa implementiranim algoritmom za povlačenje, normalizovana propusna moć u zasićenju ne prelazi vrednost od 0.08 msg/frame , zbog kombinovanih efekata skrivenih i izloženih terminala. Sa druge strane, posle linearnog rasta za male brzine pristizanja poruka, normalizovana propusna moć kod AP/TONE dostiže vrednost od čak 0.21 msg/frame . Ovoliko poboljšanje AP/TONE postiže zahvaljujući tome što je potpuno eliminiše kolizije i zahvaljujući tome što ne pati od efekta izloženih terminala. Zbog potpunog eliminisanja kolizija, TONE ne koristi algoritam za povlačenje. Čvor koji nije uspeo da se izbori za pravo slanja poruke pokušava ponovo već u sledećem frejmu. Na osnovu ovih rezultata moguće je zaključiti da se uvođenje AP/TONE kao mehanizma za razrešenje konflikata postiže znatno poboljšanje performansi u smislu normalizovane propusne moći kod AP MAC protokola, koje u slučaju mreže gustine $\delta_{avr} = 4$ iznosi čak više od 160%.



Sl. 7.10 Normalizovana propusna moć protokola sa zajedničkim aktivnim periodom: a) u zavisnosti od brzine pristizanja poruka za $\delta_{max} = 4$; b) u slučaju zasićenja za različite gustine mreže

Režim zasićenja

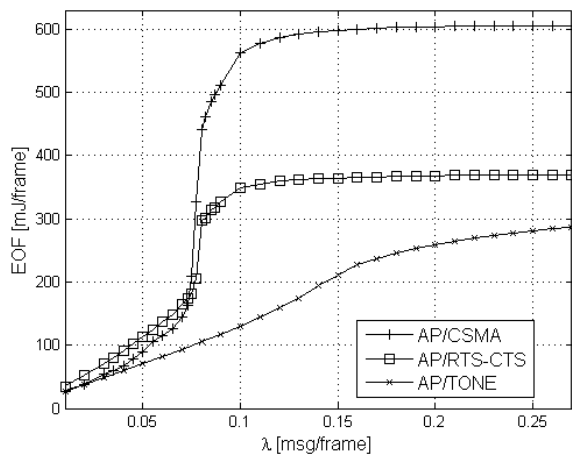
Normalizovana propusna moć podataka u stanju zasićenja za različite gustine mreže i za različite mehanizme za razrešavanje komunikacionih konflikata je prikazana na Sl. 7.10(b). Normalizovana propusna moć podataka u stanju zasićenja opada sa porastom gustine mreže, ali tako da poboljšanje AP/TONE u odnosu na druga dva raste sa povećanjem gustine. Pošto

svaki uspešan prenos poruke u slučaju AP/CSMA i AP/RTS-CTS blokira sve čvorove iz 1-hop okoline pošiljaoca i primaoca, sa porastom gustine mreže se povećava i broj blokiranih čvorova, što dovodi do opadanje propusne moći mreže. Sa druge strane, AP/TONE eliminiše efekat izloženih terminala i blokira susede samo selektivno, tako da potencijalni pošiljaoci mogu da preuzmu ulogu potencijalnih primaoca. Osim toga, verovatnoća nastanka efekta izolovanih prijemnika kod protokola AP/TONE se smanjuje sa povećanjem gustine mreže, jer se zbog povećanja broja suseda smanjuje verovatnoća da se baš svi potencijalni pošiljaoci naknadno povuku. Zbog svega toga, sa porastom gustine mreže propusna moć mreže koja koristi AP/TONE ne opada toliko naglo kao kod prethodna dva mehanizma, pa AP/TONE postiže poboljšanje performansi od 250% za $\delta_{avr} = 6$, od 320% za $\delta_{avr} = 8$ i čak 300% za $\delta_{avr} = 10$. Ovim je pokazano da upotreba AP/TONE mehanizma za razrešenje konflikata uspešno povećava propusnu moć AP/MAC protokola, posebno u WSN veće gustine.

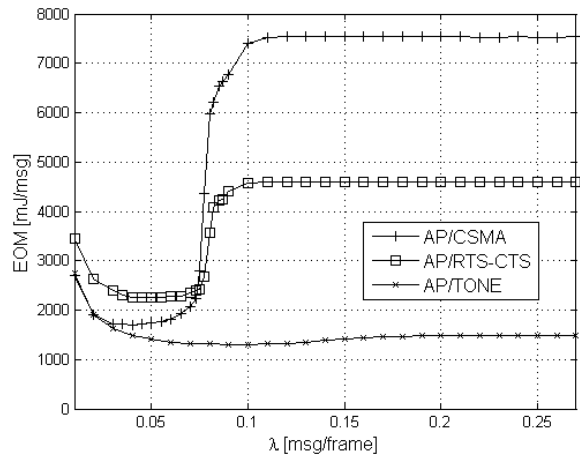
7.4.2. Energetska efikasnost

Energetska efikasnost AP MAC protokola je analizirana koristeći metrike *dodatna energija po frejmu* (EOF, eng. *energy overhead per frame*), koja meri dodatni utrošak energije po frejmu: $(E_{tot} - N_{msg}E_{msg})/T_f$, i *dodatna energija po poruci* (EOM, eng. *energy overhead per message*), koja meri dodatni utrošak energije po svim uspešno primljenim porukama: $(E_{tot} - N_{msg}E_{msg})/N_{msg}$. Ukupna dodatna energija uključuje energiju potrošenu usled pojave kolizija, nadmetanja, semplovanja kanala i nepotrebnog slušanja, kao i usled emitovanja dodatnih poruka u slučaju AP/RTS-CTS ili produženja preambule, u slučaju AP/CSMA. Računa se kao razlika između ukupne energije koju su potrošili svi senzorski čvorovi za vreme simulacije (E_{tot}) i energije potrebne za prenos jedne poruke u slučaju idealne vremenske sinhronizacije u odsustvu kolizija (E_{msg}) pomnoženo ukupnim brojem primljenih poruka (N_{msg}). Vrednost E_{msg} je procenjena na osnovu radio parametara datih u Tabela 3, pod pretpostavkom da se koristi poruka formata kao na Sl. 6.9.

Na Sl. 7.11(a) je prikazana EOF u zavisnosti od brzine pristizanja poruka za različite AP MAC protokole. Zbog mogućih kolizija, EOF kod AP/CSMA zavisi od dužine poruke podatka. U simulacijama je pretpostavljeno da su poruke podataka dužine 100B. EOF kod AP/RTS-CTS ne zavisi od dužine poruke zato što se kod njega dešavaju samo kolizije RTS paketa a ne i paketa poruka, kao ni kod AP/TONE, koji u potpunosti eliminiše kolizije.



(a)



(b)

**Sl. 7.11 Dodatna energija za AP MAC protokole za različite gustine saobraćaja i $\delta_{max} = 4$:
a) po frejmu; b) po poruci**

Na dodatnu energiju kod različitih protokola utiču različiti uzroci. Dominantni uzroci gubitka energije su: kolizije (AP/CSMA i AP/RTS-CTS) i nadmetanje, tj. emitovanje RF tonova (kod AP/TONE). Među sekundarnim uzrocima gubitka energije najvažniji je semplovanje kanala, koje se koristi kod sve tri varijante protokola za detektovanje RF tona ili preambule. Oblik svake od krivih na Sl. 7.11 je posledica relativnog udela energije potrebne za semplovanje kanala i dominantnog uzroka utroška energije, karakterističnog za konkretan protokol u vrednosti dodatne energije. Pri manjim brzinama pristizanja poruka dominantan udeo u dodatnoj energiji ima semplovanje kanala, dok pri većim brzinama generisan pristizanja poruka dolazi do izražaja dominantan uzrok gubitka energije, karakterističan za konkretan protokol.

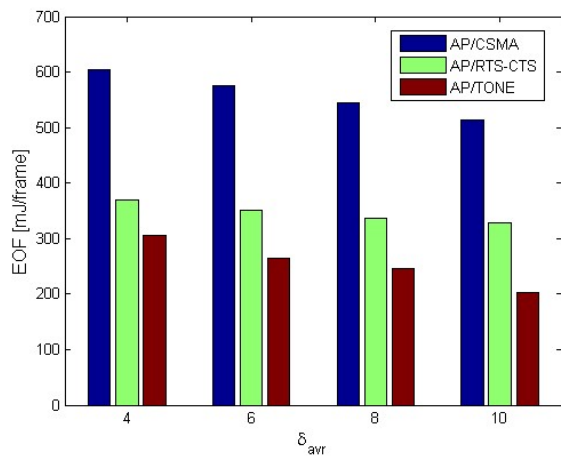
Iako pojedinačno semplovanje kanala ne troši puno energije (reda nekoliko desetih delova μJ), ukupan doprinos vrednosti dodatne energije pri malim brzinama pristizanja poruka nije zanemariv. U slučaju da nema saobraćaja svi mehanizmi za razrešavanje komunikacionih konflikata imaju malu potrošnju jer tada svaki senzorski čvor kao potencijalni primaoc semplove kanal samo jednom po frejmu. Sa povećanjem broja generisanih poruka povećava se broj semplovanja kanala zbog toga što potencijalni predajnici moraju da semplove kanal više puta za vreme perioda za nadmetanje. U slučaju AP/CSMA i AP/RTS-CTS, sa povećanjem broja generisanih poruka povećava se i broj kolizija, koje postaju dominantan uzrok povećanja dodatne energije. U slučaju AP/TONE-a, pošto nema kolizija, semplovanja kanala ostaju dominantan uzrok, pa on postiže bolje rezultate od ostala dva mehanizma. Osim toga, sa povećanjem brzine pristizanja poruka cena semplovanja kanala se amortizuje povećanjem broja prenetih poruka, da bi pri većim brzinama pristizanja poruka postala neznatna u odnosu

na druge uzroke gubitka energije. Ako, kao metriku koristimo EOF (kao na Sl. 7.10(a)), AP/TONE postiže poboljšanje od 25% u odnosu na AP/RTS-CTS i čak 50% u odnosu na AP/CSMA. Ovo poboljšanje EOF je praćeno znatnim povećanjem propusne moći u odnosu na AP/RTS-CTS, pa se realni dobitak uvođenja AP/TONE-a može videti tek posmatranjem metrike EOM (Sl. 7.11(b)), koja uzima u obzir i broj uspešno prenetih poruka.

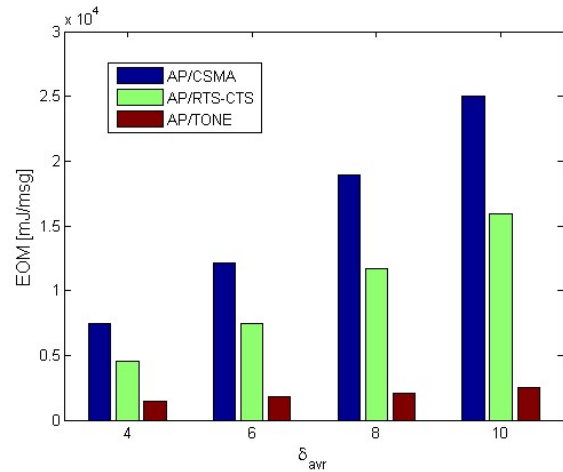
Kod AP/CSMA sa porastom brzine pristizanja poruka kolizije postaju ozbiljan problem. Kolizija na strani prijemnika dovodi do nepotrebnog slušanja, jer je nemoguće razlučiti koliziju od pozadinskog šuma. Na strani predajnika je cena kolizije još veća, pošto se kolizija detektuje tek posle emitovanja cele poruke, ukoliko se ne primi ACK paket. Osim toga, i emitovanje ACK paketa, kao deo mehanizma za izbegavanje kolizija, doprinosi nepotrebnom trošenju energije. Pri malim brzinama pristizanja poruka manja je verovatnoća da kolizija nastupi, pa dodata energija kod AP/CSMA ima relativno nisku vrednost. Međutim, kako se brzina pristizanja poruka povećava i približava maksimalnoj propusnoj moći protokola, kolizije postaju sve češće, tako da se vrednost dodatne energije naglo povećava. Kad brzina pristizanja poruka pređe maksimalnu propusnu moć, EOM ulazi u zasićenje na nivou od 7.4 mJ/frame . Zbog tako visoke vrednosti EOM i niske propusne moći AP/CSMA nije pogodan za upotrebu u slučaju saobraćaja visokog intenziteta. U slučaju AP/RTS-CTS, kolizija paketa podataka je samo zamenjena kolizijama RTS-CTS paketa, pa, slično AP/CSMA, EOM ulazi u zasićenje na nešto nižem nivou 4.5 mJ/frame .

Usled potpunog eliminisanja kolizija, AP/TONE pokazuje najbolje performanse od svih simuliranih protokola, kao što je moguće videti na Sl. 7.11(b). Na primer, pri maksimalnoj brzini pristizanja poruka AP/TONE sa dužinom period za nadmetanje $M = 4$ ima EOM od oko 1.5 mJ/msg , što je tri puta manje od EOM kod AP/RTS-CTS i čak pet puta manje od EOM kod AP/CSMA.

Na Sl. 7.12(a) i Sl. 7.12(b) su prikazane EOF i EOM, respektivno, u slučaju da su senzorski čvorovi u režimu zasićenja za različite gustine mreže. Kao što je moguće pretpostaviti, EOF opada sa povećanjem gustine mreže, zbog smanjenja broja prenetih poruka, a najbolje rezultate postiže AP/TONE. EOM se povećava sa povećanjem gustine mreže zbog povećanog nadmetanja, ali je to povećanje u slučaju AP/TONE-a neznatno.



(a)



(b)

**Sl. 7.12 Dodatna energija za AP MAC protokole u slučaju zasićenja za različite gustine mreže:
a) po frejmu; b) po poruci**

Na osnovu rezultata prikazanih na Sl. 7.11 i Sl. 7.12 se može zaključiti da je u kontekstu AP MAC protokola za bežične senzorske mreže bolje potrošiti i malo više energije na nadmetanje ali u potpunosti eliminisati kolizije (kao kod AP/TONE), nego se oslanjati na jednostavni mehanizam za razrešenje konflikata, ali gubiti energiju (i propusnu moć) na kolizije i ponovno slanje poruka (kao kod AP/CSMA i AP/RTS-CTS).

8. ZAKLJUČAK

Ova doktorska disertacija je inspirisana intenzivnim istraživanjima u oblasti WSN, čiju pojavu je omogućio izuzetan napredak u oblastima integrisanih elektronskih komponenti, mikromehaničkih sistema i bežične komunikacije. Razvoj WSN je doneo nove izazove i zahteve, pre svega za produženjem njenog životnog veka. Budući da je nemoguće, ili nepraktično zameniti baterije senzorskim čvorovima, a komunikacija troši najveći deo energije, smanjenje potrošnje energije potrebne za komunikaciju se postavlja kao imperativ. Neophodnost obezbeđenja što dužeg vremena života WSN, posebno ističe potrebu za postojanjem energetski efikasnog MAC protokola, koji bi minimizovao potrošnju radio primopredajnika. Energetski efikasan MAC protokol za WSN bi trebalo da ima mogućnost eliminisanja kolizija, tako da zahteva i postojanje efikasnog mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata.

U ovoj doktorskoj disertaciji je predložen novi mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata upotrebom RF tonova, nazvan TONE. Glavne novine ovog mehanizma su dvofazni način signalizacije RF tonovima, kojim se postiže proširenja dometa nadmetanja na 2-hop okolinu i novi algoritam podele grupa, koji smanjuje broj emitovanih RF tonova u toku nadmetanja. Upotreba TONE mehanizma kod MAC protokola za WSN zvezdaste topologije, i kod MAC protokola za multihop WSN, TDMA tipa sa rasporedom slotova za prijem poruka i sa zajedničkim aktivnim periodom, u potpunosti eliminiše kolizije, uz značajno smanjenje potrošnje energije, u poređenju sa postojećim MAC protokolima.

Kao uvod u problematiku, u disertaciji su opisani oblast i glavni pravci istraživanja WSN. Dalje su navedene različite oblasti primene WSN, kao i zahtevi i principi prilikom njihovog projektovanja. Opisana je arhitektura senzorskog čvora, sa posebnim akcentom na RF primopredajnik, koji je najveći potrošač energije u senzorskom čvoru. Takođe je opisana i komunikaciona arhitektura WSN.

Pošto je MAC sloj komunikacione arhitekture zadužen za pristup medijumu i omogućava smanjenje potrošnje RF primopredajnika, doktorska disertacija daje analizu MAC protokola za WSN. Pre svega je dat pregled postojećih bežičnih MAC protokola. Međutim, budući da je prilikom projektovanja MAC protokola za WSN nemoguće ispoštovati sve zahteve, kao što su energetska efikasnost, skalabilnost, adaptabilnost, predvidljivo kašnjenje, pouzdanost, propusna moć, potrebno je vršiti ustupke. Dat je pregled postojećih MAC

protokola za WSN, koji mogu da se podele na protokole zasnovane na zajedničkom aktivnom periodu, protokole zasnovane na vremenskom rasporedu, protokole sa semplovanjem preambule i hibridne protokole. Pored karakteristika za svaku grupu protokola opisani su i glavni predstavnici. Osim toga, predstavljeno je i razrešavanje komunikacionih konflikata primenom RF tonova, kao i postojeći MAC protokoli koji ga koriste.

Glavni zahtev pri projektovanju MAC protokola za bežične senzorske mreže, energetska efikasnost, može da se obezbedi eliminisanjem kolizija. U cilju eliminisanja kolizija, potreban je efikasan mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata. Predloženi mehanizam za razrešavanje komunikacionih konflikata unutar klastera, TONE, za signalizaciju koristi RF tonove kratkog trajanja, a proces signalizacije je dvofazan: u prvoj fazi čvorovi pripadnici klastera emituju RF ton, koji centralni čvor reemituje u drugoj fazi, čime se eliminiše problem skrivenih terminala. Razrešavanje konflikata se odvija tokom više eliminacionih rundi tokom perioda za nadmetanje, tako da su u svakoj rundi aktivni samo neki čvorovi. Izbor aktivnih čvorova se vrši na osnovu funkcije podele grupa, a u disertaciji je predložena nova funkcija podele grupa, koja pokazuje bolje performanse od postojećih. U disertaciji su detaljno objašnjeni i RF tonovi, kao i konkretna mogućnost generisanja i detekcije RF tonova. Eksperimentalna analiza RF tonova dokazuje mogućnost korišćenja RF tonova za signalizaciju i mogućnost detekcije više istovremeno emitovanih RF tonova.

Inovativnost predloženog mehanizma TONE se ogleda u nekoliko aspekata: prvo, ovo je prvi dvofazni mehanizam za razrešenje konflikata primenom RF tonova koji eliminiše skrivene terminale i drugo, ovo je prvi algoritam podele grupa koji raspoređuje nadmetanje na celokupni period za nadmetanje, čime se smanjuje broj emitovanih tonova.

U doktorskoj disertaciji su takođe predložene i moguće oblasti primene predloženog mehanizma TONE, kao i novi MAC protokoli koji koriste TONE: STAR/TONE MAC protokol, novi intraklasterski MAC protokol za zvezdaste topologije, RD-TDMA/TONE MAC protokol TDMA tipa sa rasporedom slotova za prijem i AP/TONE MAC protokol sa zajedničkim aktivnim periodom.

U cilju ispitivanja performansi TONE mehanizma za razrešavanje komunikacionih konflikata i predloženih MAC protokola koji koriste TONE izvršene su brojne simulacije. U doktorskoj disertaciji su opisani simulatori i primenjeni načini testiranja performansi. Analizirani su: efikasnost BM-BCD algoritma u pogledu broja semplovanja i broja emitovanih tonova, prosečna potrošnja energije senzorskih čvorova tokom perioda za nadmetanje kod STAR/TONE intraklasterskog MAC protokola, propusna moć i energetska efikasnost kod RD-TDMA/TONE i AP/TONE MAC protokola.

Rezultati simulacije pokazuju da BM-BCD algoritam prevazilazi postojeće srodne algoritme u pogledu smanjenja broja emitovanih RF tonova, kao i da u slučaju kad se primeni u STAR/TONE intraklasterskom MAC protokolu obezbeđuje znatno smanjenje prosečne potrošnje energije senzorskih čvorova tokom perioda za nadmetanje. TONE primenjen kod RD-TDMA/TONE MAC protokola obezbeđuje istu propusnu moć kao TDMA MAC protokol sa rasporedom slotova za slanje poruka, uz značajno povećanje energetske efikasnosti u odnosu na njih i na TDMA MAC protokole koji koriste CSMA. Pokazano je i da se primenom TONE mehanizma kod AP/TONE MAC protokola postiže značajno povećanje propusne moći uz značano poboljšanje energetske efikasnosti u poređenju sa MAC protokolima sa zajedničkim aktivnim periodom koji za razrešavanje komunikacionih konflikata koriste CSMA i RTS-CTS.

MAC protokoli su aktivna oblast istraživanja na polju bežičnih senzorskih mreža. Predloženi mehanizam za razrešavanje konflikata TONE predstavljen u ovoj disertaciji, donosi značajno poboljšanje u oblasti razrešavanja komunikacionih konflikata. Predstavljeni rezultati primene TONE kod intraklasterskih MAC protokola za zvezdaste topologije i RD-TDMA i AP MAC protokola za multihop WSN dokazuju njegovu univerzalnu vrednost u oblasti MAC protokola za WSN.

U nastavku istraživanja je potrebno posvetiti posebnu pažnju primeni TONE mehanizma u MAC protokolima sa zajedničkim aktivnim periodom, budući da tu postiže najbolje rezultate i da do ovog trenutka RF tonovi nisu kod njih korišćeni za razrešavanje komunikacionih konflikata. Interesantna je i hardverska realizacija BM-BCD algoritma, kao i uopštenje na višekanalne MAC protokole. Navedene teme ostaju za budući rad.

9. 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.ti.com>
- [8] “CC1101 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*, vol. 5, pp. 3418-3423, 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*, pp. 205-208, Tokyo, Japan 2004.
- [16] A. Tanenbaum, “*Computer Networks*“, Prentice Hall, 2002.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] M.D. Jovanovic, G.L. Djordjevic, "Reduced-Frame TDMA Protocols for Wireless Sensor Networks", *International Journal of Communication Systems*, Wiley, Volume 27, Issue 10, pp. 1857-1872, 2014, ISSN: 1099-1131, DOI=10.1002/dac.2439
- [20] G. Halkes and K. Langendoen, “Crankshaft: An Energy-Efficient MAC-Protocol for Dense Wireless Sensor Networks“, in *Proceedings of EWSN*, 2007.
- [21] 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.
- [22] H. Jiang, W. Zhuang, X. Shen, A. Abdrabou, P. Wang, “Differentiated services for wireless mesh backbone”, *IEEE Communications Magazine*; vol. 44, no. 7, pp. 113–119, 2006.
- [23] W. Song, H. Jiang, W. Zhuang, X. Shen, “Resource management for QoS support in cellular/WLAN interworking”, *IEEE Network*, vol 19, no. 5, pp. 12–18, 2005.
- [24] Z.J. Haas, J. Deng, “Dual busy tone multiple access (DBTMA)-a multiple access control scheme for ad hoc networks”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 6, pp. 975–985, 2002.
- [25] J.L. Sobrinho, A.S. Krishnakumar, “Quality-of-service in ad hoc carrier sense multiple access wireless networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 1353–1368. 1999.

- [26] J-P. Sheu, C-H. Liu, S-L Wu, Y-C. Tseng, "A Priority MAC Protocol to Support Real-time Traffic in Ad Hoc Networks", *Wireless Networks*, vol. 10, no. 1, pp. 61–69, 2004.
- [27] R.I. Davis, A. Burns, R.J. Bril, and J.J. Lukkien, "Controller Area Network (CAN) schedulability analysis: Refuted, Revisited and Revised", *Real-Time Systems*, vol. 35, issue 3, pp. 239-272, 2007.
- [28] T. You, C-H. Yeh, and H. S. Hassanein, "CSMA/IC: A New Class of Collision-free MAC Protocols for Ad Hoc Wireless Networks", in *Proc. of the 28th IEEE Int. Symp. on Comp. and Comm. (ISCC'03)*, pp. 843-848, 2003.
- [29] N. Pereira, B. Andersson, and E. Tovar, "WiDom: A Dominance Protocol for Wireless Medium Access", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 3, issue 2, pp. 120-130, May 2007.
- [30] You, C., H. S. Hassanein and H. Yeh, „CSMA/IC: a new paradigm for medium access control in wireless LANs and ad hoc wireless networks“, *International Journal of Wireless and Mobile computing*, vol. 1, no. 3/4, pp. 211-228, 2006.
- [31] N. Pereira, B. Andersson, E. Tovar, A. Rowe, „Static-Priority Scheduling over Wireless Networks with Multiple Broadcast Domains“, in *Proc. of the 28th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS'07)*, pp. 447-458, 2007.
- [32] Milica D. Jovanovic, Igor Z. Stojanovic, Sandra M. Djosic, Goran Lj. Djordjevic, „Intra-Cluster Tone-Based Contention Resolution Mechanism for Wireless Sensor Networks“, accepted for publication in *Computers and Electrical Engineering*, Elsevier, DOI: 10.1016/j.compeleceng.2016.10.008
- [33] M. D. Jovanovic, G. Lj. Djordjevic, “Contention Resolution Mechanism for Receiver-Driven TDMA-Based Wireless Sensor Networks”, *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, University of Niš, Serbia, Vol. 12, No. 1, pp. 53-73, 2013. ISSN 1820-6417,
<http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUAutContRob/article/view/12/6>
- [34] D. Snoonian, “Smart Buildings”, *IEEE Spectrum*, vol 40, No. 8, pp. 18–23, 2003.
- [35] Nordic semi-conductors, “*NRF905 multiband transceiver*”, available at <http://www.nordicsemi.com>.
- [36] “*TRC103 - 868-960 MHz Transceiver*”, available at <http://www.rfm.com/>
- [37] “*TDA5250 - ASK/FSK 868MHz Wireless Transceiver*”, available at www.infineon.com
- [38] 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.

- [39] 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.
- [40] N. Abramson, "The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications", in *Proceedings Fall Joint Computer Conference*, vol. 37, pp. 281-285, AFIPS Press, 1970.
- [41] L. G. Roberts, "Aloha packet system with and without slots and capture", *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 5, no. 2, pp. 28–42, 1975.
- [42] Abdelmalik Bachir et al., "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 12, no. 2, pp. 222-248, 2010.
- [43] J. Hill and D. Culler, "Mica: a wireless platform for deeply embedded systems", *IEEE Micro*, vol. 22, no. 6, 2002.
- [44] 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*.
- [45] J. Polastre, J. Hill and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", In *Proceedings of ACM SenSys, 2004*.
- [46] W. Ye, F. Silva and J. Heidemann, "Ultra-Low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling", in *Proceedings of ACM SenSys*, pp. 321-334, Boulder, CO, November 2006.
- [47] M. Buettner et al, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol For Duty-Cycled Wireless Networks", in *Proceedings of ACM SenSys*, pp. 307-328, Boulder, CO, November 2006.
- [48] S. Dulman O. Incel and P. Jansen, "Multi-channel Support for Dense Wireless Sensor Networking", in *Proceedings of EuroSSC*, vol. 4272, pp. 1-14, 2006.
- [49] I. Rhee et al, "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", in *Proceedings of ACM SenSys*, pp. 511-524, San Diego, CA, November 2005.
- [50] 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
- [51] J. Polastre, J. Hill and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", in *Proceedings of ACM SenSys*, pp. 95-107, 2004.
- [52] H. Jiang, P. Wang, W. Zhuang, "A distributed channel access scheme with guaranteed priority and enhanced fairness", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 6, pp. 2114-2125, 2007.
- [53] „MSP430™ SoC With RF Core", available at <http://www.ti.com>

- [54] „Application Note AN047“, available at <http://www.ti.com>
- [55] Milica Jovanović, „Višekanalni MAC protokoli za bežične senzorske mreže“, magistarska teza, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, September 2011.

Biografija kandidata

Kandidat Milica Jovanović je rođena 15.04.1979. godine u Čupriji, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju.

Diplomirala je na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu, na smeru Računarska tehnika i informatika, 2003. godine. Magistrirala je 2011. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu, smer Elektronika odbranivši magistarsku tezu pod nazivom “Višekanalni MAC protokoli za bežične senzorske mreže” i time ispunila uslov za sticanje akademskog naziva magistra tehničkih nauka. Iste godine je upisala doktorske studije na Elektronskom fakultetu, studijski program Elektronika.

Od septembra 2004. do februara 2005. bila je zaposlena u Tehničkoj školi u Čupriji, na radnom mestu profesora računarstva i informatike. U periodu od marta 2005. godine do februara 2013. je angažovana na Elektronskom fakultetu kao asistent pripravnik na Katedri za elektroniku, a od februara 2013. kao asistent. U okviru nastavnog rada je bila angažovana na izvođenju računskih i laboratorijskih vežbi iz predmeta: Digitalna elektronika, Arhitekture mikrosistema, Internet i web tehnologije, Programabilna digitalna kola, Programiranje industrijskih kontrolera, Računarske mreže i interfejsi, Arhitekture digitalnih sistema, Multimedijalne komunikacije, Mikroarhitekture, Konkurentno programiranje.

U dosadašnjem radu aktivno je učestvovala u realizaciji tri projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije i jednog međunarodnog projekta. Oblasti njenog istraživanja su Embedded sistemi i Bežične senzorske mreže. Autor je 12 tehničkih rešenja. Do sada je publikovala 22 naučna rada, od čega 1 poglavlje u knjizi, 4 rada u međunarodnim časopisima, 4 rada u domaćim časopisima, 11 u zbornicima sa međunarodnih konferencija i 2 rada u zbornicima sa domaćih konferencija.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

**Разрешавање комуникационих конфликта у бежичним сензорским мрежама
применом РФ тонова**

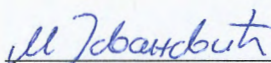
која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 20.10.2016.

Потпис аутора дисертације:


(Милица Д. Јовановић)

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

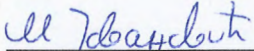
Наслов дисертације:

**Разрешавање комуникационих конфликта у бежичним сензорским мрежама
применом РФ тонова**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 20.10.2016.

Потпис аутора дисертације:



(Милица Д. Јовановић)

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

Разрешавање комуникационих конфликта у бежичним сензорским мрежама применом РФ тонова

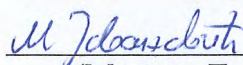
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 20.10.2016.

Потпис аутора дисертације:


(Милица Д. Јовановић)