

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

MARKO ŠTRLEK

**BEŽIČNE OPTIČKE MREŽE - RAZVOJ I TEHNIČKA
DOSTIGNUĆA U IMPLEMENTACIJI MOBILNIH
KOMUNIKACIJA PUTEV VIDLJIVOG SVIJETLA**

DIPLOMSKI RAD

RIJEKA 2013

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

**BEŽIČNE OPTIČKE MREŽE - RAZVOJ I TEHNIČKA
DOSTIGNUĆA U IMPLEMENTACIJI MOBILNIH
KOMUNIKACIJA PUTEM VIDLJIVOG SVIJETLA**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Optoelektronički Sustavi
Mentor: dr. sc. Irena Jurdana
Student: Marko Štrlek
Matični broj: 0112029257
Smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

Rijeka, Rujan 2013

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Komunikacijski sustavi četvrte generacije (4G).....	3
3. Komunikacija vidljivim svjetlom	10
3.1. FSO – Free Space Optics.....	10
3.2. OW – Optical Wireless	16
4. Odašiljačke tehnologije	20
4.1. Metode prijenosa signala putem vidljivog svjetla	21
4.2. Modulacija signala	30
4.2.1. OOK	32
4.2.2. ASK.....	33
4.2.3. BPSK.....	34
4.2.4. DPSK	34
4.2.5. QPSK	35
4.2.6. DQPSK.....	36
4.2.7. ODB	39
4.2.8. PPM	39
4.3. Multipleksiranje komunikacijskih kanala.....	40
4.4. Kodovi i protokoli.....	47
4.5. LED – Light Emitting Diode.....	54
4.6. Laser LED	59
4.7. Nekoherentni i parcijalno koherentni izvori zračenja.....	64
5. Prijemne Tehnologije	68
5.1. PIN fotodioda	75
5.2. Lavinska fotodioda – APD	81
5.3. Kvadrantna fotodioda	85
6. Optička veza i medij prijenosa.....	90

6.1.	Zemaljska FSO veza	90
6.2.	Satelitska FSO veza.....	100
6.3.	OW veza	105
7.	Primjena digitalnih optičkih komunikacija vidljivim svjetlom	110
7.1.	Primjena satelitskih FSO komunikacijskih sustava	111
7.1.1.	Među kontinentalna komunikacija	112
7.1.2.	DS komunikacija	113
7.2.	Primjena zemaljskih FSO komunikacijskih sustava.....	113
7.3.	Primjena OW komunikacijskih sustava	116
7.4.	Prednosti i nedostaci korištenja komunikacija putem vidljivog svjetla	117
8.	Zaključak.....	119
	Literatura	121
	Popis kratica	128
	Popis slika	134
	Popis tablica	136

1. Uvod

Komunikacijske tehnologije i njihov razvoj jedan su od najvažnijih čimbenika u razvoju globalne informacijske infrastrukture. Količina podataka i brzina prijenosa istih tih podataka neupitno utječe na moderan razvoj globalne zajednice. Povećanje propusnosti komunikacijskih kanala u proteklih dvadesetak godina raslo je proporcionalno razvoju procesnih tehnologija. Tehnologije komunikacija putem svjetlovoda i bežičnog prijenosa informacija omogućile su razvoj infrastrukture globalne povezivosti korisnika na svim kontinentima. Uz to, nove su tehnologije olakšale i unaprijedile osobnu komunikaciju između pojedinih korisnika putem mobilnih uređaja (mobitel, tablet PC).

Kako povećanje komunikacijskih mogućnosti pruža pristup bogatijem sadržaju, tako potražnja za više sadržaja i boljom kvalitetom prijenosa tjera na daljnji razvoj i poboljšanje komunikacijskih tehnologija. Da bi se udovoljili moderni zahtjevi korisnika uvedeni su skupovi komunikacijskih standarda i tehnologija te uvjeta komunikacijske propusnosti sakupljeni pod generacijskom oznakom. 3G predstavlja trenutno korištenu generaciju komunikacijskih tehnologija. Minimalna propusnost 3G komunikacijskih sustava je 200 kbit/s. 3G komunikacije koriste se u mobilnim telefonskim sustavima, bežičnim mrežama te internet prijenosu televizijskog programa i ostalih multimedijjskih sadržaja.

Kao što je to naglašeno, povećana potražnja multimedijjskog sadržaja na osobnim računalnim sustavima poput mobitela, tableta ili laptop računala traži povećanje propusnosti komunikacijskog kanala. Ta povećana potražnja potiče na razvoj nove generacije komunikacijskih tehnologija i standarda brzine prijenosa. 4G komunikacijske tehnologije igrati će veliku ulogu u pružanju još veće kvalitete umrežavanja i povezivanja korisnika.

Kako bi se postigle tražene brzine prijenosa zahtijevane u 4G komunikacijama, izvjesno je da će biti potrebno poboljšati samu komunikacijsku infrastrukturu. Da bi se postiglo poboljšanje na trenutno stanje komunikacijskih tehnologija, u razmatranju su nove tehnologije poput bežičnog prijenosa podataka putem vidljivog svijetla, što je i tema ovog rada, ali i hibridne tehnologije koje spajaju već postojeće sustave sa novim i učinkovitijim tehnologijama, pri čemu je cilj razvoj

sinergijske cjeline koja koristi najbolja svojstva raspoloživih tehnologija istovremeno uklanjajući njihove mane.

U ovom se radu obrađuju tehnologije bežičnih širokopolasnih komunikacija putem vidljivog svjetla. Kako se ova tehnologija dijeli na dva osnovna dijela, kroz rad se naglašavaju razlike pri korištenju OW (eng. Optical Wireless) i FSO (eng. Free space Optics). Također, rad opisuje sastavne dijelove i korištene tehnologije za ostvarivanje bežičnih optičkih komunikacija, tehničke karakteristike postojećih sustava, moguća poboljšanja, područja primjene pojedinih tehnologija te mogućnosti daljnjeg razvoja. Struktura rada prati konceptualni model komunikacijskog kanala.

U prvom djelu rada obrađuju se zahtjevi modernih komunikacijskih sustava velike propusnosti i trenutno raspoložive tehnologije kojima se 4G komunikacijski zahtjevi ostvaruju.

Drugi dio rada služi kao uvod u komunikacijske tehnologije koje kao medij prijenosa koriste elektromagnetsko zračenje unutar vidljivog spektra ili VLC (Visible Light Communication), te su u tom djelu obrađeni osnovni koncepti ove komunikacijske tehnologije.

Treći dio obrađuje odašiljačke tehnologije. Opisani su najadekvatniji pretvarači za prilagodbu signala prijenosnom mediju i opcije pri kodiranju signala, uz analizu najadekvatnijih rješenja za optimizaciju komunikacija putem vidljivog svjetla.

Kroz četvrti dio rada analizirana su svojstva tehnologija prijema signala. Kao i u djelu koji ga prethodi, iznesena su svojstva te prednosti i nedostaci primjena pojedinih tehnologija pri prijemu signala i njihov utjecaj na komunikacijski kanal, odnosno kvalitetu signala.

U petom djelu obrađen je komunikacijski medij i njegov utjecaj na signal. Iznesene su specifičnosti za komunikacijske kanale u satelitskim i zemaljskim komunikacijama putem vidljivog svjetla, te zasebno medij prijenosa kod lokalnih (OW) komunikacijskih veza pri VLC.

U zadnjem, šestom djelu opisane su moguće primjene komunikacija vidljivim svjetlom, uz naglasak na upotrebu istih u pomorskim komunikacijama.

2. Komunikacijski sustavi četvrte generacije (4G)

Procesorske mogućnosti računalnih informatičkih sustava rastu sukladno Moor-ovom zakonu koji tvrdi da se broj tranzistora u mikroprocesoru udvostručuje svakih 18 mjeseci. Posljedica tog povećanja je rast u informatičkoj i računalnoj tehnologiji koji je doveo do proširenja primjene računalnih sustava na mnoge segmente ljudskih života, kao npr. komunikacije, umjetnost ili čak socijalnu interakciju.

Povećanje procesorske sposobnosti uzrokovalo je i minimizaciju računalnih uređaja, što je dodatno integriralo računalnu tehnologiju u svakodnevni život. U razvijenim državama danas je život bez mobitela ili osobnog računala gotovo nezamisliv. Tehnologija koja možda ima i najveći utjecaj na moderno društvo je Internet. Umrežavanje računalnih sustava bila je logična zamisao od samog početka računalne revolucije, no *World Wide Web*, odnosno Internet kakvim ga korisnici danas znaju, proizašao je iz otvaranja pristupa informacijskoj komunikacijskoj mreži evropske organizacije za nuklearna istraživanja CERN (eng. European Organization for Nuclear Research), čijem je razvoju ponajveći doprinos dao britanski znanstvenik Tim Barners-Lee, zvan i ocem *World Wide Web*-a [1].

Današnji Internet osim za razmjenu znanstvenih podataka, služi i kao komunikacijska podloga putem koje se vrše poslovne transakcije, socijalne interakcije, pristupa se zabavnom sadržaju ili vrši jednostavna međusobna komunikacija.

Usljed već prethodno spomenutog rasta računalne podloge, došlo je i do eksplozivnog rasta sadržaja kojemu se može pristupiti putem Interneta. IP telefonija (glasovni pozivi putem Interneta), IPTV (televizijski prijenos putem Interneta), obrazovni portali i socijalne mreže samo su neki od tih sadržaja. Ovi sadržaji dolaze do izražaja zbog konstantnog rasta u propusnosti komunikacijskih kanala kojima se vrši umrežavanje. Sa porastom mogućnosti raste i potražnja za sadržajem, što u krajnosti dovodi do potrebe povećanja brzina prijenosa i propusnosti komunikacijskog kanala.

Što se tiče fiksnih (žičanih) komunikacijskih sustava, trenutno najizraženiju tehnologiju predstavlja komunikacija putem optičkih vlakana. Maksimalna propusnost podataka korištenjem optičkih vlakana trenutno još uvijek nije dostignuta zahvaljujući napretku u tehnološkom razvoju i raznim metodama multipleksiranja i modulacije signala kroz komunikacijski kanal. Godine 2011.

postignuta je brzina prijenosa od 109 Tbit/s (Terabita po sekundi) [2]. Dakle, može se zaključiti da trenutno komunikacije putem optičkih vlakana još uvijek zadovoljavaju potrebe.

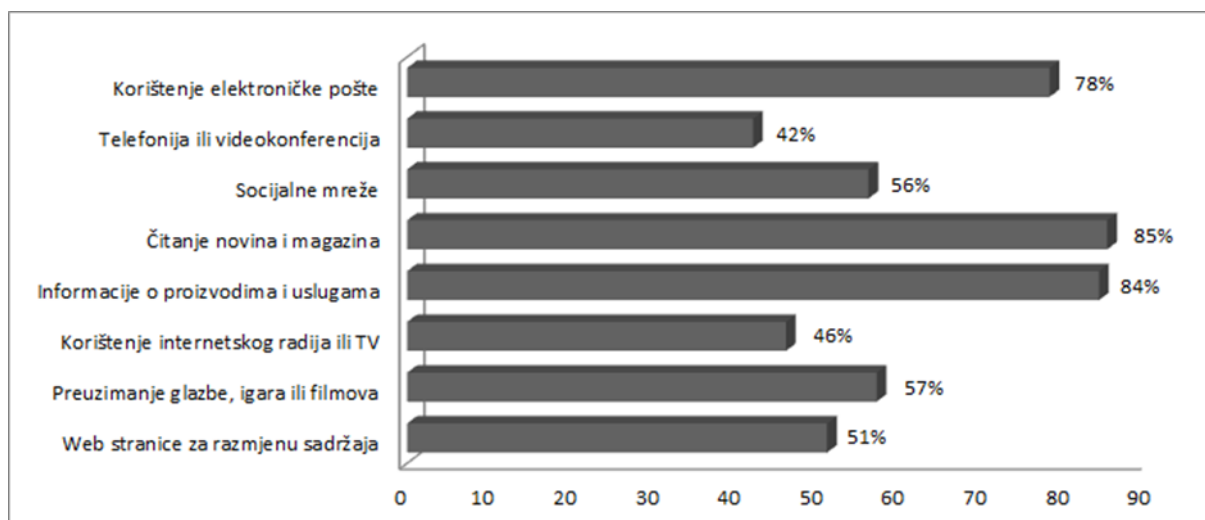
Kod mobilnih komunikacija problem je malo drugačiji. Bežične komunikacije zasnovane su na upotrebi elektromagnetskog spektra od 3 kHz do 300 GHz. Iako velik, taj je spektar konačan, dakle ograničen, a njegovo ograničenje sve više dolazi do izražaja.

S obzirom na prethodno navedenu minijaturizaciju multimedijalnih, komunikacijskih i računalnih uređaja, istina se u dovoljnoj mjeri smanjuju dimenzije da bi ih korisnici mogli imati pri ruci u svakom trenutku. Primjeri takvih uređaja su mobitel, tablet PC te laptop računalo. S obzirom na procesorske mogućnosti tih uređaja, njihovi korisnici žele imati ugrađenu mogućnost bežičnog povezivanja na Internet. Također, s obzirom na sadržaj kojemu žele moći pristupiti, potrebno je tim uređajima omogućiti širokopolasni bežični pristup Internetu.

Radio komunikacijski ekvivalent Moor-ovog zakona, tzv. Cooper-ov zakon, kaže da se najveći broj podatkovnih transakcija koje se mogu izvršiti unutar iskoristivog radio frekvencijskog spektra udvostručuje svakih 30 mjeseci. Unatoč tome, iskoristivi spektar postaje sve iskorišteniji, a broj korisnika i dalje raste.

Priopćenje Državnog Zavoda za Statistiku Republike Hrvatske o uporabi Informacijskih i komunikacijskih tehnologija za 2007. godinu izdano 19. Rujna 2008. godine opisuje relativno nisku opremljenost kućanstava sa informacijskim i komunikacijskim tehnologijama, uz čak 40% kućanstava povezano na Internet putem *dial-up* ili ISDN veze. U 2012. godini broj kućanstava sa vezom na Internet blago je porastao, no broj širokopolasnih veza je znatno porastao sa 54% (2007) na 72%, dok je *dial-up* veza pala na 1% [3][4]. Na Slici 1. prikazana je namjera uporabe Interneta u prvom tromjesečju 2012. godine, prema podacima Državnog Zavoda za Statistiku.

Na slici je vidljivo da 42% korisnika Interneta u Republici Hrvatskoj koristi telefoniju i videokonferenciju putem Interneta, 46% koristi Internet radio/TV, 57% preuzima multimedijalni sadržaj te 56% koristi socijalne mreže. Ove vrste sadržaja traže znatnu propusnost podataka, a s obzirom da velik broj korisnika pristupa istima putem mobilnih uređaja, potrebno je korisnicima osigurati širokopolasni pristup te što veću pokrivenost signalom.



Slika 1. Namjera uporabe Interneta u prvom tromjesečju 2012

Izvor: Uporaba informacijskih i komunikacijskih tehnologija (IKT) u kućanstvima i od pojedinaca u 2007., Prvi rezultati; Državni Zavod za Statistiku Republike Hrvatske; http://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2012/02-03-02_01_2012.htm

Razvijajući tehnologiju povezivanja komunikacijskih i računalnih informatičkih uređaja, određene tehnologije grupirane su u tzv. generacije komunikacijskih tehnologija. Od prvih analognih telekomunikacijskih standarda označenih kao prva generacija (1G) do, danas najviše u uporabi, treće generacije (3G), uglavnom je najveći napredak vršen u prilagodbi postojeće tehnologije iskorištavanja radio frekvencijskog spektra raznim metodama modulacije i digitalizacije signala, ograničavanje dometa te segmentacije spektra. 3G komunikacijski sustavi imaju minimalnu standardnu propusnost 200kbps, no uglavnom nadmašuju tu brojku.

Nasljednik treće generacije je 4G skup komunikacijskih tehnologija kojemu je određena standardna propusnost od 1Gbit/s za stacionarne komunikacijske sustave, odnosno 100Mbit/s za mobilne komunikacijske sustave. Trenutno ITU (International Telecommunication Union) priznaje pod 4G samo LTE i WiMAX tehnologije [5].

LTE (Long Term Evolution) je standard bežične komunikacije koji je proizašao iz GSM (Global System for Mobile Communication) i UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) standarda koji su definirali 3G komunikacijske tehnologije [6]. Zahtjevi LTE tehnologije prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Zahtijevane performanse LTE standarda

Izvor: TECHNICAL WHITE PAPER:Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview; Motorola Inc. 2007.

Mjera	Zahtjev
Vršna propusnost podataka	Dolazni smjer komunikacijske veze (downlink): 100Mbit/s Odlazni smjer komunikacijske veze (uplink): 50Mbit/s (za frekvencijski spektar 20 MHz)
Podrška mobilnosti	Do 500 km na sat (optimiziran za sustave manje mobilnosti od 0 do 15 km na sat)
Sustavno kašnjenje (vrijeme prijelaza između aktivnog i pasivnog stanja sustava)	<100 ms
Korisničko kašnjenje (vrijeme odziva na korisničku aktivnost)	<5 ms
Sustavni kapacitet	>200 korisnika po ćeliji (za spektar 5 MHz)
Pokrivenost	5 do 100 km (lagana degradacija izvan radijusa od 30 km)
Frekvencijski spektar	1.25, 2.5, 5, 10, 15 i 20 MHz

LTE sastavljen je od više funkcionalnih elemenata. Jedan od najosnovnijih funkcionalnih elemenata LTE tehnologije je ERAN (Evolved Radio Access Network) sastavljen je od jednog mrežnog eNB (eNodeB) čvora koji se izravno veže na korisničku opremu [7]. eNB mrežni čvor sadrži fizički, MAC (Medium Access Control), RLC (Radio Link Control) te PDCP (Packet Data Control Protocol) sloj.

SGW (Serving Gateway) funkcionalni element upravlja i prosljeđuje podatkovne pakete, istovremeno djelujući kao upravitelj eNB mrežnih čvorova, te kao medij kompatibilnosti sa 2G i 3G komunikacijskim sustavima.

MME (Mobility Management Entity) funkcionalni element je osnovni kontrolni čvor LTE pristupne mreže. MME je odgovoran za pretraživanje korisničke opreme (UE – User Equipment)

kad je ona u stanju čekanja (*Idle*). Preko njega se vrši proces aktivacije/deaktivacije i odabir SGW-a za određeni korisnički uređaj.

PDNGW (Packet Data Network Getaway) funkcionalni element pruža povezivost korisničke opreme sa paketnim podatkovnim mrežama time što predstavlja ulazno/izlaznu točku korisničkog uređaja. Također, ključna uloga PDNGW-a je omogućavanje prelaska između 3GPP (3G Partnership Project) tehnologija i tehnologija koje ne spadaju pod 3GPP poput WiMAX-a.

Tablica 2. E-UTRA pojasevi / Širina kanala

Izvor: 3GPP TS 36.101 V11.2.0 Release 11; Technical Specification; ETSI; 2012

E-UTRA Operacijski pojas	Uplink (UL) operacijski pojas	Downlink (DL) operacijski pojas	Metoda Dupleksiranja
	$F_{UL-donja} - F_{UL-gornja}$	$F_{DL-donja} - F_{DL-gornja}$	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
15	Rezervirano	Rezervirano	FDD
16	Rezervirano	Rezervirano	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	FDD

20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz – 3490 Mz	3510 MHz – 3590 MHz	FDD
23	2000 MHz – 2020 MHz	2180 MHz – 2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
27	807 MHz – 824 MHz	852 MHz – 869 MHz	FDD
28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
...	
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz – 3600 MHz	3400 MHz – 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz – 3800 MHz	3600 MHz – 3800 MHz	TDD
44	703 MHz – 803 MHz	703 MHz – 803 MHz	TDD

U tablici 2., prikazani su frekvencijski pojasevi E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) specifikacije bežičnog sučelja 3GPP LTE komunikacijskog standarda. Iz tablice je vidljivo da za razliku od TDD (Time Domain Duplexing) dupleksiranja gdje se koriste isti frekvencijski pojasevi za dolazni i za odlazni smjer komunikacije, kod FDD (Frequency Domain Duplexing) dupleksiranja koristi, u osnovi dvostruki frekvencijski spektar kako bi se ostvarila istovremena dvosmjerna komunikacija. To dodaje brzini prijenosa, ali povećava iskorištenje frekvencijskog spektra.

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) je bežični komunikacijski standard koji, uz LTE zadovoljava 4G potražnju od 1 Gbit/s komunikacijske veze za fiksne korisnike. Osnovan je na IEEE 802.16 standardu, a trenutna standardna verzija je IEEE 802.16e u kojoj je standard definiran nad frekvencijskim pojasom od 10 do 66 GHz [8]. Standard podržava i TDD i FDD metode duplesiranja. WiMAX koristi OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) pri kodiranju podataka za više frekvencija vala nosioca te predstavlja kvalitetno rješenje za ostvarivanje bežične veze kod problema posljednjeg kilometra, odnosno kao alternativa fizičkoj xDSL (Digital Subscriber Line) vezi.

Studija provedena u 2008. godini dokazala je postojanje smetnji u C pojasu (4 – 8 GHz) satelitskih komunikacija uzrokovana preklapanjem radio frekvencijskog spektra WiMAX standarda [9].

Kao što je vidljivo iz navedenog, trenutne službene 4G komunikacijske tehnologije dodatno opterećuju raspoloživi frekvencijski spektar. Uz to, te tehnologije i dalje zadržavaju nedostatke radio komunikacija na kojima su temeljene (poput uzrokovanja smetnji, što je i razlog zabrane korištenja nekih komunikacijskih uređaja u blizini osjetljive mjerne, navigacijske ili medicinske opreme i instrumentacije).

Najizraženija alternativa korištenju radio frekvencijskog spektra je uporaba optičkih komunikacija. Optičke veze pružaju velike brzine prijenosa i propusnost, ali se trenutno najčešće vrše isključivo putem optičkih vlakana. Iako optička vlakna imaju velik udio u kvaliteti i brzini prijenosa podataka, kako bi se udovoljili zahtjevi zakazani 4G komunikacijskim standardima, potrebno je omogućiti bežični širokopojasni prijenos podataka. Tu do izražaja dolaze bežične optičke komunikacije korištenjem vidljivog svjetla, što je i tema ovog rada. U nastavku se opisuje osnovno načelo rada, tehnološka dostignuća i mogućnosti bežičnih komunikacija putem vidljivog svjetla.

3. Komunikacija vidljivim svjetlom

Komunikacija vidljivim svjetlom nije novi koncept. U osnovi, to je jedno od najosnovnijih i najstarijih načina ljudske komunikacije. Vid je, sam po sebi kod ljudi najizraženiji osjet, pa se tako i nametnuo kao jedan od najosnovnijih medija međuljudske komunikacije.

Prije uvođenja radio komunikacija u pomorstvo i pomorski promet, plovila su međusobno koristila svjetiljke sa mehanički rukovanim zasunom. Rukovatelj bi otvarajući i zatvarajući zasun Morseovim kodom slao poruke drugim plovilima ili na kopno, odnosno obrnuto, s kopna prema plovilu. Iako je ova tehnologija zastarjela i ne može podržavati moderne standarde pomorskih komunikacija (ili komunikacija općenito) sam koncept prijenosa ostaje isti. Kod bežičnih optičkih komunikacijskih sustava može se povući paralela sa tehnologijom žičanog prijenosa optičkog signala korištenjem optičkih vlakana. Osnovna je razlika dakako činjenica da se kao medij prijenosa optičkog signala ne koristi optičko vlakno izrađeno od silicija, već atmosfera (uz sve prednosti i nedostatke koje to povlači). U nastavku se opisuju osnovne tehnologije bežičnog prijenosa podataka korištenjem vidljivog svjetla.

3.1. FSO – Free Space Optics

FSO (Free Space Optics) je skup tehnologija bežičnih komunikacija velikog kapaciteta koji koriste usku kolimiranu Gausovsku zraku pri prijenosu podataka. Jednostavnije rečeno, FSO koristi uski laserski svjetlosni izvor. Zraka se prostire kroz atmosferu, pa su atmosferski uvjeti ključni čimbenici u kvaliteti prijenosa, odnosu signal/šum (SNR – Signal to Noise Ratio) i BER-u (Bit Error Ratio). Neke od prednosti koje FSO uvodi su:

- Komunikacijski čvorovi nisu fizički povezani (Bežični komunikacijski sustav)
- Jeftiniji od sustava sa optičkim vlaknima
- FSO sustav je otporan na RF smetnje
- Sigurnost od preslušavanja signala
- Velika brzina prijenosa podataka
- Jeftinije od RF sustava (Ne traži zakup RF spektra)

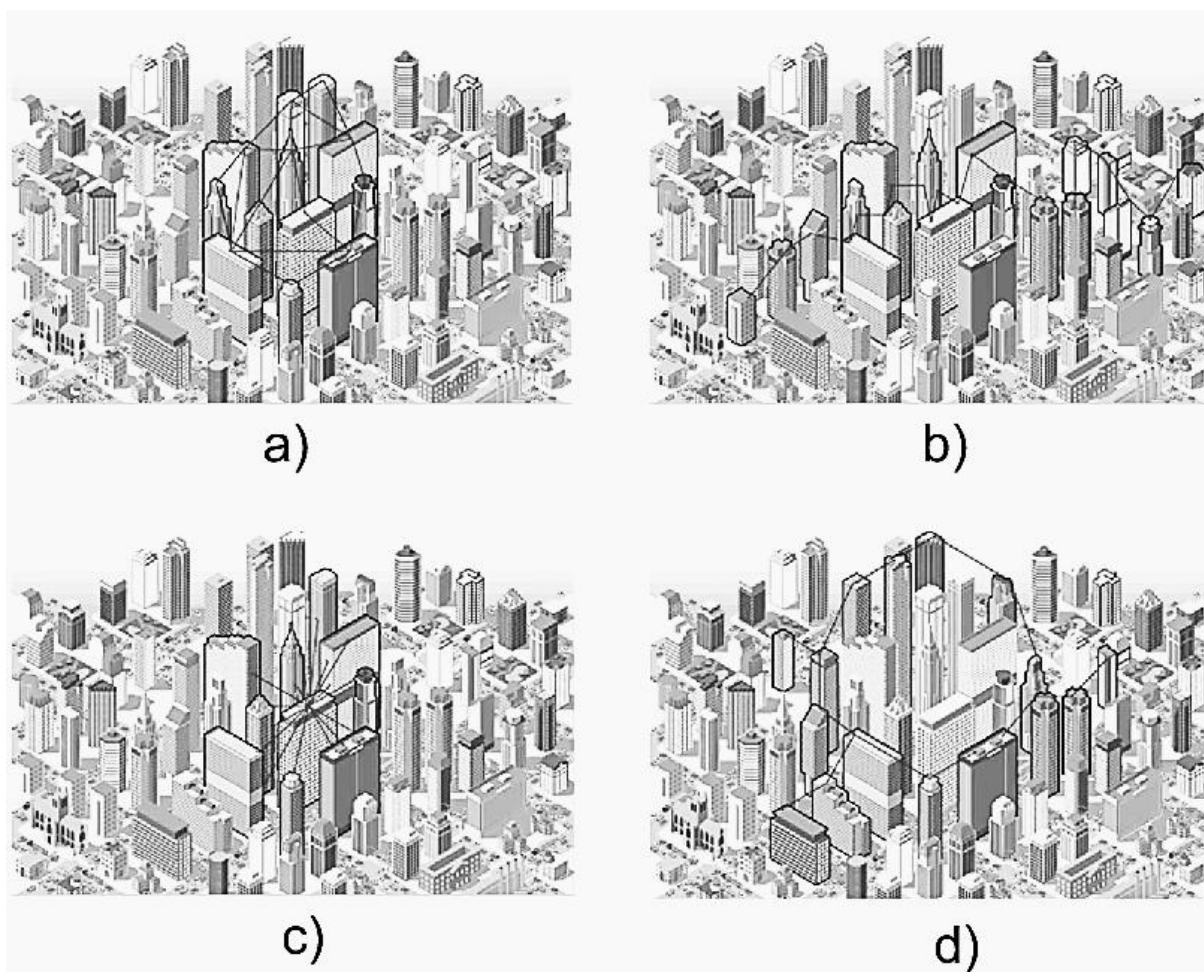
Uska kolimirana koherentna Gausovska zraka laserskog izvora podložna je atmosferskoj atenuaciji uzrokovanoj Rayleigh-ovim i Mie-ovim raspršivanjem.

Rayleigh-ovo raspršenje uzrokovano je molekulama prisutnim u atmosferi, i proporcionalno je valnoj duljini. Ova vrsta raspršenja prisutna je i u optičkim vlaknima, no njegov utjecaj je umanjen zbog velike čistoće optičkih vlakana.

Mie-ovo raspršenje uzrokovano je većim česticama u zraku i uvelike ovisi o njihovim dimenzijama. Ova vrsta raspršenja ima znatno destruktivniji učinak na FSO optičku vezu, do te mjere da se uslijed njega veza može i u potpunosti prekinuti. S obzirom da je Rayleigh-ovo raspršenje vezano uz sam sastav atmosfere, ono je barem u zemaljskim komunikacijskim sustavima neizbježno, no Mie-ovo raspršenje dolazi do izražaja pri nepovoljnim vremenskim atmosferskim uvjetima kao što su to magla, kiša ili snijeg. S obzirom da su atmosferski fenomeni stohastički procesi, dakle po prirodi nepredvidivi, FSO komunikacijski sustav trebao bi biti uparen rezervnim komunikacijskim sustavom poput RF veze. Najveći utjecaj na FSO komunikacijsku vezu putem Mie-ovog raspršenja ima magla, što je i prikazano nastavku rada.

FSO predstavlja usmjerenu vezu, no ovisno od vrste čvora, moguće je ostvariti razne mrežne topologije. Osnovne mrežne topologije FSO komunikacijskih mreža prikazane su na slici 2.

Domet FSO veze relativno je ograničen, ali relativno mala cijena i jednostavnost instalacije čine ovu tehnologiju kvalitetnim rješenjem problema posljednjeg kilometra ili povezivanja gusto naseljenih urbanih sredina u kojima bi postavljanje optičkog svjetlovoda bilo razmjerno skupo ili izazvalo funkcionalne probleme (prometne gužve i sl.).

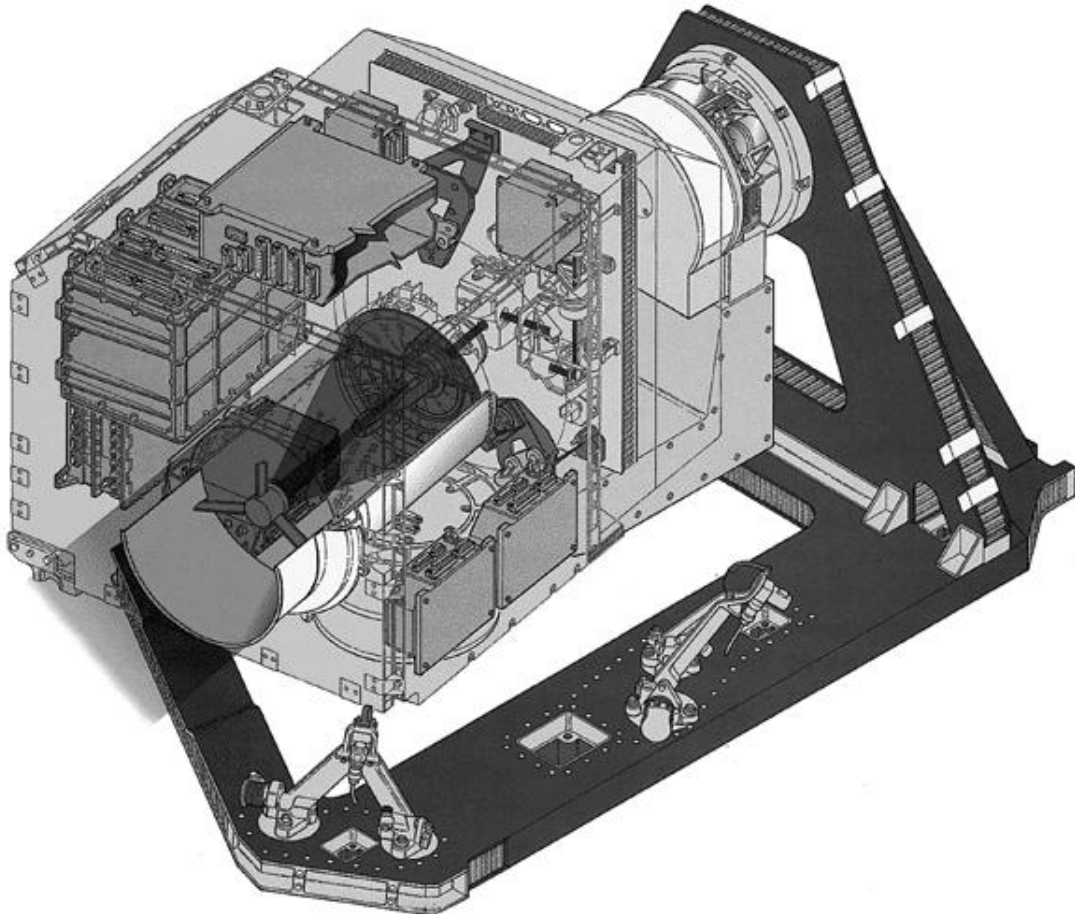


Slika 2. Topologije FSO komunikacijskih mreža: a) mrežasta b) od točke do točke c) zvjezdasta d) prstenasta

Izvor: FSO Topologies; <http://www.laseroptronics.com/index.cfm/id/57-68.htm>; 21. 02. 2013

Uz zemaljsku FSO vezu razmatra se i satelitska komunikacijska veza osnovana na istom načelu. Takva bi veza služila za među satelitsku komunikaciju [10], ali i za komunikaciju zemaljske stanice sa satelitom u zemljinoj orbiti [11]. S obzirom na izostanak atmosfere, prigušenje koje ona vrši na komunikacijski signal svedeno je na minimum pa se mogu postići znatno veće udaljenosti. Problem tada postaje mobilnost komunikacijskog sustava. Ako su sateliti u geostacionarnoj orbiti, međusobna komunikacija bi u pravilu trebala biti olakšana pošto su takvi sateliti međusobno stacionarni ili kvazi stacionarni. U slučaju da sateliti nisu stacionarni u odnosu na odašiljač potrebno je implementirati sustave kompenzacije mobilnosti odašiljača i prijemnika [12]. Zamisao o među satelitskoj komunikaciji putem optičke veze nije nipošto nova. Već osamdesetih godina prošloga stoljeća radilo se na projektiranju takvih sustava, no s obzirom na ograničena dostignuća u

tom području projektirani sustavi nisu bili kompetitivni u odnosu na RF komunikacijske sustave. Primjer jednog takvog sustava je SILEX (Semi-conductor Inter-satellite Link EXperiment) laserski terminal razvijan od strane ESA-e (European Space Agency). Slika 3 prikazuje presjek SILEX terminala.



Slika 3. SILEX laserski terminal za među satelitsku komunikaciju

Izvor: Optical Communications in Space - Twenty Years of ESA Effort;
<http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet91/b91lutz.htm>; 23. 2. 2013

SILEX projekt trebao je biti u stanju omogućiti vezu od 50 Mbit/s za LEO (Low Earth Orbit) i GEO (Geostationary Orbit) satelite koristeći Galij-Aluminij-Arsenid (GaAlAs) poluvodičke laser-diode [13].

Tvrtka Laser Light TM započela je krajem 2012. god. lansiranje konstelacije satelita koji bi trebali predstavljati prvu komercijalno raspoloživu satelitsku komunikacijsku mrežu koja u

potpunosti koristi isključivo FSO sustav za dvosmjernu komunikaciju između satelita i sa baznom stanicom na zemlji, neovisno o atmosferskim uvjetima [14]. Planirana konstelacija sadržat će 12 satelita postavljena u orbitu na 10500 km (MEO – Medium Earth Orbit) od kojih će 8 biti primarni a 4 rezervni. Planirana propusnost među satelitske veze je 4.8 Tbps dok je propusnost veze sa zemaljskom stanicom ograničena na 200 Gbit/s.

Satelitski FSO komunikacijski sustavi razvijaju se na način da omogućе što veću propusnost i mobilnost na velike udaljenosti, zemaljski FSO sustavi međutim razvijaju se na način da se poveća otpornost na smetnje uzrokovane atmosferskim uvjetima te propusnost, ali se pritom zanemaruje mobilnost (barem u komercijalnim sustavima). Mobilnost zemaljskih FSO sustava povlači korištenje kompliciranih i osjetljivih mehaničkih uređaja za pozicioniranje odašiljača i prijemnika što povećava kompleksnost cjelokupnog sustava.

Unatoč tome, mobilnost na manjim razinama je poželjna, pošto su FSO čvorovi podložni mehaničkim vibracijama uzrokovanim vjetrom ili mikro seizmičkim aktivnostima. Ona se međutim može implementirati jednostavnijim mehanizmima korekcije laserskog odašiljača i korištenjem povratne veze. No općenito govoreći, trenutno svi komercijalno raspoloživi FSO komunikacijski sustavi koriste se u fiksnim bežičnim vezama. Kako FSO konceptualno nije komplicirani komunikacijski sustav, a komponente za izradu FSO komunikacijskog sustava javno su dostupne, postoji i *Open Hardware* projekt optičkog primopredajnika RONJA (Reasonable Optical Near Joint Access) na internetu [15], uz detaljan opis sustava, popis komponenti i sheme elektroničkih sastavnih sklopova. RONJA projekt nudi dva modela FSO primopredajnika; Tetrapolis i Inferno sustav. Tablica 3 prikazuje tehničke specifikacije ova dva sustava.

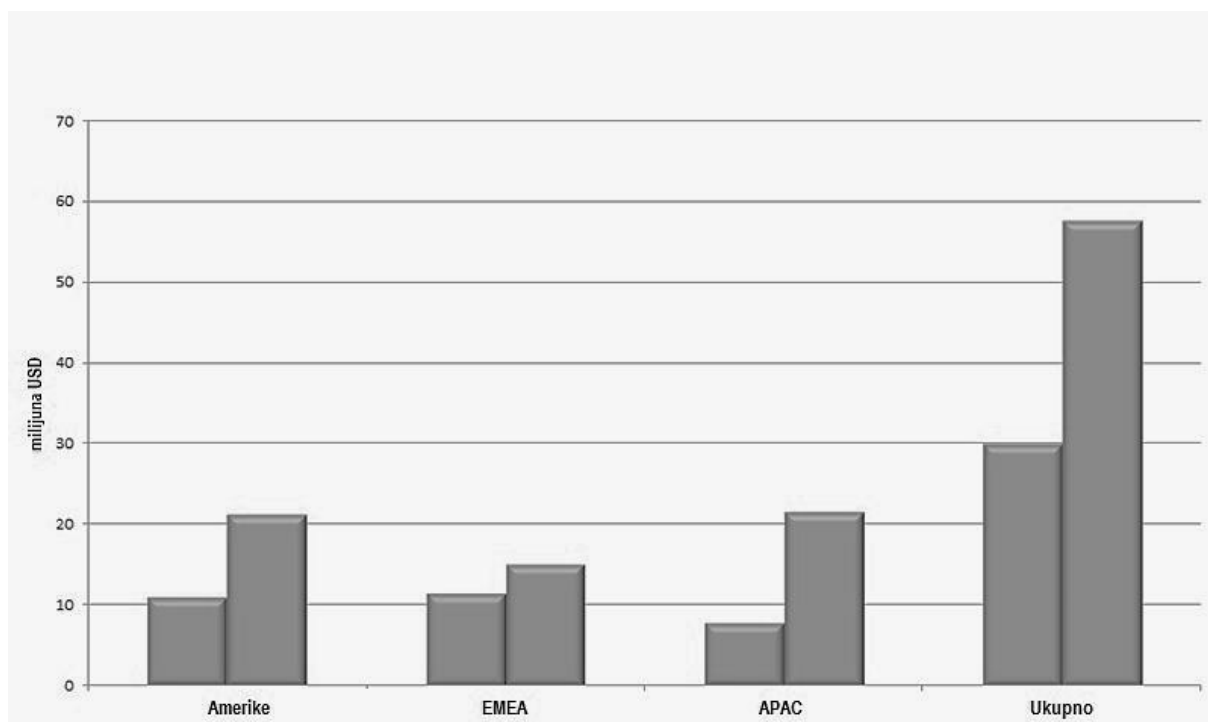
Komercijalno raspoloživi sustavi imaju očekivano znatno bolje performanse. Trenutni sustavi podržavaju brzine prijenosa od 1.25 Gbit/s, a razvijaju se i sustavi koji bi u teoriji trebali biti u mogućnosti postići brzine i do 160 Gbit/s [16], što u potpunosti zadovoljava potražnje 4G standarda za fiksne mreže. Komercijalni FSO komunikacijski sustavi koriste laserske izvore koji zrače valne duljine od 780, 850 i 1550 nm. Ovisno o korištenoj valnoj duljini mijenja se snaga signala te njegov domet. Sustavi koji koriste valnu duljinu od 1550 nm mogu zračiti signal znatno veće snage (čime se povećava i domet) pošto valne duljine ispod 1400 nm rožnica ljudskog oka usmjerava izravno na mrežnicu, što može dovesti do oštećenja oka ili čak gubitka vida, dok su valne duljine iznad te granice bezopasne.

Tablica 3. RONJA FSO Open Hardware specifikacija za modele Tetrapolis i Inferno

Izvor: RONJA - Reasonable Optical Near Joint Access; <http://ronja.twibright.com/>; 23. 2. 2012

	RONJA Tetrapolis	RONJA Inferno
Propusnost	10 Mbit/s	10 Mbit/s
Modalitet prijenosa	Full Duplex	Full Duplex
Domet	1.4 km	1.25 km
Sučelje	RJ45 konektor, IEEE 802.3 UTP sučelje	RJ45 konektor, IEEE 802.3 UTP sučelje
Srednja potrošnja snage	225 mA	275 mA
Valna duljina	625 nm	857 nm
Optička snaga	17.2 mW	30 mW
Divergencija zrake	1.9 mrad	3 mrad
Težina	15.5 kg	15.5 kg
Atmosferska vidljivost	4 km	4 km
Modulacija signala	BPSK (Binary phase-shift keying)	BPSK (Binary phase-shift keying)

Prema predviđanjima [17], udio FSO komunikacijskih veza trebao bi do 2018. godine narasti za gotovo duplo. U 2012. godini globalno tržište komercijalnih FSO sustava naraslo je 13% u odnosu na 2011. godinu. Analiza tržišta APAC (Asia-Pacific), EMEA (Europe, Middle East and Africa) te Latinske i Sjeverne Amerike pokazala su da bi kroz narednih pet godina (predviđanje za 2018. god) komercijalna upotreba FSO komunikacijskih sustava najviše narasti u APAC regiji (predviđeni rast od 19%), zatim u Americama (predviđeni rast 12%) a najmanji rast zapravo se očekuje u EMEA regiji sa predviđenim rastom od 4.6%. APAC regija ima najveći potencijal za rast upotrebe komercijalnih FSO sustava pošto je to tržište koje se postepeno širi. Slika 4 prikazuje grafikon predviđenog rasta (desni stupac) za 2018. godinu u odnosu na zabilježeni rast (lijevi stupac) u 2012. godini.



Slika 4. Globalno tržište komercijalnim FSO komunikacijskim sustavima: 2012 (lijevi stupac), 2018 (desni stupac)

Izvor: Optics.org: Free-space optics market reach \$58M by 2018; <http://optics.org/news/4/1/3>; 23. 2. 2013

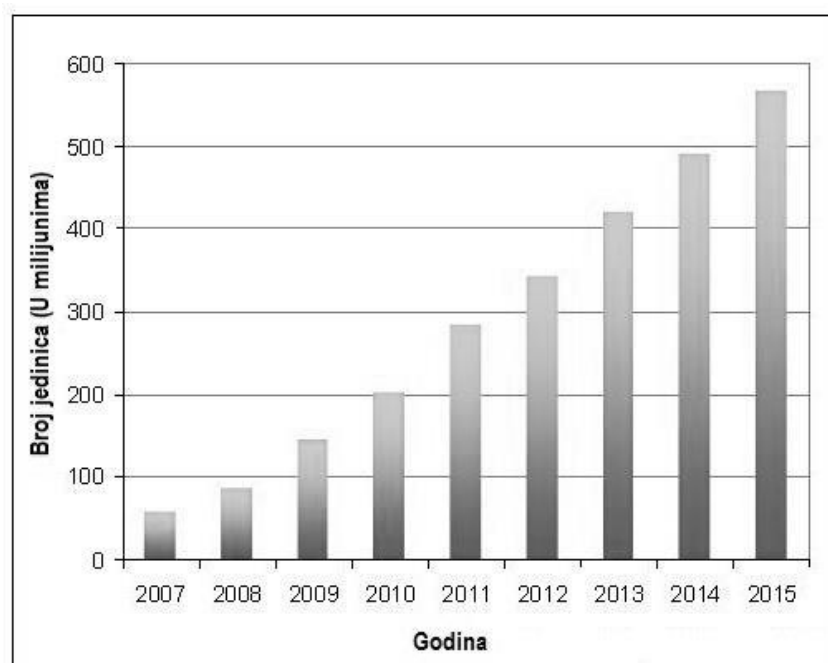
3.2. OW – Optical Wireless

OW (Optical Wireless) tehnologija koristi iste osnovne koncepte prijenosa podataka kao i FSO. Najveća razlika je u činjenici da OW ne koristi usku kolimiranu Gausovsku zraku, nego Lambertski izvor. Kao posljedica, OW ne podržava domete koji su mogući kod FSO komunikacija, ali zato dozvoljava veću razinu mobilnosti uz smanjenu kompleksnost samog primopredajnog sustava.

Lambertov izvor zračenja je svaki izvor elektromagnetskog zračenja koji podliježe Lambertovom zakonu kosinusa, odnosno to je idealni difuzni izvor kod kojeg je intenzitet promatranog zračenja izravno proporcionalan kosinusu kuta između promatrača i normale na izvor zračenja. OW komunikacijska tehnologija osmišljena je na način da uz širok prostorni kut zračenja pruža veću pokrivenost. FSO traži čistu zračnu optičku liniju kako bi se signal mogao prenijeti sa odašiljača do prijemnika, no OW teoretski omogućava i prijem reflektiranog signala [18]. Iz ovoga se može zaključiti da je idealna primarna namjena OW komunikacijske tehnologije korištenje u lokalnim pristupnim bežičnim mrežama, uglavnom u manjim zatvorenim prostorijama (u privatnim

kućanstvima, čekaonicama putničkih terminala, ugostiteljskim objektima, itd.). S obzirom da je kod OW pokrivenost veća, znatno je lakše implementirati OW sustav u mobilne uređaje nego li FSO.

FSO sustav ugrađen u korisničke uređaje velike mobilnosti poput mobilnih telefona ili prenosivih računala zahtijevao bi komplicirane mehaničke sustave pozicioniranja odašiljača i prijemnika koji uz to moraju biti minijaturizirani do razine da stanu u mobilni korisnički uređaj. Debljina današnjih mobilnih telefona ili tablet računala je oko 1 cm, pa je stoga jasno da bi tehnologija mehaničkog pozicioniranja bila nerazmjerno skupa u odnosu na ostale tehnologije koje se standardno ugrađuju u mobilne uređaje. OW s druge strane, pokrivajući veću površinu može omogućiti prijem bilo gdje unutar područja pokrivenosti, a s obzirom na prethodno spomenutu mogućnost primanja reflektiranog signala, nema ni potrebe za čistim optičkim pravcem između odašiljača i prijemnika. Brzine prijenosa do 800 Mbit/s koje je moguće postići korištenjem OW u pravilu nadmašuju potrebe 4G standarda za mobilne uređaje [19].



Slika 5. Predviđanje rasta potražnje LED rasvjete

Izvor: Maximizing the Energy-Efficiency Benefits of LED Lighting; <http://www.eebeat.com/?p=986>; 24.2. 2013

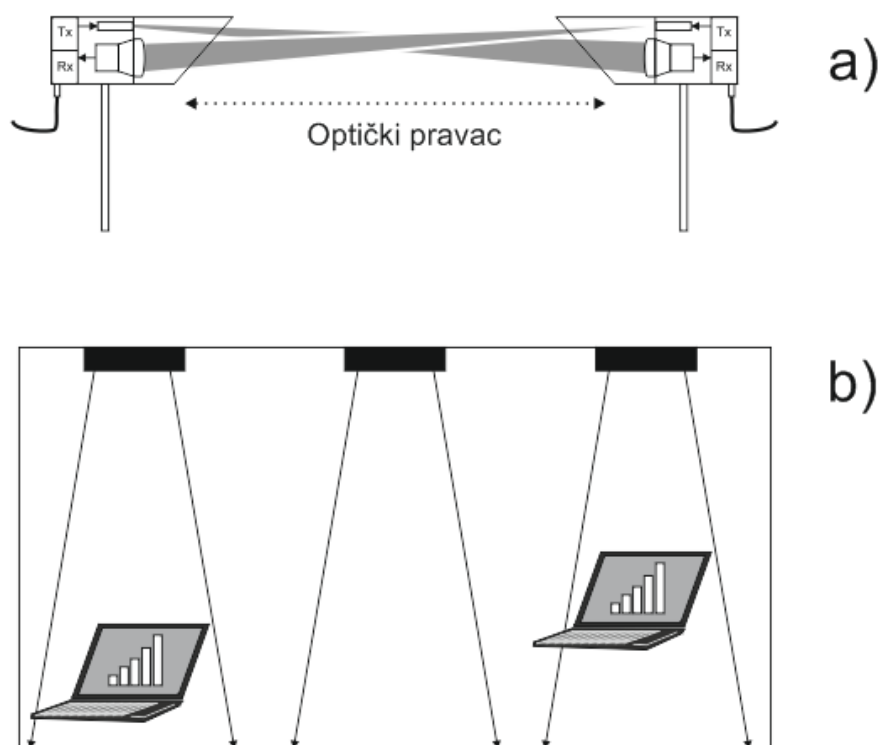
OW koristi difuzni Lambertov izvor svjetlosti. Dobar kandidat za OW odašiljač je LED (Light Emitting Diode) poluvodička svjetleća dioda. LED izvor lako je modulirati a sama LED komponenta jeftina je i lako nabavljiva.

Unazad nekoliko godina sve češće se spominju zamjene za rasvjetnu tehnologiju baziranu na žaruljama sa žarnom niti ili štednim halogenim žaruljama. Nove štedne žarulje koriste LED tehnologiju, te tako izrazito smanjuju potrošnju električne energije. LED tehnologija veoma je pouzdana pa stoga ni ne čudi da se sve češće upotrebljava. Na slici 5 prikazan je predviđeni rast upotrebe LED štednih žarulja.

Kako se LED tehnologija sve više počinje koristiti za rasvjetu, tako dolazi do izražaja još jedna mogućnost unaprjeđenja OW komunikacijske tehnologije. Spajanjem rasvjete i OW odašiljača dobiva se očita prednost pri uvođenju ove komunikacijske tehnologije, pogotovo s obzirom na nižu cijenu implementacije takvog dvojnog rasvjetno/komunikacijskog sustava. Modulirani svjetlosni izvor korišten kao komunikacijski signal mora koristiti modulaciju frekvencije veće od 20 Hz. Ljudsko oko ne bilježi promjene koje se dešavaju češće od 20 puta u sekundi, no to kod OW i ne predstavlja problem pošto su brzine prijenosa znatno veće.

OW i FSO iako konceptualno slične, predstavljaju zapravo vrlo različite tehnologije. Kao što je to prethodno bilo napomenuto, FSO se koristi u urbanim mrežama od točke do točke (point-to-point, point-to-multipoint) ili u među satelitskoj komunikaciji, dok se OW koristi isključivo u lokalnim pristupnim mrežama unutar prostorija. Svaki čvor FSO mreže je primopredajni uređaj, dakle svaki je uređaj u osnovi jednak te se dolazni i odlazni smjer komunikacije odvijaju po istom kanalu. Potrebno je samo instalirati FSO primopredajnike na planirane čvorove i u vrlo kratkom roku FSO mreža je spremna za upotrebu. OW s druge strane ne koristi iste komunikacijske kanale za dolazni i odlazni smjer komunikacije. Glavni razlog za to je upravo činjenica da OW koristi rasvjetu prostorije za odašiljanje signala. Implementacija jake rasvjete na sam komunikacijski uređaj kako bi se ostvario odlazni smjer komunikacije svakako bi smetao korisniku uređaja, ali i ostalim korisnicima koji se nalaze u istoj prostoriji. Odlazni smjer komunikacije stoga nastoji se implementirati korištenjem drugačijih metoda i tehnologija. Za dolazni komunikacijski smjer (Downlink) potrebno je koristiti bijelu LED rasvjetu moduliranu prikladnim metodama modulacije i digitalnog kodiranja podataka. Za odlazni komunikacijski smjer (Uplink) postoji više raspoloživih tehnologija. Korištenje infracrvenih poluvodičkih LED dioda nije novost na tom području, te se uz tu tehnologiju mogu postići zadovoljavajuće brzine prijenosa i propusnosti. Druga metoda je korištenje RF veze, no svrha OW je upravo pružanje alternative RF vezi, pa se stoga RF tehnologija uglavnom izbjegava.

Jedna izrazito zanimljiva opcija za ostvarivanje odlazne veze je modulacija pozadinske rasvjete LCD (Liquid Crystall Display) zaslona. Mobilni uređaji koji imaju (i traže) mogućnost bežične povezivosti u pravilu imaju LCD zaslon koji služi korisniku pri snalaženju i korištenju multimedijalnih mogućnosti koje ti uređaju pružaju. LCD tehnologija koristi pozadinsku rasvjetu koja osvjetljava sam zaslon s obzirom da ta tehnologija (za razliku od plazme ili zaslona sa katodnom cijevi) ne zrači vlastitu svjetlost. Stariji LCD zasloni koristili su pozadinsku rasvjetu temeljenu na ELP (Electroluminescent Panel), CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp), HCFL (Hot Cathode Fluorescent Lamp) te EEFL (External Electrode Fluorescent Lamp) tehnologijama. Noviji LCD zasloni koriste LED tehnologiju zbog male potrošnje te zato što ih je lako ugraditi u korisničke uređaje velike mobilnosti koji postaju sve manjih dimenzija sa svakim novim modelom. Modulacija LED poluvodičke rasvjete, kao što je to već napomenuto, ne predstavlja veliki problem, pa se ova metoda ostvarivanja odlazne komunikacijske veze nameće kao vrlo kvalitetna alternativa. Slika 6 prikazuje razlike u konceptima FSO i OW tehnologije bežične komunikacije vidljivim svjetlom.



Slika 6. Usporedba a) FSO i b) OW tehnologije prijenosa podataka putem vidljivog svjetla

4. Odašiljačke tehnologije

Komunikacije vidljivim svjetlom ne predstavljaju novi koncept, no razvojem modernih poluvodičkih i drugih tehnologija njihova je implementacija postala znatno lakša, a sama propusnost podataka i brzina prijenosa povećali su se do razine na kojoj su zapravo iskoristivi za moderne komunikacijske potrebe.

Osnovni napredak koji omogućava digitalnu komunikaciju korištenjem elektromagnetskog zračenja unutar vidljivog spektra je razvoj poluvodičkih svjetlosnih izvora te poluvodičkih komponenti osjetljivih na vidljivo svjetlo (valne duljine od 400 do 700 nm).

Poluvodičke komponente koje zrače vidljivu svjetlost zovu se LED (Light Emitting Diode). Njihova velika prednost je vrlo brz odaziv pri uključivanju i isključivanju zbog poluvodičke tehnologije koja se u njima primjenjuje. LED izvori mogu biti difuzni (Lambertski) ili kolimirani (Gausov). Difuzni izvori primjenjuju se kod OW, a kolimirani kod FSO tehnologije prijenosa podataka, kao što je to već prethodno bilo naglašeno.

S obzirom na dvojni upotrebu LED tehnologije za rasvjetu i kao OW odašiljač, u pravilu se koriste isključivo bijeli LED izvori. Postoji više mogućih tehnologija za dobivanje bijelih LED poluvodičkih izvora, te će oni biti obrađeni u nastavku.

Najčešće korišteni kolimirani izvor je poluvodički VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) LED izvor preuzet iz tehnologije prijenosa podataka putem optičkih vlakana gdje se također upotrebljava kao modulirani svjetlosni izvor. Osim poluvodičkog lasera, razmatra se i mogućnost korištenja nekoherentne ili parcijalno koherentne kolimirane zrake dobivene uz pomoć običnog LED izvora i optičkog sustava leća. Zbog razmjerno velike brzine odziva ovih izvora, modulacija signala je relativno jednostavna i vrši se jednostavnim spajanjem upravljačke elektronike izravno na LED ili VCSEL.

4.1. Metode prijenosa signala putem vidljivog svjetla

Gausov izvor je izvor elektromagnetskog zračenja koji odašilje Gausovu zraku. Gausova zraka je kolimirana, radijalno simetrična zraka čije je električno polje zadano jednačbom (1):

$$E_S = E_0 \cdot e^{\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)} \quad (1)$$

Drugim riječima, Gausova zraka je zraka čije se električno polje smanjuje udaljavanjem od sredine zrake po Gausovoj (normalnoj) razdiobi [20]. Parametar r predstavlja udaljenost od središta zrake, a parametar ω_0 predstavlja takozvani polumjer Gausove zrake. Gausov polumjer je udaljenost od središnje linije zrake na kojem intenzitet zračenja pada na $\frac{1}{e^2}$, odnosno na 0.135 vršne (središnje, osne) vrijednosti.

Intenzitet zračenja Gausove zrake također je opisan Gausovom razdiobom, i izražen je formulom (2):

$$I_S = \eta \cdot E_S \cdot E_S^* = \eta \cdot E_0 \cdot E_0^* \cdot e^{\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)} \quad (2)$$

Gausova razdioba matematički gledano nije omeđena pa vrijednosti promjera mogu biti proizvoljno određene. Ipak za praktičnu primjenu uzimaju se određene vrijednosti polumjera na značajnim točkama, kako bi se okarakterizirala zraka. Te točke su polumjer polovice (50%) maksimalnog intenziteta, koji je definiran na $0.59\omega_0$ te dvostruki Gausov polumjer ($2\omega_0$) odnosno točka u kojoj intenzitet pada na 0.0003 iznosa vršne vrijednosti (u toj se točki intenzitet smatra dovoljno malim da bude zanemariv za praktične svrhe).

Snaga zrake unutar polumjera r dobiva se integriranjem razdiobe intenziteta u granicama od 0 do r . Izraz za snagu Gausove zrake u ovisnosti o polumjeru prikazan je u jednačbi (3):

$$P(r) = P(\infty) \left[1 - e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}} \right] \quad (3)$$

I snaga dakle ima Gausovu razdiobu, ali sa invertiranom ordinatom. $P(\infty)$ predstavlja totalnu snagu zrake. Gotovo sva snaga sadržana je unutar polumjera $2\omega_0$. Polovica snage sadržana je unutar $0.59\omega_0$, a tek otprilike 10% sadržano je unutar polumjera $0.23\omega_0$. Totalna snaga zrake može se proračunati korištenjem izraza (4):

$$P(\infty) = \left(\frac{\pi\omega_0^2}{2} \right) I(0) \quad (4)$$

Opisivanje prostiranja Gausove zrake može se gotovo u potpunosti vršiti upotrebom geometrijske optike. Zbog karakteristika zrake, promjene u intenzitetu zračenja sa rastom udaljenosti od izvora nije potrebno opisivati integralom. Transverzalna razdioba intenziteta ostaje Gausova u bilo kojoj točki sustava, a mijenja se jedino polumjer razdiobe i zakrivljenost valne fronte.

Polumjer zrake povećanjem udaljenosti od izvora raste polako, pa sve brže dokle ne postane proporcionalan udaljenosti od izvora. Polumjer Gausove zrake izražen je u (5):

$$\omega^2(x) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda x}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (5)$$

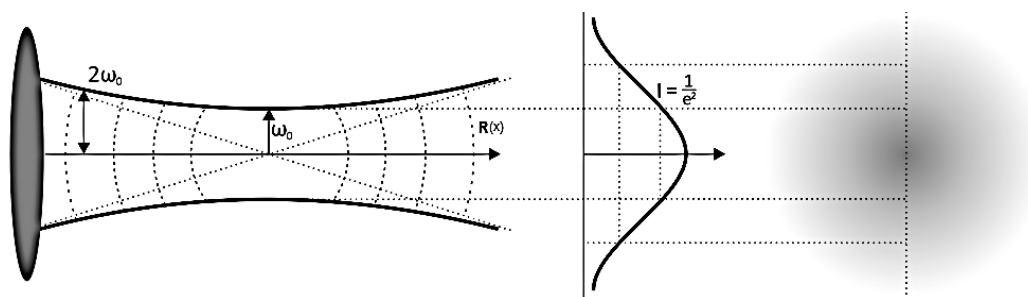
Polumjer valne fronte je u izvorišnoj točki jednak beskonačnosti, no odmah na udaljenosti većoj od nule postaje konačan, te konstantno opada povećanjem udaljenosti od samog izvora do točke minimuma, nakon koje ponovo počinje rasti dokle ne postane i on proporcionalan sa udaljenosti od izvora. Radijus valne fronte izračunava se pomoću izraza (6):

$$R(x) = x \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda x} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Pritom je ω_0 radijus zrake na izvoru, a λ označava valnu duljinu zračene svjetlosti. Iz izraza (5) i (6) vidljivo je da se ponašanje zrake može u potpunosti opisati sa ova dva parametra. Zbog njihove važnosti, često ih se kombinira pod jedan parametar zvan Rayleigh-ova duljina. Rayleigh-ova duljina je udaljenost uz os prostiranja od najuže točke zrake (struk zrake) do točke u kojoj je promjer zrake dva puta veći u presjeku.

Vidljivo je da su prethodni izrazi definirani i za negativne udaljenosti od izvora. Negativne vrijednosti udaljenosti od izvora lako je postići korištenjem fokalne leće pomoću kojih se postiže negativna zakrivljenost valne fronte.

Zraka koja upada na leću je Gausova, određenog promjera same zrake i pozitivne zakrivljenosti valne fronte. Nakon prolaska kroz leću, zakrivljenost valne fronte postaje negativna te se radijus zakrivljenosti povećava do tzv. struka zrake, u kojemu je promjer same zrake najuži a promjer valne fronte beskonačan. I ovakav kompleksni optički sustav može se vrlo kvalitetno opisati pomoću izraza (5) i (6). Presjek Gausove zrake prikazan je na slici 7.



Slika 7. Profil i razdioba intenziteta Gausove zrake

Besselov izvor je izvor koji zrači Besselovu zraku. Idealna se Besselova zraka ne ogiba pri prostiranju (za razliku od Gausove zrake), ne divergira te sama sebe regenerira ako na optičkom pravcu širenja biva parcijalno prepriječena, pošto propagacijom zrake vanjski prstenovi održavaju središnji maksimum konstantnim. Projekcija Besselove zrake sastavljena je od središnje točke

maksimuma i periodičnih vanjskih koncentričnih prstenova. Idealnu Besselovu zraku nije moguće postići s obzirom da bi takva zraka imala beskonačan broj vanjskih prstenova što traži beskonačnu količinu energije. Besselova zraka je dakle usmjereno elektromagnetsko polje čija je amplituda (intenzitet zračenja) opisana Besselovim funkcijama prve vrste. Besselove funkcije prve vrste predstavljaju rješenje Besselove diferencijalne jednačbe a izražene su preko jednakosti (7):

$$J_n(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m+\alpha+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+n} \quad (7)$$

Pri tom je $\Gamma(z)$ gama funkcija a n red Besselove funkcije. Činjenica da idealna Besselova zraka ne divergira i ne podliježe ogibu može se pokazati preko rješenja skalarnе valne jednačbe izražene pod [21] (8).

$$\nabla^2 u - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (8)$$

Koristimo rješenje oblika (9).

$$u(x, t) = f(\rho) e^{i(k_3 x_3 - \omega t)} \quad (9)$$

Gdje $\rho = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2)}$ predstavlja dijagonalnu udaljenost do x_3 , a bočni oblik $f(\rho)$ ostaje očuvan sa udaljenošću x_3 . Sada, uvrštavanjem rješenja (9) u skalarnu valnu jednačbu dobivamo izraz (10).

$$\rho^2 \frac{d^2 f(\rho)}{d\rho^2} + \rho \frac{df(\rho)}{d\rho} + \rho^2 (k^2 - k_3^2) f(\rho) = 0 \quad (10)$$

$$k^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \quad (11)$$

Sada, potrebno je uzeti u obzir Besselovu diferencijalnu jednadžbu (12)

$$x^2 \frac{d^2 J_n(x)}{dx^2} + x \frac{d J_n(x)}{dx} + (x^2 - n^2) J_n(x) = 0 \quad (12)$$

u kojoj $J_n(x)$ označava Besselovu funkciju u cilindričnim koordinatama n -tog reda. Za početno rješenje koristimo Besselovu funkciju nultog reda, pa je $f(\rho) = J_0(k_\rho \rho)$, uz to vrijedi $k_\rho^2 = k^2 - k_3^2$ pa je rješenje valne jednadžbe koja ne mijenja bočni oblik u slobodnom prostoru sa porastom udaljenosti od izvora izražen pod (13).

$$u(x, t) = J_0(k_\rho \rho) e^{i(k_3 x_3 - \omega t)} \quad (13)$$

Kako je $k_\rho = k \sin \theta$ i $k_3 = k \cos \theta$, jednadžba (14) postaje kao što je prikazano u (15).

$$u(x, t) = J_0(k \sin \theta \rho) e^{i(k \cos \theta x_3 - \omega t)} \quad (14)$$

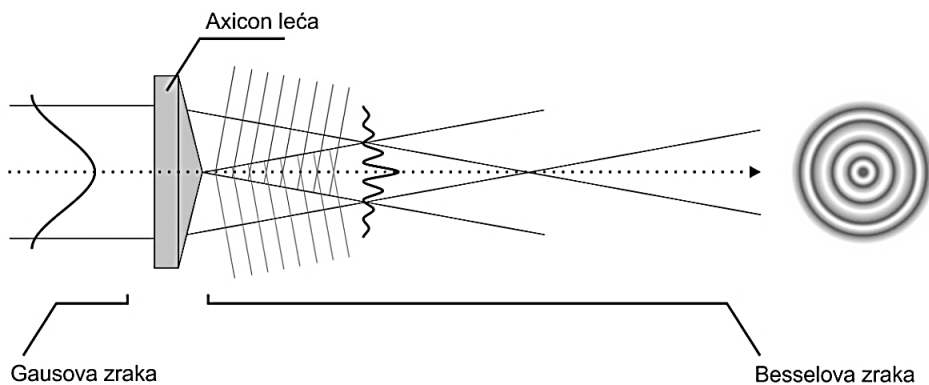
Ove dvije jednadžbe predstavljaju tzv. „stožaste valove“, koji su zapravo analogni prikaz ravnih (planarnih) valova u cilindričnim koordinatama. Rješenje se svodi na ravni val koji putuje okomito od izvora (u smjeru x_3) za $\theta = 0$. Dakako, dobiveni rezultat vrijedi za idealnu Besselovu zraku koja u pravilu ne bi bila podložna ogibu. Realna Besselova zraka jest podložna ogibu, no moguće je svesti ogib na minimum za praktične udaljenosti na kojima se ona može iskoristiti.

Intenzitet idealne Besselove zrake može se opisati pomoću jednadžbe [22] (15).

$$E(r, \phi, z) = A_0 e^{(ik_z z)} J_n(k_r r) e^{(\pm in\phi)} \quad (15)$$

U navedenom izrazu J_n predstavlja Besselovu funkciju n -tog reda, k_z i k_r su okomiti i vertikalni radijalni valni vektori pri čemu je $k = \sqrt{k_z^2 + k_r^2} = \frac{2\pi}{\lambda}$, a λ valna duljina elektromagnetskog zračenja. r , ϕ i z predstavljaju radijalnu, azimutalnu i uzdužnu komponentu u cilindričnom koordinatnom sustavu.

Postoji više načina na koje je moguće dobiti Besselovu zraku, ali najčešće se koristi pretvorbom Gausove zrake uporabom Axicon (Aksikon) leće. Axicon je leća stožastog oblika na koju se usmjerava Gausova zraka a na izlazu dobiva Besselova zraka sa prethodno navedenim svojstvima. Slika 8 prikazuje profil i osnovna svojstva Besselove zrake.



Slika 8. Profil i projekcija Besselove zrake

Lambertov izvor je difuzni izvor elektromagnetskog zračenja kod kojega je intenzitet zračenja definiran Lambertovim zakonom kosinusa. Lambertov zakon kosinusa kaže da je promatrani zračeni intenzitet idealnog difuznog izvora izravno proporcionalan kosinusu kuta (θ) između pravca promatranja i normale na izvor zračenja.

Osnovno svojstvo Lambertovog izvora je činjenica da je količina zračenja neovisna o kutu smjera zračenja. Takav izvor zračenja naziva se i izotropni [23]. Kako bi izrazili intenzitet Lambertovog izvora zračenja krećemo od diferencijala njegove površine dA [24]. S obzirom da je diferencijal po definiciji beskonačno mali može ga se prikazati kao točkasti izvor zračenja, pa je tok

koji napušta površinu modeliran pomoću geometrijskih zraka. Intenzitet (I_θ) svake zrake koja zrači iz površine pod kutom θ u odnosu na normalu izražen je preko Lambertovog zakona kosinusa jednadžbom (16):

$$I_\theta = I_n \cos\theta \quad (16)$$

Pritom I_n predstavlja intenzitet zračenja Lambertovog izvora po normalu na površinu. Intenzitet zračenja diferencijala površine dA koji ima konstantnu količinu zračenja (odnosno osvjetljenja) mijenja se u ovisnosti o projiciranoj površini koja iznosi $dA \cos\theta$ što daje izraz za količinu zračenja (17):

$$L = \frac{dI}{dA \cos\theta} = \frac{dI_n}{dA} \quad (17)$$

Postavimo li diferencijalni Lambertov izvor dA na unutrašnju plohu zamišljene sfere, uslijed zakona obrnutog kvadrata (zračena fizikalna veličina kao npr. intenzitet, obrnuto je proporcionalna kvadratu udaljenosti od izvora) dobivamo da je osvjetljenje bilo koje točke na unutarnjoj plohi sfere jednak izrazu (18):

$$E = \frac{I \cos\theta}{d^2} \quad (18)$$

Pritom d označava udaljenost od izvora zračenja. Međutim, u slučaju zamišljene sfere $d = D \cos\theta$ gdje je D promjer zamišljene sfere, pa dobivamo izraz (19):

$$E = \frac{I_\theta \cos\theta}{(D \cos\theta)^2} = \frac{I_\theta}{D^2 \cos\theta} \quad (19)$$

Pa na posljetku iz Lambetrovog zakona kosinusa dobivamo pojednostavljeni izraz za osvjetljenje prikazan u jednadžbi (20):

$$E = \frac{I_{\theta}}{D^2 \cos\theta} = \frac{I_n}{D^2} \quad (20)$$

Preko izraza (20) sada je lako vidljivo da je zapravo osvjetljenje bilo koje točke na unutarnjoj plohi zamišljene sfere konstantna. Osvjetljenje je definirana kao derivacija gustoće zračenog toka po površini (21):

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (21)$$

Iz ove definicije vidljivo je da za konstantnu gustoću toka kroz konačnu omeđenu površinu vrijedi jednakost (22):

$$\Phi = EA \quad (22)$$

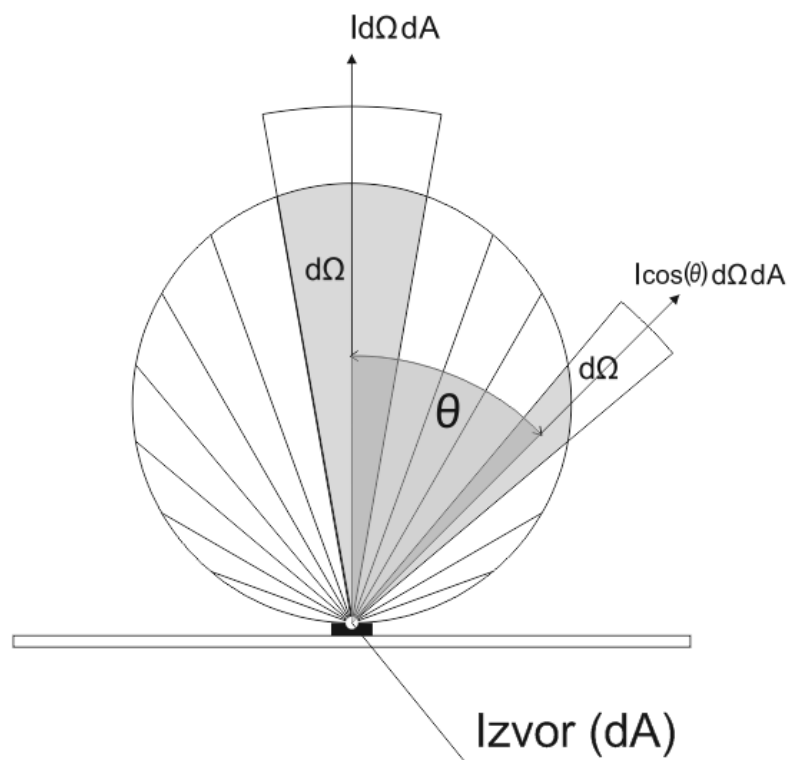
Kako je površina A sfere zadana izrazom $A = 4\pi r^2 = \pi D^2$, dobivamo da je gustoća toka zapravo jednaka (23):

$$\Phi = EA = \frac{\pi I_n D^2}{D^2} = \pi I_n \quad (23)$$

Snaga elektromagnetskog zračenja po jedinici površine dobiva se uvrštavanjem izraza (23) kako bi se dobila jednadžba (24):

$$M = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{\pi dI_n}{dA} \quad (24)$$

Uz sve gore navedene izvore, važno je napomenuti da idealni difuzni Lambertov izvor u stvarnosti ne postoji. Međutim, ovaj model izrazito dobro aproksimira svojstva većine poluvodičkih LED svjetlosnih izvora. Slika 9 prikazuje dijagram difuznog Lambertovog izvora elektromagnetskog zračenja poluvodičke LED diode.



Slika 9. Grafički prikaz zračenja Lambertovog izvora

4.2. Modulacija signala

Modulacija je proces u kojemu se karakteristike medija koji prenosi informacije oblikuju u odnosu na karakteristike nekog drugog medija za prijenos informacija. Prvi medij sadrži modulirani signal (često ga se naziva i signal nositelj) dok drugi medij sadrži modulacijski signal. Medij prijenosa signala može biti zvuk (odnosno zrak), elektromagnetsko zračenje u radio frekvencijskom području ili, kao što je to slučaj kod OW i FSO komunikacija, vidljivo svjetlo. Tipična svojstva signala koja se koriste pri modulaciji su amplituda, frekvencija i faza.

Postoje dvije osnovne vrste modulacije; digitalna i analogna. Za moderne komunikacijske potrebe koriste se u pravilu isključivo digitalne modulacije. Dakle, za potrebe komunikacija vidljivim svjetlom koristi se isključivo digitalna modulacija svjetlosnog signala (zato se ova vrsta komunikacija naziva i digitalna komunikacija vidljivim svjetlom).

Proces modulacije vrši se u tri faze. Prvo signal koji treba prenijeti biva digitaliziran (u slučaju da je izvorno u analognom formatu kao npr. zvuk). Digitalni signal tada biva kodiran kako bi se prilagodio mediju signala vala nosioca (u slučaju FSO i OW, vidljivom svjetlu). U trećem koraku signal nositelj oblikuje se na način da se u njega „ugradi“ kodirana digitalna informacija izvornog signala.

Informacije poput zvuka ili slika prenose se izvorno medijem koji nije pogodan za prijenos komunikacijskim kanalima visoke propusnosti poput onih korištenih u modernim komunikacijama, kao što su to optička vlakana, RF prijenos ili VLC (Visible Light Communication). Modulacija služi upravo kako bi se tražena informacija pretvorila u signal pogodan za navedene digitalne komunikacijske kanale visoke propusnosti.

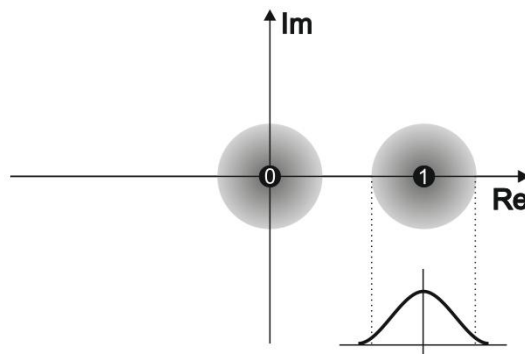
Digitalne modulacije opisuju se pomoću dijagrama stanja odnosno konstelacijskim dijagramom. Dijagram opisuje signal korištenjem dvodimenzionalnog ili trodimenzionalnog točkastog grafa. U osnovi, dijagram stanja služi kako bi prikazao broj mogućih simbola koji se mogu dobiti korištenjem određene modulacije. Mjerenjem dijagrama stanja može se odrediti izobličenje signala odnosno utjecaj smetnji. Naime, svaka točka na kompleksnoj ravnini grafa predstavlja jedan simbol, no zbog utjecaja smetnji i izobličenja, sama pozicija simbola na grafu nije strogo određena, već se uz svaki simbol veže razdioba vjerojatnosti (najčešće normalna razdioba)

čija je srednja vrijednost očekivana pozicija simbola na dijagramu stanja. Uz same simbole, na dijagramu stanja moguće je i prikazati tranzicijski smjer simbola (prijelaz iz jednog u drugi simbol). Na dijagramu stanja, tranzicije se obično prikazuju strjelicama.

Analizom dijagrama stanja može se odrediti nužni razmak između razina (npr. amplitude signala) dovoljan da ne dolazi do preklapanja razdioba vjerojatnosti pojavljivanja svakog zasebnog simbola. Naime, u slučaju da se razdiobe preklapaju, to upućuje na činjenicu da sustav ne može razlikovati između simbola kod demodulacije te se pojavljuje greška pri prijemu. Dakle, kako bi komunikacijski sustav bio pouzdan, potrebno je provjeriti i smanjiti mogućnost preklapanja razdioba pojedinih simbola, a to se vrši pomoću dijagrama stanja.

Najjednostavniji dijagram stanja je prikaz OOK modulacije. S obzirom da se kod OOK modulacije izmjenjuju stanja amplitude, i to samo dva (pojava signala predstavlja binarnu jedinicu, izostanak binarnu nulu), modulacijski simboli nalaziti će se isključivo na realnoj osi. Slika 10 prikazuje dijagram stanja OOK modulacije. Na slici je označena razdioba simbola te osi kompleksne ravnine u kojoj se dijagram prikazuje.

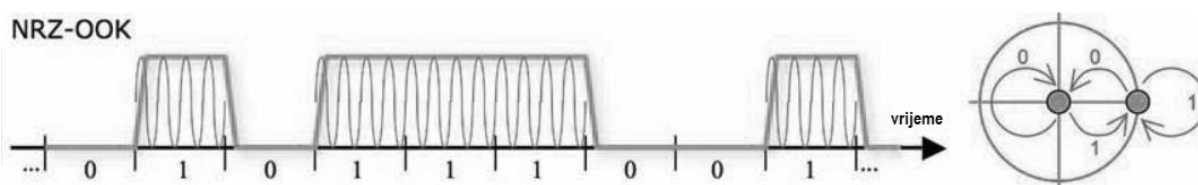
Kao što je to ranije navedeno, postoje tri osnovne veličine korištene pri modulaciji. Svaka od tih veličina može biti kvalitetnije iskorištena upotrebom raznih metoda modulacije.



Slika 10. Prikaz dijagrama stanja OOK modulacije uz naznačenu razdiobu modulacijskih simbola

4.2.1. OOK

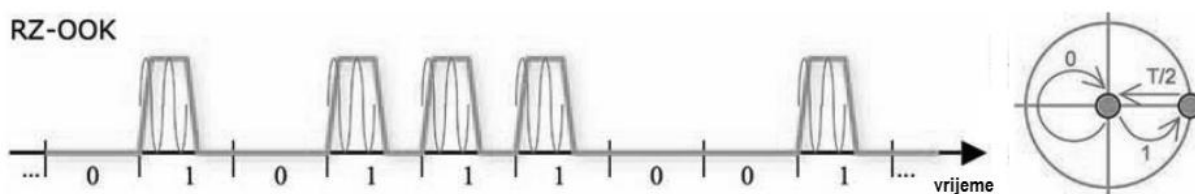
Jedna od najjednostavnijih metoda modulacije je OOK (On Off Keying) modulacija. OOK predstavlja najjednostavniji oblik ASK (Amplitude Shift Keying) metode modulacije. ASK modulacija provodi diskretne promjene u amplitudi signala. OOK dakle, kao primjer najjednostavnije promjene amplitude predstavlja uključivanje i isključivanje signala u određenim intervalima. Osnovna prednost takve vrste modulacije je da pri prijenosu „nule“ sustav štedi energiju jer se u komunikacijski kanal zapravo ne šalje nikakav signal. Ipak, stvar je malo kompliciranija. Kod osnovnog oblika OOK vrši se modulacija bez povratka na nulu, odnosno NRZ (Non-Return to Zero). Glavna mana NRZ OOK modulacije je što ne uključuje takt signala. Taj se nedostatak kompenzira raspršivanjem toka podataka kako bi se povećao broj tranzicija i poboljšao oporavak signala takta. Korištenjem NRZ-a što se brže uključuje i isključuje svjetlosni signal pojedini bitovi imaju tim manje energije sadržane u sebi, pa su stoga podložniji slabljenju signala. Ova metoda modulacije koristi se za brzine prijenosa do 10 Gbit/s [25]. Ova metoda modulacije signala nosioca nudi dobru toleranciju na raspršivanje signala, no slabu toleranciju na šum te lošu iskoristivost, pa se stoga ne upotrebljava kod DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) optičkih mreža. Slika 11 prikazuje oblik niza podataka i dijagram stanja OOK modulacije korištenjem NRZ-a. Unutar dijagrama stanja prikazani su i smjerovi tranzicije između simbola.



Slika 11. NRZ OOK modulacija signala nosioca i prikaz dijagrama stanja sa tranzicijama modulacijskih simbola

Izvor: Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies; Ildefonso M. Polo; 2009

Druga vrsta OOK modulacije je RZ (Return to Zero), odnosno sa povratom na nulu. Kod ove vrste modulacije vrijednost signala pada na nulu na polovici bita, te tako poboljšava vađenje signala takta. Sa ovakvom modulacijom niz binarnih jedinica prikazan je izmjeničnim signalom, pa je ukupna energija po simbolu manja od NRZ-a. slika 12 prikazuje OOK modulaciju korištenjem RZ-a.



Slika 12. RZ OOK modulacija signala nosioca i prikaz dijagrama stanja sa tranzicijama modulacijskih simbola

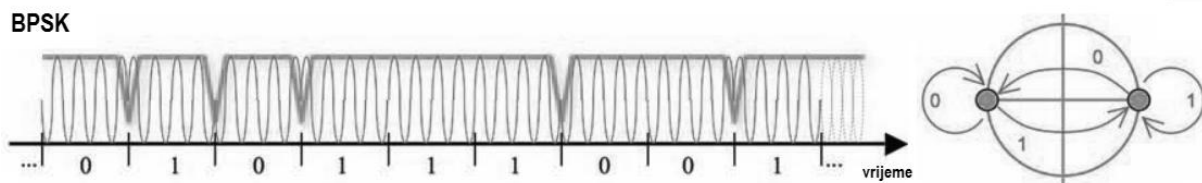
Izvor: Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies; Ildefonso M. Polo; 2009

4.2.2. ASK

ASK (Amplitude Shift Keying) modulacija predstavlja varijaciju na OOK modulaciju. Kao i kod OOK, signal se modulira diskretnim promjenama amplitude. Za razliku od OOK, ASK modulacija koristi dvije ili više razina amplitude različitih od nule. Očita prednost ove metode je da se jednim modulacijskim simbolom može prenijeti više od jednog binarnog signala što povećava kapacitet prijenosa komunikacijskog kanala [26]. Broj razina signala označava se sa M , i definiran je pravilom $M = 2^b$. Pritom b označava broj bitova po modulacijskom simbolu. ASK sa četiri razine ($M = 4$) koristi se kada je potrebno povećati propusnost ali istovremeno i zadržati širinu optičkog spektra. Kod optičkih komunikacija koriste se i ASK modulacije sa osam razina. Kod ovako velikog broja razina potrebno je voditi računa o ukupnom omjeru signal/šum i utjecaja smetnji na sam signal kako ne bi došlo do preklapanja modulacijskih simbola.

4.2.3. BPSK

BPSK (Binary Phase Shift Keying) metoda modulacije mijenja vrijednost faze optičkog signala nosioca (u najjednostavnijem slučaju između početne vrijednosti 0° i dijametralno suprotne vrijednosti 180° , odnosno između 0 i π radijana). Korištenjem ove metode snaga signala biva kvalitetnije raspoređena pošto je intenzitet zračenja jednak za binarnu jedinicu i za binarnu nulu. Binarni simboli modulirani su korištenjem različite faze svjetlosti pa demodulacija signala traži kompleksnije rješenje od jednostavne detekcije intenziteta signala kao što je to kod OOK modulacije. Na slici 13 prikazana je BPSK modulacija signala nosioca te dijagram stanja.



Slika 13. BPSK modulacija signala nosioca uz prikaz dijagrama stanja

Izvor: Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies; Ildefonso M. Polo; 2009

4.2.4. DPSK

Varijacija na BPSK je DPSK (Differential Phase Shift Keying). Kod DPSK-a, PSK modulaciju vodi diferencijalni tok bitova pa su tako binarne nule predstavljene promjenom od 180° , a binarne jedinice izostankom promjene u fazi. Dakle, svaki puta kad se prenese binarna nula u signalu dolazi do promjene faze od 180° . Prednosti ove modulacije su pojednostavljenje demodulacije i bolji odnos signal/šum, a osnovna mana je što koristi više energije u odnosu na BPSK.

Demodulacija se vrši rastavljanjem signala na dva jednaka djela, nakon čega se jedan od signala provodi kroz liniju kašnjenja. Naknadnim spajanjem ta dva signala dolazi do konstruktivne i destruktivne interferencije zbog razlika u fazi, pa se na izlazu demodulatora dobiva signal nalik na OOK modulaciju. Obično se kod demodulacije DPSK signala koristi Mach-Zehnder-ov Interferometar (MZI) sa kašnjenjem od jednog bita. Mach-Zehnder-ov Interferometar određuje

međusobne razlike u fazi dviju kolimiranih zraka dobivenih iz istog izvora. DPSK modulacija ima također dvije varijante vrijedne spomena. Kao i kod OOK, razlikujemo NRZ DPSK i RZ DPSK modulaciju.

Važna karakteristika NRZ DPSK modulacije je da je optička snaga signala konstantna, ali se zato optičko polje izmjenjuje između pozitivne jedinice (1) i negativne jedinice (-1), odnosno dolazi do faznog pomaka između 0 i π , što znači da je ukupno optičko polje jednako nuli [27]. Posljedica ovakve metode modulacije je izostanak komponente nosioca u ukupnom spektru. NRZ DPSK modulacija relativno je podložna kromatskoj disperziji i nelinearnom izobličenju signala.

Kako bi se povećala otpornost komunikacijskih sustava na nelinearna izobličenja koristi se modulacija sa povratom na nulu, odnosno RZ DPSK (Return to Zero). Kao i kod NRZ DPSK modulacije, koristi se fazna promjena od 180° odnosno π radijana (između 0 i π) između bitova, međutim duljina optičkih impulsa uža je od dužine jednog bita pa optička snaga opada na nulu prije tranzicije bita. Sama modulacija vrši se slično kao i kod NRZ DPSK modulacije, odnosno prvi korak je upravo generiranje NRZ DPSK modulacije koja se naknadno dodatno modulira signalom takta toka podataka. RZ DPSK se katkad naziva i DPSK sa modulacijom intenziteta ili IM DPSK (Intensity Modulated DPSK) zbog dodatne modulacije intenziteta sinkroniziranom sa tokom podataka.

Kod RZ DPSK modulacije optička snaga signala nije konstantna. Zbog užeg optičkog impulsa u signalu nosiocu optički spektar se proširuje, što čini RZ DPSK modulaciju znatno otporniju na kromatsku disperziju.

4.2.5. QPSK

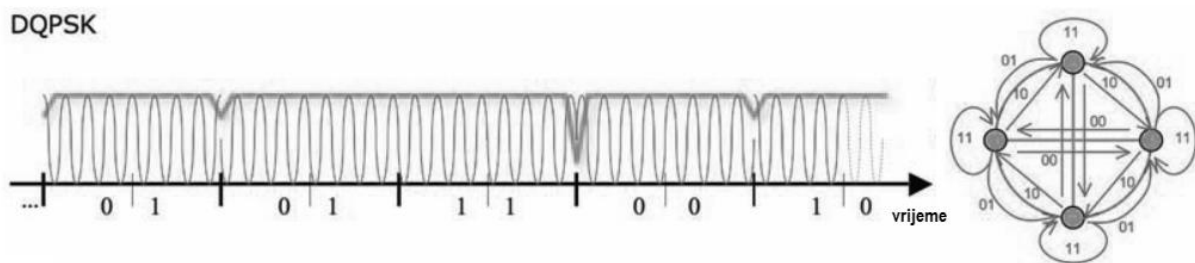
QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) modulacija koristi sličan princip proširenja BPSK modulacije kao što ASK proširuje OOK. QPSK modulacija služi kao i svaka digitalna modulacija, kako bi se digitalna informacija prenosila kroz analogni komunikacijski kanal. Bitovi se grupiraju u parove, a svaki par predstavljen je posebnim modulacijskim simbolom [28]. Takva metoda modulacije zahtjeva poseban simbol za svaku moguću kombinaciju para bitova. S obzirom da postoji četiri moguće kombinacije (00, 01, 10, 11) QPSK stvara četiri različita simbola pri modulaciji. Pri odašiljanju podataka simboli se održavaju konstantnima nad određenim brojem izlaznih uzoraka, tzv. periodom simbola. Brzina prijenosa modulacijskog simbola izražena je omjerom brzine prijenosa i perioda modulacijskog simbola. QPSK modulacija koristi sinusni i kosinusni signal nosioc kako bi se omogućio prijenos dva odvojena signala podataka. Sinusni signal

naziva se fazni (in-phase) a kosinusni kvadrturni (quadrature) signal. Ovom metodom moguće je prenijeti duplo više podataka od klasične BPSK modulacije.

4.2.6. DQPSK

DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) modulacija dijeli podatkovni niz na dva zasebna toka podataka. svaki tok modulira se korištenjem DPSK modulacije, te se naknadno uvodi kašnjenje od 90° , odnosno $\frac{\pi}{2}$ radijana. Ovako izmijenjeni tokovi podataka ponovo se spajaju u jedan koji sadrži četiri različite faze ($0, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, \pi$). Ova metoda modulacije dakle omogućava prijenos dva bita po svakom modulacijskom simbolu uz uži optički pojas. To donosi dodatne prednosti u odnosu na DPSK, kao npr. informacija je kodirana u promjenu faze, odnosno u prijelaz iz jednog modulacijskog simbola u drugi za razliku od ukupne vrijednosti faznog pomaka (PSK). Dakle, pri demodulaciji potrebno je samo odrediti promjene u fazi a ne ukupnu vrijednost faze. Bez obzira na to, ova metoda koristi znatno kompliciranije modulatore i demodule.

Uži optički spektar DQPSK modulacije dozvoljava veće raspršenje, bilo kromatsko ili polarizacijsko, te omogućava jače optičko filtriranje što sužava razmake između različitih kanala. Slika 14 prikazuje DQPSK modulaciju signala i dijagram stanja.



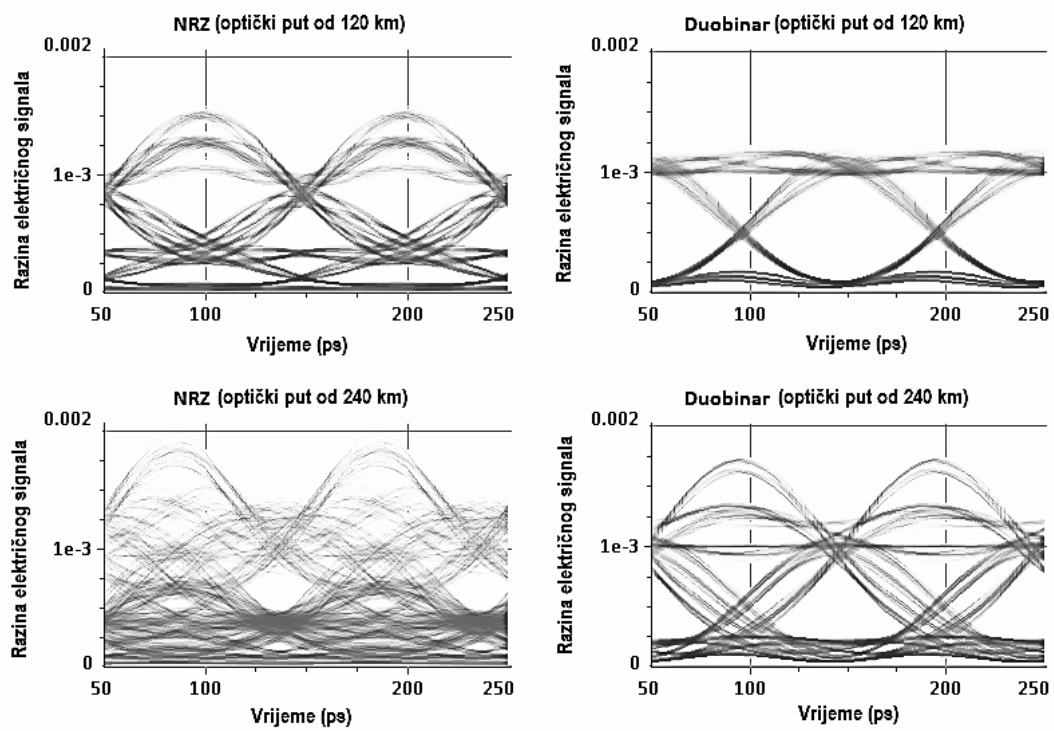
Slika 14. BPSK modulacija signala nosioca uz prikaz dijagrama stanja

Izvor: Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies; Ildefonso M. Polo; 2009

PM-DQPSK (Polarisation Multiplexed Differential Quadrature Phase Shift Keying) modulacija kombinira četiri bita u jedan modulacijski simbol. Slično kao i DQPSK, kod PM-DQPSK modulacije signal se dijeli u dva podatkovna toka. Svaki tok modulira se DQPSK modulacijom, te se nakon toga svaki pod signal polarizira u međusobno okomitim polarizacijskim ravninama. Nakon polarizacije signali se miješaju u konačni modulirani signal nosioc. Takav je

signal moduliran i amplitudom i optičkom fazom, a odašilje se u dva različita polarizacijska stanja, pa je stoga podložan polarizacijskom raspršenju. U optičkim mrežama PM-DQPSK koristi se za prijenos podataka do 100 Gbit/s.

DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying) modulacija predstavlja proširenje na QPSK modulaciju. QPSK predstavlja proširenje PSK modulacije utoliko što kod ove metode modulacije jedan modulacijski simbol sadrži dva bita (za razliku od PSK modulacije kod koje svaki modulacijski simbol sadrži samo jedan bit). Kod DP-QPSK modulacije jedan modulacijski simbol sadrži četiri bita, dakle duplo više od QPSK modulacije. Očita prednost je da elektronički upravljački uređaji mogu zapravo raditi četiri puta sporije od samog takta signala prijenosa podataka, što sustav u cijelosti čini jeftinijim s obzirom da ova metoda omogućava korištenje CMOS tehnologije kod obrade signala. Glavna metoda proširivanja kapaciteta modulacijskog simbola kod DP-QPSK modulacije je korištenje dva izvora zračenja, pri čemu su polarizacije zračene svjetlosti međusobno okomite (jedna zraka koristi horizontalnu polarizaciju a druga vertikalnu) [29]. Svaka zraka je modulirana QPSK modulacijom.



Slika 15. Simulirani dijagram oka za NRZ i ODB modulaciju za optičke putove duljine 120 i 240 km

Izvor: Dispersion-Tolerant Optical Transmission Using Duobinary Modulation;
http://www.vpiphotonics.com/App_ModFormat_NRZDB.php; 26. 2. 2013

4.2.7. ODB

ODB (Optical Dual Binary, Duobinary Optical) modulacija izrazito je otporna na raspršenje a uz to je i relativno jednostavno primjenjiva [30]. ODB pruža kvalitetnu zamjenu u odnosu na NRZ modulacije koje su znatno podložnije raspršenu kroz komunikacijski kanal. Modulacijski signal dobiva se dodavanjem podataka sa kašnjenjem od jednog bita ukupnom podatkovnom nizu [31]. Tom metodom stvaraju se tri razine signala nosioca koje se obično označavaju sa 0, 1 i 2. Isti rezultat moguće je postići dodavanjem nisko propusnog filtra izvornom binarnom signalu.

ODB modulacija postiže se maksimalnim opterećenjem Mach-Zehndner-ovog modulatora električnim kodiranim signalom. Na takav način postižu se razine 0 i 2 koje imaju potpuno suprotne optičke faze i razina 1 koja se prenosi izravno. Ovakav međuovisni signal sa tri razine demodulira se izravnom optičkom detekcijom signala na prijemniku. Kao što je to prethodno napomenuto, signal moduliran ODB modulacijom ima uži spektralni pojas u odnosu na NRZ metode modulacije, što dozvoljava veći domet kao što je to prikazano dijagramom oka na slici 15.

4.2.8. PPM

PPM (Pulse Position Modulation) modulacija zapravo predstavlja digitalnu verziju širinsko-impulsne modulacije. Kod PPM modulacije, modulacijski simboli kodirani su promjenom pozicije impulsa u vremenu u odnosu na ne modulirano vrijeme pojavljivanja impulsa. PPM je poprilično neefikasna modulacija što se tiče snage signala i iskoristivosti spektralnog pojasa, pa se stoga češće koristi malo izmijenjena varijanta PPM modulacije, DPPM (Differential Pulse Position Modulation) modulacija.

U PPM modulaciji blok od $\log_2 k$ ulaznih bitova preslikava se na jedan od k jedinstvenih valnih oblika [32]. Pritom svaki valni oblik sadrži jedan aktivan („On“) i $(k - 1)$ pasivnih („Off“) dijelova. Impuls $p(t)$ prenosi se tokom aktivnog dijela.

DPPM modulacijski simbol dobiva se iz pripadajućeg PPM modulacijskog simbola brisanjem svih pasivnih dijelova koji slijede odmah nakon aktivnog dijela u valnom obliku signala. k -ti DPPM skup simbola $s_k(t)$ (pri korištenju pravokutnih impulsa) izražene je preko jednakosti (25):

$$s_k(t) = \begin{cases} 0 & t < kT_c \\ P_c & kT_c \leq t \leq (k+1)T_c \end{cases} \quad (25)$$

P_c predstavlja vršnu vrijednost snage signala modulacije a T_c duljinu trajanja aktivnog ili pasivnog djela valnog oblika signala. DPPM, za razliku od PPM modulacije ne traži sinkronizaciju simbola, uz to DPPM ima već spomenutu veću iskoristivost u donosu na običnu PPM modulaciju.

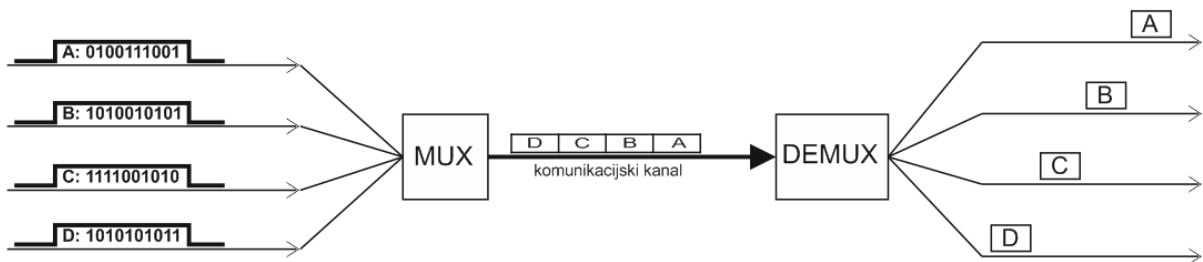
4.3. Multipleksiranje komunikacijskih kanala

Multipleksiranje je postupak kojim se više podatkovnih tokova spaja u jedan komunikacijski signal za prijenos kroz medij od kojeg je sačinjen komunikacijski kanal. Osnovna zamisao multipleksiranja je iskorištavanje jednog komunikacijskog kanala za prijenos većeg broja podatkovnih tokova istovremeno kako bi se povećala propusnost komunikacijskog kanala i iskoristivost medija prijenosa podataka. Kao i pri modulaciji, i kod multipleksiranja se iskorištavaju svojstva medija kojim se prenose podaci. Od metoda multipleksiranja korištenih u optičkim komunikacijama potrebno je spomenuti TDM (Time Domain Multiplexing), PDM (Polarization Division Multiplexing), SDM (Space Division Multiplexing), WDM (Wavelength Division Multiplexing), CDM (Code Division Multiplexing) i OAM (Orbital Angular Momentum Multiplexing) koji je još tema istraživanja.

TDM (Time Domain Multiplexing) predstavlja jednu od najjednostavnijih metoda multipleksiranja digitalnog signala. Kod TDM-a, dva ili više toka podataka prenose se (prividno) istovremeno kao pod kanali unutar jednog komunikacijskog kanala [33]. U stvarnosti, kanali prenose naizmjenično tako što svaki kanal ima određeni vremenski prozor u kojemu prenosi podatke. Vremenski prozor je fiksnog trajanja. Blok podataka prvog pod kanala prenosi u prvom vremenskom prozoru, blok podataka drugog pod kanala prenosi se u drugom vremenskom prozoru, blok podataka trećeg u trećem itd. dokle se ne prenesu svi blokovi jedne serije prijenosa i postupak počne iznova.

Jedan TDM okvir sastavljen je od jednog vremenskog prozora po optičkom kanalu uz dodatak sinkronizacijskog kanala i u nekim slučajevima kanala za provjeru ispravnosti podataka (error correction). Na slici 16 prikazana je blok shema TDM metode multipleksiranja.

PDM (Phase Division Multiplexing) metoda multipleksiranja zasnovana je na svojstvu polarizacije elektromagnetskog vala. Prema konvenciji, polarizaciju elektromagnetskog vala određuje smjer vektora električnog polja unutar jedne periode oscilacije. Dakle polarizirajući jedan signal okomitom polarizacijom s obzirom na drugi moguće je kroz isti komunikacijski kanal provesti istovremeno minimalno dva modulirana toka podataka. Tu stoji i osnovna prednost nad metodom multipleksiranja kao što je TDM. PDM za razliku od TDM-a može paralelno, potpuno istovremeno prenositi dva različita toka podataka.



Slika 16. Blok shema TDM metode multipleksiranja

U optičkim komunikacijskim mrežama implementacija PDM-a ne traži velike nadgrade komunikacijskog sustava. Dovoljno je zamijeniti multiplekser/demultiplekser i dodati još po jedan primopredajni element na svaki kraj komunikacijskog kanala [34].

Jedan od najvećih problema vezanih uz PDM je gubitak signala u ovisnosti o polarizaciji, odnosno PDL (Polarization Dependant Loss). PDL predstavlja vrlo veliku prepreku u razvoju PDM prijenosa za brzine veće od 100 Gbit/s [35]. Kod sustava prijenosa podataka korištenjem samo jedne polarizacije PDL uzrokuje promjene u snazi optičkog signala vezane uz promjene stanja polarizacije samog signala.

SDM (Space Division Multiplexing) metoda multipleksiranja jednostavno predstavlja prijenos pojedinih tokova podataka kroz prostorno (fizički) razmaknute kanale. Ova vrsta multipleksiranja poznada je i pod nazivom SDMA (Space Division Multiple Access). SDM predstavlja objektivno najjednostavniju izvedbu multipleksiranja podatkovnih tokova.

Kako SDM traži fizički odvojene kanale za prijenos podataka, implementacija ovakvog komunikacijskog sustava može potencijalno biti skuplja. U komunikacijama putem optičkih vlakana dokazani su veliki kapaciteti prijenosa preko vrlo velikih udaljenosti (uz uporabu

trojezgrenih vlakana) [36]. S obzirom na činjenicu da su multipleks kanali fizički odvojeni, moguće je SDM metodu multipleksiranja povezati sa nekom drugom metodom kako bi se ostvario dvojni učinak (npr. svaki SDM kanal može se dodatno multipleksirati WDM ili TDM metodom multipleksiranja).

WDM (Wavelength Division Multiplexing) metoda multipleksiranja izvodi se spajanjem pojedinih tokova podataka moduliranih različitim valnim duljinama. Osnovni koncept svodi se na spajanje valnih duljina prizmom. WDM u osnovi predstavlja FDM (Frequency division Multiplexing), no kako se taj izraz općenito veže uz RF komunikacije češće se upotrebljava navedeni WDM ili OFDM (Optical FDM). Pri upadu zrake na prizmu, dolazi do refrakcije, odnosno lomljenja zrake pod određenim kutom, uzrokovano prijelazom svjetla iz jednog materijala u drugi. Zakon refrakcije izražen je jednadžbom (26).

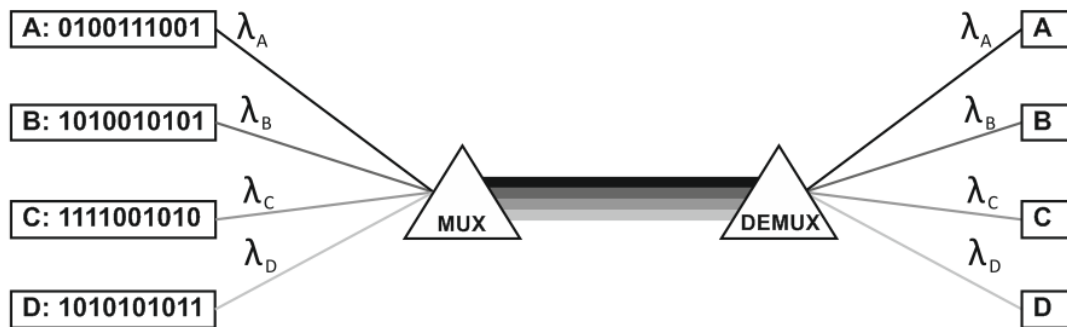
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (26)$$

Iz jednadžbe (26) vidljivo je da je kut loma upadne zrake θ_2 ovisan o indeksima loma materijala iz kojeg zraka upada i materijala u kojeg zraka upada, te kuta θ_1 pod kojim ona upada na granicu materijala. Kut loma svjetlosti također je ovisan i o omjeru brzina svjetlosti u materijalima na čijoj se granici refrakcija promatra. Kako je brzina svjetlosti u nekom materijalu ovisna o valnoj duljini, kut loma biti će ovisan i o valnoj duljini λ upadne zrake. Ako se upadni kutovi zraka različitih valnih duljina pažljivo podese, moguće je zrake različitih valnih duljina spojiti u jednu svjetlosnu zraku koja se tada može prenijeti optičkim kanalom.

Dakle, tako multipleksirani signal provodi se kroz optičku nit do demultipleksera, koji je također u osnovi prizma koja, koristeći isti princip refrakcije, rastavlja multipleksiranu zraku na sastavne spektralne komponente. Zrake različitih valnih duljina se potom šalju na različite prijemnike za različite prijenosne kanale. Ovisno o količini različitih valnih duljina koje se istovremeno prenose kroz optički komunikacijski kanal razlikujemo rijetko multipleksiranje valnih duljina ili CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) i gusto multipleksiranje valnih duljina ili DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

CWDM se obično primjenjuje korištenjem do osam valnih duljina sa razmjerno velikim međusobnim razmakom (uobičajeni razmak između valnih duljina kod CWDM je otprilike 20 nm). DWDM koristi znatno uže razmake između pojedinih valnih duljina (najčešće 0.8 nm, 0.4 nm, ili 0.2 nm) te stoga može koristiti puno veći broj različitih valnih duljina, obično 40 ili 80, a u određenim slučajevima i do 160 [37]. S obzirom na traženu preciznost odašiljanih valnih duljina kod DWDM metode multipleksiranja potrebno je koristiti vrlo precizne monokromatske izvore. Najčešći način izrade takvih izvora je uporaba predajnika sa širim spektrom, koji se nakon modulacije filtrira etalonskim Fabry-Pérot interferometrom.

Osnovni kapacitet WDM multipleksiranog kanala iznosi 10 Gbit/s, no s obzirom na kapacitet modernih DWDM komunikacijskih sustava, moguće je postići prijenose i do 1.6 Tbps. Blok dijagram WDM multipleksiranja prikazan je na slici 17.



Slika 17. Blok dijagram WDM metode multipleksiranja

Još jedan oblik WDM metode multipleksiranja je OWDM (Orthogonal Wavelength Division Multiplexing). Kod OWDM-a određeni broj međusobno bliskih okomitih sub nosioca signala smještenih na paralelnim kanalima. Svaki sub nosioc moduliran je nekom od mogućih metoda modulacije. Optički okomiti kod je porodica binarnih nizova koji posjeduju dobra autokorelacijska i međukorelacijska svojstva [38].

U osnovi dakle, OWDM metodom multipleksiranja prenosi se serijski podatkovni niz velike brzine prijenosa kanalom kojega se dijeli na blokove podataka. Uporabom Fourierove transformacije podaci se kodiraju na odvojene sub nosioce unutar frekvencijskog spektra [39].

OWDM je stoga vrlo kvalitetna metoda multipleksiranja prikladna za velike brzine obrade podataka pošto omogućava paralelnu obradu a glavna komponenta prijelnika je FFT modul koji je relativno jednostavno implementirati korištenjem digitalnih komponenti.

Uzmemo li u obzir optički prijenosni sustav u kojemu se signali upotrebljavaju za oblikovanje vremenskog kvadratnog impulsa trajanja τ , uz spektar sinkronog oblika u kojemu su nul-točke međusobno udaljene $1/\tau$, ispravno okomito (ortogonalno) usmjerenje WDM kanala postiže se samo ako razmak između kanala iznosi točno $1/\tau$ [40]. Uvjet okomitosti valnih duljina smanjuje razinu preslušavanja pri središnjoj valnoj duljini svakog kanala. Uporabom preciznog detekcijskog filtra u središtu DWDM kanala pri prijemu, moguće je smanjiti utjecaj linearnog preslušavanja na zanemarive razine. Dvije funkcije $f(x)$ i $g(x)$ zadovoljavaju uvjet okomitosti ako za njih vrijedi izraz (27).

$$\int_0^T f(x) g(x) dx = 0 \quad (27)$$

Iz ovog izraza proizlazi i ograničenje u međusobnoj udaljenosti između komunikacijskih kanala. Uzmemo li se u obzir jednako međusobno udaljene valne duljine odabrane oko proizvoljne središnje valne duljine λ_0 , izraz

$$f(t) = e^{i\phi_1} \quad (28)$$

predstavlja ne moduliranu envelopu (vremenski kvadratni impuls) u kompleksnoj ravnini za središnju valnu duljinu λ_0 .

$g(t)$ predstavlja signal na valnoj duljini λ_k udaljenoj ω_k radijana po sekundi od osnovne valne duljine λ_0 , te je izražen preko (29).

$$g(t) = e^{(i\omega_k t + \phi_2)} \quad (29)$$

S obzirom da okomitost signala vrijedi samo za specifične intervale valnih duljina, uvrštavanjem izraza (29) i (27) u izraz za okomitost dvaju signala (25), dobivamo odnos (30).

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e^{i\phi_1} e^{(i\omega_k t + \phi_2)} dt = e^{\frac{i\omega_k \tau}{2}} e^{i(\phi_1 + \phi_2)} \text{sinc}\left(\frac{\omega_k \tau}{2\pi}\right) \quad (30)$$

$\frac{\omega_k \tau}{2\pi} = 0$ samo ako je razmak između kanala namještena na $\omega_k = \left| \frac{2\pi k}{\tau} \right| = |2\pi k f_0|$ pri čemu je k cijeli broj. Dakle, okomitost kanala zajamčena je isključivo ako odvojenost kanala Δ (izražena pod (31)) iznosi k puta obrnuto proporcionalna duljina trajanja impulsa $1/\tau$.

$$\Delta = \frac{\omega_{k=1}}{2\pi} \quad (31)$$

Spektralna efikasnost ove metode multipleksiranja postiže se za najnižu vrijednost $k = 1$, što daje ukupnu spektralnu efikasnost od 1 bit/sek/Hz.

CDM (Code Division Multiplexing) metoda multipleksiranja, poznata i ako CDMA (Code Division Multiple Acces) je metoda kod koje svaki kanal prenosi bitovni tok u kodiranom obliku specifičnom za svaki kanal. Uobičajeno je da taj kodirani prijenos prati jedinstveni niz kratkih impulsa postavljenih u vremenske prozore unutar glavnog signala takta. Svaki kanal kodiran je posebnim kodom, te se stoga mogu prenositi istim optičkim komunikacijskim kanalom kojeg je moguće demultipleksirati asinkronim metodama. Zbog načina rada CDM se često primjenjuje u bežičnim mobilnim komunikacijama. Osnovni princip CDM multipleksiranja je korištenje raširenog spektra (*spread-spectrum*) koje omogućava tri osnovna svojstva komunikacijskog kanala [41].

OCDM (Optical Code Division Multiplexing) predstavlja varijantu CDM korištenu u optičkim komunikacijama. U tablici 4 prikazana je usporedba bežičnog CDM i OCDM.

Tablica 4. Usporedba bežinog CDM i OCDM

Izvor: Optical Code Division Multiplexing (OCDM) nad Its Application to Photonic Networks; Kenichi Kitayama, Hideyuki Sotobayashi, Naoya Wada; 1999

	Bežični CDM	OCDM
Nositelj	Mikro i milimetarski val, ograničena dostupnost	Vidljiva svjetlost (400 do 700 nm)
Domena prostiranja signala	Frekvencijska domena	Vremenska domena
Kod	Izravni SS (Spread Spectrum) niz, Preskakanje frekvencija	Izravni SS niz, Preskakanje valnih duljina
Kodiranje/dekodiranje	RF domena	Optička domena (bez optoelektične pretvorbe)
Kapacitet	Ograničen smetnjama	Ograničen smetnjama
Prijenosni medij	Slobodan prostor	Optičko vlakno, slobodan prostor
Potiskivanje smetnji	Antena sa više sektora, korištenje višestrukih smjerova zračenja, kontrola snage	Nedefinirano
Problemi propagacije	Višestruki putovi propagacije	Raspršenje, nelinearnost, interferometarski učinak

Implementacija OCDM-a povlači sličnosti sa bežičnim CDM multipleksiranjem. Za razliku od CDM-a u kojem se koristi RF proširivanje spektra, OCDM koristi vremensko proširivanje [42]. S obzirom da svjetlosni impuls ima znatno veći frekvencijski spektar u odnosu na frekvenciju podatkovnog toka, proširuje se na trajanje T unutar jednog bita putem korištene metode kodiranja. Prijemnik dekodira signal sužavajući ga u uski svjetlosni impuls samo ako kodovi između enkodera i dekodera odgovaraju međusobno. Kodovi koji ne odgovaraju ostaju raspršeni unutar intervala T .

OAM (Orbital Angular Momentum Multiplexing) metoda modulacije koristi svojstvo orbitalnog kutnog momenta elektromagnetskog zračenja kako bi razlikovala okomite (ortogonalne) komunikacijske signale.

Orbitalni kutni moment je komponenta kutnog momenta elektromagnetskog zračenja (ili u konkretnom slučaju optičkih komunikacija, svjetlosne zrake) ovisna od prostornoj razdiobi elektromagnetskog polja a ne o njegovoj polarizaciji. Razmatrane mogućnosti OAM multipleksa zasnovane su na svojstvima Laguerre-Gausove i Besselove zrake [43][44]. Besselova zraka opisana je ranije u ovome radu. Laguerre-Gausova zraka predstavlja jedno od mogućih rješenja paraksijalne valne jednadžbe, točnije, to je rješenje cilindrično-simetričnog problema. Laguerre-Gausova zraka opisana je u cilindričnim koordinatama pomoću Laguerrovih polinoma, pritom red polinoma određuje modalitet zrake.

Kod praktične upotrebe OAM postoje još uvijek znatni nedostaci koji ograničavaju primjenjivost ove metode multipleksiranja, npr. velika divergencija zrake kod modaliteta viših redova. Unatoč tome, velika prednost OAM metode multipleksiranja je što u osnovi dozvoljava proizvoljan broj multipleksiranih komunikacijskih kanala unutar jednog osnovnog signala nosioca.

Orbitalni kutni moment može se podijeliti na dva dodatna parametra, odnosno na unutarnji orbitalni kutni moment i vanjski orbitalni kutni moment. Unutarnji orbitalni kutni moment neovisan je o izvoru a fazna valna fronta na koju se nadovezuje spiralnog je oblika. Otkriće da zrake sa spiralnom faznom frontom imaju orbitalni kutni moment omogućilo je primjene takvih zraka u kvantnim informacijskim sustavima i sustavima za optičku manipulaciju, a u zadnje vrijeme razvila se i zamisao uporabe svjetlosnih zraka sa ovim svojstvima u komunikacijskim tehnologijama [45]. Ipak, do konkretne primjena ove metode modulacije trebati će još malo pričekati s obzirom na slabu razvijenost tehnologije koju ona upotrebljava.

4.4. Kodovi i protokoli

Kako bi se niz binarnih podataka mogao modulirati, prije svega potrebno je informaciju pretvoriti u niz binarnih podataka. Takvo pretvaranje podataka naziva se kodiranje. Kodiranje se može vršiti izravno pri analogno digitalnoj pretvorbi ili naknadno. Postoji velik broj različitih komunikacijskih kodova osmišljenih za različite primjene, npr. kodovi korišteni za CDMA koriste

se za osiguravanje privatnosti pristupa mreži većeg broja korisnika kroz isti komunikacijski kanal a da pri tome ne dolazi do preslušavanja.

Koji će kod biti primijenjen ovisi o komunikacijskoj tehnologiji. Postoje kodovi koji su podložniji smetnjama ali se jednostavno implementiraju, a postoje i zaštitni kodovi koji su znatno otporniji na smetnje ali se zato znatnije teže primjenjuju. U optičkim komunikacijama koriste se različiti kodovi a u nastavku će biti spomenuti neki od češće primjenjivanih klasa kodova.

BCH (Bose Ray-Chadguri) je skupina kodova sa cikličnim ispravljanjem greške zasnovana na konačnim poljima (matematičko polje sa konačnim brojem elemenata). Preciznije definirano, BCH kod je svaki ciklički kod na Galois-ovim poljem $GF(q)$ (abeceda kodiranih simbola) sačinjenim od konačnog broja elemenata polja q koji su definirani sa $(d-1) \times n$ matricom nad $GF(q^m)$ (abeceda dekodiranih simbola) prikazanom pod (32) [46].

$$H = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^b & \alpha^{2b} & \dots & \alpha^{(n-1)b} \\ 1 & \alpha^{b+1} & \alpha^{2(b+1)} & \dots & \alpha^{(n-1)(b+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha^{b+d-2} & \alpha^{2(b+d-2)} & \dots & \alpha^{(n-1)(b+d-2)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Pritom, α je element n -tog reda Galois-ovog polja $GF(q^m)$, b je bilo koji cijeli broj veći od nula i manji od n , a d je cijeli broj veći od 2 i manji od n (pritom se $d=1$ i $d=n+1$ smatraju trivijalnim slučajevima). Redovi matrice H predstavljaju prvih n potencija uzastopnih potencija od α .

Postoje dva posebna slučaja BCH koda, primitivni i kod u uskom smislu (narrow-sense) BCH kod naziva se primitivnim ako je definiran preko primitivnog elementa α . Ako je element α Galois-ovog polja $GF(q^m)$ definiran je kao primitivan, tada duljina bloka koda iznosi $n = q^m - 1$, što predstavlja najveću moguću duljinu bloka koda za abecedu dekodiranja $GF(q^m)$.

BCH kod u uskom smislu je slučaj u kojemu je $b = 1$. U tom se slučaju neki izrazi kod dekodiranja znatno pojednostavljaju. Ipak češće se koriste BCH kodovi u kojima $b \neq 1$. Matrica za

provjeru parnosti primitivnog BCH koda uskog smisla sa ispravkom greške stupnja t izražena je u (33).

$$H = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 & \dots & \alpha^{(n-1)} \\ 1 & \alpha^{b+1} & \alpha^4 & \dots & \alpha^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha^{2t} & \alpha^{4t} & \dots & \alpha^{2t(n-1)} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Pri čemu je $n = q^m - 1$, a α predstavlja n -ti korijen jedinice u $GF(q^m)$. Svaki redak matrice H je matrica Fourierove transformacije konačnog polja i veličine n . Kodne riječi su n -torke čiji spektar sadrži nule na svakoj $2t$ frekvenciji.

RS (Reed-Solomon) skupina kodova predstavlja podskupinu BCH kodova. To su u osnovi BCH kodovi kod kojih je abeceda dekodera jednaka abecedi kanala.

RS kodovi su nebinarni ciklični kodovi sa m -bitnim nizovima, pri čemu m predstavlja pozitivni cijeli broj veći od 2 [47]. RS kod sa parametrima n (duljina bloka) i k (duljina poruke) m -bitnih simbola postoji ako je zadovoljen uvjet (34).

$$0 < k < n < 2^m + 2 \quad (34)$$

RS kodovi imaju najveću moguću minimalnu kodnu udaljenost u odnosu na ostale linearne kodove sa jednakim duljinama bloka. Kod nebinarnih kodova udaljenost između dvije kodne riječi definirana je prema Hammingovoj udaljenosti kao broj simbola po kojemu se nizovi međusobno razlikuju. Minimalna udaljenost između simbola za RS kodove dana je izrazom (35).

$$d_{min} = n - k + 1 \quad (35)$$

RS kod u stanju je ispraviti bilo koju kombinaciju od t ili manje pogrešaka, pri čemu je t izražen preko jednadžbe (36).

$$t = \left\lfloor \frac{d_{min} - 1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n - k}{2} \right\rfloor \quad (36)$$

Iz jednadžbe je vidljivo da je za ispravak t pogrešnih simbola dovoljno $2t$ paritetnih simbola. Jednostavnije rečeno, dekodirer ima $n - k$ redundantnih simbola, što je dvostruko više od ukupnog broja ispravljivih pogrešaka. Za svaku grešku jedan se redundantni simbol koristi za pronalazak greške a drugi za pronalazak ispravne vrijednosti. Sposobnost brisanja-ispravljanja koda izražena je sa (37).

$$\rho = d_{min} - 1 = n - k \quad (37)$$

Sposobnost istovremenog ispravljanja pogrešaka i ispravljanja brisanja izražena je preko (38), pri čemu je α broj uzoraka simbola-pogrešaka koje je moguće ispraviti, a γ broj uzoraka izbrisanih simbola koje je moguće vratiti/ispraviti.

$$2\alpha + \gamma < d_{min} < n - k \quad (38)$$

Svaki linearni kod u stanju je ispraviti $n - k$ uzoraka izbrisanih simbola ako se svaki $(n - k)$ -ti izbrisani simbol pojavljuje na paritetnom simbolu. RS kodovi međutim imaju svojstvo ispravljanja bilo kojeg $n - k$ simbola unutar bloka

LDPC (Low Density Parity Check) predstavljaju klasu linearnih blokovskih kodova [48]. Osnovno svojstvo ovih kodova je da omogućuju performanse koje iskorištavaju velik broj različitih kanala, te koriste kompleksne vremenski linearne algoritme dekodiranja. Također, vrlo su podobni

u slučajevima korištenja paralelizma. LDPC kodovi mogu biti korišteni vrlo blizu Shannonove granice (maksimalna brzina prijenosa kodiranih informacija zadanim komunikacijskim kanalom, za definiranu razinu smetnji) promatranog komunikacijskog kanala isključivo za velike dužine informacijskih blokova. Veća duljina informacijskog bloka povlači veću provjeru pariteta i veću generatorsku matricu.

LDPC kodovi prikazuju se grafički i pomoću matrica. Kod binarnog koda, matrica dimenzija $n \times m$ opisana je pomoću dva parametra. w_r opisuje broj jedinica po retku, a w_s broj jedinica po stupcu. Ovakvu matricu nazivamo matricom male gustoće ako zadovoljava uvjet $w_s \ll n$ i $w_r \ll m$.

Grafički prikaz LDPC koda naziva se još i Tannerov graf. Tannerov graf u potpunosti opisuje sam kod, ali i algoritam dekodiranja. Ovaj graf spada pod bipartitne grafove, dakle svaki čvor grafa grana se na dva djela i spaja na dva čvora različite vrste, odnosno varijabilni čvorovi i čvorovi za provjeru (check nodes).

LDPC kod smatra se pravilnim ako je w_s konstantan za svaki stupac, te je pri tome $w_r = \frac{w_s \cdot n}{m}$ također konstantna vrijednost za svaki redak.

GLDPC (Generalized Low Density Parity Check) predstavlja poboljšanje LDPC koda time što GLDPC kodovi nastoje dodatno smanjiti Shannonovu granicu uz sveukupno poboljšanje LDPC kodova. Ove kodove odlikuje, između ostalog, niska kompleksnost dekodiranja [49].

Dekodiranje GDLPC kodova zasnovano je na kombinaciji jednostavnog i brzog SISO (Soft-In-Soft-Out) dekodiranja kratkih linearnih blokova koda (poput BCH kodova). Izgradnja GDLPC koda vrši se zamjenom svake jednadžbe za provjeru parnosti globalnog LDPC koda matricom provjere parnosti jednostavnog linearnog blokovskog koda (lokalni kod). Kod lokalnih kodova male duljine koristi se BCJR (Bahl–Cocke–Jelinek–Raviv) algoritam ili verzija istog algoritma sa manjom kompleksnošću zvanog Max-Log-MAP. Vremenski efikasni MAP algoritmi dekodiranja osnovani na lokalnim kodovima pružaju precizne procjene varijabilnih čvorova globalnih LDPC grafova nakon vrlo malog broja iteracija (obično manje od deset). Dakle, niska razina kompleksnosti kodiranja te posebice dekodiranja čini FEC (Forward Error Correction) sheme osnovane na GLDPC kodovima vrlo privlačnima za uporabu u optičkim komunikacijama sa velikim brzinama prijenosa.

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection) je protokol odnosno algoritam koji u Ethernet mrežama omogućava pristup više od jednog čvora LAN mreže istovremeno [50]. CDMA/CD koristi slijedeće mehanizme pri implementaciji:

- Adapter može započeti odašiljanje u bilo kojem trenutku
- Adapter ne odašilje podatkovni okvir (frame) ako neki drugi adapter u tom istom trenutku odašilje podatkovni okvir
- Adapter prekida odašiljanje kada otkrije da drugi adapter odašilje (collision detection)
- Prije nego li što pokuša ponovo odaslati signal, adapter čeka nasumično određeni vremenski interval (obično manji od vremenskog intervala prijenosa podatkovnog okvira)

U slučaju da je propagacijsko kašnjenje između stanica jako malo, iskoristivost CSMA/CD protokola može se približiti 100%. Svaki adapter koristi CDMA/CD protokol bez međusobne koordinacije. Za svaki adapter protokol djeluje na sljedeći način:

1. Adapter dobiva PDU mrežnog sloja od osnovnog čvora (parental node), zatim priprema Ethernet podatkovni okvir i postavlja isti u međuspremnik (buffer).
2. Ako adapter odredi da u komunikacijskom kanalu nema drugog prometa (nema signala na ulaznom kanalu), započinje odašiljanje podatkovnog okvira. Ako pak adapter otkrije da je komunikacijski kanal zauzet, čekaći će dokle se signal ne prestane emitirati i tek tada šalje podatkovni okvir.
3. Pri prijenosu adapter provjerava energiju signala koje emitiraju ostali umreženi adapteri. Ako adapter pošalje cijeli podatkovni okvir bez da pritom pronađe signal sa drugih adaptera, to znači da je završio prijenos okvira.
4. Ako tokom odašiljanja podatkovnog okvira adapter otkrije signal iz drugih adaptera, staje sa odašiljanjem okvira te umjesto njega odašilje 48 bitni (6 bajta) prekidni signal (jam signal).
5. Nakon prekida i odašiljanja prigušivačkog signala adapter započinje eksponencijalnu fazu povrata (exponential backoff phase - algoritam koji koristi povratnu vezu kako bi multiplikativno smanjio trajanje procesa.). Točnije, pri prijenosu određenog podatkovnog okvira, nakon n -tog sudara za redom istog podatkovnog okvira adapter odabire nasumičnu vrijednost K iz skupa $\{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\}$. Pritom je

$m := \min(n, 10)$. Nakon određivanja, adapter čeka $K \cdot 512$ vremena potrebnog da se prenese jedan bit podataka (bit time), te se vraća na korak 2.

Svrha odašiljanja prekidnog signala je obavještanje ostalih adaptera koji trenutno odašilju o sudaru podatkovnih okvira. Svi čvorovi mreže kod CSMA/CD protokola imaju jednaki prioritet

G.709 (Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)) predstavlja komunikacijski protokol za komunikaciju putem optičkih mreža. U osnovi to je sučelje za OTN (Optical Transport Network). G.709 je standardizirana metoda prijenosa korištenjem valnih duljina elektromagnetskog zračenja unutar optičkog spektra. ITU G.709 standard osnovan je na ITU G.872 (Architecture of optical transport networks) standardu. Postoje tri osnovne zadaće koje ovaj standard ispunjava [51]:

1. Definiranje optičke prijenosne hijerarhije OTN-a
2. Definiranje funkcionalnosti njegove dodatne podrške za optičke mreže koje koriste više valnih duljina.
3. Određuje strukturu podatkovnih okvira, brzine prijenosa i propusnosti te formate za mapiranje signala klijenta.

OTN kojeg definira G.709 standard sastavljen je od osnovnih odnosno kritičnih komponenti, završnih točki i načina na koji te komponente međusobno komuniciraju. Te sastavne komponente su:

- OTS (Optical Transport Section)
- OMS (Optical Multiplex Section)
- OCh (Optical Channel)
- OTU (Optical Transport Unit)
- ODU (Optical Data Unit)
- OPU (Optical Channel Payload Unit)

Završetak OTS, OMS i OCh slojeva izveden je na optičkoj razini OTN-a. na kraju OTU-a mogu se dodati daljnje funkcije, pošto je to digitalni sloj.

Jedno od osnovnih razloga zbog kojih se koristi G.709 je FEC (Forward Error Correction). U standardu se koristi RS kod kako bi se redundantne informacije vezale uz preneseni signal. Prijemno sučelje koristi dodatne informacije kako bi odredilo i ispravilo greške nastale pri prijenosu.

ITU G.709 FEC rastavlja podatkovni okvir na 16 podatkovnih tokova. Po podatkovnom toku, moguće je ispraviti do 8 pogrešnih bajtova. Pritom se svaki redak rastavlja na pod retke. Protokol koristi OB (Overhead Byte) i 238 podatkovna bajta pri proračunu 16 paritetnih bitova od kojih se tada sastavlja 255 blokova bajtova [52].

Od protokola vezanih uz FEC DWDM sustava potrebno je još spomenuti i ITU G.975 (Forward error correction for submarine systems) i ITU G.975.1 (Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems) protokole.

4.5. LED – Light Emitting Diode

LED (Light Emitting Diode) je poluvodička komponenta koja pomoću fizikalnog svojstva elektroluminiscencije (za razliku od termički pobuđenog zračenja odnosno žarenja) zrači svjetlost u vidljivom (400 – 700 nm), infracrvenom i ultraljubičastom području. Svjetleća dioda koristi, kao i svaka dioda, PN spoj poluvodiča, što ju čini polarnim poluvodičkim uređajem. P tip poluvodiča obogaćen je primjesama koje ga čine pretežito pozitivnim (sadrži tzv. šupljine koje su pozitivno nabijene) dok je N tip poluvodiča obogaćen primjesama koje ga čine pretežito negativnim (sadrži višak elektrona).

Kao i kod svake diode, struja teče samo u jednome smjeru. Između P i N tipa poluvodiča nalazi se osiromašeni sloj [53]. Kod nepropusno polarizirane diode, osiromašeni sloj se povećava te struja ne teče. Energija elektrona je kvantizirana, odnosno postoje samo točno određene energetske razine na kojima se elektroni mogu nalaziti. Kada se elektroni nalaze unutar nekakvog sustava sa većim brojem atoma, svaki elektron mora biti na drugoj razini. Stoga se elektroni unutar takvog većeg sustava organiziraju u energetske pojaseve međusobno razdvojene zabranjenim pojasevima. Pojas sa nevezanim elektronima zove se vodljivi pojas a pojas sa elektronima vezanim za atome strukture poluvodiča valentni pojas. Pri prijelazu elektrona iz valentnog u vodljivi pojas stvara se par šupljina-elektron (proces generacije para). U suprotnom slučaju, kada elektron prijeđe iz vodljivog u valentni pojas poništava se par šupljina-elektron u procesu rekombinacije [54].

Kod poluvodičkih LED dioda koriste se poluvodiči sa zabranjenim pojasom između 1.8 i 3.1 eV. Kako bi se omogućila efikasna rekombinacija materijali bi trebali imati izravne tranzicije između pojaseva, no to nije slučaj ni kod Germanija ni kod Silicija (najčešće korišteni poluvodiči) kod kojih su zabranjeni pojasevi premaleni. K tome, poluvodič za korištenje u LED diodama mora se moći proizvesti u monokristalnom obliku (volumni kristal ili epitaksijalni slojevi). Kombinacijama elemenata iz III i V grupe u periodičnoj tablici elemenata moguće je dobiti poluvodičke materijale sa zabranjenim pojasovima između 1.8 i 6 eV [55]. U tablici 5 prikazani su spojeva elemenata iz III i V skupine sa pripadajućim vrijednostima za zabranjene pojaseve (u eV).

Tablica 5. Poluvodiči dobiveni spojevima elemenata iz III i V skupine

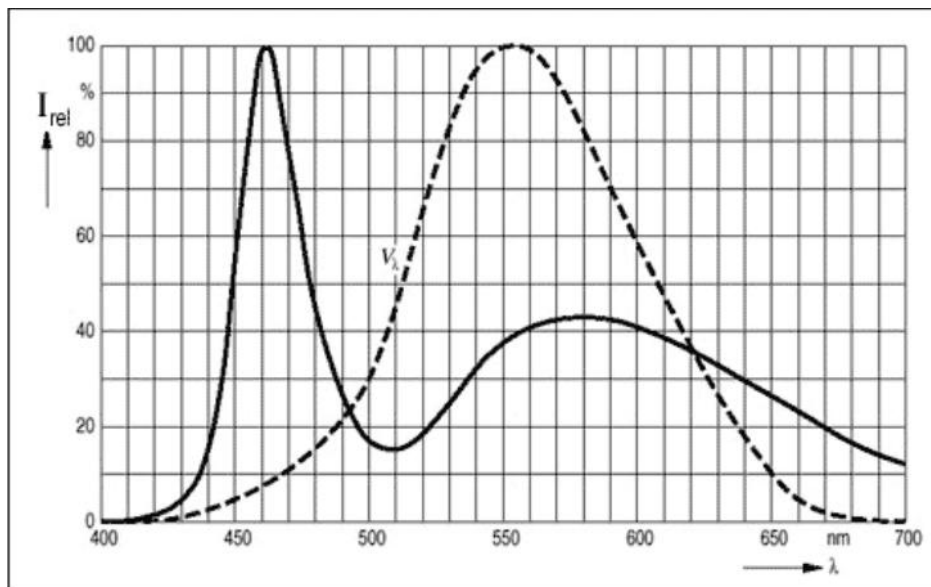
Izvor: Physics of Optoelectronic Devices Light Emitting Diodes; VISHAY-TELEFUNKEN; 2000

III		V			
		N	P	As	Sb
Al	Spoj	AlN	AlP	AlAs	AlSb
	eV	6.0	2.45	2.15	1.65
Ga	Spoj	GaN	GaP	GaAs	GaSb
	eV	3.4	2.26	1.42	0.73
In	Spoj	InN	InP	InAs	InSb
	eV	1.95	1.34	0.36	0.18

Najveći zabranjeni pojasevi nalaze se u grupi nitrida (spojevi dušika) (GaN i InN). Ti se materijali koriste kod poluvodičkih LED dioda koje zrače plavu svjetlost. Spojevi iz III-V skupine mogu stvoriti miješane kristale. Najvažniji miješani kristali korišteni kod LED tehnologije su GaAs-AlAs, GaAs-GaP, InP-GaP-AlP. U neizravnom području GaAsP iskoristivost zračeće rekombinacije može se znatno povećati dodavanjem primjesama dušika, što smanjuje zabranjeni pojas za otprilike 0.66 eV.

Jedno od osnovnih svojstva LED dioda je da je zračenje gotovo monokromatsko, te ga se može okarakterizirati vršnom valnom duljinom (λ_p) i srednjim prosjekom spektralne širine ($\Delta\lambda$). Najmanji $\Delta\lambda$ imaju LED sa izravnom međupojasnom rekombinacijom. Drugi mehanizmi i

materijalne nehomogenosti dovode do šire emisije. Iz toga je moguće zaključiti da iskoristivost opada smanjivanjem valne duljine. Za slučajeve kada se koristi detektor osnovan na Siliciju važan parametar LED diode je zračena snaga (ϕ_s). Svjetlosni tok (ϕ_v) je pak važniji kad se razmatra ljudsko oko kao prijemnik. Dodatni važni parametri su pad napona propusno polarizirane LED (V_F) koji za bijele LED iznosi (ovisno o upotrjebljenoj tehnologiji) oko 3.6 V, te vrijeme uključivanja (t_r) i vrijeme isključivanja (t_f). Za bijelu LED diodu i jedno i drugo iznosi oko 30 nanosekundi (ns).



Slika 18. Graf relativnog intenziteta zračenja s obzirom na valnu duljinu za YAG:Ce bijele LED

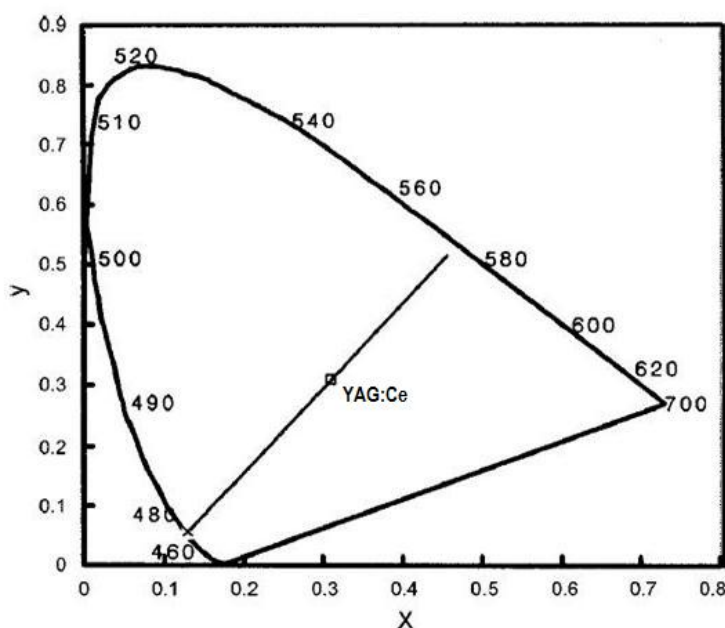
Izvor: Standard and White LED Basics and Operation: Application note 3070; Maxim Integrated (TM); 2004

Bijele LED diode ne mogu se postići izravnim zračenjem, pošto kao što je to ranije napomenuto LED zrače vrlo uski, gotovo monokromatski pojas valnih duljina. Međutim, postoje tehnike kojima se može dobiti bijela boja zračene svjetlosti. Miješanjem dviju ili više različitih boja (korištenjem principa konverzije luminescencije) moguće je dobiti privid bijele boje zračenja. InGaN LED prekriven neorganskim fosforom otopljenim u Siliciju je jedno od mogućih rješenja. Dio plave boje biva upijen od YAG:Ce-Fosfatnog (Itrij-Aluminij-Granat

obogaćen Cezijem) pretvarača, te naknadno biva odaslan na višoj valnoj duljini. Žuta i plava su komplementarne boje, stoga se njihovim miješanjem dobiva privid bijele boje. Na slici 18 prikazan je relativni intenzitet zračenja s obzirom na valnu duljinu za YAG:Ce LED bijele boje.

Trenutno većina bijelih LED dioda koristi YAG:Ce tehnologiju, no postoje i drugačiji načini generiranja bijele boje, npr. Slično kao i kod YAG LED dioda, moguće je koristiti UV (ultra ljubičastu) LED kao podlogu na koju se premazuje fosforescentni sloj. Obično je u pitanju trikromatski RGB (Red-Green-Blue) fosforescentni sloj. Treća varijanta je korištenje trikromatskog RGB LED izvora odnosno LED sa ugrađenim jednim crvenim LED izvorom, jednim zelenim i jednim plavim LED izvorom. Kombinacija tih triju boja, slično kao i kod bijele LED sa UV podlogom daje ukupnu bijelu zračenu svjetlost. Ključna stvar u dobivanju bijele boje zračenja je pronalaženje kromatskih koordinata u kromatskom dijagramu. Slika 19 prikazuje kromatski dijagram, te je na njemu označena pozicija YAG:Ce bijele LED diode.

Sa povećanjem struje kroz diodu osnovanu na InGaN tehnologiji dolazi do pomaka kromatskih koordinata, te se stoga treba uzeti u obzir pri uporabi LED diode.



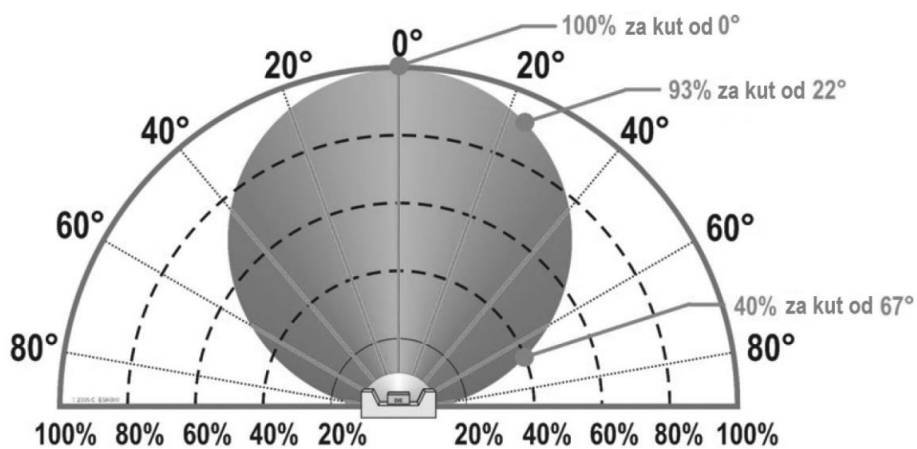
Slika 19. Kromatski dijagram sa naznačenom pozicijom YAG:Ce LED izvora zračenja bijele svjetlosti

Izvor: Phosphor for Blue LED to White Light Conversion; <http://loradchemical.com/news/phosphor-for-blue-led-to-white-light-conversion.html>; Lorad Chemical corporation; 1. 3. 2013

Trenutno se kod OW komunikacija razmatra korištenje bijelih LED izvora koji bi služili dvojnu ulogu rasvjete i odašiljača. Zbog brzog vremena odziva i mogućnosti modulacije, LED se postavlja kao jako kvalitetna tehnologija za ostvarivanje lokalnih bežičnih optičkih komunikacijskih mreža, odnosno točnije, pristupnih mreža. Trikromatska RGB LED dioda nudi zanimljivu mogućnost multipleksiranja komunikacijskog signala tako što bi se za svaki signal koristila jedna boja. Dakle, riječ je o obliku WDM. Na žalost su u tom slučaju na raspolaganju samo tri multipleks kanala, no korištenjem CDMA moguće je dodatno povećati broj multipleks kanala.

S druge strane, kako je YAG LED trenutno najraširenija na tržištu, na toj tehnologiji leži i fokus istraživanja. Dokazano je da se korištenjem ove tehnologije mogu postići brzine prijenosa i do 800 Mbit/s korištenjem plavog filtra na prijemniku [56].

LED izvori zrače po Lambertovom zakonu kosinusa, te se stoga smatraju Lambertovim izvorima zračenja. Dijagram zračenja LED diode prikazan je na slici 20.



Slika 20. Dijagram zračenja Lambertovog izvora (poluvodička LED dioda) u polarnim koordinatama

Izvor: Light matters – Designing illumination systems with high-brightness LEDs; Carl Eskow; 2008.

4.6. Laser LED

Laser je izvor kolimirane koherentne svjetlosti gotovo monokromatskog spektra zračenja. Sam naziv je akronim (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Od svog otkrića do danas, laser je promijenio jako tehnoloških područja, od znanstvenog istraživanja, preko obrade i proizvodnje pa sve do komunikacijskih tehnologija. Kao što mu i sam naziv kaže, laser zrači svjetlost preko mehanizma stimulirane emisije zračenja.

Stimulirana emisija je proces zračenja u kojemu se prethodno stimulirani elektron pri prijelazu na nižu energetska razinu zrači jedan foton. Elektron biva stimuliran na višu energetska razinu preko upadnog fotona. S obzirom da elektron ne može ostati na višoj energetska razini ako postoji prazno mjesto u nižoj energetska razini, on će eventualno pasti ponovo na nižu energetska razinu, te će pritom odaslati jedan foton. Proces prijelaza elektrona naziva se populacijska inverzija, a pošto je zračen atom dobiven stimuliranjem elektrona u višu energetska razinu, ova se pojava naziva stimulirana emisija. Foton dobiven stimuliranom emisijom ima jednaki smjer, polarizaciju, fazu i frekvenciju kao i upadni foton koji stimulira elektron u višu energetska razinu.

Laser ima četiri osnovna sastavna djela, a to su:

1. Rezonantna komora
2. Izvor energije (za stimuliranje elektrona)
3. Potpuni reflektor
4. Izlazni reflektor (djelomično reflektirajuća površina)

Rezonantna komora je zapravo materijal u kojemu se želi ostvariti stimulirana emisija fotona. Može biti načinjena od plina, tekućine ili poluvodiča. Jedan kraj rezonatora u potpunosti reflektira svjetlost, dok drugi kraj samo djelomično. Cjelokupni sklop rezonatora i zrcala naziva se optički rezonator. Kada vanjskom pobudom počinje stimulirana emisija unutar materijala, svjetlost se nekoliko puta reflektira od krajeva rezonantne komore. Time se dobiva pojačanje ukupne izlazne snage zračenja. Kada zračena svjetlost postane dovoljno jaka, jedan njen dio prolazi kroz djelomično reflektirajuću površinu i biva zračena u obliku Gausove zrake.

Rezonatori koji koriste plinove i tekućine ostvaruju stimuliranu emisiju preko svjetlosne pobude, dok se u poluvodičkim materijalima pobuda vrši preko atoma visoke energije unutar kristalne rešetke.

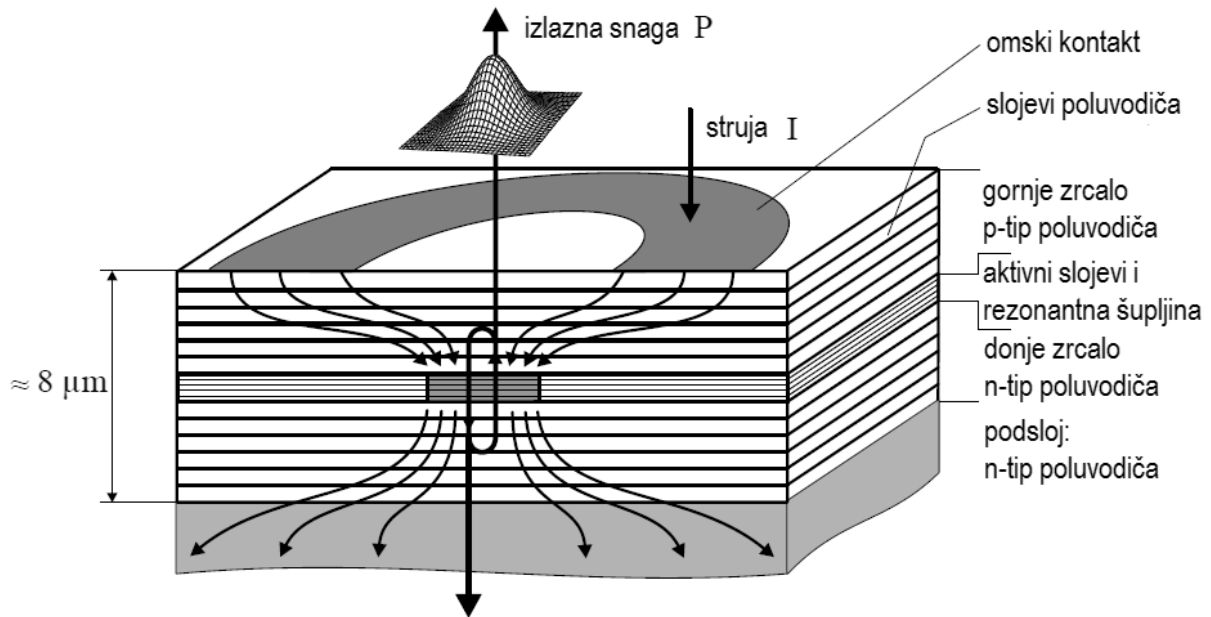
Poluvodičkih lasera postoji više vrsta, no s obzirom da se za primjenu u optičkim komunikacijama koristi VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) u nastavku će upravo ova vrsta poluvodičkog lasera biti detaljnije opisana.

VCSEL radi na osnovnom principu svakog lasera. Unutarnja šupljina u kojoj su sadržani slojevi koji vrše pojačanje i stimuliranu emisiju, obloženi su vodljivim slojevima koji služe kao zrcala. VCSEL laseri izrađeni za zračenje valnih duljina od 850 do 980 nm imaju otprilike 8 μm materijala nanesenog epitaksijalnim rastom, dok je aktivno područje od samo nekoliko kvantnih zdenaca (quantum well) debljine do desetak nm [57].

Kvantni zdenac (kvantna jama) je posebna vrsta heterostrukture (struktura dobivena spajanjem više materijala, obično u slojevima) kod koje je jedan tanki sloj (zdenac) omeđen sa dva zaporna sloja. Središnji „zdenac“ ograničava kretanje čestica (elektrona) i kvazi čestica (šupljina) na dimenziju okomitu na površinu sloja. Sloj zdenca obično je debljine četrdesetak atomskih slojeva, odnosno 100 Å (Angstroma). Zbog te male debljine sloja zdenca i elektroni i šupljine pokazuju isključivo valna svojstva. Štoviše, dozvoljena stanja unutar strukture odgovaraju stojnim valovima i upravo je njihov smjer okomit na sloj zdenca. Samo valovi određenih valnih duljina mogu stvoriti stojni val unutar zdenca, pa je stoga sustav kvantiziran [58].

Umjesto kristalnog rasta, kod izrade češće se koriste MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) ili MBE (Molecular Beam Epitaxy) tehnike. Kod jednostavnih poluvodičkih VCSEL struktura struja se dovodi preko omskih kontakata na gornju epitaksijalnu stranu, te na zadnju stranu pod sloja (substrate). Kako bi se struja ograničila na određeno područje moguće je koristiti više različitih metoda, poput ionske implantacije, te se tako dobivaju poluvodička područja visoke otpornosti. Još jedna metoda za ograničavanje struje je selektivna lateralna oksidacija. Obično se vrši na poluvodičkom sloju sa visoki sadržaje aluminijske i debljine desetak nanometara.

Procesom implantacije protona dobivaju se VCSEL velike pouzdanosti pošto je sam proces doveden gotovo do savršenstva, dok procesom selektivne oksidacije smanjuje optički gubitak unutar optičke rezonantne šupljine, te se njima mogu izraditi VCSEL sa performansama boljim od bilo kojih drugih. Na slici 21 prikazan je presjek strukture tipičnog VCSEL poluvodičkog lasera.



Slika 21. Presjek tipične strukture VCSEL poluvodičkog lasera sa označenim slojevima

Izvor: Operating Principles of VCSELs; Rainer Michalzik, Karl Joachim Ebeling; 2006

Gornje i donje zrcalo predstavljaju slojeviti Braggov reflektor (Braggovo zrcalo). Sastavljeni su od niza naizmjeničnih slojeva (parova) visokog i niskog indeksa loma, svaki debljine četvrtinu valne duljine. Obično, svako zrcalo sadrži dvadeset Braggovih parova. Prvi sloj bilo gornjeg ili donjeg zrcala mora u pravilu imati manji indeks loma od susjednog graničnog provodnog sloja. Potreba za naizmjeničnim slojevima različitih indeksa loma zadržava parnost Braggovih parova u gornjem zrcalu VCSEL poluvodičkog lasera zasnovanom na AlGaAs. Kod donjeg zrcala se pak u tom slučaju koristi samo jedan sloj debljine četvrtine valne duljine i jedinstvenog indeksa loma, susjednog pod sloju GaAs visokog indeksa loma. Ovo vrijedi pod uvjetom da gornje zrcalo graniči sa materijalom niskog indeksa loma (zrakom) [57].

Uzmu li se u obzir nizovi indeksa loma Braggovog reflektora $\bar{n}_c | (\bar{n}_1 | \bar{n}_2)^{M_{Bt}} | \bar{n}_s$ ili $\bar{n}_c | (\bar{n}_1 | \bar{n}_2)^{M_{Bb}} | \bar{n}_1 | \bar{n}_s$, te pretpostavi li se da val upada kroz obložni materijal indeksa loma \bar{n}_c u pod sloj indeksa loma \bar{n}_s , vršna vrijednost refleksije gornjeg ili donjeg zrcala sa M_{Bt} ili M_{Bb} parnih slojeva definiran je pri Braggovoj valnoj duljini λ_B određen je izrazom (39).

$$R_{t,b} = \left(\frac{1-b_{t,b}}{1+b_{t,b}} \right)^2 \quad (39)$$

Pritom je b_t definiran sa (40) a b_b sa (41).

$$b_t = \frac{\bar{n}_s}{\bar{n}_c} \left(\frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \right)^{2M_B t} \quad (40)$$

$$b_b = \frac{\bar{n}_1^2}{\bar{n}_c \bar{n}_s} \left(\frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \right)^{2M_B b} \quad (41)$$

U jednadžbama (40) i (41) vrijedi $\bar{n}_1 < \bar{n}_2$. Uz to, debljina slojeva $d_{1,2}$ odabire se preko izraza (42).

$$d_{1,2} = \frac{\lambda_B}{(4\bar{n}_{1,2})} \quad (42)$$

Reflektivnost Braggovog zrcala je dakle funkcija broja parova slojeva izraženih preko jednadžbi (39), (40) i (41).

VCSEL poluvodički laseri nisu jedina vrsta poluvodičkih lasera. Uz njih postoje još i EEL (Edge Emitting Lasers) poluvodički laseri. Osnovni koncept generiranja i zračenja koherentne, kolimirane zrake ostaje isti, no ipak VCSEL ima nekoliko prednosti u odnosu na EEL.

Prvo i osnovno, EEL zbog samog načina rada emitira svjetlost iz bočnog brida poluvodičke komponente. Dakle, kako bi se komponenta provjerila mora se prvo izrezati iz wafera ne kojemu je izgrađena, zatim spojiti na kontakte i tek onda testirati. U slučaju neispravne komponente wafer je uništen i nije ga moguće nadograditi. Kod VCSEL lasera pojedine komponente moguće je testirati još na waferu, pošto koherentna kolimirana zraka zrači u smjeru normale u odnosu na površinu

wafera. U tom slučaju moguće je dakle izvršiti testiranje wafera bez njegovog uništavanja i po potrebi ponoviti neke od procesa u izgradnji VCSEL-a. to u konačnici dovodi do znatno većeg broja proizvedenih ispravnih komponenti, što u konačnici smanjuje cijenu same komponente.

Druga prednost nad VCSEL-a je što je kod EEL poluvodičkim laserima zračena svjetlost slabije kolimirana, te njena projekcija odstupa od idealne Gaussove razdiobe znatno više nego li je to slučaj za VCSEL (zrači eliptičnu Gausovu zraku). Kod EEL lasera je dakle nužno upotrijebiti kolimacijsku leću.

Zbog kratkog optičkog rezonatora zračena valna duljina VCSEL poluvodičkog lasera određena je rezonancijom šupljine, za razliku od Fabry-Pérot EEL poluvodičkih lasera kod kojih je ona uglavnom ovisna o vršnom dobitku. Pomak zračene valne duljine uzrokovan termalnim uvjetima ovisan je uglavnom o promjenama prosječnog indeksa loma u rezonatoru, te otprilike manjim djelom termalnom ekspanzijom slojeva poluvodiča. Dakle, pomak zračene valne duljine ovisan je o sastavu materijala Braggovih zrcala i unutarnje šupljine. Za VCSEL poluvodičke lasere koji zrače na području od 800 do 1000 nm pomak je obično 0.07 nm/K.

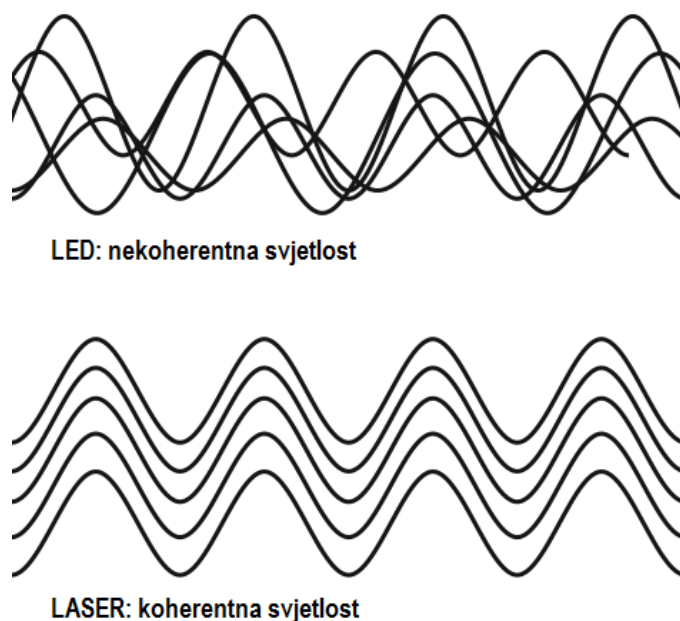
Kod korištenja VCSEL poluvodičkih lasera u digitalnim modulacijama tri faktora djeluju na performanse modulacije. Jedno od tih faktora je kašnjenje uključivanja. Kašnjenje uključivanja (turn-on delay) javlja se u slučaju kada je prednapon VCSEL-a ispod granice te treba vremena da se u aktivnom sloju postigne tražena gustoća praga nosioca. Kod rada bez korištenja prednapona kašnjenje uključivanja prelazi 100 ps.

Titranje uključivanja (turn-on jitter) kao standardna devijacija kašnjenja uključivanja uzrokovano je kolebanjima uzrokovanim spontanom emisijom te iznosi otprilike 10 ps, te stoga ne nameće nikakva ograničenja, čak ni za komunikacijske sustave brzina prijenosa do 10 Gbit/s.

Efekt uzoraka bitova (bit pattern effects) ovisi o memorijskim svojstvima spremnika nosioca i dovodi do promjenama u vremenu punjenja šupljine. Kako bi se smanjio efekt uzoraka bitova, poželjno je da vrijeme odziva VCSEL-a bude što kraće. S obzirom da to utječe na neke druge parametre, potrebno je pronaći optimalne vrijednosti vremena odziva.

4.7. Nekoherentni i parcijalno koherentni izvori zračenja

Klasična Gausova zraka koju zrači laser, zrači kolimiranu i koherentnu svjetlost. Koherentnost je svojstvo vala koje omogućava konstantnu vremensku i prostornu interferenciju. Jednostavnije rečeno, svjetlost je koherentna ako su svi zračeni svjetlosni valovi u fazi. Na slici 22 prikazana je usporedba nekoherentne svjetlosti koju zrači LED i koherentne svjetlosti koju zrači laser.



Slika 22. Usporedba koherentne i nekoherentne svjetlosti

Atmosferski poremećaji i nehomogenosti ograničavaju brzinu prijenosa podataka kod FSO komunikacija pošto je koherentna svjetlost koju oni koriste relativno podložna tim poremećajima. Laserska svjetlost podložna je trima glavnim posljedicama uzrokovanih uvjetima medija prijenosa podataka (atmosferskim uvjetima).

Prva posljedica je iskrivljavanje fazne fronte zrake zbog promjena u indeksu loma, što u konačnici dovodi do kolebanja intenziteta zrake odnosno treperenja (*scintillation*).

Druga posljedica su nasumična skretanja uzrokovana vrtložnim strujama kojima je promjer rotacije veći od promjera zrake. Ova se pojava naziva lutanje zrake (*beam wandering*).

Treća posljedica je povećana divergencija zrake zbog prostiranja kroz nehomogenu i vrtložnu atmosferu.

Treperenje predstavlja po mogućnosti najgori problem kod FSO komunikacije, te uzrokuje znatno povećanje BER-a (Bit Error Ratio) a time i pogoršanje performansi samog komunikacijskog sustava. Npr. za gigabitni komunikacijski nije moguće postići komunikacijsku udaljenost između čvorova veću od 2.5 km (čak i uz optimalne uvjete) uz BER od 10^{-9} . Treperenje je moguće smanjiti korištenjem parcijalno koherentnih izvora svjetlosti [59]. Smanjenje varijacija u intenzitetu (treperenja) moguće je postići korištenjem parcijalno koherentne svjetlosne zrake i prijemnika sa prosječnom vremenskom detekcijom (*time averaging detector*). Na žalost ova tehnika nije upotrebiva na komunikacijskim sustavima sa propusnošću iznad gigabita, iz razloga što korelacijsko vrijeme između različitih prostorno koherentnih točaka mora biti kraće od vremena odziva prijemnika (fotodiode). To dakle znači da SLM (Spatial Light Modulator) mora raditi na frekvenciji koja je viša od maksimalne propusnosti fotodiode. Pošto propusnost fotodiode mora biti viša od propusnosti komunikacijskog kanala, najviša brzina prijenosa podataka ograničena je najvišom frekvencijom SLM-a.

Razvijene ideje iskorištavanja parcijalno koherentne svjetlosti zasnovane na TAPCB (Time Averaging of Partially Coherent Beam) u kombinaciji sa spektralnim kodiranjem (koji se kod optičkih vlakana koristi za CDMA) omogućile bi korištenje kolimirane zrake parcijalno koherentne svjetlosti za veće udaljenosti, ali i LED izvore za manje udaljenosti [59]. U impulsnom načinu rada, svaki impuls može sadržavati kilobajta podataka. Dakle, ako je frekvencija pulsiranja 1MHz propusnost ulazi u područje Gbit/s.

Strogo govoreći, laserskim izvorom nije moguće dobiti potpuno koherentnu svjetlost. Dakle, svaki je izvor svjetlosti koji bi se potencijalno mogao koristiti u bežičnim optičkim komunikacijama parcijalno koherentni izvor. Ipak, svjetlost koju zrači laser vrlo je koherentna i gotovo monokromatska, pa se stoga laser kao takav smatra koherentnim izvorom.

Pri prostiranju kroz prostor, parcijalno koherentna svjetlost podilazi spektralni pomak [60]. Jedna vrsta parcijalno koherentne zrake opisuje se tzv. GSM (Gaussian Schell Model) modelom. Varijacija ovog modela koja uvodi dodatna poboljšanja je TGSM (Twisted Gaussian Schell Model). Ova dva modela koriste Gaussovu korelacijsku funkciju kako bi opisali svojstva difuzora, što dovodi do pojednostavljenja valne jednadžbe. GSM model za uniformnu spektralnu gustoću zadan je izrazom (43).

$$W^{(0)}(\rho_1, \rho_2, \omega) = S^{(0)}(\omega) e^{-\frac{(\rho_2 - \rho_1)^2}{2\sigma_g^2}} \quad (43)$$

Gdje $S^{(0)}(\omega)$ predstavlja spektralnu gustoću a σ_g mjeru koherentnosti za duljinu polja. Dvodimenzionalni poprečni vektor koji određuje poziciju točke na plohi prostiranja izražen je sa $\rho = (x, y)$ [61].

Maksimum intenziteta zračenja javlja se uvijek u geometrijskom fokusu, bez obzira na iznos spektralne gustoće. razdioba spektralne gustoće simetrična je sa fokalnom točkom i osi prostiranja.

Osim poništavanja koherentnosti laserskog izvora, moguće je i iskoristiti nekoherentnost nekih drugih izvora poput npr. LED dioda. Iako je LED zapravo izvor koji zrači svjetlost po Lambertovom zakonu kosinusa (difuzni izvor) moguće je prilagoditi zračenu svjetlost za korištenje u FSO sustavima na veće udaljenosti. Konkretno, kako bi se LED izvor mogao koristiti u FSO sustavima potrebno je kolimirati zračenu svjetlost. To se izvodi kolimacijskom lećom, međutim javlja se problem cijene klasične leće, pošto bi takva leća za konkretan komunikacijski sustav morala biti razmjerno velikih dimenzija. Alternativa klasičnoj staklenoj konveksnoj kolimacijskoj leći je fresnelova leća. Fresnelova leća znatno je jeftinija, a učinak joj je u osnovi jednak klasičnoj staklenoj leći, barem što se tiče primjene u kolimaciji difuzno zračene svjetlosti.

Korištenjem ove metode izvedeni su pokusi sa zanimljivim i ohrabrujućim rezultatima [62]. Korištenjem lako nabavljivih komponenti moguće je postići izrazito velike udaljenosti prijenosa. Sama činjenica da su komponente sustava lako nabavljive čine sustav vrlo jeftinim. Ipak, propusnost podataka u takvim sustavima ne zadovoljava moderne komunikacijske potrebe, no cilj pokusa je ionako demonstracija izvedivosti FSO veze korištenjem nekoherentnog kolimiranog izvora.

Na atmosferski prijenos uvelike utječe apsorpcija, raspršenje i turbulencija. Prijenos zračenja T_{A-S} koje putuje kroz atmosferu opisuje se preko Beerovog zakona izrazom (44) [63].

$$T_{A-S} = \frac{P_r(z)}{P(0)} = e^{-\sigma z} \quad (44)$$

U izrazu (34), $P_r(z)$ označava snagu zračenja signala na prijemu u točki z , a $P(0)$ početnu, zračenu snagu. Atenuacija odnosno prigušenje σ za zadanu duljinu dan je izrazom (45).

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550nm} \right)^{-q} \quad (45)$$

U gornjem izrazu V označava vidljivost (izraženu u km), λ valnu duljinu (u nm), a q razdiobu veličina raspršujućih čestica u atmosferi. Za $V > 50km$ (velika vidljivost) razdioba iznosi 1.6, za $6km < V < 50km$ (prosječna vidljivost) iznosi 1.3, za $1km < V < 6km$ iznosi $0.16V+0.34$, za $0.5km < V < 1km$ (izmaglica) $V - 0.5$, te nula za vidljivost $V < 0.5km$ (magla).

Totalni optički prijenos je dakle izražen kao umnožak atmosferskog prijenosa T_{A-S} i prijenosa optičkih elemenata T_{OPT} (leće) preko jednadžbe $T_{TOT} = T_{A-S} \cdot T_{OPT}$. Tablica 6 prikazuje vrijednosti atmosferskog prijenosa proračunate pomoću Beerovog zakona za neke vremenske atmosferske prilike.

Tablica 6. Vrijednosti atmosferskog prijenosa (T) za određene vidljivosti

Izvor: Reliability Analysis of FSO Communication Links using Aberrated Divergent Rectangular Partially Coherent Flat-Topped Beam; B. Ghafary, F. D. Kashani, E. Kazemian; 2013

Vremenski uvjeti	T(dB/km)	V(km)
Izmaglica	-2.4203	3
	-1.9095	3.5
	-1.5379	4
Vrlo lagana izmaglica	-1.2583	4.5
	-1.0424	5
	-0.8722	5.5

5. Prijemne Tehnologije

Prijam optičkog signala igra jako važnu ulogu u performansama bilo FSO, bilo OW komunikacijskih sustava. Ovisno o korištenoj tehnologiji moguće je drastično utjecati na BER (Bit Error Ratio) i SNR (Signal to Noise Ratio). S obzirom da se radi o komunikacijama vidljivim svjetlom, očito je da prijemni element mora biti neka vrsta foto detektora. Razvojem poluvodičke tehnologije, broj raspoloživih uređaja koji detektiraju elektromagnetsko zračenje u vidljivom spektru se umnogostručio. U osnovi, u kategoriju fotoosjetljivih komponenti mogu se ubrojiti komponente koje se primarno koriste za razne namjere, od fotonaponskih ćelija do CCD uređaja.

Općenito, za potrebe modernih širokopojasnih komunikacija potrebno je koristiti prijemne uređaje koji su u stanju podržati brzine prijenosa zadane potrebama 4G komunikacijskih sustava. Uz to, s obzirom na relativno velike udaljenosti prijenosa kod FSO komunikacija vidljivi svjetlom, poželjno je da prijemni uređaji imaju dovoljnu osjetljivost da mogu bez gubitaka prihvatiti signal.

Fotonaponske ćelije u tom pogledu ne predstavljaju baš pretjerano kvalitetnu prijemnu komponentu. Odziv im je relativno spor a dimenzije velike. Foto naponska ćelija je primarno izrađena kako bi sa što većom iskoristivošću pretvorila energiju u spektru valnih duljina sadržanih u sunčevoj svjetlosti u električnu energiju. Fotonaponska ćelija se može eventualno upotrijebiti za prikaz koncepta komunikacije vidljivim svjetlom, ali na žalost ništa više od toga (za trenutne tehnologije fotonaponskih ćelija).

CCD (Charge Coupled Device) uređaji koriste se u uređajima za digitalizaciju slike (digitalni fotoaparati, digitalne video kamere). CCD uređaji dovode niz zanimljivih prednosti koje bi bilo moguće iskoristiti kod FSO komunikacijskih sustava, no kao i kod fotonaponskih ćelija, nedostaci su zapravo ti koji određuju koliko je sam uređaj primjenjiv u komunikacijske svrhe. CCD uređaji imaju vrlo spor odziv (s obzirom na ciljane brzine prijenosa podataka). Razlog tome je njihovo osnovno načelo rada. CCD uređaj je u stvari posmični registar u kojemu su memorijske komponente osjetljive najvećim djelom na spektar elektromagnetskog zračenja vidljive svjetlosti. Nakon ekspozicije svjetlosnom zračenju, svaki „piksel“ posmičnog registra zabilježi određeni intenzitet u obliku naponskog iznosa. Taj se napon serijski pomiče na izlaz i slika se na taj način digitalizira. Upravo je proces digitalizacije taj koji oduzima najviše vremena i najviše usporava

odziv. CCD uređaji međutim mogu biti iskorišteni u SO komunikacijskim sustavima, ne kao prijemni elementi, nego kao dio sustava upravljanja automatizacijom uspostavljanja veze. Npr., CCD uređajem moguće je odrediti poziciju izvora i automatski postaviti (ili po potrebi kompenzirati) poziciju prijemnog podsustava djelujući kroz računalnu povratnu vezu na aktuatore za pozicioniranje.

Od poluvodičkih komponenti koje je moguće upotrijebiti kao prijemne elemente ostaju samo fotodiode. To je na kraju krajeva i najočitiji izbor za prijemnu komponentu u bežičnim optičkim komunikacijama (bilo FSO ili OW) s obzirom da se ta tehnologija već naveliko koristi u optičkim komunikacija putem optičkih vlakana.

Fotodiode u osnovi koriste fotonaponski efekt (kao i fotonaponske ćelije) kako bi na terminalima P i N tipa poluvodiča od kojih su napravljene dale razliku potencijala, odnosno napon ovisan o upadnom svjetlosnom zračenju. Iako su u osnovi i fotonaponske ćelije poseban slučaj fotodiode, izraz fotodioda će se u ovome radu odnositi na senzore kojima je namjena detekcija intenziteta svjetla. Fotodiode se mogu klasificirati u četiri osnovne vrste, a to su [64]:

1. PN fotodiode
2. PIN fotodiode
3. Shottky fotodiode
4. Lavinske fotodiode (APD – Avalanche Photodiode)

Izrada ovih vrsta poluvodičkih fotodioda vrši se na više načina. Način odnosno postupak izrade određuje tip odnosno podvrstu poluvodičke fotodiode. Planarna difuzija je jedan od tih postupaka. Kod planarne difuzije površina PN spoja premazuje se sa SiO_2 (Silicijev dioksid), čime se dobiva fotodioda otporna na tamnu struju (dark current). Tamna struja je pojava električne struje kroz fotodiodu i kad ona nije izravno osvjetljena. Uzrok ove pojave je činjenica da je fotodioda podložna i elektromagnetskom zračenju izvan vidljivog spektra. Nije moguće u potpunosti ukloniti utjecaj tamne struje, no postoje načini da se ti utjecaji ublaže.

Nisko kapacitivna planarna difuzija predstavlja poboljšanje na klasičnu planarnu difuziju. Cilj ove metode izrade je ubravanje odziva u odnosu na uređaje izrađene planarnom difuzijom. U ovom se postupku upotrebljava N tip materijala visoke čistoće i otpora kako bi se povećao osiromašeni sloj a time smanjilo vrijeme odziva na jednu desetinu uobičajene vrijednosti. P sloj izrađuje se čim tanji kako bi se povećao odziv u ultraljubičastom području.

Kod PNN⁺ tipa fotodiode, sloj N⁺ materijala dodaje se N sloju kako bi se njihova kombinacija dovela čim bliže osiromašenom sloju. Time se smanjuje odziv fotodiode u infracrvenom području, što ju čini pogodnijom za detekciju kraćih valnih duljina.

Kod Shottky fotodiode tanki zlatni premaz prekriva sloj materijala N tipa te time stvara PN spoj sa Shottkijevim efektom. Pošto je gornja površina N sloja blizu upadne površine fotodiode, uređaj je izrazito osjetljiv na ultraljubičasto zračenje.

Navedene vrste fotodiode koriste se za detekciju svjetlosti, njenog intenziteta, pozicije te valne duljine. Sve navedene vrste odlikuju slijedeća svojstva:

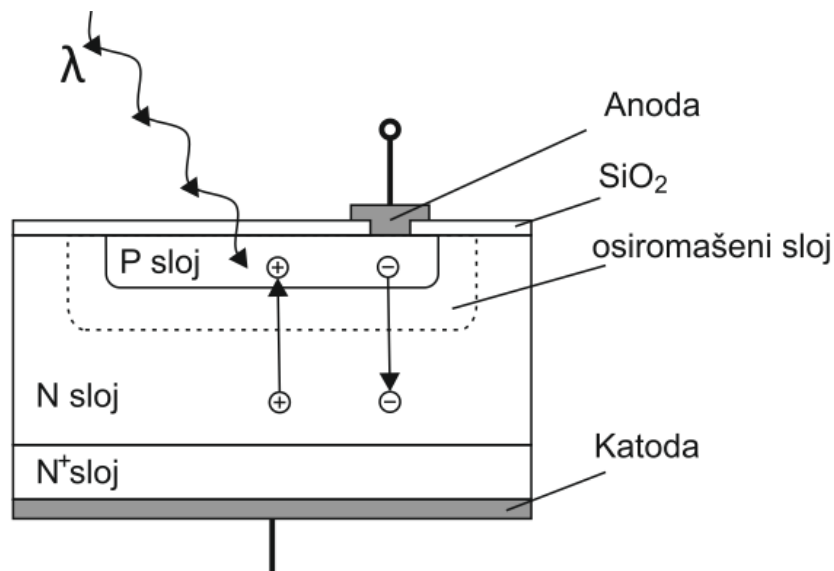
1. Mala osjetljivost na šum
2. Odlična linearnost odziva
3. Širok spektralni odziv
4. Mehanička čvrstoća
5. Kompaktnost
6. Dugovječnost

U osnovi, svaka poluvodička dioda (štoviše, svaki PN spoj poluvodiča) detektira određenu količinu elektromagnetskog zračenja. Cilj je međutim uvećati taj učinak na iskoristivu razinu.

Kod fotodiode materijal P sloja predstavlja fotoosjetljivu površinu (upadnu površinu), a materijal N tipa služi kao pod sloj čime se dobiva PN spoj koji vrši fotoelektričnu konverziju. Obično se P sloj silicijske fotodiode izrađuje selektivnom difuzijom Bora (B) do debljine od otprilike **1 μ m**.

Neutralno područje na spoju P i N tipa poluvodiča naziva se osiromašeno područje. Promjenom debljine vanjskog P sloja, pod sloja N tipa i/ili N⁺ sloja, te promjenom koncentracija primjesa, moguća je utjecati na spektralni odziv uređaja (drugim riječima, kontrolom i izmjenom navedenih parametara moguće je podesiti osjetljivost fotodiode za određene valne duljine).

Pri upadu svjetlosti na površinu fotodiode, elektroni unutar kristalne strukture bivaju stimulirani. Ako je energija svjetlosti veća od energije E_g potrebne da se savlada zabranjeni pojas, elektroni će prijeći u vodljivi pojas, dok će u valentnom pojasu ostati šupljine. Parovi elektron-šupljina pojavljuju se kroz cijeli P sloj, osiromašeni sloj i N sloj. U osiromašenom sloju električno polje ubrzava elektrone prema N sloju a šupljine prema P sloju. Iz parova stvorenih u N sloju, elektroni ostaju u tom sloju dok se šupljine prostiru kroz N sloj do PN spoja ubrzavajući se, te se naposljetku nakupljaju u valentnom pojasu P sloja. Na taj se način parovi elektrona i šupljina stvoreni proporcionalno količini energije upadne svjetlosti skupljaju u N i P slojevima. P sloj stoga postaje pozitivno a N sloj negativno nabijen. Spoji li se fotodiode u ovakvom stanju na vanjski uređaj/trošilo, uslijed razlike potencijala elektroni će se pomaknuti prema P sloju a šupljine prema N sloju. Slika 23 prikazuje strukturu tipične fotodiode.



Slika 23. Presjek tipične fotodiode

Izvor: Characteristics and Use of Photodiodes;
<http://unicorn.ps.uci.edu/H2A/handouts/PDFs/photodiode.pdf>; 4. 3. 2013

Do fotonaponskog efekta dolazi samo ako je energija upadnih elektrona veća ili jednaka od energije potrebne za prelaženje zabranjenog pojasa E_g . Granična valna duljina λ izražena preko energije zabranjenog pojasa izražena je u jednadžbi (46).

$$\lambda = \frac{1240}{E_g} \quad (46)$$

Pri temperaturi 300 K, E_g silicijske fotodiode iznosi 1.12 eV, dok za GeAsP fotodiode pri istoj temperaturi E_g iznosi 1.8V. Preko formule (36) lako se može doći do graničnih valnih duljina od 1100 nm za Silicij i 700 nm za GaAsP. Za kratke valne duljine razina apsorpcije u difuznom sloju postaje vrlo velika. Dakle, što je difuzni sloj tanji i što je PN spoj bliži površini, to je osjetljivost fotodiode veća.

Za obične fotodiode prekidna valna duljina iznosi otprilike 300 do 400 nm, dok fotodiode osjetljive na ultraljubičaste valne duljine ispod 190 nm. Prekidna valna duljina određena je svojstvima samih materijala od kojih je fotodioda izrađena, ali na nju utječe i spektralna provodljivost materijala okna (koje djeluje kao optički filter, iako je to inače u ostalim situacijama zanemariv učinak). Okna izrađena od borosilikatnog stakla (sastavljeno od Silicijevog dioksida (SiO_2) i Borovih oksida čime se dobiva velika otpornost na nagle temperaturne promjene) i plastičnih smola upijaju valne duljine ispod 300 nm. Korištenjem okna od izrađenih od tih materijala poništiti će osjetljivost fotodiode na kraće valne duljine, pa se stoga kod takvih uređaja upotrebljavaju okna od taljenog silicijevog dioksida. Ako je potrebno ograničiti osjetljivost isključivo na vidljivi spektar, u okno se ugrađuje zeleni filter.

Donje granice svjetlosne osjetljivosti fotodiode određene su karakteristikama šuma samog uređaja. Šum fotodiode izražen je kvadratnim korijenom sume kvadrata termalnog šuma i_j (tzv. Johnson-ov šum, uzrokovan otporom shunta R_{sh}) i kvadrata šuma uzrokovanog tamnom strujom i_s , te je izražen formulom (47).

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_s^2} \quad (47)$$

Korištenjem operacijskog pojačala moguće je poništiti utjecaj šuma uzrokovanog tamnom strujom, pa ukupan šum postaje jednak termalnom šumu određenom izrazom (48).

$$i_n = i_j = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot B}{R_{sh}}} \quad (48)$$

U gornjoj formuli k predstavlja Boltzmanovu konstantu ($1.3806488 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), T je apsolutna temperatura fotodiode (Kelvin) a B frekvencijski pojas šuma.

Brzina odziva fotodiode predstavlja mjeru vremena koje je potrebno da struja uzrokovana nakupljenim nabojem poteče iz samog uređaja, te se obično izražava kao vremenski interval porasta t_r i vremenski interval pada t_f . Vremenski interval porasta je vrijeme potrebno da vrijednost struje poraste sa 10% na 90% uobičajenog maksimalnog iznosa, a ovisno je o vremenskoj konstanti τ_1 koju određuje termalni kapacitet C_t fotodiode i otpor tereta R_L spojenog na terminale fotodiode (Termalni kapacitet je zbroj kapaciteta konstrukcije i spojnog kapaciteta C_j), i vremenu prostiranja (difuzije) nosioca naboja stvorenih izvan osiromašenog područja τ_2 .

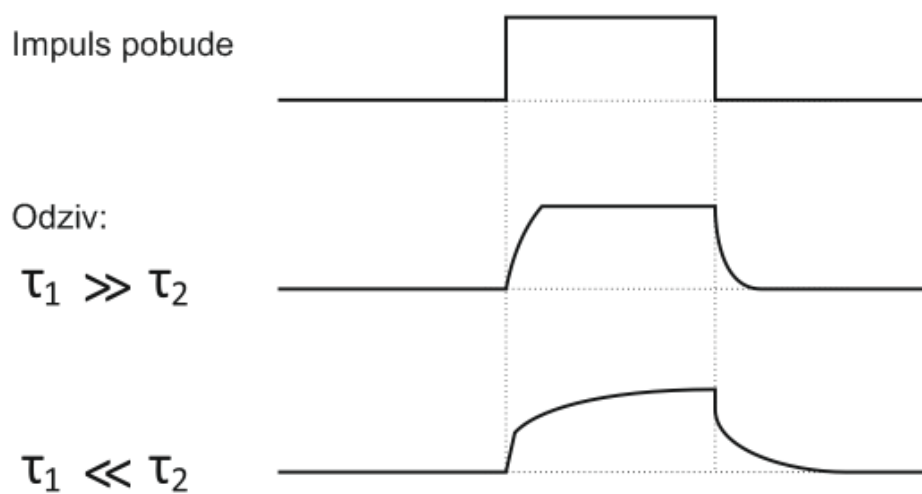
U slučaju da je dominantni faktor vremenska konstanta τ_1 , vrijeme porasta zadano je izrazom (49).

$$t_r = 2.2\tau_1 = 2.2 \cdot C_t \cdot R_L \quad (49)$$

Kako bi se skratilo vrijeme porasta, pri projektiranju uređaja mora se minimizirati bilo C_t ili R_L . Kapacitet PN spoja proporcionalan je upadnoj površini A osjetljivoj na svjetlost i obrnuto proporcionalna kvadratnom korijenu otpornosti materijala pod sloja ρ i napona obrnute polarizacije V_R , te je dana izrazom (50).

$$C_j \propto \frac{A}{\sqrt{[(V_R + 0.5) \cdot \rho]}} \quad (50)$$

Dakle, kako bi se ubrzalo vrijeme odziva fotodiode mora imati što manju upadnu površinu A , što veći ρ , te mora biti obrnuto polarizirana. nosioci izvan osiromašenog područja stvaraju se kada upadna svjetlost ne dostigne PN spojnu granicu već se raspršuje po okolnom području P i N tipa materijala. Vrijeme τ_2 potrebno da se ti nosioci rasprostru može biti veće od nekoliko μs . Slika 24 prikazuje ovisnost vremena prirasta o odnosu između τ_1 i τ_2 .



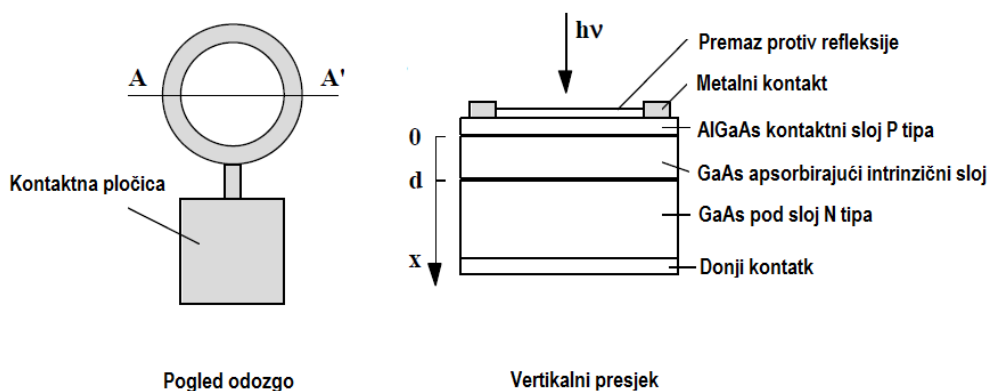
Slika 24. Ovisnost vremena prirasta (odziv) o parametrima τ_1 i τ_2

Izvor: Characteristics and Use of Photodiodes;
<http://unicorn.ps.uci.edu/H2A/handouts/PDFs/photodiode.pdf>; 4. 3. 2013

Kod PIN i lavinske (APD) fotodiode C_t je izrazito malen pa je konstanta τ_1 time manja, što znači da je i vrijeme porasta manje. Ove dvije vrste fotodiode projektirane su za malu razinu generacije nositelja izvan osiromašenog područja, pa su stoga korisne pri detekciji svjetla u optičkim komunikacijama velike brzine. APD i PIN fotodiode najčešće su korišteni detektori u optičkim komunikacijama putem optičkih vlakana. Iz tog razloga, upravo ove dvije vrste fotodiode predstavljaju najkvalitetniju alternativu za uporabu u bežičnim optičkim komunikacijama kao što su to FSO i OW. Ove dvije vrste fotosenzora biti će detaljnije opisane u nastavku rada.

5.1. PIN fotodiode

Tipična PIN fotodiode sastavljena je od prozirnog P sloja sa velikom količinom primjesa ispod kojega se nalazi apsorpcijski sloj bez primjesa te kontaktni sloj N tipa sa također velikim brojem primjesa. Samostojeće fotodiode proizvode se na vodljivom pod sloju, čime se olakšava stvaranje kontaktnog sloja N tipa i smanjuje broj koraka proizvodnog procesa. Gornji kontakt je obično prstenastog oblika malog kontaktnog otpora te omogućava prodor svjetla do poluvodiča ispod njega. Alternativa ovoj vrsti vodljivog kontakta je korištenje prozirnog vodiča poput ITO (Indium Tin Oxide). Aktivna površina izrađuje se protonskom implantacijom ili metodama izrade uporabom višestrukog izlaganja (mesa etching, double exposition/double etching) što samu površinu čini izolirajućom. Sloj dielektrika dodaje se oko aktivne površine kako bi se smanjio



Slika 25. Struktura PIN fotodiode

Izvor: Principles of Semiconductor Devices, Chapter 4.7. Photodiodes; Bart Van Zeghbroeck; 2011

učinak parazitnih kapaciteta kontaktne pločice [65]. Osnovna struktura PIN fotodiode sastavljena je od sloja P tipa i sloja N tipa koji nisu izravno spojeni, već se između njih nalazi sloj skoro intrinzičnog poluvodiča. Struktura PIN fotodiode prikazana je na slici 25.

Kako bi se smanjila N – N⁺ ili P – P⁺ barijera koja se stvara na upadnoj površini, koristi se stupnjevanje sastava materijala između prozirnog kontaktnog sloja i apsorpcijskog sloja. Ta se struktura primjenjuje kako bi osiromašeni sloj kvalitetno upijao svjetlost i time se osiguralo da nositelji (šupljine i elektroni) razdvojeni električnim poljem doprinesu struji fotodiode, istovremeno održavajući vrijeme odziva minimalnim. U takvoj strukturi, osiromašeno područje mora biti veće od apsorpcijskog područja, što se postiže ne dodajući primjese apsorpcijskom sloju (dakle, sloj materijala ostaje intrinzičan). Da bi se osiromašilo područje bez primjesa dovoljan je jako mali napon, a ako je kroz apsorpcijsko područje potrebno minimalno električno polje da bi tranzitno vrijeme bilo kratko, tad i područje bez primjesa mora zadovoljiti te uvjete pošto je električno polje konstantno. Dodatna prednost je i činjenica da je vremenska konstanta generacije/rekombinacije nosioca duža kod materijala bez primjesa, što smanjuje termalnu struju u fotodiodi.

Osim što apsorpcijsko područje mora biti manje od osiromašenog, gornji kontaktni sloj mora biti proziran za vidljivi spektar zračenja. Kod silicijskih fotodioda koriste se tanki slojevi sa velikim brojem primjesa kako bi se smanjila apsorpcija. Koristi li se kontaktni sloj sa širim zabranjenim pojasom, apsorpcija kontaktnog sloja može se gotovo u cijelosti poništiti, što naravno poboljšava odziv fotodiode.

Parovi nosioca koje upijaju kvazi-neutralna područja može doprinijeti ukupnoj struji fotodiode (*photocurrent*) ali samo ako je do generacije para došlo unutar jedne difuzijske udaljenosti od osiromašenog područja. To se međutim često izbjegava zbog nepovoljnih prijelaznih pojava koje uzrokuje ovakvo nakupljanje nosioca.

Zbog velike razlike u indeksu loma zraka i većine poluvodiča dolazi do zamjetne refleksije na upadnoj površini fotodiode. Refleksija na granici između dva materijala različitih indeksa loma izražena u postotku upadnog zračenja ako zraka upada okomito na površinu dana je jednadžbom (51).

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (51)$$

Refleksija se može gotovo u potpunosti ukloniti premaže li se površina poluvodiča dielektričnim materijalom primjerene debljine. Potrebno je razlikovati između refleksije kada je električno polje paralelno sa upadnom površinom R_{TE} i refleksije kada je magnetsko polje paralelno sa upadnom površinom poluvodiča R_{TM} . Refleksija je ovisna o kutu upada zračenja θ_i , pa su tako R_{TE} i R_{TM} dane formulama (52) i (53).

$$R_{TE} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (52)$$

$$R_{TM} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (53)$$

Proces stvaranja parova nosioca u poluvodiču izravno je vezano uz apsorpciju svjetla, pošto svaki foton kojeg poluvodič apsorbira generira jedan par elektron-šupljina. Optička mjera generacije nosioca (*optical generation rate*) zadana je jednadžbom (54).

$$g_{op} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial P_{opt}}{\partial x} \cdot \frac{1}{h\nu} = \frac{\alpha \cdot P_{opt}}{A \cdot h\nu} \quad (54)$$

Pritom je A upadna osvijetljena površina fotodiode, P_{opt} snaga upadne svjetlosti, α koeficijent apsorpcije a $h\nu$ energija fotona. Snaga upadne svjetlosti ovisna je o poziciji (x) i određena je jednadžbom (55).

$$\frac{\partial P_{opt}}{\partial x} = -\alpha P_{opt} \quad (55)$$

Stopa generacije parova dodaje se jednadžbi kontinuiteta (57), te se njenim rješavanjem dobiva struja generirana u fotodiodi. Ako se pretpostavi da svi generirani parovi doprinose struji fotodiode, tada je ta struja jednaka integralu mjere generiranja nosioca naboja g_{op} . Izraz za stuju fotodiode prikazan je u formuli (56).

$$I_{ph} = -q \cdot A \int_{-x_p}^{x_n+d} g_{op} dx \quad (56)$$

U gornjoj jednadžbi d predstavlja debljinu područja bez primjesa. Za PIN diodu koja ima velik broj primjesa u P i N sloju te prozirni kontaktni sloj, integral iz (56) svodi se na izraz (57).

$$I_{ph} = -\frac{q(1-R)P_{in}}{h\nu} \cdot (1 - e^{-\alpha d}) \quad (57)$$

Pritom je R optička refleksija upadne površine a P_{in} snaga upadnog optičkog zračenja. Za proračun struje fotodiode uzrokovane apsorpcijom fotona u kvazi-neutralnom području potrebno je riješiti difuzijsku jednadžbu uz uvjet ozračenosti, odnosno prisutnosti svjetla, što se u osnovi za šupljine u N kontaktnom spoju svodi na rješavanje jednadžbe kontinuiteta, kao što je to prikazano pod (58).

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_p}{\partial x} + \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + g_{op}(x) \quad (58)$$

Kao što je vidljivo iz jednadžbe (58), mjera generacije parova ovisna je o poziciji. Za kontaktni sloj N tipa i energije jednake zabranjenom pojasu apsorpcijskog sloja, mjera generacije parova izražena je jednadžbom (59), a struja fotodiode koja nastaje u kontaktnom sloju N tipa jednadžbom (60).

$$g_{op}(x) = \frac{P_{in}(1-R)\alpha \cdot e^{-\alpha x}}{A \cdot h\nu} \quad (59)$$

$$I_{ph} = -\frac{q(1-R)P_{in}e^{-\alpha d}}{h\nu} \cdot \frac{\alpha L_p}{1+\alpha L_p} \cdot (1 - e^{-\alpha d}) - \frac{qD_p p n_0}{L_p} \quad (60)$$

Ova dva izvoda vrijede kad je debljina kontaktnog sloja N tipa znatno veća od difuzijske duljine, pritom prvi izraz upotrebljava se kod doprinosa zbog osvjetljenja a drugi izraz kod doprinosa uzrokovanog termalnom generacijom parova. Iako je kontaktni sloj projektiran na način da ne apsorbira svjetlosno zračenje, kod malih valnih duljina do njega ipak dolazi. Odziv PIN fotodiode, ako se izostavi utjecaj tamne struje određen je izrazom (61). Slika 26 prikazuje odziv PIN fotodiode za različite izvedbene tehnologije.

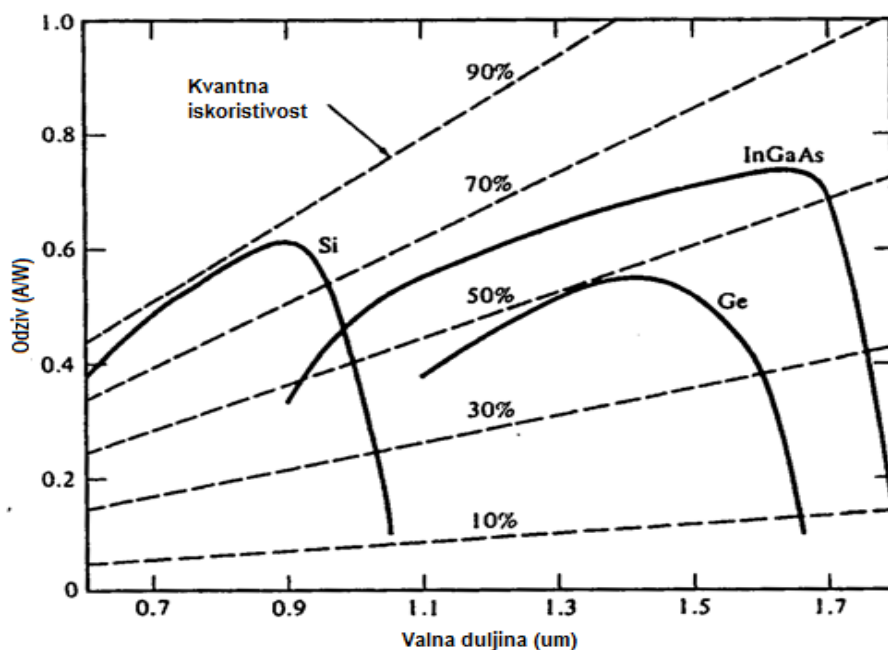
$$R = \frac{|I_{ph}|}{|P_{in}|} \quad (61)$$

Od ostalih svojstava PIN fotodiode važno je spomenuti dinamički opseg, brzinu odziva i frekvencijski pojas (*bandwidth*) fotodiode. Dinamički opseg fotodiode izražen je omjerom najveće i najmanje optičke snage koju fotodiode može detektirati.

Brzina odziva PIN fotodiode ovisi o tri čimbenika [66]:

1. Tranzitno vrijeme nosioca kroz osiromašeno područje koje su generirali upadni fotoni zračenja
2. Električni frekventijski odziv određen RC vremenskom konstantom ovisnom o ukupnom kapacitetu fotodiode
3. Spora difuzija nosioca generiranih izvan osiromašenog područja

Frekventijski pojas PIN fotodiode definiran je kao frekvencija pri kojoj izlazni signal opada na $3dB$ (50%) snage na niskoj frekvenciji. Drugim riječima, to je granica do koje polovica signala prolazi kroz fotodiodu. Kod pravokutnog signala najviše frekvencije određuju oštrinu rubova, pa porastom frekvencije pravokutnog vala funkcija postaje zaobljenija.



Slika 26. Odziv PIN fotodiode s obzirom na valnu duljinu upadnog zračenja za različite materijale

Izvor: PIN Photodetector Characteristics for Optical Fiber Communication;
<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/pin-photodetector-characteristics-for-optical-fiber-communication/>; 3. 3. 2013

5.2. Lavinska fotodioda – APD

APD (Avalanche Photodiode) je vrlo osjetljiva fotodioda koja može raditi na velikim brzinama te ima veliki dobitak. APD ima veći odnos signal/šum u odnosu na PIN fotodiode.

Mehanizam detekcije fotona kod APD fotodiode iskorištava tzv. unutarnji fotoelektrični efekt i lavinsko umnožavanje nosioca obrnuto polariziranog PN spoja. Elektromagnetsko zračenje čija energija iznosi minimalno vrijednost potrebnu da se savlada zabranjeni pojas (za Silicij $E_g = 1.15\text{eV}$) biva apsorbirana u strukturu fotodiode. Upadni tok fotona Q propada sa dubinom prodiranja u strukturu, što je izraženo formulom (62). α je apsorpcijski koeficijent ovisan o valnoj duljini upadne svjetlosti [67].

$$Q(x) = Q_0 e^{-\alpha x} \quad (62)$$

Dubina pri kojoj tok fotona eksponencijalno opadne obrnuto je proporcionalna apsorpcijskom koeficijentu i naziva se dubinom penetracije fotona. Što je energija zračenja manja (kraća valna duljina) to je i dubina prodiranja manja. Apsorbirani tok uzrokuje stvaranje parova elektron-šupljina u poluvodiču, koji bivaju razdvojeni uslijed suprotno polariziranog spoja same strukture fotodiode. Učinak stvaranja, prijenosa i očitavanja električne energije optički generiranih nosioca naboja na izlaznim terminalima strukture naziva se unutarnji fotoelektrični efekt ili učinak, te je okarakteriziran unutarnjom kvantnom iskoristivošću η_i . Kvantna iskoristivost je mjera generiranih parova nosioca naboja s obzirom na broj upadnih fotona. Dio fotona koji upadaju na površinu poluvodiča biva reflektiran, pa je proces detekcije zapravo okarakteriziran vanjskom kvantnom iskoristivošću η_e , koja je određena izrazom $\eta_e = (1 - R_\lambda)\eta_i$. R_λ je indeks refleksije upadne svjetlosti. Kvantna iskoristivost (u osnovi vanjska kvantna iskoristivost) η izračunava se i preko izraza (63).

$$\eta = \frac{\left(\frac{I_{p0}}{q}\right)}{\left(\frac{P_{\lambda}}{h\nu}\right)} = S_{\lambda 0} \left(\frac{h\nu}{q}\right) \quad (63)$$

P_{λ} predstavlja snagu upadnog zračenja, a $S_{\lambda 0}$ osjetljivost fotodiode (za APD). Izraz (52) se obično za praktične primjene aproksimira kao $\eta \approx S_{\lambda 0} \cdot (1240/\lambda)$. Kako bi se postigla najveća osjetljivost područje apsorpcije mora biti dovoljno velike debljine (obično $2/\alpha$) a indeks refleksije što manji. Kao i kod PIN fotodiode, mali indeks refleksije dobiva se ako je upadna površina prekrivena slojem dielektričnim slojem protiv refleksije indeksa loma n_1 odabranog s obzirom na indeks loma poluvodiča n_2 , na način da se zadovolji jednačba $n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$, pri čemu je n_0 indeks loma zraka. Optimalna debljina sloja protiv refleksije iznosi $d = \lambda/4 \cdot n_1$, pri čemu λ predstavlja valnu duljinu upadnog zračenja.

Kod silicijskih fotodiode indeks loma upadnog sloja iznosi od 3.4 do 3.5, pa je stoga uvjet minimalne refleksije ispunjen ako se slojem dielektrika Si_3N_4 indeksa loma između 1.8 i 2. Ipak, unatoč tome što je silicijev nitrid bolji materijal za tu primjenu, češće se u sloju protiv refleksije upotrebljava silicijev oksid (SiO_2) sa indeksom loma otprilike 1.5 zbog lakše tehničke izvedivosti. Kvantna iskoristivost fotodiode sa SiO_2 iznosi od 70% do 75%, za razliku od 80% do 90% fotodiode sa Si_3N_4 .

Drugi važan mehanizam koji utječe na rad APD fotodiode je lavinsko umnožavanje nosioca, odnosno lavinski efekt. Lavinsko umnožavanje nosioca javlja se kada je električno polje u PN strukturi jače od tzv. kritičnog polja pri kojem dolazi do sudarne ionizacije nosioca. Za silicij ta vrijednost iznosi $E_{cr} = 10^5 \text{ V/cm}$. Kod APD diode električno polje u PN spoju iznosi od $2 \cdot 10^5$ do $5 \cdot 10^5$. Vrijednost električnog polja ne može prijeći 10^6 V/cm jer pri toj vrijednosti dolazi do Zenerovog efekta. Pojavu sudarne ionizacije karakterizira ionizacijski efekt (prosječni broj parova nosioca stvorenih prolazom jednog nosioca naboja kroz jako električno polje za određenu udaljenost). Za većinu poluvodiča ionizacijski se koeficijenti za elektrone (α) i šupljine (β) razlikuju. Kod silicija je ionizacijski koeficijent za elektrone znatno veći od ionizacijskog koeficijenta za šupljine, pa je stoga faktor lavinskog umnožavanja za elektrone M_e veći u odnosu na faktor lavinskog umnožavanja za šupljine.

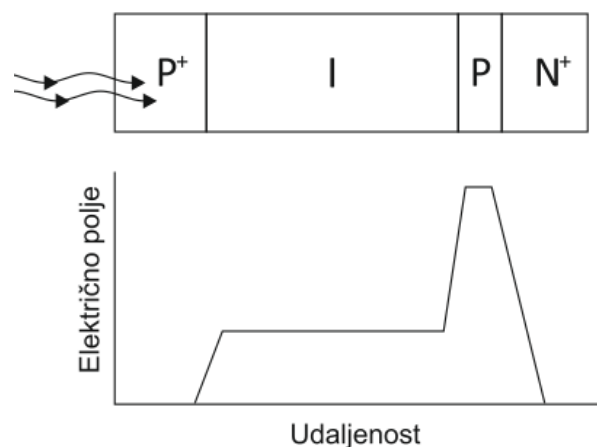
Ionizacijski koeficijenti, a time i faktori lavinskog umnožavanja predstavljaju naglo rastuće funkcije električnog polja u PN strukturi fotodiode. Ako u lavinskom efektu sudjeluju i elektroni i šupljine srednja vrijednost faktora lavinskog umnožavanja izražava se jednačbom (64).

$$M = \frac{I_e M_e + I_h M_h}{I_e + I_h} \quad (64)$$

U gornjoj jednačbzi I_e i I_h predstavljaju struju elektrona i struju šupljina. Kako bi se postigla visoka vrijednost srednjeg faktora lavinskog umnožavanja potrebno je ispuniti slijedeće uvjete:

1. Električno polje u lavinskom području mora biti što je jače moguće
2. Debljina lavinskog područja mora biti što je moguće veća
3. Ukupan udio elektronske struje u procesu lavinskog umnožavanja mora biti čim veći

Na slici 27 prikazana je jakost električnog polja u strukturi APD.



Slika 27. Jakost električnog polja u strukturi APD

Izvor: Silicon Avalanche Photodiodes; A. Stoykov, R.Scheuermann; 2004

Razdioba električnog polja ovisi o strukturi po kojoj je APD projektirana i izrađena. Optimizacija APD vrši se podešavanjem same diode za određeni radni napon i ciljanu valnu duljinu kako bi se ostvario najviši faktor lavinskog umnožavanja.

Još jedan parametar koji opisuje proces lavinskog umnožavanja je faktor šuma, odnosno dodani šum (*excess noise*). Dodani šum proizlazi iz samog procesa umnožavanja nosioca naboja, dakle ovisan je o faktoru umnožavanja M i izražen je jednadžbom (65)

$$F = kM + (1 + k) \left(2 - \frac{1}{M} \right) \quad (65)$$

k predstavlja omjer ionizacijskog faktora za elektrone i ionizacijskog faktora za šupljine (α/β) i naziva se k faktor. Što je k faktor manji, to je i faktor šuma manji. S obzirom na to, moguće je primijetiti da što više elektrona sudjeluje u lavinskom procesu, to je dodatni šum uzrokovan lavinskim procesom manji. Kako bi se osigurao minimalni dodatni šum (minimalni faktor dodatnog šuma) struktura APD mora biti projektirana na način da vrijednost M bude što viša. Omjer struje elektrona i ukupne vrijednosti struje kroz lavinsko područje uvelike ovisi o valnoj duljini upadnog zračenja. Tablica 7 prikazuje usporedbu parametara APD i PN fotodioda za različite tehnologije izvedbe.

Tablica 7. Usporedba parametara APD i PID fotodioda za različite tehnologije izrade

Izvor: PIN Photodetector Characteristics for Optical Fiber Communication;
<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/pin-photodetector-characteristics-for-optical-fiber-communication/>; 3. 3. 2013

Parametar	Silicij		Germanij		InGaAs	
	PIN	APD	PIN	APD	PIN	APD
Opseg λ (nm)	400 – 1100		800 – 1800		900 – 1700	
Vršna valna duljina (nm)	900	830	1550	1300	1300 (1550)	1300 (1550)
Odziv ρ (A/W)	0.6	77-130	0.65-0.7	3-28	0.63-0.8 (0.75-0.97)	

Kvantna iskoristivost (%)	65 – 90	77	50-55	55-75	60-70	60-70
Dobitak (M)	1	150-250	1	5-40	1	10-30
Faktor dodanog šuma (F)	-	0.3-0.5	-	0.95-1	-	0.7
Radni napon (-V)	45-100	220	6-10	20-35	5	<30
Tamna struja (nA)	1-10	0.1-1.0	50-500	10-500	1-20	1-5
Parazitni kapacitet (pF)	1.2-3	1.3-2	2-5	2-5	0.5-2	0.5
Vrijeme prirasta (ns)	0.5-1	0.1-2	0.1-0.5	0.5-0.8	0.06-0.5	0.1-0.5

5.3. Kvadrantna fotodioda

FSO komunikacijski sustavi koriste kao medij prijenosa podataka usko kolimiranu svjetlosnu zraku. S obzirom na potencijalno velike udaljenosti prijenosa podataka (za zemaljske FSO sustave udaljenost je fizički ograničena zakrivljenošću zemlje, pa postoji najveća moguća udaljenost bez obzira na prigušenje signala od strane medija komunikacijskog kanala. Za satelitske FSO sustave ta granica je znatno veća, ali je i dalje prisutna), male promjene u poziciji odašiljača zbog duljine prijenosa postaju problematično velike promjene u poziciji zrake na prijemniku. Sam problem mehaničke fluktuacije zrake može se prikazati kroz analizu pravokutnog trokuta. Duljina katete k_n nasuprot kuta θ određena je preko izraza (66).

$$\sin \theta = \frac{k_n}{h} \rightarrow k_n = h \sin \theta \quad (66)$$

Iz gornje formule je vidljivo da duljina katete k_n ovisi o kutu θ , ali i o duljini hipotenuze h . Čak štoviše, što je hipotenuza dulja, tim veći utjecaj na duljinu nasuprotne katete, pa tako i za male kutove θ dolazi do velikih promjena u duljini nasuprotne katete. Hipotenuza predstavlja udaljenost prijemnika od odašiljača. Male promjene kuta odašiljanja mogu nastati uslijed raznih mehaničkih i

mikroseizmičkih vibracija, naleta vjetra ili nekih drugih vanjskih utjecaja. Svaka takva mehanička smetnja može uzrokovati potencijalni prekid signala pa je stoga potrebno pronaći kvalitetan način kompenzacije devijacije zrake. Jedno rješenje je povećanje upadne površine prijemnog sustava. To je trenutno najčešće korištena metoda kod komercijalno raspoloživih FSO sustava. Povećanjem upadne površine moguće je na jeftin način kompenzirati male otklone zrake uslijed mehaničkih vibracija na odašiljaču. Druga alternativa je upotreba sustava povratne veze koji detektira pomak upadne zrake te povratnom vezom odašiljaču šalje informacije o pomaku kako bi ih on kompenzirao mehaničkim aktuatorima. U tom slučaju, razmatrajući najjednostavnije mogućnosti implementacije tog sustava, najbolji odabir foto senzora, odnosno prijemnika predstavlja kvadrantna fotodioda. Kvadrantna fotodioda naziva se još i segmentirani PSD (Position Sensing Detector) i upotrebljava se u raznim primjenama u kojima je potrebno odrediti poziciju upadne zrake. Segmentirani PSD zapravo su obične fotodiode (tip odnosno vrsta fotodiode nije bitan, pošto je primjena ove vrste fotodetektora vezana uz strukturu, odnosno razmještaj fotoosjetljivih komponenti. Kvadrantna fotodioda može se usporediti skupom od četiri fotodiode, koje mogu biti bilo kojeg tipa) podijeljene na dva (za jednodimenzionalno određivanje pozicije) ili četiri segmenta (za dvodimenzionalno određivanje pozicije – kvadrantna fotodioda) koji su međusobno fizički razdvojeni [68]. Simetrična optička zraka generira struju ovisnu o upadnoj svjetlosti koja je jednaka za sve segmente (ako je zraka upada u centar PSD-a). relativna pozicija upadne zrake dobiva se mjerenjem izlazne struje svakog pojedinog segmenta. Ovom metodom moguće je ostvariti pozicijsku rezoluciju do **0.1 μ m**. Pošto pozicijska rezolucija nije ovisna o odnosu signal/šum samog sustava, moguće je čitati i jako male razine osvjetljenja. PSD pružaju odličnu temperaturnu i vremensku stabilnost te ih odlikuje brzo vrijeme odziva. Uz navedene prednosti postoje dakako i ograničenja. Npr. zraka mora u svakom trenutku barem djelom obasjavati sva četiri segmenta, te u pravilu promjer fronte zračenja ne smije biti manji od fizičkog razmaka između pojedinih segmenata. Kako bi određivanje pozicije bilo što točnije zraka mora biti što je više moguće uniformna. Slika (28) prikazuje primjer kvadrantne fotodiode i dijagram sa naznačenim pojedinim segmentima.



Slika 28. Kvantna fotodioda sa kućištem (lijevo) i razmještaj segmenata (desno)

Izvor: InGaAs PIN photodiode;

<http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/S/4109/G6849/index.html>; 4. 3. 2013

Pri određivanju pozicije upadne zrake dolazi do varijacije koja se izražava preko pozicijske nelinearnosti, odnosno pozicijske greške (PDE - Position Detection Error). PDE je definiran kao geometrijska varijacija između prave pozicije i izmjerene pozicije točke upada zrake. Za jednodimenzionalne PSD, mjeri se kroz 80% dužine osjetljivog područja, dok se kod dvodimenzionalnih PSD (kvadrantna fotodioda) mjeri nad 64% površine osjetljivog područja. Za bilo koji proračun, nul točka definirana je kao električna sredina, odnosno kao točka u kojoj $I_1 = I_2$ (gdje I_1 i I_2 predstavljaju struje uzrokovane fotoelektričnim efektom na kontaktima samog uređaja). Vrijednost PDE izračunava se preko izraza (67).

$$PDE = \left(\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right) \cdot L - X \quad (67)$$

U gornjem izrazu L je površina osjetljivog područja a X pomak upadne točke zrake. PDE je izražen u μm . Postotak pozicijske nelinearnosti određuje se dijeljenjem PDE sa ukupnom dužinom osjetljivog područja. Uz PDE, postoji još nekoliko parametara koji utječu na performanse PSD-a, poput unutarnjeg otpora elektroda. Unutarnji otpor elektroda je otpor između dva krajnja kontakta po jednoj osi.

Pomak detektirane pozicije uzrokovan temperaturnim promjenama izražen je razlikom u pozicijama podijeljenom sa ukupnom duljinom. Kao i PDE, za jednodimenzionalne segmentirane diode definiran je nad 80% duljine a za dvodimenzionalne nad 64% površine osjetljivog područje.

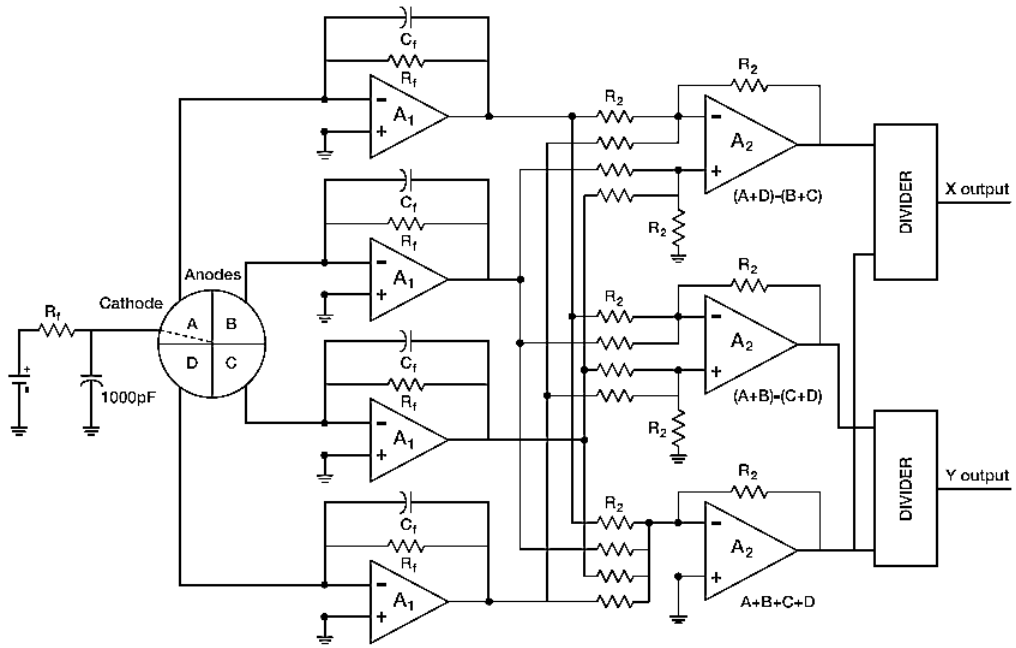
Pozicijska rezolucija definirana je kao najmanji pomak upadnog zračenja kojega je moguće očitati na aktivnoj površini prijemnika. Rezolucija je ograničena odnosom signal/šum samog sustava i ovisi o intenzitetu svjetlosnog upadnog zračenja, šumu fotodiode i frekvencijskim pojasom upravljačke elektronike. X i Y koordinate upadne svjetlosti u odnosu na centar kvadrantne fotodiode određuju se preko izraza (68) i (69).

$$X = \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D} \quad (68)$$

$$Y = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D} \quad (69)$$

U gornjim izrazima vrijednosti A , B , C i D predstavljaju struje generirane fotoelektričnim efektom za odgovarajuće segmente kvadrantne fotodiode. Na slici 29 je prikazan tipični sklop za upravljanje segmentiranim (kvadrantnim) fotodiodama.

Alternativa uporabe povratne veze korištenjem kvadrantnih fotodioda i aktuatora za podešavanje kuta odašiljanja je svakako kompliciranija te neadekvatna i neisplativa za uobičajene prilike gradskih lokalnih FSO mreža. Ipak, ova metoda kompenzacije pomaka zrake omogućila bi upotrebu FSO komunikacijskih sustava u urbanim sredinama podložnim pojačanoj seizmičkoj aktivnosti (poput Japana ili zapadne obale SAD-a). Također, daljnjim razvojem mogla bi se postići i potpuna mobilnost FSO komunikacijskih sustava barem za veće mobilne platforme (npr. brod).



Slika 29. Tipični elektronički sklop za upravljanje kvadrantnom fotodiodom

Izvor: Photodiode Characteristics and Applications; Felix Haro; 2002

6. Optička veza i medij prijenosa

Komunikacija vidljivim svjetlom koristi elektromagnetsko zračenje u rasponu valnih duljina od 400 do 700 nm. Kod FSO sustava koriste se i valne duljine u području infracrvene svjetlosti (preciznije, 1550 nm kao kod komunikacija putem optičkih vlakana) zbog manje osjetljivosti ljudskog oka na ovo područje elektromagnetskog zračenja. Kako je medij prijenosa za FSO i OW komunikacijske sustave zapravo atmosfera (osim u slučaju satelitskih FSO komunikacija koje će biti dodatno obrađene), u ovom će se djelu rada obraditi utjecaj atmosferskih uvjeta na vezu i komunikacijski kanal sustava komunikacije zasnovanih na vidljivom svjetlu.

Zemaljska FSO veza koristi medij koji je najpodložniji smetnjama (OW je u osnovi ograničen na korištenje u zatvorenim prostorijama, a satelitski FSO djeluje u izostanku atmosfere te time nije podložan njenom štetnom utjecaju na komunikacijsku vezu). OW komunikacijska veza može se analizirati pojednostavljujući uvjete prijenosa signala kod FSO sustava zbog izolacije sustava od atmosferskih uvjeta.

6.1. Zemaljska FSO veza

Optički komunikacijski kanal razlikuje se od uobičajenog komunikacijskog kanala okarakteriziranog Gausovim šumom po tome što je signal $x(t)$ predstavljen snagom umjesto amplitude. To dovodi do dva osnovna ograničenja u prenesenom signalu [69].

1. $x(t)$ mora biti pozitivna vrijednost
2. Prosječna vrijednost $x(t)$ ne smije prelaziti specifičnu vršnu vrijednost P_{max} (70)

$$P_{max} \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (70)$$

Za razliku od konvencionalnog komunikacijskog kanala u kojemu je SNR proporcionalan snazi signala, kod optičkih sustava su primljena snaga i varijacija šuma proporcionalni površini područja prijema detektora A_d i njenom kvadratu A_d^2 , što znači da je i SNR optičkog komunikacijskog sustava proporcionalan A_d . To dovodi do zaključka da je uz veću površinu prijemnog područja moguće povećati SNR. Unatoč tome, povećanjem upadne površine povećava se i parazitni kapacitet fotodiode što ograničava brzinu prijenosa podataka. Optička veza kod bežičnih optičkih komunikacijskih sustava ostvaruje se kroz atmosferski kanal koji je sastavljen od plinova i aerosola. Uz sam sastav atmosfere, znatan učinak na kvalitetu prijenosa imaju i atmosferski uvjeti poput kiše, izmaglice i magle. Atmosferski uvjeti stohastičke su prirode i ovise o zemljopisnoj lokaciji i godišnjem dobu. Najveća gustoća čestica nalazi se u troposferi, dakle najbliže tlu.

Osim atmosferskih uvjeta i samog sastava atmosfere, turbulencija na značajan način utječe na bežičnu optičku vezu. Do turbulencije dolazi kada sunčevo zračenje pogađa zemljinu površinu. Sunčevo zračenje zagrijava zračnu masu, pri čemu se javlja razlika između hladnijih i toplijih lokaliziranih volumena zraka. Topliji zrak kreće se od površine zemlje prema gore te se turbulentno (vrtložno) miješa sa hladnijim zrakom stvarajući zračne vrtloge. To vrtloženje uzrokuje fluktuacije u temperaturi od 0.01 do 0.1 stupnjeva (iako ova razlika u temperaturi djeluje mala, ona je dovoljna da uzrokuje raspršenje i apsorpciju signala). Tablica 8 prikazuje prosječni sastav atmosfere.

Tablica 8. Sastav atmosfere

Izvor: Terrestrial Free-Space Optical Communications; z. Ghassemlooy, W. O. Popoola; 2012

Sastav atmosfere		
	Postotak ukupnog volumena (%)	ppm (Parts Per Million)
Dušik (N₂)	78.09	
Kisik (O₂)	20.95	
Argon (Ar)	0.93	
Ugljikov dioksid (CO₂)	0.03	
Vodena para (H₂O)		40 – 40000
Neon (Ne)		20
Helij (He)		5.2
Metan (CH₄)		1.5
Kripton (Kr)		1.1
Vodik (H₂)		1
Dušikov dioksid (N₂O)		0.6
Ugljikov monoksid (CO)		0.2
Ozon (O₃)		0.05
Ksenon (Xe)		0.09

Jednadžba koja opisuje bežičnu optičku vezu postaje relativno jednostavna ako se izostavi optička iskoristivost i šum na prijemu [70]. Iznos snage na prijemu P_r proporcionalan je iznosu zračene snage P_t i površini osjetljivog područja A_r , te obrnuto proporcionalan kvadratu divergencije zrake D i kvadratu dometa R pomnoženog sa eksponencijalnom funkcijom koeficijenta atmosferskog prigušenja α i dometa veze R , te je izražen formulom (71).

$$P_r = P_t \cdot \frac{A_r}{(D \cdot R)^2} \cdot e^{-\alpha R} \quad (71)$$

Analizirajući jednadžbu vidljivo je da je na kvalitetu veze moguće utjecati mijenjanjem varijabli zračene snage, površine prijemnog otvora, divergencije zrake i duljinom veze odnosno dometa. Koeficijent atmosferskog prigušenja nije moguće podešavati zbog stohastičke prirode atmosferskih uvjeta i uglavnom ne ovisi o valnim duljinama svjetlosti pri uvjetima velike prigušenosti.

Primljena snaga jako velikim djelom eksponencijalno ovisi o umnošku koeficijenta atmosferskog prigušenja i dometa. Kod ISP (Internet Service Provider) pristupnih aplikacija (gdje osigurana dostupnost mora iznositi 99.999% ili više) eksponencijalni izraz postaje dominantan. Uzme li se sve to u obzir, lako je uočljivo da se pri projektiranju FSO komunikacijskog sustava može upotrijebiti izvor manje snage zračenja uz manju divergenciju zrake i veću površinu prijema a da se pritom dobije jednaka snaga na prijemu. Komponenta atmosferskog prigušenja dominira izrazom jednadžbe bežične optičke veze (osim u slučaju idealnih atmosferskih uvjeta) te se pri projektiranju FSO komunikacijskog sustava za ISP pristupne aplikacije (*carrier class*) mora uzeti u obzir. Uz to mora se uzeti u obzir domet, koji mora biti dovoljno kratak da se smanji utjecaj atmosferskog prigušenja te istovremeno dovoljno dugačak da čvorovi ne budu previše blizu jedan drugome. Sustavi visoke iskoristivosti mogu se postići (uz trenutačno stanje tehnologije) za domet ne veći od 500 m.

ISP pristupne aplikacije moraju imati velika vremena raspoloživosti veze zbog korisničke ponude. Standardna raspoloživost ISP pristupnih veza je 99.999%, što u prosjeku iznosi otprilike 5 minuta nedostupnosti veze na godinu [71]. Jedan od načina proračunavanja raspoloživosti veze zasnovan je na proračunu najgorih prigušujućih atmosferskih vremenskih uvjeta. Mjerenje prigušenja vrši se pri valnoj duljini 550 nm (sredina vidljivog spektra). Izračunavanjem koeficijenta prigušenja za najgore atmosferske uvjete moguće je odrediti najveći domet preko jednadžbe (60) za koji će biti moguće ostvariti raspoloživost komunikacijskog sustava unutar granice 99.999%. Tablica 9 prikazuje iznose prigušenja i maksimalne domete za određene atmosferske uvjete.

Tablica 9. Iznosi prigušenja atmosferskih i vremenskih uvjeta uz međunarodne standardne vrijednosti.

Izvor: Availability of Free Space Optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems; Isaac I. Kim, Eric Korevaar; 2001

Atmosferski uvjeti	Oborine (mm/sat)	Vidljivost	Prigušenje (pri $\lambda=785$ nm)	FSO domet
Gusta magla		0 m		0 m
		50 m	-339.6 dB/km	110 m
Srednje gusta magla		200 m	-84.9 dB/km	330 m
Umjerena magla		500 m	-34.0 dB/km	610 m
Srednje umjerena magla	Prolom oblaka (100)	770 m	-20.0 dB/km	780 m
		1 km	-14.2 dB/km	880 m
Blago umjerena magla	Jaka kiša (25)	1.9 km	-7.1 dB/km	1.02 km
		2 km	-6.7 dB/km	1.03 km
Izmaglica	Srednje jaka kiša (12.5)	2.8 km	-4.6 dB/km	1.08 km
		4 km	-3.0 dB/km	1.13 km
Blaga izmaglica	Lagana kiša (2.5)	5.9 km	-1.8 dB/km	1.18 km
		10 km	-1.1 dB/km	1.22 km
Čista atmosfera	Rosa (0.25)	18.1 km	-0.6 dB/km	1.25 km
		20 km	-0.53 dB/km	1.26 km
Izrazito čista atmosfera		23 km	-0.46 dB/km	1.26 km
		50 km	-0.21 dB/km	1.28 km

Gubici u FSO prijenosu svode se na gubitke snage uzrokovane atmosferskim gubicima [69]. Gubici u snazi uzrokovani su od više čimbenika. Svjetlosna zraka koja prolazi kroz atmosferu biva djelom apsorbirana od molekula u atmosferi (CO₂, vodena para, itd.) te se njena energija pretvara u toplinsku energiju, dok se dio svjetlosti raspršuje. Zraka već i sama po sebi divergira (što proizlazi iz Beer-Lambertovog zakona). Apsorpcija, raspršenje i divergencija zrake predstavljaju najvažnije čimbenike u gubitku snage.

Atmosferski gubici su dakle uzrokovani prvenstveno apsorpcijom i raspršenjem. I jedan i drugi učinak uzrokovani su sastavom atmosfere, dakle varijabilni su prostorno i vremenski. Prigušujući utjecaj izražen je preko koeficijenta atmosferskog prigušenja α (kao što je to prikazan u jednadžbi (60)). Ukupni koeficijent atmosferskog prigušenja jednak je sumi apsorpcije aerosola a_A i apsorpcije molekula a_M te raspršenja aerosola b_A i raspršenja molekula b_M . Koeficijent atmosferskog prigušenja izračunava se preko jednadžbe (72).

$$\alpha = a_A + a_M + b_A + b_M \quad (72)$$

Do apsorpcije dolazi kada foton međudjeluje sa molekulom prisutnom u atmosferi. Neki se fotoni u tom međudjelovanju pretvaraju u toplinsku energiju. Koeficijent apsorpcije uvelike ovisi o vrsti i veličini molekule te njihovoj koncentraciji. Apsorpcija je selektivni proces jer ovisi o valnoj duljini upadne svjetlosti. To uzrokuje prozirne zone u spektru, odnosno dijelove spektra koji su minimalno podložni apsorpciji, pa se stoga pri projektiranju FSO sustava nastoji upotrijebiti valne duljine koje se podudaraju sa prozirnim zonama spektra, što čini koeficijent atmosferskog prigušenja uglavnom ovisnim isključivo o raspršenju.

Raspršenje proizlazi iz kutne promjene smjera kretanja fotona nakon što se sudare sa česticom u atmosferi. Ovisi o promjeru čestice na koju foton nalijeće. Jedna od metoda opisivanja raspršenja je preko dimenzijskog parametra $x_0 = 2\pi r/\lambda$. Ako je $x_0 \ll 1$ radi se o Rayleightovom raspršenju, ako je pak $x_0 \approx 1$ riječ je o Mieovom raspršenju, a za $x_0 \gg 1$ raspršenje se opisuje korištenjem geometrijske optike (geometrijsko raspršenje) i osnovnim zakonima loma svjetlosti. U tablici 10 prikazane su ovisnosti vrste raspršenja u odnosu na veličinu čestica u atmosferi.

Tablica 10. Ovisnosti raspršenja o dimenzijama čestica u atmosferi

Izvor: Terrestrial Free-Space Optical Communications; z. Ghassemlooy, W. O. Popoola; 2012

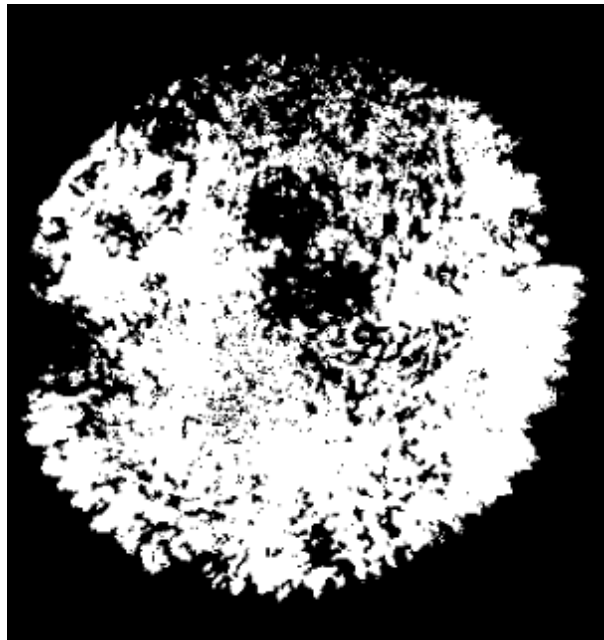
Čestice	Promjer (μm)	Parametar dimenzije x_0	Raspršenje
Molekule zraka	0.0001	0.00074	Rayleighovo
Čestice izmaglice	0.01 – 1	0.074 – 7.4	Rayleighovo – Mieovo
Kapljice magle	1 – 20	7.4 – 147.8	Mieovo – Geometrijsko
Kapljice kiše	100 – 10000	740 – 74000	Geometrijsko
Snježne pahulje	1000 – 5000	7400 – 37000	Geometrijsko
Jaka kiša	5000 – 50000	37000 – 370000	Geometrijsko

Treperenje (*scintillation*) predstavlja još jedan uzrok gubitaka pri prijenosu bežičnog optičkog signala. Atmosfersko treperenje definirano je kao promjena intenziteta fronte zračenja u vremenu i prostoru a očituje se na prijemu [70]. Svjetlosni signal varira zbog prolaza kroz dijelove atmosfere različitih indeksa loma, koji su uzrokovani temperaturnim razlikama uz putanju prostiranja signala. Promjene indeksa loma uzrokuju promjene smjera kretanja zrake (na sličan nalik kao što bi se svijetlost lomila pri prolazu kroz sustav leća i prizmi) u odnosu na smjer prostiranja signala. Vrijeme varijacija u indeksu loma ovisi o uvjetovanom volumenu atmosfere pa stoga ovisi o strujanjima zraka u atmosferi (brzini vjetra). Pošto je treperenje u potpunosti stohastički proces, njegova analiza je razmjerno komplicirana. Za male varijacije raspodjela intenziteta zračenja na prijemu može se približno opisati log-normalnom razdiobom. Kod FSO gdje je staza prostiranja signala horizontalna treperenje ima veći učinak a raspodjela intenziteta zračenja na prijemu nalikuje više na eksponencijalnu razdiobu.

Pri mjerenju atmosferskog treperenja često se koristi parametar C_n^2 . Ovaj parametar izravno je vezan za brzinu vjetra i u grubo izražava turbulentnost atmosfere. Varijacije u C_n^2 parametru korisne su za predviđanje promjene u intenzitetu zračenja na prijemu σ_x^2 korištenjem izraza (73).

$$\sigma_x^2 = 0.31 \cdot C_n^2 \cdot k^{\frac{7}{6}} \cdot L^{\frac{11}{6}} \quad (73)$$

U izrazu (72) vidi se da je promjena u intenzitetu zračenja na prijemu σ_x^2 proporcionalna parametru C_n^2 (indeks strukturne refrakcije), optičkom valnom broju $k = 2\pi/\lambda$ i (aproksimativno) kvadratu duljine staze prostiranja signala (duljina dometa) L . Promatrajući ovu jednadžbu moguće je primijetiti da kraće valne duljine imaju proporcionalno veće promjene u intenzitetu zračenja na prijemu, npr. sustav koji koristi valnu duljinu 780 nm ima otprilike duplo veći σ_x^2 od sustava koji koristi valnu duljinu 1550 nm. Sa dvostrukim povećanjem dometa σ_x^2 postaje duplo veći. Na slici 30 prikazan je izgled zrake lasera za duljinu propagacije 1000 m podložene treperenju. U točki odašiljanja zraka ima Gausovu (normalnu) razdiobu, no pri prolazu kroz atmosfereke volumene zraka različitih indeksa loma (uslijed temperaturnih razlika i razlika u gustoći) pri prijemu projekcija dobiva karakterističan izgled „mrlje“. Projekcija na prijemu promjenjiva je u vremenu i utječe na BER komunikacijskog kanala.



Slika 30. Izgled fronte zračenja lasera nakon duljine propagacije 1000 m kroz atmosferu

Izvor: Modeling Optical Scintillation; <http://spie.org/samples/PM99.pdf>; 5. 3. 2013.

Značajni izvori pozadinskog šuma kod FSO komunikacijskih sustava su raspršeno zračenje i sunčevo zračenje [69]. Zračenje ostalih nebeskih tijela poput mjeseca ili zvijezda smatra se preslabim da bi imalo ikakav značajan utjecaj na ukupne performanse zemaljskih FSO sustava, no ti izvori dobrim djelom doprinose pozadinskom šumu kod satelitskih primjena FSO komunikacijskih veza. Jednadžba ozračenosti (snaga po jedinici površine) za reflektirani pozadinski šum prikazana je u izrazu (74), a za izravni (sunce) u (75).

$$I_r = \frac{N\Delta\lambda\pi\Omega^2}{4} \quad (74)$$

$$I_i = W\Delta\lambda \quad (75)$$

U jednadžbama N predstavlja spektralnu ozračenost atmosfere a W spektralno zračenje sunca. $\Delta\lambda$ je pojas valnih duljina na prijemu dok Ω predstavlja upadno polje (Field Of Vision) prijemnika i izraženo je u radianima. Pozadinski šum može se uvelike smanjiti korištenjem prijemnika sa malim Ω .

Dodatni izvori pozadinskog šuma su kvantni šum i termalni šum. Kvantni šum uzrokovan je statističkom naravi optičkog procesa detekcije. Termalni šum uzrokovan je termalnim fluktuacijama elektrona u prijemnom elektroničkom sklopu ekvivalentnog otpora R_L i temperature T_e .

Pozadinski šum, kvantni šum i termalni šum stohastički su procesi, te su kao takvi definirani vjerojatnosnom razdiobom čije su varijacije rednom zadane izrazima (76), (77) i (78).

$$\sigma_p^2 = 2qB\mathfrak{R} \cdot (I_r + I_i) \quad (76)$$

$$\sigma_q^2 = 2qB\mathfrak{R} \cdot I \quad (77)$$

$$\sigma_T^2 = \frac{4kT_s \cdot B}{R_L} \quad (78)$$

U gornjim izrazima B predstavlja električni frekvencijski pojas, $\mathfrak{R} = \eta q \lambda / hc$ predstavlja osjetljivost detektora (η je kvantna iskoristivost, q je osnovni naboj, h predstavlja plankovu konstantu a c brzinu svjetlosti). Ukupna varijacija šuma jednaka je sumi pojedinih varijacija i zadana je jednadžbom (79)

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_q^2 + \sigma_T^2 \quad (79)$$

Pošto je prosječna optička snaga odašiljača ograničena, različite modulacijske tehnike uspoređuju se prema prosječnoj optičkoj snazi na prijemu potrebnoj da bi se ostvario ciljani BER uz određenu propusnost podataka. Od metoda modulacije koje pružaju najbolje rezultate kod FSO komunikacijskih sustava OOK, ASK i PPM [69]. U zemaljskim FSO sustavima najčešće se koristi OOK modulacija, bilo sa RZ ili NRZ varijantom. Kod NRZ OOK modulacije optičkog signala, vršna snaga impulsa $\alpha_s P_T$ predstavlja binarnu nulu, dok prijenos signala vršne snage P_T predstavlja binarnu jedinicu. α_s predstavlja omjer prigušenja optičkog izvora i definiran je $0 \leq \alpha_s < 1$. Pošto se radi o NRZ metodi modulacije trajanje optičkog impulsa jednako je trajanju simbola. Kod RZ OOK modulacije vremensko trajanje optičkog impulsa kraće je od trajanja simbola, što poboljšava iskoristivost ove modulacije u odnosu na NRZ OOK, ali povećava potrebni frekvencijski pojas.

PPM (Pulse Position Modulation) je najčešće korištena alternativa OOK modulaciji u FSO sustavima. PPM modulacija pruža bolju iskoristivost snage, ali kao i kod RZ OOK modulacije, povećava se frekvencijski pojas (*bandwidth*).

6.2. Satelitska FSO veza

Satelitska FSO veza izvodi se između pojedinih satelita i između satelita i zemljine površine. Među satelitska komunikacijski kanal modeliran je prema zemaljskoj FSO komunikaciji, no s obzirom da se komunikacija vrši u izostanku atmosfere, njeno atenuacijsko djelovanje može se izostaviti iz modela. S obzirom na to, među satelitska FSO komunikacija može se provoditi uz izrazito veće domete, ograničene zapravo samo zakrivljenošću zemlje, što omogućuje korištenje metoda modulacije koje bi zbog atmosferskog prigušnog utjecaja bilo nemoguće koristiti. Glavni utjecaji na među satelitsku vezu je ograničenje uzrokovano vibracijama i mobilnošću satelita. Pošto se veza ostvaruje na dometima i do nekoliko desetaka tisuća kilometara, najmanja promjena u kutu odašiljanja uzrokovana vibracijama uzrokuje izrazito velike pomake u odnosu na prijemnik (kao što je to bilo pokazano u izrazu (55)). Satelitski FSO sustavi dakle koriste usmjeravajuće aktuatorske sustave kako bi kompenzirali pomake i vibracije. Sustavi usmjeravanja odašiljanja relativno su kompleksni a divergencija obično je reda veličine mikro radijana, pa se stoga za usmjeravanje koriste podaci efemerida (tablica podataka sa geocentričnim lokacijama nebeskih tijela, u ovom slučaju komunikacijskih satelita, u određenim vremenskim intervalima, proračunatima na temelju poznatih putanja). Razne vibracije uzrokovane funkcijama satelita utječu na ne zanemariv način na sam sustav usmjeravanja zrake. Te vibracije umanjuju signal na prijemu, a time povećavaju BER i u potpunosti su stohastičke prirode [72]. Pristupi rješavanju problema vibracija su povećanje snage odašiljanja, upotreba kompleksnijeg sustava usmjeravanja zrake i prilagodba parametara snage odašiljanja, frekvencijskog pojasa te dobitka optičkog sustava razini vibracije. Sva navedena rješenja imaju nekoliko nedostataka:

1. Povećane dimenzije
2. Povećana masa
3. Povećana potrošnja energije
4. Povećano zagrijavanje
5. Povećana cijena
6. Povećana kompleksnost sustava

Navedeni nedostaci uvelike povećavaju cijenu i smanjuju pouzdanost cijelog sustava. Potrebno je stoga pronaći kompromis između cijene i kvalitete veze koja će omogućiti ISP potražnju pristupačnosti od 99.999%.

Kako bi se uspostavila optička veza između dva satelita u orbiti oko zemlje, kao prvo i osnovno, između promatrana dva satelita mora postojati izravna optička linija (LOS – Line Of Sight). Kako bi se u grubo uspostavila izravna optička linija koriste se podaci iz efemerida, dok se za precizno uspostavljanje veze koristi sustav usmjeravanja zrake. Cijelo vrijeme komunikacije optička veza se ne smije prekidati, jer u protivnom dolazi i do prekida komunikacije.

Najčešća metoda uspostavljanja same komunikacijske FSO veze kod satelita je korištenje usmjerivačke zrake (*tracking beam*) na odašiljačkoj strani i kvadrantnog detektora (kvadrantna fotodioda) na prijemnoj strani. I odašiljački i prijemni sustav spojeni su na mehanički sustav usmjeravanja i ostale upravljačke elektroničke sklopove. Precizno podešavanje upadne zrake vrši se očitavanjem pozicije zrake na kvadrantnom detektoru. Zbog raznih mehaničkih uzroka sustav za odašiljanje signala vibrira, što se očituje kao znatan pomak na prijemu zbog velikih udaljenosti. Okomita greška kutnog usmjeravanja uzrokovana mehaničkim vibracijama na odašiljaču opisuje se normalnom (Gausovom) razdoblom. Elevacijska greška usmjeravanja dana je normalnom distribucijom čija je gustoća razdiobe izražena preko (80).

$$f(\theta_{el}) = \frac{1}{\sigma_{el}\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\theta_{el}^2}{2\sigma_{el}^2}\right)} \quad (80)$$

U gornjem izrazu σ_{el} predstavlja standardnu devijaciju elevacije usmjerene zrake a θ_{el} kut elevacije usmjerene zrake. Azimutalna pogreška usmjeravanja također je zadana normalnom razdoblom preko izraza (81).

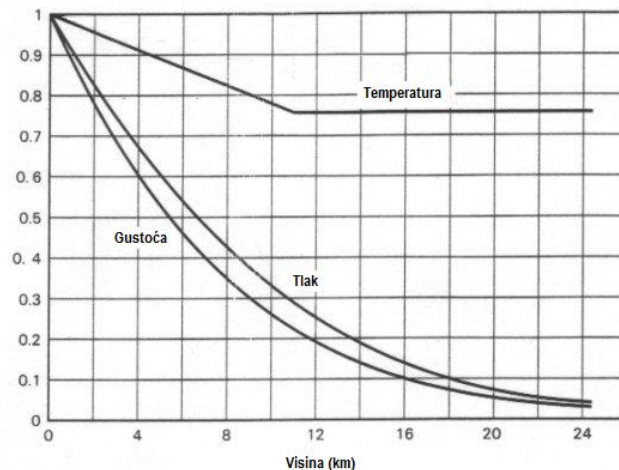
$$f(\theta_{az}) = \frac{1}{\sigma_{az}\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\theta_{az}^2}{2\sigma_{az}^2}\right)} \quad (81)$$

U gornjem izrazu σ_{az} predstavlja standardnu devijaciju azimuta usmjerene zrake a θ_{az} azimutalni kut usmjerene zrake. Radijalna pogreška usmjerenosti θ_i izražena je preko kvadratnog korijena sume kvadrata azimutalnog i elevacijskog kuta, i dana je izrazom (82).

$$\theta_i = \sqrt{\theta_{el}^2 + \theta_{az}^2} \quad (82)$$

Temeljem simetričnosti normalne razdiobe, uzima se da je standardna devijacija azimutalne usmjerenosti jednaka standardnoj devijaciji elevacijske usmjerenosti. Stoga je i radijalna devijacija istog iznosa. Uzme li se u obzir pretpostavka da su elevacijski i azimutalni proces odstupanja usmjerenosti neovisni jedan o drugome i da imaju jednake razdiobe, ukupni radijalni kut greške odstupanja usmjerenosti izražava se pomoću Rayleighove razdiobe čija je gustoća razdiobe dana izrazom (83).

$$f(\theta_i) = \frac{\theta_i}{\sigma_i^2} e^{-\left(\frac{\theta_i^2}{2\sigma_i^2}\right)} \quad (83)$$



Slika 31. Gustoća atmosfere prikazana u omjeru sa gustoćom na razini mora u ovisnosti o visini

Izvor: Air Density; <http://www.aerospaceweb.org/question/atmosphere/q0046b.shtml>; Alberto Sanchez; 5. 3. 2013

Ovo modeliranje mehaničkih vibracija korisno je ne samo kod satelitskih FSO sustava, već i kod teoretiziranih zemaljskih FSO komunikacijskih sustava povećane mobilnosti. Npr. navedene metode uspostavljanja komunikacijske veze potencijalno su primjenjive pri umrežavanju broda pri ulazu u lučki terminal ili akvatorij luke, o čemu će još u nastavku biti riječi. Kao što je to i prethodno bilo navedeno, kod satelitskih FSO sustava potrebno je razlikovati među-satelitsku vezu od veze satelita sa zemaljskom baznom stanicom (bilo dolazni (downlink) ili odlazni (uplink) smjer komunikacije). U slučaju međusobne komunikacije satelita u orbiti oko zemlje nije potrebno računavati atmosfersko prigušenje zbog vakuuma svemira, no pri komunikaciji satelita sa zemaljskom stanicom atmosfersko prigušenje je neizbježno. Na slici 31 prikazana je gustoća atmosfere u odnosu na visinu. Vidljivo je da sa porastom visine gustoća atmosfere opada.

Iz grafa je vidljivo da je već pri visini od 24 km gustoća atmosfere uvelike opala u odnosu na gustoću na razini mora. Sateliti se nalaze u orbitama na visinama od 300 km (LEO – Low Earth Orbit) do 116000 km (HEO – High Earth Orbit). Na tim visinama atmosfera više nema dovoljno znatan učinak na FSO podatkovnu vezu i njeno prigušenje, pa se mogu ostvarivati znatno veće udaljenosti, kao što je to i ranije navedeno. U slučaju povezivanja satelita sa zemaljskom baznom stanicom međutim debljina atmosfere itekako dolazi do izražaja. Kod zemaljskih FSO sustava brzina prijenosa, propusnost i pristupačnost ograničeni su upravo dometom, odnosno duljinom prostiranja veze kroz atmosferu, na domet manji od 1000 m (za prethodno navedenu pristupačnost od 99.999% i dovoljno veliku propusnost podataka). Stoga potreba za ostvarivanjem dometa većeg od 30 km itekako zabrinjava. Ipak postoje rješenja od kojih je najjednostavnije pojačanje zračene snage signala. Kako bi se ostvarila što veća pristupačnost i propusnost, pri povezivanju satelita i zemaljske bazne stanice moraju se uzeti u obzir određeni uvjeti:

1. Utjecaj oblaka na prekid izravne optičke linije i prekid signala
2. Utjecaj zračnog prometa na prekid veze
3. Elevacija satelita u odnosu na baznu stanicu
4. Pozadinski šum uzrokovan atmosferskim raspršenjem i suncem

Uz ove utjecaje, potrebno je i voditi računa o zaštiti okoline od potencijalno opasne snage zračenog signala. S obzirom da bi se lokacija bazne stanice trebala odabirati uzevši u obzir prosječan broj oblačnih dana u godini za željenu lokaciju, velika je vjerojatnost da je to područje

sušno i podložno požarima, koje bi potencijalno mogla uzrokovati refleksija zrake. Također, potrebno je voditi računa o tome da zraka signala ne dovodi u pitanje sigurnost zračnog prometa.

Općenito, za komunikaciju satelita i bazne stanice nije moguće izravno koristiti jednostavne poluvodičke lasere zbog premalih snaga zračenja. Moguće je međutim upotrijebiti optički odašiljački sustav temeljen na poluvodičkom laserskom izvoru i EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) optičkom pojačalu.

Pri projektiranju veze satelita i bazne stanice moraju se uzeti u obzir razna djelovanja koja uzrokuju prekide u vezi. Najčešće su prekidi uzrokovani vremenskim prilikama. Kako bi se umanjili prekidi uzrokovani vremenskim prilikama potrebno je pažljivo odabrati lokaciju bazne stanice.

U slučaju prekida veze uputno je koristiti razrađene metode uspostavljanja veze poput korištenja retransmisijskih protokola. Jedan takav protokol je i ARQ (Automated Repeat Request). ARQ protokol se često koristi za povećanje pouzdanosti nepouzdanih sustava, odnosno sustava sa učestalim prekidima veze. U kontekstu FSO veze zemaljske bazne stanice i satelita, kako se ne bi smanjila brzina prijenosa, preporučeno je koristiti ARQ sa selektivnim ponavljanjem. Kod ove metode predajnik konstantno odašilje podatke u dolaznom smjeru (downlink). Ako se na prijemu duže vrijeme ne očita neki od odaslanih podatkovnih okvira sustav pretpostavi da je podatkovni okvir izgubljen te započne ponovno odašiljanje (retransmisija) tog podatkovnog okvira. Moguće je i prilagoditi ARQ protokol na način da se pri gubitku podatkovnog paketa šalje signal ne primanja istog. ARQ protokol može se implementirati na podatkovnom ili na transportnom sloju.

Kako bi se maksimizirao komunikacijski kapacitet kanala potrebno je upotrijebiti najkvalitetnije metode modulacije i kodiranja signala s obzirom na komunikacijsku tehnologiju [73]. Za komunikaciju sa satelitom putem FSO veze potrebna je modulacija sa velikim omjerom vršne i prosječne snage signala. PPM modulacija najčešće se uzima kao najkvalitetnija i najjednostavnija u tim uvjetima. Unatoč tome, moguće je upotrijebiti i druge metode modulacije.

Nakon odabira modulacije, potrebno je odabrati i najprikladniji kod. Izvorno se u komunikacijama između satelita koristio RS kod, no u novije vrijeme JPL (Jet Propulsion Laboratory) razmatra korištenje serijski povezanih PPM kodova (SCRS – Serially Concatenated PPM). Ova vrsta koda može postići brzine prijenosa blizu granice kapaciteta kanala.

6.3. OW veza

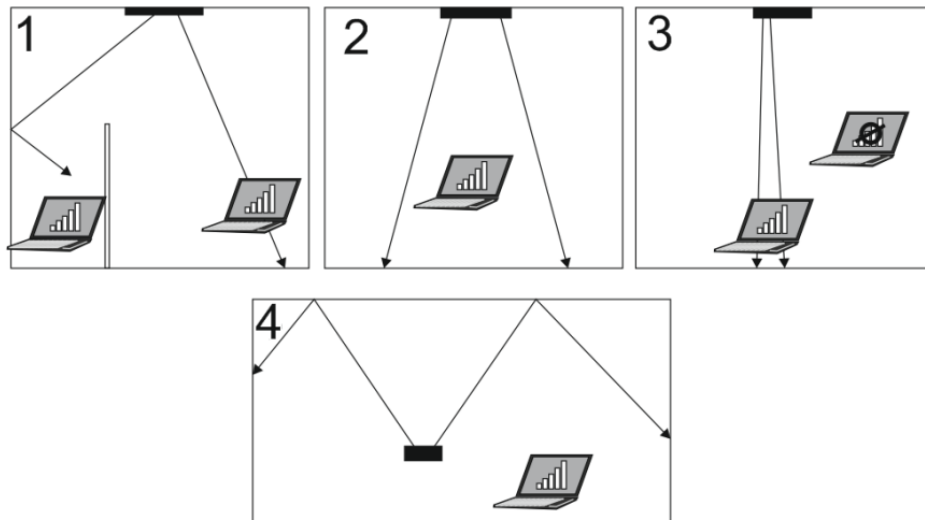
OW (Optical Wireless) predstavlja varijantu širokopolasne komunikacije vidljivim svjetlom koja se koristi za lokalne bežične pristupne mreže. Neki autori ovaj termin upotrebljavaju za opći pojam komunikacija vidljivim svjetlom, dok neki drugi termin vežu isključivo uz lokalne bežične mreže u zatvorenim prostorijama sa dometom ne većim od 100 m. Pošto je razlika između bežičnih optičkih mreža za veće domete (FSO) i lokalnih bežičnih optičkih mreža vrlo izražena, u ovom se radu druge navode kao OW.

Kao što je napomenuto OW ima neke osnovne temeljne razlike u samom konceptu i implementaciji prijenosa podataka, no također kao medij koristi spektar valnih duljina vidljive svjetlosti. Najosnovnija razlika između FSO i OW je implementacija dolaznog (downlink) i odlaznog (uplink) smjera komunikacije. Kod FSO sustava, svaki čvor je konceptualno jednak i omogućuje komunikaciju u oba smjera. Cilj OW tehnologije je umrežavanje samih korisničkih uređaja, pa je stoga razumljivo da odlazni smjer komunikacije ne može biti implementiran jednakim standardnim čvorom, već mora biti ugrađen u sam uređaj (laptop računalo, tablet PC, smart phone) na način da ne ometa korisnika uređaja.

Druga temeljna razlika između OW i FSO komunikacijskih tehnologija je način prostiranja zrake. Kod FSO sustava koristi se uska kolimirana zraka, dok se kod OW sustava koriste izvori sa znatno većom divergencijom. Konkretno, kod OW sustava koristi se više različitih vrsta odašiljača okarakteriziranih radijalnim kutom prostiranja. OW odašiljači mogu se svrstati u nekoliko standardnih vrsta:

1. Difuzni odašiljač (Lambertov izvor)
2. Odašiljač sa širokim radijalnim kutom propagacije (jedan ili više)
3. Odašiljač sa uskim radijalnim kutom propagacije (jedan ili više)
4. Difuzni reflektirani izvor

Slika 32 prikazuje metode odašiljanja optičkog signala (downlink) kod OW komunikacija vidljivim svjetlom.



Slika 32. Metode odašiljanja (dolazni smjer) OW optičkog signala

Izvor: O'Brian, Katz ; Short-Range Optical Wireless Communication; 2004

Kako je primarno područje upotrebe OW komunikacija povezivanje korisničkih uređaja u zatvorenim prostorijama, ove metode odašiljanja signala dovode do zanimljive mogućnosti spajanja odašiljača u sinergijsku cjelinu sa rasvjetom prostorije. Naime, brzine prijenosa podataka koje se zahtijevaju od OW komunikacija uvelike premašuju tromost ljudskog oka, a s obzirom da se pri odašiljanju signala koristi vidljivo svjetlo, moguće je to isto svjetlosno zračenje upotrijebiti za osvjtljenje prostorije bez da se pritom ometa korisnika.

Odašiljač se može modelirati preko prosječne optičke snage P_s (pošto je preneseni signal u optičkim komunikacijskim sustavima zapravo snaga) i kuta polovice snage θ_{hp} (kut između normale na površinu zračenja i smjera u kojemu snaga opada za -3dB) [74]. Krećući od generaliziranog Lambertovog modela difuznog izvora parametar m (parametar modaliteta – određuje usmjerenost izvora) određuje se preko kuta θ_{hp} izrazom (84).

$$(\cos \theta_{hp})^m = \frac{1}{2} \rightarrow m = \frac{\log\left(\frac{1}{2}\right)}{\log(\cos \theta_{hp})} \quad (84)$$

Uz to, potrebno je izračunati zračenu optičku snagu u odnosu na polovicu kuta odašiljanja $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$ preko izraza (85).

$$P(\varphi) = \frac{m+1}{2\pi} \cdot P_s (\cos \varphi)^m \quad (85)$$

Prijemnik je pak okarakteriziran trima osnovnim parametrima; osjetljivost detektora S_s , površina osjetljivog područja A_r i vidno polje (FOV – Field Of View). Površina A_r proračunava se u odnosu na normalu površine i kuta ψ , za kojeg vrijedi $0 \leq \psi \leq \pi/2$ i koji predstavlja polovicu kuta prijema (također u odnosu na normalu) preko izraza (86).

$$A_r(\psi) = A_r (\cos \psi)^m \quad (86)$$

Pod pretpostavkom da je udaljenost d između odašiljača i prijemnika mnogo veća u odnosu na dimenzije fotodiode, jednačba frekvencijskog odziva kanala (za nultu frekvenciju) dana je izrazom (87).

$$H^{(0)} = A_r(\psi) \frac{P(\varphi)}{P_s d^2} \quad (87)$$

Ovi izrazi dakako vrijede samo ako $\psi \leq FOV$. Geometrijsko prigušenje komunikacijskog kanala izraženo u dB dano prirodnim logaritmom frekvencijskog odziva, a prosječna optička snaga na prijemu P_r dana je izrazom (88).

$$P_r = H^{(0)} \cdot P_t \quad (88)$$

Razlika optičke prijemne snage P_r i osjetljivosti prijemnika S_e naziva se marginom optičke veze M_t i izražena je formulom (89).

$$M_t = P_r - S_e \quad (89)$$

Kod OW komunikacijskih sustava postoje dva osnovna kriterija po kojima se odabire vrsta modulacije, a to su snaga odaslanog signala i širina frekvencijskog pojasa. Zbog osjetljivosti ljudskog oka na svjetlost prevelike snage, kod zračenog signala ona mora biti ograničena na vrijednosti koje neće uzrokovati ozljede. To ograničenje uvelike utječe na kvalitetu veze. Modulacijske metode sa dobrom iskoristivošću snage vrlo su učinkovite pri kompenzaciji gubitka u kanalu za male brzine prijenosa u komunikacijama izravnom optičkom linijom, no za veće brzine prijenosa i komunikacije u kojima se ne upotrebljava izravna optička linija (poput difuznog reflektiranog OW izvora) ta se učinkovitost gubi zbog pojasno ograničene karakteristike komunikacijskog kanala uzrokovane višestrukim stazama propagacije reflektiranog signala, što u konačnici dovodi do miješanja modulacijskih simbola (ISI – Intersymbol Interference) [75]. Miješanje modulacijskih simbola naročito je izraženo kod metoda modulacije sa malom iskoristivošću frekvencijskog pojasa, npr. PPM i DPIM (Digital Pulse Interval Modulation) kod kojih snaga može prijeći vrijednosti jednostavnijih metoda modulacije poput OOK. Postoje dakako metode modulacije kojima se miješanje modulacijskih simbola može suzbiti, npr. MLSD (Maximum-Likelihood Sequence Detection), ekvalizacija i TCM (Trellis Coded Modulation). Metode modulacije sa većom iskoristivošću frekvencijskog pojasa (dužim impulsima) lakše se implementiraju i manje su podložne miješanju modulacijskih simbola pa stoga manje utječu na snagu signala, dok metode modulacije velikog frekvencijskog pojasa (kraćim impulsima) posjeduju nižu prosječnu snagu koja zadovoljava sigurnosne mjere za zaštitu vida, ali pate od izobličenja uzrokovanog višestrukim stazama prostiranja signala.

Za OW sustave koji koriste modulaciju intenziteta uz izravnu detekciju (IM/DD – Intensity Modulation with Direct Detection) može se koristiti modulacija vala nosioca ili modulacija sub nosioca. PPM i DPIM modulacije imaju znatno veću iskoristivost od OOK modulacije, no zbog toga imaju umanjenu iskoristivost frekvencijskog pojasa. Unatoč tome, pri zadanoj iskoristivosti PPM ima veću iskoristivost snage u odnosu na DPIM pa se i češće primjenjuje. OOK je vrlo

koristan kod velikih brzina prijenosa (>100 Mbit/s). Izobličenje uzrokovano višestrukim putanjama prostiranja optičkog signala dolazi do značajnog izražaja upravo u slučajevima velikih brzina prijenosa.

7. Primjena digitalnih optičkih komunikacija vidljivim svjetlom

Digitalne komunikacije vidljivim svjetlom počele su zaokupljati istraživače i razvojne inženjere iz tri osnovna razloga:

1. Potražnja za povećanjem propusnosti i brzine prijenosa
2. Sve veća iskoristivost RF frekvencijskog spektra
3. Napredak tehnologija uključenih u bežične optičke komunikacijske sustave

Potražnja za povećanjem propusnosti i brzine prijenosa proizlazi iz konstantnog rasta broja korisnika koji žele imati pristup širokopolasnoj komunikacijskoj vezi. Trenutno najzastupljenije tehnologije kod bežičnih širokopolasnih komunikacija upotrebljavaju RF elektromagnetski spektar, no taj je spektar ograničen, a upravo zbog rasta potražnje, njegova se iskorištenost približava granici. Upravo iz tog razloga istražuju se alternativne metode prijenosa podataka koje bi omogućile širokopolasni pristup i velike brzine prijenosa. Nagli rast u poluvodičkim tehnologijama za koji je prvenstveno zaslužan razvoj digitalnih sustava omogućava iskorištavanje novih poluvodičkih tehnologija na području digitalnih širokopolasnih komunikacija. U kontekstu bežičnih optičkih komunikacija, najizraženiji je napredak u razvoju odašiljača (poluvodičke laser diode, VCSEL) i prijemnika (fotodiode, APD i PIN). Uzme li se u obzir napredak u samom fizičkom sloju digitalnih bežičnih optičkih komunikacija, implementacija samih sustava u modernim komunikacijskim mrežama postaje sve pristupačnija.

Postoji više mogućih područja primjene bežičnih optičkih komunikacijskih tehnologija a svako područje primjene uvjetuje neke tehnološke posebnosti. Stoga se digitalne optičke komunikacije dijele na nekoliko kategorija.

S obzirom na različite komunikacijske tehnologije, digitalne komunikacije putem vidljive svjetlosti mogu se podijeliti na dvije kategorije:

1. Satelitske komunikacije vidljivim svjetlom (satelitski FSO)
2. Zemaljske komunikacije vidljivim svjetlom (zemaljski FSO)

Nadalje, satelitske komunikacije vidljivim svjetlom dijele se na:

1. Među kontinentalna globalna komunikacijska mreža
2. DS (Deep Space) komunikacija

A zemaljske komunikacije vidljivim svjetlom dijele se na:

1. Zemaljski FSO (Free Space Optics) komunikacijski sustavi
2. OW (Optical Wireless) lokalni pristupni komunikacijski sustavi

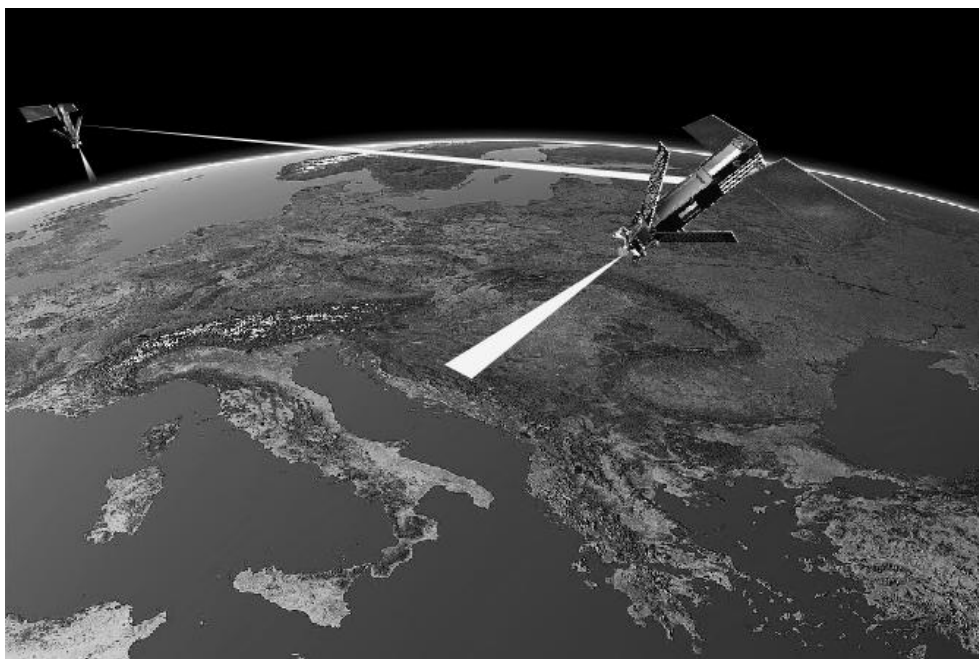
Različita područje primjene uvjetuju samu tehnologiju odašiljanja i prijema, odnosno dolazni i odlazni smjer komunikacije. U nastavku će biti obrađene specifične potrebe i posebnosti kod navedenih područja primjene digitalnih bežičnih optičkih komunikacija.

7.1. Primjena satelitskih FSO komunikacijskih sustava

Medij prijenosa FSO komunikacijskog signala izrazito utječe na performanse veze. Atmosfersko prigušenje može znatno pogoršati ili u potpunosti prekinuti komunikacijsku vezu. Razlog tome je međudjelovanje atmosferskih sastavnica i moduliranog svjetlosnog signala. kod komunikacija putem svjetlovoda prigušenje medija prijenosa umanjuje se kvalitetnom izradom optičkih vlakana, pošto upravo to prigušenje ograničava domet veze. Kod FSO komunikacija medij prijenosa je atmosfera, a smanjivanje utjecaja prigušenja na lokalni dio volumena staze prostiranja signala nije moguć uzme li se u obzir trenutno stanje tehnologije. Stoga se atmosfersko prigušenje mora uzeti kao parametar po kojemu se FSO komunikacijski sustav modelira. Kod satelitskih FSO komunikacijskih sustava atmosferski utjecaji mogu se u potpunosti zanemariti pošto se najniže satelitske orbite nalaze na visinama preko 300 km, dakle sasvim dovoljno iznad atmosfere da bi se okruženje rada satelita moglo smatrati potpunim vakuumom. To znači da signal u takvom okruženju nije podložan atmosferskom prigušenju pa se stoga domet mnogostruko povećava.

7.1.1. Među kontinentalna komunikacija

Činjenica da se u vakuumu svemira FSO signal prostire na desetke tisuća kilometara bez destruktivnog prigušenja ili drugih utjecaja, može se iskoristiti za postavljanje globalne satelitske FSO širokopojasne komunikacijske mreže. Sateliti bi međusobno komunicirali putem FSO veze, ali bi pojedini čvorovi satelitske mreže bili, također preko FSO veze spojeni na zemaljske bazne stanice. Veze sa zemaljskim stanicama djelom bi se prostirale kroz atmosferu, pa je stoga u tom djelu komunikacijske mreže potrebno osigurati dovoljnu snagu signala za nesmetanu komunikaciju (99.999% pristupačnosti). Satelitska međukontinentalna FSO komunikacijska mreža služila bi kao potpora zemaljskoj komunikacijskoj mreži putem optičkih vlakana. Slika 33 prikazuje koncept među kontinentalne FSO komunikacije korištenjem satelita.



Slika 33. Koncept satelitske među kontinentalne FSO komunikacijske mreže

Izvor: (podloga) Views of the Earth; <http://earth.imagico.de/>; Christoph Hormann

7.1.2. DS komunikacija

Osim kao podrška postojećoj zemaljskoj komunikacijskoj mreži putem optičkih vlakana, satelitska FSO komunikacijska mreža može poslužiti za buduće primjene komunikacija u duboki svemir (DS – Deep Space communication). Svemirske agencije različitih zemalja (NASA, ESA, JAXA, itd.) razmatraju mogućnosti uporabe FSO veze za uspostavljanje komunikacija sa različitim svemirskim istraživačkim misijama. To uključuje bespilotne svemirske sonde i satelite za istraživanje objekata u sunčevom sustavu, ali i moguće potencijalne ljudske misije na Mjesec ili Mars. DS FSO komunikacija omogućila bi širokopojasnu vezu sa terminalom vrlo velike udaljenosti (>1 AU). Kod bespilotnih istraživačkih misija to bi omogućilo sakupljanje znatno veće količine podataka, ali i veće mogućnosti upravljanja sondom sa zemaljske bazne stanice.

U novije vrijeme sve više dobiva glasa zamisao o vraćanju misija sa ljudskom posadom na zemljin prirodni satelit – Mjesec, ali se sve ozbiljnije razmatra zapravo i misija sa ljudskom posadom na Mars. Ljudska misija na Mars će ipak vjerojatno morati pričekati još koje desetljeće. Strogo govoreći, osnovni problem je sakupljanje financijskih sredstava. Sasvim je izvjesno dakle da će do tih misija doći u dogledno vrijeme, a kako bi se one izvršile besprijekorno i sa dovoljnom razinom sigurnosti za posadu potrebno je omogućiti što kvalitetniju komunikacijsku vezu. Idealna veza predstavljala bi uparivanje DS FSO širokopojasne veze i RF pomoćne veze.

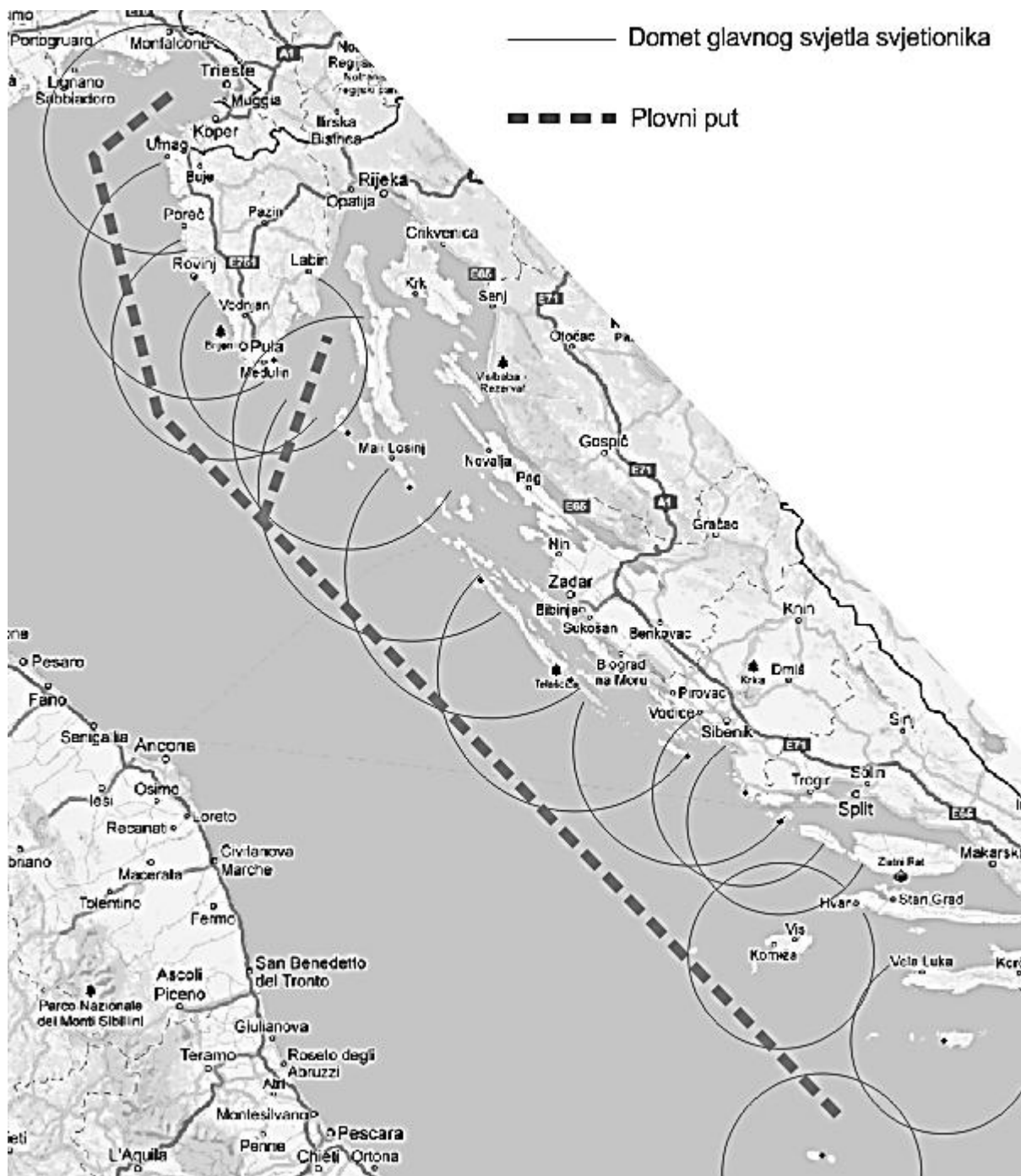
7.2. Primjena zemaljskih FSO komunikacijskih sustava

Satelitski FSO komunikacijski sustavi trenutno se nalaze u eksperimentalnoj fazi. Iako su postignuti zanimljivi rezultati [76][77][78], konkretan razvoj globalne satelitske FSO komunikacijske mreže još nije u planu. Za razliku od njih, zemaljski FSO komunikacijski terminali već su nekoliko godina komercijalno raspoloživi. Njihova osnovna primjena trenutačne je ograničena na urbane sredine gdje se zbog poteškoća postavljanja infrastrukture optičkih vlakana, koriste kao rješenje za problem posljednjeg kilometra i FTTx.

FTTx (Fiber To The x – x predstavlja varijantu završnog terminala: Home, Office, Building, Desk, itd.) predstavlja rješenje problema izravnog spajanja korisnika na širokopojasnu mrežu. Zbog ograničavajućeg utjecaja prigušenja atmosfere, domet zemaljskih FSO komunikacijskih sustava ograničen je na otprilike 1 km (ako se želi postići pristupačnost od 99.999%). Zbog velikog utjecaja

atmosferskih uvjeta na kvalitetu FSO veze neki komercijalno raspoloživi terminali kombiniraju FSO sa rezervnom RF vezom koji preuzima komunikaciju u slučaju prekida FSO veze.

FSO komunikacija mogla bi pronaći svoju primjenu i u pomorskom prometu. Naime, razmotre li se neka područja terestričke navigacije uočljivo je da je moguće iskoristiti već postojeću infrastrukturu (svjetionici) kako bi se teretnim ili putničkim brodovima u tim plovnim putovima omogućio pristup širokopojasnoj vezi. Pošto je brod kao takav mobilna platforma, bilo bi potrebno omogućiti implementaciju mobilnih FSO sustava, za što bi se mogle iskoristiti ili nadograditi tehnologije koje se trenutačno razvijaju za satelitske FSO komunikacije (aktuatori za uspostavljanje i održavanje veze u uvjetima srednje mobilnosti). Konceptualni prikaz implementacije takvog komunikacijskog sustava za područje terestričke navigacije uz jadransku obalu prikazan je na slici 34.



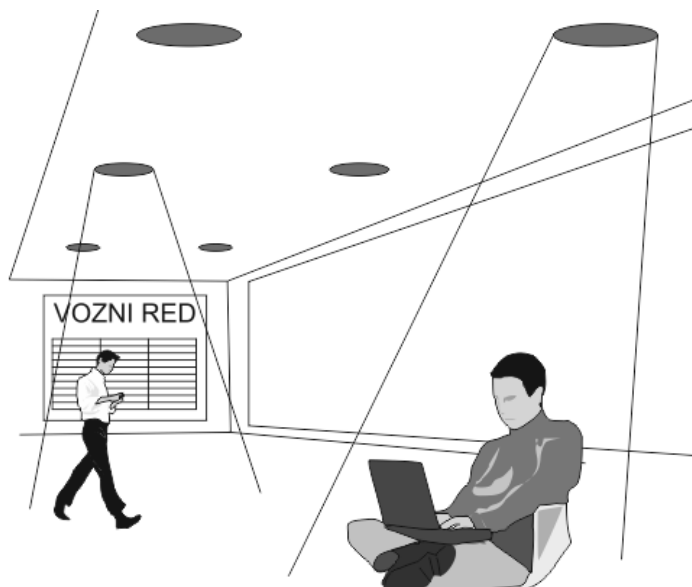
Slika 34. Konceptualni prikaz implementacije FSO komunikacija sa brodovima u području terestričke navigacije

7.3. Primjena OW komunikacijskih sustava

Osnovna razlika između FSO i OW, kao što je to i već prethodno navedeno, je način odašiljanja signala. Razlog različite implementacije odašiljanja je u samoj ciljanoj primjeni OW komunikacijskih sustava. Kod FSO nastoji se postići što veći domet, dok se kod OW nastoji povećati područje pokrivenosti.

Cilj OW komunikacijske tehnologije je povezivanje korisničkih uređaja izravno na širokopojasnu mrežu. OW dakle spada pod lokalne bežične pristupne mreže. Sama implementacija trebala bi nalikovati na bežični LAN, stoga je jedna od glavnih smjernica razvoja upravo omogućavanje većem broju korisnika pristup vezi putem jednog terminala. Trenutno najkvalitetniji pristup tome je korištenje CDMA i TDM metoda multipleksiranja komunikacijskog kanala.

OW svoju primjenu nalazi u kućanstvima i javnim mjestima poput čekaonica ili ugostiteljskih objekata. Zbog izdvojenosti od atmosferskih uvjeta, ne bi se trebalo očekivati poteškoće pri održavanju pristupačnosti na traženoj razini od 99.999%. Unatoč izoliranosti od atmosferskih uvjeta, unutar zatvorenih prostorija mogu postojati čimbenici koji bi utjecali na prigušenje signala. uglavnom je tu riječ o dimu, pa bi stoga svakako bilo savjetovano da se prostorije sa OW komunikacijskim terminalima obilježe kao prostorije za nepušaće.



Slika 35. Konceptualni prikaz implementacije OW tehnologije za spajanje korisničkih uređaja na mrežu

Kako OW tehnologiju karakterizira povezivanje korisničkih uređaja (mobitel, tablet, laptop) na mrežu, poželjno je da ova pristupna tehnologija nudi potpunu mobilnost. Konceptualni prikaz implementacije OW tehnologije za spajanje korisničkih uređaja na mrežu prikazan je na slici 35. Na slici 36., prikazan je osnovni odašiljački element OW komunikacijskog sustava u lokalnim mrežama – poluvodička LED dioda velike snage.

7.4. Prednosti i nedostaci korištenja komunikacija putem vidljivog svjetla

Najosnovnija prednost korištenja tehnologije komunikacija vidljivim svjetlom je svakako rasterećivanje RF frekvencijskih pojaseva. RF frekvencijski spektar sve više je iskorišten, dok potražnja i dalje raste. Upravo stoga komunikacija vidljivim svjetlom predstavlja jako zanimljivu alternativu bežičnim RF komunikacijama. Osim toga, komunikacija vidljivim svjetlom teoretski omogućava brzine prijenosa nalik na one prisutne u komunikacijama putem optičkih vlakana, uz istovremenu mogućnost potpune mobilnosti korisnika. Općenito, prednosti bežičnih optičkih komunikacijskih sustava mogu se svesti na:

1. Brzinu prijenosa
2. Lakoća instalacije sustava
3. Modularnost
4. Propusnost podataka
5. Nepotreban zakup RF spektra

Od nedostataka najosnovniji je dakako podložnost sustava na atmosferske uvjete. Od samog prigušenja uzrokovanog prostiranjem u idealnim uvjetima do meteoroloških prilika, pristupačnost veze ovisi o prilikama koje su u potpunosti zadane stohastičkim procesima. To ima najveći utjecaj na ukupan domet zemaljskih FSO sustava, ali kod satelitskih FSO i OW sustava ti uvjeti ne dolaze toliko do izražaja. Najveći nedostaci bežičnih optičkih komunikacija dakle mogu se svesti na:

1. Ovisnost o atmosferskim prilikama (samo zemaljski FSO)
2. Mali domet (zemaljski FSO)
3. Vibracije
4. Smanjena mobilnost (zemaljski FSO)

Još je samo važno napomenuti specifičnosti vezane uz komunikaciju putem bežične optičke veze zemaljske stanice sa satelitom u orbiti. Naime, prostiranje signala kroz atmosferu je neizbježno, te se u izravnoj komunikacijskoj vezi mora upotrijebiti svjetlosni signal velike snage, koji može biti potencijalno opasan utoliko što može nanijeti oštećenja vida ili opekline. Postoji međutim još jedan problem, a to je prekid signala uzrokovan oblacima. Oblaci zbog svoje strukture imaju izrazito atenuacijski učinak na komunikacijski signal. Potrebno je stoga pri odabiru lokacije bazne stanice uzeti u obzir godišnji prosjek naoblaka za razmatranu lokaciju, kako bi se umanjilo vrijeme nepristupačnosti veze. Također, moguće je uparivanje baznih stanica na način da se ako je jedna bazna stanica u prekidu veze promet prespoji na drugu baznu stanicu koja eventualno nije u prekidu zbog naoblake ili oborina.

Ako izuzmemo zemaljske FSO sustave, OW i satelitski FSO sustavi još su relativno daleko od konkretne komercijalne upotrebe. Ipak, postoje pokušaji standardizacije (JEITA CP – 1221, JEITA CP – 1222) kojima je cilj usmjeriti razvoj bežičnih optičkih komunikacija.



Slika 36. Primjer LED rasvjete velike snage (1W)

Izvor: Futurlec; http://www.futurlec.com/Star_LED.shtml

8. Zaključak

Kroz ovaj rad obrađene su različite tehnologije uključene u bežične optičke komunikacije. Dio rada objavljen je u časopisu Pomorstvo (Godina: 27, Broj: 1, str: 55-72) kao zasebni članak [79]. Također, stavljen je naglasak na uporabu bežičnih optičkih komunikacija u pomorstvu, što se tematski uvelike nadovezuje na seminarni rad kojeg je autor izlagao na Međunarodnom skupu za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku MIPRO 2010 [80]. U prvom djelu rada, obrađene su potrebe modernih digitalnih komunikacijskih sustava i tendencija korisničke potražnje.

U drugom djelu obrađeni su osnovni koncepti komunikacija vidljivim svjetlom. Naglasak je postavljen na konceptualne razlike FSO (Free Space Optical) i OW (Optical Wireless) komunikacijskih sustava. Iako u osnovi predstavljaju jedno te isto (neki autori koriste i jedan i drugi izraz za oba dvije tehnologije), mišljenje je autora da je svakako potrebno razlikovati jednu od druge tehnologije.

U trećem djelu obrađene su tehnologije koje predstavljaju temelj implementacije komunikacija vidljivim svjetlom. Opisane tehnologije predstavljaju trenutačno najkvalitetnije raspoložive alternative (tehnologije koje pružaju eksperimentalno dokazano najbolje rezultate), ali i tehnologije koje potencijalno mogu uvesti znatna poboljšanja iako je potrebna dodatna analiza njihovog učinka.

Kao što su u trećem djelu obrađene tehnologije odašiljanja i prijenosa, tako su u četvrtom djelu obrađene tehnologije prijema signal. U detalje su obrađeni prijemni uređaji i način njihove primjene.

U petom djelu analizirana je sama bežična optička veza. Obrađeni su utjecaji na vezu od strane medija prijenosa za zemaljski i satelitski FSO, te za OW.

U šestom i završnom djelu obrađena je primjena bežičnih optičkih komunikacija u modernim digitalnim komunikacijskim sustavima te osnovne prednosti i nedostaci upotrebe bežičnih optičkih sustava

Uzmu li se u obzir podaci navedeni u radu vezani za ovisnost komunikacija vidljivim svjetlom o atmosferskim prilikama moguće je doći do nekoliko zaključaka glede primjenjivosti ove

tehnologije u urbanoj sredini kao što je to npr. Rijeka. Primjenom FSO tehnologije bežičnih optičkih komunikacija na urbani centar kao što je Rijeka, u osnovi bilo bi moguće rješavanje problema posljednjeg kilometra i FTTx (Fiber To The x, gdje x predstavlja završni terminal komunikacijske mreže, npr. *Home, Office*, itd.). Uz to, Rijeka kao lučki grad ima mogućnost pružanja veze sa kopnom mobilnih platformi poput brodova koji uplovljavaju u luku. Ostvarivanjem širokopojasne veze sa brodom koji započinje manevar uplovljavanja bilo bi moguće unaprijediti sigurnosne postupke pri manevriranju. Rijeka nije podložna znatnim prigušnim atmosferskim utjecajima (uz izuzetak kiše), pa bi se stoga bez previše poteškoća mogla ostvariti dostupnost komunikacijske veze od 99.999%.

Komunikacija vidljivim svjetlom ima potencijal predstavljati slijedeći konceptualni korak u bežičnim digitalnim komunikacijama, no na jednak način na koji u prošlosti nije bilo moguće zamisliti potpunu sliku današnjih modernih digitalnih komunikacija, mišljenje je autora ovog rada da također nije moguće u potpunosti predvidjeti kako će digitalne komunikacije izgledati za 50 ili 60 godina. Do tada će se vrlo vjerojatno pojaviti toliko inovativne tehnologije digitalnih komunikacija da će tehnologija optičkih komunikacija (bilo putem optičkih vlakana, bilo bežična) biti u potpunosti zastarjela i neadekvatna. Jedna od tih potencijalnih budućih tehnologija prijenosa je kvantna komunikacija (iskorištavanje kvantnih svojstava subatomske čestice, poput kvantnog sprežavanja (eng. *quantum entanglement*)). S obzirom na neupitan rast u potražnji povezivanja, sasvim je izvjesno da će biti potrebno nadmašiti trenutne mogućnosti digitalnih komunikacijskih sustava. Kako god da se tehnologija razvijala, sasvim je sigurno da će ono što očekuje buduća generacija biti neusporedivo sa današnjom tehnologijom.

Literatura

- [1]. The birth of the web; <http://home.web.cern.ch/about/birth-web>; 12. 02. 2013
- [2]. NICT Achieved Highest Capacity of 109 Terabit Per Second Optical Fiber Transmission; Yoshinari Awaji, Naoya Wada; http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h22/110310/110310_e.html; 15.02.2013
- [3]. UPORABA INFORMACIJSKIH I KOMUNIKACIJSKIH TEHNOLOGIJA (IKT) U KUĆANSTVIMA I OD POJEDINACA U 2007., PRVI REZULTATI; DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU REPUBLIKE HRVATSKE; http://www.dzs.hr/Hrv/publication/2008/2-1-11_1h2008.htm; 15. 02. 2013
- [4]. UPORABA INFORMACIJSKIH I KOMUNIKACIJSKIH TEHNOLOGIJA (IKT) U KUĆANSTVIMA I OD POJEDINACA U 2007., PRVI REZULTATI; DRŽAVNI ZAVOD ZA STATISTIKU REPUBLIKE HRVATSKE; http://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2012/02-03-02_01_2012.htm; 15. 02. 2013
- [5]. Future Wireless Technology – 4G Network; Harshit Srivastava, Shubham Srivastava; 2012.
- [6]. Long Term Evolution Protocol Overview; Freescale Semiconductor Whitepaper; 2008.
- [7]. Long Term Evolution (LTE):A Technical Overview; Technical White Paper; Motorola Inc.; 2007.
- [8]. IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems; IEEE Std 802.16-2012; IEEE; 2012.
- [9]. Field Test Report WiMAX Frequency Sharing with FSS Earth Stations; Robert Ames, Adam Edwards, Kenneth Carrigan; 2008.
- [10]. Design of a Fine Steering Scheme for a LEO Satellite Free Space Optical Downlink; Erin Hammons; 2010.
- [11]. NASA Beams Mona Lisa to Lunar Reconnaissance Orbiter at the Moon; http://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/news/mona-lisa.html; Nancy Neal-Jones, Elizabeth Zubritsky; 23. 2. 2013.

- [12]. Manufacturing an engineering model of onboard optical component for a Japanese satellite; NICT (National Institute of Information and Communications Technology) news; Hiroo Kunimori; 2012.
- [13]. Optical Communications in Space - Twenty Years of ESA Effort; H. P. Lutz; <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet91/b91lutz.htm>; 23. 2. 2013
- [14]. World's first space-based commercial laser communications network launched today; <http://www.laserlightcomms.com/newsroom.php#post1>; 23. 2. 2013
- [15]. RONJA - Reasonable Optical Near Joint Access; <http://ronja.twibright.com/>; 23. 2. 2012
- [16]. Network World Research Center: FSO (Free Space Optics); <http://www.networkworld.com/details/568.html>; 23. 2. 2012
- [17]. Optics.org: Free-space optics market reach \$58M by 2018; 2013; <http://optics.org/news/4/1/3>; 23. 2. 2013
- [18]. Impact of Light Reflection on Indoor Wireless Optical CDMA Systems; Jiang Liu, Zhenni Pan, Wasinee Noonpakdee, Shigeru Shimamoto; 2012
- [19]. Paraskevopoulos A., Vučić J., Kottke C., Fernández L., Habel K., Langer K.D., Optical wireless network built on white-light LEDs reaches 800Mb/s; 2011
- [20]. Gaussian beam optics; http://www.rpgroup.caltech.edu/courses/aph162/2007/Protocols/Optics/e3872_Gaussian-Beam-Optics.pdf; 25. 2. 2013
- [21]. A tale of two beams: Gaussian beams and Bessel beams; Robert L. Nowack; 2009
- [22]. Bessel beams: diffraction in a new light; D. McGolin K. Dholakia; 2005
- [23]. Introduction to radiometry; William L. Wolfe; 1998.
- [24]. Photometry and Radiometry – Measuring Light;
- [25]. Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies; Ildefonso M. Polo; 2009

- [26]. Advanced Modulation Formats and Multiplexing Techniques for Optical Telecommunication Systems; Ghafour Amouzad Mahadiraji, Ahmad Fauzi Abas; 2012
- [27]. Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave Systems; Sen Zhang; 2004
- [28]. Digital Transmitter: Introduction to Quadrature Phase-Shift Keying; <http://cnx.org/content/m10042/latest/>; Douglas L. Jones, Swaroop Appadwedula, Matthew Berry, Mark Haun, Jake Janovetz, Michael Kramer, Dima Moussa, Daniel Sachs, Brian Wade; 26. 2. 2013
- [29]. Is DP-QPSK the endgame for 100 Gbit/sec?; <http://www.lightwaveonline.com/articles/lwe/print/volume-5/issue-6/is-dpndashqpsk-the-endgame-for-100-gbitssec-54844352.html>; Meghan Fuller Hanna; 26. 2. 2013
- [30]. Duobinary Modulation for Optical Systems; Hari Shankar; 2002
- [31]. Dispersion-Tolerant Optical Transmission Using Duobinary Modulation; http://www.vpiphotonics.com/App_ModFormat_NRZDB.php; 26. 2. 2013
- [32]. Differential Pulse-Position Modulation for Power-Efficient Optical Communication; Da-shan Shiu, Joseph M. Kahn; 1999
- [33]. Time-division multiplexing; http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Time-division_multiplexing.html; 26. 2. 2013
- [34]. All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing; X. Steve Yao, L.-S. Yan, B. Zhang, A. E. Willner, Junfeng Jiang; 2007
- [35]. Statistics and performance under combined impairments induced by polarization-dependent-loss in polarization-division-multiplexing digital coherent transmission; Kunihiko Mori, Tomoyoshi Kataoka, Takayuki Kobayashi, Shingo Kawai; 2011
- [36]. Space-Division Multiplexed Transmission over 4200-km 3-Core Microstructured Fiber; R. Ryf, R.-J. Essiambre, A. H. Gnauck, S. Randel, M. A. Mestre, C. Schmidt, P. J. Winzer, R. Delbue, P. Pupalakis, A. Sureka, T. Hayashi, T. Taru, T. Sasaki; 2012
- [37]. WDM reference guide; Finisar Corporation; 2008

- [38]. Optical orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications; Fan R. K. Chung, Jawad A. Salehi, Victor K. Wei; 1989
- [39]. Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems; Arthur James Lowery, James Armstrong; 2006
- [40]. Novel Orthogonal Wavelength Division Multiplexing (OWDM) Scheme: Theory and Experiment; Roberto Llorente, Ju Han Lee, Paulo J. Almeida, Morten Ibsen, David J. Richardson, Javier Marti, Francisco Ramos; 2004
- [41]. Theory of Code Division Multiplexing; <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/268>; 27. 2. 2013
- [42]. Optical Code Division Multiplexing (OCDM) nad Its Application to Photonic Networks; Kenichi Kitayama, Hideyuki Sotobayashi, Naoya Wada; 1999
- [43]. Free Space Optical Polarization De-multiplexing and Multiplexing by means of Conical Refraction; Alex Turpin, Yurii Loiko, Todor K. Kalkandjiev, Jordi Mompart; 2013
- [44]. Free-space orbital angular momentum division multiplexing with Bessel beams; A. Gatto, M. Tacca, P. Martinelli, P. Boffini, M. Martinelli; 2011
- [45]. Adding a Twist dimension to communication for 2.5 terabits per second now and hundreds of times more later; <http://nextbigfuture.com/2012/06/adding-twist-dimension-to-communication.html>; 27. 2. 2013
- [46]. EE387 Notes #7, Handout #28 - Course ntotes Stanford university; John Gill; 2010
- [47]. Reed-Solomon Codes; Bernard Sklar; 2002
- [48]. LDPC Codes – a brief Tutorial; Bernhard M.J. Leiner; 2005
- [49]. Generalized Low-Density Parity-Check Codes for Optical Communication Systems; Ivan B. Djordjevic, Olgica Milenkovic, Bane Vasic; 2005
- [50]. CSMA/CD: Ethernet's Multiple Access Protocol; http://www.cs.utexas.edu/users/vin/Classes/CS386M-Fall04/Readings/ethernet_552.pdf; 28. 2. 2013

- [51]. The G.709 Optical Transport Network — An Overview; Roberto Gendron, Amato Gidaro; 2008
- [52]. A G.709 Optical Transport Network Tutorial; Guylain Barlow; 2009
- [53]. LED Basics: Technology Fundamentals for Novices; Michael Poplawski; 2010
- [54]. Electronics - The basics of semiconductor physics; Marta Rencz, Gergely Nagy; 2012
- [55]. Physics of Optoelectronic Devices Light Emitting Diodes; VISHAY-TELEFUNKEN; 2000
- [56]. Paraskevopoulos A., Vučić J., Kottke C., Fernández L., Habel K., Langer K.D., Optical wireless network built on white-light LEDs reaches 800Mb/s; 2011
- [57]. Operating Principles of VCSELs; Rainer Michalzik, Karl Joachim Ebeling; 2006
- [58]. Optical Physics of Quantum Wells; David A. B. Miller; 1998
- [59]. Suppression of Intensity Fluctuations in Free Space High-Speed Optical Communication Based on Spectral Encoding of a Partially Coherent Beam; Gennady P. Berman, Alan R. Bishop, Boris M. Chernobrod, Dinh C. Nguyen, Vyacheslav N. Gorshkov; 2006
- [60]. Propagation of Some Coherent and Partially Coherent Laser Beams; Yangjian Cai; 2006
- [61]. Experimental and Theoretical Studies in Optical Coherence Theory; Thomas van Dijk; 2011
- [62]. Optical (through-the-air) communications;
http://www.modulatedlight.org/optical_comms/optical_index.html; 2. 3. 2013
- [63]. Reliability Analysis of FSO Communication Links using Aberrated Divergent Rectangular Partially Coherent Flat-Topped Beam; B. Ghafary, F. D. Kashani, E. Kazemian; 2013
- [64]. Characteristics and Use of Photodiodes;
<http://unicorn.ps.uci.edu/H2A/handouts/PDFs/photodiode.pdf>; 4. 3. 2013

- [65]. Principles of Semiconductor Devices, Chapter 4.7. Photodiodes; Bart Van Zeghbroeck; 2011
- [66]. PIN Photodetector Characteristics for Optical Fiber Communication; <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/pin-photodetector-characteristics-for-optical-fiber-communication/>; 3. 3. 2013
- [67]. Design and properties of silicon avalanche photodiodes; I. Wegrzecka, M. Wegrzecki, M. Grynglas, J. Bar, A. uszynski, R. Grodecki, P. Grabiec, S Krzeminski, T. Budzynski; 2004
- [68]. Photodiode Characteristics and Applications; Felix Haro; 2002
- [69]. Terrestrial Free-Space Optical Communications; z. Ghassemlooy, W. O. Popoola; 2012
- [70]. The Physics of Free-Space Optics; Scott Bloom; 2002
- [71]. Availability of Free Space Optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems; Isaac I. Kim, Eric Korevaar; 2001
- [72]. Performance limitations of free-space optical communication satellite networks due to vibrations—analog case; Shlomi Arnon, Norman S. Kopeika; 1997
- [73]. Deep Space Optical Communications; Hamid Hemmati, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology; 2005
- [74]. Optical Wireless Communication: LOS/WLOS/DIF propagation model and QOFI software; Olivier Bouchet, Mathieu Bertrand, Pascal Besnard; 2008
- [75]. Multilevel Digital Pulse Interval Modulation Scheme for Optical Wireless Communications; Z. Ghassemlooy, N. M. Aldibbiat; 2006
- [76]. Lutz H.P., Optical Communications in Space - Twenty Years of ESA Effort; <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet91/b91lutz.htm>; accessed: 4. 4. 2013
- [77]. Gotthard Oppenhäuser; A World First: Data Transmission Between European Satellites Using Laser Light;

[http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/A_world_f
irst_Data_transmission_between_European_satellites_using_laser_light](http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/A_world_first_Data_transmission_between_European_satellites_using_laser_light); accessed: 4. 4. 2013

- [78]. Neal-Jones N., Zubritsky E., NASA Beams Mona Lisa to Lunar Reconnaissance Orbiter at the Moon; http://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/news/mona-lisa.html; accessed: 4. 4. 2013.
- [79]. Bežične optičke mreže - Mobilne komunikacije uporabom vidljivog svjetla, I. Jurdana, M. Štrlek, S. Kunić, Pomorstvo, UDK: 656.61, ISSN: 1332-0718 godina: 27, broj: 1, 2013.
- [80]. I. Jurdana, M. Štrlek, R. Ivče, Primjena bežičnih optičkih komunikacijskih mreža u pomorstvu, 33. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku MIPRO 2010., Opatija, Hrvatska, 2010.

Popis kratica

3G - Treća generacija komunikacijskih sustava

3GPP - 3G Partnership Project

4G - Četvrta generacija komunikacijskih sustava

APAC - Asia-Pacific

APD - Avalanche Photodiode

ARQ - Automated Repeat Request

ASK - Amplitude Shift Keying

AU - Astronomical Unit

BCH - Bose Ray-Chadguri

BCJR - Bahl–Cocke–Jelinek–Raviv

BER - Bit Error Ratio

BPSK - Binary Phase Shift Keying

BPSK - Binary Phase-Shift Keying

CCD - Charge Coupled Device

CCFL - Cold Cathode Fluorescent Lamp

CDM - Code Division Multiplexing

CERN - Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (European Organization for Nuclear Research)

CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection

CWDM - Coarse Wavelength Division Multiplexing

DPIM - Digital Pulse Interval Modulation

DPPM - Differential Pulse Position Modulation

DP-QPSK - Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying

DPSK - Differential Phase Shift Keying

DQPSK - Differential Quadrature Phase Shift Keying

DS - Deep Space

DSL - Digital Subscriber Line

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing

EEFL - External Electrode Fluorescent Lamp

EEL - Edge Emitting Lasers

ELP - Electroluminescent Panel

EMEA - Europe, Middle East and Africa

eNB - eNodeB

ERAN - Evolved Radio Access Network

ESA - European Space Agency

E-UTRA - Evolved Terrestrial Radio Access

FDD - Frequency Domain Duplexing

FEC - Forward Error Correction

FFT - Fast Fourier Transform

FSO - Free Space Optics

FTTx - Fiber To The x

GEO - Geostationary Orbit

GLDPC - Generalized Low Density Parity Check

GSM - Gaussian Schell Model

GSM - Global System for Mobile Communication

HCFL - Hot Cathode Fluorescent Lamp

HEO - High Earth Orbit

IM/DD – Intensity Modulation with Direct Detection

ISDN – Integrated Service Digital Network

ISI – Intersymbol Interference

ITU - International Telecommunication Union

JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency

JEITA - Japan Electronics and Information Technology Industries Association

JPL - Jet Propulsion Laboratory

LAN - Local Area Network

LCD - Liquid Crystall Display

LDPC - Low Density Parity Check

LED - Light Emitting Diode

LEO - Low Earth Orbit

LOS - Line Of Sight

LTE - Long Term Evolution

MAC - Medium Access Control

MBE - Molecular Beam Epitaxy

MEO - Medium Earth Orbit

MLSD - Maximum-Likelihood Sequence Detection

MME - Mobility Management Entity

MOCVD - Metal Organic Chemical Vapor Deposition

MYI - Mach-Zehnder-ov Interferometar

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NRZ - Non-Return to Zero

OAM - Orbital Angular Momentum Multiplexing

OB - Overheard Byte

OCDM - Optical Code Division Multiplexing

OCh - Optical Channel

ODB - Optical Dual Binary

ODU - Optical Dana Unit

OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OMS - Optical Multiplex Section

OOK - On Off Keying

OPU - Optical Channel Payload Unit

OTN - Optical Transport Network

OTS - Optical Transport Section

OTU - Optical Transport Unit

OW - Optical Wireless

PDCP - Packet Data Control Protocol

PDE - Position Detection Error

PDM - Polarisation Division Multiplexing

PDNGW - Packet Data Network Gateway

PPM - Pulse Position Modulation

PSD - Position Sensing Detector

QPSK - Quadrature Phase Shift Keying

RF - Radio Frequency

RGB - Red Green Blue

RLC - Radio Link Control

RS - Reed-Solomon

RZ - Return to Zero

SDM - Space Division Multiplexing

SGW - Serving Gateway

SILEX - Semi-conductor Inter-satellite Link EXperiment

SLM - Spatial Light Modulator

SNR - Signal to Noise RAtio

TAPCB - Time Averaging of Partially Coherent Beam

TCM - Trellis Coded Modulation

TDD - Time Domain Duplexing

TDM - Time Domain Multiplexing

TGSM - Twisted Gaussian Schell Model

UE - User Equipement

UTP - Unshielded Twisted Pair

VCSEL - Vertical CAvity Surface Emitting Laser

VLC - Visible Light Communication

WDM - Wavelength Division Multiplexing

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

YAG - Itrj-Alminij-Granat

Popis slika

Slika 1. Namjera uporabe Interneta u prvom tromjeseccju 2012	5
Slika 2. Topologije FSO komunikacijskih mreža	12
Slika 3. SILEX laserski terminal za medu satelitsku komunikaciju	13
Slika 4. Globalno tržište komercijalnim FSO komunikacijskim sustavima	16
Slika 5. Predviđanje rasta potražnje LED rasvjete	17
Slika 6. Usporedba FSO i OW tehnologije prijenosa podataka putem vidljivog svjetla	19
Slika 7. Profil i razdioba intenziteta Gausove zrake	23
Slika 8. Profil i projekcija Besselove zrake	26
Slika 9. Graficki prikaz zracenja Lamberovog izvora	29
Slika 10. Prikaz dijagrama stanja OOK modulacije uz naznacenu razdiobu modulacijskih simbola	31
Slika 11. NRZ OOK modulacija signala nosioca i prikaz dijagrama stanja sa tranzicijama modulacijskih simbola	32
Slika 12. RZ OOK modulacija signala nosioca i prikaz dijagrama stanja sa tranzicijama modulacijskih simbola	33
Slika 13. BPSK modulacija signala nosioca uz prikaz dijagrama stanja	34
Slika 14. BPSK modulacija signala nosioca uz prikaz dijagrama stanja	36
Slika 15. Simulirani dijagram oka za NRZ i ODB modulaciju za opticke putove duljine 120 i 240 km	38
Slika 16. Blok shema TDM metode multipleksiranja	41
Slika 17. Blok dijagram WDM metode multipleksiranja	43
Slika 18. Graf relativnog intenziteta zracenja s obzirom na valnu duljinu za YAG:Ce bijele LED	56

Slika 19. Kromatski dijagram sa naznačenom pozicijom YAG:Ce LED izvora zračenja bijele svjetlosti	57
Slika 20. Dijagram zračenja Lambertovog izvora (poluvodička LED dioda) u polarnim koordinatama	58
Slika 21. Presjek tipične strukture VCSEL poluvodičkog lasera sa označenim slojevima	61
Slika 22. Usporedba koherentne i nekoherentne svjetlosti	64
Slika 23. Presjek tipične fotodiode	71
Slika 24. Ovisnost vremena prirasta (odziv) o parametrima τ_1 i τ_2	74
Slika 25. Struktura PIN fotodiode	75
Slika 26. Odziv PIN fotodiode s obzirom na valnu duljinu upadnog zračenja za različite materijale	80
Slika 27. Jakost električnog polja u strukturi APD	83
Slika 28. Kvadrantna fotodiode sa kucištem i razmještaj segmenata	87
Slika 29. Tipični elektronički sklop za upravljanje kvadrantnom fotodiodom	89
Slika 30. Izgled fronte zračenja lasera nakon duljine propagacije 1000 m kroz atmosferu	97
Slika 31. Gustoća atmosfere prikazana u omjeru sa gustoćom na razini mora u ovisnosti o visini	102
Slika 32. Metode odašiljanja (dolazni smjer) OW optičkog signala	106
Slika 33. Koncept satelitske među kontinentalne FSO komunikacijske mreže	112
Slika 34. Konceptualni prikaz implementacije FSO komunikacija sa brodovima u području terestričke navigacije	115
Slika 35. Konceptualni prikaz implementacije OW tehnologije za spajanje korisničkih uređaja na mrežu	116

Popis tablica

Tablica 1. Zahtijevane performanse LTE standarda	6
Tablica 2. E-UTRA pojasevi / Širina kanala	7
Tablica 3. RONJA FSO Open Hardware specifikacija za modele Tetropolis i Inferno	15
Tablica 4. Usporedba bežinog CDM i OCDM	46
Tablica 5. Poluvodiči dobiveni spojevima elemenata iz III i V skupine	55
Tablica 6. Vrijednosti atmosferskog prijenosa (T) za određene vidljivosti	67
Tablica 7. Usporedba parametara APD i PID fotodioda za različite tehnologije izrade	84
Tablica 8. Sastav atmosfere	91
Tablica 9. Iznosi prigušenja atmosferskih i vremenskih uvjeta uz međunarodne standardne vrijednosti	94
Tablica 10. Ovisnosti raspršenja o dimenzijama čestica u atmosferi	96