PREDGOVOR

Ovaj udžbenik pokriva materiju koja se predaje na predmetu "Bežične senzorske mreže" koji se drži u okviru izbornog područja Informaciono komunikacione tehnologije, na master akademskim studijama Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, i to trenutno u letnjem semestru (sa fondom časova 3+1+1). Iako je udžbenik prvenstveno namenjen nastavi iz predmeta "Bežične senzorske mreže", materija koja se izlaže u okviru ovog predmeta jednim delom je povezana sa onom koja se izlaže u okviru druga dva predmeta koji se drže u okviru izbornog područja Informaciono komunikacione tehnologije, na master akademskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, i to predmetima "M2M komunikacioni sistemi" i "Arhitektura IoT mreža". U izlaganju ove propulzivne materije učinjen je pokušaj da se da pregled odgovarajuće literature do kraja prethodne 2021. godine.

U ovome udžbeniku su detaljnije analizirani pojedini postojeći problemi iz oblasti bežičnih senzorskih mreža, kao i odgovarajući elementi za moguća rešenja. Kako je na više mesta u udžbeniku, uz opsežnu literaturu, ukazano na tekuće probleme i moguće pravce daljeg istraživanja, izložena materija bi mogla da bude i neka vrsta uvoda za eventualne buduće doktorske studije. Pri tome, uzimajući u obzir da je udžbenik prvenstveno namenjen studentima master akademskih studija, u njemu su definisani ali nisu detaljno objašnjavanji neki osnovni pojmovi iz oblasti bazičnih telekomunikacija, telekomunikacionih mreža, radio komunikacija i slično, a sa kojima su studenti već upoznati na prethodnim nivoima studija.

Nakon uvoda, u glavi 2 su veoma detaljno izloženi osnovni pojmovi vezani za tehnologiju bežičnih senzorskih mreža, sa namerom da se čitaoc upozna sa osnovnim postavkama, konceptom ove tehnologije, ali i izazovima njene primene. U skladu sa time, u ovoj glavi su izloženi osnovni principi rada, organizacije, arhitekture i karakteristika bežičnih senzorskih mreža, a u sklopu čega je dat i sažeti pregled primena ove tehnologije. Pri tome, posebno je naglašena priroda tehnologije koja ne predstavlja klasičnu telekomunikacionu mrežu već predstavlja osnovu za razvoj različitih primena, uz sve probleme, izazove i zahteve koji postoje za različite primene ovih mreža. Definisani su osnovni elementi sistema, uz poseban naglasak na ograničenja osnovnih gradivnih jedinica ovih mreža, senzorskih čvorova. Istaknut je zahtev energetske efikasnosti rada i komunikacije senzorskih čvorova, kao glavni ograničavajući faktor razvoja uređaja, protokola i sistema kao celine. Dodatno, jasno su naglašene razlike ovog tipa mreža u odnosu na druge tipove bežičnih komunikacionih mreža, i analizirani su svi faktori koji imaju uticaj na dizajn, impementaciju i rad ovih mreža. Konačno, razmatran je problem razvoja komunikacione arhitekture, algoritama i protokola namenjenih za primenu u BSM, a na osnovu prikazanih zahteva i ograničenja koji proističu iz prirode primene i okruženja u kome sistem treba da radi, uz prikaz osnovne mrežne komunikacione arhitekture, kao uvod u naredni deo knjige. Sledeća glava 3, predstavlja nastavka prethodne, samo je umesto opštih pojmova, uslova rada i uticaja različitih elemenata koji postoje pri primeni tehnologije bežičnih senzorskih mreža, ovde pažnja posvećena mrežnoj komunikacionoj arhitekturi (protokolskom steku). Osnovni cilj izlaganja u ovoj glavi je taj da se čitaoc uvede u problematiku razvoja komunikacionih protokola,

algoritama i uređaja koji mogu da podrže sve složene uslove rade i primene tehnologije, kao i ograničenja senzorskih čvorova po pitanju rezerve energije, procesorske snage i kapaciteta memorije. Naglašene su razlike vezane za sam protokolski stek i zahteve koji moraju da ispune odgovarajući mrežni slojevi ove arhitekture, sa posebnim naglaskom na mogućnosti i značaj primene združene optimizacije ovih mrežnih slojeva (eng. *cross-layer optimization*) u cilju postizanja energetske efikasnosti, upravljanja ciljevima rada mreže, mobilnošću, lokalizacijom, i sinhronizacijom. U narednim glavama 4 do 8, obrađena problematika vezana za pojedinačne slojeve mrežne arhitekture.

U četvrtoj glavi je detaljno razmatran dizaj fizičkog sloja za primenu u bežičnim senzorskim mrežama, uz sažet pregled osnovnih funkcionalnosti i zahteva. Dat je kratak osvrt na specifične uslova ostvarivanja bežične komunikacije u slučaju bežičnih senzorskih mreža, načina modelovanja kanala i potrošnje energije u senzorskim čvorovima mreže. Konačno, razmotren je izbor radio-frekvencijskog opsega, postupaka modulacije, tehnika višestrukog pristupa, kao i drugih faktora dizajna ovog elementa komunikacione arhitekture. U petoj glavi je obrađen sloj veze, pri čemu je najpre analizirana kontrola grešaka, tj. kanalsko kodovanje. Ova kontrola treba da osigura prenos podataka bez grešaka, u sekvenci, bez dupliciranja i prijem bez gubitaka (ispuštenih bita ili paketa). Najpre se analiziraju modeli kanala koji se mogu pojaviti. Zatim se izlažu odgovarajući pristupu kontroli grešaka – kontrola grešaka unapred (FEC), kontrola grešaka unazad (ARQ) i hibridni postupak (HARQ). Nakon toga prikazana je izuzetno detaljna analiza problematike dizajna i razvoja protokola na sloju za kontrolu pristupa medijumu za prenos (MAC sloj), koji zapravo treba da obezbede uspostavljanje bežičnih linkova i pristup uređaja bežičnom kanalu u izuzetno složenim uslovima koji karakteriše rad bežičnih senzorskih mreža. Objašnjeni su osnovni pojmovi i izazovi vezani za dizajn i implementaciju pogodnih MAC protokola, definisane su moguće ideje i pravci razvoja ovih rešenja u skladu sa jasno definisanim uslovima rada. Konačno, dat je veoma detaljan pregled do sada predloženih rešenja za MAC protokole, i to za sve do sada predložene klase, i to: MAC protokola sa rezervacijom, kao i sinhronih i asinhronih MAC protokola sa nadmetanjem, uz dodatni opis nekih hibridnih rešenja koja predstavljaju kombinaciju ova dva pravca. U šestoj glavi je na sličan način obrađen problem dizajna protokola na mrežnom sloju, sa težištem izlaganja na protokole rutiranja kao najbitnijim elementom prenosa podataka kroz bežične senzorske mreže. Uzimajući u obzir izuzetno veliki broj do sada predloženih rešenja, težište izlaganja je stavljeno na definisanje svih bitnih faktora, mogućih tehnika, predloženih ideja, kao i izazova koji se javljaju kada je u pitanju problem rutiranja u bežičnim senzorskim mrežama. Posebno je obrađen značaj i mogućnosti podrške agregacije i fuzije podataka u okviru samog procesa rutiranja. Osim toga, obrađena je međusobna zavisnost protokola rutiranja sa drugim slojevima mreže (prvenstveno slojem veze i transportnim slojem), ali je objašnjen i uticaj specifičnih zahteva za različite klase primena senzorskih mreža. Konačno, data je detaljna klasifikacija mogućih pravaca za razvoj protokola rutiranja, kojom su obuhvaćeni svi do sada predloženi pravci diazjana ovih protokola, uz prikaz tipičnih protokola koji su do sada razvijeni u skladu sa tim mogućim konceptima.

U sedmoj glavi se najpre analiziraju specifičnosti bežičnih senzorskih mreža, kao i izazovi vezani za primenu postojećih protokola na transportnom sloju mreže imajući posebno u vidu zahteve za senzorske čvorove koji imaju, po prirodi stvari, malu raspoloživu energiju, ograničenu memoriju i malu računarsku snagu. Na ovome sloju je bitno ostvariti pouzdan prenos podataka, kontrolu protoka i kontrolu zagušenja. Najpre se detaljno analiziraju posebni transportni protokoli (PSQF, CODA, ESRT itd) razvijeni da bi se rešili nabrojani problemi, a zatim se ukratko izlažu i neke modifikacije drugih, opštih, protokola na transportnom sloju (TCP/IP itd). U osmoj glavi se analizira osnovna uloga aplikacionog sloja u bežičnim senzorskim mrežama. On treba da apstrahuje fizičku topologiju ovih mreža za

odgovarajuće aplikacije. Imajući u vidu ograničene resurse i specifičnu prirodu aplikacija prirodno je da se koriste tzv. rešenja "*cross-layer*" koja se integrišu u protokol stek baziran na nivoima. Generalno, protokoli na ovome sloju mogu se svrstati u tri kategorije: kodovanje izvora, obrada i procesiranje upita i upravljanje mrežom. U tekstu su dalje prikazani i analizirani odgovarajući protokoli (DSC, SQTL, SNMS itd).

U glavama devet do jedanaest je dat pregled pokušaja standardizacije uz pregled postojećih standarda u ovoj oblasti. U devetoj glavi je najpre prikazana standardizacija za celokupnu oblast bežičnih personalnih komunikacionih mreža (WPAN), koja je standardizovana u okviru IEEE 802.15 familije standarda, pri čemu su definisane sve grupe WPAN sistema i dat osnovni opis stepena standardizacije u ovoj oblasti. Nakon toga je detaljno opisan razvoj standarda IEEE 802.15.4 koji definiše specifikacije za komunikacionu mrežnu tehnologiju koja najviše odgovara zahtevima bežičnih senzorskih mreža. Detaljno su obrađene postavke standarda na fizičkom sloju (RF opseg i kanali, postupci modulacije, kodiranje i drugi elementi), u domenu MAC protokola i topologije mreže, odnosno problemi sigurnosti. Dat je izuzetno detaljan hronološki opis razvoja standarda sa naglaskom na elemente specifikacije koje su unapređivane za podršku sve većeg broja primena kako se tehnologija razvijala. Glava deset je posvećena detaljnoj analizu *Bluetooth* standarda koji je razvio svoju novu verziju BLE (*Bluetooth Low Energy*) da bi omogućio da senzori sa baterijskim napajanjem rade mesecima, pa čak i godinama. Takođe je zamisao da oni budu reda veličine metalnih novčića. U jedanaestoj glavi se obrađuju standardi bazirani na IEEE 802.15.4 standardu, koji se primenjuju u bežičnim senzorskim mrežama. Tu je najpre detaljno analiziran ZigBee gde se definiše skup protokola za prenos malih paketa podataka putem bežične mreže kratkog dometa. Pored male potrošnje energije i malih dimenzija ovde se dodatno omogućava interoperabilnost sa drugim bežičnim i žičnim tehnologijama. Zatim se ukratko prikazuje *Wireless*HART namenjem nizu aplikacija, kao što su praćenje odvijanja procesa i rada opreme, upravljanje procesima, napredna dijagnostika i druge primene. Standard 6LoWPAN, koji se takođe ovde koristi, već je detaljno prikazan u knjzi "Uvod u M2M komunikacije". U okviru njega su obuhvaćeni uređaji ograničenih resursa, često napajani baterijama, vezani na Internet preko bežične mreže putem uređaja male snage.

Budući da je niz pojmova iz ove savremene oblasti na engleskom, a da za njih ne postoji dobar adekvatan prevod, nije učinjen pokušaj da se neki od njh prevedu, već su pisani u izvornom obliku – kurzivom. Niz naziva (*Bluetooth*, *ZigBee* itd.) nisu transkribovani na srpski. Takođe su i na više slika zadržani natpisi na engleskom.

Na kraju knjige je dat spisak skraćenica. U samoj knjizi skraćenice su date u punom značenju prilikom prvog pojavljivanja u tekstu. Imajući u vidu da se izvesni pojmovi ponavljaju u više različitih glava, da bi se čitaocima olakšalo praćenje materije u svakoj glavi gde se pojam pojavljuje prvi put, dato je njegovo puno značenje, osim u slučaju nekih opšte poznatih i prihvaćenih pojmova koji su definisani samo pri prvom pojavljivanju.

Koautor udžbenika Goran B. Marković je napisao glave 2, 3, 4, 5 (osim poglavlja 5.1), 6 i 9, dok je koautor udžbenika Dejan D. Drajic napisao glave 1, 7, 8, 10, 11 i poglavlje 5.1,

Novembar 2022, Beograd

Goran B. Marković

Dejan D. Drajić

SADRŽAJ

1 Uvod ... 1-1

Literatura ... 1-2

2 Osnovna arhitektura, karakteristike i primene ... 2-1

2.1 Principi rada i arhitektura bežičnih senzorskih mreža ... 2-1
2.1.1 Osnovne karakteristike i arhitektura SN uređaja ... 2-7
2.1.2 Senzori i aktuatori ... 2-13
2.1.2.1 Pregled i klasifikacija senzora ... 2-15
2.1.2.2 Pregled i klasifikacija aktuatora ... 2-19
2.1.3 Osnovne karakteristike Sink/BS uređaja ... 2-20
2.1.4 Osnovna komunikaciona arhitektura BSM ... 2-20
2.1.4.1 Hijerarhijska (klasterizovana) komunikaciona arhitektura BSM ... 2-21
2.1.4.2 Poređenje flat i hijerarhijske *multi-hop* komunikacione arhitekture BSM ... 2-24
2.1.4.3 Neke dodatne modifikacije osnovne komunikacione arhitekture BSM ... 2-25
2.1.5 Koncepti komunikacije u BSM/BSAM ... 2-26
2.1.5.1 Osnovni koncepti komunikacije ... 2-26
2.1.5.2 Podržane topologije mreže ... 2-28
2.1.5.3 Odnos između BSM i drugih tipova *ad hoc* bežičnih komunikacionih mreža ... 2-30
2.1.6 Karakteristike rada BSM bitne za razvoj komunikacione arhitekture ... 2-33
2.1.6.1 Energetska efikasnost i vreme života mreže ... 2-33
2.1.6.2 Tolerancija na otkaze i pouzdanost prenosa ... 2-33
2.1.6.3 Radno okruženje i medijum prenosa ... 2-34
2.1.6.4 Primena *multi-hop* komunikacije ... 2-34
2.1.6.5 Skalabilnost ... 2-36
2.1.6.6 Ekonomičnost rešenja ... 2-36
2.1.6.7 Hardverska i softverska ograničenja ... 2-36
2.1.6.8 Mrežna topologija i samoorganizovanje mreže ... 2-38
2.1.6.9 Konektivnost mreže i ostvareno pokrivanje senzorskom funkcijom ... 2-38
2.1.6.10 Lokalnost ... 2-39
2.1.6.11 *Trade-off* mehanizmi ... 2-39
2.1.6.12 Mobilnost u bežičnim senzorskim mrežama ... 2-40
2.1.6.13 Agregacija podataka i fuzija podataka ... 2-43
2.1.6.14 Kvalitet servisa ... 2-47
2.1.6.15 Vremenska sinhronizacija ... 2-47
2.1.6.16 Samo-lokalizacija SN i lokalizacija događaja u BSM ... 2-48
2.1.6.17 Sigurnost ... 2-50
2.1.6.18 Primena *middleware* pristupa u razviju aplikacija za BSM ... 2-51
2.2 Pregled primena tehnologije bežičnih senzorskih mreža ... 2-51
2.2.1 Uticaj načina angažovanje (raspored) i održavanja SN ... 2-54
2.2.2 Uticaj tipa i kvaliteta servisa ... 2-54
2.2.3 Dužina života mreže, tolerancija na otkaze i pokrivanje ... 2-55
2.2.4 Gustina prostornog rasporeda SN i skalabilnost ... 2-56
2.2.5 Programabilnost i samo-održavanje SN ... 2-56
2.2.6 Dimenzije, kvalitet i cena SN uređaja ... 2-56

2.3 Opšti pregled slojevite mrežne arhitekture BSM ... 2-56
2.4 Standardizacija u oblasti BSM/BSAM ... 2-57
Literatura ... 2-58

3 Pregled slojevite mrežne komunikacione arhitekture ... 3-1

3.1 Sažeti pregled zahteva za komunikacione protokole po slojevima ... 3-6
3.1.1 Fizički sloj ... 3-6
3.1.2 Sloj veze ... 3-8
3.1.2.1 Kontrola grešaka pri prenosu podataka ... 3-8
3.1.2.2 MAC protokoli ... 3-9
3.1.3 Mrežni sloj ... 3-11
3.1.3.1 Osnovni zahtevi i uslovi za protokole rutiranja u BSM ... 3-12
3.1.3.2 Klasifikacija i dalji razvoj protokola rutiranja ... 3-13
3.1.4 Transportni sloj ... 3-14
3.1.4.1 Osnovni zahtevi i uslovi za protokole transportnog sloja u BSM ... 3-14
3.1.4.2 Neke moguće varijante implementacije ... 3-15
3.1.5 Aplikacioni sloj ... 3-16
3.2 *Cross-Layer* optimizacija ... 3-18
3.3 Dalji razvoj i optimizacija protokola za BSM ... 3-20
Literatura ... 3-22

4 Fizički sloj (PHY sloj) ... 4-1

4.1 Izbor RF opsega za potrebe bežične komunikacije ... 4-4
4.2 Karakteristike, uticaj i modelovanje bežičnog kanala ... 4-6
4.3 Potrošnja energije SN platforme ... 4-9
4.3.1 Potrošnja energije za obavljanje senzorske funkcije i rad MCU ... 4-10
4.3.2 Ušteda energije putem prelaza iz aktivnog u *sleep* modove rada ... 4-11
4.3.3 Potrošnja energije za potrebe komunikacije ... 4-13
4.4 Izbor postupka modulacije ... 4-15
4.5 Faktori dizajna fizičkog sloja i radio interfejsa ... 4-17
Literatura ... 4-17

5 Sloj veze ... 5-1

5.1 Kontrola grešaka ... 5-1
5.1.1 Modeli bežičnih kanala ... 5-1
5.1.2 Pristupi kontroli grešaka ... 5-4
5.1.2.1 ARQ postupci ... 5-4
5.1.2.2 FEC postupci ... 5-5
5.1.3 HARQ postupak ... 5-8
5.2 Pregled mehanizama, zahteva i protokola na MAC podsloju ... 5-8
5.2.1 Osnovni zahtevi i izazovi za MAC protokole u BSM ... 5-11
5.2.1.1 Energetska efikasnost ... 5-11
5.2.1.2 Podrška rada sa malim faktorom aktivnosti ... 5-13
5.2.1.3 Adaptabilnost ... 5-13
5.2.1.4 Skalabilnost ... 5-15
5.2.1.5 Pouzdanost ... 5-16
5.2.1.6 Mala složenost i protokolski overhed ... 5-16
5.2.1.7 Kašnjenje pri prenosu i predvidljivost kašnjenja ... 5-16
5.2.1.8 Topologija i gustina prostornog rasporeda SN ... 5-17
5.2.1.9 *Fairness* ... 5-17
5.2.1.10 Vremenska sinhronizacija ... 5-18
5.2.1.11 Hardverske opcije i njihov uticaj na MAC protokole ... 5-19
5.2.2 Moguće opcije za dizajn MAC protokola za BSM ... 5-20
5.2.2.1 Protokoli sa rezervacijom ... 5-21

5.2.2.2 Protokoli sa nadmetanjem ... 5-23
5.2.2.3 Primena u bežičnim senzorskim mrežama ... 5-24
5.2.2.4 Mogućnost primene kanonskih MAC protokola razvijenih za druge BKM ... 5-25
5.2.2.5 Klasifikacija MAC protokola za BSM ... 5-29
5.3 Sinhroni MAC protokoli sa nadmetanjem ... 5-29
5.3.1 S-MAC protokol - adaptivno osluškivanje kanala ... 5-31
5.3.2 T-MAC protokol – fleksibilnost i zahtevi za slanje u budućnosti ... 5-32
5.3.3 DS-MAC i FPA-MAC - minimizacija kašnjenja kroz promenu trajanja neaktivnog stanja ... 5-34
5.3.4 D-MAC i Q-MAC – prikupljanje podataka sa podešenim rasporedom ... 5-34
5.3.5 R-MAC i DW-MAC – pomeranje prenosa podataka u SLEEP period ... 5-35
5.3.6 AS2-MAC – pametan prelazak u aktivno stanje ... 5-36
5.3.7 Ostali protokoli ... 5-36
5.4 Asinhroni MAC protokoli sa nadmetanjem ... 5-37
5.4.1 B-MAC i EA-ALPL protokoli – unapređenje osluškivanja kanala (LPL) ... 5-39
5.4.2 STEM-T i STEM-B - razdvajanje prenosa podataka i preambule, primena bikon paketa umesto kontinualne preambule ... 5-40
5.4.3 X-MAC, DPS-MAC i C-MAC protokoli – paketizacija preambule ... 5-41
5.4.3.1 DPS-MAC protokol ... 5-42
5.4.3.2 C-MAC protokol ... 5-42
5.4.4 WiseMAC protokol - skraćivanje trajanja preambule na osnovu informacija o rasporedu ... 5-43
5.4.5 RI-MAC, RC-MAC i PW-MAC protokoli – prenos koji se inicira od strane prijemnika ... 5-43
5.4.6 Protokoli sa primenom dodatnog WuR uređaja ... 5-45
5.4.7 Ostali protokoli ... 5-46
5.5 MAC protokoli sa rezervacijom ... 5-47
5.5.1 SMACS i E-MAC protokoli - distribuirano kreiranje rasporeda ... 5-49
5.5.2 TRAMA protokol – povećanje iskorišćenja kroz adaptivnu alokaciju ... 5-49
5.5.3 TreeMAC – maksimizacija protoka ka Sink/BS ... 5-51
5.5.4 L-MAC i ML-MAC protokoli – distribuirana alokacija koju inicira Sink ... 5-51
5.5.5 P-MAC protokol – smanjivanje faktora aktivnosti promenom predajnih slotova u prijemne slotove ... 5-52
5.5.6 TAS-MAC – adaptivnost na saobraćajno opterećenje ... 5-53
5.5.7 Protokoli za hijerarhijske (klasterizovane) mreže ... 5-53
5.5.7.1 LEACH protokol (E-TDMA) ... 5-54
5.5.7.2 DEE-MAC protokol ... 5-55
5.5.7.3 BEST-MAC protokol ... 5-56
5.5.8 MH-LMAC i Y-MAC protokoli – višekanalni protokoli ... 5-57
5.5.8.1 Y-MAC protokol – TDMA/FDMA sa dodelom slotova za slanje ... 5-57
5.5.8.2 ML-LMAC protokol – TDMA/FDMA sa dodelom slotova za slanje ... 5-58
5.6 Hibridni MAC protokoli ... 5-59
5.6.1 Z-MAC protokol – kombinacija TDMA i CSMA ... 5-59
5.6.2 MH-MAC protokol ... 5-61
5.6.3 SPC-MAC – adaptivno ispitivanje kanala ... 5-62
Literatura ... 5-63

6 Mrežni sloj ... 6-1

6.1 Sažeti pregled osnovnih uslova rutiranja u BSM ... 6-6
6.2 Bitni pojmovi i izbori vezani za dizajn i izbor protokola rutiranja ... 6-9
6.2.1 Mogući ciljevi optimizacije u procesu rutiranja ... 6-9
6.2.2 Šeme saobraćaja u BSM sa stanovišta mrežnog sloja ... 6-10
6.2.3 Pojam i odnos *single-path* i *multi-path* rutiranja ... 6-12
6.2.4 Neke opšte i posebne metrike koje se koriste pri rutiranju u BSM ... 6-13

6.2.4.1 Dodatni aspekti energetski efikasnih protokola rutiranja 6-14
6.3 Osnovna klasifikacija protokola rutiranja 6-15
6.3.1 Grupa protokola rutiranja zasnovanih na komunikacionom modelu 6-16
6.3.2 Grupa protokola rutiranja zasnovanih na strukturi mreže 6-16
6.3.3 Grupa protokola rutiranja zasnovanih na topologiji mreže 6-17
6.3.4 Grupa protokola rutiranja optimizovanih u cilju ostvarivanja pouzdanosti prenosa 6-18
6.3.5 *Data*-centrična priroda rada pojedinih grupa protokola rutiranja 6-18
6.4 Pregled protokola rutiranja uz opis tipičnih predstavnika grupa 6-19
6.4.1 Protokoli rutiranja zasnovani na *flat* komunikacionoj arhitekturi 6-19
6.4.1.1 Proaktivni protokoli – WRP protokol 6-19
6.4.1.2 Reaktivni protokoli – *Flooding, Gossiping*, *Rumour Routing*, TORA i E-TORA. 6-20
6.4.1.3 Hibridni protokoli – ZRP protokol 6-23
6.4.2 Protokoli rutiranja zasnovani na pregovaranju – SPIN protokol 6-24
6.4.3 Protokoli rutiranja zasnovani na slanju i obradi upita – DD, GBR, IDSR, CADR i COUGAR protokoli 6-26
6.4.3.1 *Directed Diffusion* protokol 6-26
6.4.3.2 GBR protokol 6-29
6.4.3.3 IDSR i CADR protokoli 6-29
6.4.3.4 COUGAR protokol 6-30
6.4.4 Protokoli rutiranja zasnovani na koherentnoj i nekoherentnoj obradi podataka 6-30
6.4.4.1 Koherentna obrada - SEW algoritam 6-30
6.4.4.2 Nekoherentna obrada - MWE algoritam 6-31
6.4.5 Opšte osobine protokola rutiranja na bazi *data*-centričnog rutiranja 6-31
6.4.6 Protokoli rutiranja zasnovani na hijerarhijskoj komunikacionoj arhitekturi mreže. 6-32
6.4.6.1 Protokoli sa klasterima koje čine međusobno bliski SN – LEACH, HEED, ELCH i ECHERP protokoli 6-35
6.4.6.2 Protokoli sa klasterima u formi lanaca SN - PEGASIS protokol 6-39
6.4.6.3 Protokoli sa klasterima definisani po zonama – DREEM-ME i REECH-ME 6-41
6.4.6.4 Protokoli zasnovani na korišćenju energetske heterogenosti – SEP, E-SEP i Z-SEP protokoli 6-41
6.4.6.5 Prilagođenje protokola potrebama primene - TEEN i APTEEN protokoli 6-43
6.4.6.6 Opšte osobine hijerarhijskih protokola rutiranja 6-44
6.4.7 Protokoli rutiranja zasnovani na poznavanju lokacije čvorova 6-45
6.4.7.1 Protokoli rutiranja za *unicast* prenos 6-45
6.4.7.2 *Multicast* prenos – SPMB, GMR i RBMulticast protokoli 6-51
6.4.7.3 *Geocast* prenos 6-52
6.4.7.4 Opšte osobine protokola zasnovanih na poznavanju lokacije SN 6-53
6.4.8 Protokoli rutiranja zasnovani na korišćenju mobilnih agenata 6-54
6.4.9 Protokoli rutiranja zasnovani na mobilnosti Sink/BS 6-54
6.4.10 Protokoli rutiranja zasnovani na podršci kvaliteta servisa 6-55
6.4.10.1 SAR protokol 6-55
6.4.10.2 SPEED protokol 6-56
6.4.10.3 MMSPEED protokol 6-57
6.4.10.4 Opšte osobine protokola zasnovanih na podršci kvaliteta servisa 6-59
6.4.11 Protokoli rutiranja zasnovani na rutiranju po više putanja 6-59
6.5 Zaključna razmatranja 6-59
Literatura 6-60

7 Transportni sloj 7-1

7.1 Specifičnosti BSM i izazovi vezani za protokole transportnog sloja 7-1
7.2 Transportni protokoli 7-3

7.2.1 Pouzdan prenos podataka ... 7-4
7.2.1.1 Prenos jednog paketa, prenos bloka, prenos celoga niza ... 7-4
7.2.1.2 Prenos od Sink/BS ka senzorskom čvoru, prenos od senzorskog čvora ka Sink/BS i lokalni prenos između senzorskih čvorova ... 7-4
7.2.1.3 Garantovana isporuka paketa u odnosu na stohastičku isporuku ... 7-5
7.2.2 Isporuka jednog paketa ... 7-5
7.2.2.1 Isporuka paketa korišćenjem jedne putanje ... 7-5
7.2.2.2 Isporuka korišćenjem više putanja ... 7-7
7.2.3 Isporuka bloka paketa ... 7-9
7.2.3.1 PSFQ protokol ... 7-9
7.2.3.2 Protokol GARUDA ... 7-12
7.2.3.3 RMST protokol ... 7-14
7.2.4 Kontrola zagušenja i brzine rada ... 7-15
7.2.4.1 ESRT protokol ... 7-16
7.2.4.2 CODA protokol ... 7-17
7.2.4.3 $(RT)^2$ protokol ... 7-20
7.3 Neke modifikacije TCP protokola ... 7-21
7.3.1 *Tiny* TCP/AP protokol ... 7-21
7.3.1.1 STCP protokol ... 7-21
7.3.1.2 SenTCP protokol ... 7-22
7.4 Zaključna razmatranja ... 7-22
Literatura ... 7-23

8 Aplikacioni sloj ... 8-1

8.1 Kodiranje izvora ... 8-2
8.1.1 Klasičan LZW algoritam ... 8-2
8.1.2 *Sensor LZW* algoritam ... 8-3
8.1.3 Distribuirano kodiranje izvora (DCS) ... 8-3
8.2 Procesiranje (obrada) upita ... 8-4
8.3 Agregacija podataka ... 8-7
8.3.1 COUGAR protokol ... 8-8
8.3.2 *Fjords* arhitektura ... 8-9
8.3.3 TAG protokol ... 8-9
8.3.4 *Tiny*DB protokol ... 8-9
8.4 Upravljanje mrežom ... 8-10
8.4.1 Arhitektura MANNA ... 8-13
8.4.2 Arhitektura SNMS ... 8-14
Literatura ... 8-15

9 Pregled postojećih standarda ... 9-1

9.1 Pregled IEEE 802.15 familije standarda za LAN/MAN mreže ... 9-1
9.2 IEEE 802.15.4 standard (*Low-Rate* WPAN/WN) ... 9-8
9.2.1 Standardizacija ... 9-10
9.2.2 Osnovni elementi i podržane topologije ... 9-12
9.2.3 Prve verzije standarda: IEEE 802.15.4 -2003 i IEEE 802.15.4 - 2006 ... 9-14
9.2.3.1 Specifikacija PHY sloja ... 9-14
9.2.3.2 MAC podsloj i prenos podataka ... 9-16
9.2.3.3 Sigurnost prenosa ... 9-19
9.2.3.4 Osnovni nedostaci IEEE 802.15.4 – 2006 standarda ... 9-20
9.2.4 Promene standarda zaključno sa verzijom IEEE 802.15.4 -2011 ... 9-20
9.2.5 Promene standarda zaključno sa verzijom IEEE 802.15.4 – 2015 (Amandmani IEEE 802.15.4g i IEEE 802.15.4g) ... 9-22
9.2.5.1 Dopune specifikacije PHY sloja definisane u IEEE 802.15.4e - 2012 ... 9-23

9.2.5.2 Promene i dopune specifikacije MAC sloja definisane u IEEE 802.15.4g – 2012 i IEEE 802.15.4e - 2012 ... 9-24
9.2.5.3 Unapređenje sigurnosti u IEEE 802.15.4g – 2012 i IEEE 802.15.4e - 2012 ... 9-27
9.2.5.4 Pregled drugih promena zaključno sa verzijom standarda iz 2015. godine ... 9-27
9.2.6 Sažeti pregled promena standarda nakon 2015. godine ... 9-29
Literatura ... 9-30

10 *Bluetooth* tehnologija (standard IEEE 802.15.1) ... 10-1

10.1 Uvod ... 10-1
10.2 Osnovne karakteristike *Bluetooth* tehnologije ... 10-3
10.2.1 *Bluetooth* radio i spektar ... 10-3
10.2.2 Topologije ... 10-5
10.2.3 Režimi rada i energetska efikasnost ... 10-8
10.2.4 Uspostavljanje veze (konekcije) ... 10-9
10.2.5 Prenos podataka ... 10-12
10.2.6 Prenos glasa ... 10-12
10.3 *Bluetooth* protokol stek ... 10-12
10.3.1 *Lower layer stack* i *Higher layer stack* ... 10--15
10.3.2 Profili ... 10-16
10.4 Verzije *Bluetooth* standarda ... 10-20
10.4.1 Verzija 1 ... 10-20
10.4.2 Verzija 1.1 ... 10-20
10.4.3 Verzija 1.2 ... 10-20
10.4.4 Verzija 2 ... 10-21
10.4.5 Verzija 2.0 + EDR ... 10-21
10.4.6 Verzija 2.1+EDR ... 10-21
10.4.7 Verzija 3 ... 10-22
10.4.8 Verzija 4.0 ... 10-23
10.4.9 Verzija 4.1 ... 10-24
10.4.10 Verzija 4.2 ... 10-25
10.4.11 *Bluetooth Low Energy* ... 10-25
10.4.11.1 Struktura BLE paketa ... 10-28
10.4.11.2 BLE topologija ... 10-29
10.4.11.3 *Beacon* uređaji ... 10-31
10.4.12 Verzija 5.0 ... 10-35
10.4.12.1 Interoperabilnost ... 10-37
10.4.12.2 Životni vek baterije ... 10-38
10.4.13 Verzija 5.1 ... 10-39
10.4.14 Verzija 5.2 ... 10-39
10.5 Zaključak ... 10-40
Literatura ... 10-41

11 Pregled industrijskih standarda zasnovanih na standardu IEEE 802.15.4: *ZigBee*, *WirelessHART* i 6LoWPAN ... 11-1

11.1 *ZigBee* tehnologija ... 11-1
11.1.1 *ZigBee* alijansa ... 11-2
11.1.2 Veza između *ZigBee* standarda i standarda IEEE 802.15.4 ... 11-3
11.1.3 Standard IEEE 802.15.4 i *ZigBee* fizički sloj ... 11-4
11.1.4 Standard IEEE 802.15.4 i *ZigBee* MAC sloj ... 11-5
11.1.4.1 Tipovi uređaja u standardu IEEE 802.15.4 ... 11-6
11.1.4.2 Tipovi uređaja u *ZigBee* standardu ... 11-7
11.1.4.3 Mehanizmi pristupa kanalu ... 11-8
11.1.4.4 Metode prenosa podataka ... 11-9
11.1.5 Mrežni sloj u *ZigBee* standardu ... 11-10

11.1.5.1 Formiranje *ZigBee* mreže ... 11-11
11.1.5.2 Adresiranje u *ZigBee* mreži ... 11-15
11.1.5.3 Servisi u *ZigBee* mrežama ... 11-15
11.1.6 Sigurnosni sloj (SeSP – *Security Service Provider*) ... 11-16
11.1.7 *ZigBee* aplikacioni sloj ... 11-16
11.1.8 Verzije *ZigBee* tehnologije ... 11-18
11.1.8.1 *ZigBeePRO* ... 11-19
11.1.8.2 *ZigBee* 3.0 ... 11-20
11.1.8.3 *Green Power* ... 11-20
11.1.8.4 *ZigBee* RF4CE ... 11-22
11.1.8.5 *ZigBee Smart Energy* ... 11-23
11.1.9 Sertifikacija uređaja ... 11-23
11.2 Industrijski standard *WirelessHART* ... 11-24
11.2.1 Uvod ... 11-24
11.2.2 *WirelessHART* standard ... 11-25
11.2.2.1 Fizički sloj ... 11-25
11.2.2.2 MAC podsloj ... 11-25
11.2.2.3 Mrežni sloj ... 11-26
11.2.2.4 Transportni sloj ... 11-26
11.2.2.5 Aplikacioni sloj ... 11-26
11.2.3 *WirelessHART* zaključak ... 11-28
11.3 Industrijski standard 6LoWPAN ... 11-28
11.3.1 Uvod ... 11-28
11.3.2 Uloga, razvoj i standardizacija 6LoWPAN tehnologije ... 11-29
11.3.3 6LoWPAN protokol stek ... 11-29
11.3.4 Primeri 6LoWPAN aplikacija ... 11-31
Literatura ... 11-31

SPISAK SKRAĆENICA

1 UVOD

U mnogobrojnim oblastima primene, kao što su industrijske, vojne, medicinske, naučne, ekološke i druge, zahteva se veoma intenzivno i opsežno prikupljanje podataka i informacija iz fizičkog okruženja, a za potrebe nadgledanja, nadzora i kontrole okruženja i/ili procesa. Konvencionalni senzorski sistemi koji su zasnovani na primeni složenih senzorskih uređaja, ugrađenih na pokretne ili nepokretne platforme, sa mogućnošću direktne komunikacije ka pristupnim tačkama sistema, ne obezbeđuju potrebnu fleksibilnost, skalabilnost i prostornu rezoluciju merenja ili predikcije za posmatrani fenomen. Takođe, u većini slučajeva zahtevaju relativno velike troškove postavljanja i održavanja sistema, [1-2].

Primena *Bluetooth* tehnologije predstavljala je jedan od prvih koraka ka korišćenju *ad hoc* bežičnih mreža u cilju povezivanja i umrežavanja velikog broja senzorskih uređaja i/ili senzora. Pri tome, pod pojmom *ad hoc* mreže, podrazumeva se rešenje telekomunikacione mreže koja za svoj rad ne zahteva postojanje infrastrukture informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT) ili posebnih elemenata koji kontrolišu rad mreže (npr. bazne stanice u okviru sistema javne mobilne telefonije). Dalji razvoj telekomunikacionih tehnologija, tehnologija izrade senzora veoma malih dimenzija, i integrisanih hardversko-softverskih platformi malih dimenzija, sa mogućnošću lokalne obrade i čuvanja podataka, niske potrošnje energije i veoma male cene proizvodnje, omogućila je razvoj i sve češću primenu tehnologije bežičnih senzorskih mreža (BSM, eng. *Wireless Sensor Networks* - WSN), [1-4].

Koncept rada i primene bežičnih senzorskih mreža, zasniva se na korišćenju veoma malih i jeftinih, često potrošnih multifunkcionalnih senzorskih platformi, koje su opremljene sa ugnježdenim (eng. *embedded*) senzorima i bežičnim komunikacionim interfejsom. Ove senzorske platforme imaju mogućnost samostalnog formiranja *ad hoc* bežičnih mreža u cilju ostvarivanja međusobne komunikacije, kao i dostavljanja prikupljenih podataka korisniku mreže. Priroda procesa komunikacije u BSM, zahtevi u smislu brzine prenosa podataka (tzv. protoka), pouzdanosti i procesa rutiranja paketa podataka kroz mrežu, kao i softverska i hardverska ograničenja savremenih senzorskih platformi, postavljaju specifične uslove u razvoju arhitekture ovih mreža, odnosno procesu čuvanja i obrade prikupljenih podataka, kao i za razvoj korisničkih aplikacija neophodnih za uspešnu primenu BSM.

Pri tome, veoma je bitno shvatiti da razvoj i primena tehnologije BSM predstavlja složen multidisciplinaran problem. Naime, u svim fazama planiranja, razvoja i implementacije BSM za neku određenu primenu, neophodno je ostvariti saradnju, i to kako u razvoju samih komunikacionih, hardverskih i softverskih rešenja koja se odnose na funkcionisanje komunikacione mreže, tako i u ostvarivanju senzorske funkcije, kontrole rada senzorskih platformi, razvoju aplikacija i aplikacionog softvera za krajnje korisnike mreže, odnosno koncepta i postupaka prikupljanja, organizacije, čuvanja i obrade podataka u centralnom delu sistema, tzv. "oblaku" (eng. *cloud*).

Dodatno, treba naglasiti da je dosadašnji razvoj tehnologije bežičnih senzorskih mreža bio prvenstveno uslovljen mogućim primenama tehnologije, odnosno tehničkim zahtevima koji moraju da se zadovolje u svim aspektima rada BSM. Stoga, problem ostvarivanje i podrška

komunikaciji u mreži, koji nas ovde primarno zanima, predstavlja samo jedan od elemenata BSM koncepta koji se mora rešavati na multidisciplinarni način, kako bi se ostvarila uspešna primena. Imajući u vidu, da je osnovna namena BSM prikupljanje i dostavljanje podataka i informacija o osmatranom fizičkom okruženju, u skladu sa potrebama korisnika mreže (tj. specifičnom primenom BSM), svi aspekti dizajna komunikacione arhitekture moraju biti podređeni specifičnim zahtevima posmatrane primene. Pri tome, ovi zahtevi su veoma različiti za različite primene ili grupe primena.

Generalno, bežične senzorske mreže predstavljaju novu klasa bežičnih komunikacionih mreža koje se sve više koriste u nizu različtih primena. Sposobnost prostorno raspodeljenih senzora i lak način primene putem bežičnog komunikacije učinili su da ove mreže postanu veoma važne, i to kako u različitim komercijalnim (civilnim), tako i u vojnim primenama odnosno primenama u domenu javne bezbednosti. Sama bežična senzorska mreža se sastoji od prostorno raspodeljenih autonomnih senzorskih čvorova opremljenih senzorima kojima se osmatraju fizički uslovi ili stanje u okruženju, kao što su temperatura, jačina zvuka, vlažnost, pritisak itd, a koji koopertativno šalju svoje podatke kroz mrežu ka centralnoj lokaciji. Obezbeđivanjem ovih informacija iz fizičkog sveta omogućava se uvođenje različitih sajber struktura u taj svet. Lokacije senzorskih čvorova se obično ne menjaju, ali se konfiguracija mreže ili samih čvorova može dinamički menjati u zavisnosti od posmatrane primene. U opštem slučaju, u BSM je najvažnije obezbediti potrebnu konektivnost čvorova mreže uz minimizaciju potrošnje energije (koja se troši za prikupljenja, obradu i prenos podataka), pro čemu treba imati u vidu da se senzorski čvorovi napajaju sa baterijama ograničenog kapaciteta energije. Na ovaj način, u proces dizajna i implementacije bežične senzorske mreže uvodi se niz značajnih izazova, a sam dizajn obuhvata dobro poznavanje niza oblasti iz domena elektrotehnike i računarstva. U ovoj knjizi se upravo razmatraju neka moguća rešenja ovih izazova, sa posebnim naglaskom na one koje se tiču principa, organizacije, protokola i algoritama, kao i praktične realizacije prenosa podataka i bežične komunikacije u okviru bežičnih senzorskih mreža.

Literatura:

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," in *Computer Networks*, vol. 38, no.4, March 2002, pp. 399–422.

[2] G. B. Marković, M. L. Dukić, "Bežične senzorske mreže I deo: Osnovna arhitektura, karakteristike i primene," u *Telekomunikacije*, Godina II, no. 3, jun 2009, pp.35-48.

[3] V. Raghunathan, S. Ganeriwal, M. Srivastava, "Emerging techniques for long lived wireless sensor networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 4, April 2006, pp. 108-114.

[4] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," in *Computer Networks*, 2008, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330.