

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Vana Jeličić

**Modifikacija protokola ZigBee**  
**za energetske učinkovit i pouzdan prijenos slike**  
**u bežičnim multimedijским mrežama osjetila**

Zagreb, 2009.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija Fakulteta elektrotehnike i računarstva pod vodstvom prof. dr. sc. Vedrana Bilasa i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2008./2009.

## Popis i objašnjenje kratica

BER	engl. <i>Byte Error Rate</i> , omjer pogrešno primljenih i ukupno poslanih bajtova
BMO	Bežična mreža osjetila
BPSK	engl. <i>Binary Phase Shifting Keying</i> , tehnika digitalne modulacije
CMOS	engl. <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i> , tehnologija izrade digitalnih i analognih mikroelektroničkih sklopova
FPGA	engl. <i>Field Programmable Gate Array</i> , programirljivo logičko polje
kbps	kilobita po sekundi
KVP	engl. <i>Key Value Pair</i> , tip okvira aplikacijske poruke ZigBee protokola
MAC	engl. <i>Medium Access Control</i> , kontrola pristupa mediju
MSB	engl. <i>Most Significant Byte</i> , najznačajniji bajt
MSG	engl. <i>Message</i> , tip okvira aplikacijske poruke ZigBee protokola
PAN	engl. <i>Personal Area Network</i> , mreža za povezivanje uređaja koji obično služe jednom korisniku
PER	engl. <i>Packet Error Rate</i> , omjer pogrešno primljenih i ukupno poslanih paketa
QPSK	engl. <i>Quadrature Phase Shifting Keying</i> , tehnika digitalne modulacije
RF	engl. <i>Radio Frequency</i> , frekvencija oscilacija u rasponu od 3 Hz do 300 GHz
SRAM	engl. <i>Static Random Access Memory</i> , statički RAM, jedna od izvedbi poluvodičke memorije
RS-232	standardni međusklop za serijski prijenos binarnih podataka
VGA	razlučivost slike 640x480 piksela

# Sadržaj

POPIS I OBJAŠNJENJE KRATICA .....	1
SADRŽAJ .....	1
1. UVOD .....	1
1.1. MasliNET .....	4
1.2. Postojeća istraživanja i projekti .....	6
2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA .....	8
3. MATERIJALI I METODE .....	9
3.1. Protokol ZigBee .....	13
3.1.1. MAC sloj .....	17
3.2. Energija i pouzdanost prijenosa podataka .....	20
3.3. Načini prijenosa slike .....	24
3.3.1. Metoda s maksimalno ispunjenim paketom (MIP) .....	24
3.3.2. Metoda s MSG okvirom .....	27
4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI .....	29
4.1. Ispitivanje prijenosa datoteka .....	29
4.2. Promet paketa zabilježen mrežnim analizatorom ZENA .....	31
5. RASPRAVA .....	37
5.1. Prijenos datoteka veličine do 30 kB .....	37
5.2. Prijenos datoteka veličine 70 000 B i 614 400 B .....	39
5.3. Budući rad .....	44
6. ZAKLJUČCI .....	46
7. POPIS LITERATURE .....	48
SAŽETAK .....	51
SUMMARY .....	53

# 1. Uvod

Bežične mreže osjetila (engl. *Wireless Sensor Network*, skraćeno *WSN*) smatraju se jednom od najvažnijih područja tehnologije 21. stoljeća. Zbog mnoštva teorijskih i praktičnih izazova, privukle su pažnju istraživača posljednjih desetak godina. Od samog početka njihovog razvoja omogućavale su akviziciju skalarnih veličina poput temperature, tlaka, vlažnosti, lokacije objekta... Zahvaljujući pristupačnosti jeftinog sklopovlja, kao što su CMOS kamere i mikrofoni, koji omogućavaju akviziciju multimedijskog sadržaja iz okoline, sve više se razvijaju tzv. bežične multimedijske mreže osjetila (engl. *Wireless Multimedia Sensor Network*, skraćeno *WMSN*). To su mreže bežično povezanih čvorova koji iz okoline prikupljaju zvučne i video signale te slike, kao i, naravno, dosad uobičajene skalarne veličine.

Najpopularnije primjene bežičnih mreža osjetila uključuju: vojnu primjenu, nadgledanje prometa, automatizaciju u proizvodnji i industriji, robotiku, nadzor zgrada, promatranje okoliša i staništa [1].

Bežične multimedijske mreže osjetila donose brojne prednosti u prikupljanju i obradi podataka. Neke od mogućnosti koje pružaju su:

- Uzorkovanje na širokom prostoru (npr. velika jezera, šume...), što ne bi bilo moguće čak ni da se jako puno ljudi uključi u istraživanje
- Prikupljanje podataka visokom frekvencijom (*data stream*)
- Prikupljanje novih tipova podataka, kao što su zvuk, slika i video
- Nenametljivo promatranje (omogućuje npr. promatranje životinja bez čovjekovog prilaženja i ometanja njihovog prirodnog ponašanja)
- Promatranje u ekstremnim uvjetima
- Reagirane na događaje (npr. promjena frekvencije uzorkovanja, slanje znaka upozorenja...)
- Proširenje laboratorija na teren – omogućavanje istraživačima da se povežu sa sredstvima u laboratorijima diljem svijeta da se npr. potvrdi identifikacija nove vrste [2].

Bežičnu mrežu osjetila (BMO) čine osjetilni čvorovi - računala vrlo ograničenih mogućnosti koja osjetilima (senzorima) prikupljaju podatke iz okoline u kojoj se nalaze, obrađuju ih, lokalno donose odluke i bežično komuniciraju s ostalim čvorovima u mreži putem definiranog protokola. Kod BMO veliki je izazov osigurati osjetilnim čvorovima dovoljno energije za što duži samostalni rad. Kod bežičnih multimedijских mreža osjetila taj izazov je još veći zbog akvizicije većeg i složenijeg signala (slike ili zvuka) te se nameće problem kompromisa između lokalne obrade signala i slanja potrebne informacije.

Mrežni protokoli bežičnih mreža osjetila imaju neke posebne zahtjeve u odnosu na ostale protokole u komunikacijskoj tehnologiji. Najčešće se u BMO prenosi malena količina podataka, i to u kratkim intervalima kada je uređaj aktivan. Ostatak vremena uređaj miruje („spava“) i štedi energiju. Time je osigurana dulja autonomija uređaja koji je najčešće na baterijskom napajanju. Dodatne izazove za postojeće mrežne protokole stvara zahtjev za prijenosom informacije iz okoliša u obliku slike ili videa zbog prijenosa vrlo velike količine podataka koji troši puno energije i frekvencijskog pojasa i skraćuje životni vijek uređaja. Komunikacijski dio osjetilnog čvora je najveći potrošač od svih dijelova: za prijenos jednog bita potrebna je jednaka količina energije koliko i za obavljanje 3000 instrukcija mikrokontrolera [3]. Zato se često u tim slučajevima pribjegava lokalnoj obradi informacije te se bežično šalje samo informacija zanimljiva korisniku.

Mreže osjetila su po svojoj karakteristici privatne mreže – PAN (engl. *Personal Area Networks*), za koje je IEEE uveo standard 802.15. Frekvencijsko područje koje se koristi za komunikaciju je ISM (engl. *Industrial, Scientific and Medical*). Najpoznatiji 802.15 protokoli su BlueTooth i ZigBee.

BlueTooth (IEEE 802.15.1), vjerojatno najpopularniji bežični mrežni protokol, prikladan je za prijenos multimedijского sadržaja. No, komplicirani protokolarni stog, velika potrošnja i relativno mala autonomija uređaja (do 7 dana) čini ga nepogodnim za primjenu u bežičnim mrežama osjetila.

Protokol ZigBee (IEEE 802.15.4) konstruiran je baš za primjenu u bežičnim mrežama osjetila. Karakterizira ga niska brzina prijenosa uz nisku potrošnju. ZigBee minimizira vrijeme uključenosti čvora, omogućava pouzdanu i jednostavnu

komunikaciju, jednostavno dodavanje i napuštanje čvorova iz mreže, te brz odziv čvora. Više o vezi protokola ZigBee i standarda IEEE 802.15.4, kao i više o samom ZigBee-ju, opisano je u 3. poglavlju.

Primjena bežičnih mreža osjetila na promatranje okoliša i staništa (engl. *environment and habitat monitoring*) je posebno važna za ekologiju, poljoprivredu i ostale biološke znanosti, kao i za društvo u cijelosti. Za senzorske čvorove u toj primjeni bitne su sljedeće karakteristike:

- Integracija senzora
- Robustnost
- Uklapanje u okoliš i uzimanje podataka bez ometanja procesa koji senziraju
- Niska potrošnja, jer je cilj da sustav radi neovisno, bez intervencija čovjeka
- Cijena – cilj je da budu jeftini da bi se mogli proizvoditi i prodavati u što većim količinama [4].

Bežične mreže osjetila primjenjene u promatranju okoliša i staništa razvijaju se u nekoliko istraživačkih grupa (uglavnom pri sveučilištima) diljem svijeta. Karakterizira ih specifičnost, tj. svi oni, u suradnji s biolozima i njima srodnim stručnjacima, nastoje što bolje prilagoditi tehničko rješenje konkretnom problemu. Krajnji cilj je olakšati stručnjacima proučavanje okoliša i biljnih i životinjskih vrsta, očuvanje okoliša, izrada prognostičkih modela te, u konačnici, razvoj rješenja za 'običnog čovjeka', npr. poljoprivrednika, kako bi povećao prinose i pritom očuvao okoliš.

Jedna od posebno zanimljivih primjena bežičnih mreža osjetila je primjena u poljoprivredi. Poznato je da se u posljednje vrijeme dosta važnosti pridaje proizvodnji zdrave hrane, smanjenju korištenja pesticida i sl. U svijetu se sve više razvijaju i primjenjuju bežične mreže osjetila koje bi pomagale agronomima i poljoprivrednicima u svakodnevnom poslu, a sve u cilju proizvodnje kvalitetne ekološke hrane. Prepoznata je korist njihove implementacije u vinogradima i plastenicima [5], a u nastavku će biti predstavljena bežična multimedijaska mreža osjetila koje se razvija na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, a koja će biti primijenjena u maslinicima.

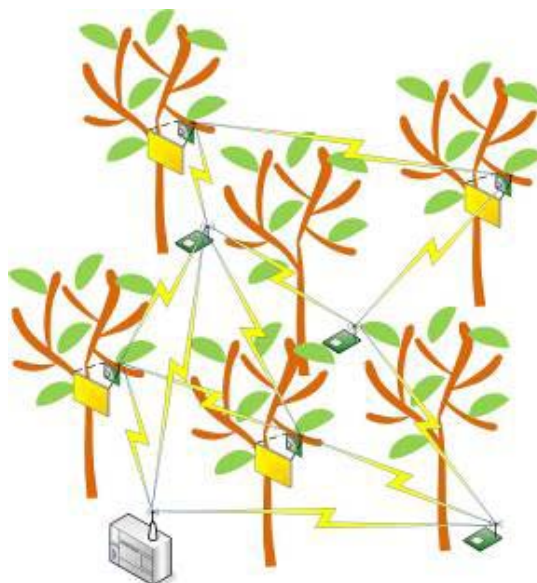
## 1.1. MasliNET

MasliNET je istraživačko-razvojni projekt započeo u lipnju 2007. god. u suradnji kompanije Siemens d.d. i Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu s ciljem primjene bežičnih senzorskih mreža u poljoprivredi, točnije uzgoju masline [6]. Upravo je taj projekt bio motivacija za istraživanje opisano u ovom radu.

Maslinine muhe (lat. *Bactrocera oleae*) najznačajniji su štetnik na maslinama i uzrokuju velike štete na urodu. Trenutačno se hvataju na mamce “žute ploče” i ručno prebrojavaju u ciklusima od nekoliko dana. Ideja ovog projekta je smjestiti bežične senzorske čvorove u krošnju masline zajedno s ljepljivim mamcem.

Na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija Fakulteta elektrotehnike i računarstva u tijeku je razvoj bežičnog osjetilnog čvora nazvanog Čvorak. Neki osjetilni čvorovi će biti smješteni na tlu, a neki u krošnji stabla. Ovi smješteni u krošnji imat će osjetilo za akviziciju slike visoke razlučivosti. Razvijaju se dva osjetila za akviziciju slike – jedan razlučivosti 2 megapiksela kojim će se snimati lovka i detektirati prisutnost maslinine muhe te drugi, razlučivosti 640x480 piksela (VGA) kojim će se snimati krošnja masline i detektirati fenofaze (ciklus cvjetanja, listanja, razvoja plodova...). Na Slici 1 prikazana je ideja organizacije bežične mreže osjetila u masliniku. Osim fenofaze, koja je bitna za prognostičke modele – razne fenofaze su karakteristične za pojavu različitih bolesti i različitih štetnika – slika pruža informaciju i o stanju stabla, što se tiče same pojave raznih bolesti masline. U slučaju pojave štetnika, na osnovi prikupljenih informacija pokreću se alarmi ili se pak pojava štetnika može unaprijed predvidjeti na nekoliko lokacija te na temelju njih donijeti odluku o tome treba li, koje i koliko pesticida koristiti na nekom mjestu. Na Slici 2 prikazana je ideja povezivanja mreža osjetila na širem području.





Slika 1: Organizacija mreže osjetila u masliniku [6]



Slika 2: Povezivanje mreža osjetila na širem području [6]

Ovakva bežična mreža osjetila bi automatizirala postupak, smanjila trošak ljudskih aktivnosti i terenskog rada, dala geografsku raspodjelu rasprostranjenosti i širenja štetnika te omogućila analizu pojave štetnika na širem području. Uz neke preinake, ovakvo bi se rješenje moglo primijeniti i u ostalim poljoprivrednim kulturama.

## 1.2. Postojeća istraživanja i projekti

Potreba za kamerom visoke razlučivosti veliki je izazov u projektu MasliNET jer zahtijeva mnogo energije. A upravo je energija temeljno ograničenje u konstrukciji bežičnih mreža osjetila. Cilj je minimizirati potrošnju energije da bi se omogućila što dulja autonomija osjetilnih čvorova (koji su obično baterijski napajani). Mnoga su istraživanja provedena da bi se pronašle optimalne kombinacije obrade podataka dobivenih na sensorima (energija potrošena na instrukcije mikrokontrolera) i slanja podataka bežičnim putem (energija potrošena na emitiranje podataka). Istraživanja pokazuju da je energija potrebna za bežičnu komunikaciju mnogo veća od energije potrebne za izvođenje instrukcije mikrokontrolera (obrada podatka) [7], [8].

Prilikom razvoja bežičnog osjetilnog čvora za dobivanje slike pristupilo se proučavanju aktualnih projekata slične tematike s ciljem pronalazjenja potencijalno zanimljivih postojećih rješenja. Posebno je zanimljiv Cyclops [9], platforma niske potrošnje za akviziciju slike razvijena na UCLA u Kaliforniji. Cyclops je zapravo elektroničko sučelje između kamere i bežičnog čvora. Njime je moguće snimati slike CIF razlučivosti (352x288), a koristi se u promatranju ptičjih gnijezda i lovki za guštere [9],[10].

Postoji još nekoliko zanimljivih platformi bežičnih osjetilnih čvorova za dobivanje slike [11]-[18], koje koriste ili Bluetooth ili ZigBee protokol bežične komunikacije. Razlučivost kamere im je maksimalno VGA, a za dobivanje slike lovke za maslinine muhe u projektu MasliNET potrebna je kamera veće razlučivosti.

Problem smanjivanja potrošnje pri prijenosu velike količine podataka u bežičnim mrežama osjetila u literaturi je uglavnom zastupljen projektiranjima vlastitog MAC sloja, pogodnog za kraće aktivno stanje radija u *multi-hop* mrežama [19],[20]. Kad je u mreži puno čvorova rasprostranjenih na širem području, oni daju redundantne informacije i postoji više kanala komunikacije kojima se podaci mogu prenijeti od izvorišnog do odredišnog čvora. To su tzv. *multi-hop* mreže. U takvim okolnostima proučava se optimalno usmjeravanje (engl. *routing*) informacija i distribuirana obrada podataka. Mnogo se istražuje u području energetske učinkovite obrade (kompresije) slika na osjetilnim čvorovima [21],[22].

Problem koji je u ovom radu obrađen nije znatnije zastupljen u literaturi. U [23] su na simulatoru ispitivane pogreške u prijenosu u *multi-hop* mrežama s puno krajnjih čvorova uz isključenu potvrdu prijena u IEEE 802.15.4 standardu. Hengstler *et al.* u [13] spominje slanje slike veličine 900 B bez potvrde prijema (osim za prvi i posljednji paket), no, kao i kod većine drugih istraživanja konstrukcije vlastite platforme, usredotočuje se na hardver i softver. U [24] je predstavljena nadogradnja na IEEE 802.15.4 MAC sloj u obliku kontrolera koji omogućava zaštitno kodiranje. Wang *et al.* u [25] predstavlja dodavanje raznih zaglavlja i zaštitnog kodiranja slici komprimiranoj JPEG2000 kompresijom, radi smanjenja grešaka u prijenosu, dok Pekhteryev *et al.* u [26] predstavlja prijenos komprimirane slike ZigBee protokolom u paketima, uz usporedbu kvalitete korištenja kompresijskih postupaka JPEG i JPEG2000.

U ovom istraživanju, u okviru razvoja bežične multimedijske mreže osjetila s primjenom u masliniku, naglasak je stavljen na prijenos datoteke (slike) s jednog čvora na drugi protokolom ZigBee. Cilj ovog istraživanja je pronaći način modifikacije već postojećeg standardiziranog ZigBee protokolnog stoga koja bi omogućila prijenos slike uz što manje poruka te ispitati pouzdanost takvog prijena.

## 2. Opći i specifični ciljevi rada

U okviru projekta MasliNET razvija se bežična multimedijaska mreža osjetila za primjenu u maslinicima. Za komunikaciju među čvorovima koristi se protokol ZigBee. Veliki izazov u arhitekturi te mreže predstavlja razvoj modula za akviziciju i prijenos slike. ZigBee nije inicijalno zamišljen za prijenos velike količine podataka (datoteka). Osim toga, što se više poruka prenosi između čvorova u mreži, to je potrošnja energije veća. A energija je ograničavajući čimbenik u bežičnim mrežama osjetila jer su čvorovi napajani baterijski i trebalo bi im osigurati što dulju autonomiju. Proučavanjem IEEE 802.15.4 standarda i protokola ZigBee došlo se do ideje modifikacije ZigBee protokolnog stoga u svrhu smanjenja potrebnog broja poruka u komunikaciji među čvorovima prilikom prijena slike, čime bi se povećala energetska učinkovitost bežične mreže osjetila. Slanje potvrde prijema poruke na sloju za kontrolu pristupa mediju (MAC sloju) ZigBee stoga koje je po standardu stalno prisutno, okarakterizirano je kao potencijalno suvišan prijenos poruka. Umjesto kontrole prijena na sloju za kontrolu pristupa mediju, javila se ideja postavljanja kontrole prijena na aplikacijskom sloju ZigBee stoga.

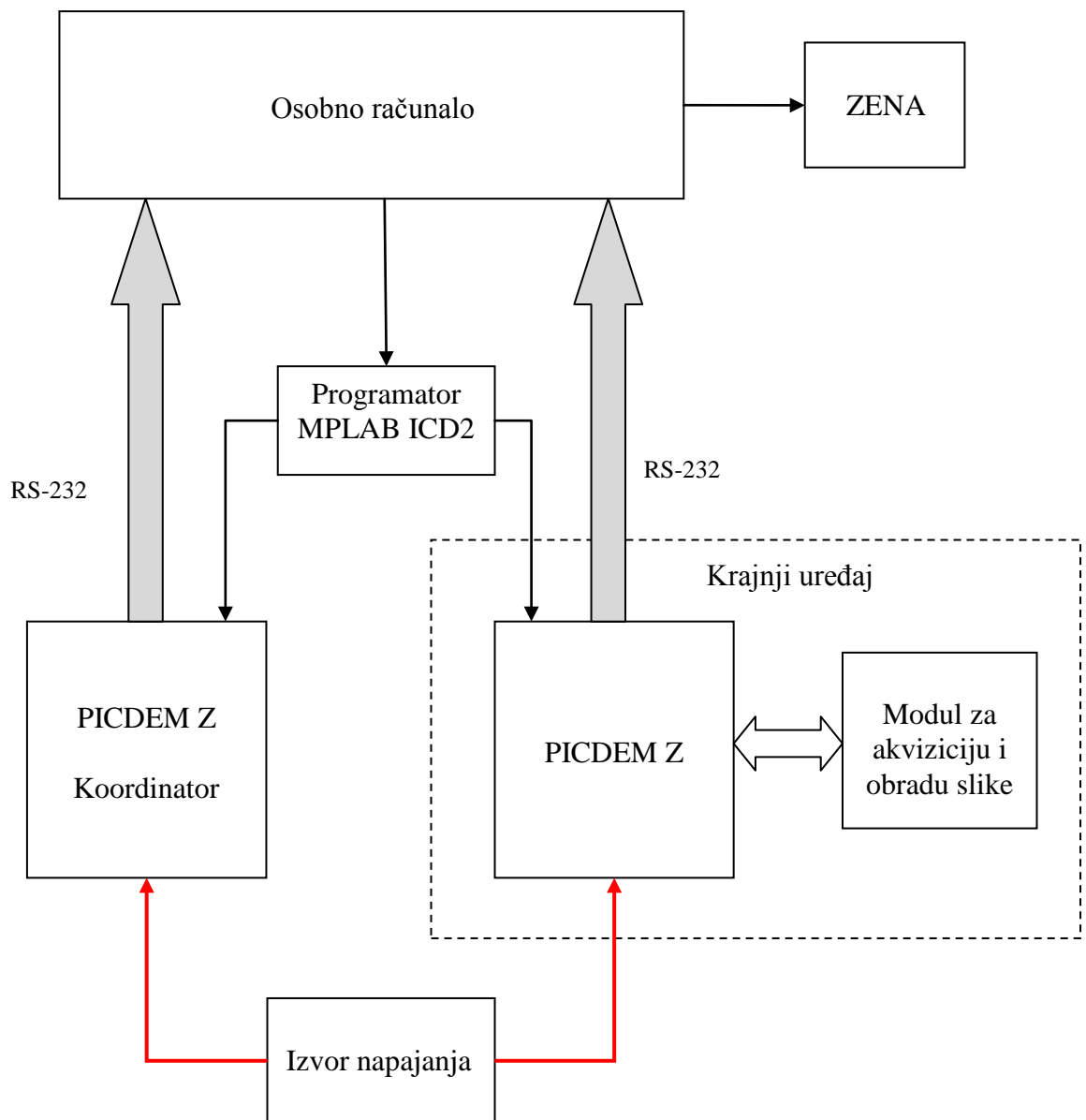
Cilj ovog rada je ispitati mogućnosti modifikacije ZigBee protokolarnog stoga radi smanjenja potrošnje energije čvorova prilikom uzastopnog slanja velikog broja paketa i ispitati utjecaj te modifikacije na pouzdanost i kvalitetu prijena.

### 3. Materijali i metode

Za razvoj bežičnog osjetilnog čvora za dobivanje slike u projektu MasliNET nabavljeni su odvojeni senzori i odgovarajuće leće. Izabrani su Micronovi CMOS senzori razlučivosti 2 MP i VGA. Podaci o sensorima se nalaze u specifikacijama [27], [28]. Budući da senzor razlučivosti 2 MP daje već komprimiranu sliku, za ispitivanje je izabrana VGA kamera, koja daje nakomprimiranu sliku, veličine 614 400 B.

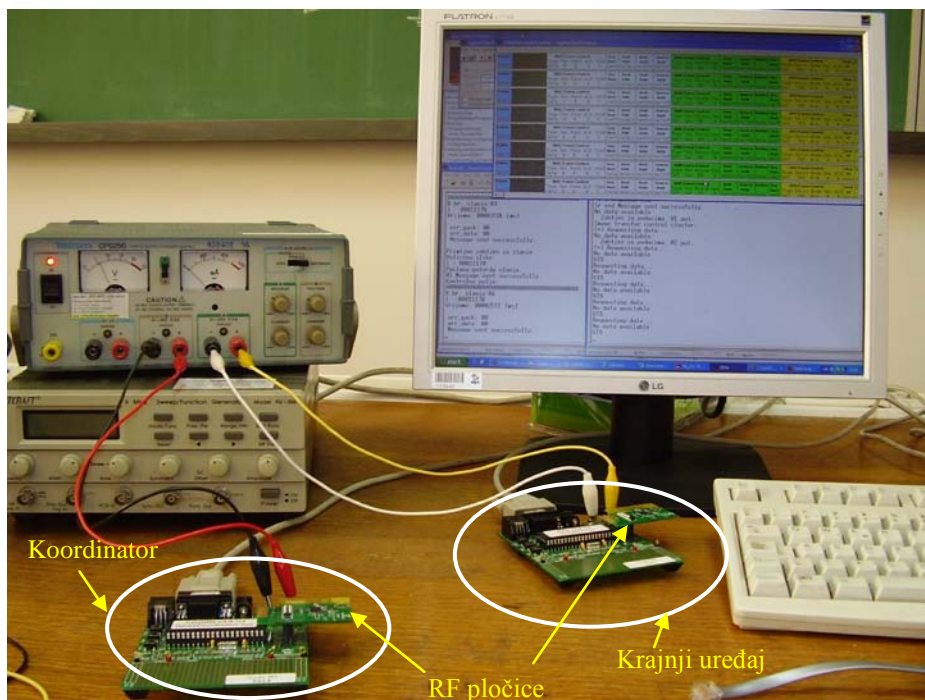
Istraživanje energetski učinkovitog i pouzdanog bežičnog slanja slike opisano u ovom radu provedeno je u laboratoriju Zavoda za elektroničke sustave i obradbu informacija Fakulteta elektrotehnike i računarstva. Za ispitivanje slanja slike, odnosno datoteke, protokolom ZigBee korišteno je razvojno sklopovlje Microchip PICDEM Z koje se sastoji od dva čvora (koordinatora i krajnjeg uređaja) te mrežnog analizatora ZENA. U slučaju prijenosa slike, na krajnji uređaj je spojen modul za akviziciju i prikupljanje slike. Svaka PICDEM Z razvojna pločica sadrži mikrokontroler PIC18LF4620 te RF priključnu pločicu s MRF24J40 802.15.4 odašiljačem (engl. *transceiverom*) i antenom. U [29] se može pronaći više o PICDEM Z razvojnom sklopovlju. Pločice se programiraju MPLAB ICD2 programatorom. Imaju i RS-232 priključak za serijsku komunikaciju s osobnim računalom. Potrebno im je osigurati napajanje između 6 V i 9 V. Modul za akviziciju i prikupljanje slike sastoji se od VGA kamere priključene na pločicu na kojoj se nalazi SRAM memorija i FPGA sklop koji upravlja kamerom i prijenosom slike s kamere u memoriju i iz memorije na mikrokontroler. Napaja se naponom iznosa 3,3 V dovedenim s izlaza regulatora PICDEM Z pločice. Slika dobivena kamerom sprema se u SRAM te se na zahtjev PIC mikrokontrolera čita iz SRAM-a i bežično šalje na koordinator. Na Slici 3 prikazana je blok-shema ispitnog okruženja.

Serijska RS-232 veza koristi se za ispitivanje ispravnosti komunikacije i predstavlja ograničenje prilikom ispitivanja sustava zbog dodatnog opterećenja mikrokontrolera. Zato se prilikom ispitivanja težilo ispisu što manje znakova na serijsko sučelje.

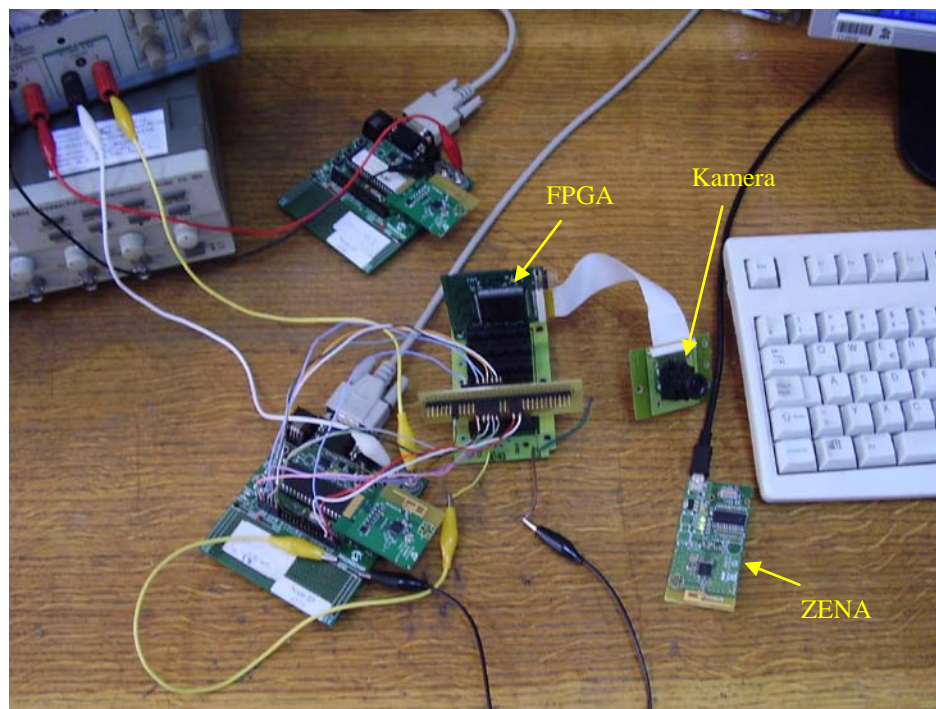


Slika 3: Blok-shema ispitnog okruženja

Ispitivanje prijenosa se provodi uz 100 uzastopnih slanja datoteke, ili do prekida komunikacije. Rezultati ispitivanja su prosječne vrijednosti niza slanja. Prilikom slanja slike snimljene VGA kamerom, koordinator na serijsko sučelje ispisuje primljene bajtove te se na kraju slanja dobivena tekstualna datoteka prikaže kao slika u programskom paketu MATLAB. Na Slikama 4 i 5 prikazani su čvorovi i dodatna oprema korištena u laboratoriju za potrebe ovog istraživanja.



Slika 4: PICDEM Z razvojno sklopvlje



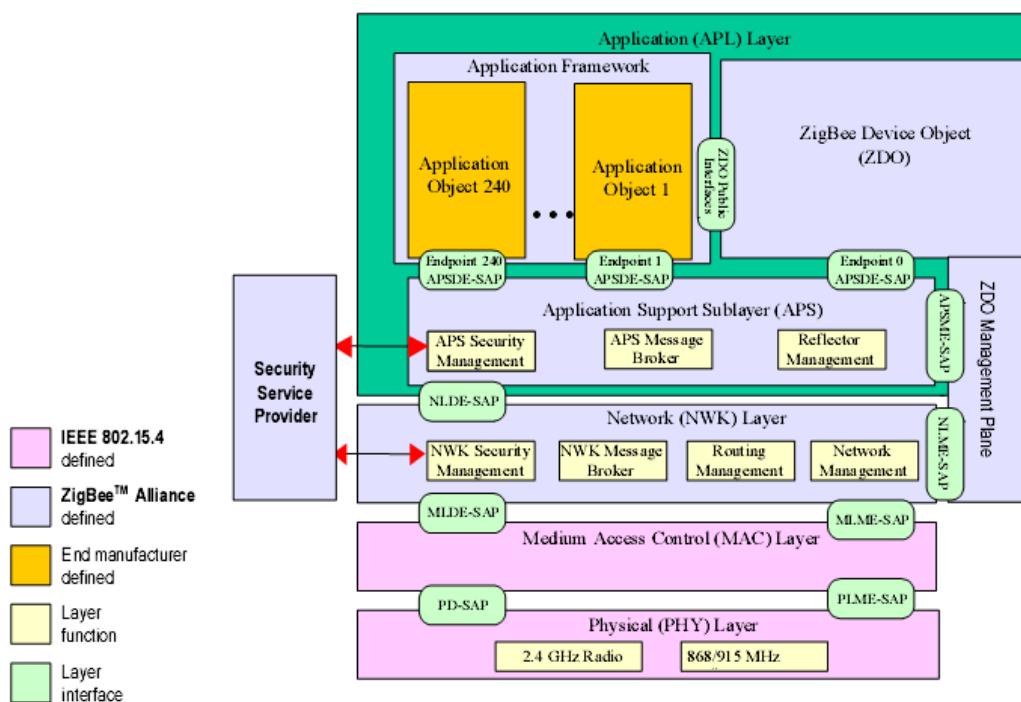
Slika 5: PICDEM Z razvojno sklopovlje, modul za akviziciju i prikupljanje slike, mrežni analizator ZENA

Programska podrška za ZigBee komunikaciju pisana je u razvojnom okruženju MPLAB IDE, u programskom jeziku C, koristeći prevodioc C18. Temelji se na Microchipovom stogu za ZigBee protokol v3.6 [30]. U nastavku su navedene važnije karakteristike ZigBee-ja, te zahvati koji su primjenjeni na stogu s ciljem energetski učinkovitog i pouzdanog prijenosa datoteke.



### 3.1. Protokol ZigBee

Protokol ZigBee sastavljen je od 4 sloja: fizičkog, sloja za kontrolu pristupa mediju (engl. *Medium Access Control* - MAC), mrežnog i aplikacijskog. Na sučelju aplikacijskog i mrežnog sloja nalazi se APS podsloj (engl. *Application Support Sublayer*). Fizički i MAC sloj definirani su IEEE 802.15.4 standardom [31], dok su mrežni i aplikacijski sloj definirani ZigBee protokolom [32]. Na Slici 6 prikazana je arhitektura ZigBee stoga.



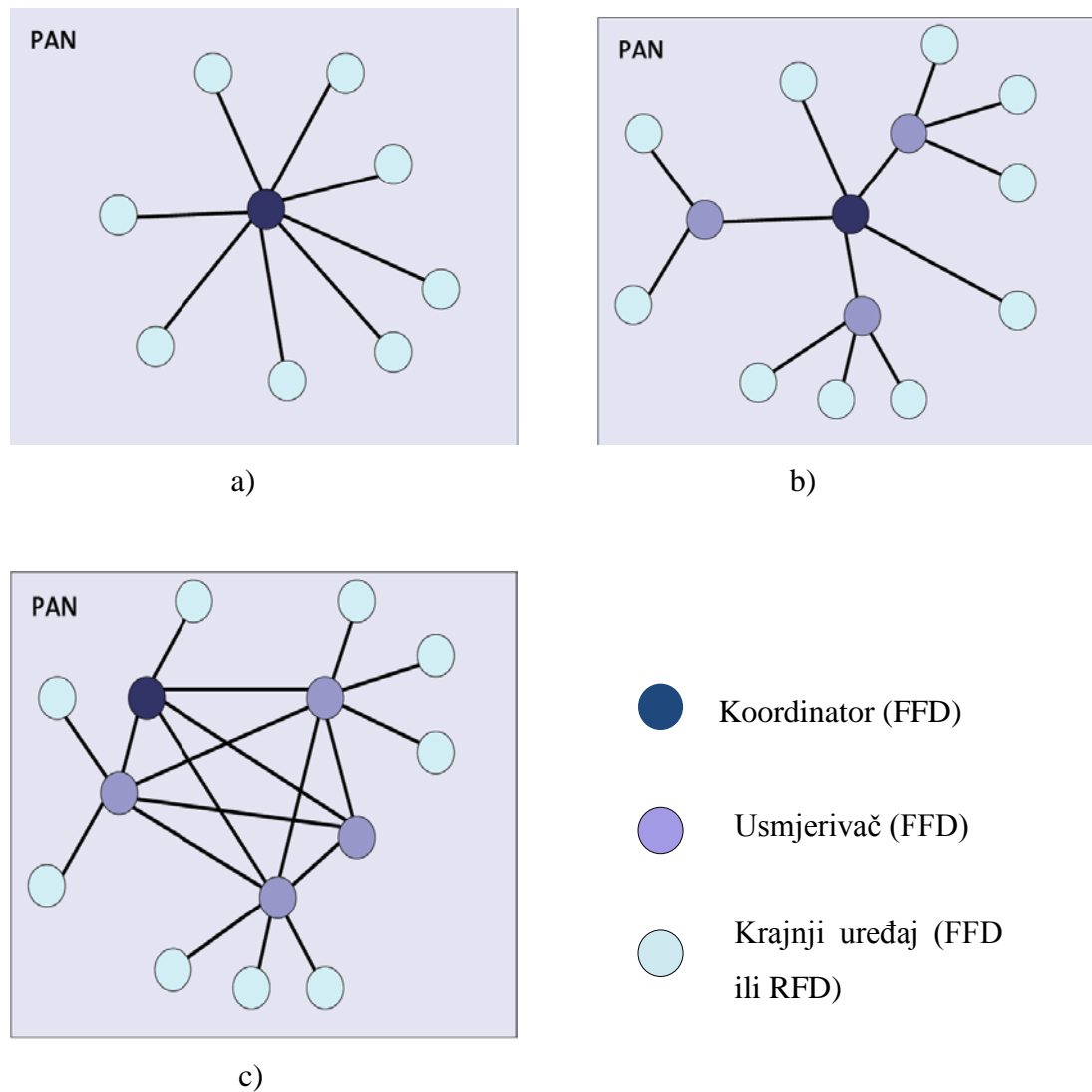
Slika 6: Arhitektura ZigBee stoga [32]

Na frekvenciji 2,4 GHz (koja se najčešće koristi), ZigBee koristi QPSK modulaciju s brzinama prijenosa do 250 kbps, dometa do 75 m, sa snagom odašiljanja od 1 mW. Još se koriste frekvencije 915 MHz i 868 MHz, uz BPSK, s brzinama od 40 odnosno 20 kbps.

Prema IEEE 802.15.4 standardu uređaji u mreži mogu se podijeliti po prioritetu na uređaje s punom funkcionalnošću (FFD – *full functional device*) i uređaje s reduciranom funkcionalnošću (RFD – *reduced functional device*). FFD

obično ima stalni izvor napajanja, dok je RFD na baterijskom napajanju. ZigBee protokol dijeli uređaje prema funkciji na koordinator, usmjerivač (engl. *router*), i krajnji uređaj (engl. *end device*). U jednu mrežu je moguće, ukoliko se koristi 16-bitna adresa, priključiti do 65 534 uređaja. [30]

Postoje tri tipične topologije ZigBee mreža, koje su dane na Slici 7.

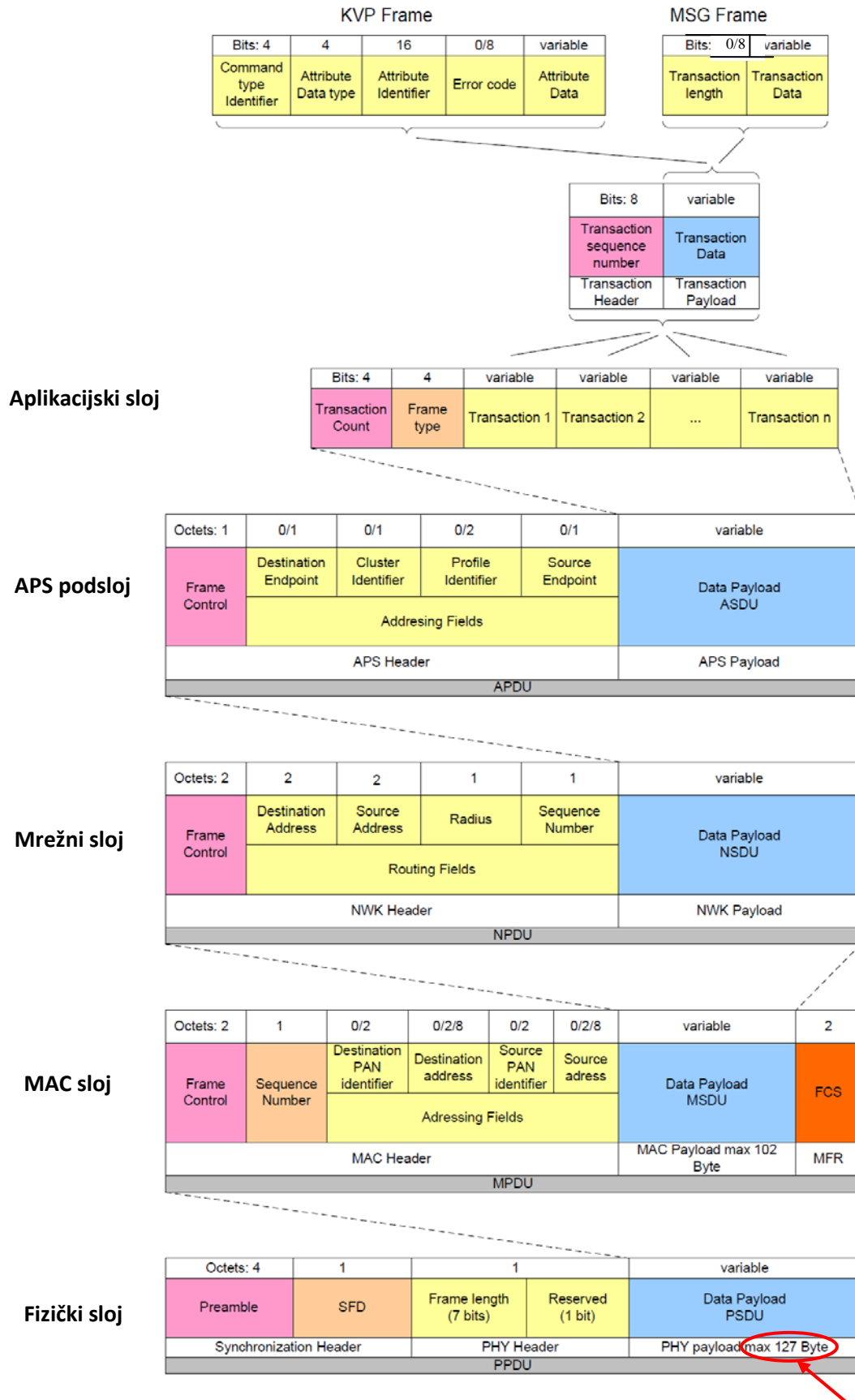


Slika 7: Konfiguracije mreža:

a) Zvijezda (*star*), b) Stablo (*cluster tree*), c) Isprepletana mreža (*mesh*)

ZigBee protokolom definirana su dva tipa okvira aplikacijske poruke: KVP okvir (*Key Value Pair*) i MSG (*Message*) okvir. KVP okvir koristi definiranu strukturu podataka. MSG okvir može prenijeti bilo kakav oblik podataka, a format mu u potpunosti definira korisnik, ovisno o potrebama aplikacije. Uobičajeno se u MSG okviru na prvom mjestu nalazi duljina poruke u bajtovima. Na Slici 8 prikazan je format poruke ZigBee protokola te se na aplikacijskom sloju uočavaju dva moguća okvira transakcija (KVP i MSG). Pojmovi kao što su *endpoint*, *cluster* i atribut (koji se mogu vidjeti na Slici 8) važni su elementi ZigBee protokola i potrebno ih je razumjeti da bi se uspješno programirala komunikacija između čvorova. Međutim, za opis same ideje komunikacije bili bi suvišni i možda čak dodatno zbunjujući bez konkretnog primjera. Detaljnije o *endpoint*-ovima, *cluster*-ima i atributima može se pronaći u [30] i [32].

Najviše se ZigBee protokolom može u paketu prenijeti 127 bajtova (kao što je vidljivo na Slici 8 u poruci na fizičkom sloju). No, nisu svi na raspolaganju korisniku jer ih se dosta inherentno koristi kao zaglavlja u sljedećim slojevima. Možemo vidjeti da blok *Attribute Data* u KVP okviru, odnosno *Transaction Data* u MSG okviru imaju značajno manje bajtova od cijele poruke na fizičkom sloju. Slika dobivena s krajnjih čvorova, čak i nakon kompresije, zauzima najčešće barem 10 kB memorije te je potrebno osmisliti način slanja tako velike datoteke ZigBee protokolom.



Slika 8: Format poruke ZigBee/IEEE 802.15.4 [32]

### 3.1.1. MAC sloj

MAC sloj (sloj kontrole pristupa mediju) je zadužen za pristup fizičkom sloju, generiranje i sinkroniziranje na mrežnu zraku, pokretanje koordinatora i generiranje PAN ID-a (engl. *Personal Area Network Identifier*) te uspostavljanja veze između MAC entiteta na različitim čvorovima i ostvarivanje pouzdane komunikacije između dva susjedna čvora u mreži potvrdom prijema za svaki paket. Ima tu još dosta značajnih funkcija, ali kao posebno važnu funkciju MAC sloja treba istaknuti određivanje načina i trenutka pristupanja pojedinih uređaja u mreži komunikacijskom kanalu. MAC sloj IEEE 802.15.4 standarda ima CSMA-CA (engl. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) mehanizam za pristup kanalu. To je mehanizam u kojem uređaj koji želi poslati poruku prvo osluškuje energiju kanala da vidi je li slobodan. Ako je kanal slobodan, uređaj smije poslati svoju poruku. Na Slici 9 prikazan je format MAC okvira.

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/ 14	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
Addressing fields								
MHR							MAC Payload	MFR

Slika 9: MAC okvir [31]

### 3.1.1.1. MAC potvrda prijema

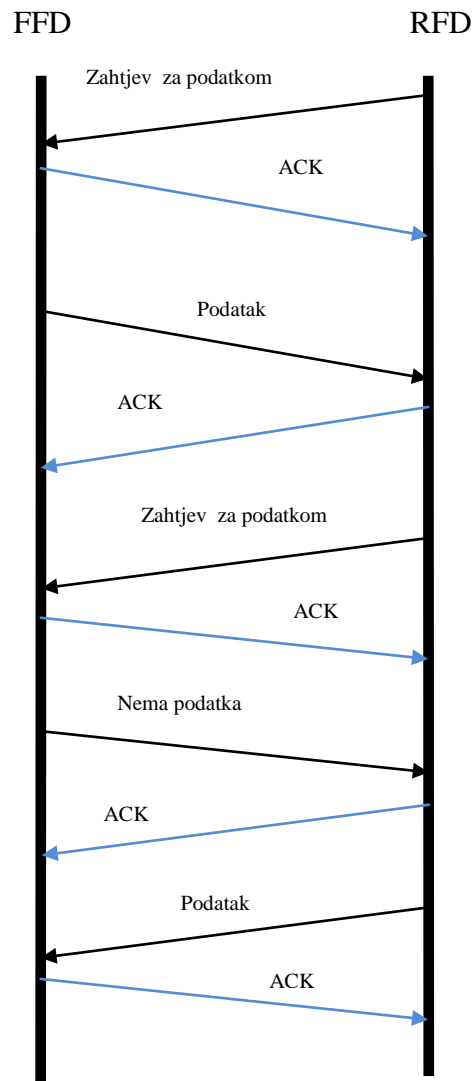
IEEE 802.15.4 standardom definirana je zastavica zahtjeva za MAC potvrdom prijema (*Acknowledgment Request*). Ona se nalazi u polju 'Frame Control' (Slika 10) na mjestu petog bita (*Ack. Request*) [31].

Bits: 0–2	3	4	5	6	7–9	10–11	12–13	14–15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Ack. Request	PAN ID Compression	Reserved	Dest. Addressing Mode	Frame Version	Source Addressing Mode

Slika 10: Format polja 'Frame Control' [31]

Kad je taj bit postavljen u '1', postoji zahtjev za MAC potvrdom prijema te čvor, nakon što pošalje paket s podacima, čeka poruku s MAC potvrdom prijema od odredišnog čvora da bi poslao novi paket.

Na Slici 11 prikazan je primjer tipične komunikacije među čvorovima u ZigBee mreži. Obično nakon buđenja (izlaska iz stanja mirovanja) RFD čvor (krajnji uređaj) pošalje FFD čvoru (koordinatorsu ili usmjerivaču) zahtjev za podatkom (*Data Request*). Nakon što je poslao potvrdu prijema (ACK), FFD pošalje podatak koji je imao pripremljen za RFD. Taj postupak se ponavlja sve dok FFD ne odgovori RFD-u da nema spreman podatak za njega (*No Data*). Nakon toga RFD pošalje FFD-u potvrdu prijema (ACK) i tek onda može slati svoje podatke (najčešće prikupljene s osjetila). FFD na to odgovori potvrdom prijema. Ovisno koliko podataka krajnji čvor treba poslati FFD-u, postupak se ponavlja. Kad pošalje sve podatke, obično ponovno ode u stanje mirovanja radi uštede energije.



Slika 11: Tipičan tijek komunikacije u ZigBee mreži

U slučaju da potvrda prijema nije primljena u zadanom vremenskom periodu, šalje se ponovno isti paket. Ako dođe do duljeg problema u komunikaciji i više uzastopnih izostanka potvrde prijema, isti paket se šalje više puta za redom, sve dok se ne primi potvrda prijema.

Sama MAC potvrda prijema ne znači da je paket stvarno primljen i obrađen na svom odredištu, već da je stigao do MAC sloja. Postoji mogućnost da je došlo do problema u višim slojevima i da paket nije dobro obrađen. To se onda mora bilježiti u aplikacijskom sloju.

### 3.2. Energija i pouzdanost prijenosa podataka

U ovom istraživanju osmišljeno je razlaganje datoteke (tj. slike) na krajnjem uređaju na više manjih paketa koji se onda šalju na koordinatorski čvor ZigBee protokolom. Mnoštvo uzastopno poslanih paketa predstavlja veliki izazov za postizanje energetske učinkovitosti i pouzdanosti bežične komunikacije među čvorovima.

Energija potrebna za rad bežičnog osjetilnog čvora za dobivanje slike može se razložiti na tri stavke: energija potrebna za akviziciju slike, energija potrebna za računanje (instrukcije mikrokontrolera) i energija potrebna za komunikaciju (bežični prijenos). To možemo prikazati sljedećim izrazom:

$$E = E_{\text{akvizicija}} + E_{\text{računanje}} + E_{\text{komunikacija}} \quad (1)$$

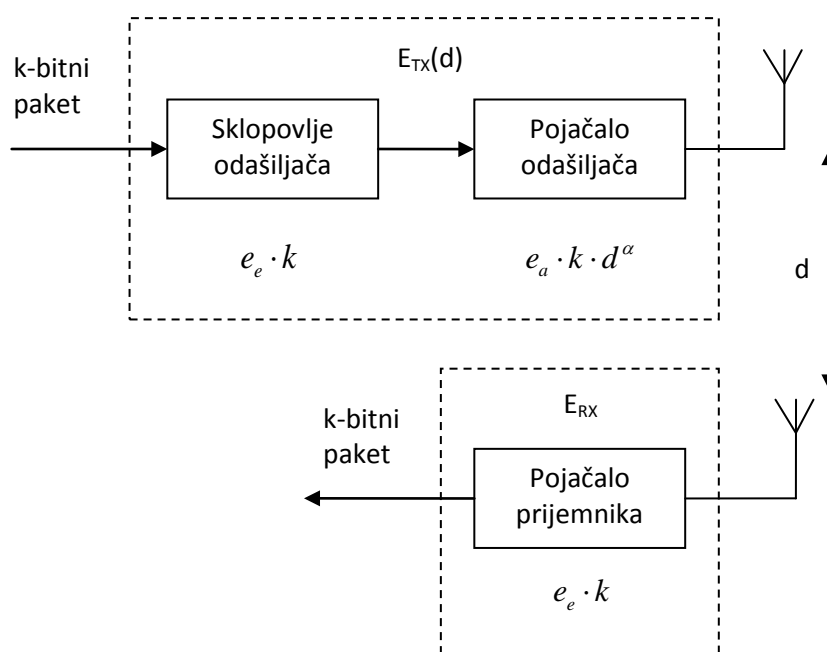
Energija akvizicije slike često linearno raste s veličinom slike i uglavnom ovisi o tehnologiji izvedbe optičkog osjetila i akvizicije [33]. Osjetilo korišteno u ovom istraživanju izrađeno je u CMOS tehnologiji koju karakterizira niska potrošnja. Energija računanja ovisi o složenosti algoritma za obradu (najčešće kompresija) slike. Energija komunikacije ovisi o veličini poslanih i primljenih podataka te o frekvenciji slanja, odnosno primanja. Energija računanja i energija komunikacije u recipročnom su odnosu. Ako povećamo složenost algoritma obrade podataka, trošimo više energije na računanje, no informacija koju moramo bežično poslati je sažetija i time trebamo manje energije za komunikaciju. Bežični prijenos obično zahtijeva puno više energije nego računanje, no, kod velikih datoteka kao što je slika, algoritmi obrade mogu biti toliko složeni da zahtijevaju mnogo energije i time računanje postane kritična točka potrošnje energije. U literaturi je pronađeno više radova koji proučavaju odnos energija računanja i komunikacije te pronalazjenje optimalnog odnosa između njih. Uglavnom se bave problematikom pronalaska optimalne kompresije za bežične multimedijske mreže osjetila. Ovaj rad je, pak, usredotočen na problem vezan za smanjenje poslanih i primljenih podataka, odnosno smanjenje energije komunikacije.



Energija komunikacije može se podijeliti na energiju slanja ( $E_{TX}$ ) i energiju primanja ( $E_{RX}$ ) podataka:

$$E_{\text{komunikacija}} = E_{TX} + E_{RX} \quad . \quad (2)$$

Na Slici 12 prikazan je pojednostavnjeni model radija i označene su potrebne energije. U cilju smanjenja energije komunikacije, mnoga se istraživanja provode i u području radija niske potrošnje, no to izlazi izvan domene ovog rada.



Slika 12: Jednostavni model radija

Energiju slanja ( $E_{TX}$ ) i energiju primanja ( $E_{RX}$ ) možemo odrediti na sljedeći način:

$$E_{TX}(k, d) = e_e \cdot k + e_a \cdot k \cdot d^\alpha \quad (3)$$

$$E_{RX}(k) = e_e \cdot k \quad , \quad (4)$$

gdje su:  $e_a$  energija disipirana po bitu po metru  $m^2$ ,  $e_e$  energija po bitu koju slopovlje troši,  $d$  udaljenost između čvora koji šalje i čvora koji prima podatak,

$\alpha \in [2,4]$  parametar gubitka na putu između izvorišnog i odredišnog čvora te  $k$  broj bitova [33].

Parametri  $e_a$  i  $e_e$  su konstantni i karakteristični za radio korišten u konkretnoj aplikaciji i ne može se na njih utjecati. Udaljenost između čvorova najčešće je određena zahtjevima aplikacije, a  $\alpha$  ovisi o stanju komunikacijskog kanala (prepreke, šum i sl.).

Zato bi se izraz (2) u konkretnoj aplikaciji mogao zapisati kao:

$$E_{komunikacija}(k) = k \cdot C, \quad (5)$$

gdje je  $C = 2 \cdot e_e + e_a \cdot d^\alpha$ , a  $k$  (kao što je već navedeno iznad) broj bitova.

Iz svega toga može se zaključiti da je na smanjenje energije komunikacije jedino moguće utjecati smanjenjem broja poruka koje se šalju, odnosno primaju.

U literaturi nisu zabilježena opsežnija istraživanja mogućnosti zahvata na originalnom ZigBee stogu koja će biti predstavljena u nastavku ovog rada.

Pouzdanost prijenosa definira se uspješnošću prijenosa poslanih podataka (da odredišni čvor primi upravo ono što je izvorišni čvor poslao). Određuje se brojem pogrešno primljenih paketa ( $N_{Ppogr}$ ) i brojem pogrešno primljenih bajtova ( $N_{Bpogr}$ ), te se izražava omjerom pogrešnih primljenih i ukupno poslanih paketa (PER – *Packet Error Rate*) i bajtova (BER – *Byte Error Rate*), kao što je prikazano u izrazima (6) i (7).

$$PER = \frac{N_{Ppogr}}{N_{Puk}} \quad (6)$$

$$BER = \frac{N_{Bpogr}}{N_{Buk}} \quad (7)$$

Pouzdanost prijenosa je veća što su BER i PER manji.

Da bi se smanjio broj poslanih poruka prilikom slanja datoteke i time smanjila potrošnja uređaja, pristupilo se ispitivanju slanja s onemogućavanjem MAC

potvrde prijema (engl. *MAC acknowledgment*). Umjesto na MAC sloju, kontrola primitka paketa na koordinatoru odvija se na aplikacijskom sloju, uvođenjem kontrolnog polja u kojem se označava redni broj pogrešno primljenih paketa, a koje krajnji uređaj zatim ponovno pošalje. Više o svemu tome opisano je u nastavku.

Jedna od ideja za prijenos slike visoke razlučivosti u okviru projekta MasliNET je komprimirati sliku nekim kompresijskim postupkom te u dobivenoj datoteci odrediti prioritete pojedinih bajtova u prijenosu ZigBee protokolom, u cilju što kvalitetnije dekompresije (tj. minimalnog gubitka informacije). Kad bi se odredili prioriteti, moglo bi se u aplikacijskom sloju odrediti koji bajtovi su važni za prijenos informacije, koji su manje bitni, i čak koji su za naše potrebe nebitni. Tako bi se moglo uštediti na vremenu i energiji prilikom prijenosa (budući da više bitova potvrde troši više energije). Svakom prioritetu bi se pridružila određena vrijednost, npr. '00', '01', '10', '11'.

Tako bi se moglo odrediti koji bajtovi se:

- šalju uz MAC potvrdu prijema + aplikacijsku potvrdu prijema ('11')
- šalju uz aplikacijsku potvrdu prijema ('10')
- šalju bez potvrde prijema ('01')
- mogu izostaviti iz prijenosa bez znatnijeg gubitka korisne informacije ('00')

Cijeli taj postupak potrebno je implementirati u aplikacijskom sloju, jer MAC sloj IEEE 802.15.4 standarda ne podržava dodjelu prioriteta paketima u mreži.

### 3.3. Načini prijenosa slike

Kompanija Microchip jedina daje potpuno slobodan pristup i modifikaciju čitavog izvornog ZigBee stoga. Modifikacijom zNWK datoteke Microchipovog ZigBee stoga omogućen je pristup zastavici MAC potvrde prijema (koja je inače stalno postavljena u '1') u aplikacijskom sloju. U kôdu na aplikacijskom sloju krajnjeg uređaja pristupa joj se pomoću novodefinirane 'allowMacAck' zastavice. Nju se postavlja u logičku nulu za vrijeme slanja korisnih podataka (elementa slike). Time je omogućeno uzastopno slanje podataka s krajnjeg uređaja na koordinator bez prethodnog čekanja potvrde prijema s koordinatora.

Kao što je već spomenuto, maksimalno se ZigBee protokolom može u paketu prenijeti 127 bajtova. No, nisu svi na raspolaganju korisniku zbog brojnih zaglavlja na višim slojevima stoga. Potrebno je ispitati koliko je najviše bajtova u paketu moguće iskoristiti za prijenos slike, a da pritom ne bude narušena stabilnost komunikacije. Budući da eliminiranjem potvrde prijema na MAC sloju gubimo podatak o uspjehu primitka paketa, potrebno je kontrolu primitka paketa uspostaviti na aplikacijskom sloju. Razvijene su dvije metode prijenosa slike i kontrole kvalitete prijenosa, opisane u nastavku.

#### 3.3.1. Metoda s maksimalno ispunjenim paketom (MIP)

Ovom metodom postignuto je maksimalno ispunjenje paketa korisnim podacima (elementima slike). Ispitivanje je pokazalo da je granica ispunjenja poruke aplikacijskog okvira 101 bajt - za više bajtova se ne ostvari uspješna komunikacija. Datoteka koja se šalje sadrži generirani niz bajtova (*char*) uzastopno povećavanih za 1. Bajtovi (njih 99) se šalju u paketu vlastitog aplikacijskog okvira (umjesto predefiniраниh KVP i MSG okvira opisanih u poglavlju 3.1.). Taj okvir je u ovom istraživanju nazvan MIP (Maksimalno Ispunjen Paket). Na Slici 13 prikazani su formati poruke aplikacijskog sloja (AF okvir) sa standardnim MSG okvirom i s, u ovom istraživanju generiranim, vlastitim MIP okvirom. Umjesto izraza 'transakcija' ovdje koristimo izraz 'poruka' jer je u paketu s MSG okvirom samo jedna transakcija. Na početku paketa su 2 bajta koji označavaju redni broj poslanog paketa (engl. *sequence number*). Prije slanja paketa s elementima datoteke, pošalje se koordinatoru

zahtjev za slanje paketa u KVP okviru u kojem se nalazi podatak o broju bajtova korisne informacije (*Transaction Length*) – u našem slučaju 99, te podatak o broju paketa koji slijede.

AF zaglavlje		Poruka		
		Zaglavlje poruke	MSG okvir	
Bitova: 4	4	8	0/8	promjenjivo
Broj transakcija ( <i>Transaction Count</i> )	Tip okvira ( <i>Frame Type</i> )	Redni broj poruke ( <i>Transaction Sequence Number</i> )	Duljina poruke ( <i>Transaction Length</i> )	Podaci poruke ( <i>Transaction Data</i> )

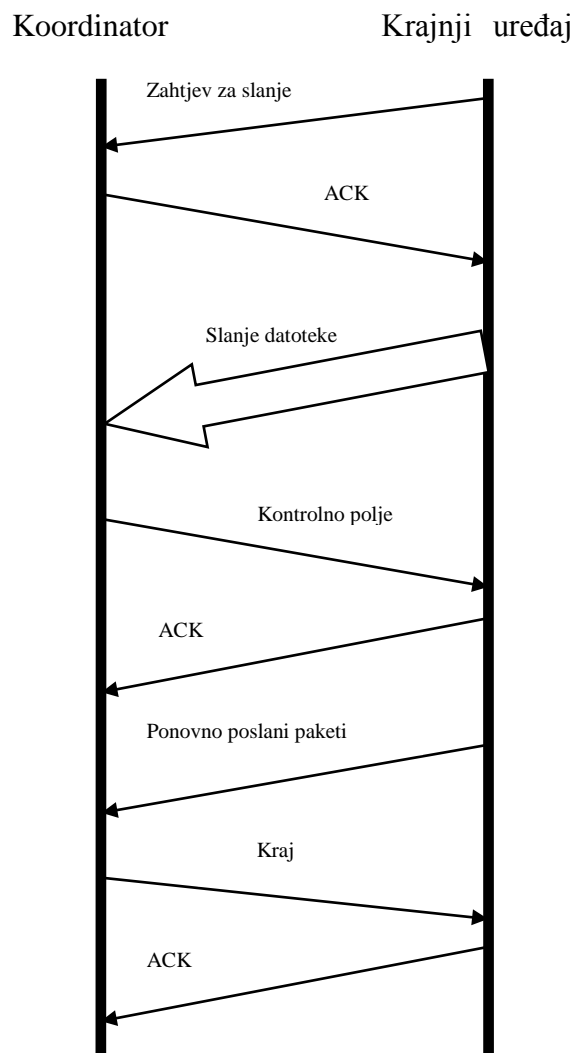
a)

Zaglavlje	Poruka	
Bajtova: 1	1	99
LSB rednog broja paketa	MSB rednog broja paketa	Podaci (elementi datoteke)

b)

Slika 13: Format poruke aplikacijskog sloja  
a) s MSG okvirom, b) s novodefiniranim MIP okvirom

Na Slici 14 prikazana je ideja algoritma prijenosa datoteke, a u nastavku je dan njegov detaljniji opis.



Slika 14: Tijek komunikacije

Krajni uređaj pošalje koordinatoru zahtjev za slanje u kojemu je podatak o broju paketa koji slijede i broju bajtova u paketu. Po primitku zahtjeva, koordinator pošalje potvrdu slanja (ACK).

Zatim krajni uređaj pošalje niz paketa u MIP okviru s elementima datoteke. Isključivanjem MAC potvrde prijema, paketi se šalju uzastopno, jedan za drugim, bez čekanja MAC potvrde od koordinatora.

Koordinator prima jedan po jedan paket i za svakog od njih bilježi je li njegov redni broj jednak rednom broju paketa koji on očekuje. U slučaju da nije, postavlja jedinicu na odgovarajuće mjesto u kontrolnom polju. U kontrolnom polju svaki bit odgovara rednom broju paketa, pa kontrolno polje ima onoliko bitova koliko je

paketa potrebno za prijenos cijele datoteke. Nakon što koordinator primi sve pakete, ako mu je kontrolno polje jednako nuli (što znači da su svi paketi ispravno primljeni), pošalje krajnjem uređaju zahtjev za kraj prijenosa.

U slučaju da je kontrolno polje različito od nule, koordinator ga šalje krajnjem uređaju i on onda pretraživanjem tog polja utvrđuje koji paketi nisu uspješno stigli do koordinatora te mu ih ponovno šalje. Koordinator prima jedan po jedan ponovno poslani paket te, ako redni broj paketa odgovara očekivanom, briše jedinicu na odgovarajućem mjestu u kontrolnom polju. Kad je primio sve ponovno poslani pakete, u slučaju da je kontrolno polje jednako nuli, šalje krajnjem uređaju zahtjev za kraj prijenosa. U protivnom, ponovno šalje kontrolno polje i, kao i ranije, krajnji uređaj određuje koje pakete treba ponovo slati. Taj se postupak ponavlja sve dok koordinator ne primi sve pakete uspješno, tj. dok kontrolno polje ne postane jednako nuli. Tada koordinator pošalje zahtjev za kraj prijenosa.

Praćenje tijeka i ispravnosti komunikacije odvija se ispisom poruka svakog čvora na serijsko sučelje, te praćenjem mrežnog analizatora ZENA.

Budući da krajnji uređaj u paketu šalje niz bajtova čija se vrijednost neprestano uzastopno mijenja od 0 do 255, na koordinatoru možemo provjeriti je li primljeno upravo ono što je i poslano ili je došlo do pogrešaka u prijenosu. Time možemo odrediti BER.

Kad koordinator detektira da je primljen posljednji paket, zaustavlja se brojilo koje je bilo pokrenuto na početku slanja i na serijsko sučelje se šalje ispis izračunatog vremena potrebnog za slanje niza paketa.

### **3.3.2. Metoda s MSG okvirom**

Za prijenos datoteka većih od onih koje su prenošene metodom s MIP okvirom koristi se metoda sa standardnim MSG okvirom. Svaki paket sadrži 96 bajtova korisne informacije (datoteke) te 1 bajt koji je MSB rednog broja poslanog paketa, zbog potrebe za dvobajtnim rednim brojem paketa pri slanju velike količine podatka (više od 256 paketa). Na Slici 15 prikazan je format poruke aplikacijskog sloja korišten u ovoj metodi. Poruka na aplikacijskom sloju sada ima 100 B (umjesto 101 B koliko ih je imala u prethodno opisanoj metodi prijenosa).

AF zaglavlje		Poruka			
		Zaglavlje poruke	MSG okvir		
Bitova: 4	4	8	8	8	768 (96 B)
Broj transakcija ( <i>Transaction Count</i> )	Tip okvira ( <i>Frame Type</i> )	LSB rednog broja paketa ( <i>Transaction Sequence Number</i> )	Duljina poruke ( <i>Transaction Length</i> )	MSB bajt rednog broja paketa	Podaci (slika)
				<i>Transaction Data</i>	

Slika 15: Format poruke aplikacijskog sloja s MSG okvirom

Tijek komunikacije među čvorovima isti je kao onaj prikazan na Slici 14. Zbog znatne veličine prenošene datoteke, umjesto prijenosa kontrolnog polja u obliku polja bitova implementirano je kontrolno polje u koje se može maksimalno zapisati 10 rednih brojeva pogrešno poslanih paketa. Dakle, veličina polja iznosi 20 B. Eksperimentalno se to pokazalo kao dovoljan broj (ne dolazi do više pogrešaka prilikom jednog slanja). U slučaju korištenja kontrolnog polja u obliku bitova, u kojem je ispravnost svakog paketa zabilježena jednim bitom, veličina kontrolnog polja iznosi osminu poslanih paketa. Tako bi npr. za prijenos nekomprimirane slike VGA razlučivosti kontrolno polje trebalo sadržavati 800 B (9 paketa), što je čak 40 puta više nego u ovoj metodi!

Prednost ovog rješenja u odnosu na ono korišteno u Metodi s maksimalno ispunjenim paketom je manje emitiranih podataka i samim time (zbog malog PER-a) manje pogrešaka u prijenosu. Također krajnji uređaj u ovom rješenju ne mora iz položaja bitova u kontrolnom polju računati redni broj paketa kojeg treba ponovno poslati, već samo iz primljenog kontrolnog polja čita redne brojeve. Time mikrokontroler izvodi manje naredbi i troši manje energije za računanje.



## 4. Eksperimentalni rezultati

### 4.1. Ispitivanje prijenosa datoteka

Kôd je uhodavan na manjem broju paketa te se onda prešlo na ispitivanje za potreban veći broj paketa. S krajnjeg uređaja se na koordinator šalje generirani niz brojeva (tipa *char*) koji se uzastopno povećavaju za 1 raspodijeljen u pakete.

Na početku ispitivanja paketi su slani u novodefiniranom MIP okviru (Slika 11b)), s maksimalnom ispunjenošću (99 bajtova datoteke po paketu), bez MAC potvrde prijema prema Metodi s maksimalno ispunjenim paketom. Pri svakom slanju niza paketa koordinator na serijsko sučelje ispisuje vrijeme potrebno za slanje i pogreške u prijenosu (u tablicama označeni kao PER – Packet Error Rate, BER – Byte Error Rate). U Tablici 1 prikazani su dobiveni podaci za veličine datoteke 10 kB (105 paketa), 20 kB (217 paketa) te 30 kB (311 paketa) bez MAC potvrde prijema.

Tablica 1: Rezultati ispitivanja za Metodu s maksimalno ispunjenim paketom, bez MAC potvrde prijema

Veličina datoteke [kB]	Prosječno vrijeme [ms]	Prosječna brzina [kB/s]	PER [ $10^{-5}$ ]	BER [ $10^{-7}$ ]
10	1463	6,95	0	19,2
20	2850	7,02	0	9,8
30	4244	7,09	3,21	26,0

Sljedeće ispitivanje obavljeno je nad većim datotekama, prema Metodi s MSG okvirom. Prijenos datoteke veličine 70 000 B (730 paketa) simulira slanje komprimirane slike, dok datoteka veličine 614 400 B (6400 paketa) predstavlja sliku VGA razlučivosti. Osim ispitivanja slanja generiranog niza brojeva, ispitalo se i slanje slike snimljene VGA kamerom. Na Slici 16 prikazana je jedna od uspješno

prenesenih slika snimljenih VGA kamerom. Tablica 2 prikazuje rezultate prijensa podataka s MAC potvrdom prijema i bez nje.



Slika 16: Slika VGA razlučivosti prenesena ZigBee protokolom

Tablica 2: Rezultati ispitivanja za Metodu s MSG okvirom, s MAC potvrdom prijema i bez nje

Sadržaj paketa	Veličina datoteke [B]		Prosječno vrijeme [ms]	Prosječna brzina [kB/s]	PER [10 <sup>-5</sup> ]	BER [10 <sup>-7</sup> ]
Generirani niz brojeva	70 000	S MAC ACK	12 991	5,39	3,0	9,3
		Bez MAC ACK	12 275	5,70	4,1	11,0
Generirani niz brojeva	614 400	S MAC ACK	113 130	5,30	1,0	6,0
		Bez MAC ACK	106 307	5,78	2,8	2,8
Slika	614 400	S MAC ACK	117 810	5,20	10,0	-
		Bez MAC ACK	106 794	5,75	3,0	

## 4.2. Promet paketa zabilježen mrežnim analizatorom ZENA

U nastavku je dano nekoliko karakterističnih slika s prikazima prometa paketa zabilježenih tijekom ispitivanja mrežnim analizatorom ZENA. Važniji blokovi i oznake su zaokruženi da bi se bolje istaknuli. Niz blokova koji ZENA prikazuje je vrlo dugačak (za sve slojeve protokola ZigBee), pa Slike 19 i 20, te 21 i 22 prikazuju iste poruke, ali na različitim slojevima stoga.

Na Slici 17 prikazana je uspostava mreže, priključivanje krajnjeg uređaja (*Association Request*, *Association Response*) i njegova prijava s identifikacijskim brojem poslanim u paketu KVP okvira. Te se poruke izmjenjuju samo prilikom uspostave mreže. Na Slici 18 vidi se zahtjev krajnjeg uređaja za slanje datoteke (slike) poslan u paketu KVP okvira s 4 transakcije. Svaka od njih sadrži određenu informaciju o nadolazećem nizu paketa (identifikacijski broj krajnjeg uređaja, veličinu paketa, broj paketa i veličinu datoteke). Na taj zahtjev koordinator pošalje odobrenje slanja. Adresa koordinatora je 0x0000, a adresa krajnjeg uređaja je 0x796F.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control	Seq Num	Dest PAN	Dest Addr	Source PAN	Source Addr	Beacon Request	FCS
00006	+791600	10	Type Sec Pend ACK IPAN	0x5B	0xFFFF	0xFFFF			-19	0x69 OK
00007	+927056	10	Type Sec Pend ACK IPAN	0x5B	0xFFFF	0xFFFF			-17	0x66 OK
00008	+5184	16	Type Sec Pend ACK IPAN	0x5C	0x0A16	0x0000				
00009	+269534	21	Type Sec Pend ACK IPAN	0x67	0x0A16	0x0000	0x0004A30000000000		Association Request	FCS
00010	+1312	5	Type Sec Pend ACK IPAN	0x67	0x67					
00011	+493072	19	Type Sec Pend ACK IPAN	0x68	0x0A16	0x0000	0x0004A30000000067		Data Request	FCS
00012	+1152	5	Type Sec Pend ACK IPAN	0x68	0x68					
00013	+6432	27	Type Sec Pend ACK IPAN	0x5D	0x0A16	0x0004A30000000067	0x23510A1601010001		Association Response	FCS
00014	+1632	5	Type Sec Pend ACK IPAN	0x5D	0x5D					
00015	+22816	12	Type Sec Pend ACK IPAN	0x69	0x0A16	0x0000	0x796F		Data Request	FCS
00016	+848	5	Type Sec Pend ACK IPAN	0x69	0x69					
00017	+4096	11	Type Sec Pend ACK IPAN	0x5E	0x0A16	0x796F				
00018	+42928	36	Type Sec Pend ACK IPAN	0x6A	0x0A16	0x0000	0x796F			
00019	+23535664	5	Type Sec Pend ACK IPAN	0x6A	0x6A					

Slika 17: Uspostava komunikacije krajnjeg čvora i koordinatora

The screenshot shows a list of captured packets in the ZENA(TM) Packet Sniffer. Two packets are highlighted with red circles and arrows pointing to the 'AF Header' field in the 'NWK Frame Control' section. The first packet (Source: 0x796F) has an AF Header value of 0x04, and the second packet (Source: 0x0000) has an AF Header value of 0x01. Both are identified as 'Data Request' packets.

Slika 18: Zahtjev i odobrenje slanja slike

Slike 19 i 20 pokazuju prijenos paketa s MAC potvrdom prijema. U MAC okviru poruke krajnjeg uređaja vidi se da je postavljen zahtjev za MAC potvrdom prijema MAC=Y (yes). Nakon tog paketa koordinator odgovara MAC potvrdom prijema.

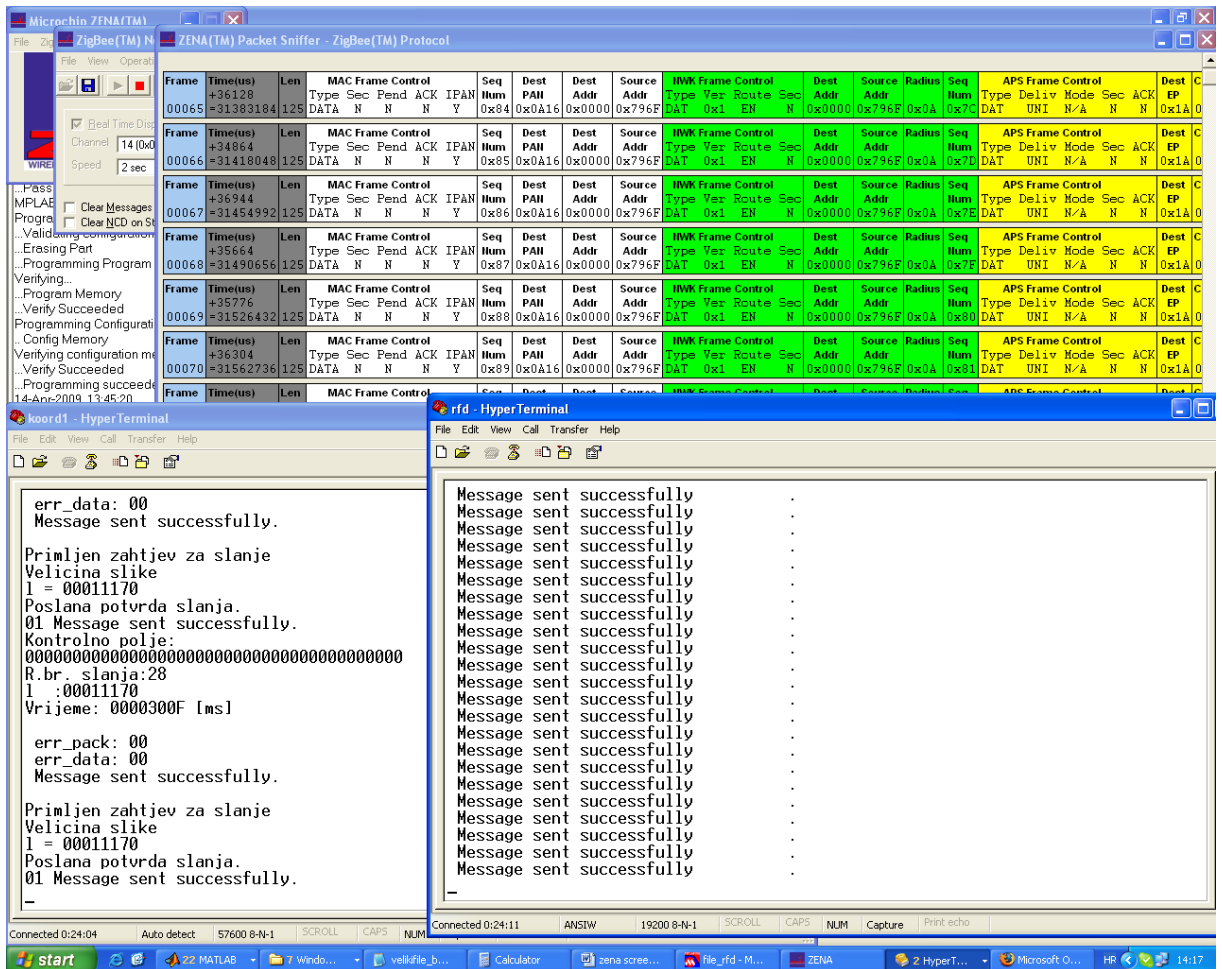
The screenshot shows a list of captured packets. Two packets are highlighted with red circles and arrows pointing to the 'ACK' field in the 'MAC Frame Control' section. The first packet (Frame 00321) has an ACK value of 'Y', and the second packet (Frame 00322) has an ACK value of 'N'. Both are identified as 'Data' packets.

Slika 19: Prijenos paketa s MAC potvrdom prijema – MAC, mrežni (NWK) sloj i APS podsloj

Na Slici 20 prikazane su poruke na aplikacijskom sloju. Uočava se da su tipa MSG i da sadrže samo jednu transakciju, duljine 97 B (heksadekadski 0x61). U bloku s podacima (Data) prvi bajt je značajniji bajt (MSB) rednog broja trenutno poslanog







Slika 23: Prijenos 70 000 B bez MAC potvrde prijema

Analogno, za Sliku 24 možemo reći da prikazuje prijenos slike snimljene VGA kamerom, bez MAC potvrde prijema. Koordinatorski čvor šalje na serijsko sučelje sve primljene bajtove slike. Tako se slika pohranjuje u tekstualnu datoteku i u programskom paketu MATLAB pretvara u matricu, odnosno 'klasičnu' sliku.

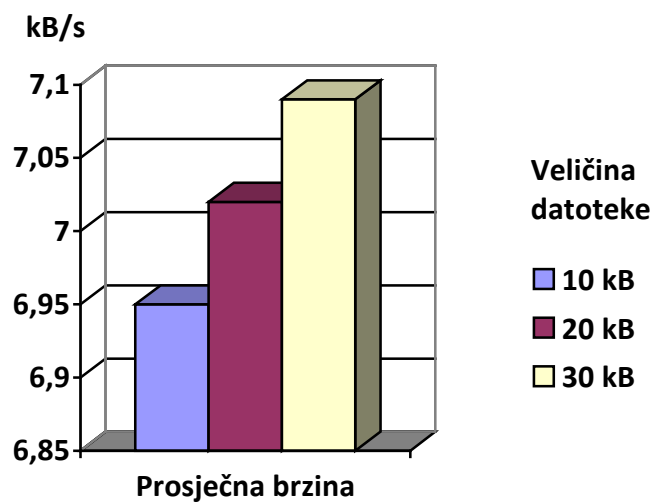




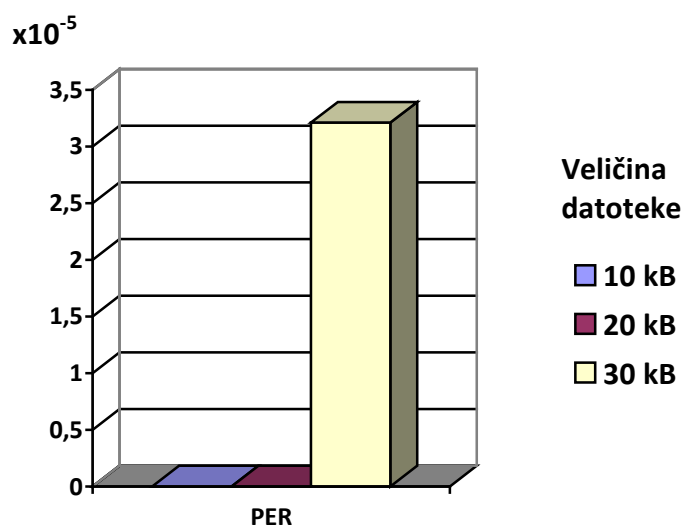
## 5. Rasprava

### 5.1. Prijenos datoteka veličine do 30 kB

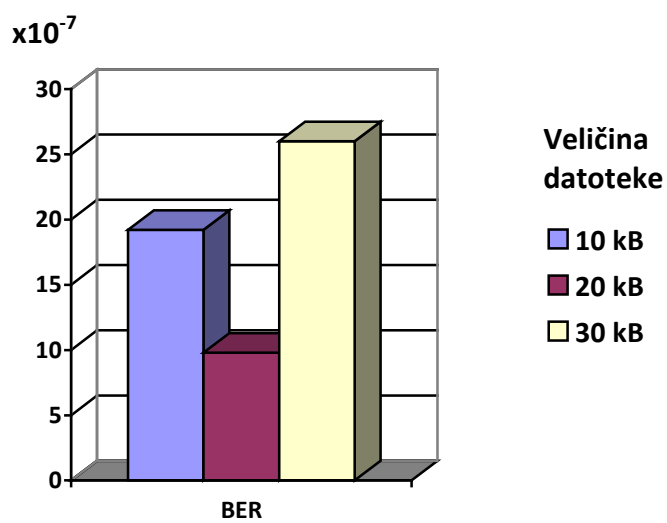
Rezultati iz Tablice 1 (za datoteke veličine do 30 kB) pokazuju brzinu prijenosa oko 7 kB/s. Ta brzina je postignuta uz maksimalno ispunjen paket prenošen novodefiniranim MIP okvirom (Slika 13b)) uz isključivanje MAC potvrde prijema. Također je ispis o uspješno poslanoj poruci koji krajnji uređaj šalje na serijsko sučelje skraćen na 3 znaka (to se pokazalo kao minimalno potrebno – za manje znakova dolazi do gubitka veze s koordinatorom prije slanja paketa s elementima datoteke). Time se osjetno dobilo na brzini prijenosa. No, postoji mogućnost da je za veći broj paketa to prebrzo i da zato dođe do pogrešaka u prijenosu. Na Slici 25 dan je grafički prikaz rezultata iz Tablice 1.



a)



b)



c)

Slika 25: Grafički prikaz rezultata iz Tablice 1, uz veličinu datoteke kao parametar:

a) Prosječna brzina, b) PER, c) BER

## 5.2. Prijenos datoteka veličine 70 000 B i 614 400 B

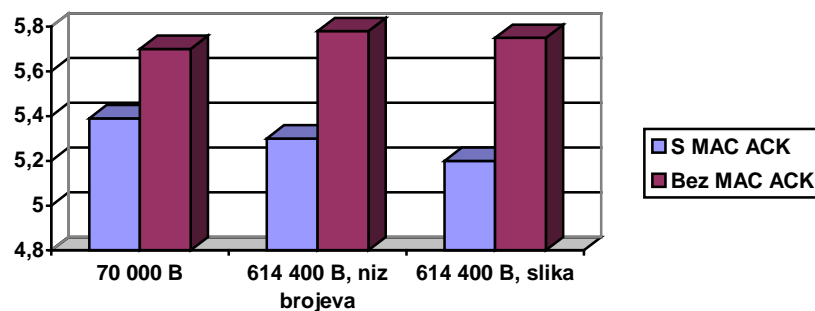
Budući da je u programskom kôdu krajnjeg uređaja na aplikacijskom sloju definirano da se nakon određenog broja neuspješno primljenih MAC potvrda prijema prekine komunikacija, za slučaj s MAC potvrdom prijema nakon nekoliko desetaka uzastopnih slanja datoteke velike 614 400 B dođe do prekida komunikacije. Zato vrijednosti PER i BER u Tablici 2 za ta dva slučaja nisu vjerodostojne, zbog relativno malog broja uzoraka. Dakle, potrebno je omogućiti ponovno uspostavljanje mreže u takvoj situaciji. U Tablici 2 za slučaj bez MAC potvrde prijema nema nikakvog čekanja krajnjeg uređaja između uzastopnih slanja paketa, te ponekad dođe do resetiranja čvorova, ali se komunikacija nastavi. Da se to izbjegne, treba smanjiti brzinu prijenosa.

Kod slanja datoteke s generiranim nizom brojeva primjećuje se da, iako je paket što se tiče rednog broja uspješno primljen, ponekad postoji unutar njega pogrešno primljen bajt. To je u ovom slučaju moguće detektirati zbog toga što koordinator prima podatke koji su mu unaprijed poznati. Kod slanja slike koordinator ne zna što prima te se tek nakon rekonstruiranja slike može vidjeti je li prijenos bio u potpunosti uspješan.

Na Slici 26 grafički su prikazani rezultati iz Tablice 2.

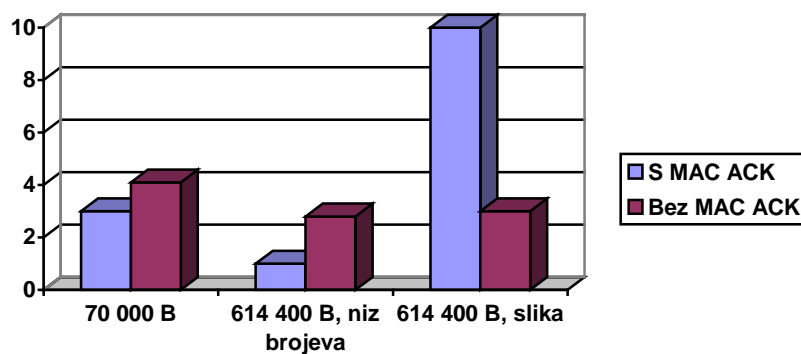
Prilikom slanja datoteke velike 70 000 B dobivena je dugotrajna i stabilna komunikacija te rezultate ispitivanja (za razliku od onih za veće datoteke) možemo smatrati pouzdanima. Usporedbom rezultata za prijenos podataka s MAC potvrdom prijema i bez nje možemo zaključiti da se u slučaju onemogućavanja MAC potvrde brzina prijenosa povisuje nauštrb pouzdanosti. No, povećanje brzine je manje od smanjenja pouzdanosti. U slučaju 70 000 B velike datoteke povećanje brzine iznosi oko 6%, dok je PER veći za skoro 37%, a BER za 18%. Povećanje PER-a nije toliko kritično za kvalitetu prijenosa, zbog implementacije kontrolnog polja i ponovnog slanja pogrešno primljenih paketa. Međutim, kod prijenosa slike bitno je osigurati što manje pogrešno prenesenih bajtova unutar paketa, zbog nemogućnosti detekcije pogreške i ponovnog slanja tog paketa.

Prosječna brzina,  
kB/s



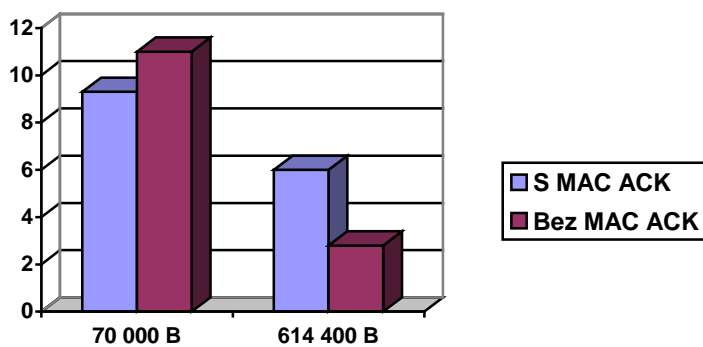
a)

PER,  $\times 10^{-5}$



b)

BER,  $\times 10^{-7}$



c)

Slika 26: Grafički prikaz rezultata iz Tablice 2:

a) Prosječna brzina, b) PER, c) BER

Iako brojke naizgled ne opravdavaju ukidanje MAC potvrde prijema, ne smije se zaboraviti bitan dobitak u slučaju izostanka MAC potvrda (zbog čega se i pristupilo tom zahvatu na ZigBee stogu), a to je smanjenje energije komunikacije. Prisjetimo se izraza (1) – (5) iz poglavlja 3.2. i činjenice da je energija komunikacije linearno proporcionalna broju bitova u paketu poruke koja se bežično prenosi.

U slučaju isključenja MAC potvrde prijema ne prenosimo poruku s potvrdom prijema nakon svakog poslanog paketa, nego na kraju prijenosa prenosimo poruku s kontrolnim poljem, nakon čega slijede ponovno poslani paketi (ako je bilo pogrešaka u prijenosu). Prilikom slanja datoteke veličine 614 400 B (6400 paketa), broj dodatnih poruka MAC potvrde prijema iznosio bi 6400 (za svaki paket po jedna), dok s ovom metodom imamo 12 dodatnih poruka (kontrolno polje, potvrda prijema krajnjeg čvora i 10 ponovno poslanih paketa u najgorem slučaju).

Omjer broja dodatno razmijenjenih paketa u slučaju prijenosa 614 400 B velike datoteke Metodom s MSG okvirom (bez MAC potvrde prijema) i na standardni način (s MAC potvrdom prijema):

$$\frac{12}{6400} \approx \frac{1}{533}$$

pokazuje uštedu u broju dodatno razmijenjenih paketa od čak 99,8%!

U općem slučaju taj omjer glasi:

$$O_1(N_{pak}) = \frac{12}{N_{pak}}, \quad (8)$$

gdje je  $N_{pak}$  ukupni broj paketa u kojima se prenosi datoteka.

Kao što vidimo, iznos omjera  $O_1$  značajno ovisi o veličini datoteke (točnije o broju paketa) koja se prenosi.

Omjer broja ukupno razmijenjenih paketa manje ovisi o veličini datoteke (pogotovo za velike datoteke). Opći izraz za omjer broja ukupno razmijenjenih paketa glasi:

$$O_2(N_{pak}) = \frac{N_{pak} + 12}{N_{pak} + N_{pak}} = \frac{N_{pak} + 12}{2 \cdot N_{pak}}, \quad (9)$$

te za dovoljno veliki broj paketa ( $N_{pak} \gg 12$ ), što obično jest karakteristično za prijenos velikih datoteka, možemo ga aproksimirati s:

$$O_2 = \frac{N_{pak}}{2 \cdot N_{pak}} = \frac{1}{2}.$$

**Ušteda u broju ukupno razmijenjenih paketa pri prijenosu velike datoteke bez MAC potvrde prijema Metodom s MSG okvirom u odnosu na standardni prijenos s MAC potvrdom prijema iznosi, dakle, oko 50%!**

Čak i da nakon ponovno poslanih paketa opet ima pogrešaka u prijenosu i postoji potreba za ponovnim slanjem, ušteda ostaje velika. Napomenimo i da kod prijenosa s MAC potvrdom nije rijetkost da se dogodi i duži zastoj u komunikaciji pa krajnji uređaj više puta šalje isti paket, sve dok ne dobije potvrdu prijema.

Prilikom prijenosa datoteke na standardni način, s MAC potvrdom prijema, broj bajtova koji se prenose ( $N_{B,sMACcack}$ ) može se izračunati kao:

$$N_{B,sMACcack} = N_{pak} \cdot (N_{B,datoteka} + N_{B,MACcack}), \quad (10)$$

gdje je  $N_{pak}$  ukupni broj paketa u kojima se prenosi datoteka,  $N_{B,datoteka}$  broj bajtova u paketu kojim se prenose elementi datoteke, a  $N_{B,MACcack}$  broj bajtova u paketu s MAC potvrdom prijema.

Broj bajtova koji se prenose Metodom s MSG okvirom ( $N_{B,bezMACcack}$ ) može se izračunati kao:

$$N_{B,bezMACcack} = N_{pak} \cdot N_{B,datoteka} + N_{B,kontr} + N_{B,ponovljeni}. \quad (11)$$

$N_{B,kontr}$  (broj bajtova u paketu kojim se prenosi kontrolno polje) i  $N_{B,ponovljeni}$  (ukupan broj bajtova u paketima ponovno prenesenih pogrešno primljenih paketa) mogu se zanemariti kod prijenosa velike datoteke (velikog broja paketa), te izraz (11) za izračun broja bajtova prenešenih Metodom s MSG okvirom aproksimiramo izrazom (12):

$$N_{B,bezMACcack} = N_{pak} \cdot N_{B,datoteka}. \quad (12)$$

Budući da je energija komunikacije proporcionalna broju prenešenih bitova (izraz (5)), možemo procijeniti omjer energije komunikacije utrošene kod prijenosa datoteke Metodom s MSG okvirom (bez MAC potvrde prijema) i energije

komunikacije utrošene kod prijenosa datoteke standardim načinom (uz MAC potvrde prijema):

$$O_3 = \frac{E_{bezMACack}}{E_{sMACack}} = \frac{N_{B,bezMACack}}{N_{B,sMACack}} \quad (13)$$

Slika 8 prikazuje veličinu poruke u paketu na pojedinom sloju ZigBee stoga. Poruka MAC potvrde prijema (kao što se vidi na Slici 19) sadrži samo dijelove 'Frame Control', 'Sequence Number' i 'FCS'. Uzevši u obzir veličine poruke na nižem, fizičkom sloju, možemo zaključiti da paket s MAC potvrdom prijema sadrži 11 B. Prilikom maksimalnog ispunjenja paketa u Metodi s MSG okvirom, ukupno na fizičkom sloju paket s elementima datoteke sadrži 133 B (127 B+ 6 B).

Uvrštavanjem izraza (10) i (12) u izraz (13), uz  $N_{B,datoteka} = 133$  i  $N_{B,MACack} = 11$ , omjer energija komunikacije pri slanju s MAC potvrdom prijema i bez nje ( $O_3$ ) iznosi 92,4%. Iz toga se može zaključiti da ušteda energije korištenjem Metode s MSG okvirom iznosi oko 7,6%.

Primjećujemo da ušteda energije ovisi o ispunjenosi paketa kojim se šalje poruka. U slučaju prijenosa poruke s manje bajtova u paketu, ušteda energije bila bi veća.

Zbog svega navedenoga može se zaključiti da je korisno isključiti slanje MAC potvrde prijema, ali ipak dodatno smanjiti brzinu prijenosa uvođenjem čekanja između slanja uzastopnih paketa na krajnjem uređaju. Time se smanjuje broj pogrešaka u prijenosu. Uvođenjem čekanja od približno 0,7 ms postiže se zadovoljavajuća kvaliteta prijenosa. Time je ostvarena brzina prijenosa približno jednaka onoj zabilježenoj za slanje s MAC potvrdom (oko 5,3 kB/s). Dakle, **uz ostvarenu jednaku brzinu prijenosa kao i s MAC potvrdom prijema, prijenosom bez MAC potvrde prijema, Metodom s MSG okvirom, ostvari se oko 7,6% manja potrošnja energije komunikacije.**

Ograničenje prilikom ispitivanja prijenosa slike je ispis primljenih bajtova (piksela) na serijsko sučelje osobnog računala koje dodatno opterećuje mikrokontroler za vrijeme primanja velikog broja paketa. Zbog toga dođe do poremećaja u komunikaciji i najčešće krajnji uređaj izgubi vezu s koordinatorom. I

tom problemu pomaže usklađivanje brzine slanja podataka s krajnjeg uređaja s brzinom primanja podataka na koordinatoru, tj. uvođenje određenog čekanja između slanja uzastopnih paketa na krajnjem uređaju. To, naravno, usporava ukupan prijenos, ali povećava njegovu pouzdanost i kvalitetu. U stvarnoj primjeni u bežičnoj mreži primljeni podaci (slika) će se zapisivati u memoriju, pa neće biti poremećaja u komunikaciji uzrokovanog ispisom na serijsko sučelje te se može očekivati ostvarenje većih brzina prijenosa.

### 5.3. Budući rad

Usporedbom rezultata iz Tablice 1 s rezultatima iz Tablice 2 vidimo da se za manju količinu podataka i maksimiziranje brzine slanja postiže gotovo 23% brži prijenos. U slučaju prijenosa datoteke veličine do 30 kB, Metoda s maksimalno ispunjenim paketom bi bila pogodna. Za veće datoteke treba koristiti Metodu s MSG okvirom.

Ispitivanje slanja manjih datoteka (do 30 kB, pa čak i 70 kB) pokazalo da je prijenos podataka osjetno lakši (s manje zastoja i resetiranja čvorova), a za datoteke veličine do 30 kB i osjetno brži. Poznato je da slika, kao dvodimenzionalan signal, po prirodi obiluje redundancijama, te se kao logičan slijed između akvizicije i slanja slike nameće obrada, odnosno kompresija slike. To područje otvara istraživanja otvara brojne nove mogućnosti i izazove.

Istraživanje opisano u ovom radu pokazalo je da je modifikacija originalnog ZigBee protokolnog stoga radi isključivanje slanja MAC potvrde prijema korisna za prijenos slike (tj. općenito velike datoteke). Ova modifikacija ZigBee stoga posebno je prikladna za aplikacije kao što je naša – mreže s malim brojem senzorskih čvorova u zvijezda topologiji. Određenu scenu snima samo jedna kamera i šalje sliku izravno na koordinator. Nema potrebe ni mogućnosti za *multi-hop* mrežom, više kanala komunikacije, usmjerivače, distribuirano postavljanje kamera i distribuiranu obradu slike. Ti problemi su istraživani u [21],[22],[23]. Zato je ovaj pronalazak zahvata na već postojećem standardiziranom protokolarnom stogu vrlo praktičan (u odnosu na konstruiranje u potpunosti novog MAC sloja što je predmet istraživanja u [19]). U budućem radu je potrebno ispitati optimalne parametre brzine slanja (odnosno



uvođenje čekanja između slanja uzastopnih paketa na krajnjem čvoru) za veličinu komprimirane slike koju je potrebno slati na koordinatorski čvor. Ovisno o prirodi implementirane kompresije, moguće je primijeniti dodjelu prioriteta pojedinim djelovima datoteke komprimirane slike te u skladu s time odlučiti o primjeni potvrde prijema.

## 6. Zaključci

Bežične mreže osjetila su multidisciplinarno područje tehnologije u koje se danas mnogo ulaže i od koje se očekuju koristi u mnogim dijelovima ljudske djelatnosti i života općenito. Njihova primjena u promatranju okoliša i staništa donosi prednosti u istraživanjima u ekologiji, biologiji, agronomiji i srodnim znanostima. Na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u tijeku je razvoj bežične mreže osjetila primjenjive u masliniku u okviru projekta MasliNET.

U posljednje vrijeme je posebno zanimljiva akvizicija slike i videa u bežičnim mrežama osjetila. Tako i u MasliNET-u poseban izazov predstavlja razvoj modula za akviziciju slike visoke razlučivosti koja bi prikazivala lovku s maslininim muhamama ili fenofazu stabla. Izvedba takvih čvorova zahtijeva primjene znanja iz raznih područja i predmet je intenzivnih istraživanja u svjetskoj znanstvenoj zajednici. Protokol ZigBee, koji se koristi u bežičnim mrežama osjetila nije inicijalno namijenjen prijenosu datoteka. Da bi se one uspješno prenijele, potrebno je ili modificirati postojeći protokol ZigBee ili projektirati neki novi protokol. Važno ograničenje u bežičnom prijenosu, koje posebno dolazi do izražaja prilikom prijenosa datoteka, je potrošnja energije. Velik udio potrošnje energije predstavlja energija potrebna za komunikaciju (bežični prijenos poruka). Da bi se energija komunikacije smanjila, treba smanjiti broj prenesenih poruka. Potrebno je naći kompromis koji bi zadovoljio ograničenja u energiji i istodobno osigurao pouzdan prijenos informacije.

Ovaj rad bavi se upravo tom problematikom. Predstavljena je modifikacija originalnog ZigBee protokolnog stoga kojim se isključuje inače stalno postavljen zahtjev za potvrdom prijema na MAC sloju. Umjesto toga, kontrola prijenosa paketa odvija se na aplikacijskom sloju pomoću kontrolnog polja koordinatora koji bilježi neuspješno primljene pakete i šalje zahtjev krajnjem uređaju za ponovno slanje neuspješno poslanih paketa (ako ih ima). Predstavljene su i dvije metode prijenosa datoteka bez MAC potvrde prijema. Metodom s maksimalno ispunjenim paketom (MIP), za prijenos datoteka veličine do 30 kB, postignuta je brzina prijenosa oko 7 kB/s. Za veće datoteke korištena je Metoda s MSG okvirom s kojom se uz brzinu od oko 5,3 kB/s (24% manju od one postignute u Metodi s maksimalno ispunjenim paketom) postiže zadovoljavajuća pouzdanost prijenosa paketa. Tolika brzina se

postiže i pri prijenosu velike datoteke s MAC potvrdom prijema. Bitno je pritom naglasiti da se prilikom prijenosa bez MAC potvrde prijema prenosi 50% manje paketa. Budući da je energija komunikacije osjetilnog čvora proporcionalna broju prenešenih bitova, ovisno o ispunjenosti paketa kojim se prenose elementi datoteke, postiže se ušteda energije u odnosu na prijenos s MAC potvrdom prijema u iznosu od barem 7,6%. Ovakvi načini prijenosa velike količine podataka protokolom ZigBee u bežičnoj mreži osjetila još nisu zabilježeni. Istraživanje predstavljeno u ovom radu je značajan korak prema uspostavi prikladnog rješenja energetske učinkovitog i pouzdanog slanja slike (tj. općenito datoteke) u bežičnim multimedijским mrežama osjetila.

## 7. Popis literature

- [1] Chong, C.-Y., Kumar, S. P.: Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges // Proceedings of the IEEE, Vol.91, No.8, August 2003.
- [2] Porter, J., Arzberger, P., Braun, H.-W., Bryant, P., Gage, S., Hansen, T., Hanson, P., Lin, C.-C., Lin, F.-P., Kratz, T., Michener, W., Shapiro, S., Williams, T.: Wireless Sensor Networks for Ecology, 2005. URL: <http://www.coralreefeon.org/bioscience%20wireless%20networks%202005.pdf> (2008-06-14)
- [3] Ganesan, D., Cerpa, A., Yu, Y., Estrin, D., Ye, W., Zhao, J.: Networking issues in wireless sensor networks, 2003.
- [4] Hart, J. K., Martinez, K.: Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? // Earth-Science Reviews 78, 2006., str. 177-191.
- [5] Burrell, J., Brooke, T., Beckwith, R., Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production, 2004. URL: [http://people.ischool.berkeley.edu/~jenna/burrell\\_pervasive\\_computing.pdf](http://people.ischool.berkeley.edu/~jenna/burrell_pervasive_computing.pdf) (2008-06-14)
- [6] MasliNET, URL: <http://www.maslinet.com/> (2008-06-13)
- [7] Ferrigno, L., Marano, S., Pacielli, V., Pietrosanto, A.: Balancing computational and transmission power consumption in wireless image sensor networks // VECIMS, July 2005., str. 61.-66.
- [8] Downes I., Rad L. B., Aghajan H.: Development of a mote for wireless image sensor networks// COGIS, Paris, March 2006.
- [9] Rahimi M., Rick, B., Iroezi, O. I., Garcia, J. C., Warrior, J., Estrin, D., Srivastava, M.: Cyclops: In situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks // Sensys, 2005., str. 192.-204.
- [10] CENS, URL: <http://research.cens.ucla.edu/> (2008-06-13)
- [11] Park, C., Chou, P. H.: eCAM: ultra compact high data-rate wireless sensor node with a miniature camera, URL: <http://www.ece.uci.edu/~chou/eCAM.pdf>
- [12] Park, C., Liu, J., Chou, P. H.: Eco: an ultra-compact low-power wireless sensor node for real-time motion monitoring // Third International Workshop on Body Sensor Networks, April 2006.
- [13] Hengstler, S., Prashanth, D., Fong, S., Aghajan, H.: MeshEye: a hybrid-resolution smart camera mote for application in distributed intelligent

- surveillance // IPSN, April 2007., URL:  
[http://www.stanford.edu/~hengstle/labpage/publications/conference\\_paper\\_9.pdf](http://www.stanford.edu/~hengstle/labpage/publications/conference_paper_9.pdf)
- [14] Ferrigno, L., Pietrosanto, A., Paciello, V.: Low-cost visual sensor node for Bluetooth-based measurement networks // IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol.55, No.2, April 2006.
- [15] Kleihorst, R., Schueler, B., Danilin, A., Heijligers, M.: Smart camera mote with high performance vision system,  
URL: [http://www.iti.tugraz.at/dsc06/CR/dsc06\\_p11\\_cr.pdf](http://www.iti.tugraz.at/dsc06/CR/dsc06_p11_cr.pdf)
- [16] CSEM, URL: <http://www.csem.ch/> (2008-07-25)
- [17] Feng, W.-C., Kaiser, E., Feng, W.-C., Le Baillif, M.: Panoptes: scalable low-power video sensor networking technologies, URL:  
[http://syn.cs.pdx.edu/projects/panoptes/TOMCAPP2005\\_article.pdf](http://syn.cs.pdx.edu/projects/panoptes/TOMCAPP2005_article.pdf)
- [18] Kulkarni, P., Ganesan, D., Shenoy, P.: The case for multi-tier camera sensor networks //NOSSDAV, June 2005.
- [19] Ye, W., Heidemann, J., Estrin, D.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks
- [20] Haenselmann, T.: Sensornetworks, 2006., URL: [http://www.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn\\_book/](http://www.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn_book/)
- [21] Wu, H., Abouzeid, A. A., Energy efficient distributed JPEG2000 image compression in multihop wireless networks, 2005., URL:  
[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6TYP-4FWFTSG-1&user=4758774&rdoc=1&fmt=&orig=search&sort=d&view=c&acct=C000050661&version=1&urlVersion=0&userid=4758774&md5=c8c3656885104b4c82444ce660237bcd](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TYP-4FWFTSG-1&user=4758774&rdoc=1&fmt=&orig=search&sort=d&view=c&acct=C000050661&version=1&urlVersion=0&userid=4758774&md5=c8c3656885104b4c82444ce660237bcd)
- [22] Lecuire, V., Duran-Faundez, C., Krommenacker, N.: Energy-Efficient Transmission of Wavelet-Based Images in Wireless Sensor Networks, EURASIP Journal on Image and Video Processing Volume 2007, Article ID 47345, 11 pages, 2007.
- [23] Shu, F., Sakurai, T., Zukerman, M., Vu, H. L.: Packet Loss Analysis of the IEEE 802.15.4 MAC without Acknowledgements // IEEE Communications Letters, VOL. 11, NO. 1, Jan. 2007.
- [24] Wang, K.-Y., Lee, S.-S., Song, J.-Y., Choi, J.-Y., Shin, S.-S., Kim, D.-S., Chung, D.-J.: Low-MAC FEC controller for JPEG2000 image transmission over IEEE 802.15.4 // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Volume 38, Feb. 2009.

- [25] Wang, K.-Y., Lee, S.-Y., Kim, B.-S., Lee, S.-S., Song, J.-Y., Kim, D.-S., Chung, D.-J.: Robust JPEG2000 Image Transmission over IEEE 802.15.4, 2008.
- [26] Pekhteryev G., Sahinoglu, Z., Orlik, P., Bhatti, G.: Image Transmission over IEEE 802.15.4 and ZigBee Networks, Mitsubishi Electric Research Laboratories, 2005.
- [27] 1/4 -Inch SOC VGA CMOS Digital Image Sensor, MT9V131, Micron, datasheet
- [28] 1/3.2- Inch, 2-Megapixel SOC CMOS Digital Image Sensor, MT9D131, Micron, Developer Guide
- [29] PICDEM Z , ZigBee Technology Demonstration Kit, URL: [http://docweb.khk.be/khk/remote/technologie/PICDEM\\_Z/PICDEM\\_Z\\_fact\\_she\\_et\\_51504b.pdf](http://docweb.khk.be/khk/remote/technologie/PICDEM_Z/PICDEM_Z_fact_she_et_51504b.pdf)
- [30] Flowers, D., Otten, K., Yang, Y., Rajbharti, N.: Microchip Stack for the ZigBee protocol, Microchip Technology Inc. , 2007., URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00965c.pdf> (2008-7-23)
- [31] IEEE 802.15.4 Standard, 2006., URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>
- [32] ZigBee Specification, 2007., URL: <http://www.zigbee.org>
- [33] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H.: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.

## Sažetak

Vana Jeličić

### **Modifikacija protokola ZigBee za energetske učinkovit i pouzdan prijenos slike u bežičnim multimedijским mrežama osjetila**

Bežične mreže osjetila (BMO) su predmet sve intenzivnijeg istraživanja. Veliki izazov u tom području je akvizicija i prijenos slike. Protokol ZigBee nije inicijalno namijenjen prijenosu velike količine podataka. Motivacija za istraživanje predstavljeno u ovom radu je potreba razvoja bežičnog osjetilnog čvora za dobivanje slike u okviru projekta MasliNET. U ovom radu predstavljena je fragmentacija slike i njen prijenos u više paketa. Predstavljena je i modifikacija originalnog ZigBee protokolnog stoga kojom se isključuju MAC potvrde prijema određeni čvora prilikom primanja mnoštva paketa u kojima se nalaze dijelovi slike. Smanjenjem broja poslanih poruka smanjuje se potrošnja energije čvorova koja je ograničavajući faktor u BMO. Da bi se ipak provela kontrola prijenosa podataka, uvodi se kontrolno polje na aplikacijskom sloju u koje koordinator bilježi eventualne pogrešno primljene pakete i šalje krajnjem uređaju s kamerom zahtjev za njihovo ponovo slanje. Predstavljene su dvije metode prijenosa datoteke bez MAC potvrde prijema. U jednoj od njih, umjesto standardnih KVP i MSG okvira aplikacijske poruke, uveden je vlastiti, maksimalno ispunjen paket (MIP). Metoda s maksimalno ispunjenim paketom prikladna je za prijenos datoteka veličine do 30 kB i njome se postiže brzina prijenosa oko 7 kB/s. Metoda sa standardnim MSG okvirom prikladna je za prijenos još većih datoteka i njome se postiže brzina oko 5,7 kB/s, no veća stabilnost i pouzdanost komunikacije postiže se pri brzini od oko 5,3 kB/s. Tolika brzina se postiže i pri prijenosu velike datoteke s MAC potvrdom prijema. Važno je istaknuti da se prilikom prijenosa bez MAC potvrde prijema prenosi 50% manje paketa, uz uštedu energije komunikacije u odnosu na prijenos s MAC potvrdom prijema u iznosu od barem 7,6%.

Ovakvi načini prijenosa velike količine podataka predstavljaju novost u dosadašnjem istraživanju bežičnih multimedijских mreža osjetila te omogućuju energetski učinkovitiji, pouzdan prijenos velike količine podataka.

Ključne riječi: Bežične multimedijске mreže osjetila, ZigBee, prijenos slike, MAC potvrda prijema



## Summary

Vana Jeličić

### **ZigBee protocol modification for energy efficient and reliable image transmission in Wireless Multimedia Sensor Networks**

Wireless Sensor Networks (WSN) are a subject of intensive research. A big challenge in that field is image acquisition and transmission. ZigBee protocol is not initially designed to transmit a large amount of information. The motivation for the research presented in this work was the necessity to develop a wireless image sensor node in MasliNET project. This work presents image fragmentation and transmission in multiple packets. A modification of the original ZigBee protocol stack in order to disable MAC acknowledgment of the destination node while receiving many packets containing image elements is also presented. By decreasing the number of transmitted messages, energy consumption of the nodes, which is a restrictive factor in WSN, is also decreasing. In order to establish data transfer control, a control field is implemented on the application layer, in which the coordinator records inaccurately received packets (if there are any) and sends a request to the end device for their retransmission. Two methods of file transmission without MAC acknowledgment are presented. In one of them, instead of the standard KVP and MSG application message frames, a new, maximally filled packet (MIP) is introduced. The Method with maximally filled packet is appropriate for transmission of the files up to 30 kB size and by this method a transmission rate of about 7 kB/s is accomplished. The Method with standard MSG frame is appropriate for transmitting even bigger files and by it a transmission rate of about 5,7 kB/s is accomplished, but a bigger communication stability and reliability is obtained at the rate of about 5,3 kB/s. That rate is also accomplished by transmitting a big file with MAC acknowledgment. It's important to emphasize that, at the transmission without MAC acknowledgment, 50% less packets are being transmitted, with energy saving of minimum 7,6% compared with the transmission with MAC acknowledgment.

These methods of transmitting a large amount of information are a novelty in the state of the art research in Wireless Sensor Networks and they enable an energy more efficient, reliable transmission of large amount of information.

**Key words:** Wireless Multimedia Sensor Networks, ZigBee, image transmission, MAC acknowledgment