

UVOD U ZIGBEE PROTOKOL ZA BEŽIČNE MREŽE UPRAVLJANJA I NADZORA

Taradi T.¹, Kukec M.¹

¹Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, Hrvatska

Sažetak: Ovaj rad uvodi nas u osnove bežične komunikacije putem ZigBee protokola, uz primjer ZigBee protokolnog stoga tvrtke Microchip. U njemu su opisani osnovni pojmovi vezani uz ZigBee protokol, slojevi protokolnog stoga, te je objašnjeno na koji se način šalju i primaju poruke. Na kraju je opisan hardver potreban za izradu Microchipovog ZigBee uređaja, čime je stvorena podloga za konkretnu primjenu ovog protokola, što je ujedno i cilj ovog rada.

Ključne riječi: Microchip PIC Mikrokontroler, bežični prijenos podataka, ZigBee

Abstract: This paper introduces us to the basics of wireless communication by using the ZigBee protocol, with the example of ZigBee protocol stack of the Microchip Company. Basic notions related to the ZigBee protocol together with the layers of protocol stack are described in the paper; the way of sending and receiving messages is explained. Towards the end of the paper, the hardware needed for the making of Microchip's ZigBee device is described, which created the background for the concrete application of this protocol, this being the aim of the work.

Key words: Microchip Pic Microcontroller, Wireless data transfer, ZigBee

1. UVOD

Namjera ovog rada je pokazati osnove samog protokola te objasniti način uspostavljanja komunikacije korištenjem implementacije ZigBee protokolnog stoga tvrtke Microchip. Protokol je nastao zbog potrebe umrežavanja velikog broja uređaja (moguće umrežavanje više od 65 000 čvorova). Između njih se prenosi malo podataka, a primjena zahtijeva veliku energetska autonomiju uređaja i malu potrošnju. Tipični primjeri primjene su bežične mreže osjetila, kontrolne mreže, prikupljanje medicinskih podataka i slično. ZigBee standard razvila je organizacija ZigBee Alliance, udruga tvrtki osnovana 2002. godine. Cilj im je zajednička izrada javnog svjetskog standarda koji bi omogućio stvaranje pouzdanih, bežično povezanih elektroničkih proizvoda male potrošnje i male cijene.

ZigBee protokol se temelji na IEEE 802.15.4 standardu, ali se često ova dva pojma poistovjećuju. Komunikaciju putem ZigBee protokola moguće je ostvariti u tri pojasa frekvencije: prvi pojas je na frekvenciji od 868 MHz te sadrži kanal 0 i podržava prijenos podataka brzinom od 20 kbps. Drugi pojas je na frekvenciji 915 MHz s kanalima 1–10 i brzinom prijenosa od 40 kbps, dok je treći kanal na 2,4 GHz s kanalima 11–26, brzinom prijenosa od 250 kbps i širinom kanala od 5 MHz. U frekvencijskom opsegu na 2,4 GHz doseg deklariranog prometa na otvorenom iznosi 100 m, dok je u zatvorenom prostoru 30 m sa snagom odašiljanja od 1 mW.

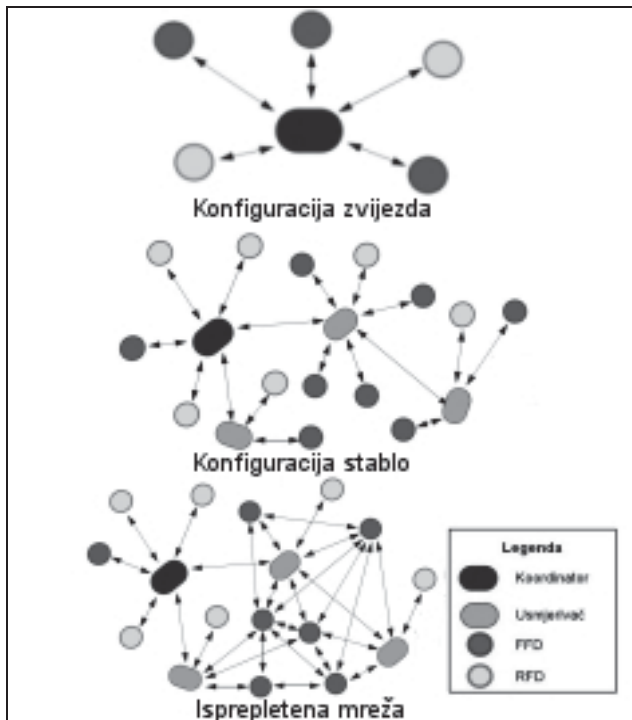
Drugi dio rada daje osnovne pojmove vezane uz komunikaciju putem ZigBee protokola. Treći dio objašnjava arhitekturu protokola po slojevima na koje je podijeljen. Opis protokolnog stoga tvrtke Microchip, kao i način komunikacije, nalaze se u četvrtom dijelu ovog rada. Hardver potreban za izradu uređaja temeljenog na implementaciji protokolnog stoga tvrtke Microchip opisan je u petom dijelu.

U radu se često puta koristi kratica ZigBee i sintagma ZigBee protokolni stog. Pri tome se uvijek misli ZigBee protokolni stog tvrtke Microchip.

2. OSNOVNI POJMOVI ZIGBEE KOMUNIKACIJE

Bežična komunikacija temeljena na ZigBee protokolnom stogu namijenjena je elektroničkim uređajima razmjerno malih dimenzija i male potrošnje energije. Kako bi se krenulo u objašnjavanje osnovnih principa rada protokola, treba prvo spomenuti podjelu uređaja koji sudjeluju u komunikaciji.

Protokolni stog ZigBee temelji se na IEEE standardu koji, po razini funkcionalnosti, definira dva razreda uređaja: uređaj s potpunom funkcionalnošću (eng. Fully Functional Device - FFD) i uređaj s ograničenom funkcionalnošću (eng. Reduced Functional Device - RFD). Uređaj tipa FFD je uglavnom spojen na neki stalni izvor napajanja, dok je RFD profil namijenjen energetska samostalnim uređajima. On ima neko vlastito autonomno napajanje te je kao takav ograničen u energetska smislu i funkcijama u mreži.



Slika 1. Topologije ZigBee protokalnog stoga

Uređaji se dijele i prema ulozi u mreži. Tako imamo: koordinator (eng. coordinator), usmjerivač (eng. router) i krajnji uređaj (eng. end device). Uređaj tipa koordinator je po svojoj funkcionalnosti uvijek uređaj tipa FFD. Njegov zadatak je izvođenje inicijalnih akcija i uspostavljanje veze između ostalih čvorova u mreži. Koordinator može služiti i kao izlaz prema nekoj drugoj vrsti mreže (LAN, GSM). Pravilo koje ZigBee mreža mora slijediti je da u svakoj mreži može postojati samo jedan koordinator.

Uređaj tipa usmjerivač je također uvijek FFD uređaj. Njegova uloga u mreži je ta da povećava domet i broj mogućih čvorova u mreži. On može imati i nadzornu i/ili upravljačku funkciju. Broj usmjerivača u mreži je proizvoljan.

Krajnji uređaj je uglavnom RFD, ali može biti i FFD uređaj. Na njemu su uglavnom smještena osjetila ili neke upravljačke jedinice.

Mrežne topologije koje se mogu postići upotrebom ZigBee protokola su zvijezda (eng. star network configuration), stablo (eng. cluster tree topology) i isprepletana mreža (eng. mesh network), a prikazane su na slici 1. Mrežna konfiguracija zvijezda sastoji se od jednog koordinatora i jednog ili više krajnjih uređaja. U zvijezdi svi krajnji uređaji komuniciraju samo s koordinatorom. Ukoliko krajnji uređaj želi poslati podatke drugom krajnjem uređaju, podaci se prvo šalju koordinatoru koji ih zatim prosljeđuje primatelju. Kod konfiguracije stabla krajnji uređaji se mogu spojiti na koordinator ili na usmjerivač. Dodavanjem usmjerivača u mrežu, krajnji uređaj ne mora biti u dometu koordinatora. Konfiguracija isprepletene mreže slična je konfiguraciji stabla. U konfiguraciji isprepletene mreže umjesto da se prati strukturu stabla FFD članovi mogu usmjeravati poruke direktno drugim FFD članovima. Poruke za RFD

članove ipak moraju ići kroz nadređeni uređaj RFD člana. Prednosti ove topologije su smanjenje kašnjenja poruka i povećanje otpornosti mreže od kvarova na čvorovima.

Uređaji u ZigBee mreži posjeduju jedinstvenu adresu širine 64 bita, a postavlja je proizvođač uređaja. Nakon što se uređaj prijavi koordinatoru, on ga upiše u tablicu u memoriji u kojoj se 64-bitnoj adresi pridružuje kratka, 16-bitna adresa. Na taj način uređaji unutar mreže mogu komunicirati pomoću 16-bitnih adresa. Koordinator omogućuje i komunikaciju uređaja iz mreža s različitim mrežnim identifikatorima, dakle komunikaciju između dvije neovisne ZigBee mreže. U tom se slučaju uređaji moraju adresirati pomoću jedinstvenih 64-bitnih adresa. Uređaj pristupa mediju prema CSMA-CA protokolu. Postoje dvije vrste mehanizma pristupa: mrežnim signalom (eng. beacon) i bez mrežnog signala (eng. non-beacon).

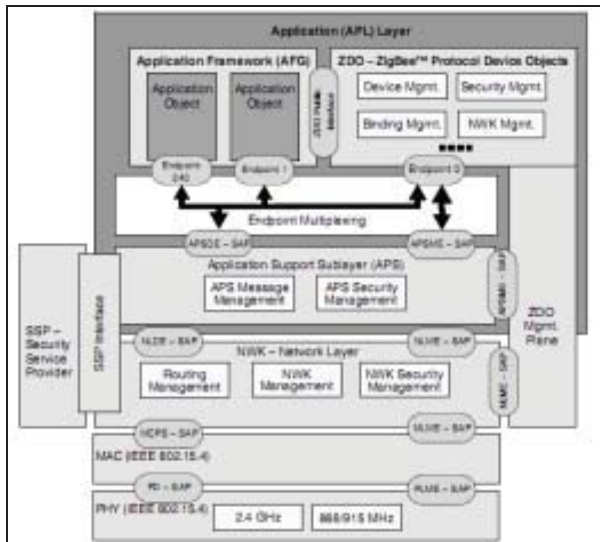
Za pristup mediju bez mrežnog signala upotrebljava se CSMA-CA bez vremenskih isječaka (eng. time slots). Nakon što se krajnji uređaji prijave koordinatoru i na taj se način uspostavi mreža, oni se "natječu" za korištenje prijenosnog medija prema protokolu CSMA-CA. Drugim riječima, koordinator čitavo vrijeme čeka hoće li krajnji uređaj od njega tražiti neku aktivnost. Zbog toga koordinator mora čitavo vrijeme biti aktivan i tako se šteti energija u krajnjim čvorovima. Ovakvo funkcioniranje mreže neprikladno je za uređaje čije aplikacije zahtijevaju brzo reagiranje, tj. zahtijevaju iznimno mala kašnjenja i veliku propusnost. Koordinator kod ovakvog tipa mreže nije napajan iz baterije, dok krajnji uređaji jesu. Problem se rješava kod načina rada s mrežnim signalom.

U mrežama s mrežnim signalom, čvorovima je omogućeno slanje poruka u prije određenim vremenskim isječcima. Koordinator periodično odašilje nadzorni okvir (eng. superframe) koji se identificira kao okvir mrežnog signala, te se svi čvorovi u mreži moraju sinkronizirati s tim okvirom. Svakom čvoru dodjeljuje se garantirani vremenski isječak (eng. Guaranteed Time Slot, GTS) unutar nadzornog okvira, tijekom kojega mu je dopušteno slanje i primanje svojih podataka. Nadzorni okvir također može sadržavati nedodijeljene isječke tijekom kojih se svi čvorovi natječu za pristup kanalu. Sama komunikacija u ZigBee mreži može se podijeliti na tri vrste prijenosa podataka: od krajnjeg uređaja prema koordinatoru, od koordinatora prema krajnjem uređaju i između dva krajnja uređaja.

Kod prijenosa podataka od krajnjeg uređaja prema koordinatoru, u mreži u kojoj se koristi mrežni signal, uređaj se CSMA-CA metodom redovito sinkronizira s koordinatorom. Potvrdu prijema koordinator šalje samo ako uređaj to traži. U mreži koja ne koristi mrežni signal, uređaj šalje podatke čim se oslobodi kanal. Potvrda prijema je također opcionalna.

Ukoliko koordinator mrežnom zrakom treba poslati podatke nekom krajnjem uređaju, on u sadržaju mrežne zrake obavještava uređaj da ima podatke za njega. Uređaj

tada koordinatoru šalje poruku sa zahtjevom za slanje podataka. Tako pokazuje da je aktivan i spreman za primanje podataka. Koordinator zatim potvrđuje primitak zahtjeva za slanjem podataka i šalje podatke uređaju. Opcionalno je slanje potvrde o primitku koju šalje uređaj. Kod slanja podataka od koordinatora prema krajnjem uređaju u mreži bez mrežne zrake, koordinador mora čekati da uređaj pošalje zahtjev za podacima. Ako uređaj zatraži podatke, a koordinador nema nikakve podatke za poslati tom uređaju, šalje mu poruku potvrde primitka u kojoj javlja da nema poruka za njega, ili šalje podatkovnu poruku bez korisnog sadržaja (eng. zero-length payload).



Slika 2. Arhitektura stoga ZigBee protokola

Kod prijenosa podataka između dva krajnja uređaja, svaki uređaj može komunicirati s bilo kojim drugim uređajem u mreži. Kako bi uređaji efikasno komunicirali, tijekom podataka bi trebao biti kontinuiran ili se mora međusobno sinkronizirati. U prvom slučaju uređaj šalje podatke koristeći CSMA-CA bez vremenskih isječaka, a u drugom slučaju potrebno je postići sinkronizaciju, a te mjere nisu dio IEEE 802.15.4 standarda.

3. ARHITEKTURA STOGA ZIGBEE PROTOKOLA

Slika 2. prikazuje arhitekturu stoga ZigBee protokola. Stog je podijeljen u slojeve koji su međusobno povezani podatkovnim i upravljačkim servisnim pristupnim točkama (eng. Service Access Point – SAP), preko kojih komuniciraju primitivima.

Komunikacija između susjednih slojeva obavlja se ZigBee primitivima, koji svojim parametrima opisuju uslugu koju je potrebno pružiti. Svaki uslužni primitiv može imati proizvoljan broj parametara koji prenose informaciju potrebnu za pružanje usluge. Primitivi su podijeljeni u četiri vrste: zahtjev, indikacija, odgovor i potvrda. Primitivi zahtjeva prenose se od N-tog korisnika (aplikacijskog objekta) do N-tog sloja kao zahtjev za uključivanjem usluge. Primitivi indikacije prenosi se od N-tog sloja do N-tog korisnika kako bi ukazala na događaj u N-tom sloju važan za N-tog korisnika. Primitivi odgovora prenose se od N-tog korisnika N-tom

sloju kako bi se završila procedura pozvana primitivom indikacije. Primitivi potvrde prenose se od N-tog sloja N-tom korisniku kako bi se prenijeli rezultati jednog ili više povezanih prethodnih uslužnih zahtjeva.

Fizički sloj (eng. physical layer, PHY) odgovoran je za aktiviranje radija koji šalje ili prima pakete. Također bira frekvenciju kanala i provjerava da komunikacijski kanal nisu trenutačno zauzeli drugi uređaji u mreži.

Sloj za pristup mediju (MAC – Medium Access Layer) zadužen je za pristup fizičkom sloju, za generiranje i sinkroniziranje na mrežnu zraku, pokretanje koordinadora i za generiranje identifikatora osobne mreže (eng. Personal Area Network Identifier, PAN Id), za određivanje i izvršavanje GTS-a, korištenje CSMA-CA mehanizma za pristup kanalu te za uspostavljanje veze između MAC slojeva na različitim čvorovima. Tako bi se ostvarila pouzdana komunikacija između dva susjedna čvora u mreži. Funkcionalnost uređaja je definirana na ovom sloju.

Mrežni sloj (eng. network layer, NWK) je zadužen za pravilno formiranje mrežne topologije, za konfiguriranje uređaja, uključivanje i isključivanje čvora s mreže, za dostavljanje poruke pravom odredištu, pravilno adresiranje, otkrivanje susjedstva i pravih putova između dva čvora, te za prosljeđivanje i primanje podataka od aplikacijskog i MAC sloja. Mrežni sloj podržava usmjeravanje poruka (eng. routing), odnosno formiranje optimalne mrežne topologije. Ove dvije funkcije su glavne značajke ZigBee protokola. Funkcija uređaja je definirana na mrežnom sloju.

Najviši sloj Zigbee protokolnog stoga sastoji se od aplikacijskog okvira (eng. Application Framework), objekta ZigBee uređaja (eng. ZigBee Device Object, ZDO) i podsloja aplikacijske podrške (eng. Application Support Sublayer, APS).

Aplikacijski okvir pruža okruženje za razvoj krajnje korisničke aplikacije te opisuje kako izraditi aplikacijski profil na ZigBee protokolnom stogu, kako bi se osiguralo da se profili mogu generirati na dosljedan način. Aplikacijski profili omogućavaju korisniku aplikacijskog koda da šalje naredbe i upite. Aplikacijski profil je skup opisa uređaja u mreži, sučelja i poruka koje se šalju među uređajima. Postoje dvije vrste profila: javni i privatni. Javni profil definira ZigBee Alliance te se koristi kako bi se osigurala interoperabilnost proizvoda koji su izrađeni po nekom javnom profilu, što znači da imaju zajednički komunikacijski mehanizam. Privatni profil definira pojedina tvrtka ili skupina tvrtki i namijenjen je za upotrebu u zatvorenom sustavu gdje interoperabilnost nije potrebna. Sastavni dio profila su atributi. To su podaci koji se šalju među uređajima kao što su npr. položaj sklopke ili očitavanje mjernog uređaja. Unutar profila, svakom atributu je dodijeljen jedinstveni 16-bitni identifikator – Attribute ID. Atributi su grupirani u skupine atributa (eng. cluster). Svakoj skupini atributa je također dodijeljen jedinstveni 16-bitni identifikator – Cluster ID.

Aplikacijski objekt je softver u krajnjoj točki (eng. endpoint) koji upravlja ZigBee uređajem. Jedan ZigBee

čvor može imati i do 240 krajnjih točaka. Svaki aplikacijski objekt spojen je na jednu krajnju točku, od 1 do 240 (krajnja točka 0 rezervirana je za objekt ZigBee uređaja (ZDO)).

ZDO definira ulogu uređaja unutar mreže (koordinator, usmjerivač ili krajnji uređaj), pokreće i/ili odgovara na zahtjeve za vezanje ili otkrivanje mreže i uspostavlja sigurnu vezu između uređaja u mreži. Također pruža bogati set upravljačkih naredbi definiranih u profilu ZigBee uređaja. ZDO je uvijek u nultoj krajnjoj točki.

ZDO upravljačka osnova (eng. ZDO Management Plane) potpomaže pri komunikaciji između APS i NWK slojeva sa ZDO. Omogućava ZDO-u da pomoću poruka iz profila ZigBee uređaja rješava zahtjeve aplikacija za pristupom mreži i zaštitom.

Podslaj aplikacijske podrške (APS) odgovoran je za pružanje podatkovnih usluga profilima aplikacija i ZigBee uređaja. Također pruža upravljačke usluge za održavanje veze i spremanje same tablice veza.

Zaštita je važan faktor u svim bežičnim mrežama pa tako i u ZigBee mrežama. U bežičnoj mreži poslana poruka mogu primiti svi uređaji u dometu, uključujući i uljeza. Dva su glavna problema sigurnosti bežičnih mreža. Prvi je povjerljivost podataka. Uređaj uljez može priskrbiti osjetljive podatke jednostavno slušajući poslana poruka. Taj problem rješava enkripcija poruka. Algoritam enkripcije mijenja poruku koristeći se nizom bitova poznatih kao zaštitni ključ, te će samo uređaj kojemu je poruka namijenjena moći obnoviti originalnu poruku. IEEE 802.15.4 standard podržava standard napredne enkripcije (eng. Advanced Encryption Standard, AES) za enkripciju odlaznih poruka. Drugi problem sigurnosti je mogućnost uređaja uljeza da promijeni i ponovo pošalje neku od prijašnjih poruka, čak i ako su poruke kriptirane. Dodavanje koda cjelovitosti poruke (eng. message integrity code, MIC) svakom izlaznom okviru omogućuje primatelju spoznaju je li poruka promijenjena u tranzitu. Ovaj proces naziva se autentifikacija podataka. Dio stoga odgovoran za zaštitu naziva se pružatelj usluge zaštite (eng. Security Service provider, SSP) te se pokreće i usklađuje preko ZDO. Sadrži sigurnosne mehanizme za slojeve koji se koriste enkripcijom (NWK i APS).

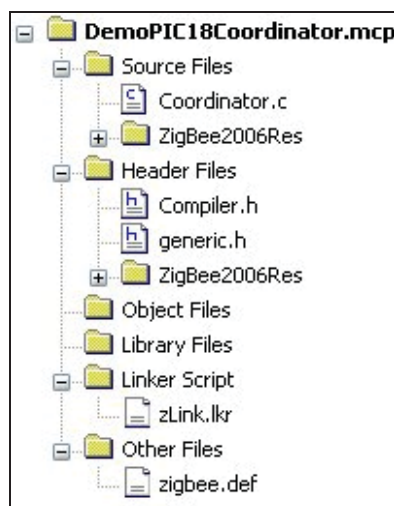
Vezivanje (eng. binding) je zadatak stvaranja logičkih veza između aplikacija koje su povezane. Na primjer, ZigBee uređaj spojen sa svjetiljkom je logički povezan s drugim ZigBee uređajem spojenim prekidačem koji upravlja svjetiljkom. Informacije o tim logičkim vezama pohranjene su u tablici veza (eng. binding table). ZigBee protokol pruža podupire stvaranje i održavanje tablice veza u aplikacijskom sloju. Uređaji logički vezani u tablici veza zovu se vezani uređaji (eng. bound devices).

4. IMPLEMENTACIJA ZIGBEE PROTOKOLA TVRTKE MICROCHIP

Tvrtka Microchip je za komunikaciju ZigBee protokolom razvila protokolni stog koji je izrađen u Microchipovoj razvojnoj okolini MPLAB IDE u programskom jeziku C. Želi li se razvijati softver za mikrokontrolere s podrškom za ZigBee protokol, na računalu treba imati instaliranu razvojnu okolinu MPLAB IDE s odgovarajućim programskim prevoditeljem (eng. compiler). U ovom

radu korišten je prevoditelj C18. Kompletan izvorni kôd ZigBee stoga tvrtke Microchip dostupan je svima i slobodno se može skinuti na internet stranici tvrtke Microchip u obliku instalacijske datoteke. Verzija stoga korištena u ovom radu je v2.0-2.6.a.

Nakon instalacijskog procesa, na mjestu koje smo odabrali prilikom instalacije nalazi se direktorij "Microchip Solutions" s poddirektorijem "ZigBee2006Res", u kojem je instaliran i program ZENA. On služi za podešavanje postavki stoga i za analiziranje ZigBee mreža, za što je potreban dodatan hardver. Izvorišne datoteke stoga ZigBee protokola nalaze se u mapi "Microchip". Datoteke koje se nalaze u ovoj mapi ne smiju se mijenjati jer bi to utjecalo na pravilan rad samog stoga. U mapama čije ime počinje s "DemoPIC" nalaze se izvorišne datoteke za pokazne ZigBee uređaje (koordinator, usmjerivač, RFD). Broj 18 ili 24 u nazivu mape označava kojoj je porodici PIC mikrokontrolera namijenjen izvorišni kod koji se nalazi u njemu.



Slika 3. Izgled projekta koordinatora

Važno je spomenuti kako se ovim radom prikazuju samo osnove komunikacijske mogućnosti između dva ZigBee uređaja, koordinatora i RFD uređaja na PIC mikrokontroleru iz serije 18. Mikrokontroler koji se koristi je mikrokontroler tvrtke Microchip s oznakom 18F4620.

U mapama "DemoPIC18Coordinator" i "DemoPIC18RFD" nalaze se datoteke specifične za koordinatori, odnosno RFD čvor, te datoteka projekta za svaki čvor napravljena u Microchipovoj MPLAB razvojnoj okolini, *DemoPIC18Coordinator.mcp* i *DemoPIC18RFD.mcp*. Otvaranjem datoteke otvara se projekt u MPLAB razvojnoj okolini kako je pokazano na slici 3. Mape u projektu nazvane "ZigBee2006Res" sadrže izvorišne datoteke i datoteke zaglavlja stoga. Pozornost će se posvetiti glavnim izvorišnim datotekama *Coordinator.c*, odnosno *RFD.c*, koje su ujedno jedina razlika u sadržaju projekata koordinatora i RFD člana. U tim datotekama se postavlja hardver i softver, a tu je i glavna petlja. Inicijalizacija hardvera podrazumijeva inicijalizaciju SPI komunikacije i SPI pinova, određivanje smjerova komunikacije na svim korištenim nožicama mikrokontrolera i provjeru korištenog

primopredajnika. Softverska inicijalizacija podrazumijeva pokretanje samog protokolnog stoga pozivom funkcije `ZigBeeInit()`.

```
while (1) {
    CLRWDT();
    ZigBeeTasks( &currentPrimitive );
    ProcessZigBeePrimitives();
    ProcessNONZigBeeTasks();
}
```

Slika 4. Glavna petlja programa koji koristi ZigBee protokolni stog tvrtke Microchip

Nakon obavljenih početnih inicijalizacija, program ulazi u glavnu, beskonačnu petlju prikazanu na slici 4. U glavnoj petlji prvo se resetira brojač WDT funkcijom `CLRWDT()`. Funkcijom `ZigBeeTasks` pokreće se rad stoga koji obrađuje prethodno odabran primitiv. Pri prvom prolasku kroz petlju nema primitiva za obradu, pa je trenutni primitiv (eng. *current primitive*) `NO_PRIMITIVE`. Nakon završetka obrade primitiva, potrebno je za sljedeći primitiv odabrati `NO_PRIMITIVE`, kako bi se izbjegla beskonačna petlja. Funkcijom `ProcessZigBeePrimitives()` određuje se sljedeći primitiv koji stog treba obraditi. Pozivom funkcije `ProcessNONZigBeeTasks()` izvršavaju se zadaci koji nisu vezani uz sam ZigBee protokol.

```
if (ZigBeeReady()) {
    ZigBeeBlockTx();
    TxBuffer[TxData++] = broj;
    params.APSDE_DATA_request.DstAddrMode
        = APS_ADDRESS_16_BIT;
    params.APSDE_DATA_request.DstAddress.ShortAddr.v[1] = 0x79;
    params.APSDE_DATA_request.DstAddress.ShortAddr.v[0] = 0x6F;
    ...
    currentPrimitive = APSDE_DATA_request;
}
```

Slika 5. Primjer slanja poruke

Proces formiranja ili spajanja na mrežu inicira se u `NO_PRIMITIVE` rukovanju primitivama. Ako je uređaj koordinator koji nije formirao mrežu, on to pokušava slanjem `NLME_NETWORK_FORMATION_request` primitiva. Ako uređaj nije koordinator i trenutno nije u mreži, on se pokušava spojiti na mrežu. U slučaju da je uređaj već prije bio u mreži, pokušat će se spojiti tako da šalje `NLME_JOIN_request` s parametrom `RejoinNetwork` postavljenim na `TRUE`. Ukoliko ne uspije, ili ako uređaj nije bio prije u mreži, pokušat će se spojiti kao novi čvor. Prvo šalje `NLME_NETWORK_DISCOVERY_request` da otkrije koje su mreže dostupne. Nakon toga aplikacijski kod odabire jednu od pronađenih mreža i pokušava se spojiti slanjem `NLME_NETWORK_JOIN_request` primitive s parametrom `RejoinNetwork` postavljenim na `FALSE`.

ZigBee protokolni stog omogućava istodobno jednu izlaznu poruku u aplikacijskom sloju. Slika 5. prikazuje kôd kojim se šalje poruka:

1. Je li aplikacijski sloj spreman za novu izlaznu poruku provjerava se utvrđivanjem da li je povratna vrijednost funkcije `ZigBeeReady()` `TRUE`.

2. Zaključavanje sustava funkcijom `ZigBeeBlockTx()`, tako da daljnji pozivi funkcije `ZigBeeReady()` vraćaju vrijednost `FALSE`.
3. Spremanje sadržaja poruke u `TxBuffer` polje, koristeći `TxData` za indeksiranje kroz polje. Kada je spremanje završeno, `TxData` mora pokazivati na prvu lokaciju poslije poruke (tj. `TxData` jednak je dužini poruke).
4. Unošenje parametara `APSDE_DATA_request` primitiva.
5. Postavljanje `APSDE_DATA_request` kao trenutnog primitiva i pozivanje funkcije `ZigBeeTasks()`.

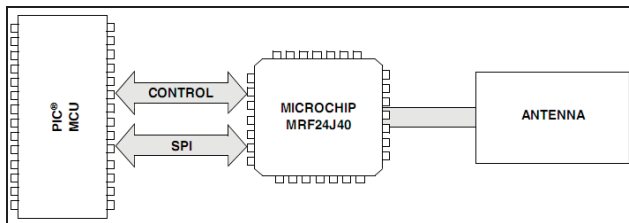
Poruke se šalju uobičajeno na jednom od dva mjesta: u obradi `APSDE_DATA_indication` kao odgovor na primljenu poruku, ili u obradi `NO_PRIMITIVE` kao odgovor na aplikacijski događaj. Status poslana poruke vraća se preko `APSDE_DATA_confirm` primitiva. Ako slanje poruke ne uspije, ono se ponavlja onoliko puta koliko je određeno parametrom `apscMaxFrameRetries`.

```
case APSDE_DATA_indication:
{
    switch(
        params.APSDE_DATA_indication.DstEndpoint){
        //...
        case 33:
            stanje = APLGet;
            break;
        //...
    }
    APLDiscardRx();
}
```

Slika 6. Primjer primanja poruke

Slika 6. prikazuje primjer primanja poruke. Stog obavještava aplikaciju o primljenoj poruci preko `APSDE_DATA_indication` primitiva. Aplikacija zatim provjerava kojoj je krajnjoj točki poruka namijenjena. U ovom primjeru provjeravamo krajnju točku 33. Ako je poruka namijenjena za krajnju točku 33, funkcijom za pribavljanje sljedećeg bajta poruke `APLGet` upisuje se poslana poruka u varijablu `stanje`. Ovdje je poslan samo jedan bajt, pa je cijela poruka primljena. Nakon obrade trenutne poruke potrebno je pozvati funkciju `APLDiscard`, kojom se odbacuje primljena poruka.

Nakon završetka izrade programskog koda, treba prilagoditi postavke stoga za namjenu koju smo odredili uređaju. Postavke stoga zapisane su u datotekama `zigbee.def`, `myZigBEE.c` i `zLink.lkr`. Prilagođavanje postavki se radi stvaranjem novih datoteka pomoću alata za podešavanje postavki stoga (eng. *Stack Configuration Tool*). Alat se nalazi u sklopu programa za analizu bežičnih mreža ZENA (eng. *ZENA Wireless Network Analyzer*), koji je instaliran zajedno sa stogom i nalazi se u poddirektoriju "ZigBee2006Res". Tim programom se također može analizirati bežična mreža zasnovana na IEEE 802.15.4 standardu. Da bi se to ostvarilo, potreban je dodatan Microchipov sklop.

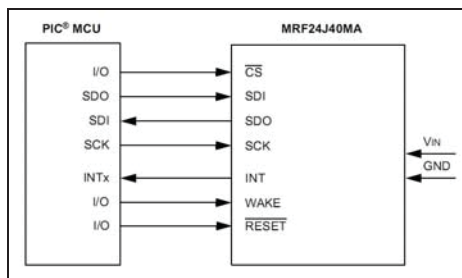


Slika 7. Povezivanje hardvera tipičnog ZigBee uređaja

5. HARDVER ZIGBEE UREĐAJA

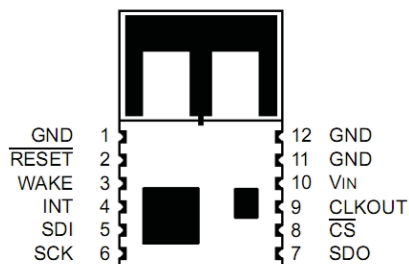
Za izradu tipičnog čvora ZigBee mreže pomoću stoga tvrtke Microchip potrebne su sljedeće komponente:

- Mikrokontroler tvrtke Microchip sa SPI sučeljem
- Microchipov primopredajnik MRF24J40 s potrebnim vanjskim komponentama
- PCB ili monopolna antena
- Vanjski serijski EEPROM (ukoliko memorija samog mikrokontrolera nije dovoljna)



Slika 8. Smjerovi komunikacije PIC-a i primopredajnika

Slika 7. prikazuje način na koji su međusobno povezane komponente. Mikrokontroler je spojen s MRF24J40 primopredajnikom putem SPI sabirnice i nekoliko diskretnih upravljačkih signala. U toj vezi mikrokontroler se ponaša kao SPI nadređeni (eng. master), a MRF24J40 kao SPI podređeni (eng. slave) uređaj. SPI veza i smjerovi prikazani su na slici 8.



Slika 9. Dijagram pinova MRF24J40MA

Osim samog MRF24J40 čipa može se koristiti i gotov modul MRF24J40MA, koji na sebi ima integrirani kristal, unutarnji regulator napona, MRF24J40 čip s pripadajućim strujnim krugom i PCB antenu. Modul radi u nelicenciranom frekvencijskom pojasu od 2.4 GHz-a. Za napajanje modula potreban je istosmjerni napon od 3.3V. Dijagram pinova modula prikazan je na slici 9.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad daje osnovne podatke o ZigBee protokolu pa su objašnjeni principi slanja i primanja poruka, kao i postupci koje je potrebno obaviti prilikom ostvarivanja ZigBee čvorova. Rad je podloga za daljnje proučavanje mogućnosti ZigBee protokola te njegove primjene u konkretnim uređajima.

Kako je primarna svrha rada uvod u prijenos podataka ZigBee mrežom, sigurnosni aspekti prijenosa podataka ZigBee nisu opisani. Isto tako, korištenje ZENA programskog alata za prilagođavanje postavki stoga nije detaljnije opisano, zbog toga jer detaljan opis prelazi okvire ovog rada. Potrebno je istaknuti kako ZENA programski alat tvrtke Microchip uz pomoć popratnog ZENA sklopa služi i za analizu mreža, što je, uz zaštitu podataka koji se prenose, vrlo važno u uspostavi kvalitetne i funkcionalne mreže.

7. LITERATURA

- [1] MICROCHIP: AN965, "Microchip Stack for the ZigBee™ Protocol", 2007.
- [2] Farahani S., "ZigBee Wireless Networks and Transceivers", Newnes, 2008.
- [3] MICROCHIP: "MRF24J40 Data Sheet", 2006.
- [4] MICROCHIP: "MRF24J40MA Data Sheet", 2008.
- [5] MICROCHIP: "ZigBee Quickstart Guide", 2008.
- [6] MICROCHIP: "ZENA™ Wireless Network Analyzer User's Guide", 2008.