



**UNIVERZITET U NIŠU**  
**ELEKTRONSKI FAKULTET**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Primopredajnik za bežične mreže senzora**

**Ivica Vasović**

**2008.**

**Tema: Primopredajnik za bežične mreže senzora**

**Zadatak: Proučiti princip rada bežične mreže senzora. Projektovati primopredajnik za opseg 2.4GHz sa 2Mbps brzinom prenosa podataka. Izraditi štampanu ploču, sklopiti i oživeti dva primopredajnika. Izraditi dve ploče sa USART i SPI interfejsom na bazi mikrokontrolera PIC18F242. Napisati program u C# jeziku za serijsku komunikaciju prilagođenu za razmenu podataka sa mikrokontrolerom. Napisati program u C jeziku za mikrokontroler koji radi inicijalizaciju i upravljanje primopredajnika. Ostvariti razmenu podataka između dva primopredajnika.**

**Komisija za odbranu:**

**Student: Ivica Vasović 10699**

1. \_\_\_\_\_  
(Predsednik)

\_\_\_\_\_  
(Datum prijave)

2. \_\_\_\_\_  
(Član)

\_\_\_\_\_  
(Datum predaje)

3. \_\_\_\_\_  
(Član)

\_\_\_\_\_  
(Datum odbrane)

## Uvod

U ovom diplomskom radu predstavljeno je moguće rešenje primo-predaje jedne bežične senzorske mreže. Glavni akcenat postavljen je na bežičnu komunikaciju dva primopredajnika nRF24L01 koji su proizvod firme *Nordic Semiconductor*. Ovaj primopredajnik koji se napaja baterijama spada u *ultra low power* sisteme.

Diplomski rad sadrži sledeća pet poglavlja:

Prvo poglavlje obrađuje osnovu o bežičnim senzorskim mrežama, njihovim arhitekturama i protokolima. Opisana je arhitektura senzorskog čvora kao i svi nivoi protokola počev od fizičkog pa sve do aplikacionog.

Drugo poglavlje opisuje nRF24L01 primopredajnika i njegove funkcije. U poglavlju su detaljno obrađene stanja, modovi rada i metode za manipulisanje primopredajnika. Opisani su komande za upis i čitanje preko SPI interfejsa. Nakon toga sledi opisivanje paketa koji se mogu poslati i periferalna RF informacija. Takođe, u okviru poglavlja priložena je i memorijska mapa registara nRF24L01 primopredajnika.

U trećem poglavlju pretstavljeni su eksperimentalni rezultati i praktična realizacija. U poglavlju je data šema nRF24L01 primopredajnika sa antenskim prilagođenjem, spoljašnjeg taktnog oscilatora i ostale pasivne komponente. Opisana je periferija nRF24L01 primopredajnika i dato je objašnjenje periferalne šeme. Izneti su i mogući problemi i njihova rešenja. Dostavljeni su i glavni programi mikrokontrolera, PCB i program za serijsku komunikaciju.

Četvrto poglavlje pretstavlja zaključak diplomskog rada i u petom, poslednjem poglavlju navedena je literatura koja je korišćena tokom izrade projekta.

# 1. Bežične senzorske mreže

## 1.1 Osnova o bežičnih senzorskih mreža

Senzorska mreža (*Sensor Network- Snet*) je distribuirani sistem (*Dsis*) koga čini polje senzora različitog tipa međusobno povezanih komunikacionom mrežom. Podaci sa izlaza senzora su deljivi, a dovode se na ulaz *Dsis*-a radi njihove procene (estimacije). Zadatak *Dsis*-a je da na osnovu dostupnih podataka sa senzora izdvoji najverovatniju informaciju o fenomenu koji se nadgleda.

Osnovne operativno-ekonomske karakteristike *Snet*-a su:

- visoka pouzdanost u radu
- relativno visoka tačnost
- fleksibilnost
- niska cena
- lako raspoređivanje senzora u prostoru

*Snet* se formira od individualnih multifunkcionalnih senzorskih čvorova (*Sensor Node- Snod*). U najvećem broju slučajeva *Snod*-ovi se bežičnim putem povezuju u komunikacionu mrežu formirajući na taj način bežičnu senzorsku mrežu (*Wireless Sensor Network- WSN*). *WSN* se sastoji od baterijsko napajanih modula koji su u suštini *Snod*-ovi.

Gradivni blokovi ovih modula su:

- senzor: generator podataka
- radio primo-predajnik: predaje svoje ili prosledjuje kroz mrežu podatke koje je primio od svojih suseda (rutira podatke)
- jedan ili više procesora: kontrolišu rad senzora i primo-predjnika, procesiraju podatke, i implementiraju mrežne i protokole za rutiranje

U najvećem broju slučajeva *Snet*-ovi se realizuju kao *data-centric*, a ne kao *address-centric* sistemi. To znači da se upiti (*queries*) upućuju regionu koga čini topološki uređena grupa (*cluster*) senzora, a ne specifičnoj adresi senzora. U okviru jednog *cluster*-a postoji jedan agregator čvor, koji sakuplja podatke od *Snod*-ova pridruženi tom *cluster*-u, analizira ih, agregatira, i nakon prozivke predaje. U suštini zbirna analiza lokalnih podataka se obavlja od strane agregatora čvora u okviru *cluster*-a. Time se u značajnoj meri redukuju zahtevi koji se odnose na komunikacionu propusnost. Agregacijom podataka povećava se nivo tačnosti, a istovremeno inkorporira redundantnost-podataka čime se kompenziraju kvarovi u čvorovima. Imajući u vidu da su senzorski moduli baterijsko napajani uređaji, i da je dostupna energija od baterije ograničena, energetska efikasnost modula ima direktni uticaj na vreme života senzora. Kada modul prestane sa radom, ne prestaje samo njegovo prikupljanje podataka, nego mreža gubi raspoloživost modula da dalje prosledjuje (rutira) podatke. Zbog prethodno pomenutog, energetska efikasnost ima direktni uticaj na to koliko dugo će ne samo individualni senzori nego i cela mreža uspešno funkcionisati. S toga je od izuzetne važnosti sagledati problem energetske efikasnosti sa tačke gledišta svih detalja koji se tiču kako projektovanja modula tako i rada cele mreže.

Analizirajući rad *Snet*-a uočavamo da se koriste brojne informaciono procesne tehnike namenjene za:

- manipulaciju i analizu senzorskih podataka
- ekstrakciju značajnih osobina ambijenta koji se nadgleda
- efikasno memorisanje i prenos važnih informacija

Protokoli i algoritmi koji su predloženi za tradicionalne bežične *ad-hoc* mreže ne ispunjavaju sve zahteve koji se postavljaju od strane *Snet*-ova. Specifičnosti karakteristika *Snet*-ova su sledeće:

- broj *Snod*-ova je mnogo veći u odnosu na broj čvorova kod *ad-hoc* mreže
- *Snod*-ovi su gusto raspoređeni
- *Snod*-ovi koriste *broadcast* komunikacionu paradigmu u odnosu na *ad-hoc* čvorove koji koriste *point-to-point* komunikacije
- *Snod*-ovi nemaju globalnu identifikaciju zbog velikog broja senzora

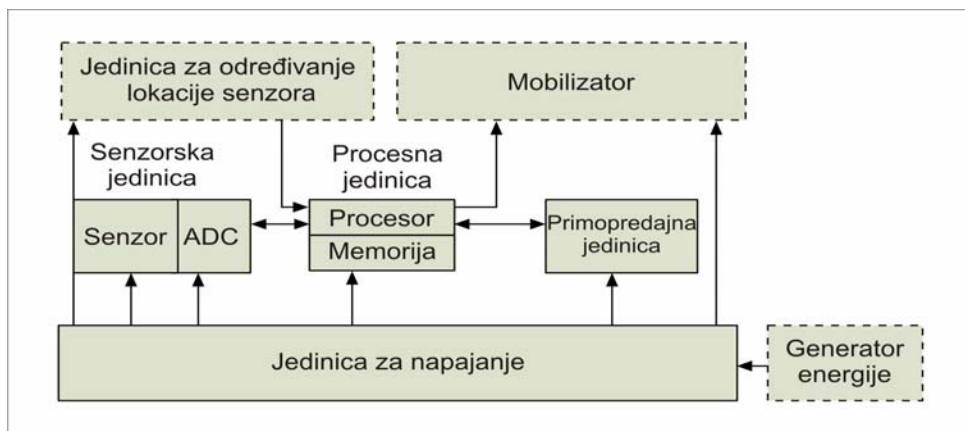
Postoje dva tipa *Snod*-ova koji se uglavnom razlikuju po tome u koji se tip *Snet*-ova ugrađuju:

1. *Proactive Networks*: čvorovi u mreži periodično uključuju senzore, izmere veličinu od okruženja, i predaju podatke koji su od interesa
2. *Reactive Networks*: su mreže kod kojih su čvorovi celo vreme budni i trenutno reaguju na nagle promene u mreži. Ovi tipovi čvorova su pogodni za aplikacije sistema koji rade u realnom vremenu.

## 1.2 Arhitektura *Snet*-a

*Snod*-ovi su razudjeno raspoređeni u senzorskom polju. Svaki *Snod* u stanju je da prikuplja podatke i usmerava ih ka odredištu. Strukturu pametnog senzorskog čvora (*smart sensor node*), vidi sliku 1, čine sledeća četiri osnovna gradivna bloka:

- senzorska jedinica (*sensing unit*)
- primopredajna jedinica (*transceiver unit*)
- procesna jedinica (*processing unit*)
- jedinica za napajanje (*power unit*)



Slika 1 Komponente senzorskog čvora

Opcione komponente *Snod*-a su:

- jedinica za određivanje lokacije senzora- kakav je recimo *GPS* prijemnik
- mobilizator- blok za pokretanje *Snod*-a, koristi se kada senzor treba da postane mobilan
- generator energije- blok koji vrši konverziju energije, recimo solarna baterija

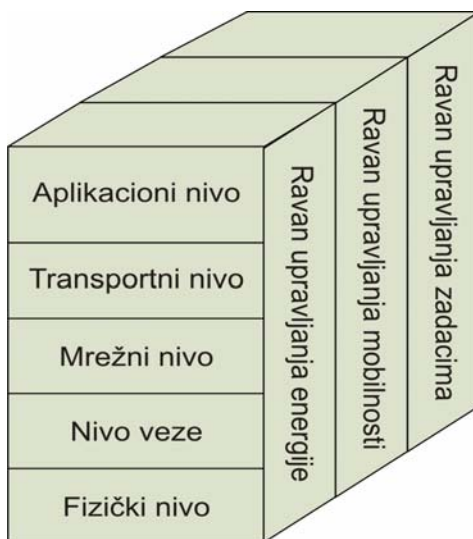
Senzor prihvata na ulazu merenu veličinu i konvertuje je u električni signal. Nakon kondicioniranja signal se dovodi na ulaz *ADC*-a, pa se po obavljenoj konverziji prihvata od strane procesora. Procesor, nad podacima, obavlja neki tip signal procesiranja, i u zavisnosti od toga kako je programiran, predaće rezultatnu informaciju prema mreži uz pomoć primopredajnika. Blok za napajanje može biti neka baterijska jedinica.

### 1.3 Nivoi protokola

Protokol *stack* (PS) koga koriste *Snod*-ovi prikazan je na slici 2. *PS* kombinuje:

- svesnost dizajna koja se odnosi na potrošnju i rutiranje (*power and routing awareness*),
- integritet podataka sa mrežnim protokolom, i
- energetska efikasnost komuniciranja preko bežičnog medijuma

Fizički nivo je zadužen za sprovođenje modulacionih tehnika, kao i predaje i prijema signala. Nivo-veze odgovoran je za redukciju kolizija kod predaje podataka. Mrežni-nivo je zadužen za rutiranje. Transportni nivo vodi računa o isporuci podataka od jednog krajnjeg korisnika do drugog. Aplikacioni nivo vodi računa o pružanju usluga.



Slika 2 Protokol *stack* *Snod*-a

Ravni upravljanja energije, mobilnosti i zadataka posmatraju potrošnju, kretanje i zadatke između senzorskih čvorova. Ove ravni pomažu senzorskom čvoru oko koordinacije senzorskog zadatka i umanjivanjem potrošnje energije.

## 1.4 Fizički nivo

Fizički nivo je zadužen za:

- izbor frekvencije (*frequency selection*)
- detekciju signala (*signal detection*)
- zaštitu podataka (*data protection*)
- propagacione efekte (*propagation effects*)
- modulacionu šemu (*modulation scheme*)
- energetske efikasnost (*power efficiency*)

Kod *Snet*-ova najčešće korišćene frekvencije za prenos signala pripadaju RF 915 MHz *ISM*-ovom opsegu. Detekcija signala se bazira na sledećem principu: Na osnovu skupa vrednosti  $\{x_j\}$  koje se nadgledaju, određuje se koja je hipoteza  $\{h_i\}$  istinita (*true*). Ciljna frekvencija emitovanja koja može biti prisutna ili ne se zasniva na proceni parametara  $\{f_k\}$  od  $\{x_j\}$ , tj. izabranim Fourier-ovim transformacionim koeficijentima koji se odnose na talasnu dužinu. Kada se govori o efektima propagacije signala identifikacija prostornog razdvajanja *Snod*-ova se mora ostvariti gustim rasporedjivanjem čvorova. *Snod*-ovi imaju ugrađene male antene, a raspoređeni su po neravnoj površini. Što je veća gustina to znači da su čvorovi bliže jedan drugom, pa je i veća verovatnoća ostvarivanja dobre veze na malom rastojanju, kao i eliminisanje drugih negativnih efekata propagacije signala.

Koristeći najjednostavniji *Path Loss Model* gubici signala se mogu izraziti kao  $(1/d)^n$  gde je  $n$  blizu 4. Izbor modulacione šeme je kritičan sa aspekta energetske efikasnosti.  $M$ -arnim modulacijama (u okviru jednog simbola prenosi se veći broj bitova) redukuje se iznos snage potreban da se preda informacija, ali su tada elektronska kola za predaju/prijem (*Tx/Rx*) suviše složena i troše dosta energije. Kod binarnih modulacionih šema kakve su *BPSK*, *FSK* i *ASK* (predaja je tipa *ON/OFF*) tako da postoji bolji balans snage na predajnoj strani i snage koja se troši od strane *Tx/Rx* kola. *Start-up* vreme ima veliki uticaj na prosečnu energiju po bitu ( $E_b$ ). Kada se u toku prenosa koriste kratki paketi tada na ukupnu potrošnju veći uticaj ima *start-up* energija (uključuje prenos *header*-a), a ne ona koja se troši za prenos korisne informacije. Drugim rečima  $E_b$  je jako zavisna od obima paketa.

## 1.5 Nivo veze

Nivo veze je odgovoran za:

- multipleksiranje nizova podataka (*multiplexing data streams*)
- formiranje okvira (*framing*)
- fizičkom adresiranju (*physical addressing*)
- upravljanje protokom (*flow control*)
- kontrolom grešaka u prenosu (*error control*)
- metodom pristupa (*access control*)

## Kontrola medijuma za pristup

Nivo kontrole medijuma za pristup (*medium access control layer*) je veoma važan aspekt prenosa zbog toga što je bežični medijum deljivi medijum. Naime, imajući u vidu da se radio-prenos od strane većeg broja predajnika vrši na istoj frekvenciji neminovno je da dolazi do njihove međusobne interferencije. To je, u krajnjem slučaju, uzrok pojave kolizije. Uloga MAC-a je da identifikuje kada i kako svaki čvor može da predaje po bežičnom komunikacionom kanalu.

Primarni MAC atributi kojih treba identifikovati su:

- izbegavanje kolizije (*collision avoidance*)
- energetska efikasnost (*energy efficiency*)
- skalabilnost i adaptivnost (*scalability & adaptivity*)
- efikasno korišćenje propusnog opsega (*efficient bandwidth utilization*)
- latencija (*latency*)
- propusnost (*throughput*)

Postojeći MAC protokoli se ne mogu koristiti kod WSN iz razloga što su mobilni izvori locirani na rastojanju od jednog preskoka u odnosu na najbližu baznu stanicu, kao i što je uloga protokola prvenstveno podređena postizanju visokog QoS-a i efikasnijem korišćenju propusnog opsega. S obzirom da senzorski čvorovi ne poseduju centralno upravljački agent (*central controlling agent*) to znači da se postojeći metodi ne mogu koristiti.

MAC protokoli za senzorske mreže se mogu klasifikovati na:

- protokoli bazirani na sudarima (*contention based protocols – CBPs*) i
- protokoli bazirani na planiranju (*scheduled protocols*)

### Protokoli bazirani na sudarima

Kod protokola baziranih na sudarima, umesto da se unapred određuje trenutak kada će koji čvor vršiti predaju, čvorovi se takmiče za kanal, što rezultira koordinaciji zasnovanoj na verovatnoći. Klasični primeri *CB MAC* protokola su *ALOHA* i *CSMA/CD*.

Kod *ALOHA* čvor predaje paket u trenutku generisanja (*pure ALOHA*-a) ili u nerdnom dostupnom slotu (*slotted ALOHA*). Paketi kod kojih dolazi do kolizije se izbacuju, a kasnije ponovo predaju. Kod *CSMA*, pre predaje, čvor osluškuje kanal. Ako detektuje da je kanal zauzet, on odgadja pristup i pokušava da pristupi kanalu kasnije. Kod *CSMA/CA* mehanizma pre nego što predajnik počne sa predajom podataka uspostavlja se *handshake* procedura između predajnika i prijemnika. Svrha *RTS-CTS handshake* procedure je da se obaveste susedi kako predajnika tako i prijemnika da će do predaje doći. Tako na primer kod *MACA* koja se bazira na *CSMA/CA* kako kod *RTS* tako i kod *CTS* pridodaje se polje koje ukazuje na obim podataka kojih treba preneti. Ovim se daje ka znanju drugim čvorovima za koliko dugo neće biti u stanju da obavljaju predaju. Kod poboljšane verzije *MACA*, nazvane *MACW*, nakon prenosa svakog paketa podataka uvodi se *ACK* paket koji omogućava brzo oporavljanje nivoa-veze od grešaka u prenosu. Prenos između predajnika i prijemnika se vrši shodno sekvenci *RTS-CTS-DATA-ACK*. Kod 802.11, kada se govori o distribuiranoj funkciji (*DCF*) usvojeni su svi predlozi koji su uvedeni kod *CSMA/CA*, *MACA* i *MACW*, a pored toga učinjena su i brojna poboljšanja, kakva su



virtuelna detekcija nosioca (*virtual carrier sense*), binarna eksponencijalna *back-off*, kao i podrška procesu fragmentacije.

### Protokoli bazirani na planiranju

*TDMA* deli kanal na  $N$  vremenskih slotova. U toku trajanja svakog slota, samo jednom čvoru je dozvoljena predaja.  $N$  čvorova čine okvir koji se ciklično ponavlja. U okviru svake ćelije, bazna stanica alocira vremenske slotove i snadbeva sa tajming i sinhronizacionom informacijom sve mobilne čvorove. Obično mobilni čvorovi komuniciraju samo sa baznom stanicom jer ne postoje direktne, *peer-to-peer*, komunikacije između mobilnih čvorova. Glavna prednost *TDMA* pristupa je njena energetska efikasnost, iz prostog razloga što ovaj pristup direktno podržava jako-nesimetričan faktor-popune (*low duty cycle*) u radu čvorova. Ipak *TDMA* ima i neke svoje nedostatke koji se ogledaju u sledećem: *TDMA* zahteva da čvorovi formiraju *cluster*, pri čemu se jedan od čvorova u okviru *cluster*-a bira da bude vodja (*cluster-head*) i ponaša se kao bazna stanica. Čvorovima se ograničava da komuniciraju u okviru *cluster*-a, što znači da se *peer-to-peer* komunikacije direktno ne podržavaju. (Za slučaj da čvorovi komuniciraju direktno, oni moraju da oslušuju kanal u toku svih slotova, što rezultira smanjenju energetske efikasnosti). Problemi koji se javljaju zbog *inter-cluster* komunikacije kao i pojavu interferencije rešavaju se korišćenjem tehnika tipa *FDMA* ili *CDMA*.

Kod *WSN*-a često se koristi samo-organizirajući (*self-organized*) protokol. Ovaj protokol pretpostavlja da je preko *FDMA* ili *CDMA* dostupan veći broj kanala, pri čemu bilo koje interferirajuće veze (*links*) biraju i koriste različite pod-kanale. U toku vremena koje nije predviđeno za predaju i prijem, čvor u cilju uštede energije isključuje svoj radio. Ovaj protokol podržava rad koji karakteriše mala potrošnja (*low-energy operation*), ali ima nedostatak koji se ogleda u tome da je iskorišćenost dostupnosti kanala suviše mala. Tipičan primer protokola koji kod *WSN* koristi *TDMA* tehniku je *LEACH* (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*). *LEACH* organizuje čvorove u *cluster* hijerarhije, a u okviru svakog *cluster*-a implementira *TDMA*. Uloga glavnog u okviru *cluster*-a (*cluster-head*) se menja (rotira) između čvorova (*cluster*-a) i zavisi od preostale neiskorišćene energije. U suštini *LEACH* predstavlja direktno proširenje celularnog *TDMA* modela na senzorske mreže. *FH* (*frequency hopping*) *TDMA* se koristi za *inter-cluster* komunikaciju i smanjenje interferencije.

### Kontrola grešaka

Kontrola grešaka u prenosu podataka je važna stavka kod bilo koje veze. Za rešavanje ovog problema koriste se sledeće tehnike:

- *FEC* (*Forward Error Correction*) – troši se dodatna energija i unosi kašnjenje u prenosu paketa zbog izračunavanja *FEC* kôda i prenosa dodatnih bitova.
- *ARQ* (*Automatic Repeat Request*) – rizikuje se da će se paket bez greške preneti, a u slučaju da se to ne desi sledi proces retransmisije što ima za posledicu povećanu potrošnju energije.

### Režimi rada za uštedu energije

Nezavisno od toga koji se tip šeme midijuma za pristup, kod senzorskih mreža, koristi, evidentno je da to rešenje mora, što se tiče senzorskog čvora, da podrži režim rada sa smanjenom

potrošnjom. Najjednostavniji način za uštedu energije sastoji se u isključenju primo-predjnika čvora u trenucima kada to nije potrebno. I pored toga što se ovakvom metodom na prvi pogled postiže znatna ušteda energije, ipak treba naglasiti da se ovo rešenje uglavnom preporučuje kada se komunikacije između čvorova ostvaruju korišćenjem kratkih paketa. Ispitivanja pokazuju da najveći udeo na potrošnju energije ima *start-up* energija. U suštini, ako je u toku pasivnih slotova radio primo-predajnik u potpunosti isključen, tada u trenutku uključivanja, zbog uspostavljanja radnog režima, može da se zahteva povećana potrošnja, što je nepovoljno sa tačke gledišta rada baterije. Kao rezultat, rad u režimu smanjene potrošnje je efikasan samo ako je vreme potrošeno u ovom režimu rada veće od određenog iznosa ukupnog vremena (recimo 90 % ili 95 %). U zavisnosti od stanja u kome se nalazi mikroprocesor, memorija, AD konvertor, i primo-predjnik razlikuju se nekoliko režima rada sa smanjenom potrošnjom. Svaki od ovih režima rada se karakteriše svojom potrošnjom energije i latencijom, kao i energijom koja je potrebna za prelaz iz jednog režima rada u drugi (recimo, iz pasivni u aktivni). Veoma često u cilju uštede energije koristi se šema poznata kao dinamičko-upravljanje potrošnjom energije (*Dynamic Power Management – DPM*). Kod ovog rešenja senzorski čvor može da se nadje u veći broj stanja (sve u zavisnosti od toga koji je njegov blok u stanju *ON/OFF*), dok radom čvora upravlja blok *power-manager*. Prelaz iz jednog stanja u drugo dešava se za određeni iznos vremena. Uporedni pregled različitih *MAC* protokola kao i njihovih tehnika za uštedu energije date su u Tabeli 1.

Tabela 1 Uporedni pregled različitih *MAC* protokol modela

MAC protokol	Metod	Ušteda energije	Potreba za poboljšanjem
CDMA bazirani senzori	proizvoljan pristup baziran na sudaru	koristi konstantno vreme osluškivanja kako bi se minimizirala potrošnja energije	treba da koristi veće procesiranje kod <i>handshaking</i> -a. Koristi veći broj <i>Power-saving</i> režima rada
hibridni TDMA/FDMA zasnovani senzori	Centralizovana frekventna i vremenska podela	koristi se minimalna energija od strane hardvera. Koristi se mix TDMA/FDMA da bi se minimiziralo korišćenje energije	( <i>sleeping</i> ). Treba da se odrede granice o potrošnji energije koje su potrebne za rad senzora
SMACS i EAR	fiksna alokacija dupleks vremenskih slotova na fiksnim frekvencijama	slučajno probudjivanje u toku uključivanja i isključivanja radia. Koristi široki propusni opseg u odnosu na brzinu prenosa podataka od senzorsa	nije poželjan za velike mobilne mreže (obično dobar za stacionarne čvorove)

## 1.6 Mrežni nivo

Glavni atributi mrežnog nivoa su:

1. efikasna potrošnja,
2. efikasno rutiranje, i
3. agregacija podataka

Senzorske mreže su mreže *data-centric* tipa. To znači da zahtevana informacija treba da zadovolji nekoliko atributa, a pri tome se ne zahteva rutiranje podataka između čvorova.

Takodje, s obzirom da susedni čvorovi imaju takoreći slične podatke i zadovoljavaju iste atribute, umesto da se podaci od svakog čvora ka odredišnom čvoru šalju separatno, neophodno je realizovati agregaciju podataka. U tom cilju razvijen je veliki broj protokola koji prikupljaju podatke na osnovu upita iniciranih od strane korisnika. Čvorovi tipa ponor (*sink*) šalju upite izabranim čvorovima u različitim regionima i čekaju da se podaci prikupe. Ruta se uspostavlja samo kada je potrebno (*on-demand routing*).

## 1.7 Tehnike rutiranja

### 1.7.1 Plavljenje

Kod plavljenja svaki čvor koji primi podatke ili upravljačku informaciju emituje je svima (*broadcast*), sve dok se ne dostigne maksimalan broj preskoka specificiran u paketu, ili paket ne pristigne do odredišnog čvora. Plavljenje je reaktivna tehnika i ne zahteva skupo održavanje mrežne topologije, kao i složene algoritme za rutiranje. Ovu tehniku karakterišu sledeće osobine:

- implozija- toje situacija kada se istom čvoru šalju duplicirane poruke. Na primer, ako čvor A ima susedne čvorove koji su takodje susedi senzorskom čvoru B, tada će senzor B primiti veći broj poruka tipa kopija koje su poslate od strane senzorskog čvora A.
- prikupljanje- ako dva čvora dele isti observacioni region, tada oba senzora u istom trenutku mogu procenjivati isti stimulus. Kao rezultat, susednoi čvorovi primaće duplicirane poruke.
- zaslepljenost resursa- protokol plavljenja ne vodi računa o dostupnoj energiji. Energetsko resursno-svesni protokol neprekidno vodi računa o iznosu dostupne energije.

### 1.7.2 Brbljanje

Modifikacijom tehnike plavljenja dobija se brbljanje (*gossiping*). Kod ove tehnike čvorovi ne vrše emisiju svima nego proizvoljno biraju drugi senzorski čvor prema kome će usmeriti poruku. Mada se ovim pristupom izbegava problem implozije jer se raspolaže samo jednom kopijom poruke u bilo kom čvoru, neophodno je dosta dugo vreme da se poruka prenese do svih senzorsih čvorova.

## 1.8 Data-centric protokoli

### 1.8.1 SPIN 1

Familija adaptivnih protokola nazvanih *SPIN* (*Sensor Protocol for Information via Negotiation*) rasejava svu informaciju od svakog čvora ka svakom čvoru u mreži (vidi sliku 3). Ovo omogućava korisniku da upita svaki čvor, kao i da trenutno dobije željenu informaciju. Ovaj protokol koristi osobinu da bliski čvorovi poseduju slične podatke pa s toga distribuiraju samo podatke koje ostali čvorovi ne poseduju. Protokol radi proaktivno i distribuira informaciju po celoj mreži, čak i u slučaju kada korisnik ne zahteva podatke. Za razmenu podataka između čvorova *SPIN* koristi tri tipa poruka, a to su:

- ADV poruke- omogućavaju senzoru da oglašava pojedine meta-podatke,
- REQ poruke- vrše upis specifičnih podataka,
- DATA poruke- sadrže aktuelne podatke

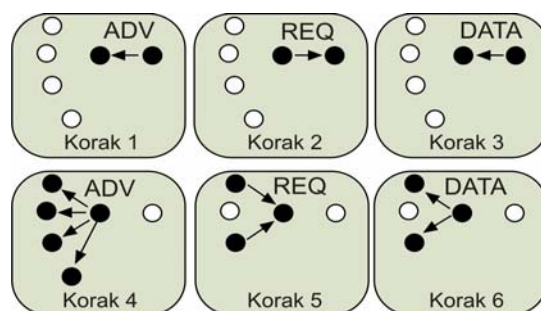
Svaki senzorski čvor ima ugrađeno menadžer-resursa koji čuva trag o:

- izračunavanjima koja obavlja resurs
- prekidu aktivnosti radi uštede energije

### 1.8.2 SPIN 2

U odnosu na *SPIN 1* protokol *SPIN 2* ima implementirano energetska-konzervativnu karakteristiku. To znači da čvor inicira protokol samo ako ima dovoljno energije da završi sa prenosom. Ako je nivo raspoložive čvora nizak, tada čvor može i dalje da prima poruke, ali ne može da predaje/prima poruke tipa *DATA*.

Pre slanja *DATA* poruke, senzorski čvor emituje neku *ADV* poruku kao sadržajni opis *DATA* kao što je prikazano u koraku 1 na slici 3. Ako susedni čvor je zainteresovan za ovaj podatak, on šalje *REQ* poruku za *DATA* i *DATA* je prosleđena susednom senzorskom čvoru, kao što je prikazano u drugom i trećem koraku na slici. Susedni senzorski čvor onda ponavlja ovaj proces kao što je ilustrovano u četvrtom, petom i šestom koraku na slici. Kao rezultat senzorski čvorovi unutar senzorske mreže koji su zainteresovani za podatak dobiće kopiju istog.



Slika 3 *SPIN* protokol

Glavna prednost *SPIN* protokola je ta što su topološke promene lokalizovane. To znači da svaki čvor treba da zna samo svoje *single-hop* susede. Glavni problem koji se javlja kod *SPIN*-a je sledeći: Ako su čvorovi koji se interesuju za podatke udaljeni u odnosu na izvorišni čvor, a čvorovi locirani između izvorišta i odredišta ne interesuju ti podaci, tada se zahtevani podaci ne mogu dostaviti odredištu.

### 1.9 Usmerene difuzije

Kao što je prikazano na slici 4 senzori se raspoređuju na takav način da formiraju pri tome distribuiranu mrežu. Kada god neki region zahteva nadgledanje nekog događaja kakav je recimo širenje štetnog gasa, kretanje vozila, seizmičkih vibracija, i drugo, tada se koristi tehnika usmerene difuzije. To znači da kada se desi neki događaj, podatak se prihvata i procesira od strane čvora, a informacija se prosleđuje prema odredištu koje se o toj informaciji raspituje.



Slika 4 Usmerena difuzija

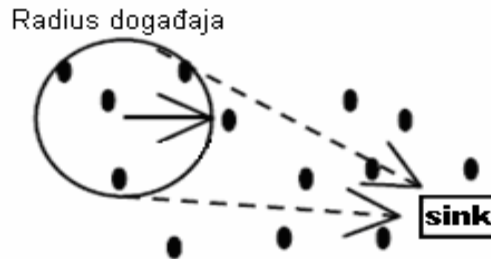
Sa ciljem da se obezbedi efikasna agregacija podataka predlaže se jedna aplikaciono-svesna paradigma, kojom se primljeni podaci prenose ka odredištu koje ih potražuje. Pri tome se koristi model upit-odgovor (*query-response model*). Upit (*interest*) se od strane čvora (*sink*) emituje svima. U toku svoje propagacije upit pristigne do senzorskog čvora (*source*) koji može da zadovolji zahteve upita. Nakon ovoga čvor izvorište se aktivira, prihvata podatak sa senzora i procesira ga. Kada je podatak dostupan izvorište predaje podatak natrag preko pojačanog puta (vidi udebljanu liniju na slici 4). Raspitivač izražava interes,  $I$ , koristeći atributne vrednosti. Sensori tipa izvorište (*source*) koji mogu da pruže uslugu  $I$ , odazivaju se podacima. Interes se definiše korišćenjem atributa- parovi vrednosti. Raspitivač (*sink*) emituje svima izvidjački interes,  $i_I$ , sa ciljem da otkrije (sazna) puteve izmedju *source*-a i *sink*-a. Susedi ažuriraju keš-interesa i prosledjuju  $i_I$ .

### 1.10 Transportni nivo

TCP varijante razvijene za tradicionalne bežične mreže nisu pogodne za WSN-ove. Naime pojam pouzdani prenos podataka od jednog krajnjeg korisnika do drugog mora se u ovom slučaju drugačije sagledati prvenstveno zbog postojanja kako većeg broja predajnika tako ipostojanja većeg broja senzora, ali takodje i zbog jednog odredišta (*sink*) koje inicira *multicast* tip protok podataka. Treba pri ovome naglasiti da za isti događaj (zahtev za istim podacima) postoji visok nivo redundanse ili korelacije prikupljenih podataka od strane većeg broja senzora pa zbog toga ne postoji potreba za *end-to-end* pouzdanim prenosom izmedju individualnih senzora i *sink*-a, nego samo izmedju događaja i *sink*-a. Sa druge strane ne postoji potreba za *end-to-end* pouzdanim prenosom izmedju *sink*-a i individualnih čvorova u situacijama kakve srećemo kod *retasking*-a ili reprogramiranja. Razvijeni protokol mora sa jedne strane biti tipa *energy-aware*, a sa druge strane dovoljno jednostavan kako bi se implementirao u hardver i softver velikog broja WSN aplikacija.

### 1.10.1 Transport tipa događaj-*sink*

*Sink* (vidi sliku 5) se interesuje o kolektivnoj informaciji senzorskih čvorova u okviru oblasti čiji radijus okružuje događaj.



Slika 5 Transport tipa događaj-*sink*

### 1.10.2 Transport tipa *sink*-senzor

Suprotan put *sink*-senzor se koristi za slanje operativnih ili aplikaciono specifičnih podataka od *sink*-a ka sensorima. Ovo je *multihop* jedan prema-više (*multicast*) komunikacija.

Neki od poznatijih protokola na transportnom nivou koji se koriste su:

1. PFSQ (*Pump Flow Fetch Quickly*) – obezbedjuje pouzdan prenos od *sink*-a do senzorskih čvorova. Sink emituje svima (*broadcast*) konstantnom brzinom pakete, a susedi prosledjuju te pakete. Prenos na nivou jednog preskoka je pouzdan, a čvorovi se karakterišu time što kešuju podatke.
2. RMST (*Reliable Multi-Segment Transport*) – obezbedjuje pouzdan transport u smeru događaj → *sink* i to kako na MAC tako i na transportnom nivou. Glavni cilj je da se ispita na kom nivou treba ostvariti pouzdani prenos. Pouzdanost na MAC nivou se postiže bez-*ARQ*, uvek-*ARQ*, ili selektivnim-*ARQ*-om. Pouzdanost na transportnom nivou se postiže korišćenjem *NACK*-ova (bilo da su oni tipa *end-to-end* ili *hop-to-hop*).
3. ESRT (*Event to Sink Reliable Transport*) – obezbedjuje kolektivnu pouzdanost tipa događaj → *sink*. Kontrola sudara i pouzdanost se postižu podešavanjem frekvencije raportiranja u senzorskim čvorovima. Sink meri pouzdanost observacionog događaja, aplikacija određuje pouzdanost željenog događaja, a sink emituje svima novu frekvenciju raportiranja. Detekcija sudara se vrši u svakom čvoru bilo nadgledanjem lokalnog reda čekanja ili korišćenjem bita koji ukazuje na sudar.
4. CODA (*Congestion Detection and Avoidance*) – sličan je ESRT-u. Obezbedjuje kolektivni pouzdani transport tipa događaj – *sink*. Potencira sudar kada nenadejni događaj uzrokuje da čvorovi šalju impulse podataka. CODA može da signalizira sudare specifičnim čvorovima regiona. Detekcija sudara se vrši nadgledanjem kanala.

Usporedne karakteristike različitih protokola na transportnom nivou prikazani su u Tabeli 2.

Tabela 2 Karakteristike transportnih protokola

protokol	otkrivanje grešaka	smer pouzdanog transporta	kontrola sudara	MAC-ov zahtev
PSFQ	<i>hop-by-hop</i>	<i>sink</i> → senzor	ne postoji	<i>broadcast</i>
RMST	<i>hop-by-hop</i> ili <i>end-to-end</i>	dogadjaj → <i>sink</i>	ne postoji	usmerena difuzija
ESRT	ne postoji	kolektivni dogadjaj → <i>sink</i>	učestali raport o dogadjaju	CSMA
CODA	ne postoji	kolektivni dogadjaj → <i>sink</i>	učestali raport o dogadjaju	CSMA/CA

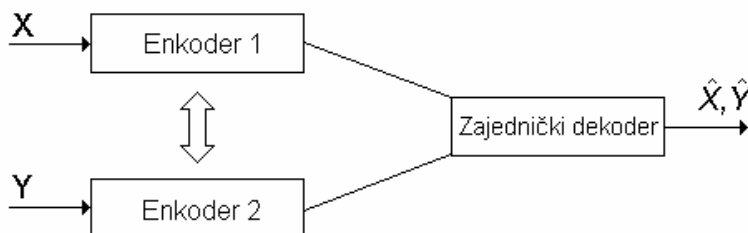
### 1.11 Aplikacioni nivo

Dosta je napora istraživača uloženo na razvoju ovog nivoa zadnjih godina. Tri poznata aplikaciona protokola su:

1. *Sensor Management Protocol* (SMP)- čini da hardver i softver nižih nivoa budu transparentni za aplikacije tipa upravljanje koje se odnose na rad senzorske mreže. Sistem administratori interaguju sa Snet-om koristeći SMP
2. *Task Assignment and Data Advertisement Protocol* (TADAP)- obezbedjuje korisničkom softveru efikasan interfejs koji se odnosi na potrebe rasejavanja informacije.
3. *Sensor Query and Data Dissemination Protocol* (SQDDP)- obezbedjuje korisničkim aplikacijama interfejs na upite, odaziva se na upite, i prikuplja dolazeće upite.

### 1.12 Kolaboracija enkodera

Kod WSN-a dogadjaj obično uzrokuje da nekoliko senzora generišu jako korelisane (skoro identične) merne rezultate. Od interesa je sada kako se uz pomoć korelacije može ostvariti kompresija informacije koja se predaje kontroleru ili *sink* čvoru. Na slici 6 prikazan je jedan od načina organizacije većeg broja enkodera koji rade u kolaborativnom okruženju. Enkoderi kolaborišu brzinom odredjenom od strane entropije,  $H(X,Y)$ , koja je zadovoljavajuća za datu aplikaciju.



Slika 6 Kolaborativnost enkodera

## 2. nRF24L01 primo-predajnik na 2.4GHz

### 2.1 Karakteristike nRF24L01 primo-predajnika:

- Radio
  - Operisanje na svetskim poznatim ISM band\_u na 2.4GHz
  - Jednostavni GFSK čip predajnik
  - 126 RF kanala
  - Kratko vreme odabira (skoka) frekvencije
  - Zajedničke TX i RX pinove
  - GFSK modulacija
  - Transfer podataka 1÷2 Mbit/s
  - 1MHz ne preklapajuća širina kanala na 1Mbps
  - 2MHz ne preklapajuća širina kanala na 2Mbps
- Predajnik
  - Programabilna izlazna snaga: 0, -6, -12 ili -18dBm
  - 11.3mA potrošnje pri 0dBm izlazne snage
  - 900nA u *Power Down* modu
  - 22uA u *Standby I* modu
- Prijemnik
  - Integrirani filtri kanala
  - 12.3mA potrošnje pri 2Mbps
  - -82dBm osetljivosti pri 2Mbps
  - -85dBm osetljivosti pri 1Mbps
  - Programabilni LNA gain
- RF sintetizator
  - Potpuno integrirani sintetizator
  - Ne koristi spoljašnji filter, VCO ili rezonator
  - Koristi +/- 60ppm kristal niske cene
- Enhanced Shock Burs™
  - 1÷32 bajtova dinamičke širine korisnog podataka (*payload*)
  - Automatsko prihvatanje paketa
  - Automatska transakcija prihvatanja paketa
  - Komunikacija sa šest različitih “cevima” podataka (*data pipes*)
- Napajanje i potrošnja
  - Integrirani naponski regulator
  - Opseg napona napajanja od 1.9V do 3.6V
  - Idle modovi sa brzim startom
  - 1.5ms - maksimalno vreme za start iz *Power Down* moda
  - 130us - maksimalno vreme za start iz *Standby moda*
  - Totalna disipacija Pd (Ta=85°C) = 60mW



- Interfejs host\_a
  - 4 pina za hardware\_ski SPI
  - Maksimalni protok od 8Mbps
  - 3 odvojena 32 bajta TX i RX FIFO\_a
  - 5V tolerancije ulaza (-0.3V÷5.25V)
- Temperature
  - Temperatura operisanja (-40 °C ÷ +85 °C)
  - Temperatura čuvanja (-40 °C ÷ +125 °C)
- Kompaktno 20 pinsko 4X4 mm QFN kućište
- Dvoslojni PCB
- Kompatibilnost sa ostalim nRF24XX

## 2.2 Aplikacije:

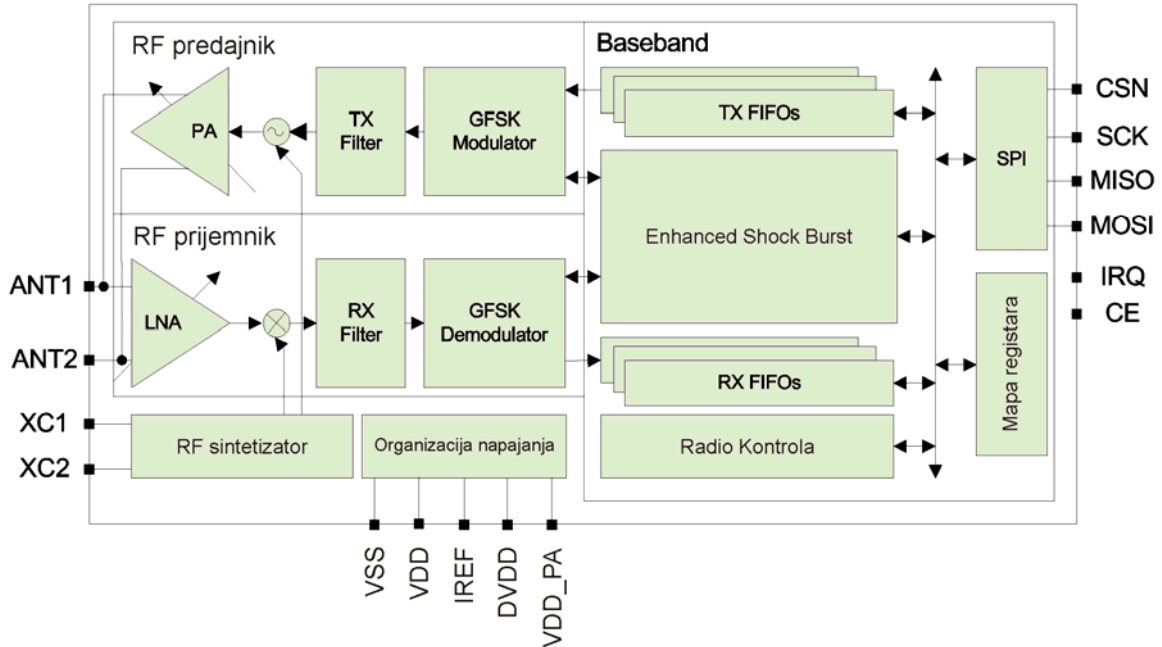
- Bežične PC periferije (bežični miš, tastatura, džoistik)
- Ultra nisko potrošačke senzorske mreže
- Udaljene kontrole unapređene centre medija
- VoIP slušalice
- Aktivni RFID (*RF IDentification*)
- Ulazak bez ključa
- Bežična komunikacija podataka
- RF udaljena kontrola za potrošačke elektronike
- Alarmi i bezbednosni sistemi
- Domaća automatizacija
- Prismotra
- Telemetrija
- Automobilske aplikacije
- Inteligentna sportska oprema
- Industrijski senzori

## 2.3 Generalni opis:

nRF24L01 kao jedinstveni čip je radio predajnik za svetski širokopoznati ISM opseg (*band*) na 2.4÷2.5GHz. Predajnik sadrži potpuno integrirani frekvencijski alat za sintezu, pojačavac, kristalni oscillator, demodulator, modulator i *Enhanced Shock Burst* protokol. Izlazna snaga, frekvencijski kanali i protokol su lako unošljivi otvorenim SPI interfejsom. Trenutna potrošnja struje predajnika je veoma mala, svega 9mA pri izlaznoj snazi od -6dBm i 12.3m u RX modu. *Power Down* i *StandBy* su modovi koji omogućavaju uštedu energije i se mogu veoma lako realizovati.

### 2.3.1 Blok šema nRF24L01:

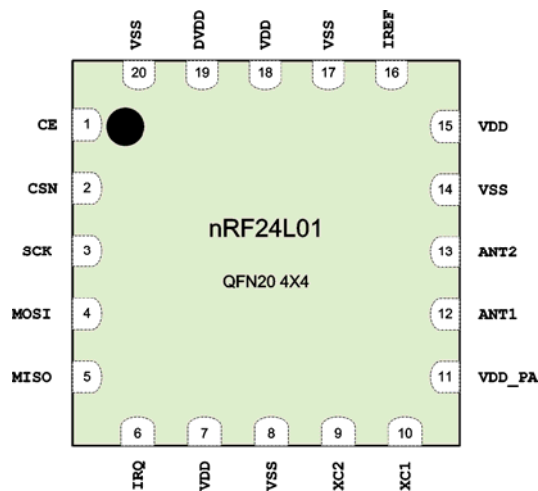
Na slici 7 prikazana je blok šema nRF24L01 primopredajnika.



Slika 7 Blok šema nRF24L01 primopredajnika

### 2.3.2 Raspored pinova nRF24L01:

Na slici 8 prikazan je raspored pinova nRF24L01 primopredajnika. Funkcionalni opis dat je u tabeli 3.



Skika 8 Raspored pinova čipa

Tabela 3

Pin	Ime	Funkcija pina	Opis
1	CE	Digitalni ulaz	<i>Chip Enable</i> , aktiviranje RX ili TX mod
2	CSN	Digitalni ulaz	SPI selektovanje čipa
3	SCK	Digitalni ulaz	SPI takt
4	MOSI	Digitalni ulaz	SPI slave <i>Data in</i>
5	MISO	Digitalni izlaz	SPI slave <i>Data out</i> , sa opcijom od tri stanja
6	IRQ	Digitalni izlaz	Prekidni pin, aktivan na niskim nivoom
7	VDD	Napajanje	Napon napajanja (+1.9 ÷ +3.6V DC)
8	VSS	Napajanje	Masa (0V)
9	XC2	Analogni izlaz	2 pin kristalnog oscilatora
10	XC1	Analogni ulaz	1 pin kristalnog oscilatora
11	VDD_PA	Izlaz napajanja	Naponski izlaz (+1.8V) za interni nRF24L01 pojačavač. Mora biti konektovan za ANT1 I ANT2
12	ANT1	RF	Pin za antene 1
13	ANT2	RF	Pin za antene 2
14	VSS	Napajanje	Masa (0V)
15	VDD	Napajanje	Napon napajanja (+1.9 ÷ +3.6V DC)
16	IREF	Analogni ulaz	Referentna struja.
17	VSS	Napajanje	Masa (0V)
18	VDD	Napajanje	Napon napajanja (+1.9 ÷ +3.6V DC)
19	DVDD	Izlaz napajanja	Interni digitalni izlaz za svrhe prespajanja.
20	VSS	Napajanje	Masa (0V)

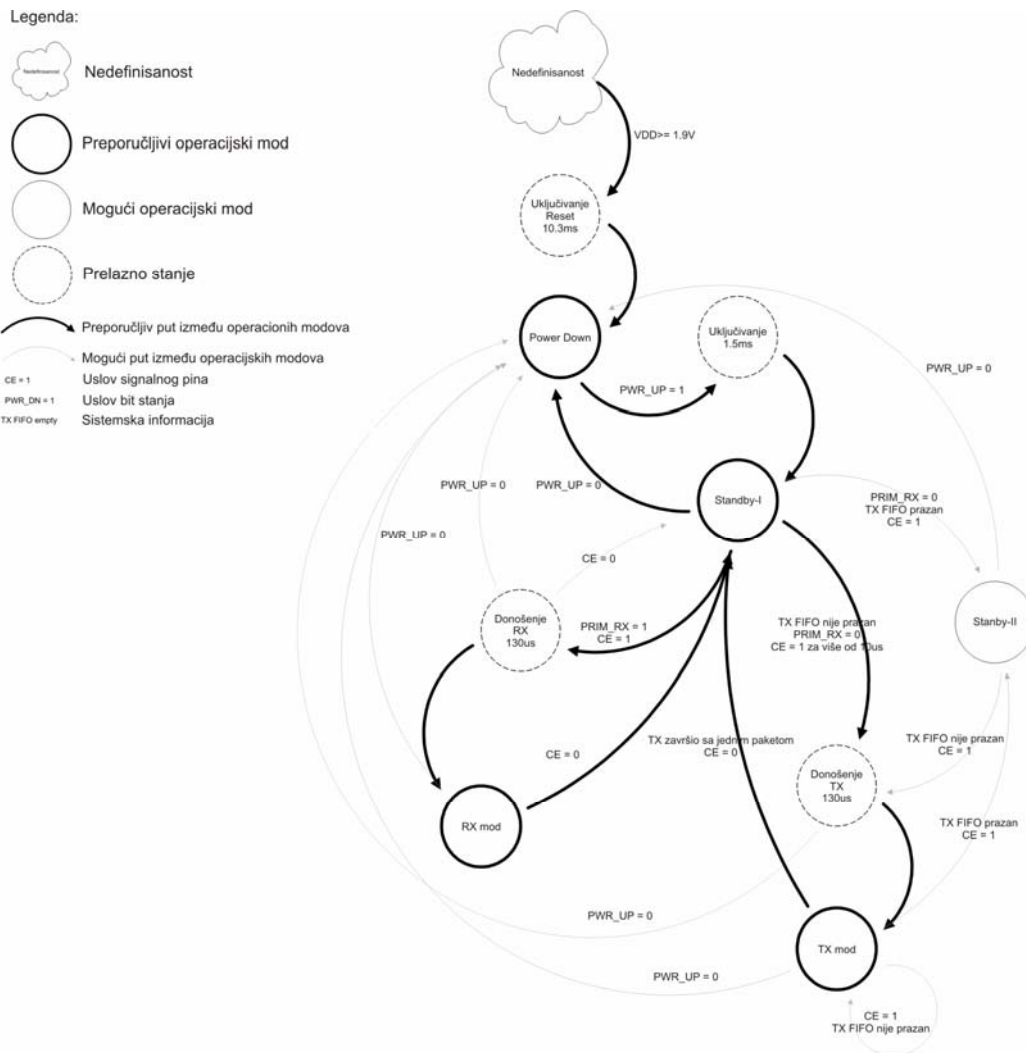
### 2.3.3 Radio kontrola:

Ovde biću opisani različiti modovi operisanja nRF24L01 radio predajnika i parametri iskorišćeni za kontrolu.

nRF24L01 je napravljen kao konačni automat koji kontroliše prelaze između različitih operacionih modova na čipu. Konačni automat uzima ulaznu vrednost od korisničkog definisanog registra i interne siganle.

### 2.3.4 Dijagram stanja:

Na dijagramu stanja prikazan na slici 9 prikazani su modovi u kojima nRF24L01 može operisati i kako se u njima pristupa. nRF24L01 je nedefinisan ako je napon napajanja ispod VDD. Kada se priključi na napon napajanja, resetuje se stanje u kome je poslednji put bio i ulazi u *Power Down* mod. Iako je u *Power Down* modu, mikrokontroler može kontrolisati čip preko otvorenog SPI interfejsa i CE (*Chip Enable*) pina (zauzeta tri stanja u dijagramu). “Preporičljivi operacijski mod” je stanje koje je zauzeto za vreme normalne operacije. “Mogući operacijski mod” je stanje koje je dozvoljeno da se koristi, ali nije uzeto za vreme normalne operacije. “Prelazno stanje” je stanje vremenskog ograničenja uzeto za vreme starta.



Slika 9 Dijagram stanja

### 2.3.5 Operacioni modovi:

nRF 24L01 može biti setovan u sledećih glavnih modova, zavisno od tekućih nivoa primarne I/O<sub>e</sub> i konfiguracione registre. Modovi su prikazani u tabeli 4.

Tabela 4 Modovi nRF24L01

Mod	PWR_UP registar	PRIM_RX registar	CE	FIFO stanje
RX mod	1	1	1	-
TX mod	1	0	1	Podaci u TX FIFO
TX mod	1	0	1 → 0	Ostaje u TX modu pre nego što je prenos paketa završen
Standby-II	1	0	1	TX FIFO – prazan
Standby-I	1	-	0	Nema prenos paketa
Power Down	0	-	-	-

I/O pinovi u različitim modovima rada nRF24L01 prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5

Ime pina	Tip	TX mod	RX mod	Standby modovi	Power Down
CE	Ulazni	Visoki impuls >10us	Visoki nivo	Niski nivo	-
CSN	Ulazni	SPI <i>Chip select</i> , aktivan na niskom nivou			
SCK	Ulazni	SPI takt			
MOSI	Ulazni	SPI serijski ulaz			
MISO	Tro-statički izlazni	SPI serijski izlaz			
IRQ	Izlazni	Prekid, aktivan na niskom nivou			

### 2.3.5.1 Standby modovi:

*Standby I* mod se koristi za minimiziranje srednje trenutne potrošnje, kao održavanje sa kratkim vremenskim uključenjima. U ovom modu aktivan je samo deo kristalnog oscilatora. U *Standby II* modu, aktivni su takti baferi i upoređeno sa *Standby I* mod potrošnja je povećana deset puta. *Standby II* se može ostvariti kada je CE na visokom nivou PTX uređaja sa praznim TX FIFO registrom.

Za vreme *Standby* modova sadržaj konfiguracione reči je održan i aktiviranje SPI interfejsa je moguće.

### 2.3.5.2 Power Down mod:

U ovom modu nRF24L01 je isključen i je u fazi minimalne potrošnje energije. Kada je aktivan ovaj mod uređaj nije aktivan, ali vrednost svih registara je dostupna preko SPI interfejsa. Za vreme moda SPI interfejs može biti aktivan samo u slučaju kada je CSN pin na niskom nivou. *Power Down* mod može se kontrolisati pomocu PWR\_UP bita u CONFIG registru.

### 2.3.6 Metode za manipulisanje sa paketima:

nRF24L01 poseduje sledeće metode manipulisanja:

- Shock Burst™ (kompatibilan sa nRF2401, nRF2402, nRF24E1 i nRF24E2 sa protokom od 1Mbit/s)
- Enhanced Shock Burst™

#### 2.3.6.1 Shock Burst™ :

Shock Burst™ omogućava korišćenje visokog transfera podataka, ponuđenog sa strane nRF24L01 bez potrebe skupog visoko-brzok mikrokontrolera za procesiranje/taktovanje podataka. Umesto *high-speed* procesiranja, nRF24L01 nudi aplikacioni mikrokontroler i jednostavan kompatibilan SPI interfejs gde je protok podataka (*data rate*) odabran sa srtane samog mikrokontrolera. Pored digitalnog dela aplikacije za pokretanje sa malom brzinom pa sve

do maksimalnog protoka na RF vezi, Shock Burst™ smanjuje srednju potrošnju struje u aplikacijama.

U Shock Burst™ RX, prekid (IRQ) označava MCU kada validna adresa i korisna informacija je primljna, respektivno. MCU može nakon završetka takta (u sledećem takt periodu) da primi opet korisnu informaciju od nekog drugog nRF24L01 RX FIFO\_a.

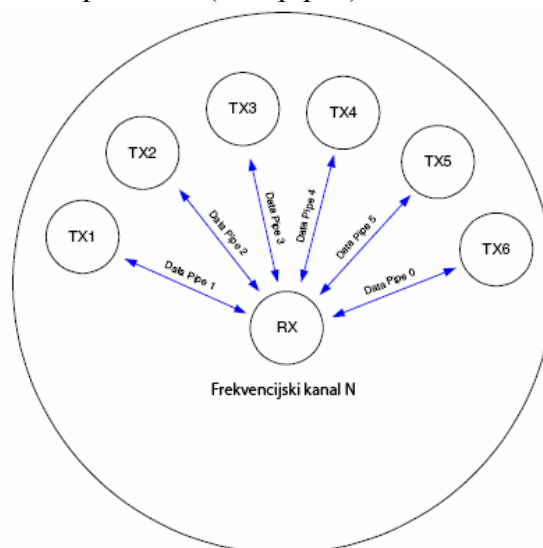
U Shock Burst™ TX, nRF24L01 automatski generiše preambulu i CRC. Prekid (IRQ) označava MCU da je predaja kompletna. Sve zajedno, ovo znači umanjeni zahtev za memoriju u MCU što znači jeftiniji MCU, kao i umanjeno vreme razvijanja software\_a.

nRF24L01 ima tronivojni RX FIFO (podeljeno između šest “cevi” podataka (*data pipes*) i tronivojni TX FIFO. MCU može pristupiti FIFO\_vima u bilo koje vreme, u Power Down modu, u Standby modu i za vreme translacije paketa. Ovo dozvoljava sporiji SPI interfejs usmeren na srednji protok i dozvoljava upotrebu MCU\_a bez SPI interfejsa.

### 2.3.6.2 Enhanced (povećan) Shock Burst™ :

Ovo je metod za manipulisanje sa funkcionalnošću, koji može lako implementirati bidirekcionalnu vezu, i je više efukasniji. U tipičnoj bidirekcionalnoj vezi, dozvoljeno je primljanje ACK (*Acknowledge*) posle završetka primljanja paketa, kako bi se detektovalo eventualno gubljenje paketa. Gubljenje podataka može se nadomestiti retransmisijom (ponovljenim slanjem). Ideja Enhanced Shock Burst™\_a je dozvoliti nRF24L01 da upravlja sa oba ACK (od primljenih paketa i od retransmisiji izgubljenih paketa) bez učestvovanja mikro kontrolera.

Neki nRF24L01 može biti konstruisan kao primarni RX (PRX), koji je spreman da primi podatke od šest različitih “cevi” podataka (*data pipes*) kao na slici 10:

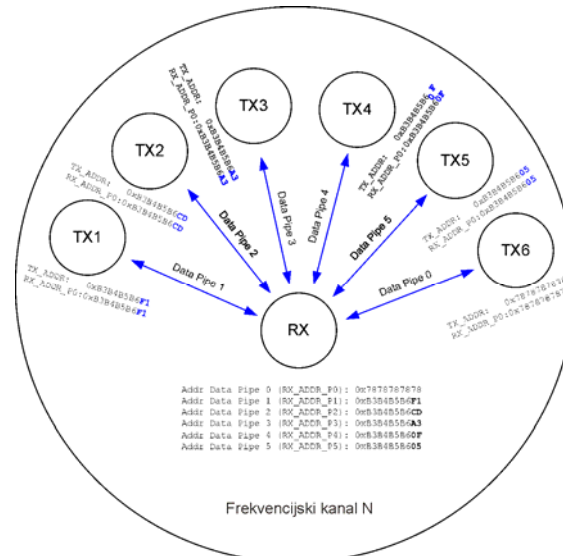


Slika 10

*Data pipe* ima jedinstvenu adresu, ali svi kotiste isti frekvencijski kanal. Ovo znači da svih šest različitih nRF24L01 konfigurisani kao primarni TX (PTX) mogu komunicirati sa jednim nRF24L01 konfigurisan kao PRX koji je sposoban da pravi razlike između njih. *Data pipe* 0 ima jedinstvenu 40bit\_nu konfiguracionu adresu. Svi ostali *data pipe*\_ovi (1÷5) imaju jedinstvene

8bit\_ne adrese, a pri tom dele 32 vrlo značajna adresna bita. Svi *data pipe*\_ovi mogu izvršavati kompletnu Enhanced Shock Burst™ funkcionalnost.

nRF24L01 koristiće adresu *data pipe\_a* kada vrši dozvolu primanja paketa. Ovo znači da nRF24L01 šalje ACK na adresi *data pipe\_a* ako primi korisne informacije sa nje. U PTX *data pipe* "0" je iskorišćen da primi ACK, stoga, primljena adresa za *data pipe* "0" mora biti jednaka sa poslatom adresom kako bi bio u mogućnosti da primi ACK. Pogledati primer adresiranja na slici 11.



Slika 11

Svaki nRF24L01 konfigurisan kao PTX sa uključenim Enhanced Shock Burst™\_om koristiće karakteristike Shock Burst™\_a za slanje paketa bilo kada to poželi mikro kontroler.

Nakon što je paket poslat nRF24L01 radiće kao prijemnik koji treba da primi ACK za potvrdu uspešnosti pošiljke. Ako ovaj ACK ne stigne nRF24L01 nanovo šalje paket sve dok ne primi ACK ili dok ne prekorači broj dozvoljenih retransmisija paketa koji je definisan i upisan u SETUP\_RETR\_ARC registru. Ako je ovaj broj u okviru dozvoljenih retransmisija, bice pokazan u STATUS\_nom registru kao bit MAX\_RT koji generiše prekid.

Kada neki ACK je primljen od strane nekog nRF24L01\_a smatraće se poslednji poslani paket za isporučenim. Nakon toga biće obrisano iz TX\_FIFO\_a i TX\_DS IRQ izvor više postavljen na visokom nivou.

Sa Enhanced Shoch Burst™\_om nRF24L01 nudi sledeće povoljnisti:

- veća umanjnost potrošnje i tačniji vremenski red u ACK saobraćaju.
- Manja cena sistema. Pošto nRF24L01 operiše sa brzim protokom, retransmisijom izgubljenih paketa i generisanje ACK primljenih paketa, nije potreban dodatani *hardware* za SPI interfejs. Interfej se može napraviti sa jeftinim mikro kontrolerom i korišćenje I/O pinova SPI\_a koji se povezuju sa kontrolerom. Sa samim nRF24L01\_om omogućena je dovojna brzina čak i pri vezi u oba smeru (bidirectional link).
- Umanjen rizik zabuna za vreme slanja.
- Lako razvijen *firmware*, pošto je sloj veze integriran na čipu.

### 2.3.6.3 Enhanced Shock Burst™ pri slanja korisne informacije:

1. Konfiguracioni bit PRIM\_RX mora biti na niskom nivou.
2. Kada mikro kontroler treba da pošalje podatak, adresa za primanje (TX\_ADDR) i korisni podaci (TX\_PLD) moraju biti taktovani unutar nRF24L01\_a preko SPI interfejsa. Širina TX korisnog podatka je određena kao broj bajtova upisanih u TXFIFO od srtane mikro kontrolera. TX\_PLD mora biti upisan neprekidno kada je CSN zadržan na niskom nivou. TX\_ADDR ne mora biti preupisan ako se nije promenila adresa poslednjeg slanja. Ako PTX uređaj primi ACK, *data pipe* "0" bice konfigurisan da primi ACK. Adresa primanja *data pipe* "0" (RX\_ADDR\_P0) mora biti jednaka adresi predajnika (TX\_ADDR) u PTX uređaju. Kao primer koji je pokazan na slici 11 uzećemo adresiranje između TX5 i RX uređaja:  
TX5 uređaj: TX\_ADDR = 0XB3B4B5B605  
TX5 uređaj: RX\_ADDR\_P0 = 0XB3B4B5B605  
RX uređaj: RX\_ADDR\_P4 = 0XB3B4B5B605
3. Visoki impuls na CE startuje slanje. Minimalna širina na CE je 10us.
4. nRF24L01 Shock Burst:
  - Predajnik je uključen
  - 16MHz interni takt je startovan
  - RF paket je kompletan
  - Podaci su poslani velikom brzinom (1 ili 2 Mbit/s konfigurisano od strane mikrokontrolera)
5. Ako je auto ACK aktiviran (ENAA\_P0 = 1) prijemnik odmah ide u RX modu. Ako je paket validan, biće primljen u validnom ACK prozoru i slanje takvog paketa bice ocenjeno kao uspešno. TX\_DS bit u STATUS registru je postavljen na visokom nivou i korisni podatak je premešćen iz TXFIFO\_a. Ako nije primljen validan ACK u posebnom vremenskom prozoru korisna informacija je nanovo poslata (ako je uključena opcija auto retransmit). Ako brojač retransmisije (ARC\_CNT) prekorači programirani maksimalni limit (ARC), MAX\_RT bit u STATUS\_nom registru biće postavljen na visokom nivou. Pri tom korisni podatak ostaje u TXFIFO. IRQ pin biće aktivan kada je MAX\_RT ili TX\_DS na visokom nivou. Da bi se isključio IRQ pin, izvor prekida mora biti resetovan upisivanjem u STATUS\_nom registru (pogledati poglavlje o prekidima). Ako nije primljen ACK za poslani paket, nakon maksimalnog broja retransmisija, ne poslani paketi moći će da se pošalju pre nego što MAX\_RX prekid bude obrisan. Brojač izgubljenih paketa (PLOS\_CNT) inkrementira se za vreme MAX\_RT prekida t.j ARC\_CNT broji broj retransmisija što je zahtev za uzimanje jednog paketa. PLOS\_CNT broji broj paketa koji se ne mogu izeti nakon maksimalnog broja pokušaja slanja.
6. Uređaj ide u *Standby I* mod ako je CE na niskom nivou. Inače sledeći korisni podatak u TXFIFO biće poslat. Ako je TXFIFO prazan, a CE na visokom nivou uređaj će ući u *Standby II* modu.
7. Ako je uređaj u *Standby II* modu , može se odmah prebaciti u *Standby I* mod donošenjem nizak nivo na pin CE.



### 2.3.6.4 Enhanced Shock Burst™ pri primljanje korisne informacije:

1. RX je setovan postavljanjem PRIM\_RX bita na visokom nivou u CONFIG registru. Svi *data pipe*\_ovi primiće podatak ako je uključen (EN\_RXADDR reg.) auto ACK za sve *data pipe*\_ove za vreme Enhanced Shock Burst™\_a koji bice aktivan, i moraju biti setovane tačne širine podataka (RX\_PW\_Px registre). Adrese moraju biti setovane i opisane u drugom delu Enhanced Shock Burst™\_a slanja korisne informacije.
2. Aktivni RX mod je startovan postavljanjem CE na visokom nivou.
3. Nakon 130us nRF24L01 posmatra etar (okruženje) za neku dolaznu informaciju.
4. Kada bude primljen validni paket (tačna adresa i CRC) korisni podatak je sačuvan u RX\_FIFO i RX\_DR bit je setovan na visokom nivou. IRQ pin biće aktivan kada je RX\_DR na visokom nivou. RX\_P\_NO u STATUS\_nom registru pokazaće iz koje *data pipe* je primljen podatak.
5. Ako auto ACK je uključen neki ACK je poslat nazad.
6. Procesor postavlja CE pin na niskom nivou za ulazak u *Standby I* modu (mod manje potrošnje struje).
7. Procesor može taktovati korisne podatke sa podešavanjem protoka preko SPI interfejsa.
8. Uređaj je sada spreman za ulazak u TX ili RX mod ili *Power Down* mod.

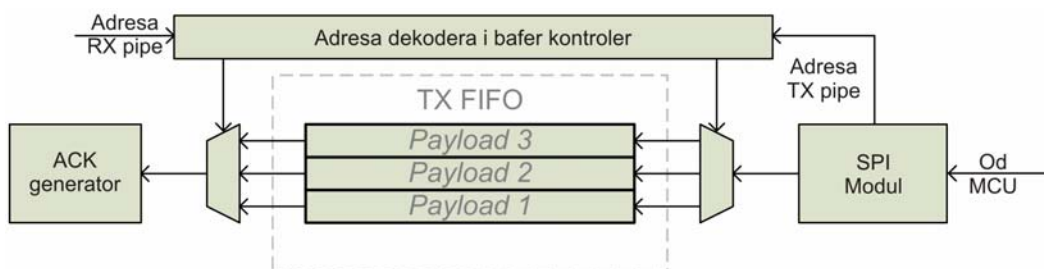
### 2.3.7 Komunikacija u oba smera sa korisnim podacima u oba pravca:

Ako se korisni podaci šalju u oba smera, PRIM\_RX registar mora biti poprečen sa redefinisanjem uređaja sa PRX na PTX. Kontrolni procesori moraju uspostaviti sinhronizaciju između PTX i PRX. Punjenje podacima oba RXFIFO i TXFIFO registra istovremeno je moguće, ali sa isključenim 1÷5 *data pipe*\_ova. U trćem nivou TXFIFO\_a moći će se upisati samo u RX, TX ili *Standby II* modu ako podaci su sačuvani u RXFIFO.

### 2.3.8 Auto Acknowledgement (ACK) (RX):

Auto ACK funkcija redukuje rad spoljašnjeg mikro kontrolera, i može izbeći potrebu za upotrbru *hardware*\_a u mišu/tastaturi ili slične sisteme. Samim tim se umanjuje cena i prosečna potrošnja energije. Auto ACK može da se konfigurira posebno za svaku *data pipe* preko SPI interfejsa.

Ako auto ACK je uključen i ispravan paket (tačna adresa data pipe i CRC) je primljen, uređaj će ući u TX modu i poslati ACK. Nakon što uređaj pošalje ACK normalna operacija nastavlja i mod biće konstruisan od stanja na PRIM\_RX registru i CE pinu.



Slika 12

Na slici 12 prikazano je kako TX FIFO (PRX) operiše manipulisanjem nerešenog ACK paketa korisnog podataka. Od mikrokontrolera korisni podatak je taktovan sa W\_ACK\_PAYLOAD komandom. Adresa dekodera i bafer kontroler obezbeđuju da je korisni podatak sačuvan u praznim slotom TX FIFO (PRX). Kada je paket primljen, adresni dekodier i bafer kontroler su obavešteni PTX adresom. Ovo obezbeđuje to da pravi korisni podatak je sadržan u ACK generatoru.

Ako TX FIFO (PRX) sadrži više od jednog korisnog podataka za PTX, korisne podatke biću izabrane korišćenjem FIFO (*First In First Out*) principa.

Dozvola *Auto Acknowledgement* funkcije izvršava se setovanjem EN\_ACK\_PAY bita u SYSTEM registru.

### **2.3.9 Automatska retransmisija paketa (ART) (TX):**

Neka auto retransmisiona funkcija je dostupna. Biće iskorišćena u TX strani u nekom auto ACK sistemu. U SETUP\_RETR registru moći će da stoji stanje koliko puta podatak iz registra biće poslat ako podaci nisu ACK\_ovani. Nakon određenog broja slanja, uređaj će ući u RX modu i čekaće ACK neki određeni period. Kada se ACK paket primi uređaj će se vratiti u normalnu funkciju slanja. Ako tamo ne postoje podaci za slanje (u TXFIFO), i ako je CE pin na niskom nivou uređaj ulazi u *Standby I* modu. Ako ACK nije primljen, uređaj ide nazad u TX mod kako bi poslao podatke. Ovo nastavlja sve dok se ne primi ACK, ili isteče vreme za slanje (t.j maksimalni broj puta retransmisije je prekoračen). Jedina mogućnost da se ovo resetuje je postavljanje PWR\_UP bita na niskom nivou ili dozvoliti da se auto transmisija završi. Brojač izgubljenih paketa biće inkrementiran u istom trenutku ako paket ne stigne do predviđene destinacije za određeno vreme (pre isteka vremena za slanje). Ovo vreme je definisano sa MAX\_RT prekida. Brojač za izgubljene pakete je resetovan upisom u RF kanalni registar.

### **2.3.10 Identifikacija paketa (PID) i CRC korišćenjem Enhanced Shock Burst™\_a:**

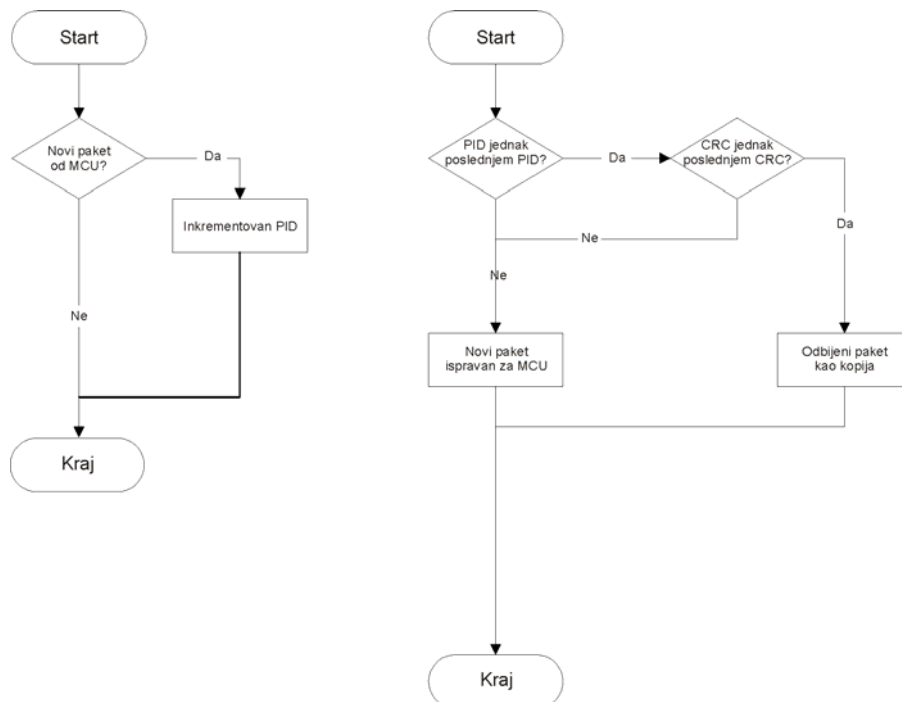
Svaki paket sadrži dvo\_bitno PID polje za detektovanje nekog primljenog ili nanovo poslanog paketa. PID preventuje da PRX uređaj istu korisnu informaciju prezentuje mikrokontroleru više od jednog puta. PID polje se inkrementira od strane TX za svaki novi primljeni paket preko SPI interfejsa. PID i CRC polja su iskorišćena od PRX uređaja za utvrđivanje dali je paket nanovo poslat ili je nov. Kada nekoliko podataka su izgubljeni na vezi, PID polje u nekim slučajevima može vratiti poslednji primljeni PID. Ako paket ima isti PID kao i poslednji paket, nRF24L01 upoređuje CRC sume oba paketa. Ako su i one iste, poslednji primljeni paket je ocenjen kao kopija prethodnog i nakon toga je odbačen. Algoritam PID prikazan je na slici 13.

1: PRX uređaj:

PRX uređaj upoređuje primljeni i poslednji PID. Ako PID polja su različita paket je ocenjen kao nov. Ako su isti primljeni paket može biti isti kao i poslednji. Prijemnik mora da proveri i CRC\_ove ovih paketa. Ako su i oni isti onda se radi o istom paketu, pa će on biti odbačen.

2: PTX uređaj:

Predajnik inkrementira PID polje svaki put kada je neki novi paket poslat.



Slika 13 Algoritam PID

Dužina CRC<sub>a</sub> je konfigurisana SPI interfejsom. Važno je znati se da CRC kalkuliše krajem paketa uključujući adrese, PID i korisnom informacijom. Paket je prihvaćen kao važeći ako je prošao CRC verifikaciju.

### 2.3.11 Detekcija stacionarne smetnje – *Carrier Detect (CD)*:

*Carrier detect (CD)* je na visokom nivou ako je RF signal detektovan u RX modu, inace je na niskom nivou. Interni CD signal je filtriran pre upisa u CD registar. Ovaj signal mora biti najmanje 128us na visokom nivou. U Enhanced Shock Burst™<sub>u</sub> preporučljivo je korišćenje CD funkcionalnosti samo kada PTX uređaj neuspešno uzima pakete, kao indikacija MAX\_RT prekida za jedan paket i pribavljanje brojača za izgubljene pakete (PLOS\_CNT) ako dođe do gubitka nekoliko paketa. Ako PLOS\_CNT u PTX uređaju upozorava na visoki nivo gubljenja paketa, uređaj biće konfigurisan kao PRX uređaj za vrlo kratko vreme (~250us) da bi proverio CD. Ako je CD visok (loša situacija) frekvencijski kanal biće promenjen. Ako je CD nizak (van kritičnog ranga) moći će da produži na istom frekvencijskom kanalu, ali sa drugom podešenošću.

### 2.3.12 „Cevi“ podataka (*Data Pipes*):

nRF24L01 konfigurisan kao PRX može primiti podatke sa šest različitih *data pipes* u jednom frekventnom kanalu. Svaka *data pipe* ima svoju jedinstvenu adresu i može biti konfigurisana da ima sopstveno ponašanje.

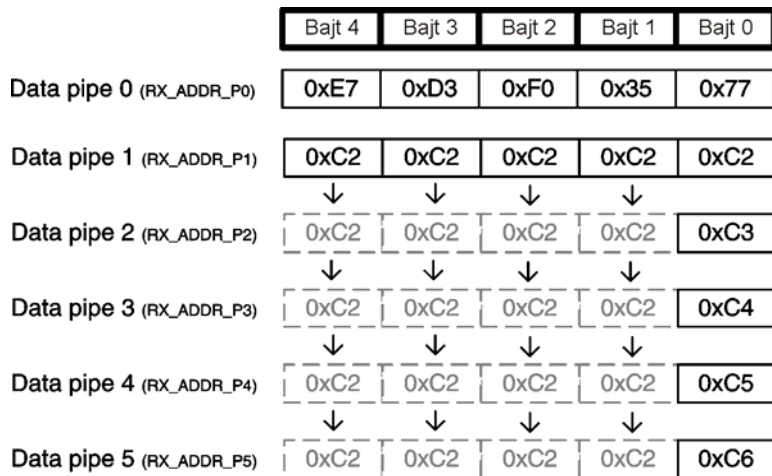
*Data pipe*-ovi dostupni su bitovima u EN\_RXADDR registru. Kao difoltno dostupne su samo „0“ i „1“ *data pipe*.

Adresa za svaku *data pipe* je konfigurisana u RX\_ADDR\_Px registru. Uvek se mora obezbediti da svaka *data pipe* ima različitu adresu.

*Data pipe* „0“ ima jedinstvenu 40bit\_nu konfiguracionu adresu. Ostale *data pipe*\_ove (1÷5) dele iste 32bit (visoko definisani), a imaju različit LSByte.

Slika 14 pokazuje adresiranje *data pipe*\_ova:

(Svaka *data pipe* ima 40bit\_nu adresu, dok *data pipe*\_ovi 1÷5 imaju različit samo LSByte)



Slika 14 Adresiranje *data pipe*\_ova

Kada će se paket primiti sa jednog od *data pipe*\_ova, i *data pipe* je podešena da generiše ACK, nRF24L01 generisaće ACK sa adresom jednakom adresi *data pipe* iz koje je paket primljen.

Neka konfiguracijska podešavanja su zajednička, a neka su posebna za sve *data pipe*\_ove.

Sledeća podešavanja su zajednička za sve *data pipe*\_ove:

- CRC dostupan/nedostupan (CRC je uvek dostupan ako je dostupan ESB)
- CRC enkodirana šema
- Širina RX adrese
- Frekvencijski kanal
- LNA dobit
- Izlazna RF snaga

### 2.3.13 Konfiguracija uređaja:

Cela konfiguracija nRF24L01 je definisana vrednostima u nekim konfiguracionim registrima. Svi ovi registri su reupisljivi preko SPI interfejsom.

### 2.4 SPI interfejs:

SPI interfejs je standardni intrfejs sa maksimalnim protokom podataka od 10Mbps. Većina registara su čitljive prirode.

### 2.4.1 Set SPI instrukcija:

U donjem deli teksta su prikazane dostupne komande koje koristi SPI interfejs. Bilo kada je CSN na niskom nivou, interfejs očekuje neku instrukciju. Svaka nova instrukcija mora biti startovana prelazom sa visokog na niskom nivou CSN<sub>a</sub>. U paraleli sa SPI instrukcionoj reči postavljena na MOSI pin, STATUS<sub>ni</sub> registar je pomeren serijskim izlazom na MISO pinu. SPI komande za serijsko pomeranje su sledećeg formata:

- < instrukciona reč: MSBit → LSBit (jedan bajt) >
- < bajtovi podataka: LSByte → MSByte, u svakom bajtu MSBit je prvi >

Tabela 6 SPI instrukcije

Ime instrukcije	Format instrukcije (binarni)	# Bajti podataka	Operacija
R_REGISTAR	000A AAAA	1 → 5 LSByte prvi	Čitanje registrte. AAAA=5bit <sub>ne</sub> adrese memorijske mape.
W_REGISTAR	001A AAAA	1 → 5 LSByte prvi	Upisivanje u registrima. AAAA=5bit <sub>ne</sub> adrese memorijske mape. <i>Izvršavanje jedino moguće u power down i standby modu.</i>
R_RX_PAYLOAD	0110 0001	1 → 32 LSByte prvi	Čitanje RX korisni podatak: 1-32 bajta. Operacija čitanja biće uvek startovana u bajtu „0“. Korisni podatak biće obrisan iz FIFO <sub>a</sub> nakon čitanja. Korišćenje u RX modu.
W_TX_PAYLOAD	1010 0000	1 → 32 LSByte prvi	Upis TX korisni podatak: 1-32 bajta. Operacija upisa biće uvek startovana u bajtu „0“. Korišćenje u TX modu.
FLUSH_TX	1110 0001	0	Flush TX FIFO, korišćenje u TX modu.
FLUSH_RX	1110 0010	0	Flush RX FIFO, korišćenje u RX modu. Ne može se izvršiti za vreme transmisije ACK, t.j ACK paket bice nekompletan.
REUSE_TX_PL	1110 0011	0	Iskorišćeno za PTX uređaj. Nanovo iskorišćen poslani korisni podatak. Paketi biću preposlati dok je CE na visokom nivou. TX korisni podatak je ponovo upotrebljiv pre aktiviranja W_TX_PAYLOAD ili FLUSH TX aktiviranja.
NOP	1111 1111	0	Bez operacije. Snaga se koristi za čitanje STATUS <sub>nog</sub> registra.

W<sub>registar</sub> i R<sub>registar</sub> mogu operisati kao jedno ili višebajtni registri. Kada rade kao višebajtni registri, jedan će pisati ili čitati MSBit prvog LSBajt<sub>a</sub>. Upis se može završiti pre upisa svih bajtova u višebajtnom registru. U ovom slučaju neupisani MSBajt (ovi) ostaće nepromenjem t.j LSByte RX\_ADDR\_P0 može biti modifikovan upisom samo jednog bajta u RX\_ADDR\_P0 registru. Stanje STATUS<sub>nog</sub> registra biće uvek očitano preko MISO nakon prelaska CSN<sub>a</sub> sa višeg na niži nivo.

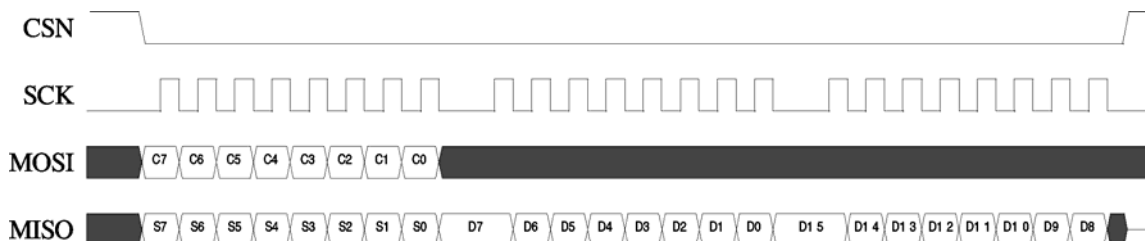
## 2.4.2 Prekid:

nRF24L01 ima IRQ (*Interrupt Request*) pin koji je aktivan na niskom nivou. Prekid biće aktiviran ako su TX\_DS, RX\_DR ili MAX\_RT u STATUS\_nom registru setovani na visokom nivou. Kada mikrokontroler upiše jedinicu na prekidnom izvoru, IRQ pin biće neaktivan. Prekidni deo maskiranja CONFIG registra je iskorišćen da maskira prekidne izvore koji dozvoljavaju setovanje IRQ pina na niskom nivou. Setovanje jednog od MASK bitova na visokom nivou onemogućuje odgovarajući prekidni izvor. Bez naknadnog definisanja svi prekidni izvori su omogućeni.

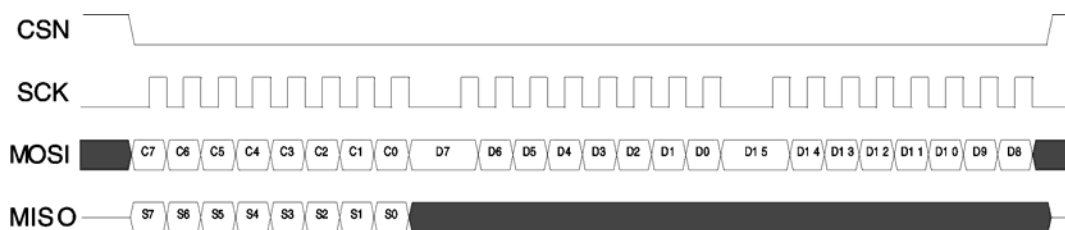
## 2.4.3 SPI tajming (vremensko podešavanje):

Interfejs podržava SPI. SPI operisanje i vremensko podešavanje prikazano je na slikama 15, 16 i 17 i u tabelama 7÷12. Uređaj mora biti u jedan u *Standby* ili u *Power Down* modu pre upisa u CONFIG registru. U slikama su iskorišćene sledeće notacije:

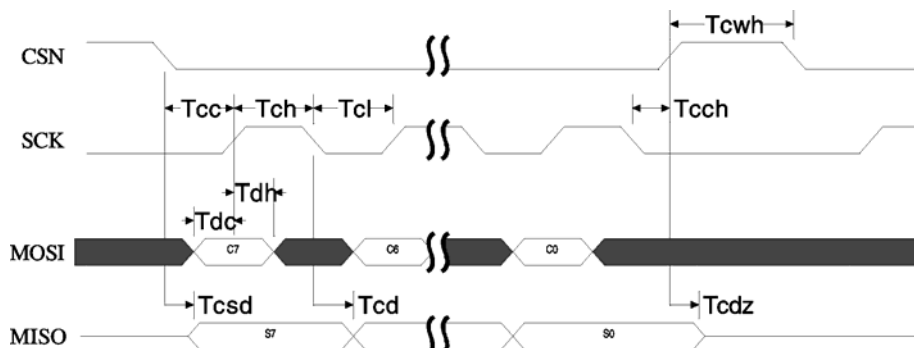
- C<sub>n</sub> – SPI instrukcioni bit
- S<sub>n</sub> – bit statusnog registra
- D<sub>n</sub> – bit podataka



Slika 15 SPI operacija čitanja



Slika 16 SPI operacija upisa



Slika 17 SPI vremenski dijagram bez operacije

U tabelama 7÷11 prikazani su vremenski parametri SPI interfejsa za različite vrednosti *pull up* otpornika i *Clload* kondenzatora. Na slici 18 data je šema povezivanja ovih elemenata.

Tabela 7 SPI vremenski parametri (Clload= 5pF)

Parametar	Simbol	Min	Max	Jedinica
Podaci do podešavanja SCK	Tdc	2		ns
SCK do držanja podataka	Tdh	2		ns
CSN do validnih podataka	Tcsd		38	ns
SCK do validnih podataka	Tcd		55	ns
Nisko vreme SCK	Tcl	40		ns
Visoko vreme SCK	Tch	40		MHz
SCK frekvencija	Fsck	0	8	ns
Vreme uspona i pada SCK	Tr, Tf		100	ns
CSN do SCK podešavanja	Tcc	2		ns
SCK do CSN držanja	Tcch	2		ns
Vreme aktivnost CSN a	Tcwh	50		ns
CSN do visoke impedanse na izlazu	Tcdz		38	ns

Tabela 8 SPI vremenski parametri (Clload= 10pF)

Parametar	Simbol	Min	Max	Jedinica
Podaci do podešavanja SCK	Tdc	2		ns
SCK do držanja podataka	Tdh	2		ns
CSN do validnih podataka	Tcsd		42	ns
SCK do validnih podataka	Tcd		58	ns
Nisko vreme SCK	Tcl	40		ns
Visoko vreme SCK	Tch	40		ns
SCK frekvencija	Fsck	0	8	MHz
Vreme uspona i pada SCK	Tr, Tf		100	ns
CSN do SCK podešavanja	Tcc	2		ns
SCK do CSN držanja	Tcch	2		ns
Vreme aktivnost CSN a	Tcwh	50		ns
CSN do visoke impedanse na izlazu	Tcdz		42	ns

Tabela 9 SPI vremenski parametri (Rpull = 10KΩ, Clload = 50pF)

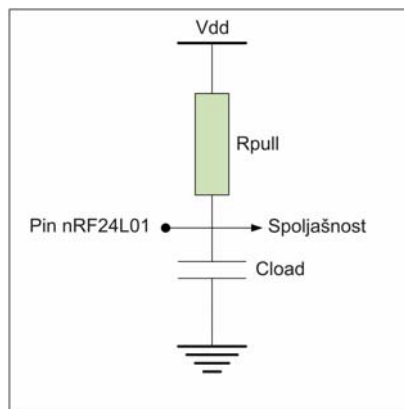
Parametar	Simbol	Min	Max	Jedinica
Podaci do podešavanja SCK	Tdc	2		ns
SCK do držanja podataka	Tdh	2		ns
CSN do validnih podataka	Tcsd		75	ns
SCK do validnih podataka	Tcd		86	ns
Nisko vreme SCK	Tcl	40		ns
Visoko vreme SCK	Tch	40		ns
SCK frekvencija	Fsck	0	5	MHz
Vreme uspona i pada SCK	Tr, Tf		100	ns
CSN do SCK podešavanja	Tcc	2		ns
SCK do CSN držanja	Tcch	2		ns
Vreme aktivnost CSN a	Tcwh	50		ns
CSN do visoke impedanse na izlazu	Tcdz		75	ns

Tabela 10 SPI vremenski parametri ( $R_{pull} = 10K\Omega$ ,  $C_{load} = 100pF$ )

Parametar	Simbol	Min	Max	Jedinica
Podaci do podešavanja SCK	Tdc	2		ns
SCK do držanja podataka	Tdh	2		ns
CSN do validnih podataka	Tcsd		116	ns
SCK do validnih podataka	Tcd		123	ns
Nisko vreme SCK	Tcl	40		ns
Visoko vreme SCK	Tch	40		ns
SCK frekvencija	Fsck	0	4	MHz
Vreme uspona i pada SCK	Tr, Tf		100	ns
CSN do SCK podešavanja	Tcc	2		ns
SCK do CSN držanja	Tcch	2		ns
Vreme aktivnost CSN a	Tcwh	50		ns
CSN do visoke impedanse na izlazu	Tcdz		116	ns

Tabela 11 SPI vremenski parametri ( $R_{pull} = 50K\Omega$ ,  $C_{load} = 50pF$ )

Parametar	Simbol	Min	Max	Jedinica
Podaci do podešavanja SCK	Tdc	2		ns
SCK do držanja podataka	Tdh	2		ns
CSN do validnih podataka	Tcsd		75	ns
SCK do validnih podataka	Tcd		85	ns
Nisko vreme SCK	Tcl	40		ns
Visoko vreme SCK	Tch	40		ns
SCK frekvencija	Fsck	0	5	MHz
Vreme uspona i pada SCK	Tr, Tf		100	ns
CSN do SCK podešavanja	Tcc	2		ns
SCK do CSN držanja	Tcch	2		ns
Vreme aktivnost CSN a	Tcwh	50		ns
CSN do visoke impedanse na izlazu	Tcdz		75	ns



Slika 18 Raspored otpornika  $R_{pull}$  i kondenzatora  $C_{load}$



## 2.5 Memorijska mapa

Adresa (Hex)	Mnemonik	Bit	Resetna vrednost	Tip	Opis
<b>00</b>	<b>CONFIG</b>				Konfiguracioni registar
	Rezervisano	7	0	R/W	Dozvoljena samo nula
	MASK_RX_DR	6	0	R/W	Maskiranje prekida RX_DR 1: prekid nije odražen na IRQ pin 0: Odraženi RX_DS kao aktivni prekid na IRQ pinu
	MASK_TX_DS	5	0	R/W	Maskiranje prekida TX_DS 1: prekid nije odražen na IRQ pin 0: Odraženi TX_DS kao aktivni prekid na IRQ pinu
	MASK_MAX_RT	4	0	R/W	Maskiranje prekida MAX_RT 1: prekid nije odražen na IRQ pin 0: Odraženi MAX_RT kao aktivni prekid na IRQ pinu
	EN_CRC	3	1	R/W	Omogućen CRC. Visoko nivo ako je jedan od bitova u EN_AA na visokom nivou.
	CRCO	2	0	R/W	Šifrovana šema CRCO "0" – 1 bajt "1" – 2 bajtova
	PWR_UP	1	0	R/W	1: <i>Power up</i> , 0: <i>Power down</i>
	PRIM_RX	0	0	R/W	1: PRX, 0: PTX
<b>01</b>	<b>EN_AA Enhanced Shock Burst™</b>				Omogućena funkcija auto ACK
	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	ENAA_P5	5	1	R/W	Omogućen auto ACK za <i>data pipe5</i>
	ENAA_P4	4	1	R/W	Omogućen auto ACK za <i>data pipe4</i>
	ENAA_P3	3	1	R/W	Omogućen auto ACK za <i>data pipe3</i>
	ENAA_P2	2	1	R/W	Omogućen auto ACK za <i>data pipe2</i>
	ENAA_P1	1	1	R/W	Omogućen auto ACK za <i>data pipe1</i>
	ENAA_P0	0	1	R/W	Omogućen auto ACK za <i>data pipe0</i>
<b>02</b>	<b>EN_RXADDR</b>				Omogućeno RX adresiranje
	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	ERX_P5	5	0	R/W	Omogućena <i>data pipe 5</i>
	ERX_P4	4	0	R/W	Omogućena <i>data pipe 4</i>
	ERX_P3	3	0	R/W	Omogućena <i>data pipe 3</i>
	ERX_P2	2	0	R/W	Omogućena <i>data pipe 2</i>
	ERX_P1	1	1	R/W	Omogućena <i>data pipe 1</i>
	ERX_P0	0	1	R/W	Omogućena <i>data pipe 0</i>

<b>Adresa (Hex)</b>	<b>Mnemonic</b>	<b>Bit</b>	<b>Resetna vrednost</b>	<b>Tip</b>	<b>Opis</b>
<b>03</b>	<b>SETUP_AW</b>				Postavljanje širine adrese
	Rezervisano	7:2	000000	R/W	Dozvoljeno samo "000000"
	AW	1:0	11	R/W	RX/TX širina adresnog polja: "00" – nepropisno "01" – 3bajta "10" – 4bajta "11" – 5bajta LSBajt biće iskorišćen ako je širina adrese manja od 5bajtova
<b>04</b>	<b>SETUP_RETR</b>				Postavljanje auto retransmisije
	ARD	7:4	0000	R/W	Kašnjenja ART_a: "0000" – čekanje 250us "0001" – čekanje 500us "0010" – čekanje 750us ... "1111" – čekanje 4000us (Kašnjenje je definisano od kraja jednog prenosa do početka sledećeg prenosa podataka)
	ARC	3:0	0011	R/W	Brojač auto retransmisije: "0000" – onemogućena ART "0001" – do 1 retransmisije "1111" – do 15 retransmisija
<b>05</b>	<b>RF_CH</b>				RF kanal
	Rezervisano	7	0	R/W	Dozvoljena samo nula
	RF_CH	6:0	0000010	R/W	Postavljanje frekvencijskog kanala operisanja nRF24L01
<b>06</b>	<b>RF_SETUP</b>				RF Setup_ni registar
	Rezervisano	7:5	000	R/W	Dozvoljeno samo "000"
	PLL_LOCK	4	0	R/W	PLL lock signal (samo za test)
	RF_DR	3	1	R/W	Protok podataka: "0" – 1 Mbps "1" – 2 Mbps
	RF_PWR	2:1	11	R/W	Postavljanje izlazne RF snage u TX modu: "00" – -18dBm "01" – -12dBm "10" – -6dBm "00" – 0dBm
	LNA_HCURR	0	1	R/W	Postavljanje LNA gain_a
<b>07</b>	<b>STATUS</b>				Statusni registar (U paraleli sa SPI instrukcione reči primenjen na MOSI pin, izlaz statusnog registara je serijski pomeren na MISO pinu)
	Rezervisano	7	0	R/W	Dozvoljena samo nula
	RX_DR	6	0	R/W	Podaci spremni, RX FIFO prekid. Postavljen na visokom

					nivou kada je novi podatak donet u RX FIFO. Upisati "1" za brisanje bita
	TX_DS	5	0	R/W	Podaci poslani, TX FIFO prekid. Postavljen na visokom nivou kada je paket poslat u TX. Ako je AUTO_ACK aktiviran, ovaj bit biće "1" kada je primljen ACK. Upisati "1" za brisanje bita
<b>Adresa (Hex)</b>	<b>Mnemonik</b>	<b>Bit</b>	<b>Resetna vrednost</b>	<b>Tip</b>	<b>Opis</b>
	MAX_RT	4	0	R/W	Maksimalan broj pokušaja TX prekida. Upisati "1" za brisanje bita. Ako je MAX_RT postavljen mora biti obrisano da bi omogućio dalju komunikaciju.
	RX_P_NO	3:1	111	R	Broj <i>Data pipe_a</i> za korisni podatak i čitanje RX FIFO_a. 000 – 101: Broj <i>data pipe_a</i> 110 – nije iskorišćen 111 – prazan RX FIFO
	TX_FULL	0	0	R	Flag punog TX FIFO_a: 1: TX FIFO pun. 0: dostupne lokacije TX FIFO
<b>08</b>	<b>OBSERVE_TX</b>				Posmatranje predajnog registra
	PLOS_CNT	7:4	0	R	Broj izgubljenih paketa. Brojač se može resetovati upisom u RF_CH registru
	ARC_CNT	3:0	0	R	Broj repositivnih paketa. Brojač se resetuje kada je slanje završeno i je novi paket spreman za slanje.
<b>09</b>	<b>CD</b>				
	Rezervisano	7:1	0000000	R	
	CD	0	0	R	Carrier detect
0A	RX_ADDR_P0	39:0	0xE7E7E7E7E7	R/W	Primljena adresa od <i>data pipe 0</i> . Maksimalna dužina 5 bajtova. (LSbajt je prvi upisan. Upis broja bajtova definiše se u SETUP_AW registru)
0B	RX_ADDR_P1	39:0	0xC2C2C2C2C2	R/W	Primljena adresa od <i>data pipe 1</i> . Maksimalna dužina 5 bajtova. (LSbajt je prvi upisan. Upis broja bajtova definiše se u SETUP_AW registru)
0C	RX_ADDR_P2	7:0	0xC3	R/W	Primljena adresa od <i>data pipe 2</i> . Samo LSB. MSbajtivi (39:8) su isti kao I kod RX_ADDR_P1
0D	RX_ADDR_P3	7:0	0xC4	R/W	Primljena adresa od <i>data pipe 3</i> . Samo LSB. MSbajtivi (39:8) su

					isti kao I kod RX_ADDR_P1
0E	RX_ADDR_P4	7:0	0xC5	R/W	Primljena adresa od <i>data pipe 4</i> . Samo LSB. MSbajtimi (39:8) su isti kao I kod RX_ADDR_P1
0F	RX_ADDR_P5	7:0	0xC6	R/W	Primljena adresa od <i>data pipe 5</i> . Samo LSB. MSbajtimi (39:8) su isti kao I kod RX_ADDR_P1
<b>10</b>	<b>TX_ADDR</b>	39: 0	0xE7E7E7E7E7	R/W	Slanje adrese. Koristi se samo za PTX uređaj (upisan je prvo
<b>Adresa (Hex)</b>	<b>Mnemonic</b>	<b>Bit</b>	<b>Resetna vrednost</b>	<b>Tip</b>	<b>Opis</b>
					LSBajti). Postaviti RX_ADDR_P0 jednaku ovoj adresi zbog auto ACK ako je PTX uređaj sa omogućenim Enhanced Shock Burst™
<b>11</b>	<b>RX_PW_P0</b>				
	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	RX_PW_P0	5:0	0	R/W	Broj bajtova RX korisnog podataka u <i>data pipe0</i> (1÷32 B) 0 – <i>Pipe</i> ("cev") nije iskorišćen 1 – 1 bajt ... 32 – 32 bajta
<b>12</b>	<b>RX_PW_P1</b>				
	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	RX_PW_P1	5:0	0	R/W	Broj bajtova RX korisnog podataka u <i>data pipe1</i> (1÷32 B) 0 – <i>Pipe</i> ("cev") nije iskorišćen 1 – 1 bajt ... 32 – 32 bajta
<b>13</b>	<b>RX_PW_P2</b>				
	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	RX_PW_P2	5:0	0	R/W	Broj bajtova RX korisnog podataka u <i>data pipe2</i> (1÷32 B) 0 – <i>Pipe</i> ("cev") nije iskorišćen 1 – 1 bajt ... 32 – 32 bajta
<b>14</b>	<b>RX_PW_P3</b>				
	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	RX_PW_P3	5:0	0	R/W	Broj bajtova RX korisnog podataka u <i>data pipe3</i> (1÷32 B) 0 – <i>Pipe</i> ("cev") nije iskorišćen 1 – 1 bajt ... 32 – 32 bajta
<b>15</b>	<b>RX_PW_P4</b>				

	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	RX_PW_P4	5:0	0	R/W	Broj bajtova RX korisnog podataka u <i>data pipe4</i> (1÷32 B) 0 – <i>Pipe</i> ("cev") nije iskorišćen 1 – 1 bajt ... 32 – 32 bajta
<b>Adresa (Hex)</b>	<b>Mnemonik</b>	<b>Bit</b>	<b>Resetna vrednost</b>	<b>Tip</b>	<b>Opis</b>
<b>16</b>	<b>RX_PW_P5</b>				
	Rezervisano	7:6	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	RX_PW_P5	5:0	0	R/W	Broj bajtova RX korisnog podataka u <i>data pipe5</i> (1÷32 B) 0 – <i>Pipe</i> ("cev") nije iskorišćen 1 – 1 bajt ... 32 – 32 bajta
<b>17</b>	<b>FIFO_STATUS</b>				Status FIFO registra
	Rezervisano	7	0	R/W	Dozvoljena samo nula
	TX_REUSE	6	0	R	Ako je "1" ponovo se može upotrebiti poslednji poslani paket. Paket biće poslat ponovo ako je CE na visokom nivou. TX_REUSE se postavlja pomoću SPI instrukcije REUSE_TX_PL i resetuje pomoću W_TX_PAYLOAD ili FLUSH_TX instrukcije.
	TX_FULL	5	0	R	Flag punog TX FIFO_a: 1: TX FIFO pun, 0: dostupne lokacije u TX FIFO
	TX_EMPTY	4	1	R	Flag praznog TX FIFO_a: 1: TX FIFO prazan, 0: podaci u TX FIFO
	Rezervisano	3:2	00	R/W	Dozvoljeno samo "00"
	RX_FULL	1	0	R	Flag punog RX FIFO_a: 1: RX FIFO pun, 0: dostupne lokacije u RX FIFO
	RX_EMPTY	0	1	R	Flag praznog RX FIFO_a: 1: RX FIFO prazan, 0: podaci u RX FIFO
N/A	TX_PLD	255: 0	X	W	Upisan korisni podatak u TX registrom posebnom SPI komandom (1–32Bajta). Ovaj registar je implementovan kao tro nivojni FIFO. Koristi se samo u TX modu.
N/A	RX_PLD	255: 0	X	R	Upisan korisni podatak u RX registrom posebnom SPI komandom (1–32Bajta). Ovaj registar je implementovan kao tro nivojni FIFO. Svi prijemni kanali dele isti FIFO registar.

## 2.6 Veza Enhanced Shock Burst™\_a

### 2.6.1 Minimalna konfiguracija i primer konfiguracije:

- Konfiguracija:

PTX

- Uključivanje napajanja za PTX.
- Upis 0X0a u CONFIG registru.

Beleška: Uređaj biće konfigurisan kao PTX uređaj sa fabrički podešenim parametrima. Ova podešavanja se mogu naći u memorijskoj mapi kao reset vrednosti.

PRX

- Uključivanje napajanja za PRX uređaj i setovati PRIM\_RX bit na visokom nivou.
- Upisati 0X0b u CONFIG registru.
- Setovati širinu korisne informacije (pr. 8 bajtova za *data pipe* „0“).
- Upisati 8 u RX\_PW\_P0.
- Setovati CE na visokom nivou i PRX biće spreman da primi 8Byte paketa na difoltnoj adresi i frekvenciji.

- Komunikacija:

PTX

- *Upload* 8Byte podataka u TX FIFO PTX\_a.
- Izvršiti SPI instrukciju: W\_TX\_PAYLOAD <korisni podatak>.
- Visoki impuls na CE.
- Čekati prekid (IRQ pin na niskom nivou)
- Proveriti STATUS\_ni registar za TX\_DS prekid (poslani podaci).

Neobavezno: *Power Down* mod moći će da se uspostavi nakon slanja podataka.

Upisati 0X08 u CONFIG registru.

PRX

- Postaviti CE na visokom nivou.
- Čekati prekid (IRQ pin na niskom nivou).
- Proveriti STATUS\_ni registar za RX\_DR prekid (podaci spremni).
- Pročitati RX korisni podatak.
- Izvršiti SPI instrukciju R\_RX\_PAYLOAD

Neobavezno: *Standby I* mod moći će da se uspostavi nakon primljanje paketa i setovanje CE na niskom nivou.

Beleška: PRX poslaće neki ACK paket PTX\_u nakon uspešno primljenog paketa. Ovo biće obavljeno korektno ako je CE pin setovan na niskom nivou odmah nakon RX\_DR prekida. Pored toga preporučljivo je da se drži CE na visokom nivou, dovoljno da se uhvati potencijal retransmisije od PTX u slučaju izgubljenih ACK\_a (PRX takođe ACK\_uje pakete koji su pre poslani). Ako je PRX odmah isključen i ACK paket je izgubljen, PTX će preposlati paket više puta pre nego što ARC bude dostignut, prema tome nepotrebno disipiraće energiju.

Neobavezno: *Power Down* mod moći će da se uspostavi iz *Standby I* moda:  
Upisati 0X09 u CONFIG registru.

### 2.6.2 Konfiguracija za kopatibilnost sa nRF24XX:

Postavljanje nRF24L01 kako bi primio podatak od nekog nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2:

- Korišćenjem istu CRC konfiguraciju kao što i nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 koristi.
- Postavljanjem PWR\_UP i PRIM\_RX bit na visokom nivou.
- Onemogućivanjem AUTO ACK na *data pipe* koja će biti adresirana.
- Korišćenjem istu širinu adrese kao PTX uređaj.
- Selektovanjem protok podataka 1Mbit/s na oba uređaja (nRF24L01 i nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2).
- Postavljanjem korektne širine korisne informacije na *data pipe* koja je adresirana.
- Postavljanjem CE na visokom nivou.

Postavljanje nRF24L01 kako bi poslao podatak od nekog nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2:

- Korišćenjem istu CRC konfiguraciju kao što i nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 koristi.
- Postavljanjem PRIM\_RX bita na niskom nivou.
- Postavljanjem ARC na „0“ kako bi onemogućili auto retransmisionu funkciju.
- Korišćenjem istu širinu adrese kao sto i nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 koriste.
- Korišćenjem isti frekvencijski kanal kao što i nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 koriste.
- Selektovanjem protok podataka 1Mbit/s na oba uređaja (nRF24L01 i nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2).
- Postavljanjem PWR\_UP bita na visokom nivou.
- Takt korisne informacije treba imati istu dužinu kako je nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 konfigurisan da prima.
- Impuls na CE za slanje paketa.

## 2.7 Opis paketa:

Enhanced Shock Burst™ paket sa 1÷32 bajta korisne informacije (*payload*).

Preambula	Adrese 3÷5bita	9 bit	Korisna informacija 1÷32bajta	CRC 0/1/2bajta
/				
Flag bitovi				

Shock Burst™ paket kompatibilan sa nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 uređaje.

Preambula	Adrese 3÷5bita	Korisna informacija 1÷32bajta	CRC 0/1/2bajta
-----------	----------------	-------------------------------	----------------

Tabela 12 Opis paketa podataka

Preambula	- Preambula se koristi da bi detektovala nivoa „0“ i „1“.
Adrese	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polje adrese sadrži adrese primanja</li> <li>- Adrese mogu biti širine 3, 4 ili 5 bajtova.</li> <li>- Adrese polja mogu biti posebno konfigurisane za sve RX kanale i TX kanal.</li> <li>- Adrese su automatski premešćene sa prijemnih paketa.</li> </ul>
Flag_ovi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PID: 2bita su inkrementirana za svaku novu korisnu informaciju.</li> <li>- 7 bitova su rezervisana za kopatibilnost paketa sa budućim proizvoda.</li> <li>- Nisu iskorišćeni z akompatibilnost sa nRF2401/nRF24E1.</li> </ul>
Korisna informacija	- Širine 1÷32 bajtova.
CRC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CRC je neobavezan.</li> <li>- Širina CRC_a 0÷2 bajtova.</li> <li>- 8 bita CRC za proveru polinoma <math>X^8+X^2+X+1</math></li> <li>- 16 bita CRC za proveru polinoma <math>X^{16}+X^{12}+X^5+1</math></li> </ul>

## 2.8 Važna vremena podataka:

Sledeća vremena su primenjena za operisanje nRF24L01:  
nRF24L01 informaciona vremena:

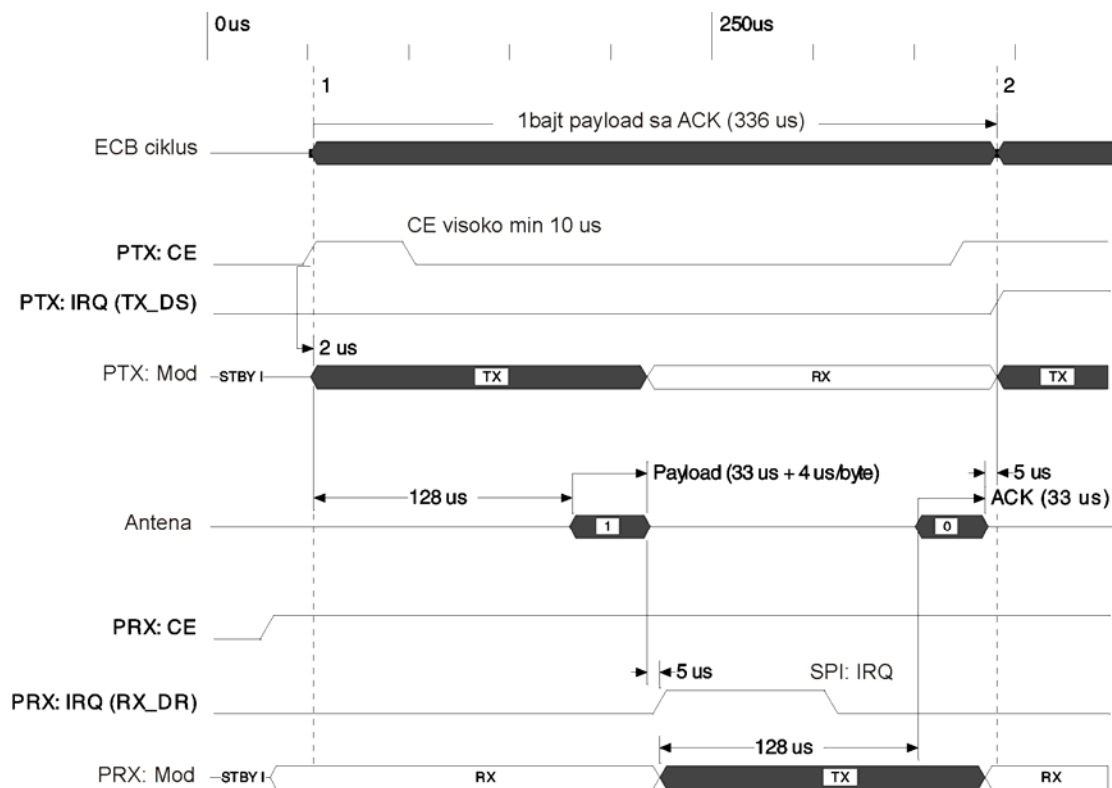
Tabela 13 Vremena operisanja nRF24L01

Tajming nRF24L01	Max.	Min.	Ime	Komentar
<i>PowerDown</i> → <i>Standby mod</i>	1.5ms		Tpd2stby	Interni kristalni oscilator
<i>PowerDown</i> → <i>Standby mod</i>	150us		Tpd2stby	Sa spoljašnjim taktom
<i>Standby modovi</i> →TX/RX	130us		Tstby2a	
Min. visoki nivo CE_a		10us	Thce	
Kašnjenje od CE ivice do niski nivo CSN_a		4us	Tpece2csn	

Kada je nRF24L01 u *Power Down* modu u *Standby* modu mora ući za 1.5ms, pre nego što uđe u jedan od TX ili RX modova. Ako se koristi spoljašnji takt ovo kašnjenje je umanjeno na 150us, kao što je prikazano u tabeli 13. Konfiguraciona reč biće izgubljena ako VDD je isključen tako da uređaj mora biti konfigurisan pre odlaska u jedan od TX ili RX modova.



Enhanced Shock Burst™ vremenski dijagram:



Paket:

Adrese: 5bajtova

CRC: 1bajt

Payload (korisna informacija): 1bajt

Slika 19 Vremenski dijagram Enhanced Shock Bursta™\_a za jedan paket *upload\_a* (2Mbps)

Na slici 19 je prikazano slanje jednog paketa i ACK paketa. Učitavanje korisne informacije u PTX uređaju nije prikazano na slici. PRX uređaj je setovan u RX modu (CE=1), PTX uređaj je setovan u TX modu (CE=1 za min. 10us). Nakon 130us slanje počinje i završava se nakon 37us (1bajt korisne informacije). Slanje je završeno, PTX uređaj se automatski setuje u RX mod kako bi primio ACK od PRX uređaja. Nakon što je PTX uređaj primio ACK, on generiše prekid mikrokontroleru (IRQ(TX\_DS) => TX\_data\_send). Nakon što je PRX uređaj primio paket, od takode generiše prekid mikrokontroleru (IRQ(RX\_DR) => RX\_data\_ready).

## 2.9 Periferalna RF informacija:

Izlaz antene:

Izlazni pinovi antena ANT1 i ANT2 proizvode simetričan izlaz antene. Pinovi moraju imati DC liniju do VDD, jedan od njih preko RF, a drugi preko centralne tačke dipol antene. Uključena na  $15\Omega + j88\Omega$  (simulirane vrednosti) je preporučljiva za maksimalnu izlaznu snagu (0dBm).

Uključivanjem na nižom impedansom (pr. 50Ω) može se dobiti umrežavanje između obe antene (ANT1 i ANT2).

Specifikacija kristalnog oscilatora:

Preciznost frekvencije uključuje početnu tačnost (toleranciju) i stabilnost na temperaturi i starosti.

Tabela 14 Specifikacija kristala nRF24L01

Frekvencija	CI	ESR max	Comax	Frekvencijska tačnost
16MHz	8 - 16 pF	100 Ω	7.0pF	±60ppm

Postići nisku potrošnju i brzo vreme starta, preporučljivo je specificovati kristal sa niskom vrednošću kondenzatora za uključivanje kristala. Ovo specificiranje se takođe može ostvariti sa paralelnom ekvivalentnom kapacitivnošću  $C_0$ , ali to povećava cenu kristala. Tipična vrednost  $C_0=1.5\text{pF}$ .

Kondenzator za uključivanje kristala,  $C_I$  dobija se:

$$C_I = (C_1' * C_2' / (C_1' + C_2'))$$

Gde je:

$$C_1' = C_1 + C_{pcb1} + C_{I1} \quad \text{i} \quad C_2' = C_2 + C_{pcb2} + C_{I2}$$

$C_1$  i  $C_2$  su SMD kondenzatori kao što je pokazano u aplikacionoj šemi.  $C_{pcb1}$  i  $C_{pcb2}$  su parazitne kapacitivnosti na ploči.  $C_{I1}$  i  $C_{I2}$  su kapacitivnosti XC1 i XC2 pinova kristala. Njihove tipične vrednosti iznose 1pF.

Podela nRF24L01 kristala sa mikrokontrolerom:

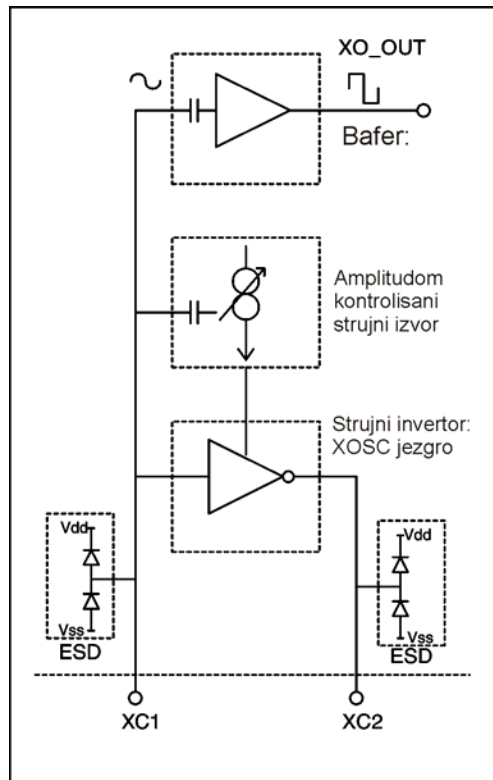
Kada se koristi mikro kontroler a vođenje kristala na ulazu XC1 nRF24L01 predajnika moraju biti ispunjeni sledeći uslovi.

Parametri kristala:

Kada se ulazni takt nRF24L01 dovodi iz mikro kontrolera, zahtevnost  $C_I$  kondenzatora setovana je samo sa strane mikrokontrolera. Tačnost frekvencije ( $\pm 60\text{ppm}$ ) je još uvek potrebna za uzimanje funkcionalnu RF vezu.

Ulazna amplituda kristala i potrošnja energije:

Ulazni signali ne poseduju amplitude za prekoračenje graničnog napona. Prekoračenje pobudiće ESD strukturu i radio performanse beće degradirane. Ako se nRF24L01 testira sa RF izvora bez DC ofset napona kao izvor, ulazni signal će otići ispod nulte vrednosti, sa kojom nije prihvatljiv.



Slika 20 Principijelna šema kristalnog oscilatora

Kristalni oscilator nRF24L01 je regulisan amplitudom. Za postizanje niske potrošnje energije i takođe dobar odnos signal-šum kada se koristi spoljašni takt, preporučljivo je da se koristi neki ulazni signal veći od 0.4V. Kada je taktovanje spoljašno, XC2 se ne koristi pa se može ostaviti kao otvoreni pin.

### 3. Eksperimentalni rezultati i praktična realizacija

#### 3.1 Električna šema nRF24L01 primopredajnika

Na slici 21 pretstavljena je električna šema nRF24L01 čip primopredajnika sa neophodnom pasivnom mrežom elemenata. Pasivni deo kola sastoji se iz mreže za antensko prilagođavanje, kristalom sa *Kolpic*-ovim oscilatorom i ostala pasivna elementa. Mreža za antensko prilagođavanje prilagođava diferencijalni (simetrični) izlaz čipa na nesimetričnu dipol antenu. Nesimetričnost antene prouzrokovana je zbog prikačivanja jednog njenog kraja na masu (0V). Impedansa antene iznosi  $50\Omega$ . Kristal sa *Kolpic*-ovim oscilatorom predstavlja spoljašni takt nRF24L01 primopredajnika. Frekvencija oscilovanja iznosi 16MHz.

Uloga ostalih pasivnih elemenata je:

- Otpornik R2 definiše (uspostavlja) jednosmerni režim rada primopredajnika. Preporučljivo je da ovaj otpornik bude veoma precizan t.j njegova tolerancija mala (1%).
- Kondenzator C7 pretstavlja kondenzator integrisanog PLL\_a (*Phase Locked Loop*).
- Kondenzatori služe za blokiranje napona VDD na masi.

##### 3.1.1 Komponente kola.

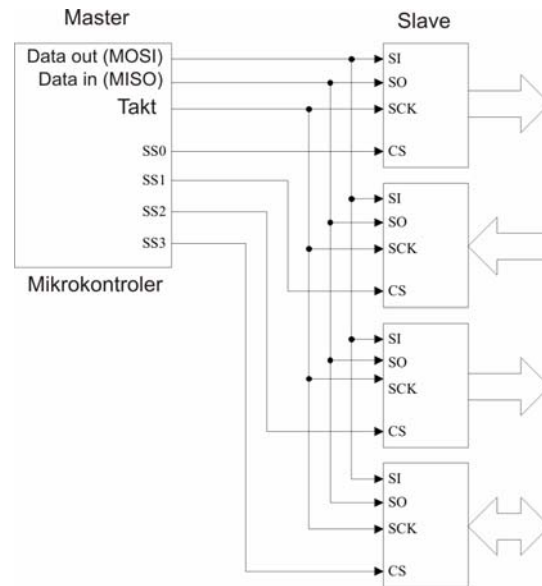
U tabeli 15 prikazane su sve komponente kola sa svojim vrednostima.

Tabela 15 Komponente nRF24L01 primopredajnika.

Komponenta	Vrednost	SMD veličina	Opis, tolerancija
C1	22pF	0402	NPO, +/- 2%, 50V
C2	22pF	0402	NPO, +/- 2%, 50V
C3	2.2nF	0402	X7R, +/- 10%, 50V
C4	4.7pF	0402	NPO, +/- 0.25pF, 50V
C5	1.5pF	0402	NPO, +/- 0.1pF, 50V
C6	1pF	0402	NPO, +/- 0.1pF, 50V
C7	33nF	0402	X7R, +/- 10%, 50V
C8	1nF	0402	X7R, +/- 10%, 50V
C9	10nF	0402	X7R, +/- 10%, 50V
L1	8.2nH	0402	+/- 5%
L2	2.7nH	0402	+/- 5%
L3	3.9nH	0402	+/- 5%
R1	1M $\Omega$	0402	+/- 10%
R2	22K $\Omega$	0402	+/- 1%
U1	nRF24L01	QFN20 4x4	
X1	16MHz	/	+/- 60ppm, Cl=12pF

### 3.1.2 SPI komunikacija.

Komunikacija između PIC18F242 mikrokontrolera i primopredajnika nRF24L01 ostvarena je SPI interfejsom. SPI (*Serial Peripheral Interface*) sistemski interfejs sadrži jedan *master* (glavni) uređaj i jedan ili više *slave* uređaja kao što je prikazano na slici 22.



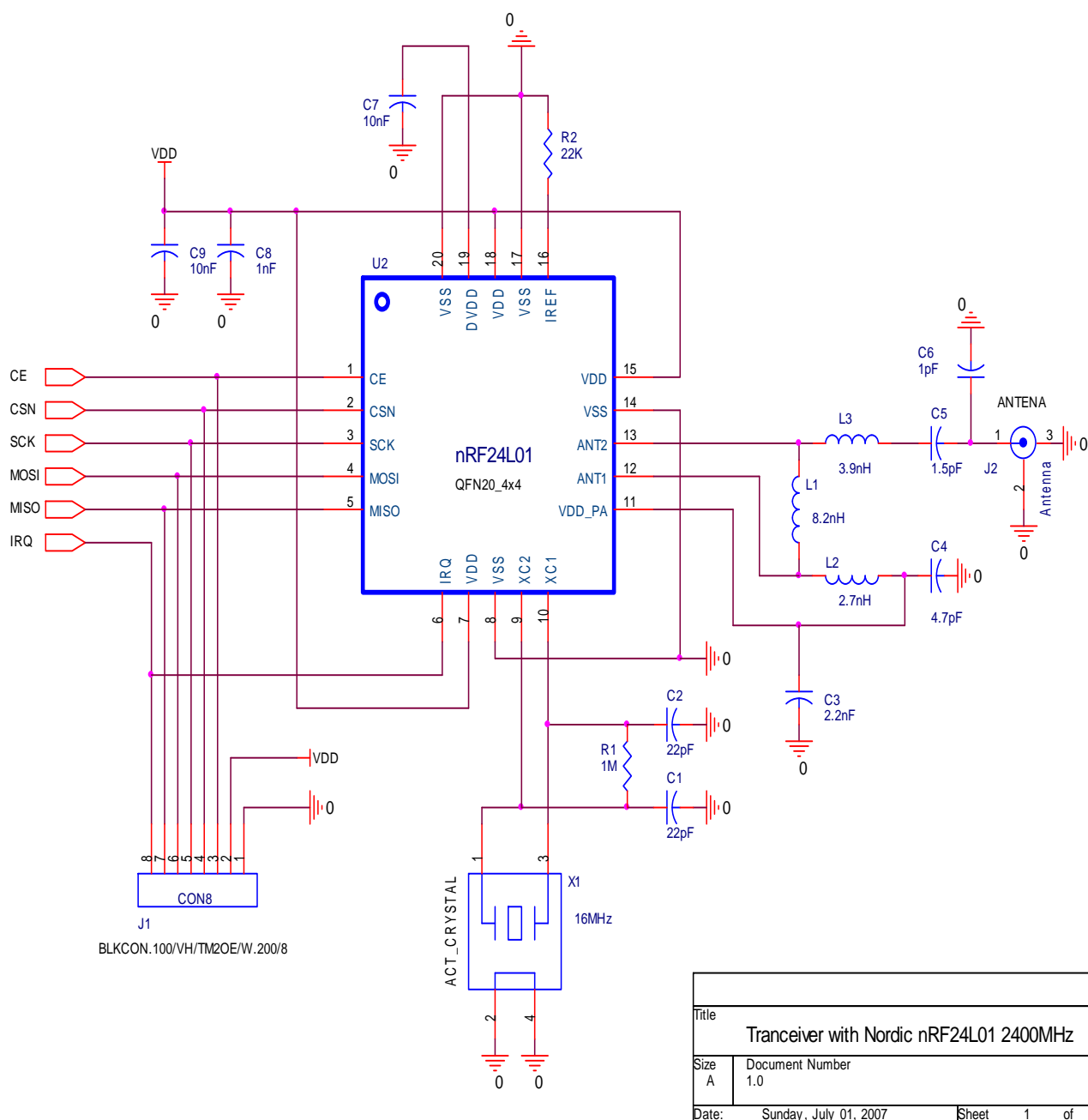
Slika 22

U ovom slučaju kao *master* uređaj koristi se PIC18F242 mikrokontroler, a *slave* predstavlja primopredajnik nRF24L01.

SPI je četvorožičani sinhronizacioni interfejs. Transfer podataka koristi sledeće četiri linije:

- MOSI (*Master Out Slave In*) predstavlja izlaz mikrokontrolera, a ulaz primopredajnika.
- MISO (*Master In Slave Out*) predstavlja ulaz mikrokontrolera, a izlaz primopredajnika.
- Takt (SCK) predstavlja serijski takt mikrokontrolera.
- CSB (CSN) predstavlja selektovanje čipa.

Vremenski dijagrami SPI protokola upisa i čitanja dati su u poglavlju 3.3 SPI interfejs.



Slika 21 Električna šema nRF24L01 primopredajnika

### 3.2 Periferija nRF24L01 primopredajnika

nRF24L01 je povezan sa PC računarom preko serijskog porta (RS232). Veza između primopredajnika i računara ostvarena je preko PIC18f242 mikrokontrolera i MAX232 čipa. Na slici 23 prikazana je šema povezivanja nRF24L01, PIC18F242 i MAX232 kola. U kolu postoji jedan glavni (primarni) izvor od 5V, i sekundarni 3.3V, koji se dobija upotrebom TS1117 stabilizatorskog kola u kombinaciji sa dva tantal kondenzatora (C1 i C2) kao na slici 23. Izvor od 5V koristi se za napajanje MAX232 čipa, izvor od 3.3V za napajanje PIC18F242 mikrokontrolera i nRF24L01 primopredajnika. MAX232 kolo koristi se za prilagođavanje na serijski port (RS232). Njegovi RX1 ulaz i TX2 izlaz su direktno povezani na pinove 3 i 2 serijskog porta, respektivno. Dok su RX1 izlaz i TX2 ulaz povezane na portove C.6 i C.7 mikrokontrolera, respektivno. Zbog toga što se MAX232 i PIC18F242 ne napajaju istom vrednošću napona veza između RX1 izlaza i porta C.6 nije direktna. Kao problem koji može da se javi pri direktnoj vezi je veliki ulazni napon na PIC18F242 mikrokontroleru (veći od napona napajanja PIC18F242 mikrokontrolera t.j veći od 3.3V). Taj problem je rešen upotrebom diode D1 i otpornika R1 kao na slici. Sa ovim rešenjem dioda D1 biće uvek inverzno polarisana kada je napon na njenoj katodi veći od 3.3V. Direktna polarizacija diode sledi tek za nižeg napona, koji kao ulaz nije opasan za PIC18F242 mikrokontroler. Na pinovima 9 i 10 mikrokontrolera vezuje se spoljašni kristalni oscilator vrednosti 10MHz. Na pinu 1 dovodi se uvek visoki nivo preko otpornika R4 zbog resetovanja mikrokontrolera, koji je aktivan na niskom nivou. Na pinovima 2 i 3 t.j portovima A.0 i A.1 vezane su LED diode kao signalizacija testiranja *software\_a* koji se implementira na mikrokontroleru. Veza između PIC18F242 mikrokontrolera i nRF24L01 primopredajnika ostvarena je na način prikazan u tabeli 16.

Tabela 16

Br.	nRF24L01 pin	Port mikrokontrolera
1.	CE	PORTC.1
2.	CSN	PORTC.2
3.	SCK	PORTC.3
4.	MISO	PORTC.4
5.	MOSI	PORTC.5
6.	IRQ	PORTB.0

Programi kojima se programiraju mikrokontroleri napisani su u C programskim jezikom. Oni vrše inicijalizaciju i upravljulju sa radom oba nRF24L01 primopredajnika. Jedan od njih je *local* (bazni) i je povezan sa Pc računarom preko serijskog porta kao na slici 23, a drugi je *remote* (udaljeni) koji ne koristi serijski port (slika 23 bez MAX232 čipom). Kodovi su pisani i kompajlirani u MPLAB v8 programskim paketom.

## Glavni *local* kod:

```
void main(void)
{
    unsigned char data; //registar za smeštanje poruke (poslate il primljene)
    unsigned int count; //brojač za for petlju

    Initialize(); //incijalizacija IO, UART, SPI, postavljanje nRF24L01 kao TX

    while(1)
    {
        CheckErrorsUSART();

        // Provera statusnog registra UART_a i videti dali su podaci primljeni. Ako da sledi proces
        while(DataRdyUSART())
        {
            data = ReadUSART(); //get data from UART

            nrf24l01_write_tx_payload(&data, 1, true); //poslati primljeni karakter preko RF

            //čekati sve dok paket se ne pošalje ili nije dostignut maksimalni broj pokušaja
            while(!(nrf24l01_irq_pin_active() && nrf24l01_irq_tx_ds_active()));

            nrf24l01_irq_clear_all(); //obrisati sve prekide u 24L01
            nrf24l01_set_as_rx(true); //promeniti uređaj u RX kako bi primili isti karakter od drugog 24L01

            //čekati while da bi videli dali će te primiti podatak nazad

            for(count = 0; count < 20000; count++)
            {
                //proveriti dali su podaci primljeni. Ako da uzeti ih i izaći iz petlje.
                //Ako petlja okreće zadnji put, preuzeti paket kao izgubljen i poslati „?“ na UART_u.
                //Ako ovo nije tačno nastavlja okretanje.
                if((nrf24l01_irq_pin_active() && nrf24l01_irq_rx_dr_active()))
                {
                    nrf24l01_read_rx_payload(&data, 1); //uzeti payload iz podatka
                    break;
                }

                //ako je petlja na poslednjoj iteraciji preuzeti izgubljeni paket
                if(count == 19999)
                    data = '?';
            }

            nrf24l01_irq_clear_all(); //ponovo obrisati prekide
            printf("%c", data); //štampanje primljeni podatak

            DelayUS(130); //čekati da predajnik ude iz RX u Standby mod
            nrf24l01_set_as_tx(); //nastaviti normalnu operaciju kao TX

            ToggleLED(); //led dioda kao signalizacija za izlazak iz petlje
        }
    }
}
```



## Glavni *remote* kod:

```
void main(void)
{
    unsigned char data; // registar za smeštanje poruke (poslate il primljene)

    Initialize(); //inicijalizacija PLL, IO, SPI, postavljanje nRF24L01 kao RX

    //glavna programska petlja
    while(1)
    {
        //čekati dok paket ne bude primljen
        while(!(nrf24l01_irq_pin_active() && nrf24l01_irq_rx_dr_active()));

        nrf24l01_read_rx_payload(&data, 1); //pročitati paket iz podatka
        nrf24l01_irq_clear_all(); //obrisati prekide u 24L01

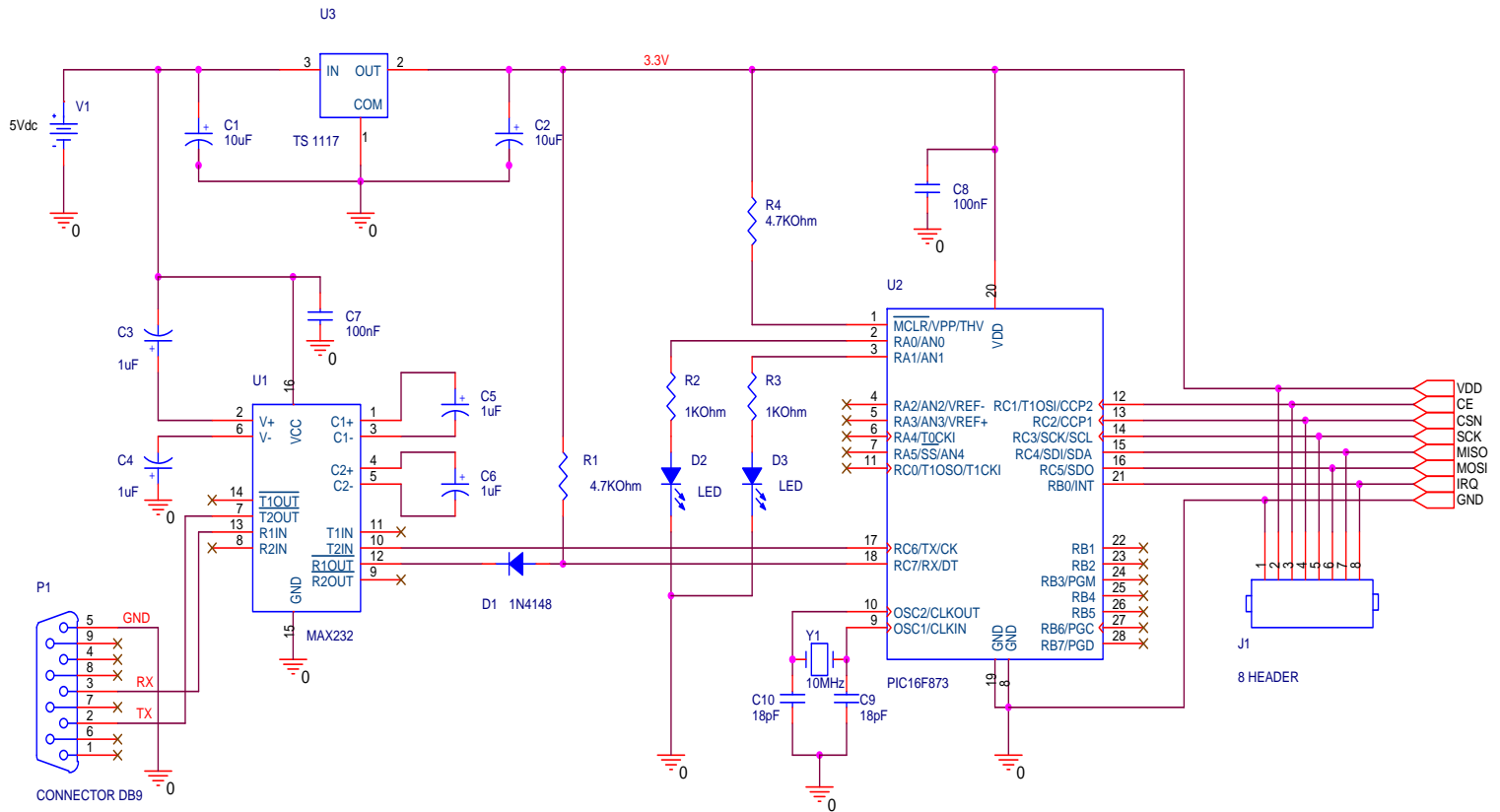
        DelayUS(130); //čekati da drugi 24L01 pređe iz standby u RX

        nrf24l01_set_as_tx(); //promeniti uređaj u TX da bi poslao podatak drugom 24L01
        nrf24l01_write_tx_payload(&data, 1, true); //poslati primljeni karakter preko RF

        //čekati dok paket ne bude poslat
        while(!(nrf24l01_irq_pin_active() && nrf24l01_irq_tx_ds_active()));

        nrf24l01_irq_clear_all(); //ponovo obrisati prekide
        nrf24l01_set_as_rx(true); //nastaviti normalnu operaciju kao RX

        ToggleLED(); //led dioda kao signalizacija za izlazak iz petlje
    }
}
```

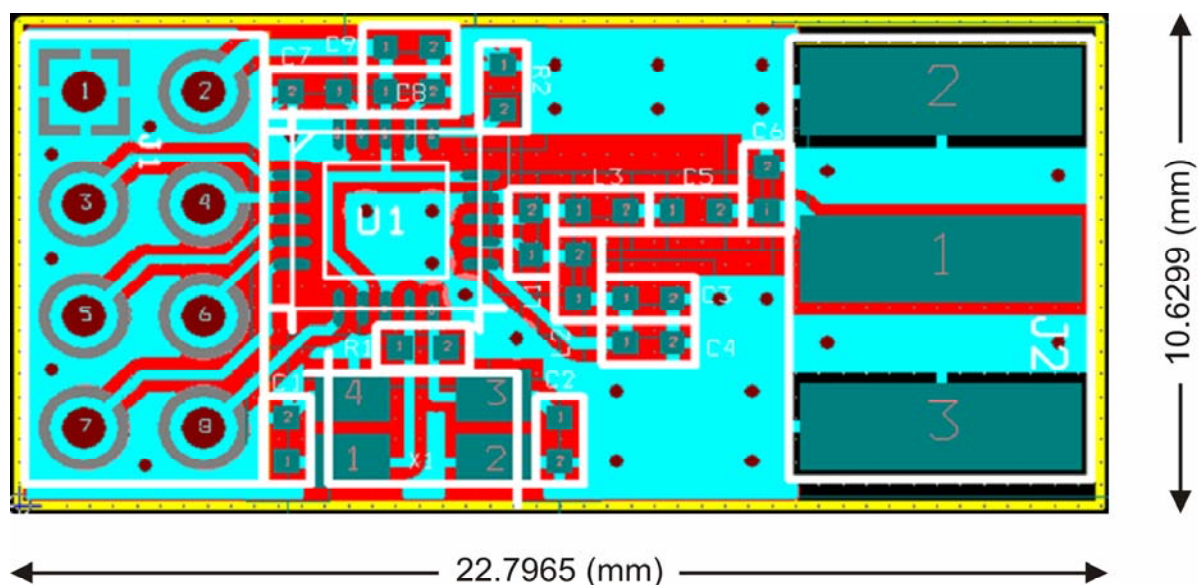


Title		
PIC18F242		
Size	Document Number	Rev
A4	1	01
Date:	Wednesday, January 30, 2008	Sheet 1 of 1

Slika 23 Električna šema periferije nRF24L01

### 3.3 PCB

Dobro dizajnirani PCB je neophodan uslov za ostvarivanje dobre performanse. PCB sa minimum dva sloja uključujući sloj nultog potencijala (mase) je preporučljiv za optimalne performanse. DC napajanje nRF24L01\_a mora biti povezan što je moguće bliže VDD pinova sa visoko performansne RF kondenzatore. Duže linije napona napajanja na PCB\_u trebalo bi da se izbegavaju. Sve veze, VDD\_a i kondenzatora trebalo bi da su što bliže nRF24L01 procesoru. Projektovanje PCB pločice rađeno je u *Orcad 10* paketu. Izgled PCB\_a nRF24L01 prikazan je na slici 24.

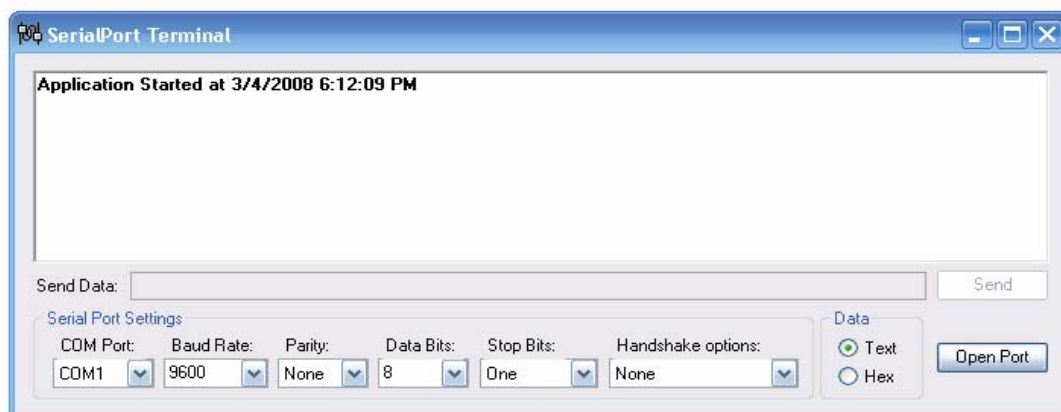


Slika 24 PCB sloj

### 3.4 Program za komunikaciju preko serijskog porta (RS232)

Programska aplikacija za lakše manipulisanje sa serijskim portom (RS232) prikazana je na slici 25. Generalni rad programa zasniva se na izborom tipa podataka (Hex ili Text), otvaranje porta pritiskom na dugme *Open port*, upisivanjem podatak na *Send Data* liniji i slanje upisanog podataka preko serijskog porta pritiskom na dugme *Send*. Takođe postoje i podešavanja serijskog porta (*Serial Port Settings*) predstavljena padajućim menijima.

Program je napisan u *Visual Studio 2008* – *Visual C#*.



Slika 25 Izgled programske aplikacije

## 4. Zaključak

Izrada projekta ostvarena je iz nekoliko faze.

U prvoj fazi odrađeni su *hardware\_* i dva nRF24L01 primopredajnika i izvršena su njihova testiranja. Nakon uspešnog testiranja i donošenja zaključka o ispravnosti pređeno je na sledeću fazu. U drugoj fazi napravljena je periferalna (procesorska) ploča sa PIC18F242 mikrokontrolerom i MAX232 čipom za prilagođavanje na serijskom portu. I u ovoj fazi kao i u prethodnoj nakon testiranja zaključeno je da su ploče ispravne. Sledeće, u programskom jeziku C napisan je program za mikrokontroler PIC18F242 koji radi inicijalizaciju i upravljanje nRF24L01 primopredajnika preko SPI interfejsa. Rezultati o uspešnosti programa utvrđeni su u MPLAB v8 programskim paketom (kompajliranjem i debug\_iranjem) i pomoću instrumentacije za posmatranje signala i nivoa (osciloskopom i voltmetrom). Programatorom za PIC18F242 ispravni kodovi su upisani u mikrokontrolere.

Sledeća faza je pisanje programa za serijsku komunikaciju u Visual C#. Nakon uspešnosti i u ovoj fazi, sledi testiranje celokupnog projekta t.j oživljavanje primopredajnika i razmena podataka.

Kada je sve testirano, konektovano i uključeno na napon napajanja sledi testiranje rada primopredajnika. On se sastoji od pokretanja programa za serijsku komunikaciju, slanje karaktera i primanja istog. Ako se isti karakter primi nazad na serijskom portu znači da je sve u redu i da projekat radi kao što je konstruisam.

## 5. Korišćena literatura

[1] *Bežične senzorske mreže* – <http://es.elfak.ni.ac.yu/>

[2] *A Survey on Sensor Networks*, Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, Erdal Cayirci – Georgia Institute of Technology.

[3] *Datasheet nRF24L01* – <http://www.nordicsemi.com/>

[4] *Tutorials* – <http://www.diyembedded.com/>

