

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**Sebastian Linić**

**KOMUNIKACIJA U VIDLJIVOM SVJETLU**

**DIPLOMSKI RAD**

**RIJEKA, 2013. godina**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

# **KOMUNIKACIJA U VIDLJIVOM SVJETLU**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Optoelektronički sustavi

Mentor: dr. sc. Irena Jurdana

Student: Sebastian Linić

Matični broj: 15501/E

Studij: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

Rijeka, rujan, 2013. godina

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Pomorskom fakultetu u Rijeci s navedenom literaturom.*

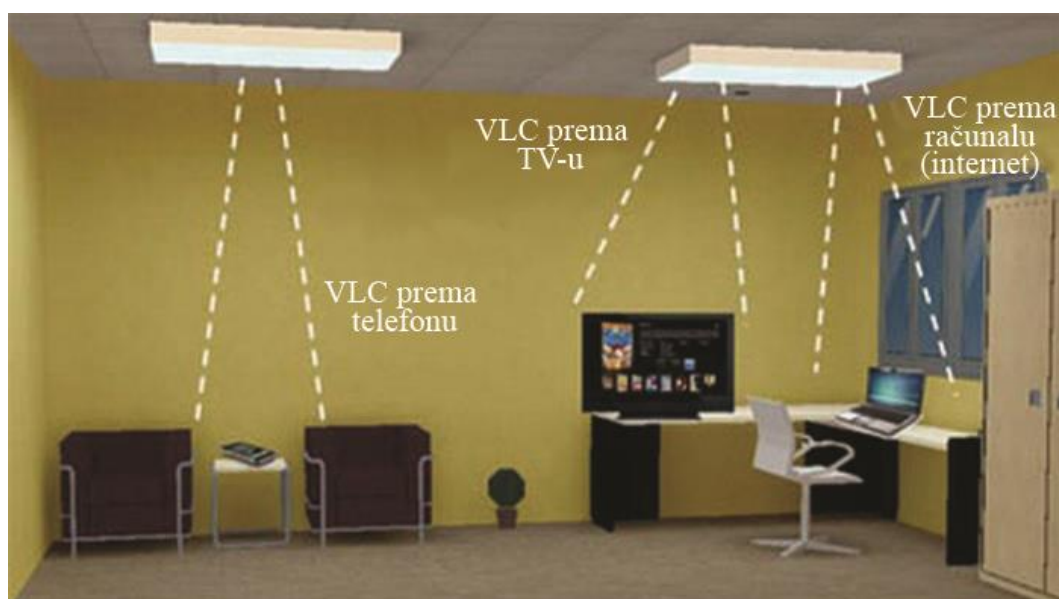
# Sadržaj

<b>1.</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Povijest komunikacije u vidljivom svjetlu .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>Tehnologije prijenosa informacija .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1.</b>	<b>LED tehnologija .....</b>	<b>4</b>
3.1.1.	Prijenos podataka bijelim LED diodama .....	5
3.1.2.	Prijenos podataka RGB LED diodama .....	6
<b>3.2.</b>	<b>Infracrvena tehnologija .....</b>	<b>7</b>
<b>3.3.</b>	<b>Fluorescentne lampe .....</b>	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b>Metode komunikacije vidljivim svjetlom .....</b>	<b>9</b>
<b>4.1.</b>	<b>Uređaji za komunikaciju vidljivim svjetlom .....</b>	<b>9</b>
<b>4.2.</b>	<b>Komunikacija sa senzorom slike .....</b>	<b>14</b>
<b>5.</b>	<b>Struktura sustava i elementi .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1.</b>	<b>Pregled sustava VLC .....</b>	<b>18</b>
<b>5.2.</b>	<b>Analogni dio .....</b>	<b>19</b>
5.2.1.	Prijenosni podsustav .....	19
5.2.2.	Upravljački podsustav .....	27
5.2.3.	Integracija u izložbeni prostor .....	31
5.2.4.	Prijemni podsustav .....	33
<b>5.3.</b>	<b>Digitalni dio .....</b>	<b>39</b>
5.3.1.	Modulacija i shema kodiranja .....	42
5.3.2.	Procjena kanala i sinkronizacija .....	44
5.3.3.	Sinkronizacija .....	45
<b>5.4.</b>	<b>Sučelja .....</b>	<b>48</b>
5.4.1.	Digitalno-analogna i analogno-digitalna sučelja .....	49
5.4.2.	Elektro-optička i opto-električna sučelja .....	49

5.4.3.	MAC-PHY Tx sučelja .....	50
5.4.4.	MAC-PHY Rx sučelja .....	51
<b>6.</b>	<b>Područja primjene .....</b>	<b>52</b>
6.1.	Aplikacije za osobnu upotrebu prijenosa podataka .....	52
6.2.	Aplikacije za prepoznavanje lokacije korisnika .....	53
6.3.	Aplikacije za osvjetljenje i vizualnu signalizaciju .....	54
<b>7.</b>	<b>Usporedba s ostalim tehnologijama .....</b>	<b>55</b>
7.1.	Usporedba sa ostalim bežičnim tehnologijama .....	55
7.2.	Usporedba sa infracrvenom tehnologijom .....	56
7.3.	Usporedba sa mikrovalnom tehnologijom .....	57
7.4.	Usporedba sa RONJA tehnologijom .....	58
<b>8.</b>	<b>Izazovi i mogućnosti.....</b>	<b>59</b>
	<b>Zaključak .....</b>	<b>61</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>63</b>
	<b>Popis tablica .....</b>	<b>64</b>
	<b>Popis slika.....</b>	<b>65</b>
	<b>Popis kratica s objašnjenjem.....</b>	<b>68</b>

## 1. Uvod

U budućnosti unutrašnji bežični sistemi težiti će prema gigabitnome prijenosu podataka. Bežični prijenos podataka pomoću svjetla predstavlja alternativnu tehnologiju za širokopojasni prijenos podataka. Komunikacija u vidljivom svjetlu (*eng. Visible Light Communication; VLC*) temelji se na tome da se komunikacija ostvaruje između dva ili više uređaja (vidi sliku 1.). Način djelovanja temelji se na tome da predajnik informacije pretvara digitalni signal u svjetlosni signal koji putuje zrakom. Nakon toga dolazi do prijemnika koji taj svjetlosni signal ponovo pretvara u digitalni signal koji je prepoznatljiv prijemnom uređaju.

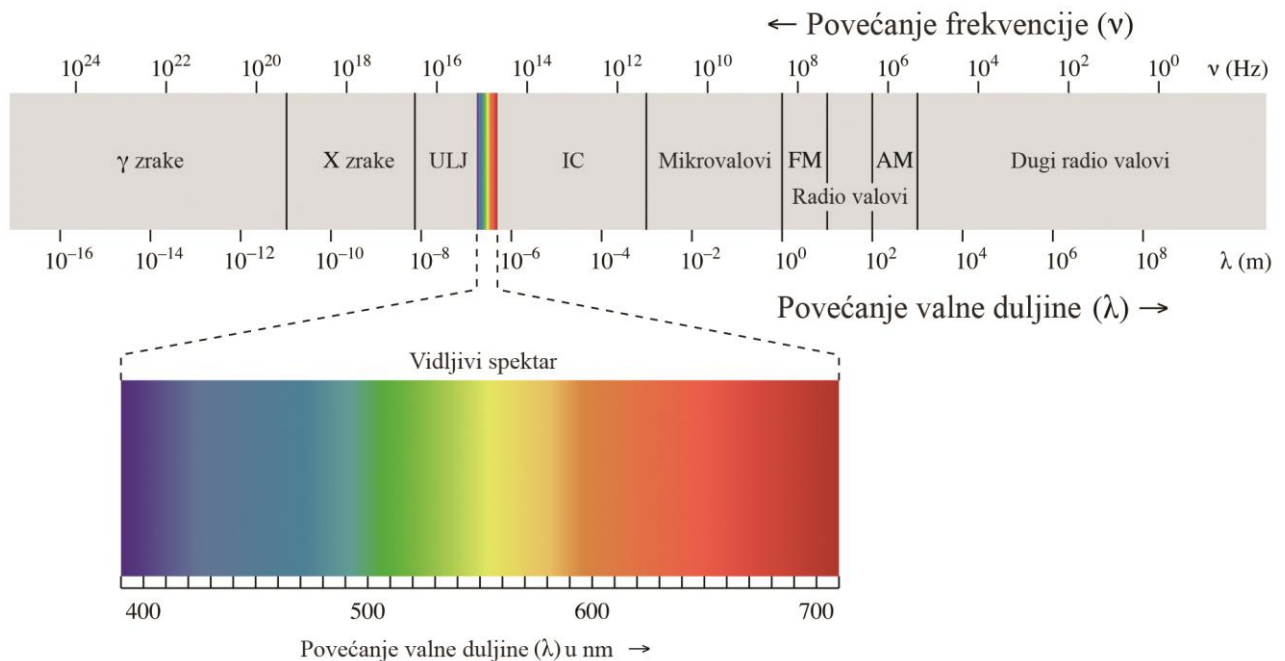


Slika 1. Prikaz VLC prijenosa informacija

(Izvor: [http://photonicsociety.org/newsletters/oct12/RH\\_DigitalSignal.html](http://photonicsociety.org/newsletters/oct12/RH_DigitalSignal.html))

Za početak objašnjeni su osnovni pojmovi o samoj svjetlosti i tehnologiji. Svjetlost u biti predstavlja elektromagnetski val. Svaki takav val ima svoju valnu duljinu i frekvenciju. Ljudsko oko vidi samo valne duljine od 375 nm do 780 nm gdje najmanja valna duljina

predstavlja plavu boju, a najveća crvenu boju. Iznad vidljivog spektra (vidi sliku 2.) nalazi se infracrveno područje a ispod ultraljubičasto područje.



Slika 2. Prikaz vidljivog spektra

(Izvor: [http://en.wikipedia.org/wiki/Visible\\_light\\_communication](http://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication))

VLC tehnologija može koristiti 2 vrste svjetlosti za prijenos podataka. Pomoću fluorescentnih cijevi moguće je ostvariti brzinu prijenosa 10 kbit/s, dok se sa LED tehnologijom mogu ostvariti i brzine do 500 Mbit/s, ovisno o udaljenosti predajnika i prijemnika. Za predaju izvora svjetlosti koriste se LED diode, dok se za primanje svjetlosnog signala koriste fotodiode. U nekim slučajevima može se koristiti i kamera sa mobilnog telefona ili fotoaparata. U nekim slučajevima takve kamere su bolja opcija od samo jedne fotodiode zbog toga što takav senzor omogućuje komunikaciju preko više kanala, gdje jedan piksel predstavlja jedan kanal. O njima više u nastavku rada.

## 2. Povijest komunikacije u vidljivom svjetlu

Škotski znanstvenik Alexander Graham Bell 1880. godine u Washingtonu izumio je fotofon (eng. photophone) koji je mogao prenositi govor pomoću moduliranog sunčevog svjetla na nekoliko stotina metara. Ovaj način prijenosa govora izumljen je prije prijenosa signala putem radio signala.

Uređaj razvijen u Češkoj RONJA (Reasonable Optical Near Joint Access) 2001. godine postao je prvi uređaj koji je mogao bežično prenositi podatke svjetlosnim zrakama. Na udaljenosti od 1.4 km postizao je brzinu od 10 Mbit/s.

Doktor Stefan Spaarman 2002. godine razvio je prvi VLC sistem ali nije mogao naći kompaniju koja će financirati njegov prototip.

2003. godine, laboratorij Nakagawa u Japanu počeo je raditi na korištenju tehnologije LED dioda koja bi se koristila za prijenos podataka vidljivim svjetlom na veće udaljenosti. To je bila prekretnica u razvoju ove tehnologije. Počeli su se razvijati sljedeći projekti poput „OMEGA“ projekta u Francuskoj, „COWA“ projekta u Americi, te više projekata u Engleskoj.

Istraživači sa Američkog sveučilišta „Penn State“ 2006. godine predložili su kombiniranje tehnologije komunikacije pomoću električne mreže (eng. Power Line Communication, skr. PLC) s bijelim LED diodama kako bi se omogućio širokopojasni pristup u zatvorenim prostorima.

Istraživački tim iz Fraunhofer instituta i istraživački tim iz tvrtke Siemens u siječnju 2010. godine uspjeli su prikazati i demonstrirati brzinu prijenosa podataka od 500 Mbit/s na udaljenosti od 5 kilometara i to koristeći svjetlo samo jedne bijele LED diode. Osim toga demonstrirali su prijenos na veće udaljenosti i sa većim brojem LED dioda. Uspjeli su postići brzinu od 100 Mbit/s. Fraunhofer Heinrich Hertz institut u Berlinu u travnju 2013. godine ostvario je demonstrirati i prikazati brzinu od 800 Mbit/s koristeći bijele LED diode.

Osim toga, iste godine došlo je do završavanja procesa standardizacije ove tehnologije unutar IEEE grupe osobnih bežičnih mreža (engl. Wireless Personal Area Networks), tj. grupe standarda 802.15.



### 3. Tehnologije prijenosa informacija

Kroz godine razvijanja komunikacije u vidljivom području razvijali su se i alternativni načini prijenosa informacija. U ovom poglavlju opisana su tri načina prijenosa informacija, tj. tri vrste izvora svjetlosti za prijenos informacija.

#### 3.1. LED tehnologija

Način rada LED tehnologije temelji se na slanju digitalnih informacija koje ljudsko oko ne može zapaziti. LED diode pale se i gase i do 1000 puta u sekundi te se tako prenosi informacija u obliku svjetlosnog signala. Različiti interval paljenja i gašenja dioda predstavljaju različite vrste informacija.

Fotodioda koja se nalazi na prijemnoj strani dekodira taj niz svjetlosnih impulsa i pretvara ih u električne signale. Postoje nekoliko vrsta modulacija signala kojima se pretvara svjetlosni signal u električni i obrnuto. Najčešće korištene su *Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)* i *Manchester* metode kodiranja signala. O njima više riječi kasnije.

Postoje više vrsta LED prijenosa podataka. Jedna od njih je prijenos podataka sa bijelim LED svijetlom koja se najviše koristi za uredsku komunikaciju. Najčešći princip rada je da se za *Downlink* (skidanje podataka sa mreže) koristi LED tehnologija, a za *Uplink* (dodavanje podataka na mrežu) infracrvena tehnologija.

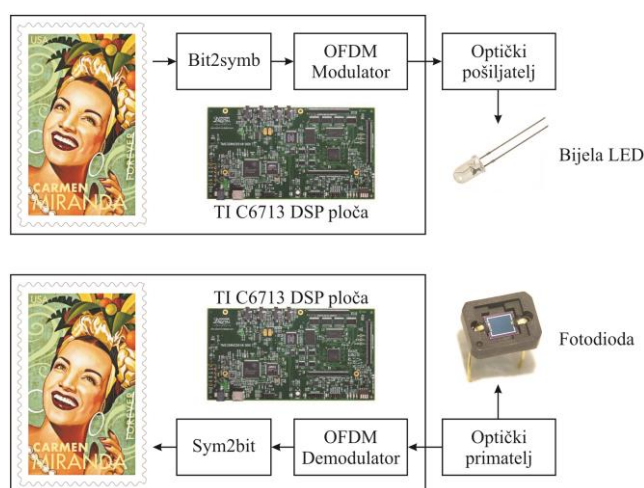
Druga vrsta prijenosa informacija je putem RGB LED dioda. Razlika od prvog prijenosa je u tome što se ovdje prenosi razne kombinacije svijetlosti. RGB LED koristi i druge načine modulacije signala i koristi se za brži prijenos informacija.

### 3.1.1. Prijenos podataka bijelim LED diodama

U većini slučajeva da bi se omogućio brzi prijenos podataka sa RGB LED diodama osim valnog multipleksiranja mora se omogućiti i modulatorske tehnike poput OFDM i *Discrete Multi-Tone (DMT)* modulacije. U ovome primjeru prikazan je način prijenosa OFDM metodom. U nastavku rada biti će prikazan detaljan opis rada i strukture samog sustava, dok će se u ovome poglavlju samo prikazati primjer načina prijenosa podataka.

Jedna od prednosti prijenosa podataka pomoću bijelih LED dioda je u tome što svjetlo kojim se osvjetljava prostorija može služiti kao predajnik informacija. Dakle, kada je uključena LED lampa u prostoriji istodobno se prenose informacije na prijemni uređaj (osobno računalo, laptop, tablet...) i osvjetljava prostorija. Napomenuto je prije kako se diode pale i gase i do 1000 puta u sekundi tako da nije problem ukoliko predajnik služi i kao rasvjetno tijelo. Ova tehnologija nije osjetljiva na smetnje od drugih svjetlosnih signala i ostalih boja koje pruža komunikacijski spektar.

Iz sljedeće slike (vidi sliku 3.) vidljivo je kako se prenosi jedna slika sa predajnika prema prijemniku. Najprije se ta slika predstavi kao niz nula i jedinica u binarnom sustavu te zatim preko modulatora pretvara u optičke signale. U binarnom sustavu stanje jedinice je ukoliko LED dioda svijetli a stanje logičke nule je ukoliko LED dioda ne svijetli.



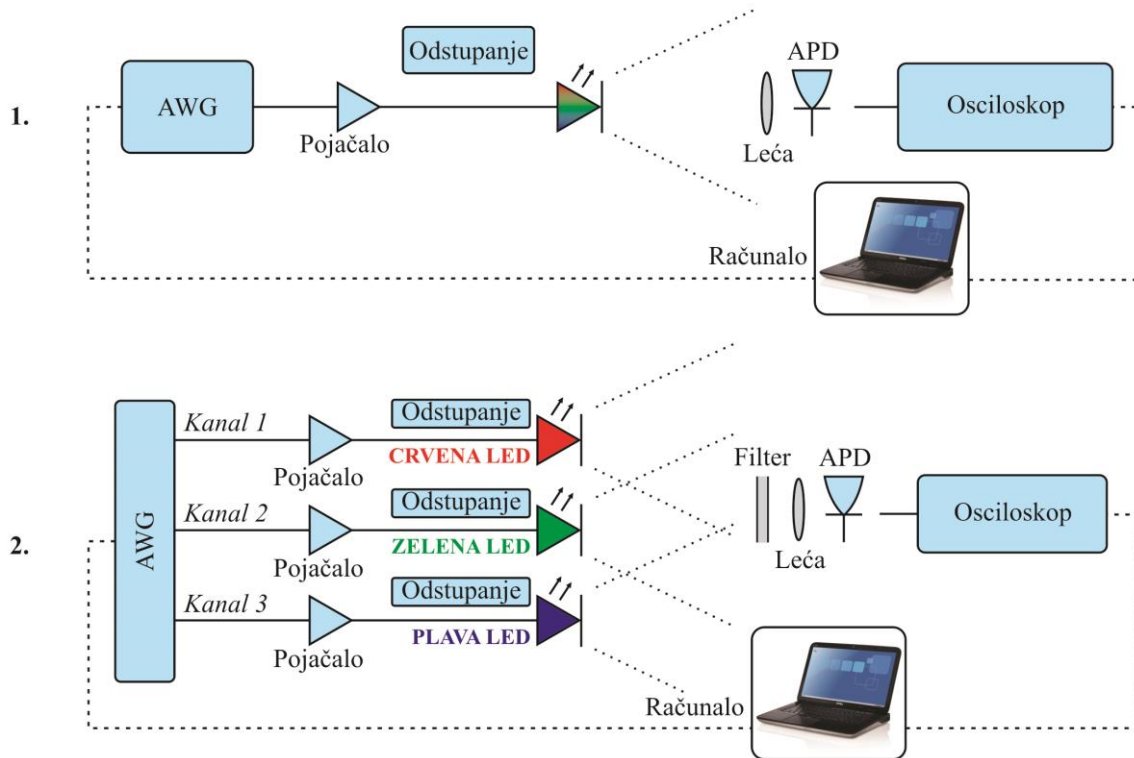
Slika 3. Primjer prijenosa podataka bijelim LED diodama

(Izvor: „Wireless High-Speed Data Transmission with Phosphorescent White-Light LEDs“;  
Optical Communication)

### 3.1.2. Prijenos podataka RGB LED diodama

Prijenos podataka RGB LED diodama puno je poželjniji nego prijenos koji se bazira na bijelim LED diodama zbog toga što se postižu veće brzine prijenosa podataka i zbog mogućnosti valnog multipleksiranja (WDM) koje povećava prijenosni kapacitet.

U nastavku su prikazana dva načina prijenosa podataka (vidi sliku 4.). U prvom slučaju prikazan je prijenos samo jednim kanalom i postignuta je brzina od 1,5 Gbit/s. U drugom slučaju korišteno je valno multipleksiranje u predajniku tako da svaka boja nosi različiti signal. U ovom slučaju postignuta je brzina od 3,4 Gbit/s.



Slika 4. Dva načina prijenosa podataka pomoću RGB LED dioda

(Izvor: „3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED“; G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella)

## 3.2. Infracrvena tehnologija

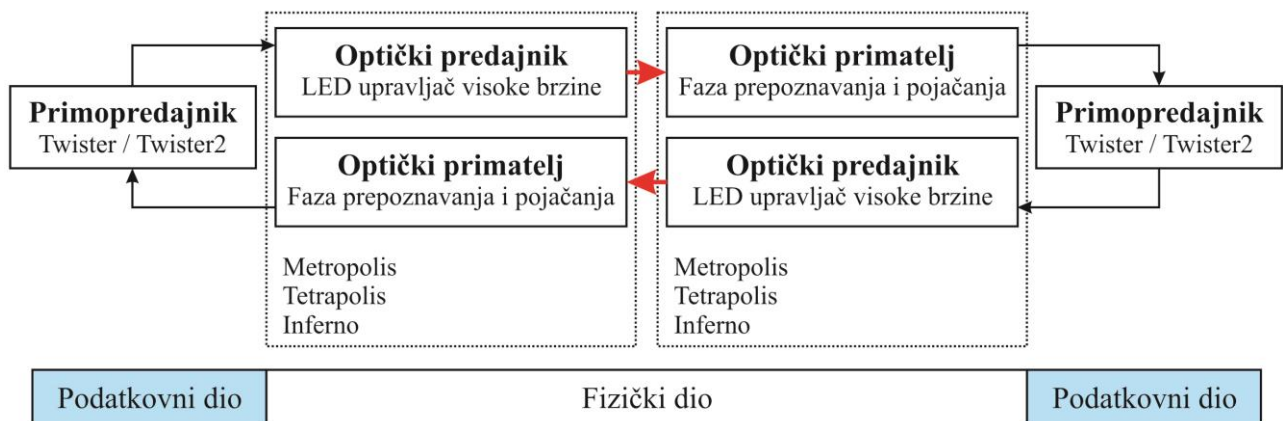
Infracrvenu tehnologiju za prijenos podataka najviše je popularizirao RONJA projekt koji se razvijao u Češkoj. Dakle za prijenos podataka koriste se crvena i infracrvena svjetlost. Raspon infracrvenog zračenja kreće se od približno 750 nm do 3 mm, tj. od  $4,5 \cdot 10^{14}$  do  $10^{12}$  Hz. U samim počecima ova tehnologija koristila se za prijenos informacija na malim udaljenostima. Najviše se koristila za prijenos informacija između računala, mobitela i drugih pomoćnih digitalnih uređaja.

Za daljinsko upravljanje i slanje informacija koriste se infracrvene svjetleće diode. Te diode emitiraju infracrveno zračenje (koje je nevidljivo ljudskom oku) i sabiru ga u žarište plastičnih leća. Samim sabiranjem tih zraka, dobiva se uska nevidljiva zraka. Nakon toga dolazi do moduliranja zrake. Zraka se pali i gasi i tako se dobivaju binarne informacije koje su prepoznatljive električnim uređajima. Drugim riječima, dolazi do kodiranja podataka koji se zatim šalju prema prijemniku.

Za prijem informacija koristi se fotodioda koja pretvara infracrveno zračenje u električnu struju koja se kasnije ponovo kodira i obrađuje kako bi se dobila informacija koja je poslana od strane pošiljatelja.

Infracrveno zračenje ne može prolaziti kroz zidove i druge prepreke kao mikrovalovi, stoga je potrebno uspostaviti direktnu povezanost bez prekidanja infracrvenog snopa između predajnika i prijemnika. Osim toga, ovakva vrsta zračenja ne ometa rad ostalih uređaja u prostoriji.

Na slici vidimo kako se ovom tehnologijom može vršiti prijenos podataka u oba smjera. Na svakoj strani imamo po jedan predajnik i jedan prijemnik. Prijenos se vrši na način da se niz informacija u digitalnom obliku pretvori u svjetlosne signale koji putuju zrakom do prijemnika. Nakon što dođu do prijemnika, ponovno se svjetlosni signali pretvaraju u diskretne digitalne signale. To isto vrijedi i za prijenos podataka u drugom smjeru (vidi sliku 5.).



Slika 5. Općeniti prikaz prijenosa podataka

(Izvor: <http://en.wikipedia.org/wiki/RONJA>)

### 3.3. Fluorescentne lampe

Uz ostale tehnologije prijenosa podataka fluorescentna lampa (vidi sliku 6.) daje najveće gubitke pri prijenosu podataka. Predstavlja veliki potrošač električne energije. LED tehnologija polako zamjenjuje fluorescentne lampe, zbog toga što su ekološki prihvatljivije i manji su potrošači. Osim toga, LED dioda ima duži vijek trajanja, manju cijenu i veću efikasnost osvjetljenja.

Osim toga, što je najvažnije brzina prijenosa podataka LED tehnologije višestruko je veća od prijenosa lampama. Brzina prijenosa podataka sa fluorescentnom lampom iznosi nekoliko kbit/s, dok kod korištenja LED diode se postiže i do nekoliko stotina Mbit/s.



Slika 6. Prikaz fluorescentne lampe za prijenos podataka

(Izvor: <http://www.energyplus.hr/shop/proizvod/led-cijev-tu1200-t8-17w>)

## 4. Metode komunikacije vidljivim svjetlom

U prvome poglavlju prikazana su i opisana dva osnovna uređaja koja su potrebna za prijenos podataka svjetlom. To su LED dioda i fotodetektor. Opisane su neke osnovne karakteristike te način rada na koji funkcioniraju.

Nadalje, u drugom poglavlju opisana je metoda sa kojom se slika, tj. podaci mogu prenositi vidljivim svjetlom uz pomoć senzora slike.

### 4.1. Uređaji za komunikaciju vidljivim svjetlom

Kao uređaj za slanje informacija u obliku svjetlosnog signala koristi se LED dioda, dok se za primanje informacija koristi fotodioda. U nastavku su objašnjeni njihovi principi rada te neke osnovne informacije o njima.

Kao što je prije napomenuto kao prijenosnik svjetlosti koristi se LED dioda. Ona je poluvodič koji je temeljen na p-n spoju koji pod određenim uvjetima može emitirati zračenje u ultraljubičastom, vidljivom i infracrvenom spektru. Najčešći materijali od koji se izrađuju diode su germanij (Ge) i silicij (Si). Kako bi se poboljšala svojstva dodavaju se primjese ostalih elemenata poput galija (Ga), arsena (As), aluminijska (Al), fosfora (P), indija (In) i drugih.

Aplikacije LED dioda mogu se svrstati u tri različite kategorije. U prvu kategoriju spadaju diode u svrhu indikacije ili prikaza nekog stanja. U to možemo svrstati LED prikazivače (*display*), upravljačke ploče različitih elektroničkih uređaja, ekrani monitora, kalkulatora, svjetla na semaforima, i sl. Najveću primjenu imaju kao segmentni pokazivači (vidi sliku 7.).



Slika 7. Primjer upotrebe LED dioda kao indikatora

(Izvor: [http://www.lpt.si/en/por/control\\_centre/Traffic\\_Flows](http://www.lpt.si/en/por/control_centre/Traffic_Flows))

U drugu grupu mogu se svrstati LED diode u svrhu osvjtljenja prostorija, kao indirektna rasvjeta ili osvjtljenje u kućama, vrtu i sl. Također upotrebljavaju se i u svjetlima automobila (vidi sliku 8.) i kao ručne svjetiljke. Njihova primjena stvarno je široka. Njihova najveća prednost je visoka iskoristivost i dugi vijek upotrebe (u odnosu na standardno osvjtljenje). Samim time, smanjuje se potreba za učestalim mijenjanjem tradicionalnih žarulja i ostalih svjetala za vanjsku upotrebu.



Slika 8. Primjena LED osvjtljenja u svjetlima automobila

(Izvor: <http://schock.net/articles/2012/12/22/bmw-vision-connecteddrive-concept-roadster-is-just-future-y-enough/>)

U treću i posljednju kategoriju LED dioda se kao aplikacija može koristiti u komunikacijskim sustavima za prijenos informacija. Prijenos informacija može se vršiti bežično ili putem svjetlovodnih kabela. Najčešće se upotrebljava u svjetlovodnim kabelima kao izvor svjetlosti za prijenos informacija. U ovome radu prikazana LED tehnologija prikazana je kao upotreba za bežični prijenos informacija.

U usporedbi sa laserima, koji bi se također mogli koristiti kao izvor svjetlosti za prijenos informacija dane su neke prednosti i nedostaci. Prednosti prijenosa podataka preko LED dioda su:

- Rad na većoj temperaturi
- Manja temperatura ovisnosti o emitiranoj snazi
- Jednostavnija izvedba uređaja
- Jednostavniji upravljački krug

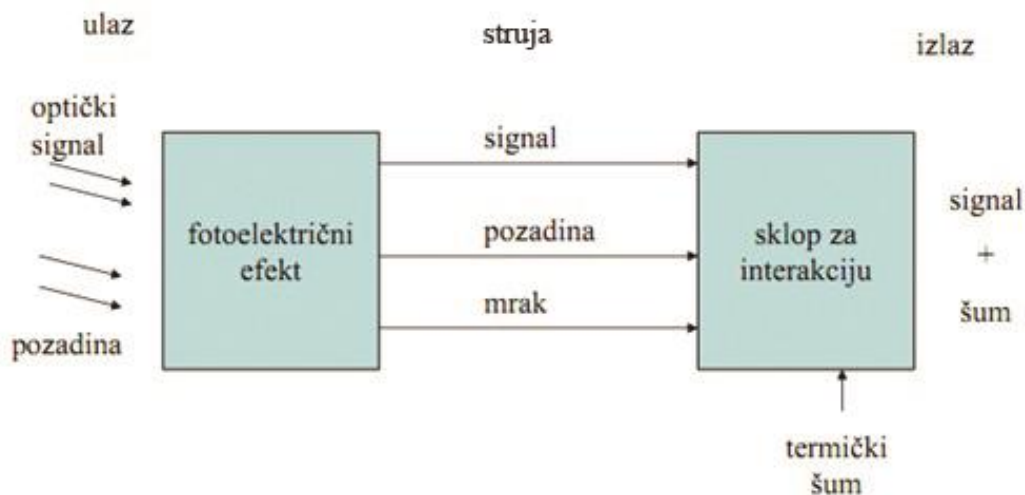
Neki od nedostataka LED tehnologije u usporedbi sa laserskom tehnologijom su:

- Manja jačina svjetlosti
- Manja modulacijska frekvencija

Kao prijemnik svjetlosnog signala koristi se fotodioda. Njezine prednosti su što je niska cijena proizvodnje a pružaju visoku pouzdanost. Vrijeme odziva fotodiode je dosta kratko, što pogoduje kod velike brzine prijenosa podataka.

Njezina funkcija je svjetlosni signal koji dolazi od predajnika pretvoriti u struju i napon kako bi se dalje u električnim uređajima mogla ponovno rekonstruirati primljena informacija. To je pokazano na sljedećoj slici (vidi sliku 9.). Na ulazu u fotodiodu apsorbira svjetlosno zračenje optičkog signala predajnika i pozadinsko zračenje. Pomoću fotoefekta (generiranja parova elektron-šupljina) svjetlosni signal se pretvara u strujni signal. Dobivamo tri struje, struju samog signala, struju pozadinskog zračenja i struju mraka. U sklopu za interakciju koji u biti predstavlja otpornik dolazi do pada napona. Odnosom signala i šuma (SNR) dobivamo informaciju koja se dalje prerađuje, filtrira i pojačava.





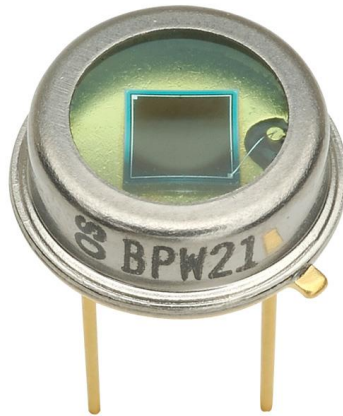
Slika 9. Prikaz pretvorbe svjetlosti u električni signal

(Izvor: Izradio autor prema literaturi: S. M. Sze, Kwok K.Ng; „Physics of Semiconductor Devices“; Third edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication)

Postoje dvije vrste fotodioda koje se koriste:

- PIN fotodioda (*PIN photo diode*)
- Lavinska fotodioda (*Avalanche photo diode*)

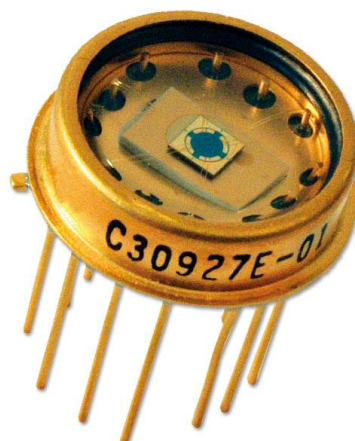
PIN fotodioda (vidi sliku 10.) su specijalna verzija fotodioda i najčešće su korištene kao fotodetektor zbog tankog sloja intrinzičnog sloja koji se nalazi između  $p$  i  $n$  tipa poluvodiča. Taj sloj dovodi do poboljšanja kvantne efikasnosti i frekvencijskog odziva same fotodiode. PIN fotodiode jednostavne su i daju širi spektar zračenja.



Slika 10. PIN fotodioda

(Izvor: <http://www.rapidonline.com/electronic-components/bpw21-pin-photodiode-for-visible-spectrum-76209/>)

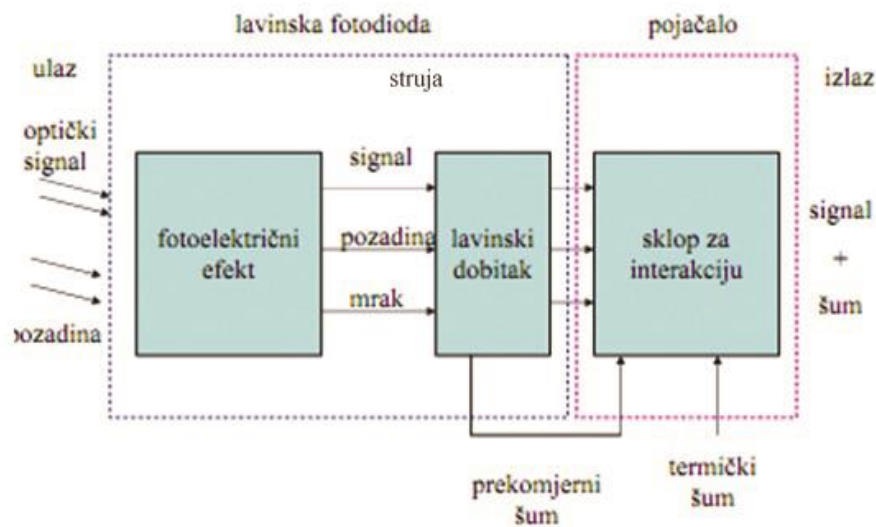
Lavinske fotodiode (vidi sliku 11.) rade na visokim reverznim naponima gdje se događa lavinska multiplikacija. Ta multiplikacija povećava pojačanje interne struje. GB (Gain-Bandwith) produkt tj. omjer pojačanja i širine pojasa može biti veći od 300 GHz pa uređaj može reagirati na svjetlo i pri mikrovalnim frekvencijama. Osim pojačanja signala, u obzir se mora uzeti i šum signala. Cilj je što više smanjiti šum kako bi omjer signala i šuma bio čim veći, tj. dobiti im kvalitetniji signal.



Slika 11. Lavinska fotodioda

(Izvor: <http://www.warsash.com.au/products/optoelectronics/PHOTONIC-DETECTORS.php>)

Na sljedećoj slici (vidi sliku 12.) vidljiv je način dobivanja napona iz svjetlosnog signala. Shema je slična kao i kod PIN fotodiode samo što u ovom slučaju prije no što se signal pretvori u napon dolazi do lavinskog pojačanja. Nakon što je ostvareno pojačanje, osim njega u sklop za interakciju prenosi se i prekomjerni šum, gdje se kasnije uspostavlja omjer signala i šuma.



Slika 12. Prikaz dobivanja električnog signala kod lavinske fotodiode

(Izvor: Izradio autor prema literaturi: S. M. Sze, Kwok K.Ng; „Physics of Semiconductor Devices“; Third edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication)

## 4.2. Komunikacija sa senzorom slike

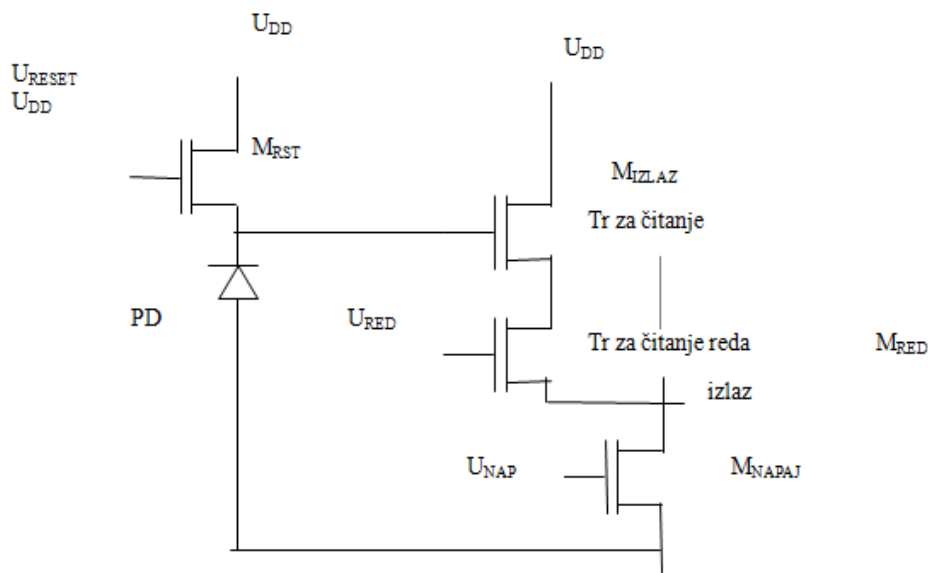
Senzor slike pretvara svjetlosnu sliku u električni signal. Najčešće korišteni su APS (*Active Pixel Sensor*) i CCD (*Charge-Coupled Device*) senzori, a većinom se koriste kod digitalnih fotoaparata i kamera. U nastavku biti će opisani principi rada senzora te njihove prednosti i nedostaci.

APS senzori (vidi sliku 13.) sastoje se od fotodiode i tri tranzistora, od kojih je jedan tranzistor za očitavanje, jedan za resetiranje i jedan za odabir reda. Definiran je kao senzor

slike s jednim ili više tranzistora smještenih uz svaki piksel. Poznat je i kao CMOS senzor zbog njegove kompatibilnosti s CMOS tehnologijom.

Tranzistor za poništavanje (reset tranzistor) postavlja napon katode fotodiode na poznatu vrijednost na početku „hvatanja“ slike kako bi polarizirao komponente u više linearno područje. Od tad nadalje kad svjetlo osvjetli fotodiodu, generirana fotostruja u fotodiodi počinje skupljati naboje na upravljačkoj *gate* elektrodi tranzistora za isčitavanje (*readout*), te istovremeno prazni gate upravljačku elektrodu. Na kraju procesa hvatanja (*capturing*), tranzistor za odabir reda osigurava izlazni napon koji ovisi o količini naboja na gate tranzistora za očitavanje.

Tranzistor za očitavanje  $M_{IZLAZ}$  kada je potopljen s konstantnom strujom, djeluje kao sljedilo (*source follower*). Tranzistor napajanja  $M_{NAP}$  je podijeljen između svih piksela u polju u istom stupcu. On osigurava konstantnu struju potopljenu za tranzistor očitavanja  $M_{IZLAZ}$  s narinutim naponom  $V_{NAP}$  na upravljačku elektrodu G i drži ga u zasićenju. Idealno,  $M_{NAP}$  osigurava konstantni strujni izvor (potopljenost), stoga je važno projektiranje ovog tranzistora na maksimalno područje gdje je strujni izvor (potopljenost) konzistentan.

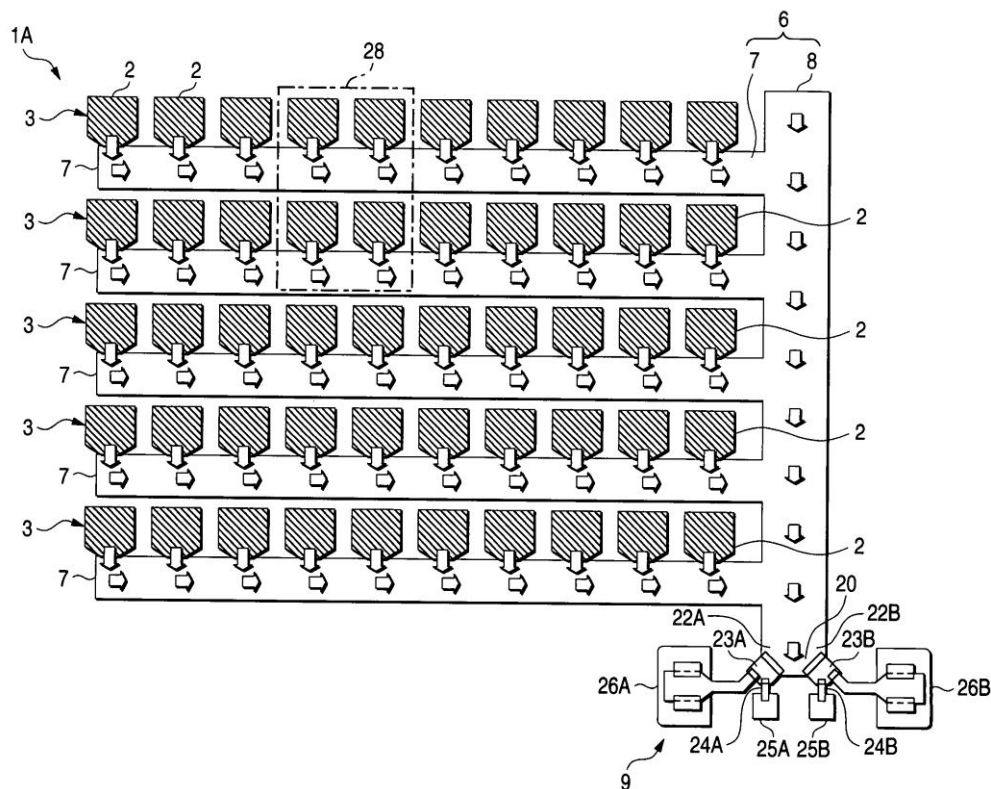


Slika 13. Prikaz APS senzora

(Izvor: Izradio autor prema literaturi: S. M. Sze, Kwok K.Ng; „Physics of Semiconductor Devices“; Third edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication)

Što se tiče CCD senzora slike (vidi sliku 14.) on se u praksi upotrebljava kao senzor slike, posmačni registar, fotodetektor i sl. Kao linearni sustav za skeniranje uveden je davne 1970. godine.

Što se tiče same građe površinskog CCD senzora slike on se sastoji od polja piksela gdje svaki piksel sadrži fotodetektor koji pretvara upadno svjetlo u fotostruju. Osim toga sadrži i sklop za čitanje koji je potreban za pretvorbu fotostruje u električni napon, te za isčitavanje iz tog polja. U pikselu postoji postotak površine koji zauzimaju fotodetektor. On se još naziva i faktor ispunjenja (*fill factor*). Drugi dio sklopa za čitanje smješten je na periferiji polja i multipliciran je sa brojem piksela.



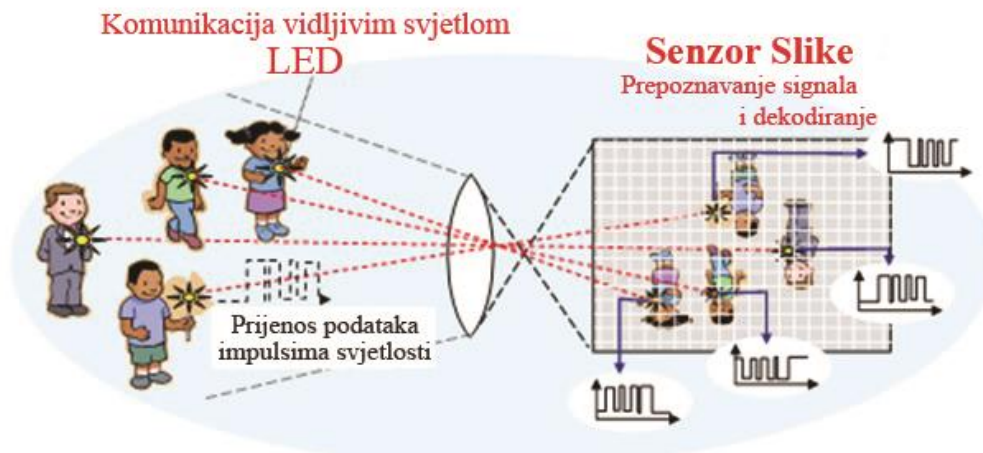
Slika 14. Prikaz CCD senzora

(Izvor: <http://www.freepatentsonline.com/7015963.html>)

Prednosti APS senzora u odnosu na CCD senzore:

- Veća brzina rada
- Manja potrošnja snage
- Manja cijena
- Sposobnost integracije na čip (*System-On-a-Chip; SOC*)
- Proizvoljan pristup do piksela (*Random Pixel Access; RPA*)

Na sljedećoj slici vidljivo je kako kamera kontinuirano uzima djeliće od cijele slike sa LED svjetlom i prijemnik detektira svjetlosni intenzitet na mjestu prema kojem je fokusirano LED svjetlo. Moguće je čak i višestruko slanje podataka od više svjetlosnih izvora istodobno. Senzor slike (vidi sliku 15.) može primiti i demodulirati sve podatke odjednom i to bez ikakvih smetnji između njih.



Slika 15. Princip djelovanja senzora slike

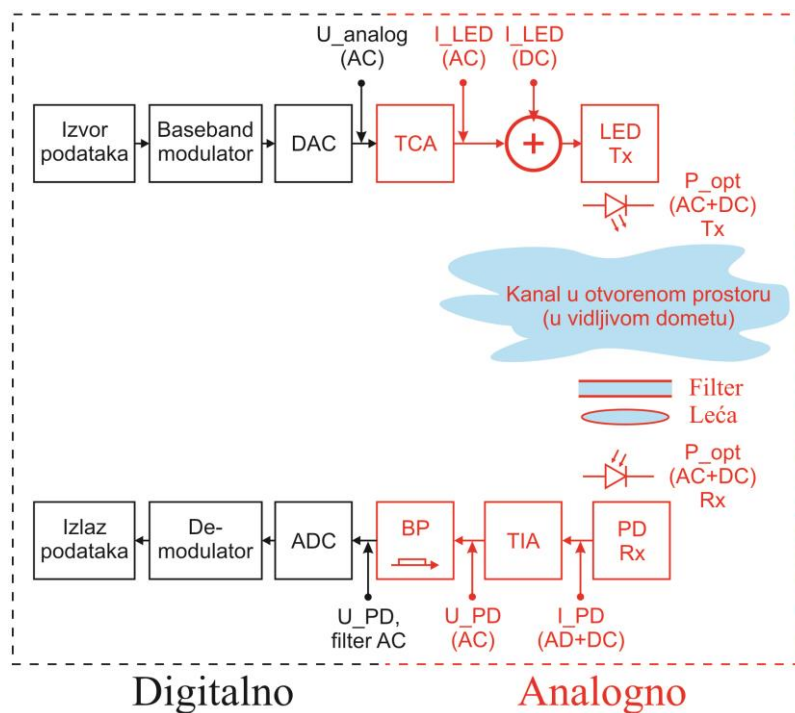
(Izvor: „A Smart Lighting ERC“; Boston University)

## 5. Struktura sustava i elementi

### 5.1. Pregled sustava VLC

Slika 16. prikazuje pregledni blok-dijagram VLC PHY sustava. Iako je praksa dosta kompleksnija, (zbog koračnog upravljanja LED dioda), ovaj dijagram daje koristan uvid u dijelove razvijenog VLC PHY sustava. Ovaj dijagram se također može koristiti za definiranje podjele odgovornosti u sustavu.

Siemens je zaslužan za razvoj analognog primopredajnika (označeno crvenom bojom), dok je HHI razvio digitalni primopredajnik (označeno crnom bojom). Analogni odašiljač sastoji se od upravljačkog sklopa (transkonduktantnog pojačala, TCA), bias T mreže za slanje AC signala LED struji mirovanja (DC) i optičkom prijenosniku. Prijemnik se sastoji od pozitivne leće, filtera boja, fotodiode, transimpedantnog pojačala i pojasnog propusnika. Ova veza je ograničene širine frekvencijskog pojasa odašiljača na 12 MHz, što predstavlja izazov za ciljne brzine prijenosa podataka od 100 MB u sekundi. Taj problem se rješava prijašnjom distorzijom i višerazinskom modulacijom.



Slika 16. Blok dijagram VLC PHY sustava

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Prijenos signala se odvija na sljedeći način: na strani odašiljača, digitalni PHY prenosi izmjenični  $U_{analog}$  (AC) signal u osnovnom pojasu do upravljačkog sklopa (transkonduktantno pojačalo, TCA), koji linearno pojačava AC signal i pretvara ga u električnu struju. Tada preklapa AC struju na istosmjernu (DC) struju mirovanja što odgovara točki rada spojenih LED žarulja. Ukupna struja  $I_{LED}$  dolazi do LED žarulja koje pak emitiraju modulirani optički signal  $P_{opt}$ . Dobiveno optičko napajanje se odbija od objektiva, usmjerava kroz optički filter i pretvara u električnu struju  $I_{PD}$  u fotiododi. AC komponenta generirane električne struje se tada transimpedantno pojačava  $U_{PD}$  i filtrira kroz pojasni propusnik  $U_{PD}$  (filter).

U nastavku poglavlja biti će prikazani i opisani pojedini dijelovi sustava na praktičnom primjeru demonstracije OMEGA sustava na ICT radionici.

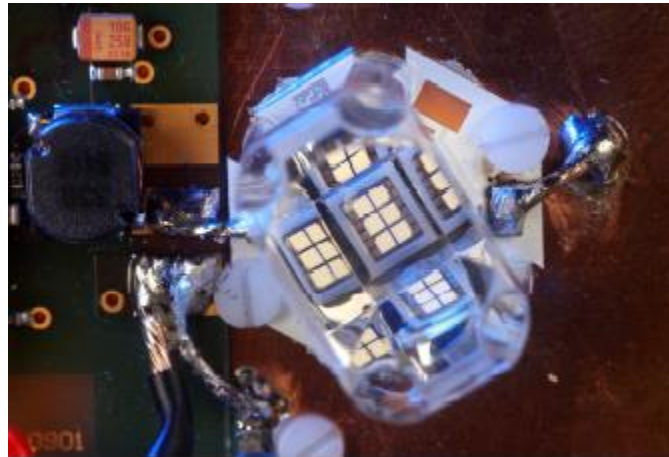
## **5.2. Analogni dio**

### *5.2.1. Prijenosni podsustav*

Kako bi se osvijetlio barem dio izložbenog prostora ( $\sim 60 \text{ m}^2$ ) s razumnim brojem LED žarulja, odabrani su OSTAR moduli rasvjete jer pružaju primjetno bolje osvjetljenje od visokonaponskih LED žarulja. Na slici 17. prikazan je OSTAR modul sa 6 čipova i sužavajućim objektivom, a zahvaljujući povećanju optičke leće, na desnom dijelu slike jasno je vidljivo spomenutih 6 serijski postavljenih čipova.

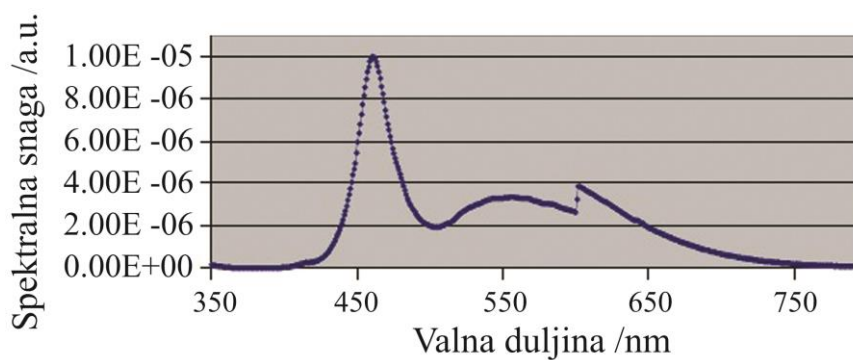
Na slici 18. prikazan je tipični spektar emitiranja ovog sklopa. Diskontinuitet krivulje vidljiv na oko 600 nm uzrokovan je zbog korištenja optičkog analizatora spektra (YOKOGAM, AQ-6315A).





Slika 17. Pogled na OSTAR E3A s 6 čipova kroz sustav za optičko snimanje montiran na vrhu LED modula

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))



Slika 18. Osvjetljenje OSTAR bijele LED žarulje (LE CW E2B-MYNZ-N3P5)

(Izvor: Smart Wireless Optics, Demonstrator 2; [www.ict-Omega.eu](http://www.ict-Omega.eu))

U tablici 1 sažeti su tehnički parametri dvaju OSTAR modula koji su bili dostupni na tržištu na početku OMEGA projekta. U tablici se također navodi i ukupan broj OSTAR modula (s četiri i šest čipova) potrebnih za osvjetljavanje izložbenog prostora jačinom od 400 lx. Kako bi se maksimalno pojednostavio VLC prototip odabrana je OSTAR verzija sa 6 čipova.

Tablica 1. Elektro-optičke karakteristike OSTAR E2B i E3b

<b>OSTAR tip</b>	<b>E2B</b>	<b>E3B</b>
Broj LED čipova	4	6
Napon struje mirovanja/V	11,6-16,4	17,4-24,5
Tipični napon struje mirovanja/V	15	22
Ogovarajuća tipična struja mirovanja/A	0,7	0,7
Odgovarajući svjetlosni tok/lm na 0,7 A upravljačkoj struji	250-350	380-540
Odgovarajući tipični svjetlosni intenzitet/cd	100	140
Maksimalna struja mirovanja/A	1	1
Maksimalni strujni impuls/A	2	2
Puni kut gledanja na pola osvijetljenja	130°	130°
Broj modula potrebnih za osvijetljavanje cijelog OMEGA izložbenog prostora na 400 lx	68-95	44-63

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-Omega.eu](http://www.ict-Omega.eu))

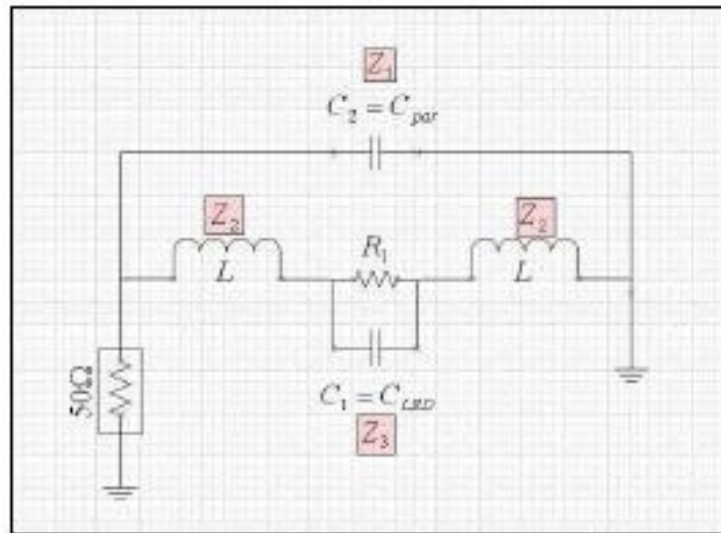
Za razvoj upravljačkog sklopa bila su potrebna najmanje tri sustavna parametra: ekvivalentni LED sklop i njegova linearnost. Ekvivalentni sklop za LE CW E3b N3P5 (slika 4) izveden je na sljedeći način (vidi sliku 19.).



Slika 19. LED sklop LE CW E3b N3P5

(Izvor: [http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/629/LE\\_CW\\_E3A-MXNY-N3P5.php](http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/629/LE_CW_E3A-MXNY-N3P5.php))

Zaštitna dioda je uklonjena iz LED paketa, a složena impedancija preostalog kruga je izmjerena za nisko-signalnu distorziju kao funkciju modulacijske frekvencije i struje mirovanja. Odgovarajući ekvivalentni krug je zatvoren Agilent naprednim sustavom (Agilent Advanced Design System). Pasivne komponente ekvivalentnog kruga prikazane su na slici 20. ( $C_{PAR}$  označava parazitski kapacitet LED modula).



Slika 20. Ekvivalent kruga LE CW E3b N3P5

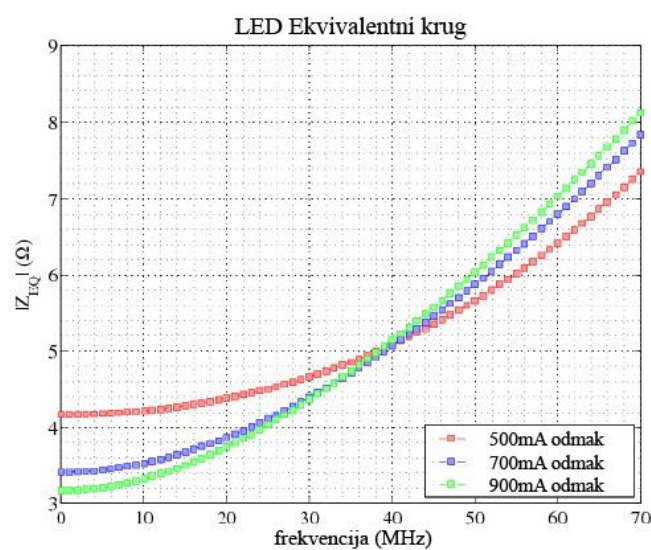
(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Možemo primijetiti da se induktivitet  $L$  ekvivalentnog kruga ne mijenja s električnom strujom, dok se dvije vrijednosti kapaciteta  $C_{LED}$  i  $C_{PAR}$  smanjuju s povećanjem LED upravljačke struje. Uz pomoć ekvivalentnog kruga može se analizirati ovisnost frekvencije o potpunoj impedanciji, a iz toga i LED prijenosna funkcija. Ekvivalentna impedancija  $Z_{EQ}$  proizlazi iz sljedeće jednadžbe:

$$Z_{EQ} = \frac{(1 - 2LC_1\omega^2) + \left(\frac{2L}{R_1}\right)j\omega}{\left(\frac{1}{R_1} - \left(\frac{2LC_2}{R_1}\right)\omega^2\right) + ((C_1 + C_2)\omega - 2LC_1C_2\omega^3)j} \quad (1)$$

gdje je  $j$  imaginarna jedinica, a  $\omega$  kutna modulacija frekvencije. Apsolutna vrijednost ekvivalentne impedancije je prikazana na slici 21 kao funkcija modulacije frekvencije i struje mirovanja.

Prikazana krivulja (Slika 21.) izračunata je pomoću prethodne jednadžbe, a kapacitet i induktivitet su izmjereni s već spomenutim postavkama. Smanjenje parazitskih kapaciteta i povećanje struje mirovanja rezultira povećanjem nagiba krivulje. Također, može se primijetiti usporedivo mala apsolutna vrijednost LED impedancije.



Slika 21. Varijacija ekvivalentne impedancije za OSTAR E3 kao funkcija modulacije frekvencije za raspon struja mirovanja

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

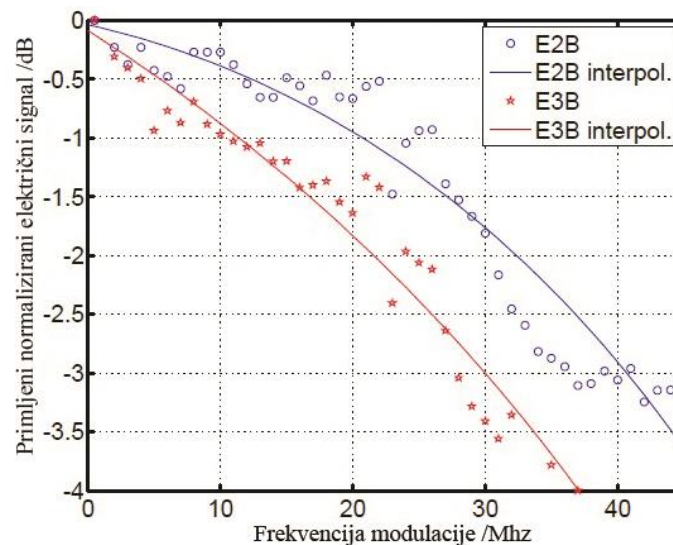
3-dB frekvencija kruga se definira kao frekvencija na kojoj je apsolutna vrijednost ekvivalentne impedancije  $\sqrt{2}$  puta veća od vrijednosti  $\omega = 0$ . Vrijednosti 3-dB frekvencije za različite struje mirovanja prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti 3 dB frekvencije OSTAR-E3 ekvivalentnog kruga za tri LED upravljačke struje

LED upravljačka struja [mA]	Procijenjena 3-dB frekvencija [MHz]
500	54
700	37
900	32

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

Drugim riječima, 3-dB modulacijske propusnosti do 35 MHz trebale bi biti dostupne s odabranim modulom. Ovo je potkrijepljeno izravnim mjerenjima. Primjenom izlaznog signala frekvencije 80 MHz na bias T mrežu koja napaja LED modul potvrđene su vrijednosti prikazane na slici 22.

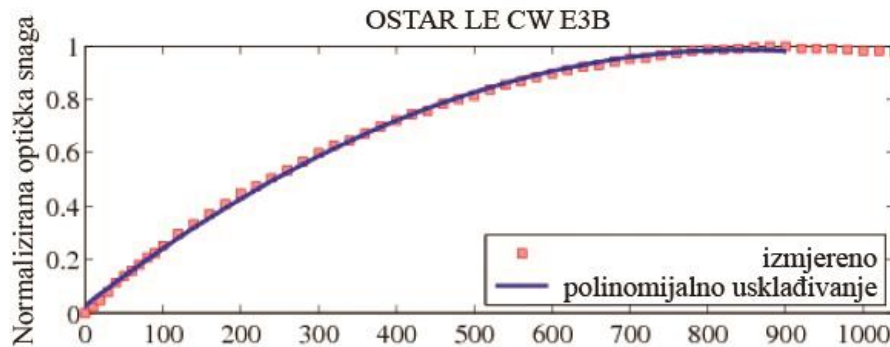


Slika 22. Normaliziran primljeni signal korištenjem detektora frekvencije 1 GHz

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

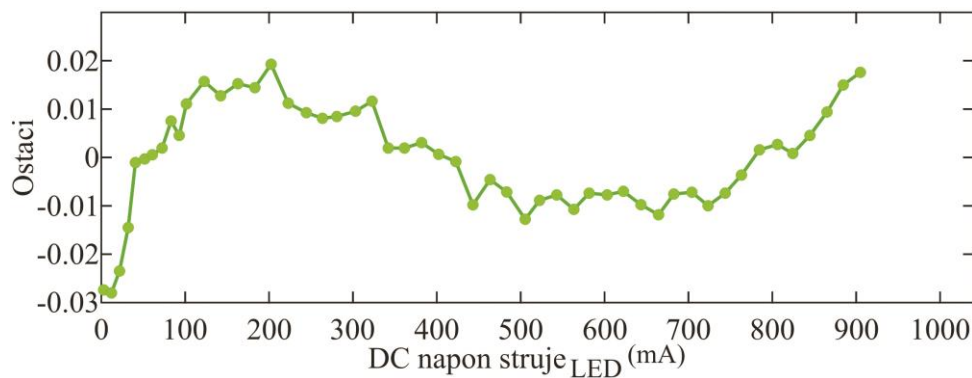
Oba mjerenja i interpolacije prikazane na slici 22. bazične su na polinomima drugog reda, a maksimalni indeks modulacije upravljačke struje bio je ispod 3 %.

Na slici 23. vidi se smanjenje optičke snage pri upravljačkim strujama iznad 900 mA što se može pripisati nedovoljnom hlađenju LED čipa.



Slika 23. Statička prijenosna funkcija, emitirana svjetlosna snaga kao funkcija istosmjerne upravljačke struje za OSTAR LE CW E3b N3P5

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))



Slika 24. Neopterećeni ostaci u ovisnosti o istosmjernoj upravljačkoj struji

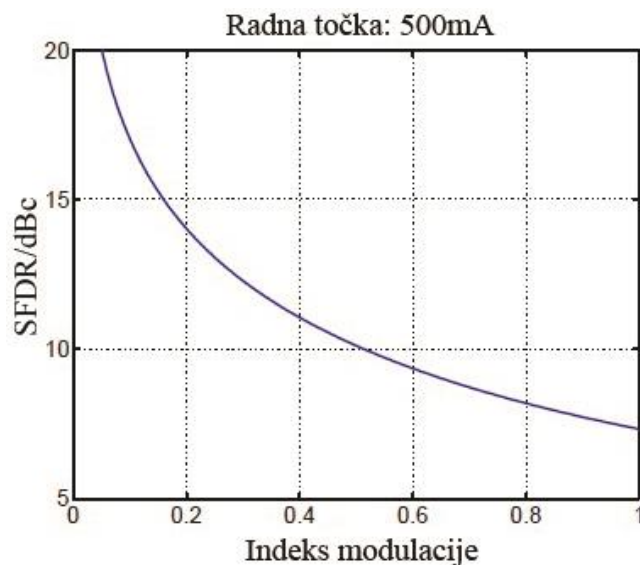
(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Donja granica linearnosti E3 modula procijenjena je iz njegove statičke prijenosne funkcije, tj. iz ovisnosti optičke izlazne snage o istosmjernoj upravljačkoj struji. Relevantni podaci izmjereni su za model LE CW E3B N3P5, a rezultati su prikazani na slikama 23. i 24.

Kako se vidi na slici 23, krivulja polinoma drugog reda omogućava vrlo dobru procjenu izmjerenih podataka.

Mjerenja normalizirane optičke snage za LED upravljačke struje iznad 900 mA bila su pod utjecajem viška topline disipirane iz LED žarulja pa stoga ti podaci nisu obuhvaćeni označenom krivuljom procjene mjerenih podataka. Uz pretpostavku da su modulatorske frekvencije daleko ispod 3 dB popuštajuće termalne frekvencije (koja je tipično u rasponu od 0 do 100 kHz), iz statičke prijenosne funkcije se također može izračunati i dinamički raspon bez smetnji (engl., Spurious-Free Dynamic Range – SFDR).

Odgovarajući rezultat prikazan je na slici 25, na kojoj se vidi da se dinamički raspon naglo smanjuje s povećanjem indeksa modulacije, kako se i očekivalo. Također, prikazan je i rezultat dinamičkog raspona pri radnoj točki od 500 mA i modulatorskim frekvencijama ispod termalne 3 dB frekvencije.



Slika 25: Dinamički raspon bez smetnji kao funkcija indeksa modulacije E2B N3P5

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

### 5.2.2. Upravljački podsustav

Upravljački sklop se temelji na dvostupanjskoj TCA topologiji. DSL chip se koristi za pojačanje napona u prvoj fazi, a AB pojačalo u izvedbi bipolarno spojenih tranzistora za strujno pojačanje u drugoj fazi. Tipične gornje i donje modulacijske propusnosti za dva ulazna signala navedene su u tablici 3.

Ulazni signal od  $600 \text{ mV}_{pp}$  pri impedanciji od  $50 \Omega$  je maksimalna razina prije pojave zasićenja u pojačalu i nelinearnosti izraženijih od onih kod LED dioda. Na slici 26 su prikazana tri primjera E-O-E pojačanja kao funkcije modulacijske propusnosti, a shema sklopa prikazana je na slici 27.

Uz pomoć prethodno navedenih parametara LED dioda, mogu se izvesti sljedeći zahtjevi za LED upravljački sklop:

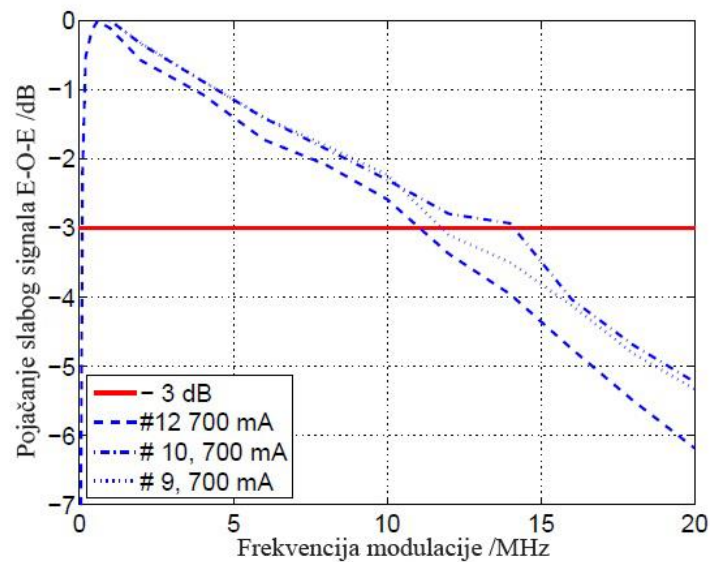
- Ukupna modulacijska propusnost veze od 10-ak MHz (cilj:  $\sim 30 \text{ MHz}$ )
- Struja predpobude (eng. Bias current) od  $700 \text{ mA}$  (tipična struja za rasvjetu) i DC napon od  $21 \text{ V}$  što odgovara istosmjernoj snazi od oko  $15 \text{ W}$
- Modulacijski indeks između  $0,3$  i  $1$  što odgovara najjačem AC naponu između  $\sim 30 \text{ mW}$  i  $\sim 400 \text{ mW}$
- Snažna linearnost – dinamički raspon bez smetnji ispod  $3\text{-dB}$  širine frekvencijskog pojasa mora biti puno veći od  $20 \text{ dBc}$
- Ulazni signal napona  $1 \text{ V}_{pp}$  i strujni signal od  $20 \text{ mA}_{pp}$  (impedancija od  $50\Omega$ ) – potrebno pojačanje snage je  $6 \text{ dB}$  i manje, dok je za napon i struju potrebno pojačanje od  $3 \text{ dB}$ , odnosno  $15 \text{ dB}$ .



Tablica 3. Frekvencijski pojas od 3-dB za OSTAR E3B s različitim signalom izmjeničnog napona u upravljačkom sklopu

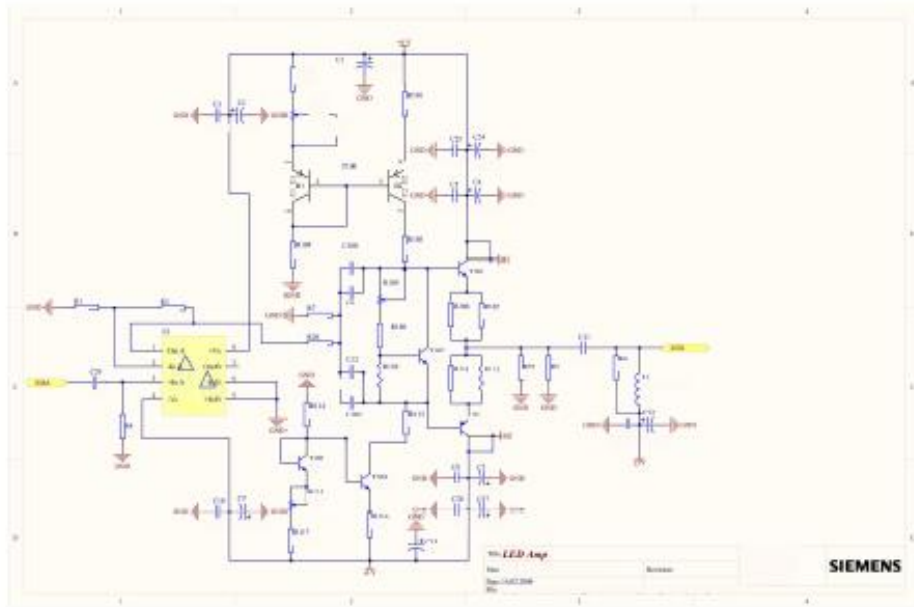
Napon predpobude [V]	Struja predpobude [mA]	Ulazni AC napon [ $mV_{pp}$ ]	Donja granica 3-dB frekvencijskog pojasa [kHz]	Gornja granica 3-dB frekvencijskog pojasa [MHz]	Maksimalni indeks modulacije
20	700	600	90	~12	0,7
		160	50	~20	0,13

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))



Slika 26. Pojačanje slabih signala kod tri primjera VLC odašiljača (LED+ upravljački sklop) kao funkcija modulatorske propusnosti

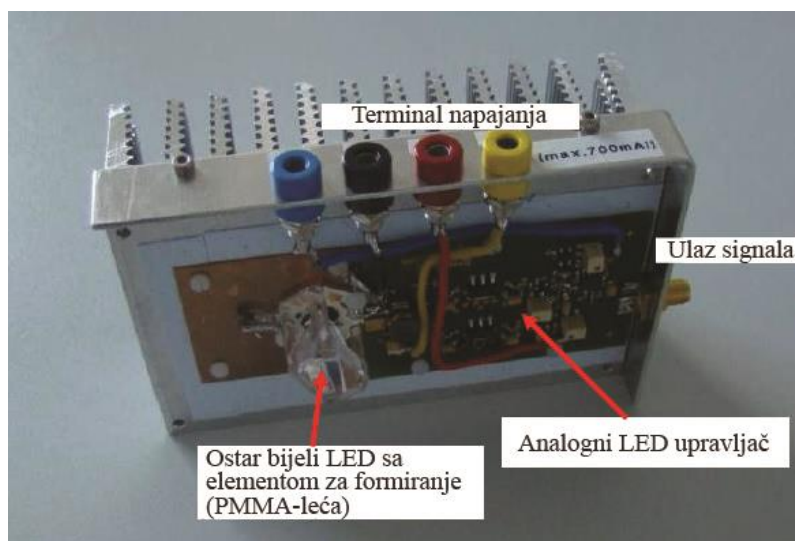
(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))



Slika 27. Upravljački sklop za OSTAR E3

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

Slika 28. prikazuje jedan od 24 analognih odašiljača izrađenih u Siemens-u. Na slici se vidi SMA adapter na desnoj strani na koji se spaja analogni ulazni signal. Na crveni i plavi ulaz spaja se napajanje transkonduktantnog pojačala, na žuti se dovodi struja predpobude LED modula, a na crni ulaz spaja se uzemljenje.



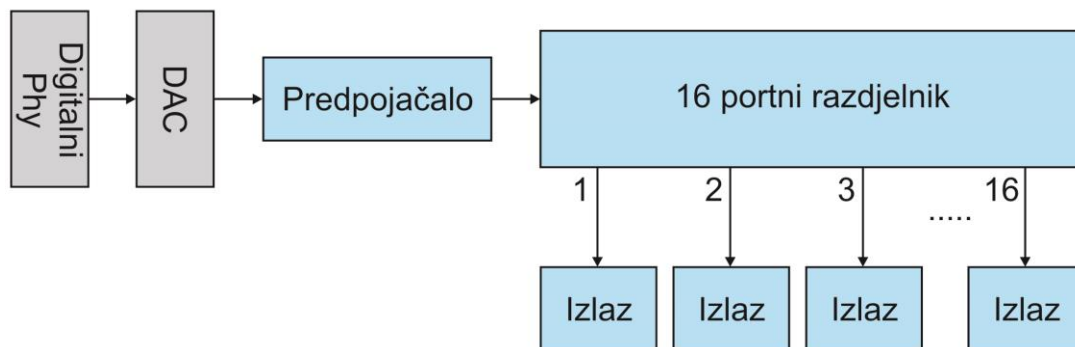
Slika 28. Siemens-ov analogni odašiljač

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

LED moduli (E3A) se montiraju izravno na ventilator integriran pored PCB (vidi sliku 17). Na vrh LED modula je postavljena tvornički dizajnirana astigmatična leća koja pretvara emisiju iz pravokutnog LED modula u kružni svjetlosni snop. Kut divergencije emitiranog zračenja iznosi  $76^\circ$  na pola osvijetljenosti.

Digitalni signal generiran digitalnim PHY treba replicirati kako bi se omogućio koračni rad 16 VLC odašiljača. Kako bi smanjili složenost sustava, digitalni DMT signal prvo je pretvoren u analogni i onda repliciran te distribuiran. Topologija odabrane signalne distribucijske mreže je prikazana na slici 29. Pasivni 1:16 razdjelnik snage s visokim omjerom nepropusnosti i vrlo niskim preslušavanjem služi kao replikator. Kako bi se izjednačila razina izlaznog napona s razinom ulaznog, integrirano je pojačalo širokopojasnog frekvencijskog pojasa između DAC izlaza i ulaznog razdjelnika.

Postavljeni su kabeli RG 58 (standardni BNC), dok su SMA konektori odabrani kako bi se pojednostavilo postavljanje sustava. U završnom dijelu, odabrana je zvjezdasta topologija sustava koja je jedina uspjela proizvesti dovoljno niske faze kašnjenja između dva VLC odašiljača.



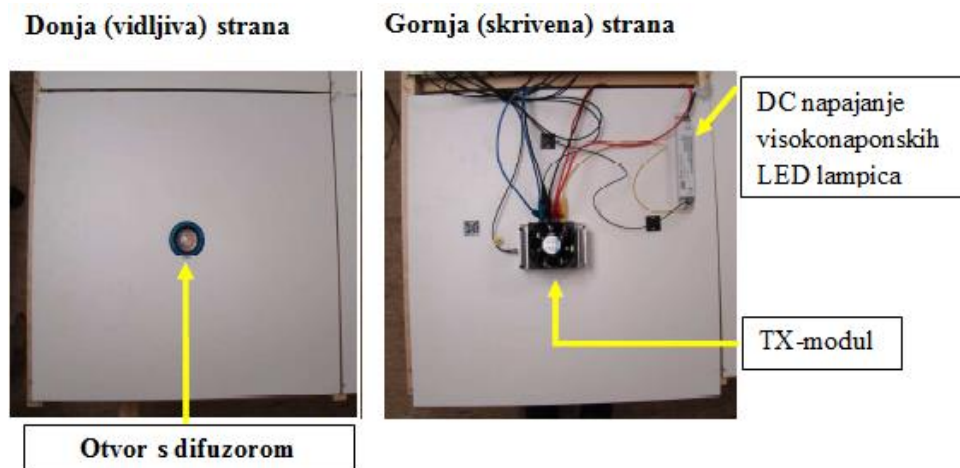
Slika 29. Blok dijagram distribucijske mreže analognog signala

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Na slici 29. prikazana je distribucijska mreža analognog signala razvijena posebno za demonstraciju. Impedancija svih veza je  $50 \Omega$ , a glavni dijelovi mreže su širokopojasno pojačalo, 16-portni pasivni razdjelnik, te analogni VLC odašiljač kao opterećenje.

### 5.2.3. Integracija u izložbeni prostor

Radi lakše instalacije demonstracijskog modela i za omogućavanje maksimalne prilagodljivosti njegovog smještaja u odnosu na arhitektonska ograničenja, uvedeni su odašiljači po sredinama pločica identični onima već instaliranim na stropu izložbenog prostora. Difuzor je instaliran ispred opreme za optičko snimanje kako bi se smanjio odsjaj, a analogni odašiljači su izravno montirani na pločice (vidi sliku 30.).

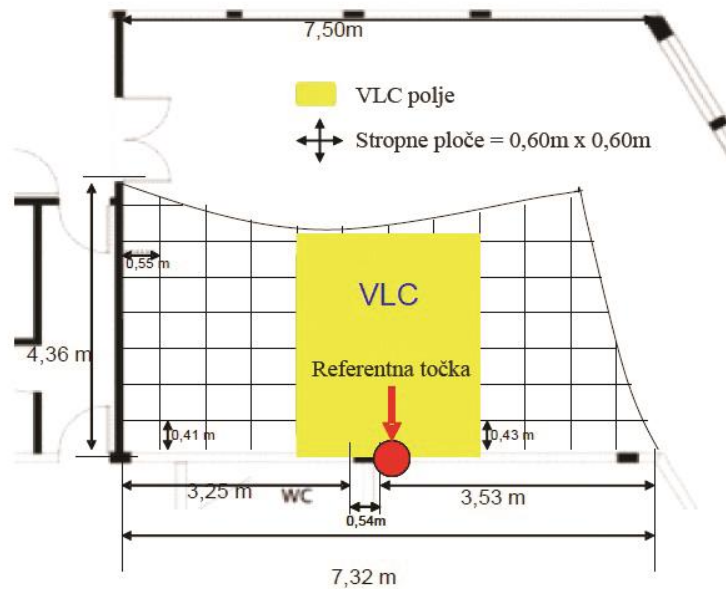


Slika 30. Donji dio (lijevo) i gornji dio (desno) odašiljačke pločice

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Kako bi se smanjio šum proizveden upravljačkim strujama, DC napajanje je zamijenjeno zajedničkim napajanjem i za ventilatore i transkonduktantna pojačala.

Područje VLC emitiranja je površine oko 9 m<sup>2</sup>. Slika 31. prikazuje poziciju VLC odašiljača unutar izložbenog prostora (označeno žutom bojom). Također, označena je i referentna točka, odnosno točka priključenja na tehničku prostoriju (vidi sliku 32.). Od 20 stropnih ploča unutar VLC područja, samo 16 ih je opremljeno VLC odašiljačima.

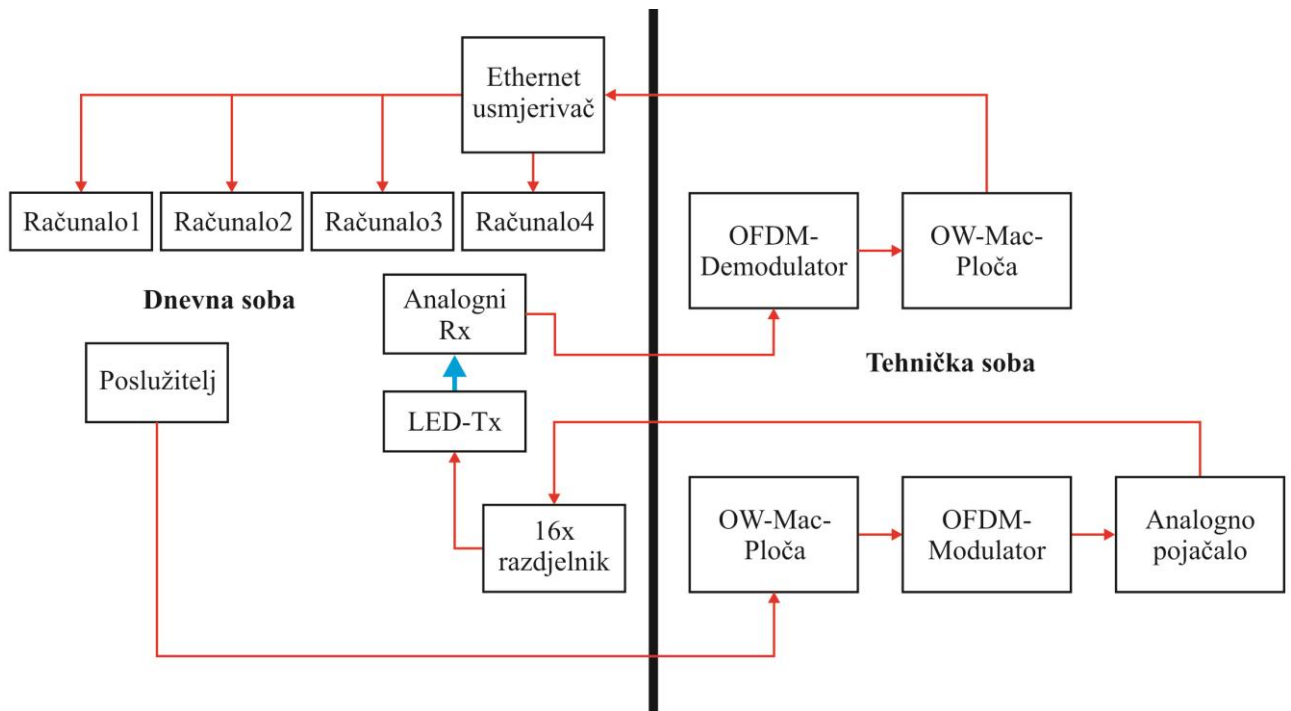


Slika 31. Tlocrt OMEGA izložbenog prostora i položaj VLC odašiljača

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Osim estetskih i arhitektonskih ograničenja, vrlo bitan parametar je i razina osvijetljenja koja se može postići na visini radnog stola. Kako bi se omogućio brz prijenos podataka bez odsjaja s jedne strane i razine rasvjete dovoljne za čitanje s druge strane, težilo se horizontalnoj osvijetljenosti iznad 400 lx, a ispod 800 lx što ravnomjernije raspoređeno VLC područjem. Također, cilj je bio i smanjenje curenja signala izvan VLC područja. Analizirano je preko 20 geometrijskih i distribucijskih modela i najbolji je izabran za demonstraciju.

Blok dijagram VLC demonstrativnog modela prikazan je na slici 32. Četiri video signala šalju se sa servera smještenog u prvoj (demonstracijskoj) prostoriji na VLC MAC smješten u drugoj (kontrolnoj) prostoriji. Nakon toga, Ethernet paketi se pretvaraju u VLC pakete i šalju se digitalnom modulatoru, te potom analognom pojačalu. Signal se preusmjerava natrag u demonstracijsku prostoriju, dijeli na 16 kopija i tada šalje upravljačkom sklopu svakog od 16 VLC odašiljača. Analogni prijemnik tada prima VLC signal koji se prenosi slobodnim prostorom. Nakon toga, električni signal se šalje natrag u kontrolnu prostoriju gdje se demodulira i Ethernet paketi otpakiravaju, te se pomoću CAT-5 kabela signal ponovno šalje u demonstracijsku prostoriju gdje Ethernet usmjerivač odvaja 4 video signala i usmjerava na 4 prijenosna računala kako bi se mogli gledati.



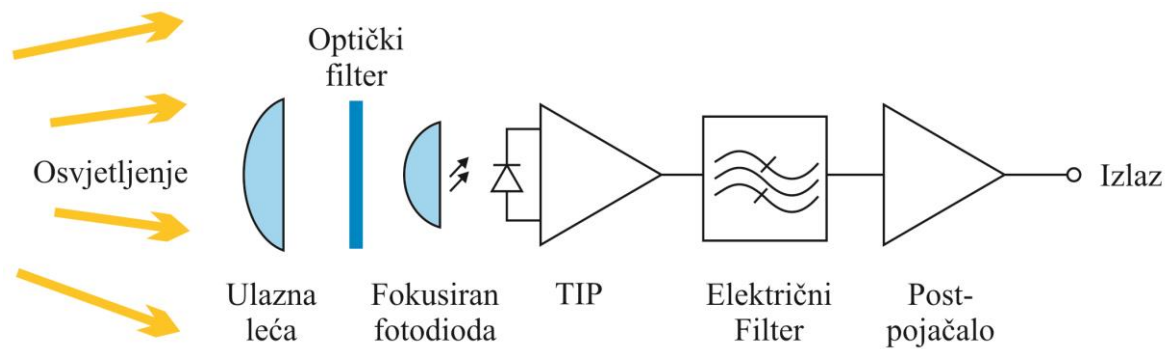
Slika 32. Blok dijagram VLC demonstrativnog modela

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

#### 5.2.4. Prijemni podsustav

Slika 33. prikazuje blok dijagram analognog VLC prijemnika. Redizajn analognog prijemnog modula bio je temeljen na rezultatima mjerenja izvedenima na demonstraciji u izložbenom prostoru. Izmjeren je tipičan intenzitet svjetlosti od 500 lx na stolnoj razini ispod stropa. U usporedbi sa starim dizajnom prijemnika, ova razina je bila blizu donje granice stabilnog prijenosa podataka bez grešaka. Mjerenja s punim PHY (analogni + digitalni) pokazali su značajan utjecaj razine primljene fotostruje na stopu pogreške signalne veze. Nadalje, prvotno izrađeni prijemnik imao je kut vidnog polja od oko 70° što je između lampi postavljenih u izložbenom prostoru na razmacima oko 60 cm ostavljalo otvore od cca 17°, te time ostavljalo veću mogućnost pojave grešaka u prijenosu.

Stoga je jedan fokus rada bio na poboljšanju dobiti od pretvorbe RX-modula, zadržavajući električne performanse na istoj visokoj razini kao i u starijoj izvedbi. Drugi cilj je bio smanjenje dimenzija kućišta prijemnika i kompaktniji dizajn namijenjen distribuciji na masovnom tržištu.

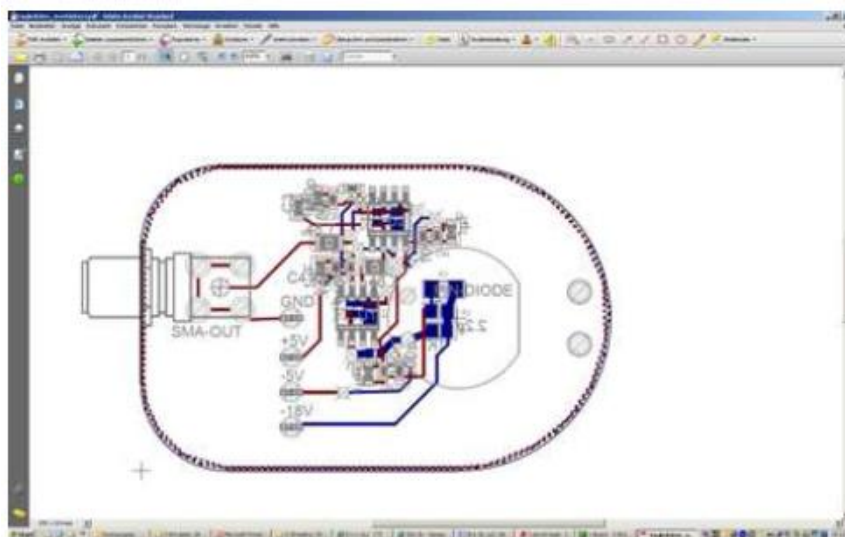


Slika 33. Osnovni dijelovi analognog prijemnika

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

To je uglavnom postignuto potpunim redizajnom sklopovske pločice i prebacivanjem unutarnjeg napajanja na vanjski okvir čime su dimenzije tiskane pločice smanjene na 25% izvorne veličine (vidi sliku 34.).

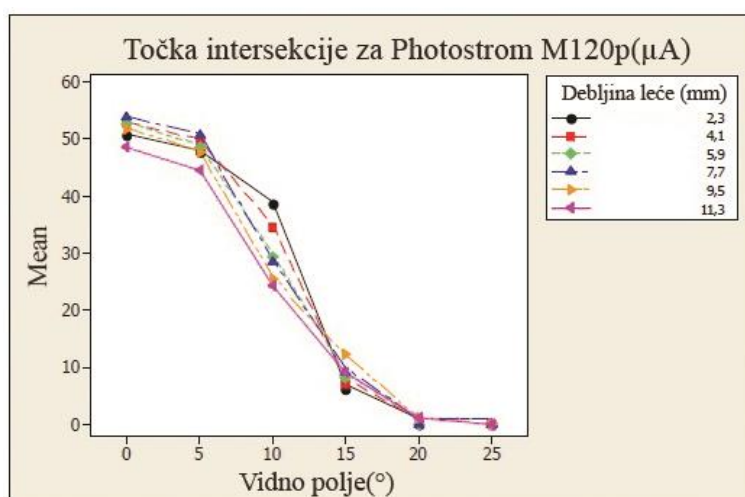
Glavne komponente prijemnika su: asferična kolimatorska leća, optički filter (plavi filter), PIN dioda velike površine s priključenom kolimatorskom lećom, transimpedantno pojačalo i post-pojačalo. Cijeli je sustav smješten u plastično kućište.



Slika 34. Nova PCB konstrukcija umanjena za 75% u odnosu na prvu izvedbu

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

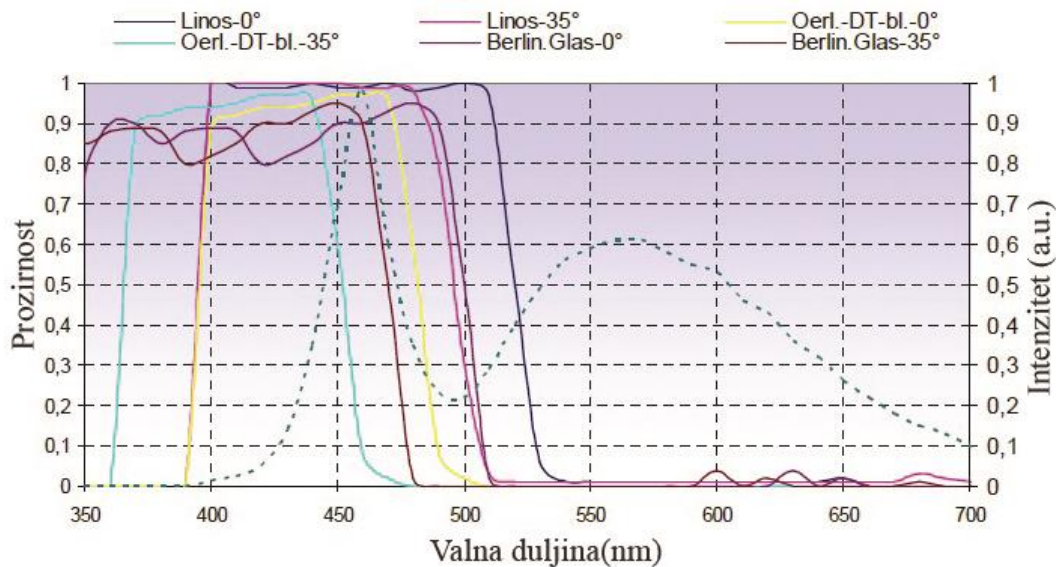
Za razliku od početne izvedbe prvog modela, poboljšana inačica opremljena je dodatnom asferičnom kolimatorskom lećom što uzrokuje smanjenje vidnog polja sa  $70^\circ$  na  $17^\circ$  i poboljšanje optičkog dobitka za 30% u odnosu na stari dizajn (vidi sliku 35.). Provedeno je nekoliko testova kako bi se odredila najpogodnija leća te je odabrana leća žarišne duljine 35,5 mm i promjera 25 mm.



Slika 35. Mjerenje vidnog polja s Melles Griot lećom i S6968 PIN-diodom

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))





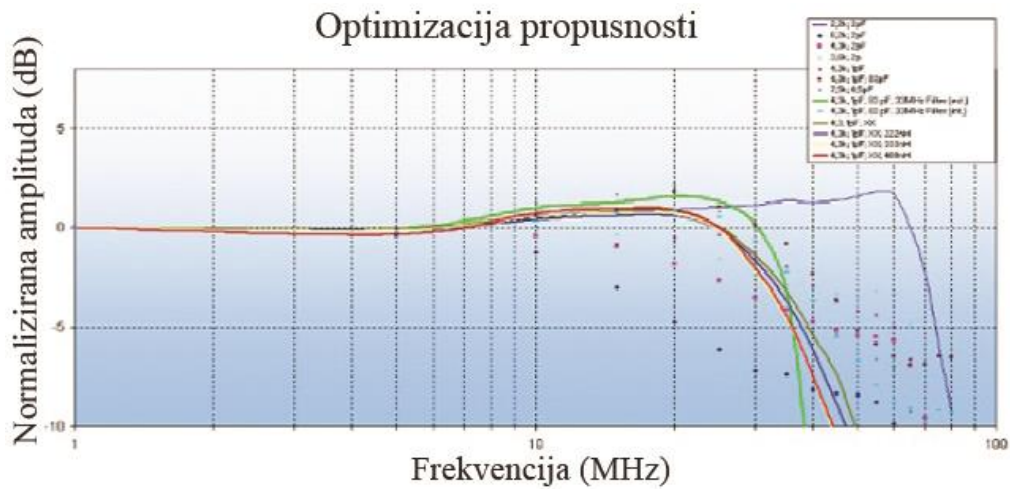
Slika 36. Usporedba karakterističnih krivulja različitih dvobojnih filtera

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Za optički filter koristi se dvobojni višeslojni sustav izveden na float staklu (BK7). Njegova funkcija je blokada žućkastog svjetla iznad  $\sim 480$  nm i omogućavanje prijenosa plavog svjetla i svjetla do UV dijela LED svjetla. Promjer filtera je 25 mm, a debljina 2 mm, te je njime ostvaren optimiziran prijenos valnih duljina od 350-480 nm (slika 36.).

Sljedeći element sustava je fotodioda opremljena asferičnom lećom proizvođača PMMA. Kao prijemni čip koristi se Hamamatsu tip S6968 zbog svojih izvrsnih performansi u pogledu propusnosti i učinkovitog aktivnog područja. Aktivno područje silikonskog čipa je  $\sim 25$  mm ( $5 \times 5$  mm<sup>2</sup>), dok je granična frekvencija oko 50 MHz. Kapacitet priključnica na 1 MHz i 10 V prednapona je oko 50 pF. Brzina odziva za željenu valnu duljinu od 460 nm je oko 0,25 A/W.

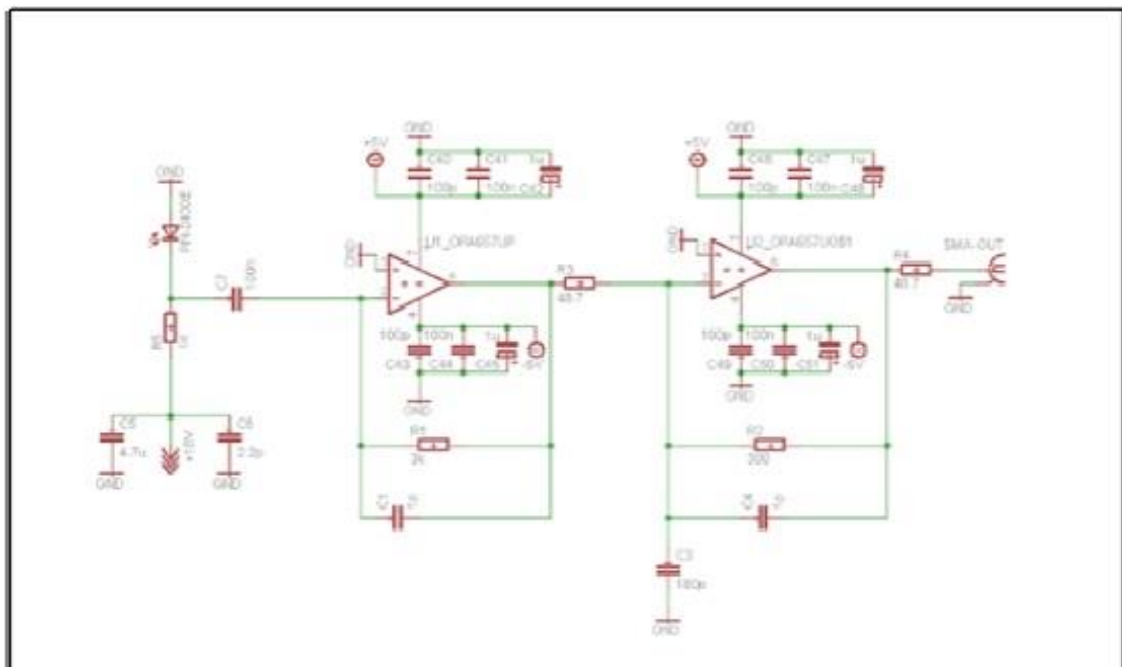
Niskošumno FET operacijsko pojačalo pretvara fotostruju u naponski signal. Korišteno operacijsko pojačalo ima odličnu propusnost od 1,6 GHz i vrlo nizak šum ulaznog napona od 4,8 nV/Hz. Nakon nekoliko preinaka, transimpedantno pojačanje od 4,2 kV/A, ravan frekvencijski odziv i napon isključenja od 35 MHz, ostvareni su optimizacijom povratne mreže transimpedantnog pojačala (TIA) (vidi sliku 37.).



Slika 37. Optimizacija propusnosti transimpedantnog pojačala

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

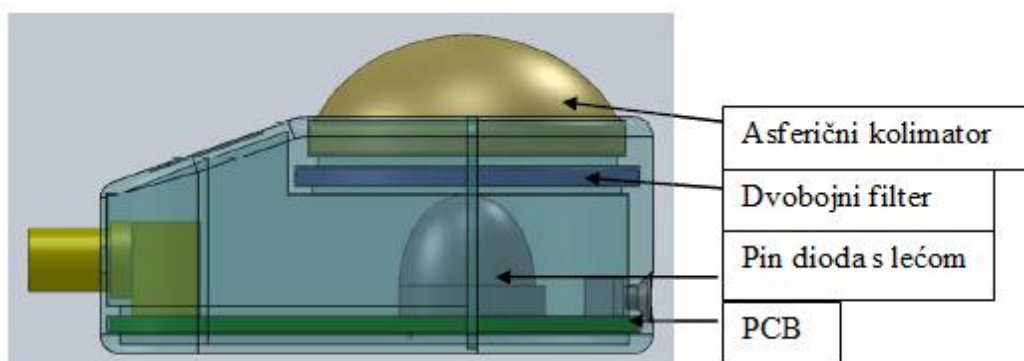
Signal je pojačan 3 puta u fazi post pojačala, te je ukupno pojačanje iznosilo otprilike 12 kV/A. Širina 3 dB frekvencijskog područja prijemnika je oko 35 MHz, a izračunata razina osjetljivosti fotodetektora (eng. Noise-equivalent Power, NEP) iznosi 0,23 nW/Hz<sup>1/2</sup>. Sklop pojačala može se vidjeti na slici 38.



Slika 38. Shema sklopa analognog prijemnika

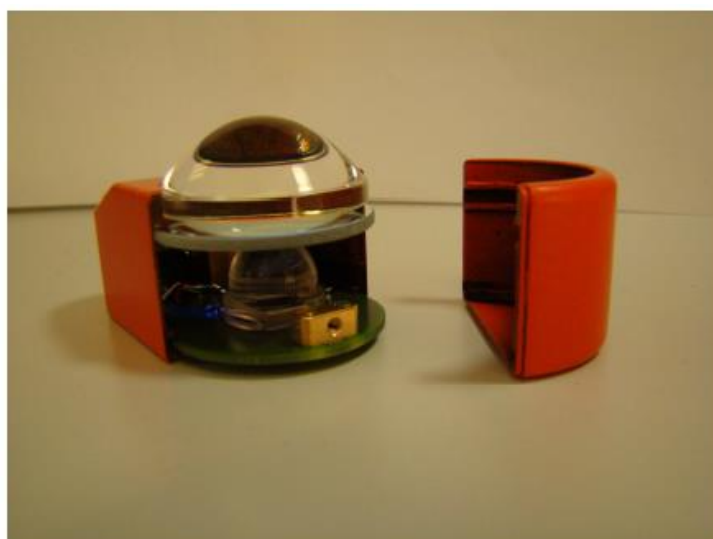
(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

Sve komponente su montirane u jednom kućištu s otvorom i mehanički učvršćenim filterom valne duljine kao i signalnim sučeljem za ADC fazu (SMA priključak). Slika 39. prikazuje tehnički crtež nove izvedbe. Kućište je proizvedeno uz pomoć sustava za brzu izradu prototipa uz rezoluciju procesa od oko 100  $\mu\text{m}$ . Nakon toga, kućište je iznutra obojano u crno kako bi se izbjeglo ometanje od vanjskih izvora svjetlosti, a fotografije prototipa mogu se vidjeti na slikama 40. i 41.



Slika 39. Tehnički crtež analognog prijemnika (bočni pogled)

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))



Slika 40. Analogni prijemnik, prvi realiziran uzorak (bočni pogled, otvoreno kućište)

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))



Slika 41. Analogni prijemnik, prvi realiziran uzorak

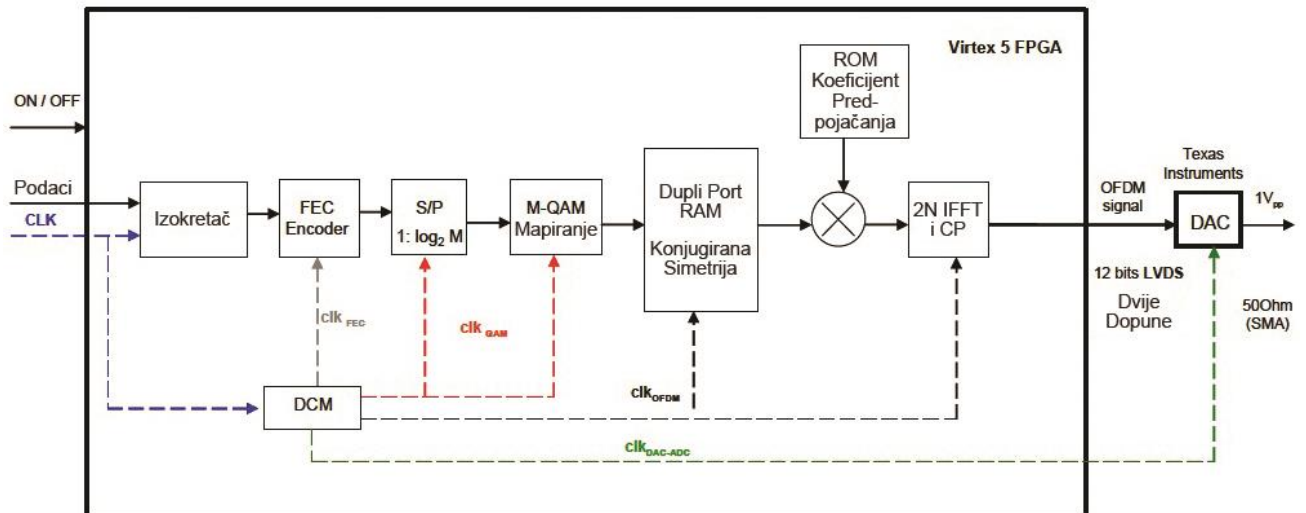
(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

### 5.3. Digitalni dio

Digitalna obrada signala provodi se preko Virtex-5 FPGA koristeći aritmetiku fiksne točke. U ovom dijelu je hardverski opisana shematika sustava.

Slika 42. prikazuje blok dijagram odašiljača (OFDM Tx i DAC). Serijski ulaz iz OWS kartice prvo prolazi kroz pretvarač i FEC koder prije nego se konvertira u bitni  $\log_2 M$  paralelni tok podataka uz pomoć posmičnog registra. Ti podaci se zatim preslikavaju na složeni  $M$ -QAM simbol spremljen u FIFO memoriju. Kako bi se dobila stvarna vrijednost signala na izlaznom  $2N$ -IFFT modulu, primjenjuje se konjugirana simetrija na  $N-1$   $M$ -QAM simbolima. Ova simetrija se postiže čitanjem FIFO i pisanjem odgovarajuće vrijednosti, QAM simbola ili kompleksno konjugiranog, ispravno pozicioniranim u odnosu na RAM s dvostrukim ulazom. U demonstratoru, svi podnosioci su modulirani po redu s tim da je izvršeno prethodno izjednačavanje snage (distribucija snage signala nije ujednačena). Izračun koeficijentata množenja se obavlja na temelju poznatog LED frekvencijskog odziva, tj, na temelju karakteristika E-O-E kanala s ciljem ostvarenja sličnih performansi na svim podnosiocima.

U sljedećem koraku iz RAM-a se čitaju  $2N$  vrijednosti potrebne za IFFT transformaciju. Modul. koji provodi transformaciju. unosi direktno zaštitni interval u obliku cikličkog prefiksa tako da se stvarni izlaz IFFT-a može primijeniti na DAC. Veza između FPGA ploče i DAC-a se vrši putem LVDS signala, a SMA je sučelje između analognog DAC izlaza i LED upravljačkog sklopa.

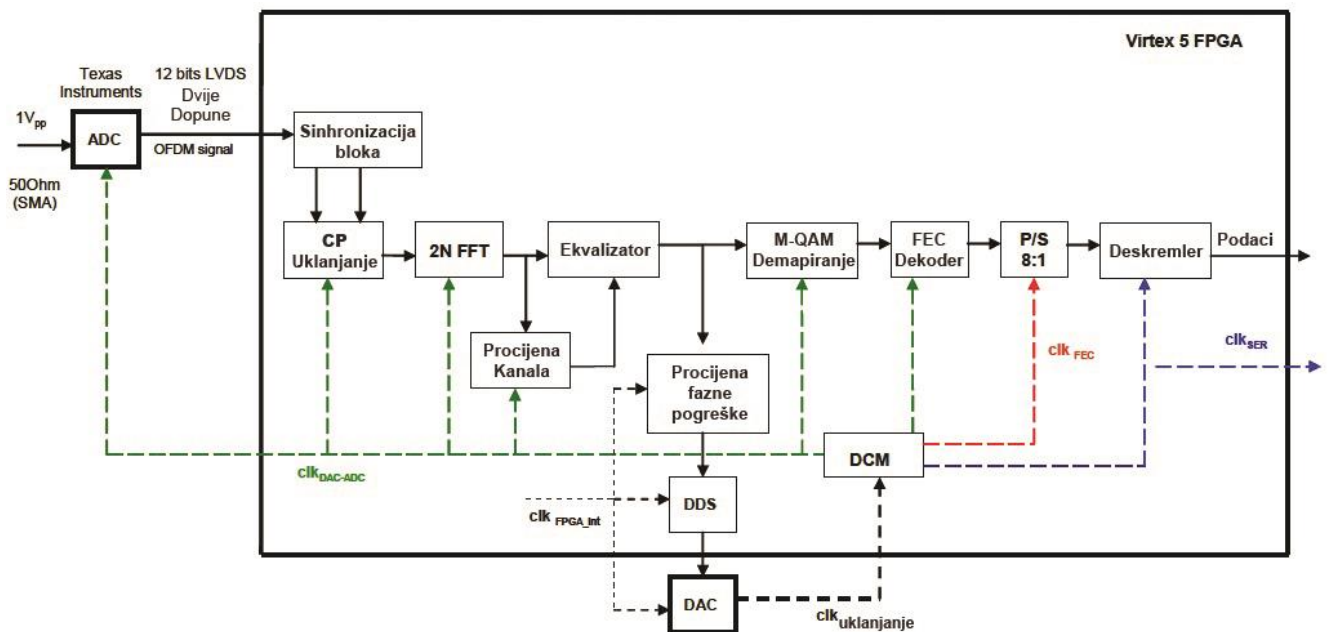


Slika 42. Blok dijagram odašiljača VLC kartice (OFDM Tx i ADC)

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Slika 43. prikazuje blok dijagram digitalne obrade signala na prijemniku VLC kartice (ADC i OFDM Rx). Moduli za OFDM demodulaciju odgovaraju onima u odašiljaču, ali u obrnutom redoslijedu. Fotodetektor snima optički signal i pretvara ga u električni format prije dolaska u ADC putem SMA priključka. Digitalni LVDS izlazi ADC-a se prenose na FPGA. Za pravilnu detekciju i demodulaciju, OFDM Rx treba uključivati sinkronizaciju, procjenu kanala i izjednačavanje. Sinkronizacija je potrebna da bi se našao početak OFDM okvira. U završnom demonstratoru algoritam sinkronizacije se temelji na automatskoj povezanosti dobivenih podataka, dok je u prvoj demonstraciji sinkronizacija ostvarena pomoću kabela. Neovisno od bit sinkronizacije i sinkronizacije okvira, potrebna je uspostava takta. Uspostava takta se provodi na temelju algoritma procjene fazne pogreške, zbog čega su neki podnosioci iskorišteni kao ispitni tonovi.

Uz pretpostavku uspješne bit-sinkronizacije u trenutku kad se zna početni okvir (početak prvog OFDM simbola) ciklički prefiks može biti uklonjen s početka dolaznih OFDM simbola, a ostali uzorci se mogu spojiti na  $2N$ -FFT modul radi transformacije. Prije  $M$ -QAM premapiranja, signal se mora izjednačiti. Jednotaktno izjednačavanje se izvodi pomoću procijenjenih koeficijenata kanala dobivenih uz pomoć testnog slijeda na početku svakog bloka prijenosa. Nakon premapiranja vraćeni su izvorni  $\log_2 M$  bitovi. Ti bitovi formiraju paralelni podatkovni signal koji se prenosi u dekodera za ispravljanje pogrešaka i deskrembler prije nego što se pretvore u serijski slijed brzine od 100 Mb/s koji se preko SMA sučelja kreće prema OWS kartici.



Slika 43. Blok dijagram VLC prijemnika (OFDM Rx i ADC)

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

### 5.3.1. Modulacija i shema kodiranja

Tablica 4. OFDM parametri

Parametar	Vrijednost
Širina električnog frekvencijskog pojasa	$B = 32,7 \text{ MHz}$
Broj neovisnih podnosioca (uključujući i DC)	$N = 32$
Broj ispitnih tonova (iskorištenih)	$2 (I)$
Odvajanje frekvencije podnosioca	$\Delta f = 2B/2N$
Period OFDM simbola bez cikličkog prefiksa	$T_{\text{FFT}} = (\Delta f)^{-1}$
Period uzorkovanja	$T_{\text{PER}} = T_{\text{FFT}}/2n$
Duljina cikličkog prefiksa u uzorcima	$L = 4$
Duljina cikličkog prefiksa	$T_{\text{CP}} = LT_{\text{SAM}}$
Period OFDM simbola s cikličkim prefiksom	$T = T_{\text{FFT}} + T_{\text{CP}}$
Period OFDM simbola s cikličkim prefiksom (u uzorcima)	$P = 2N+L$
Red QAM modulacije	$M=16$
Korekcija pogrešaka	Reed Solomon (187,207)

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Tablica 4. prikazuje parametre OFDM prijenosa. Širina frekvencijskog pojasa sustava može se smatrati približno niskopropusnom zbog frekvencijskih karakteristika bijelih LED žarulja i VLC prijemnika. Propusnost signala u osnovnom pojasu ( $B$ ) je prilagođena sustavu.

Broj korištenih podnosioca je ograničen, a duljina cikličkog prefiksa može biti kratka ako propusnost signala znatno ne prelazi graničnu frekvenciju sustava. Brzina prijenosa uključujući i redundanciju cikličkog prefiksa je:

$$R_b [\text{bit/s}] = \frac{2B}{2N + L} \sum_{n=1}^{N-1} \log_2(M_n) \quad (2)$$

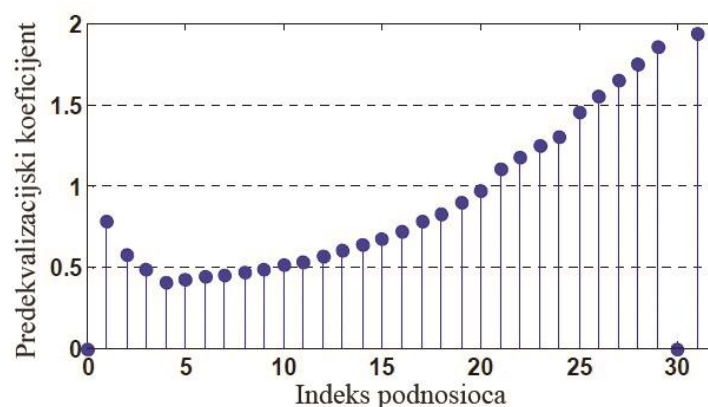


Ako se za primjer uzme da je  $B = 32,7$  MHz,  $M = 16$ -QAM,  $N = 32$  i  $L = 4$ , pod uvjetom da su svi podnosioci modulirani, postiže se brzina prijenosa  $R_b \approx 120$  Mbit/s. Parametri su izabrani tako da se ako dođe do greške u izvedbi nekodiranog prijenosa, može dostatno kompenzirati konvencionalnim FEC algoritmom.

Nadalje, implementirani FEC ( $\rho$ FEC), testni niz za procjenu kanala i sinkronizacije  $\rho_{\text{train}}$  (ukupno 80 OFDM simbola na svakih 10 000 OFDM podatkovnih simbola) i ispitni podnosioci za uspostavu takta ( $\rho_{\text{pilot}}$ ) dovode do smanjenja mrežnog prijenosa od oko 100 Mb/s. Do sada, rezultati pokazuju da je učinak ograničen uglavnom zbog šuma na prijemniku. Nelinearnosti zbog LED karakteristika su od manje važnosti. Kontrolirano cjeplanje visokih frekvencija na odašiljaču rezultira pojačanjem SNR.

S obzirom da su svi podnosioci modulirani po redu, izvodi se prethodno izjednačavanje snage (distribucija signala električne energije nije ujednačena). Kalkulacija koeficijenata množenja se obavlja na temelju poznatog LED frekvencijskog odziva, tj. na temelju karakteristika EoE kanala s ciljem ostvarenja sličnih performansi na svim podnosiocima.

Koeficijenti množenja slijeda QAM simbola na svakom podnosiocu su prikazani na slici 44. Podnosioc s indeksom "0" korespondira DC-u i obično je nemoduliran. Podnosioci "30" i "31" su rezervirani za ispitne tonove s tim da je prvi neiskorišten.



Slika 44. Koeficijenti prethodnog izjednačavanja snage (prikazani kao amplituda) na Tx

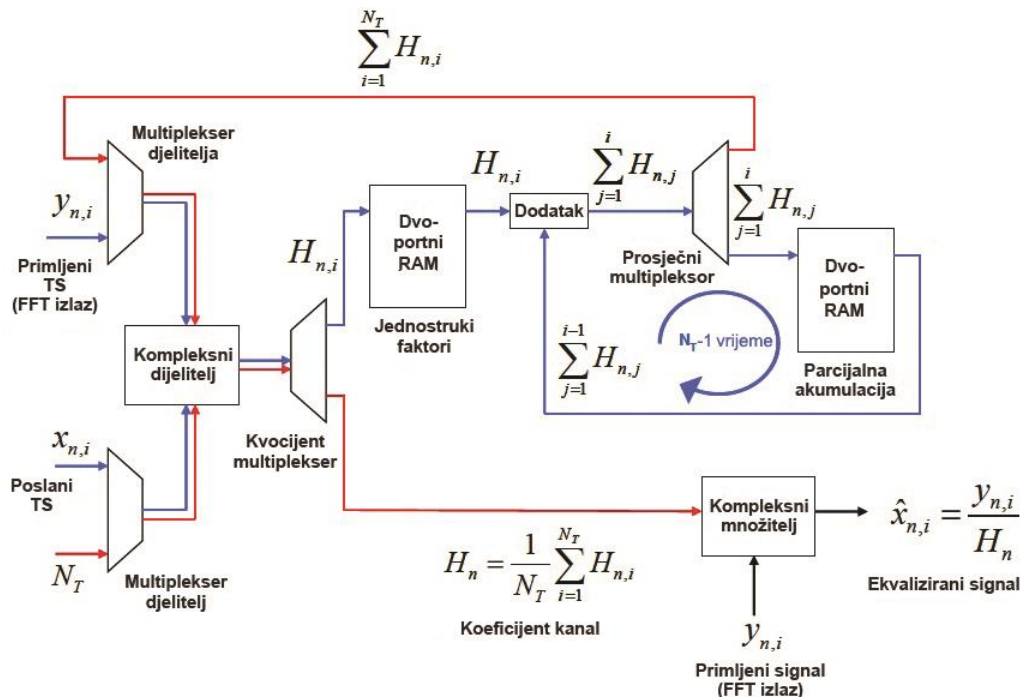
(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))



### 5.3.2. Procjena kanala i sinkronizacija

Procjena kanala je potrebna za pravilno spremanje podataka na prijemniku. Testni slijed se izvodi između dva bloka podataka. S obzirom na činjenicu da je kanal vremenski nepromjenjiv, testni niz ne treba slati često. Duljina niza bi trebala biti dovoljna da se ispravi Gaussov šum, ali s druge strane to ne bi trebalo značajnije povećati tok. Ako blok podataka sadrži  $N_D$  OFDM simbole, a testni niz  $N_T$  OFDM simbole, smanjenje iskoristivosti spektra je  $N_D/(N_T + N_D)$ . Testni niz se sastoji od 16-QAM simbola mapiranih na svim podnosiocima. Sastoji se od 74 OFDM simbola, i pojavljuje se nakon svakih 10 000 simbola korisničkih podataka. Procjena kanala se obavlja na svakom podnosiocu, QAM simbol po simbol, a dobivene vrijednosti se računaju prosječno da bi se definirali koeficijenti kanala na svakom podnosiocu.

Procijenjeni koeficijenti kanala se zatim koriste za obavljanje linearnog izjednačavanja pristiglih podatkovnih simbola. Slika 45. prikazuje glavne module i tok signala.



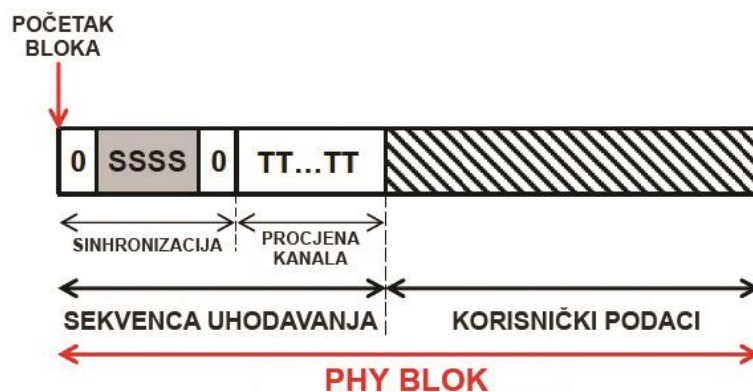
Slika 45. Blok shema procjene kanala i modula izjednačenja na Rx

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

### 5.3.3. Sinkronizacija

Za testnu verziju 1, sinkronizacija okvira je izvedena pomoću kabela. U završnoj fazi (verzija 2), algoritam sinkronizacije se temelji na autokorelaciji zaprimljenih podataka.

Za sinkronizaciju okvira možemo iskoristiti periodički implementiran testni niz kako bi sinkronizirali prijemnik svaki put kad niz nastupi. Prvi OFDM simboli ovog niza su posebno odabrani kako bi se omogućio postupak sinkronizacije. Oni slijede shemu prikazanu na slici 46. gdje "0" predstavlja "nulti" OFDM simbol u vremenskoj domeni, "S" je OFDM simbol za sinkronizaciju, a "T" predstavlja simbol testnog niza u svrhu procjene kanala. Simboli sinkronizacije nose informaciju u svakom četvrtom podnosiocu a umetnuti su i dodatni nulti simboli, i to sve kako bi se omogućila maksimalna korelacija budući da je riječ o stvarnim uzorcima.



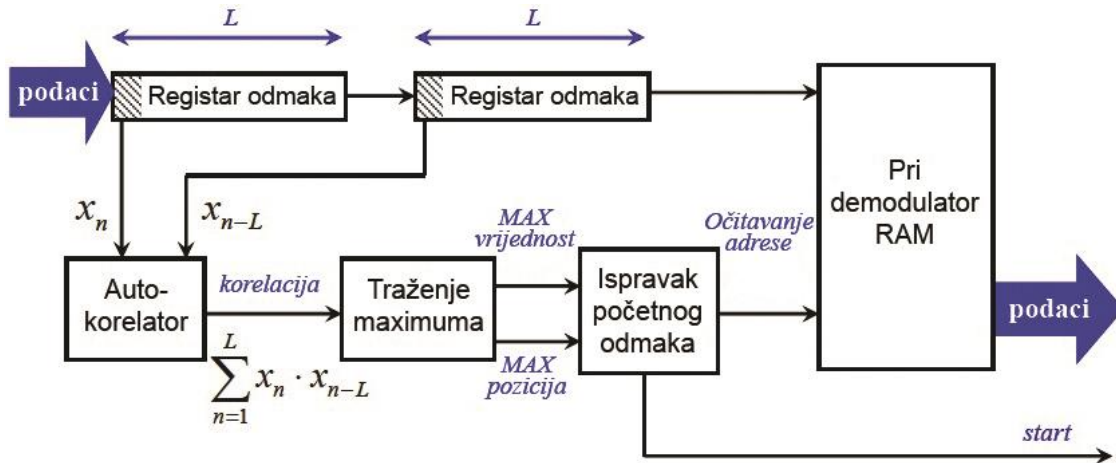
Slika 46. Struktura i pozicija sinkronizacijskog bloka

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Prijemnik traži početni okvir izvedbom autokorelacije dolaznog signala i pronalaskom njegovog maksimuma. Slika 47. prikazuje pojednostavljenu shemu sinkronizacijskog bloka na prijemniku.

Ulazni signal se pomiče u registar koji nam omogućuje trenutnu izvedbu  $n$  ulaznog uzorka i kasniju izvedbu dolaznog uzorka  $L$  koji je pola duljine korelacijskog otvora. U našem

slučaju,  $L$  je dug 2 OFDM simbola. Kad se sva četiri "S" simbola nalaze točno u dva registra pomaka ( $L$  uzoraka), korelacijski blok rezultira maksimumom.



Slika 47. Blok shema modula sinkronizacije okvira na Rx

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

Funkcija korelacije se provodi iterativno. Kad se novi uzorak pomakne u registar, novi generirani produkt se dodaje prethodnoj korelacijskoj vrijednosti, a produkt koji odgovara uzorku pomaknutom iz registra (iz  $2L$  korelacijskog otvora), se oduzima od prethodne korelacijske vrijednosti. Izlaz korelacijskog modula je tada povezan s upravljačkim blokom koji pronalazi slijedeću maksimalnu vrijednost netom prije slijedećeg testnog niza.

Pronalaze se i veličina i položaj maksimalne vrijednosti. Položaj se koristi za teoretski izračun slijedećeg maksimuma. Sa svakim testnim nizom uspoređujemo teoretski položaj maksimuma sa stvarnim i bitna razlika nam govori da li smo sinkronizirani ili ne, i kako ispraviti neusklađenost. Dolazni signal se sprema na RAM nakon što se pomaknuo u registar, prije slanja u demodulator.

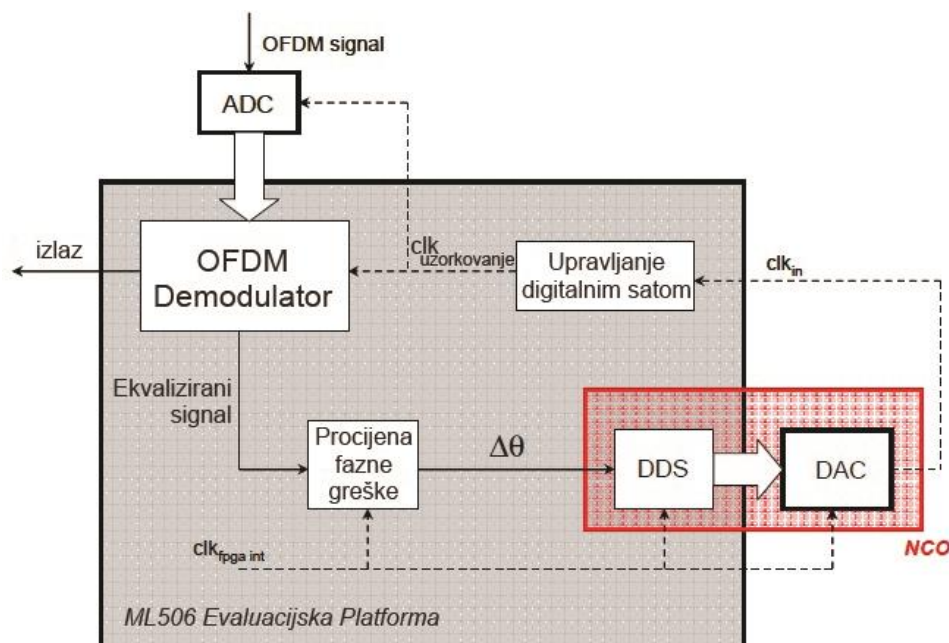
Sinkronizacija je do sada postizana pomoću kabela. Takt od 100 MHz iz OWS-a je korišten u TX-FPGA da bi generirao takt(ove) za sve TX module i DAC. Isti takt je doveden preko kabela do RX-FPGA što je generiralo taktove za sve RX-module i ADC. Na slici 36. i 37. takti signali su obilježeni isprekidanim linijama.

U završnoj primjeru (verzija 2), postignuta je automatska uspostava takta pomoću numerički upravljano oscilatora (NCO) i algoritma temeljenog na procjeni faznih pogrešaka zaprimljenih podataka.

NCO se sastoji od direktnog digitalnog sintetizatora (DDS) ugrađenog na Rx-FPGA ploču I DAC (vidi sliku 48.). NCO generira sinusoidu čija je frekvencija funkcija frekvencije taktnog sustava frekvencije ( $\text{clk}_{\text{fpga int}}$ ) i parametra faze  $\Delta\theta$

Da bi se utvrdio  $\Delta\theta$  dva podnosioca imaju funkciju ispitnih tonova i kontinuirano prenose signal u realnom vremenu. Nakon izjednačenja na prijemniku, QAM simboli preneseni ispitnim tonom se koriste za procjenu srednjeg faznog pomaka preko okvira (blok od 10.000 OFDM simbola). Ta informacija se zatim koriste za izračun  $\Delta\theta$  potrebnog za ispravljanje vremenske pogreške koja uzrokuje procijenjeni fazni pomak.

Na temelju trenutne vrijednosti  $\Delta\theta$  ulazna taktna frekvencija ( $\text{clk}_{\text{in}}$ ), a time i frekvencija uzorkovanja ( $\text{clk}_{\text{sampling}}$ ) variraju kako bi ispravile bilo koju frekvencijsku neusklađenost između odašiljača i prijemnika. Nova  $\Delta\theta$  vrijednost dobiva se procjenjujući faznu pogrešku slijedećeg bloka primljenih podataka.



Slika 48. Blok dijagram uspostave takta

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

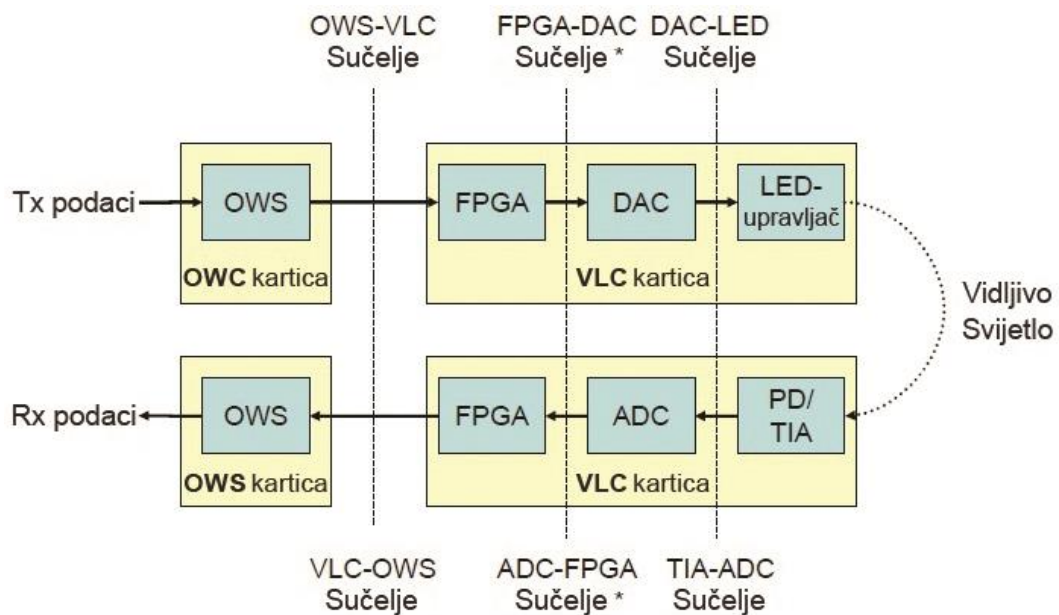
## 5.4. Sučelja

VLC sustav prijenosa prikazan na slici 49. se sastoji od ukupno šest sučelja. U ovom poglavlju opisati će se vanjska i unutarnja sučelja VLC sustava.

Tablica 5. Vrste sučelja VLC sustava

	Odašiljač	Prijemnik
<b>MAC / PHY sučelja</b>	OVS kartica → VLC kartica	VLC kartica → OVS kartica
<b>A/D i D/A sučelja</b>	FPGA → DAC	ADC → FPGA
<b>E/O i O/E sučelja</b>	DAC → LED (upravljajč)	PD / TIA → ADC

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)



Slika 49. VLC blok dijagram uključujući sučelja

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; www.ict-omega.eu)

#### 5.4.1. Digitalno-analogna i analogno-digitalna sučelja

D/A i A/D sučelja povezuju FPGA ploču (koja sadrži sve funkcije digitalne obrade signala) s ADC i DAC.

##### *DAC specifikacije (DAC5662 ploča)*

DAC pretvara digitalni signal s FPGA ploče u analogni signal LED pojačala. Za OFDM signal se koristi 12 bitna rezolucija kako bi se smanjio kvantizacijski šum i brzina ažuriranja od  $4B = 122 \text{ MS/s}$ .

##### *ADC specifikacije (ADS5527 ploča)*

ADC pretvara dobiveni analogni signal u digitalni signal FPGA ploče. Za OFDM signal se koristi 12 bitna rezolucija kako bi se smanjio kvantizacijski šum i brzina ažuriranja od  $4B = 122 \text{ MS/s}$ .

Za ovaj primjer se koristi ulaz i ADC ploče zbog boljih karakteristika pri visokim frekvencijama u odnosu na ulaz II.

#### 5.4.2. Elektro-optička i opto-električna sučelja

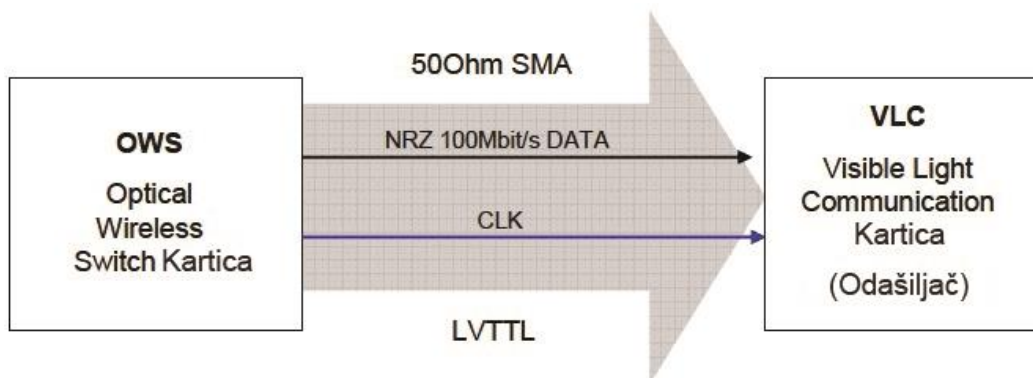
E/O i O/E sučelja spajaju DAC s odašiljačem i prijemnik s ADC.

*DAC-LED upravljačko sučelje (E/O sučelje)* – postavljen je na maksimalni napon  $V_{pp} = 1,2 \text{ V}$  uz LED upravljački ulaz.

*TIA-ADC sučelje (O/E sučelje)* – TIA izlaz daje napon  $V_{pp} = 0,7 \text{ V}$ .

### 5.4.3. MAC-PHY Tx sučelja

VLC kartica će se povezati s OWS karticom putem serijske veze od 100 Mb/s. Kao što je prikazano na slici 50. sučelje odašiljača (OWS kartica prema VLC kartici) sastoji se od podatkovnog signala i taktnog signala.



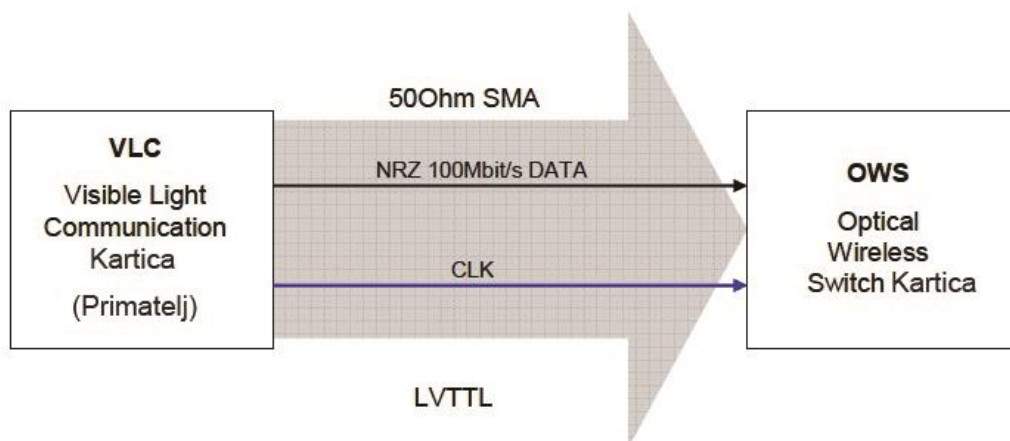
Slika 50. Sučelje iz OWS kartice prema odašiljaču VLC kartice

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Serijski podaci i taktni signali su kodirani pomoću NRZ, a razina signala je LVTTL. Veza je ostvarena na SMA sučelju impedancije od 50  $\Omega$  i ženskim konektorima s obje strane.

#### 5.4.4. MAC-PHY Rx sučelja

Serijsko sučelje između prijemnika VLC kartice i OWS kartice kako je prikazano na slici 51. sastoji se od 100 Mbit/s podatkovnog signala i taktnog signala.



Slika 51. Sučelje od prijemnika VLC kartice prema OWS kartici

(Izvor: „Smart Wireless Optics, Demonstrator 2“; [www.ict-omega.eu](http://www.ict-omega.eu))

Veza je kao i u prethodnom slučaju ostvarena preko SMA sučelja impedancije od  $50\Omega$ . Podaci su kodirani pomoću NRZ, a razina signala je LVTTTL.

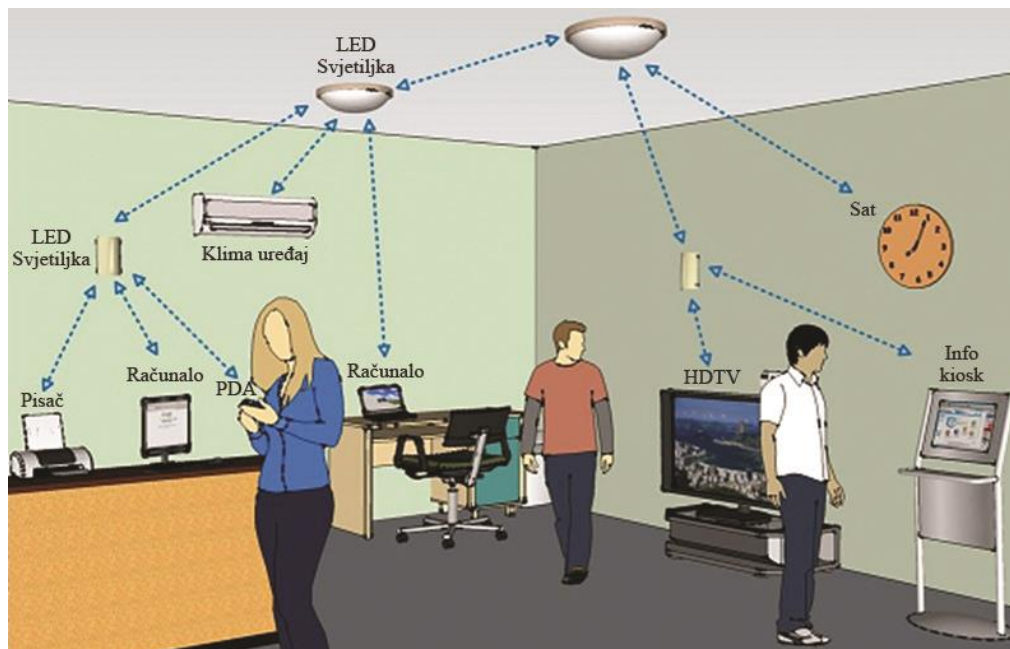


## 6. Područja primjene

U ovom poglavlju opisani su načini primjene VLC tehnologije u čovjekovoj okolini. VLC ima brojne primjene u brojnim područjima vizualne signalizacije (informacijski zaslon), komunikacije, u osvjetljenju, pozicioniranju itd. U nastavku su dani primjeri za nekoliko grupa aplikacija.

### 6.1. Aplikacije za osobnu upotrebu prijenosa podataka

Najčešće ovakav način prijenosa podataka koristi se u uredskim prostorijama za razmjenjivanje podataka preko mobilnih uređaja, tableta, laptopa, čak i osobnih računala. Ukoliko se fiksiraju predajnik i prijemnik moguć je prijenos govora i slike na velike udaljenosti preko mobilnih uređaja. Na slici 52. vidljivo je kako LED svjetlo koje se nalazi na stropu može funkcionirati sa mnogim uređajima.



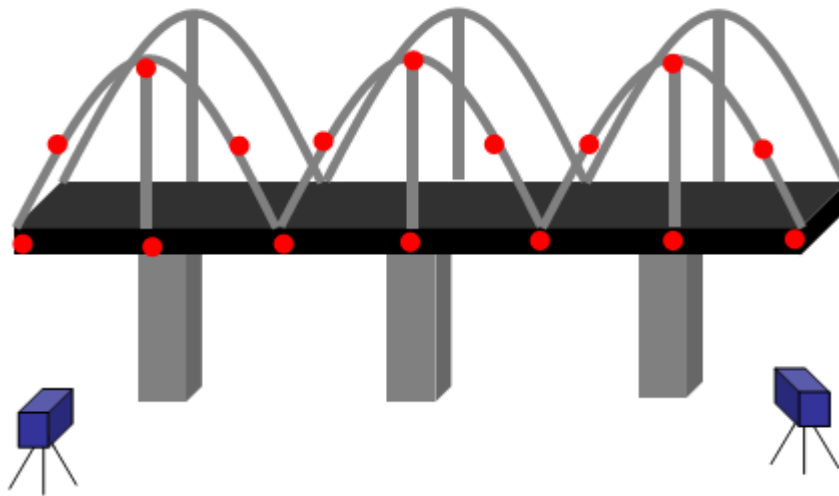
Slika 52. Primjer prijenosa podataka

(Izvor: <http://www.oberonwireless.com/blog-5-13-2013.php>)

## 6.2. Aplikacije za prepoznavanje lokacije korisnika

Pomoću VLC tehnologije moguće je odrediti točnu poziciju nekog objekta. Neke od prednosti ovih aplikacija su u tome što se pozicija može automatski odrediti i moguće je kontinuirano praćenje. Osim toga, poziciju je moguće mjeriti i noću. Kod ovakvih aplikacija moguća je velika točnost. Na 100 metara udaljenosti točnost određivanja pozicije iznosi  $\pm 5$  milimetara što je dosta impresivno.

Moguće je mjeriti i više točaka u isto vrijeme. To se izvrsno vidi iz sljedeće slike (53.). Vidljivo je kako su na mostu postavljeni prijemnici koji su obasjani sa LED diodama. Ovo tehnika određivanja pozicije je dobra zbog toga što i najmanji pomaci na mostu mogu uzrokovati havarije. Moguće je odrediti kritične pozicije na mostu, te njegova savijanja pod teretom.



Slika 53. Primjer određivanja 3D prikaza mosta

(Izvor: Shinichiro Haruyama; „Visible Light Communications: Recent Activities in Japan“;  
BU Photonics Center, Boston University; 08.02.2011.)

### **6.3. Aplikacije za osvjtljenje i vizualnu signalizaciju**

Obojena signalna svjetla su naširoko korištena u pomorstvu, automobilske industriji, te u drugim primjenama poput arhitektonske rasvjete, te se ugrađuje i u građevinske strukture.

U prometu boja omogućuje signal promatraču, te se podaci pri tome prenose od semafora na automobil kao što je „crveno svjetlo za opasnost“. Rasvjeta se nadograđuje s podatkovnim komunikacijama, čime se može povećati sigurnost i drugi aspekti upravljanja prometom. Istraživački projekt Europske Unije je ispitao komunikaciju između dva automobila korištenjem bijele svjetlosti prednjih svjetala.

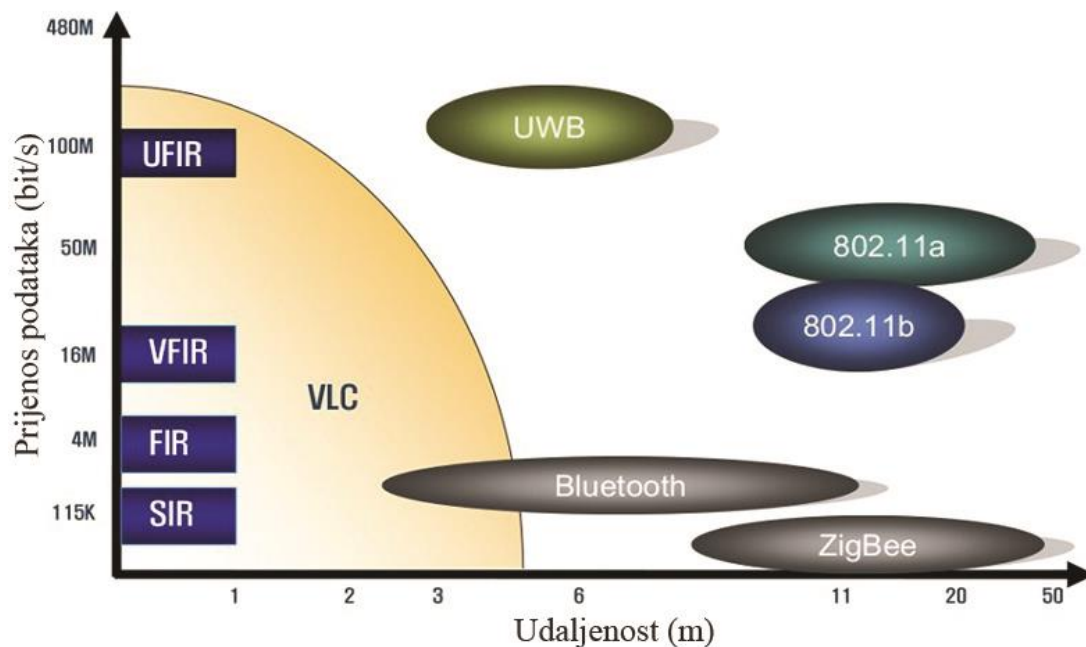
VLC se upotrebljava u informacijskim zaslonima kao što su natpisi i indikatorske ploče, koje se moduliraju na ručne terminale da emitiraju informacije. Takva primjena je moguća u zračnim lukama, muzejima i ostalim sredinama gdje je potrebno emitiranje podataka ovisno o lokaciji.

## 7. Usporedba s ostalim tehnologijama

U sljedećem poglavlju biti će opisane neke od tehnologija za prijenosa podataka, te će se usporediti u odnosu na komunikaciju vidljivim svjetlom.

### 7.1. Usporedba sa ostalim bežičnim tehnologijama

Postoje mnoge tehnologije za bežični prijenos informacija. Neke od njih veoma su raširene u današnjem vremenu za različite aplikacije. Iz slike 54. vidljivo je kako VLC tehnologija ima najveću brzinu prijenosa podataka, ali problem je u tome što je taj prijenos na male udaljenosti. WLAN tehnologija (802.11) ima najbolji omjer brzine prijenosa podataka u odnosu na udaljenost predajnika i prijemnika. Što se tiče brzine prijenosa podataka VLC tehnologiji konkurira samo UWB (Ultra-Wideband) tehnologija.



Slika 54. Usporedba brzine prijenosa u odnosu na udaljenost predajnika i prijemnika

(Izvor: Seminar Kommunikationsstandards in der Medizintechnik; Christian Pohlmann)

## 7.2. Usporedba sa infracrvenom tehnologijom

Infracrveni uređaji često se koriste za prijenos podataka u uređajima poput laptopa, daljinskih upravljača i u nekim mobilnim uređajima. Najveći problem kod infracrvene tehnologije nastaje kod prijenosa većeg broja podataka. IC zrake mogu biti štetne za ljudski vid. Zbog velike emisije energije i same nevidljivosti zrake moraju se ispuniti sigurnosni uvjeti kako bi se zaštitile oči. Dakle prednost VLC tehnologije je u tome što se prijenos podataka odvija u vidljivom spektru i samim time nema opasnosti za ljudski vid.

Iz slike 55. je vidljiv prijenos podataka preko infracrvenog zračenja. Predajnik/prijemnik (1) koji je spojen direktno na Internet komunicira sa karticom koja je spojena na laptop. Može se primijetiti kako je ostvarena dvosmjerna komunikacija. Kod *download* načina komunikacije, odnosno skidanja podataka sa Interneta (1) predstavlja predajnik a (2) prijemnik podataka. Naravno, u drugome slučaju kod *upload* načina komunikacije situacija je obratna. Ukoliko postoje pregrade između ureda kao što je ovdje slučaj, reflektirana zraka (3) će svejedno doći do uređaja ali to će malo usporiti prijenos podataka.

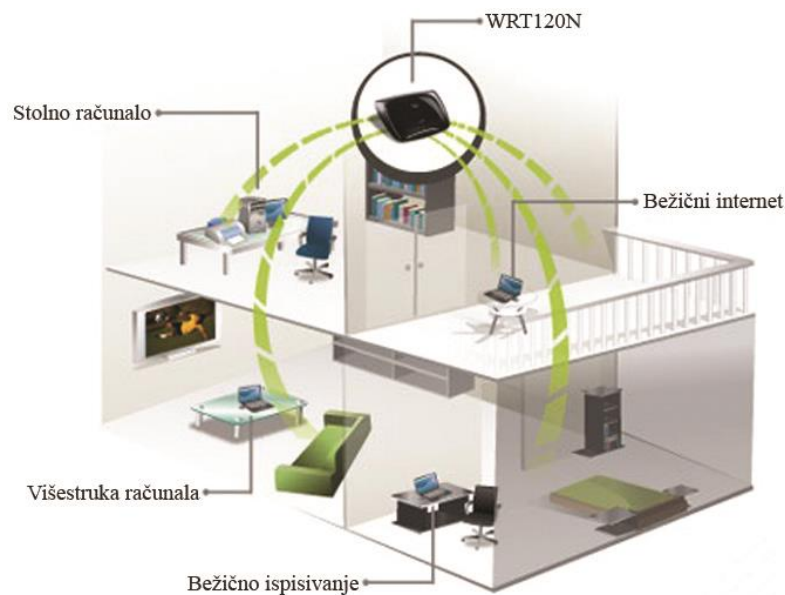


Slika 55. Primjer korištenja IC tehnologije u uredima

(Izvor: <http://cictr.ee.psu.edu/CICTRnews/White%20LED/sad0707Kave4p.pdf>)

### 7.3. Usporedba sa mikrovalnom tehnologijom

Od svih tehnologija bežične komunikacije, najviše se koristi tehnologija za prijenos podataka preko radio valova (engl. Radio Frequency, skr. RF) ili mikrovalova (vidi sliku 56.). Ova dominacija ostvarena je prvenstveno zbog velike dostupnosti visoko osjetljivih prijemnih uređaja tj. antena koje primaju elektromagnetske signale, kao i zbog sposobnosti pokrivanja širokog područja signalom niskih frekvencija ili uskog područja (engl. line-of-sight) signalom visokih frekvencija. Međutim, RF ima ograničenu propusnost (engl. bandwidth) zbog ograničenja dostupnog frekvencijskog pojasa i smetnji. Stoga se pojas vidljivog svjetla u elektromagnetskom (EM) valnom spektru smatra potencijalnim rješenjem tih problema. Prednost mikrovalne tehnologije u odnosu na VLC tehnologiju je u tome što nije potrebno imati direktan prijenos podataka nego se podaci mogu prenositi i između zidova. Gledajući sa druge strane, nedostatak je u tome što su moguća preslušavanja.



Slika 56. Prikaz prijenosa podataka RF tehnologijom

(Izvor: <http://support.linksys.com/en-us/support/routers/WRT120N>)

Prednost VLC tehnologije u odnosu na RF tehnologiju je u tome što ne uzrokuje nikakve smetnje na uređaje koji rade u RF spektru, te se mogu koristiti u istim prostorijama, odnosno istim područjima. Neki od primjera su bolnice, aerodromi i svemirske stanice gdje je

velika osjetljivost na RF signale. Još neke od prednosti su jednostavna instalacija, sigurnost, te besplatno korištenje frekvencijskog pojasa.

#### 7.4. Usporedba sa RONJA tehnologijom

RONJA tehnologija (vidi sliku 57.) u biti predstavlja prijenos podataka na velike udaljenosti pomoću infracrvenog svjetla. Prednost ove tehnologije je što nema interferencija i regulacije spektra. Osim toga ova tehnologija je neosjetljiva na elektromagnetska zračenja i nema gubitaka paketa prilikom prijenosa podataka. Prilikom razmjene podataka nije moguće prisluškivanje paketa. Razmjena podataka može se obavljati u oba smjera (*Full Duplex*).

Neki od nedostataka ove tehnologije u usporedbi sa VLC tehnologijom su to što je oprema dosta teška (10-20 kg) i zauzima puno prostora te je moguća samo *point-to-point* (*P2P*) način prijenosa podataka. Kao što samo ime kaže P2P prijenos odvija se samo između jednog predajnika i jednog prijemnika informacija, dok kod VLC tehnologije jedan predajnik može komunicirati sa više prijemnika. Nedostatak ove tehnologije je također što prijenos informacija nije moguć kada je prisutna magla.



Slika 57. Primjer predajnika za RONJA tehnologiju

(Izvor: <http://ronja.twibright.com/community.php>)

Za budućnost planira se brzina prijenosa podataka i do 100 Mbit/s uz udaljenost prijenosa do 3 km, dok trenutna tehnologija daje 10 Mbit/s uz udaljenost 1,4 km.



## 8. Izazovi i mogućnosti

Tehnologija prijenosa podataka vidljivom svjetlošću privlači sve više pažnje rastom popularnosti LED rasvjete. LED rasvjetna tijela mogu biti upravljana poput bilo koje druge elektroničke komponente, tj. pale se i gase velikom brzinom. Prijenos podataka temelji se na istom principu kao i WiFi, odnosno umjesto WiFi predajnika, koristimo LED žarulju, a na prijemnoj strani je fotodetektor umjesto antene.

U četvrtome mjesecu 2013. godine Fraunhofer Heinrich Hertz institut u Berlinu objavio je kako je uspio postići prijenos podataka od 800 Mbit/s koristeći LED diode. To je za sada najveća brzina prijenosa podataka što se tiče ove tehnologije.

U usporedbi s maksimalnom brzinom prijenosa podataka putem WiFi konekcije koja iznosi 7 Gbit/s to je još uvijek mala brzina prijenosa. Institut tvrdi da je za sada moguće dostizanje brzine prijenosa podataka od 3 Gbit/s putem LED tehnologije. Kako bi postigli brzinu od 3 Gbit/s, znanstvenici su koristili frekvencijski pojas od 180 megaherca i tri LED žarulje različitih boja. Izazov za dalje je težiti prema tom cilju kako bi se došlo do njegovog ostvarivanja.

Prednosti VLC komunikacije je mogućnost korištenja u područjima gdje postoji veliko zagušenje radio signala i na mjestima gdje je korištenje uređaja s radio predajnicima zabranjeno, poput bolnica i zrakoplova.

U Fraunhoferu navode kako VLC može poboljšati privatnost, s obzirom da se širenje signala lako može spriječiti neprozirnim materijalom.

Nedavno je predstavljen projekt više britanskih sveučilišta pod utjecajem Sveučilišta Strathclyde za razvoj takozvanih Li-Fi mreža. Osnovni cilj znanstvenika koji rade na ovom projektu je da sustav omogući prijenos podataka pomoću sićušnih LED-ica, kombinirajući ih s postojećom rasvjetom.

Takav projekt bi omogućio LED mrežu uz autocestu koja služi za osvjetljavanje kolnika, a i uz to bi bežično prenosio podatke o prometu na prijenosnike, tablete i pametne telefone putnika. Ovaj paralelni sustav je ključ razvoja Li-Fi mreža, jer donosi uštedu energije.



U budućnosti svaki izvor svjetlosti koji se koristi u domaćinstvima i uredima mogao bi biti Li-Fi ruter koji će prenositi podatke do osobnih računala, pametnih telefona i tableta.

Korištenje LED rasvjete kroz sljedećih 20 godina bi trebalo dominirati, te pri tome Li-Fi mreže imaju veliku perspektivu, no pitanje je tko će se usuditi prvi donijeti tu tehnologiju na tržište.

## Zaključak

U ovom radu pokušala se prikazati budućnost bežičnih komunikacija kako u uredskoj ili kućnoj primjeni tako i za vanjsku upotrebu te za udaljeni prijenos informacija. Tehnologija prijenosa informacija vidljivim svjetlom razvijena je s ciljem stvaranja vrlo velikih brzina prijenosa podataka. Radi se na ostvarivanju visoke sigurnosti, koja je biološki i ekološki prihvatljivija u odnosu na mikrovalnu tehnologiju koja svojim prijenosom informacija ima zračenje kao nuspojavu. Tehnologija prijenosa informacija vidljivim svjetlom nije štetna za ljudski organizam, te je i znatno jeftinija.

Takva tehnologija komunikacije omogućuje proširenje postojećih aplikacija koristeći vrlo velik raspon frekvencija svjetla umjesto radio i mikro-valne tehnologije. Takvi sustavi koriste modularane valne duljine svjetlosti koju emitiraju razni prikladno prilagođeni izvori, kao što su unutarnja i vanjska rasvjeta, osvijetljeni znakovi, televizori, zasloni računala, digitalne kamere i digitalne kamere na mobilnim telefonima za komunikacijske svrhe, prvenstveno kroz korištenje LED dioda.

Cilj ove tehnologije je osim prijenosa podataka u zatvorenim prostorijama, omogućiti i prijenos podataka na velike udaljenosti kako bi se iz upotrebe izbacio prijenos podataka preko bakrenih žica. Glavni nosioc je zrak te se ova tehnologija može koristiti na mnogim mjestima gdje se isključivo nalazi svjetlost. Dobrobit ove tehnologije je što je neosjetljiva na elektromagnetske smetnje i nisu moguća preslušavanja, te se kao takva može implementirati u svakodnevne situacije. Negativna strana ove tehnologije kod vanjskog prijenosa podataka je u tome što nije moguća razmjena informacija po maglovitom vremenu i moru i to zbog loma svjetlosti, interferencije koje su moguće od strane drugih izvora svjetlosti poput sunčevog zračenja i fluorescentnih lampa.

Imamo tri glavna načina prijenosa informacija putem svjetlosti a to su infracrvena tehnologija, fluorescentne lampe i najpopularnija i najkvalitetnija LED tehnologija. Pomoću fluorescentnih cijevi moguće je ostvariti brzinu prijenosa 10 kbit/s, dok se sa LED tehnologijom mogu ostvariti i brzine do 500 Mbit/s, ovisno o udaljenosti predajnika i prijemnika. Način rada LED tehnologije temelji se na slanju digitalnih informacija koje ljudsko oko ne može zapaziti. LED diode pale se i gase i do 1000 puta u sekundi te se tako prenosi informacija u obliku svjetlosnog signala.

Različiti interval paljenja i gašenja dioda predstavljaju različite vrste informacija. Kao uređaj za slanje informacija u obliku svjetlosnog signala koristi se LED dioda, dok se za primanje informacija koristi fotodioda.

Osnovne komponente VLC sustava su VLC odašiljač, VLC kanal i VLC prijemnik. VLC odašiljač je vidljivi emiter koji može biti LED dioda ili poluvodički laser koji se koriste za prijenos podataka putem bijele svjetlosti, ovisno o samoj primjeni. VLC odašiljač mora djelovati kao komunikacijski odašiljač i uređaj za iluminaciju svjetla. VLC optički kanal sastoji se od optičke vidljivosti različitih komponenti koje odgovaraju širenju svjetla od izvora do prijemnika. VLC optički kanal mora spriječiti difuziju svjetla nastalu reflektiranjem svjetlosti od zidova ili objekata u sobi. VLC prijemnik se sastoji od optičkog koncentratora, optičkog filtera, fotodetektora i pojačala.

Na razvoju VLC tehnologije rade brojne korporacije i organizacije diljem svijeta poput Panasonic, Siemens, Toshiba, Casia i brojna sveučilišta u Rimu, Ateni, Kaliforniji i na Oxfordu i ostali. Takva tehnologija je još uvijek u početnoj fazi razvoja. Unutarnje umrežavanje i usluge temeljene za prepoznavanje lokacije korisnika su jedine aplikacije koje su prodjele na tržište. U budućnosti je ova tehnologija usmjerena prema razvoju u područjima aplikacija poput inteligentnih prometnih sustava upravljanja, zračnim lukama za signalizaciju, te za komunikaciju itd.

U svakom slučaju, mogu se vidjeti veliki potencijali ove tehnologije koja će se zasigurno u budućnosti nastaviti razvijati i vjerojatno koristiti i u svakodnevnoj upotrebi, pogotovo zbog vrlo širokog raspona mogućih primjena.

## Literatura

- [1] Christian Pohlmann; „Visible Light Communication“; Seminar Kommunikationsstandards in der Medizintechnik ; Institut für Telematik, Universität zu Lübeck
- [2] <http://bemri.org/visible-light-communication.html>
- [3] Shinichiro Haruyama; „Visible Light Communications: Recent Activities in Japan“; BU Photonics Center, Boston University; 08.02.2011.
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Visible\\_light\\_communication](http://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication)
- [5] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Infracrveno\\_zra%C4%8Denje#Komunikacije](https://hr.wikipedia.org/wiki/Infracrveno_zra%C4%8Denje#Komunikacije)
- [6] <http://www.seebiz.eu/led-prijenos-podataka-za-najbrzi-internet/ar-61210/>
- [7] G. Cossu; A. M. Khalid; P. Choudhury; R. Corsini; E. Ciaramella; „3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED“ ; 04.12.2012
- [8] S. M. Sze; Kwok K.Ng; „Physics of Semiconductor Devices“; Third edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication
- [9] <http://ronja.twibright.com/>
- [10] Karel Kulhavy; „RONJA, User controlled technology optical datalink“
- [11] <http://www.ict-omega.eu/>

## Popis tablica

Tablica 1. Elektro-optičke karakteristike OSTAR E2B i E3b .....	21
Tablica 2. Vrijednosti 3 dB frekvencije OSTAR-E3 ekvivalentnog kruga za tri LED upravljачke struje .....	24
Tablica 3. Frekvencijski pojas od 3-dB za OSTAR E3B s različitim signalom izmjeničnog napona u upravljачkom sklopu.....	28
Tablica 4. OFDM parametri .....	65
Tablica 5. Vrste sučelja VLC sustava .....	68

## Popis slika

- Slika 1. Prikaz VLC prijenosa informacija
- Slika 2. Prikaz vidljivog spektra
- Slika 3. Primjer prijenosa podataka bijelim LED diodama
- Slika 4. Dva načina prijenosa podataka pomoću RGB LED dioda
- Slika 5. Općeniti prikaz prijenosa podataka
- Slika 6. Prikaz fluorescentne lampe za prijenos podataka
- Slika 7. Primjer upotrebe LED dioda kao indikatora
- Slika 8. Primjena LED osvjetljenja u svjetlima automobila
- Slika 9. Prikaz pretvorbe svjetlosti u električni signal
- Slika 10. PIN fotodioda
- Slika 11. Lavinska fotodioda
- Slika 12. Prikaz dobivanja električnog signala kod lavinske fotodiode
- Slika 13. Prikaz APS senzora
- Slika 14. Prikaz CCD senzora
- Slika 15. Princip djelovanja senzora slike
- Slika 16. Blok dijagram VLC PHY sustava
- Slika 17. Pogled na OSTAR E3A s 6 čipova kroz sustav za optičko snimanje montiran na vrhu LED modula
- Slika 18. Osvjetljenje OSTAR bijele LED žarulje (LE CW E2B-MYNZ-N3P5)
- Slika 19. LED sklop LE CW E3b N3P5
- Slika 20. Ekvivalent kruga LE CW E3b N3P5

- Slika 21. Varijacija ekvivalentne impedancije za OSTAR E3 kao funkcija modulacije frekvencije za raspon struja mirovanja
- Slika 22. Normaliziran primljeni signal korištenjem detektora frekvencije 1 GHz
- Slika 23. Statička prijenosna funkcija, emitirana svjetlosna snaga kao funkcija istosmjernje upravljačke struje za OSTAR LE CW E3b N3P5
- Slika 24. Neopterećeni ostaci u ovisnosti o istosmjernjoj upravljačkoj struji
- Slika 25: Dinamički raspon bez smetnji kao funkcija indeksa modulacije E2B N3P5
- Slika 26. Pojačanje slabih signala kod tri primjera VLC odašiljača (LED+upravljački sklop) kao funkcija modulacijske propusnosti
- Slika 27. Upravljački sklop za OSTAR E3
- Slika 28. Siemens-ov analogni odašiljač
- Slika 29. Blok dijagram distribucijske mreže analognog signala
- Slika 30. Donji dio (lijevo) i gornji dio (desno) odašiljačke pločice
- Slika 31. Tlocrt OMEGA izložbenog prostora i položaj VLC odašiljača
- Slika 32. Blok dijagram VLC demonstrativnog modela
- Slika 33. Osnovni dijelovi analognog prijemnika
- Slika 34. Nova PCB konstrukcija umanjena za 75% u odnosu na prvu izvedbu
- Slika 35. Mjerenje vidnog polja s Melles Griot lećom i S6968 PIN-diodom
- Slika 36. Usporedba karakterističnih krivulja različitih dvobojnih filtera
- Slika 37. Optimizacija propusnosti transimpedantnog pojačala
- Slika 38. Shema sklopa analognog prijemnika
- Slika 39. Tehnički crtež analognog prijemnika (bočni pogled)
- Slika 40. Analogni prijemnik, prvi realiziran uzorak (bočni pogled, otvoreno kućište)
- Slika 41. Analogni prijemnik, prvi realiziran uzorak

- Slika 42. Blok dijagram odašiljača VLC kartice (OFDM Tx i ADC)
- Slika 43. Blok dijagram VLC prijemnika (OFDM Rx i ADC)
- Slika 44. Koeficijenti prethodnog izjednačavanja snage (prikazani kao amplituda) na Tx
- Slika 45. Blok shema procjene kanala i modula izjednačenja na Rx
- Slika 46. Struktura i pozicija sinkronizacijskog bloka
- Slika 47. Blok shema modula sinkronizacije okvira na Rx
- Slika 48. Blok dijagram uspostave takta
- Slika 49. VLC blok dijagram uključujući sučelja
- Slika 50. Sučelje iz OWS kartice prema odašiljaču VLC kartice
- Slika 51. Sučelje od prijemnika VLC kartice prema OWS kartici
- Slika 52. Primjer prijenosa podataka
- Slika 53. Primjer određivanja 3D prikaza mosta
- Slika 54. Usporedba brzine prijenosa u odnosu na udaljenost predajnika i prijemnika
- Slika 55. Primjer korištenja IC tehnologije u uredima
- Slika 56. Prikaz prijenosa podataka RF tehnologijom
- Slika 57. Primjer predajnika za RONJA tehnologiju



## Popis kratica s objašnjenjem

- VLC (Visible Light Communication) - komunikacija u vidljivom svjetlu
- LED (Light Emiting Diode) - svjetleća dioda
- PLC (Power Line Communication) - tehnologija komunikacije pomoću električne mreže
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - međunarodna neprofitna profesionalna organizacija za uznapredovanje tehnologije vezane sa elektricitetom
- OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) - vrsta modulacija signala za pretvorbu svjetlosnih signala u električni i obrnuto
- RGB LED (red, green, and blue LED) - više-bojna svjetleća dioda
- DMT (Discrete Multi-Tone) - vrsta modulacija signala za pretvorbu svjetlosnih signala u električni i obrnuto
- WDM (Wavelength-division multiplexing) - vrsta valnog multipleksiranja
- RONJA (Reasonable Optical Near Joint Access) - projekt razvoja uređaja za bežično prenošenje podataka putem svjetla, nastao u Češkoj
- SNR (Signal-to-noise ratio) - odnos signala i šuma
- GB (Gain-Bandwidth) - omjer pojačanja i širine pojasa
- APS (Active Pixel Sensor) - senzor slike koji pretvara svjetlosnu sliku u električni signal
- CCD (Charge-Coupled Device) - senzor slike koji pretvara svjetlosnu sliku u električni signal
- CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) - tehnologija koja se koristi za konstruiranje integriranih krugova
- SOC (System-On-a-Chip) - sposobnost integracije na čip

- RPA (Random Pixel Access) - proizvoljan pristup do piksela
- OSI (Open Systems Interconnection) - konceptualni model koji obilježava i standardizira unutarnje funkcije komunikacijskih sustava
- PHY (physical layer) - fizički sloj
- HHI (Hyundai Heavy Industries) - Hyundai
- TCA (Transducer) - pojačalo
- LX (Lux) - jedinica osvjetljenja
- SFDR (Spurious-Free Dynamic Range) - dinamički raspon bez smetnji
- PCB (Printed circuit board) - tiskana pločica
- BNC (Bayonet Neill–Concelman) - vrsta konektora za koaksijalni kabel
- SMA (SubMiniature version A) - vrsta konektora za koaksijalni kabel
- NEP (Noise-equivalent Power) - razina osjetljivosti fotodetektora
- FPGA (Field-programmable gate array) - integrirani krug konstruiran od strane korisnika
- OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) - metoda kodiranja digitalnih podataka na više-frekvencijskom nosaču
- DAC (Digital-to-analog converter) - uređaj za pretvaranje digitalnog signala u analogni
- FIFO (First In, First Out) - način organiziranja i manipuliranja podacima u odnosu na vrijeme i prioritete
- IFFT (Inverse fast Fourier transform) - inverzna Fouriereva transformacija
- LVDS (Low-voltage differential signaling) - standard za električno digitalno signaliziranje
- ADC (Analog-to-digital converter) - uređaj za pretvaranje analognog signala u digitalni

- FEC (Forward error correction) - tehnika za kontrolu pogrešaka u prijenosu podataka preko nepouzdatih komunikacijskim kanala
- QAM (Quadrature amplitude modulation) - shema za analognu i digitalnu modulaciju
- NCO (Numerically controlled oscillator) - numerički upravljani oscilator
- DDS (Direct digital synthesizer) - direktni digitalni sintezator
- NRZ (Non-return-to-zero) - binarni kod gdje je logička "1" predstavljena promjenom nivoa napona, a logička "0" bez promjene nivoa napona
- LVTTTL (Low Voltage Transistor-Transistor Logic) - niski napon TTL tranzistora
- TTL (Transistor-transistor logic) - digitalni sklop izgrađen od bipolarnih tranzistora i otpornika
- UWB (Ultra-wideband) - vrlo širok pojas radio-tehnike