

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
ELEKTROTEHNIKE I
INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE**

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

**Tehnologija komuniciranja vidljivom
svjetlošću kao dio bežične pristupne
arhitekture pete generacije (5G)**

Faruk Duvnjak

Split, listopad 2016.

Sadržaj

ABSTRACT.....	4
SAŽETAK	4
1. UVOD.....	5
2. OSNOVI PRINCIPI FUNKCIONIRANJA VLC TEHNOLOGIJE	7
2.1 Princip funkcioniranja VLC predajnika i prijemnika.....	10
2.2 VLC kao budući način širokopojsnog Internetskog pristupa i komuniciranja.....	12
2.3 Infrastruktura komuniciranja vidljivom svjetlošću za privatne/javne prostore i zgrade	14
3. TEHNIKE DIGITALNOG PRIJENOSA ZA VLC TEHNOLOGIJU.....	18
3.1 Predajne modulacijske tehnike u VLC sustavima.....	19
3.2 Modulacijske tehnike prigušenja svjetlosti u VLC sustavima	21
3.2.1 Tehnike VLC modulacija s digitalnim prigušenjem svjetlosti.....	22
3.2.2 Ostale tehnike prigušenja svjetlosti.....	23
4. PREGLED IEEE STANDARDA 802.15.7: BEŽIČNA OPTIČKA KOMUNIKACIJA PUTEM VIDLJIVE SVJETLOSTI NA KRAĆIM RASTOJANJIMA.....	24
4.1 Opći opis i arhitektura.....	24
4.1.1 Prigušenje svjetlosti	24
4.1.2 Izbjegavanje treperenja svjetlosti.....	25
4.1.3 Model prijenosa podataka	25
4.2 Specifikacija protokola podsloja kontrole pristupa mediju (MAC).....	25
4.2.1 Specifikacija usluge (servisa) podsloja kontrole pristupa mediju (MAC)	27
4.2.2 Specifikacije sigurnosti	28
4.3 Specifikacije fizičkog (PHY) sloja (razine)	28
4.3.1 Specifikacije usluge (servisa) fizičkog (PHY) sloja	29
4.3.2 Specifikacije PHY I načina rada fizičkog sloja.....	30
4.3.3 Specifikacije PHY II načina rada fizičkog sloja	30
4.3.4 Specifikacije PHY III načina rada fizičkog sloja.....	31
5. SPECIFIČNOSTI I PROBLEMI VLC SUSTAVA.....	32
5.1 Utjecaj karakteristika rasvjete na VLC tehnologiju	32
5.1.1 Ograničenja rasvjete.....	32
5.1.2 Mjerenje i karakteristike svjetlosti.....	33
5.1.3 Karakteristike i ograničenja svjetlosnih dioda (LED).....	33

5.1.4	Karakteristike i ograničenja prijemnika	34
5.1.5	Karakteristike LED upravljačke elektronike.....	35
5.2	Problemi i karakteristike komunikacijskog kanala	35
5.2.1	Problemi pri MIMO prijenosu signala putem vidljive svjetlosti.....	37
5.2.2	Otklanjanje problema zasjenjivanja pri MIMO VLC prijenosu signala	38
5.2.3	Poboljšanje performansi VLC sustava	38
5.3	Problemi pri planiranju VLC ćelija.....	39
5.3.1	Integriranje prijenosa u silaznom i uzlaznom smjeru.....	40
5.3.2	Dostignuća u brzini prijenosa u VLC ćelijama	40
6.	POZICIONIRANJE U SUSTAVIMA KOMUNICIRANJA VIDLJIVOM SVJETLOŠĆU.....	42
6.1	Karakteristike pozicioniranja putem LED rasvjete	42
6.2	Tehnike pozicioniranja.....	42
6.3	Tipovi, karakteristike VLP prijemnika i format emitiranog signala	43
7.	IZAZOVI I MOGUĆNOSTI ZA ŠIRU IMPLEMENTACIJU VLC SUSTAVA	45
7.1	Realizacija VLC sustava	46
7.2	Perspektiva buduće ugradnje VLC sustava u rasvjetna tijela	46
7.2.1	Budući izazovi za širu komercijalizaciju VLC tehnologije	47
7.3	VLC u kontekstu budućih heterogenih mreža.....	48
7.3.1	Li-Fi (Light-Fidelity) kao podskup (dio) VLC-a	48
7.3.2	Integracija i interoperabilnost VLC-a i Wi-Fi-ja	49
7.3.3	Rješenja za interoperabilnost heterogenih sustava.....	50
7.3.4	VLC u kontekstu pametne rasvjete sa brigom o ljudskom zdravlju	51
7.3.5	Istraživačke grupe za VLC.....	52
8.	ZAKLJUČAK	54
	POPIS KRATICA	56
	LITERATURA (REFERENCE).....	62

ABSTRACT

Visible Light Communication (VLC) represents communication technology which uses visible light part of the electromagnetic (EM) spectrum for transfer of information. By many anticipations, this way of mobile broadband access and data transmission represents new promising communication technology with many application possibilities and with large future potential. Certain problems during the transmission and propagation of the visible light signal, as a main information carrier through many different light signal propagation areas and environments, are making very important aspect of this sort of communication. Because, every problem in the signal transmission have direct implication on the quality of service (QoS) degradation. Main VLC technology functioning aspects, transmitters, receivers, transmission techniques, with IEEE 802.15.7 standard overview, light modulation techniques, light dimming techniques, and problems in the VLC access technology, are given in this paper. Also, most common data transmission problems over visible light spectrum description, problems with VLC systems future broader commercialization and implementation, and heterogeneous Wi-Fi/VLC and Li-Fi systems description, has been presented in this paper.

SAŽETAK

Komuniciranje vidljivom svjetlošću (VLC) je komunikacijska tehnologija koja za prijenos informacija koristi frekvencijsko područje vidljive svjetlosti. Ovakav način prijenosa, odnosno mobilnog širokopojsnog pristupa mnogi vide kao novu i obećavajuću tehnologiju komuniciranja sa veoma velikim budućim potencijalom i mogućnostima primjene. Veoma važan aspekt ovakvog načina komuniciranja čine i određeni problemi pri prijenosu, odnosno prostiranju svjetlosnih zraka koji su i osnovni nositelji informacija kroz razna područja i okruženja (ambijent) propagacije svjetlosnog signala. Ovo se također direktno odnosi i na kvalitetu usluge QoS (Quality of Service), pošto svaki problem u prijenosu signala se direktno manifestira, odnosno degradira kvalitetu usluge. U ovom radu dat je pregled osnovnih tehničkih načela funkcioniranja VLC tehnologije, predajnika, prijemnika, tehnika prijenosa, zatim pregled IEEE 802.15.7 standarda, tehnika modulacije i prigušenja svjetlosti, kao i problema koji se javljaju u VLC tehnologiji pristupa. Također, dat je opis najčešćih problema pri prijenosu podataka (informacija) putem spektra vidljive svjetlosti, te problema vezanih uz buduću širu komercijalizaciju i implementaciju VLC sustava, kao i heterogenih Wi-Fi/VLC i Li-Fi sustava.

1. UVOD

Komuniciranje vidljivom svjetlošću VLC (Visible Light Communication) predstavlja rezultat (ishod) tehnološkog napretka 21-og stoljeća. Osnovna ideja iza ove tehnologije je da se prijenos podataka može ostvariti kroz svjetlost emitiranu od strane LED (Light Emitting Diode) lampe, čiji intenzitet varira mnogo brže nego što to ljudsko oko može detektirati. Ovu tehnologiju mnogi nazivaju i "optimiziranim" Wi-Fi-jem. Smatra se da ovakav način bežične komunikacije znatno smanjuje sveukupne troškove, te da je jedan od glavnih razloga koji je doveo do izuma ove tehnologije, zapravo ograničenje klasične Wi-Fi tehnologije na relativno male udaljenosti prijenosa i nesposobnost kvalitetnog posluživanja većeg broja korisnika. Naime, svakim danom sve više mobilnih uređaja zahtijeva povezivanje na mrežu (Internet), i uslijed povećanog podatkovnog prijenosa signali postaju sve zagušeniji, te se zbog toga ukazala potreba za tehnologijom koja je otporna na ovu vrstu ograničenja. Upravo je rješenje za to bila VLC tehnologija. Sam način funkcioniranja ove tehnologije je takav ona ublažava nedostatke koji se javljaju kod Wi-Fi tehnologije. Općenito VLC tehnologija radi bez većih problema i ispod vode, te je zanimljiva za vojne i druge istraživačke potrebe. Ovakav način prijenosa, odnosno mobilnog širokopojsnog pristupa mnogi vide kao novu i obećavajuću tehnologiju komuniciranja sa veoma velikim budućim potencijalom i mogućnostima primjene.

Tehnologija komuniciranja vidljivom svjetlošću je standardizirana Visible Light Communication (VLC) PAN IEEE 802.15.7 standardom. Ova tehnologija koristi "vidljivi" dio elektromagnetnog spektra koji nije licenciran. Pošto je svjetlost oduvijek prisutna u ljudskoj okolini, tako ni ova tehnologija nema nikakvih štetnih efekata na zdravlje ljudi. Štoviše, vidljivi dio EM spektra nam pruža 10 000 puta "šire" frekvencijsko područje od dostupnog radijskog područja. Ukoliko gledamo sa stanovišta infrastrukture do danas instaliranih LED rasvjetnih tijela, ova tehnologija nam pruža oko 10 000 puta veću dostupnost u odnosu na klasičnu bežičnu tehnologiju (gledano sa stanovišta infrastrukture).

Kao i pri svakoj drugoj vrsti prijenosa i kod komuniciranja putem vidljivog svjetla javljaju se određeni problemi koji proističu iz nedostataka ove tehnologije, a to je u prvom redu ograničen domet i brzina koja naglo opada sa povećanjem udaljenosti od predajnika. Problemi također nastaju i uslijed prigušenja izazvanog zasjenjivanjem, odnosno prekidom izravne optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, kao i smetnje izazvane ambijentalnim svjetlom ili prirodnom svjetlošću. Kada više svjetlosnih zraka reflektiranih od raznih predmeta i zidova stiže do prijemnika javlja se problem interferencije među simbolima ISI (Inter Simbol Interference), zbog različitih kutova upada i duljina putova koju prelaze pojedine svjetlosne zrake. Poteškoće izaziva i neravna krivulja frekvencijskog odziva LED predajnika, kao i njihov uzak modulacijski propusni opseg. Pored ovih problema pri prijenosu u silaznom smjeru, veliki izazov predstavlja i pronalazak adekvatnog rješenja za prijenos u uzlaznom smjeru, odnosno od prijernih uređaja prema mreži. Ovdje se kao dvije moguće tehnologije prijenosa predlažu, prijenos u uplink-u putem infra-crvenog dijela spektra, odnosno dioda jer bi korištenje LED tehnologije zbog dodatnog izvora svjetla stvaralo nelagodu kod ljudi. Druga mnogo izvjesnija tehnologija za ovaj smjer prijenosa je općeprisutna Wi-Fi radijska pristupna tehnologija sa mnogim prednostima i mnogo većom brzinom prijenosa. Izazov također predstavlja i sinkroniziranje prijenosa u oba smjera tj, downlink i uplink.

Ostatak ovog rada napisan je na sljedeći način. Drugo poglavlje ovog rada opisuje temeljne principe funkcioniranja VLC tehnologije, predajnika, prijemnika, te infrastrukture za VLC. U trećem poglavlju opisane su tehnike digitalnog prijenosa, predajne modulacijske tehnike, kao i tehnike prigušenja svjetlosti. Četvrto poglavlje donosi detaljan pregled IEEE 802.15.7 standarda za VLC sa nekim najvažnijim detaljima funkcioniranja fizičkog (PHY) sloja i sloja kontrole pristupa mediju, kao i sigurnosti. U petom dijelu opisani su specifičnosti i problemi VLC sustava, karakteristika rasvjete, predajnika, prijemnika, komunikacijskog kanala, upravljačke elektronike, predajnih ćelija, MIMO prijenosa, te integracije prijenosa u silaznom i uzlaznom smjeru. Šesto poglavlje opisuje pozicioniranje u VLC sustavima, zatim tehnike pozicioniranja, vrste i karakteristike predajnika i prijemnika za lokalizaciju, kao i format emitiranog signala. U sedmom poglavlju opisani su izazovi i mogućnosti za buduću širu implementaciju VLC sustava i perspektiva ugradnje u rasvjetna tijela, zatim opis VLC tehnologije u kontekstu budućih heterogenih (RF-optičkih) bežičnih mreža, Li-Fi-ja, rješenja za integraciju i interoperabilnost heterogenih komunikacijskih sustava, pametne rasvjete, te je na kraju poglavlja dat pregled najvažnijih istraživačkih grupa za VLC u svijetu. Slijede zaključak i popis referenci.

2. OSNOVI PRINCIPI FUNKCIONIRANJA VLC TEHNOLOGIJE

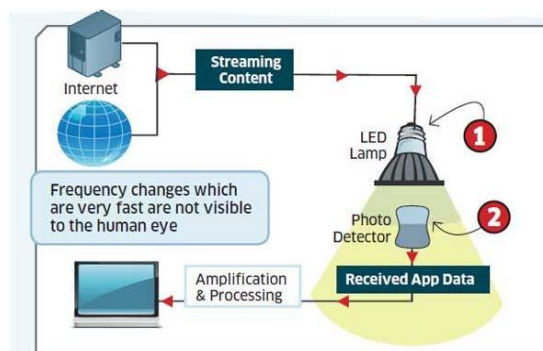
Tehnologija komuniciranja vidljivom svjetlošću implementira se korištenjem "bijelih" svjetlosnih dioda (LED) ugrađenih u rasvjetna tijela na strani predajnika, za slanje podataka u silaznom smjeru (downlink). One se obično koriste za osvjetljenje i zahtijevaju samo konstantno napajanje električnom energijom. Dakako, brzim i finijim promjenama u dotoku napajanja, možemo učiniti da i izlazna emitirana svjetlost varira iznimno velikim brzinama. Ovo bitno svojstvo "variranja" optičkog toka je iskorišteno u temeljnoj implementaciji VLC tehnologije. Osnova funkcioniranja je vrlo jednostavna: ukoliko je svjetleća dioda tj. LED upaljena, tada prenosimo digitalnu "1", a ukoliko je ugašena prenosimo digitalnu "0". Pošto se LED lampe mogu paliti i gasiti jako brzo, to nam zapravo i omogućava prijenos podataka. Dakle, u osnovi sve što nam je potrebno je LED lampa i kontroler koji kodira podatke u ove rasvjetne diode. Uloga kontrolera je varijacija brzine "treptanja" diode, ovisno o podacima koje želimo kodirati. Tako prema autorima [1], buduća unaprjeđenja idu u pravcu korištenja više paralelnih LED svjetlosnih izvora u cilju paralelnog prijenosa podataka ili mješovitom uporabom crvenih, zelenih i plavih svjetlećih dioda radi promjene frekvencije svjetla tako da svaka frekvencija kodira različit podatkovni kanal. Takva unaprjeđenja omogućuju teoretske brzine od 10 Gb/s, što znači da bi preuzimanje (download) jednog filma visoke razlučivosti trajalo svega 30 sekundi.

Radi bližeg razumijevanja funkcioniranja ove tehnologije, možemo razmotriti primjer običnog daljinskog infracrvenog (IR) upravljača. On šalje pojedinačni podatkovni tok bita brzinom od 10,000 - 20,000 bita u sekundi. Te ukoliko zamijenimo ovu infracrvenu diodu sa grupom LED svjetlećih dioda, onda je takav sustav sposoban za slanje na tisuće takvih podatkovnih tokova veoma velikim brzinama.

Autori [2] navode da, VLC predstavlja optički komunikacijski medij koji koristi spektar vidljivog svjetla u području između 400 THz (780 nm) i 800 THz (375 nm) kao optički nosač za prijenos podataka i osvjetljenje, te da koristi brze "impulse" svjetlosti za prijenos podataka bežičnim putem. Glavna komponenta ovog komunikacijskog sustava je LED svjetleća dioda velike svjetline, koja služi kao predajni element (predajnik), te silicijska fotodioda koja pokazuje jako dobar odziv na područje spektra vidljive svjetlosti, koja služi kao prijemnik. Brzim paljenjem i gašenjem svjetlećih dioda generiramo podatkovni niz nula i jedinica. Podatci se mogu kodirati u svjetlost i generiraju podatkovni tok variranjem treperenja svjetlosne diode. Preciznije, moduliranjem LED svjetla podatkovnim signalom, LED rasvjeta se može koristiti kao komunikacijski izvor. Pošto je brzina paljenja i gašenja tj. "treperenja" svjetlećih dioda jako velika ljudsko oko to ne primjećuje i registrira samo konstantnu svjetlost. Brzine prijenosa veće od 100 Mb/s su moguće uz uporabu svjetlećih dioda velike brzine i odgovarajućih tehnika multipleksiranja. Brzine prijenosa VLC tehnologije se mogu znatno povećati kao što je ranije spomenuto korištenjem grupe ili grupa LED rasvjetnih tijela, gdje svaka pojedinačna dioda prenosi zaseban tok podataka. Ovo bi, uz uštedu energije, moglo predstavljati važan razlog za preferiranje LED rasvjetnih tijela umjesto klasičnih rasvjetnih tijela poput fluorescentnih cijevi ili žarulja sa žarnom niti, koje nam ne omogućavaju prijenos podataka putem svjetlosti.

Kao prijemni uređaji mogu se koristiti "PIN" (Positive-Intrinsic-Negative) fotodiode sa sposobnošću visoke brzine prijema i do 1Gb/s. Također, mogu se koristiti i "lavinske" fotodiode APD (Avalanche Photo Diode), čija je karakteristika velika osjetljivost prijema. Pored ovoga kao prijemnik se može koristiti i senzor slike (foto-senzor), koji ima sposobnost istovremenog prijema

slike i podataka putem svjetlosti [3]. Sljedeća slika prikazuje pojednostavljeni princip funkcioniranja VLC tehnologije:



Slika 1: Pojednostavljeni princip funkcioniranja VLC tehnologije [1]

Na gornjoj slici je prikazan uopćeni princip funkcioniranja VLC tehnologije. Naime, jedna LED lampa se nalazi na stropu neke prostorije. Uz lampu nalazi se pogonski sklop (driver) koji vrši procesiranje signala, odnosno "ubacivanje" podatkovnog toka u svjetlosni tok, te na taj način svjetlosni tok prenosi podatke velikim brzinama do prijemne foto diode odnosno fotodetektora. On kao prijemni uređaj male varijacije u promjeni amplitude primljene svjetlosti pretvara u niz električnih impulsa, koji se onda ponovo pretvaraju u tok podataka i prenose do odgovarajućeg odgovarajućeg procesa u računalu ili mobilnom uređaju.

U cilju šireg razumijevanja i shvaćanja funkcioniranja VLC tehnologije, najprije je potrebno razmotriti njenu nužnost, odnosno sadašnje i buduće potrebe za ovom tehnologijom komunikacije. Sa ogromnim razvojem i upotrebom u svakodnevnom životu raznih mobilnih i prijenosnih komunikacijskih uređaja (gadgets), te svakodnevnom sve širom upotrebom, kao i dostupnošću i razvojem sve naprednijih uređaja, postavlja se pitanje i povezivosti tih uređaja na Internet.

Svakodnevno se susrećemo sa gotovo "nejasnim" razlozima za prekid signala, njegovo slabljenje i doseg kod klasičnih Wi-Fi mreža. Ovo je naročito izraženo na mjestima gdje više ljudi istovremeno pristupa na Internet putem bežičnih mreža, kao što su trgovački centri, aerodromi, konferencijske i koncertne sale, sportske manifestacije i slično. Tako da nova tehnologija pristupa Internetu putem spektra vidljive svjetlosti, ne samo da nadopunjuje nego i ispunjava sve uvjete koji se postavljaju pred klasične Wi-Fi bežične mreže. Ova ideja prvi put je javno predstavljena od strane profesora Haralda Haas-a sa Sveučilišta u Edinburgu (UK-Škotska), na "TED" globalnoj konferenciji [4]. On navodi da se višestruki paralelni podatkovni prijenos može ostvariti korištenjem grupa svjetlećih dioda. Također, dalje navodi da korištenjem istovremeno crvenih, zelenih, i plavih dioda kao predajnih uređaja možemo vršiti promjenu frekvencije emitirane svjetlosti istovremeno sa promjenom frekvencije podatkovnih kanala. Napretkom i poboljšanjima u ovom području moguće je ostvariti teoretske brzine prijenosa od 10 Gb/s. Ostali razlozi za napredak ove tehnologije su: pošto se VLC temelji na prijenosu podataka putem spektra vidljive svjetlosti, on je otporan smetnje u radijskom dijelu EM spektra, te svjetlost kao prijenosni medij nemože izazvati smetnje na osjetljivim uređajima, kao što su uređaji u avionima, bolnicama, naftnim i plinskim bušotinama, ili rafinerijama i postrojenjima (koji su inače podložni ovakvim EM smetnjama od radijskih valova). Dalje, pošto VLC za razliku od Wi-Fi može raditi i ispod

vode, čini ga zanimljivim za primjenu u podvodnim istraživanjima, kao i razne vojne i druge primjene.

Također, važno je spomenuti termin koji se sve češće upotrebljava za ovakav vid komuniciranja putem vidljive svjetlosti Li-Fi (Light Fidelity), kojeg je također definirao profesor Harald Haas po analogiji na termin Wi-Fi (Wireless Fidelity). Naime, pošto se svjetlosne diode mogu paliti i gasiti mnogo većom brzinom no što je to u stanju registrirati ljudsko oko, svjetlost koju ono prima nam se čini kao kontinuirana svjetlost, koja do nas dolazi od izvora. A pošto su radijski valovi zamijenjeni svjetlosnim valovima, otuda i potječe naziv Li-Fi (Light Fidelity).

U posljednje vrijeme rapidan razvoj tehnologije omogućuje nam sve veću mogućnost bežičnog Internetskog pristupa putem bežičnih pristupnih točki do sveprisutnijih usluga "računarstva u oblaku" (cloud computing), a u novije vrijeme aktualiziran je i termin "fog computing" (koji se odnosi na smještanje češće traženog Internetskog sadržaja što bliže korisniku). Ovo sa druge strane dovodi do sve veće degradacije i zagušenja signala pristupnih točki uslijed sve većeg broja mobilnih uređaja koji pristupaju na mrežu. Tako da slobodno možemo reći da je posljedica toga smanjenje kvaliteta pristupa Internetu i raznim drugim uslugama putem bežičnih pristupnih točki (hotspot). Ustvari, imamo smanjenje pristupne brzine, ali također je zabrinjavajuća i sigurnost komunikacije pošto se bežični signali probijaju kroz zidove, te su osjetljivi za hakerske zlonamjerne upade i napade. I upravo se pretpostavlja da će tehnologija komuniciranja vidljivom svjetlošću riješiti ova dva osnovna problema zagušenja i sigurnosti. Naime, zbog šireg frekvencijskog spektra ove tehnologije trebali bi riješiti problem zagušenja, a problem sigurnosti pristupa po pojedinoj prostoriji rješavamo time što vidljiva svjetlost ne prolazi kroz "čvrste" prepreke, te je onemogućen zlonamjerni upad u mrežu iz drugih okolnih prostora. Pretpostavlja se, da ćemo u bliskoj budućnosti biti okruženi raznim uređajima poput laptopa, pametnih telefona i tableta koji pristupaju mreži i komuniciraju putem vidljive svjetlosti. Tako autori [2] navode da bi bilo bitno spomenuti neka važna područja primjene i aspekte koji bi trebali imati posebne koristi od ove tehnologije, od kojih smo neka ukratko i ranije naveli. A ta područja primjene su:

- 1) Mogu se koristiti na mjestima na kojima je teško postavljati i polagati svjetlovodne kabele poput raznih zdravstvenih i sličnih ustanova. VLC tehnologija se može koristiti u bolnicama i operacijskim salama za komuniciranje osjetljivih instrumenata, a gde RF komunikacija može izazvati smetnje pri radu. Također i ovdje je veoma bitno anulirati smetnje od strane radijskih valova, koje mogu uticati na nepravilan rad i očitavanja ove osjetljive medicinske instrumentacije, jer to može rezultirati gubitkom ljudskih života.

- 2) U prometnoj signalizaciji, VLC tehnologija se može koristiti za komuniciranje među automobilima putem njihovih LED signalnih žarulja, kao i za komuniciranje između vozila i prometne signalizacije. Tako na ovaj način može biti spriječen veliki broj prometnih nezgoda. Pošto vozila mogu imati prednja i stražnja svjetla bazirana na LED tehnologiji, ona mogu "komunicirati međusobno", te samim tim razmjenjivati informacije i spriječiti potencijalne prometne nezgode.

- 3) U zrakoplovima VLC se također može koristiti za prijenos podataka i komunikaciju, a gdje komuniciranje putem radijskih valova može ometati osjetljive instrumente. I ovdje svaka rasvjetna lampa može biti iskorištena kao pristupna točka za komuniciranje i povezivanje sa Internetom i raznim drugim uslugama.

4) Mogu se koristiti u kemijskim, naftnim, plinskim postrojenjima, bušotinama i rudnicima gdje komuniciranje putem radijskih valova na određenim frekvencijama može biti opasno i katastrofalno. Odnosno, gdje imamo mnogo rasvjetnih tijela, a predstavlja mnogo sigurniji vid komunikacije u odnosu na klasični radijski, zbog mogućnosti ometanja osjetljivih (mjernih) uređaja. Ovo je veoma bitno, jer postoji opasnost od eksplozije i precizan rad uređaja koji mjere razinu naftnih ili plinskih isparenja je od presudne važnosti.

5) prijenos podataka između dvije daljinski upravljane podvodne sonde UOV (Underwater Operating Vehicle), koje su upravljane daljinskim putem od strane operatora uz pomoć kamere i koje koriste osvjetljenje radi lakšeg kretanja u uvjetima bez osvjetljenja na većim dubinama. Tako da nam svjetlo služi ne samo da vidim kuda da upravljamo sandom, nego i sonde mogu razmjenjivati podatke putem te iste svjetlosti.

Istraživači [3] navode da su temeljne prednosti upotrebe tj. korištenja tehnologije komuniciranja vidljivom svjetlošću sljedeće:

- Frekvencije iznad 3 THz nisu obuhvaćene zakonskim regulacijama o radijskim valovima.
- LED svjetleće diode se mogu koristiti gotovo svugdje. Pošto se infracrvena svjetlost već koristi za komunikaciju poput npr. daljinskih upravljača, zatim infracrveni bežični LAN ili infracrvena komunikacija između objekata. Svjetlosne diode LED se počinju koristiti u gotovo svakom domu ili uredu, što ih čini idealnim za "sveprisutne" predajnike za podatkovni prijenos. Stopa porasta korištenja LED rasvjetnih tijela se gotovo utrostručila u periodu od 2009 do 2012 godine, te se očekuje da će tržišni udio ove vrste rasvjete biti iznad 30 % od ukupnog tržišta rasvjete u 2016 godini.
- Također veoma je velika važnost korištenja senzora slike kao prijemnika, što omogućuje detekciju dolazećih podataka putem svjetlosti, kao i precizan smjer dolaznog vektora od predajnika do prijemnika. Korištenje tehnologije senzora slike će omogućiti razne druge primjene VLC tehnologije, koje se ne mogu realizirati tehnologijom radijskih valova, kao što je navigacija u zatvorenim prostorima, umetnuta stvarnost (augmented reality), precizna kontrola robota ili vozila, i precizno određivanje pozicije.

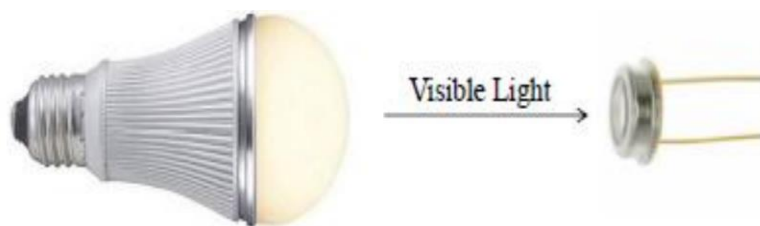
2.1 Princip funkcioniranja VLC predajnika i prijemnika

Komuniciranje putem vidljive svjetlosti predstavlja ekološki prihvatljivu tehnologiju u oblasti svjetlosnih izvora i osvjetljenja sa velikom energetsom učinkovitošću, dugim vijekom trajanja, kao i širim područjem odnosno spektrom primjene, koje VLC tehnologija zadovoljava mnogo bolje od dosadašnjih koje su primjeni.

Istraživači [3] navode da VLC izvor emitira svjetlost velikog intenziteta izraženo u Lumenima. Drugim riječima, pojedinačni svjetlosni izvor tj. svjetleća dioda, koja ima promjer od svega nekoliko milimetara, može proizvesti 2300 Lumena "jarke" bijele svjetlosti. Na ovoj izlaznoj razini, za ostvarenje Internetske veze odnosno za pristup mreži na otvorenim prostorima kao što je npr. ulica, dovoljno bi bilo koristiti jedan ovakav izvor po uličnoj svjetiljci u većini slučajeva. Ovo bi se moglo ostvariti i u kombinaciji sa već postojećom rasvjetom, gdje bi se VLC svjetlosni element, jednostavno dodao ili ukombinirao sa već postojećim rasvjetnim elementom. Te bi na taj

način uz neposrednu "optičku" vidljivost prema tom elementu, omogućavao pristup na mrežu putem raznih mobilnih uređaja iz neposredne blizine uličnog rasvjetnog tijela ukombiniranog sa VLC elementom.

Kako je već prethodno navedeno, budući Internetski pristup koji se ostvaruje putem tehnologije komuniciranja vidljivom svjetlošću, pored svjetlosnog izvora (uglavnom LED), mora imati i odgovarajuće svjetlosne prijemnike na prijemnoj strani. Kao ti prijemnici svjetlosti koriste se elektroničke komponente koje već dugo vremena imamo na raspolaganju, a koriste se kao razni fotosenzori. U budućim primjenama razni fotosenzori, koji imaju različite karakteristike, bi upravo na osnovu tih "specifičnih" karakteristika i dimenzija, mogli i biti ugrađivani u različite mobilne komunikacijske uređaje (terminale), ovisno o njihovim karakteristikama, dimenzijama i namijeni. Na sljedećoj slici prikazan je jedan općenit i pojednostavljen princip komunikacije putem svjetlosnih valova, sa komponentama koje su prilagođene za određenu namijenu i ugradnju:



Slika 4: VLC predajnik i prijemnik prilagođeni za odgovarajuću namijenu i ugradnju [3]

Već smo spomenuli da postoji velik i raznolik broj komponenti koje se mogu iskoristiti kao fotodetektor za prijem svjetlosti na strani prijemnika. Na osnovu toga istraživači [3] u svom radu navode da se kao temeljni svjetlosni prijemnici mogu iskoristiti komponente koje već dugo vremena nalaze svoju uspješnu primjenu u raznim tehničko-tehnološkim aspektima. Između ostalog oni navode tri osnovne prijemne komponente, koje su nam poznate iz drugih primjena kao optički senzori (osjetila). Te komponente su:

- Pin fotodioda (koja ima veliku brzinu prijema do 1 Gb/s)
- Lavinska fotodioda APD (koja ima veoma veliku osjetljivost prijema)
- Senzor slike ili fotosenzor (koji ima sposobnost istovremenog prijema slike i podataka)

Ove tri komponente prikazane su na sljedećoj slici:



Slika 5: Pin fotodioda, Lavinska fotodioda, i Senzor slike kao VLC prijemnici [3]

2.2 VLC kao budući način širokopojasnog Internetskog pristupa i komuniciranja

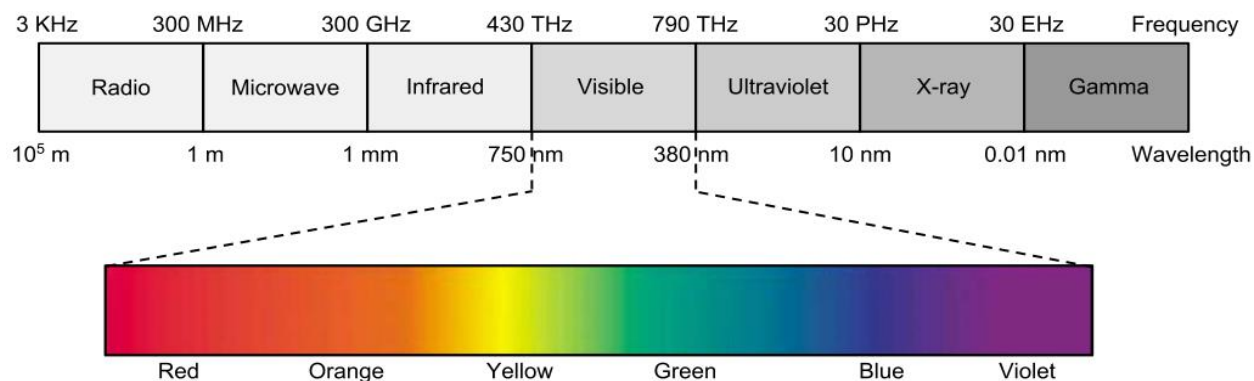
Naime, poznato je da diljem svijeta imamo raspoređenih oko 1.4 miliona baznih primo-predajnih postaja (stanica) za mobilne pristupne mreže, te da u svijetu ima preko 5 milijardi mobilnih uređaja (telefona). Pretpostavlja se, da svaki aktivni pojedinačni pametni mobilni uređaj (smartphone) generira (prijem i predaja) preko 1 GB (Gigabajta) podataka svaki mjesec. Sukladno ovomu, možemo reći da bežične komunikacije postaju neophodan resurs koji koristimo svakodnevno, kao npr. vodu ili električnu energiju. Stoga je važno navesti karakteristike, koje nam ova tehnologija donosi, a predstavljaju određene prednosti u odnosu na klasični prijenos putem radijskih valova. Te prednosti prema [4] su:

- Prva prednost je "**kapacitet**", pošto prijenos putem radijskih valova ima svoja ograničenja, dosta su raspršeni frekvencijski pojasevi, zatim imamo veoma skupe licence radijskih frekvencijskih pojaseva za mobilne operatere. Stoga, imamo izvjesna ograničenja glede korištenja ovih frekvencija u pogledu prijenosa velikih količina podataka, a vremenom ostajemo i bez "slobodnih" frekvencija.
- Druga prednost je "**učinkovitost**", naime gore spomenutih 1.4 miliona baznih stanica troše mnogo energije. Pretpostavlja se da je većina ove energije, umjesto za prijenos utrošena na "hlađenje" ovih stanica, te je prema nekima njihova učinkovitost svega 5%.
- Treća prednost je "**dostupnost**", jer u određenim situacijama od nas se traži da isključimo mobilne uređaje (npr. zrakoplovi, bolnice), čime postajemo "nedostupni".
- Četvrta prednost je "**sigurnost**", pošto radio valovi "prolaze" kroz zidove, neko zlonamjerman može presresti naše komunikacije ili koristiti našu mrežu za pristup Internetu.

Ustvari, sve što treba uraditi za sve ove pobrojane primjene je ugraditi mikro-čip u svako potencijalno LED rasvjetno tijelo. Te će to onda rezultirati da imamo istodobno osvjetljenje i prijenos podataka (komunikaciju), odnosno povezanost na mrežu. I smatra se da upravo ova "simbioza" može riješiti četiri prethodno pobrojana temeljna problema u bežičnim komunikacijama sa kojima se trenutno susrećemo. Tako da u budućnosti umjesto o 14 milijardi LED rasvjetnih tijela, možemo govoriti o 14 milijardi (a taj broj se stalno povećava ugradnjom novih žarulja) VLC/Li-Fi pristupnih komunikacijskih točaka. Možemo zaključiti da ovaj vid mrežnog pristupa predstavlja ogroman resurs za budućnost komunikacija [4].

To bi bile neke osnovne ili glavne prednosti komunikacije vidljivom svjetlošću u odnosu na klasični način bežičnog komuniciranja putem radijskih valova. Vremenom, kako ovaj vid komunikacije i Internetskog pristupa bude šire prihvaćen i iskorišten, pretpostavlja se da ćemo otkriti i brojne druge prednosti ovog vida mobilne širokopojasne komunikacije u odnosu na sveprisutni radijski.

Pošto svjetlost predstavlja vidljivi dio elektromagnetskog (EM) spektra, najbolji uvid u ovaj način pristupa Internetu imat ćemo ukoliko to pogledamo u kontekstu cijelog elektromagnetskog spektra. Na sljedećoj slici prikazan je elektromagnetski spektar sa pojasom koji pripada vidljivom dijelu spektra:



Slika 6: Spektar/područje vidljive svjetlosti u EM spektru [55]

U gornjem dijelu EM spektra imamo Gamma zrake koje su opasne po ljudsko zdravlje, iza njih dolaze X-zrake, koje također mogu biti potencijalno opasne po ljude. Sa druge strane X-zrake su u nekim primjenama i veoma korisne (npr. rendgenski snimci u medicini). Nakon njih, odmah do gornje granice vidljivog spektra dolaze ultraljubičaste zrake, koji su također potencijalno opasne po ljude. Na suprotnoj strani, odmah do donje granice vidljivog spektra, nalaze se infracrvene zrake tj. njihovo područje. Oni sa donje strane graniče sa područjem gore spomenutih mikro i radijskih valova, koji se koriste za klasični način komuniciranja (RF).

Međutim, ono što imamo između infracrvenog područja sa donje strane i ultraljubičastog područja sa gornje strane je upravo područje spektra vidljive svjetlosti. A kao što je i poznato prirodna svjetlost nas oduvijek okružuje, te je samim tim korisna za upotrebu, stoga se postavlja pitanje zašto je ne bismo iskoristili za komuniciranje.

Ukoliko usporedimo veličinu spektra radijskih valova sa veličinom spektra vidljive svjetlosti, dolazimo do zanimljivog podatka da je širina frekvencijskog spektra vidljive svjetlosti veća 10 000 puta. I koja nam stoji na raspolaganju za komuniciranje. Također, ako usporedimo gore spomenute izvore, odnosno primopredajnike, imamo 1.4 miliona malo učinkovitih (u smislu potrošnje) ćelijskih baznih postaja, nasuprot procjenjuje se 14 milijardi LED žarulja koje mogu biti iskorištene kao pristupne točke za komunikacije. Pošto nas ove žarulje okružuju na mnogo mjesta, zašto ih onda ne bismo iskoristili za komunikacije, odnosno pristup Internetu. Pored ovoga, na mnogim mjestima bi mogli zamijeniti klasične žarulje sa LED žaruljama, koje nam omogućuju ovakav način komuniciranja. Pošto je LED poluvodički element, koji ima svojstvo da se intenzitet svjetlosti koji on emitira može mijenjati jako brzo, a također se i svjetlost koju on emitira može jako brzo prekidati. Te su upravo ova svojstva fundamentalna svojstva koja su iskorištena za komunikacije [4].

Kako je prethodno napomenuto, svjetlost emitirana od izvora i služi za osvjetljenje se istovremeno koristi i za prijenos komunikacija i podataka. Te se stoga ovdje nameće i zanimljivo pitanje: Da li svjetlo mora biti cijelo vrijeme uključeno tijekom komunikacije (prijenosa)? Odgovor je da mora, ali se ono može "prigušiti" na neki minimum i da još uvijek imamo komunikaciju, ukoliko to neprigušeno svjetlo predstavlja smetnju npr. prilikom odmora ili spavanja u prostoriji.

2.3 Infrastruktura komuniciranja vidljivom svjetlošću za privatne/javne prostore i zgrade

Optički komunikacijski sustav koji bi u budućnosti trebao nadomjestiti, a u nekim slučajevima i potpuno zamijeniti bežični LAN (Local Area Network) u stambenim, poslovnim objektima, i zgradama bi u skorije vrijeme trebao biti sve više zastupljen. Proučavajući ovakav način umrežavanja uređaja i njihovog pristupa Internetu, istraživači u [5] navode, da zatvarajući posljednju milju komunikacije uz korištenje bežične optičke komunikacije WOP (Wireless Optical Communication), dobijemo prednosti kao što su bežično okruženje, slobodnu mobilnost, te veću brzinu prijenosa podataka. Svjetlovodni optički signali iz gradske jezgrene mreže, završavaju na lokaciji određene optičke kontrolne ploče OCP (Optical Control Panel), nakon čega su ti signali filtrirani, rekodirani, i emitirani preko LED rasvjete do različitih područja kuće ili ureda. Fotoprijemnici, sa druge strane primaju svjetlosne signale i ponovo ih konvertiraju u električne signale za uređaje. Na taj način smo uporabili svjetlost kao medij za komunikaciju na lokalitetu ureda ili kuće (stana).

Kroz povijest bilo je više primjera uporabe svjetlosti za komuniciranje u slobodnom prostoru. Poznate povijesne primjene optičkog prijenosa u slobodnom prostoru uključuju Chappe-ov telegraf, Mangin-ov optički telegraf, heliograf, i fotofon od Alexander Graham Bell-a. Autori [6], ističu da je uz rastuću popularnost, optička komunikacija za slobodne prostore, za razliku od svjetlovodne optičke komunikacije, telekomunikacijska tehnika koja nije još potpuno razvijena i iskorištena. Dok je optička komunikacija putem svjetlovoda, široko primijenjena u današnjim komunikacijama. Pretpostavlja se, da će narednih godina, optičke komunikacije za slobodne prostore postati integralni dio bežične komunikacije, a naročito u zatvorenim prostorima kao što su domovi, uredi, učionice, i industrijska postrojenja.

Bežična optička komunikacija WOPCOM (Wireless Optical Communication), predstavlja proširenje postojeće tehnologije pristupa, koja je dizajnirana da riješi probleme pristupa od svjetlovodnog vlakna do uređaja FTTD (Fiber-to-the-Device). Tako prema autoru [7] u FTTH (Fiber-to-the-Home) distribuiranoj komunikacijskoj mreži, optički signali od operatera usluga dolaze do domova ili ureda preko optičkog mrežnog terminala ONT (Optical Network Terminal). Dakako, "posljednja milja" do korisničkih uređaja je obično povezana putem Ethernet kabela od optičkih mrežnih terminala. Neučinkovitost u prijenosu stoga nastaje u razlici između optičkih i karakteristika Ethernet-a. Drugim riječima, brzina prijenosa putem svjetlosti nije efektivno iskorištena do razine uređaja.

Jedan od ciljeva bežičnih optičkih komunikacija je eliminiranje uporabe kabela i žica između što više komunikacijskih uređaja (pristupnih terminala). Bežične optičke komunikacije imaju za cilj ne samo da prenose informacije bežičnim putem između pojedinih uređaja, već i između uređaja i višestrukih korisničkih servisa koji su omogućeni u domovima i uredima. Naprimjer, zvučnici i TV ekran nemoraju biti povezani sa DVD player-om putem audio i video kabela. Ili npr., centralna jedinica osobnog računala (PC-a), može biti povezana na Internet, bez povezivanja sa Internetskim modemom i raditi bez žične veze sa mišem, tastaturom, LCD monitorom i printerom, putem Ethernet, USB ili video kabela. Također, slike i snimke sa raznih kamera i fotoaparata, mogu se slati na centralnu jedinicu PC-a bez USB kabela ili mogu biti direktno prikazane na platnu putem projektora odnosno TV ekrana, bez potrebe za video kabelom.

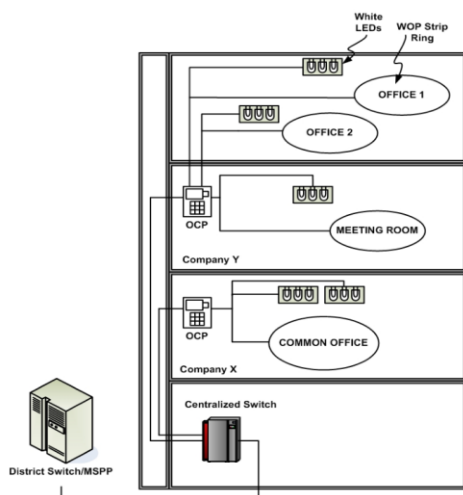
Prema [8], predloženi bežični optički komunikacijski sustav (WOPCOM) je tehnologija velike brzine i velikog kapaciteta, koja prenosi informacije putem svjetlosti u slobodnom prostoru. Funkcioniranje ove tehnologije se malo razlikuje od postojećih optičkih mreža. Konvertirajući

podatke u optičke signale u formatu impulsno pozicijske modulacije (PPM - Pulse Position Modulated) i prenoseći ih putem svjetlosti od LED rasvjete, bežična optička komunikacija omogućava svjetlosti da daje osvjetljenje, te čak i svjetlosno konvertiranu energiju, dok istodobno omogućuje i slobodnu razmjenu informacija između uređaja i servisa.

Distribuiranje kapaciteta iz jezgrene mreže do lokaliteta korisnika, može da predstavlja priličan izazov, a naročito prilikom planiranja na lokalitetu pojedine zgrade. Ovaj prijenos može uključivati različite razine arhitekture od gradske mreže MAN (Metropolitan Area Network) do bežične optičke mreže za lokalno područje WOPLAN (Wireless Optical Local Area Network), i do bežične personalne optičke mreže WOPPAN (Wireless Optical Personal Area Network). Istraživač u [8] navodi da, višeservisna uslužna platforma kombinira različite razine tehnologije i tehnike prijenosa kako bi omogućile konvergiranu set usluga za javnost. Usluge poput PSTN-a, Interneta, kabelskih medija se distribuiraju do lokalne bežične optičke mreže kroz optičku kontrolnu ploču.

Kabliranje između zgrada može biti u formi jednostavnog prstena, zvijezde, ili kompleksnije web topologije u formi paukove mreže. Topologija kabliranja između zgrada u formi stablaste mreže, sastoji se od centraliziranog hub-a ili prospojnika (switch-a) za određeno područje, koji povezuje određenu grupu stanova ili zgrada sa gradskom optičkom mrežom [5].

Topologija kabliranja do krajnjeg korisnika u zgradi, za bežičnu optičku komunikaciju, može biti lateralna veza od jedne od prijelomnih točaka personalne bežične optičke mreže. Unutarnje kabliranje unutar zgrade izvedeno je obično u formi pristupa topologijom zvijezde. Takvo jedno povezivanje u topologiji zvijezde, za bežičnu optičku mrežu WOPNET, prikazano je na sljedećoj slici:



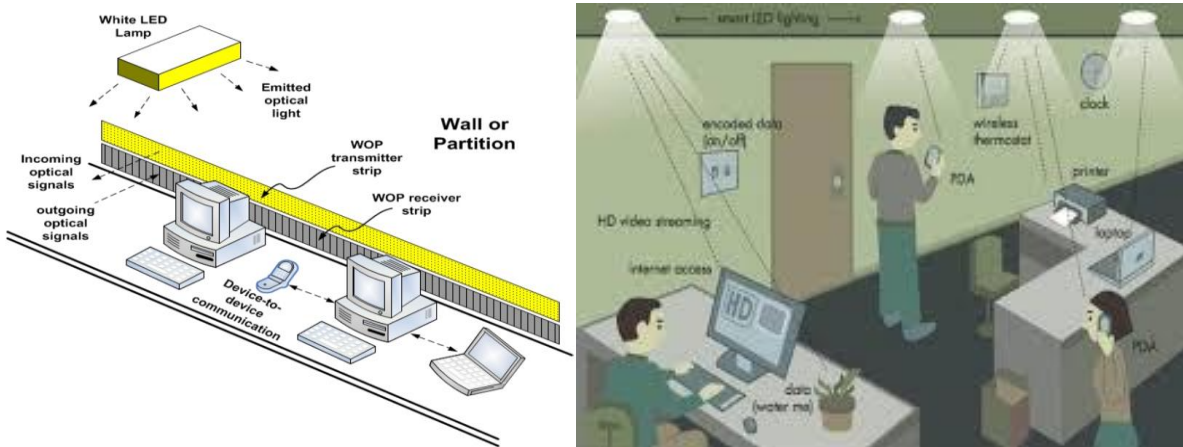
Slika 7: Zvijezdasto kabliranje unutar zgrade za VLC optičku mrežu [5]

Optički signali od prospojnika (switch-a) za određeno područje se prenose do centralnog prospojnika za pojedinu zgradu. Od centralnog prospojnika, optički signali se distribuiraju do optičkih kontrolnih panela za pojedine katove i urede. Odakle se optički signali vode do LED predajnih (rasvjetnih) tijela od kojih se bežičnim optičkim putem odašilju do prijemnih uređaja u pojedinoj prostoriji.

Prema autorima [5], tehnologija bežične optičke komunikacije je implementirana sa dva tipa veza:

- Veza od pružatelja usluga do krajnjih uređaja. Sa bežičnom optičkom komunikacijom, PSTN-om, Internetom i medijskim servisima, provajderi (pružatelji) usluga mogu pružiti glasovne, podatkovne i video usluge izravno do korisničkih uređaja.
- Druga vrsta veze je od uređaja do uređaja ili između samih uređaja

Bežična optička komunikacija u jednoj prostoriji, kao i komunikacija između uređaja bežičnim optičkim putem prikazana je na sljedećim slikama:



Slika 8: VLC bežična optička komunikacija unutar prostorije (ureda) [1], [5]

Bežična optička komunikacija WOPCOM predstavlja bežični sustav za zatvorene (unutarne) prostore, koji omogućuje istodobno komuniciranje za podatkovne, glasovne i video signale između velikog broja različitih uređaja. Kao što prikazuju i gornje slike, VLC optički signali se prenose izravno do uređaja. Ti uređaji mogu biti naprimjer: centralna procesna jedinica stolnog računara, prijenosni računar, printer, fax i POTS telefon, pametni telefon, tablet, MP3 itd..

Zbog velikih zahtjeva za konvergencijom u digitalnoj potrošačkoj elektronici, tehnologija bežične optičke komunikacije WOPCOM se može manifestirati kao "pristupni medij naredne generacije", jer se radio frekventni (RF) mikrovalovi ne mogu mjeriti sa propusnim kapacitetom optičkih sustava. Bežične optičke komunikacije nastoje unaprijediti osobine i ponašanje mreže u odnosu na transparentnost, kapacitet valnih duljina, agregiranje servisa i gustoću mreže. Prednosti ove vrste komunikacije su:

- Mobilnost, velika brzina i slobodan pristup bez kabela
- Više vrsta podatkovnog prometa i servisa na jednom vlaknu
- Skalabilnost i pristup bez natjecanja sa drugim uređajima (jedan kanal za jedan uređaj)
- Sigurnost (korisnici su alocirani slotovima na transmisijskom kanalu)

Smatra se da bi bilo izvodivo i pogodno zatvoriti "posljednju milju" veze sa bežičnom optičkom konekcijom. Zahtjevi za bržim prijenosom podataka i Internetskom dostupnošću, će sve više rasti u budućnosti. Stoga, korištenje slobodne optičke komunikacije putem vidljive svjetlosti kao još jednog prijenosnog medija u LAN okruženju, može osigurati konstantne buduće potrebe, zbog

njegove ultimativne brzine. Bežični prijenos glasa, datoteka, televizije i Internetskih servisa može donijeti veću fleksibilnost i komfor [5].

3. TEHNIKE DIGITALNOG PRIJENOSA ZA VLC TEHNOLOGIJU

Temeljni prijenosni element u VLC tehnologiji predstavlja svjetleća dioda i ovisno o mjestu ugradnje i karakteristikama prijenosa odabiremo odgovarajući tip diode pogodan za date uvjete.

Kao što je poznato svjetleća dioda LED (Light Emitting Diode) predstavlja čvrsti poluvodički uređaj koji ima sposobnost promjene električne energije izravno u svjetlosnu energiju. Protokom struje kroz propusno polarizirani PN spoj, elektroni se spajaju sa šupljinama i padaju na tzv. nižu energetska razinu, oslobađajući pri tom energiju u vidu fotona. To se onda može percipirati kao vidljiva svjetlost. Ovaj efekt poznatiji je pod nazivom *elektroluminiscencija* [9].

Danas postoji nekoliko tipova svjetlosnih dioda, pri čemu svaki tip ima odgovarajuće karakteristike i može se koristiti za specifične primjene i zahtjeve [10]:

- Svjetleće diode sa fosfornom konverzijom/premazom PC-LED (Phosphor Converted LED), pri čemu fosfor pretvara plavu svjetlost u bijelu svjetlost koju emitira dioda, ovo je ujedno jedan od najmasovnije korištenih tipova svjetlećih dioda.

- Višebojne svjetleće diode (Multi-Chip LEDs), gdje jedan LED čip sadrži 3 ili više čipa različitih boja, obično crvenu, zelenu, i plavu - RGB.

- Organske svjetleće diode OLED (Organic Light Emitting Diodes), za generiranje svjetlosti služi organski sloj koji se nalazi između pozitivnih i negativnih nositelja, i obično koriste u ravnim panelima.

- Mikro svjetleće diode (μ -LED), imaju male dimenzije 14–84 μm , te se na jedan čip može smjestiti veliki broj ovih dioda, i pogodne su slanje više paralelnih tokova podataka - MIMO.

- Svjetleće diode sa rezonantnom šupljinom rc-LEDs (Resonant Cavity LED), one imaju poboljšanu ekstrakciju svjetlosti u valnom opsegu bliskom infracrvenom - IR.

Sve gore pobrojane vrste svjetlosnih dioda mogu se koristiti za komuniciranje vidljivom svjetlošću primjenom odgovarajućih tehnika prijenosa, modulacije, i kodiranja.

Tipični VLC linkovi koriste konfiguraciju sa izravnom optičkom vidljivošću između predajnika i prijemnika LOS (Line Of Sight), prvenstveno zbog svoje primarne namjene a to je rasvjeta. Štoviše, sa manjom udaljenošću pri prijenosu imamo manju disperziju i gubitke, a što na koncu rezultira većim propusnim opsegom. Svjetleće diode emitiraju nekoherentnu svjetlost, fotoni imaju različite valne duljine i faze za razliku od koherentnih izvora svjetla poput lasera. Modulacija intenziteta IM (Intensity Modulation) obavlja se istodobno s osnovnim signalom pobude za emitiranu optičku snagu LED-a. Emitirani intenzitet svjetla se kontrolira strujom koja prolazi kroz LED i mora biti u slučajnom području unutar naponsko strujne (V-I) krivulje svjetleće diode. Pošto modulacija intenziteta mijenja trenutnu snagu LED-a, izravna detekcija DD (Direct Detection) nameće se kao jedino izvedivo rješenje za pretvorbu signala iz svjetlosnog u električni. Metoda izravne detekcije koristi fotodiodu za pretvaranje snage dolaznog optičkog signala u proporcionalnu električnu struju. Ova postavka je mnogo jednostavnija od koherentne RF detekcije, gdje se lokalni oscilator koristi za izdvajanje signala osnovnog opsega iz vala nositelja. Modulacijske frekvencije optičkog toka trebaju biti dovoljno visoke kako bi se izbjeglo treperenje svjetlosti, jer to ugrožava osnovnu funkciju rasvjete, te može stvarati nelagodu i imati negativan

učinak na ljudski vid. Uobičajeni standardi za rasvjetu u uredima propisuju razine osvjetljenja između 400-1000 lux-a (europski standard za rasvjetu EN12464-1 zahtjeva minimalno 500 lux-a) [10].

U komunikaciji vidljivom svjetlošću VLC (Visible Light Communication) postoje dva načina (tipa, prirode) prijenosa:

- (1) Prvi način, u kojem sva LED rasvjetna tijela emitiraju istodobno isti tok signala.
- (2) Drugi način, u kojem svako LED rasvjetno tijelo neovisno emitira različite dijelove toka signala.

Istraživači [11] na temelju svojih simulacija i testova navode da se višestruka MIMO (multiple input-multiple output) tehnika i tehnika različitih predajnika može koristiti adaptivno. Prijemnik detektira i računa snagu emitiranog signala tokom prijema, te u skladu sa tim informira predajnik kako bi se mogao prebacivati između dva gore spomenuta načina transmisije. Rezultati njihovih testova i simulacija su pokazali da problemi sjene (zasjenjivanja) i poravnanja između predajnika i prijemnika, sa kojima se obično susrećemo pri komunikaciji vidljivom svjetlošću mogu lako biti riješeni ovim tehnikama. Tehnika sa višestrukim ulazima i višestrukim izlazima MIMO predstavlja upotrebu višestrukih signala istodobno (dvije ili više radio ili optičke valne forme) u jednom frekvencijskom kanalu, radi iskorištenja propagacije signala preko više putova i multipliciranja spektralne učinkovitosti. Tako se naprimjer, MIMO tehnika uvelike koristi u našim Wi-Fi (802.11n i 802.11ac) sustavima radi povećanja propusne efikasnosti i brzine. Dakako, u proteklih nekoliko godina, istraživači tehnologije komuniciranja vidljivom svjetlošću su počeli koristiti MIMO tehniku u konfiguraciji linka LED-fotodioda, odnosno predajnik-prijemnik.

Sa druge strane, grupa istraživača u [12] predlaže MIMO tehniku prijenosa, gdje je podatkovni paket razdvojen na blokove. Nakon čega, se svaki blok šalje neovisno kroz različite pojedinačne predajnike. Na temelju njihovih testova, ovim modelom mogu se postići velike brzine prijenosa podataka, ali je sa druge strane njegov nedostatak taj da se sva LED predajna tijela smatraju kritičnim, jer svako zasebno predajno rasvjetno tijelo prenosi različite dijelove informacije. Pretpostavlja se, da će u budućnosti "pametni" MIMO sustavi poput ovih biti još efikasniji, jer će biti dalje prilagođeni za kontrolu modulacijskih tehnika u LED klasterima, za kontrolu matrice svjetla u slučaju problema ili poteškoća pri radu [12].

3.1 Predajne modulacijske tehnike u VLC sustavima

U komuniciranju vidljivom svjetlošću modulirajući signali mogu se koristiti za preklapanje svjetlećih dioda željenim frekvencijama koje sadrže informaciju koja se želi prenijeti. Tehnike modulacije pojedinačnih nositelja poput OOK (On-Off Keying), PPM (Pulse Position Modulation), ili PAM (Pulse Amplitude Modulation) se već uvelike koriste u komuniciranju putem infracrvenog svjetla IR (Infra Red) [13].

Ove metode modulacije u sebi sadrže sekvence ograničenog trajanja RLL (Run Length Limited), radi izbjegavanja dugih nizova jedinica "1" ili "0", a koji potencijalno mogu prouzročiti treperenje izvora svjetla (VLC predajnika), te kako bi se izdvojio takt i oporavak izgubljenih podataka. Metode unaprijednog ispravljanja pogrešaka FEC (Forward Error Correction) poput RS (Reed-Solomon) mogu biti korištene za ispravljanje grešaka i u VLC sustavima [14], [15].

Tehnike modulacije koje se koriste u VLC sustavima su [10]:

- **On-Off Keying (OOK)** predstavlja jednu od najjednostavnijih modulacijskih tehnika za moduliranje podataka i preklapanje LED-ova između visoke i niske razine, odnosno "1" i "0". RLL kodovi poput Manchester kodiranja mogu se koristiti za ujednačenje DC (Direct Current) napajanja [16]. Jedna od poznatijih varijanti ove tehnike modulacije je OOK-NRZ (OOK-Non-Return-to-Zero).

- **Pulse Position Modulation (PPM)** impulsno-pozicijska modulacija, gdje impuls koji odgovara određenom bitu se prenosi u jednom od vremenskih odsječaka unutar perioda simbola. Prosječna potrebna snaga za PPM je niža nego za OOK pošto se izbjegava DC komponenta i niže frekvencijske komponente spektra, ali je ona manje spektralno učinkovita [17]. Neke varijante ove modulacijske tehnike koje se mogu koristiti u VLC sustavima su: EPPM (Expurgated PPM), DPPM (Differential PPM), OPPM (Overlapping PPM), VPPM (Variable PPM), i MPPM (Multiple PPM).

- **Pulse-Position-Pulse-Width Modulation (PPMPWM)** kombinirana impulsno pozicijska-impulsno širinska modulacija. Predstavlja noviju hibridnu shemu modulacije koja kombinira L-razinski PPM i L-razinski PWM. Ima bolju energetska i spektralnu učinkovitost, te niži BER (Bit Error Ratio) u odnosu na PPM [18].

- **Pulse Amplitude Modulation (PAM)** impulsno-amplitudna modulacija. Predstavlja jednu od bazičnih modulacijskih shema, koja je energetska učinkovita. Podatci su modulirani u amplitudu impulsa signala [19].

- **Pulse Dual Slope Modulation (PDSM)** dvostrana impulsna modulacija, kod koje je bitska "0" predstavljena rastućim rubom impulsa (u okviru njegovog trajanja), dok je bitska "1" predstavljena padajućim rubom impulsa. Ova modulacija je prikladna za izbjegavanje treperenja svjetla unutar i između okvira [20].

- **Generalized Space Shift Keying (GSSK)** generalizirana/uopćena prostorna modulacija, predstavlja podskup prostorne modulacije kod koje je prostorna domena iskorištena za moduliranje informacije. Ova modulacijska shema ima veću spektralnu učinkovitost u odnosu na OOK i PPM tehnike, te je prikladnija za upotrebu u scenarijima sa ograničenom (malom) mobilnošću korisnika [21].

- **Color Shift Keying (CSK)** modulacija po boji svjetla, koristi više čipova sa svjetlećim diodama (najčešće RGB LED), a predstavljena je u standardu IEEE 802.15.7 za VLC iz 2011 godine. Bitovi koji se prenose odgovaraju koordinatama CIE 1931 definiranim od strane međunarodne komisije za osvjetljenje/rasvjetu International Commission on Illumination (CIE). Koordinata boje za svaki simbol generira se modulacijom intenziteta RGB čipova. Ne može se koristiti u sklopovima koji sadrže samo jednu boju diode (npr. pc-LED kao najčešće korišteni izvor svjetla), te zahtjeva složeniju strukturu sklopa [22], [42].

- **Generalized Color Modulation (GCM)** generalizirana/općenita modulacija boje, predstavlja modulacijsku shemu neovisnu o boji koja se može koristiti za komuniciranje pod promjenljivim (željenim/ciljanim) uvjetima u pogledu boje svjetla. Omogućuje rad bez treperenja svjetlosti, kao i djelovanje neovisno o broju LED predajnika i PD prijemnika [23].

- **Color Intensity Modulation (CIM)** modulacija intenziteta boje, predstavlja ustvari nadskup nad inverzno kodiranim multipleksiranjem valnih duljina WDM (Wavelength Division Multiplexing)

na izvoru. Nije podložna interferenciji između kanala ICI (Inter Channel Interference), te se njome mogu ostvariti veće podatkovne brzine prijenosa u odnosu na WDM [24].

- **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)** ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje, gdje se korištenjem višestrukih ortogonalnih podnositelja za istodobni prijenos paralelnih podatkovnih tokova postižu velike brzine prijenosa i reducira interferencija među simbolima ISI (Inter Symbol Interference). OFDM je spektralno učinkovit i robustan je naspram pojave disperzije kanala. Intenzivno se koristi u RF primjenama poput Wi-Fi-ja i kabelske televizije DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial) [25]. Također, postoje određene varijante ove modulacijske tehnike koje se primjenjuju u VLC prijenosu a to su: DCO-OFDM (DC Offset-OFDM), ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical-OFDM), i U-OFDM (Unipolar-OFDM) [26], [27], [28].

- **Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation (CAP)** modulacija amplitude i faze bez nositelja, predstavlja ustvari shemu prekidanja svjetla kvadraturno amplitudne modulacije QAM (Quadrature Amplitude Modulation) za sustave sa jednim nositeljom SC (Single Carrier). Sastoji se od dva ortogonalna signala slična signalima u fazi i kvadraturi kod QAM sheme, ali ne zahtjeva dodatne informacije (overhead) i nositelj. Ima veliku spektralnu učinkovitost, te se koristi za povećanje kapaciteta VLC linka sa ograničenom propusnošću [29].

3.2 Modulacijske tehnike prigušenja svjetlosti u VLC sustavima

Integriranje tehnologije prigušenja svjetlosti u VLC sustav poboljšava njegovu vrijednost, štedi energiju, te omogućuje realizaciju inteligentnih (naprednih) sustava rasvjete. Naime, veoma je poželjno održavati komunikaciju putem vidljivog svjetla, dok istodobno korisnik proizvoljno želi prigušiti jačinu svjetla emitiranog od strane VLC izvora radi uštede energije. Teoretski, svjetlosne diode se mogu u potpunosti prigušiti, ali to nije kompatibilno sa svim vrstama kontrole prigušenja svjetla dizajniranim za tradicionalne rasvjetne tehnologije [16]. Postoje dva opća pristupa za prigušenje svjetlosnih dioda [10]:

1) Analogno prigušenje svjetla

Količina svjetla koju stvara svjetlosna dioda proporcionalna je upravljačkoj struji koja protiče kroz LED. Stoga se svjetlina LED-a može podesiti kontroliranjem amplitude struje napajanja. Izlaz LED upravljača mijenja se proporcionalno kontrolnom naponu. Ova metoda je poznatija pod nazivom CCR (Continuous Current Reduction) ili kontinuirano reduciranje struje. I ono ne unosi nove frekvencije kao potencijalne izvore elektromagnetskih smetnji EMI (EM Interference). Analogno prigušenje koje se temelji na intenzitetu je jednostavnije za implementaciju, te se čini kao troškovno učinkovita shema prigušenja za VLC. Također, pokazalo se da je učinkovitost rasvjete uvijek veća za CCR sheme prigušenja svjetla [30].

2) Digitalno prigušenje svjetla

Digitalno modulirani niz impulsa upravlja svjetlosnom diodom pri konstantnoj razini struje. U digitalnom prigušenju, prosječan radni ciklus ili gustoća signala predstavlja ekvivalent analognoj razini prigušenja. Često se koristi zbog nekih prednosti poput lakše implementacije i povećane učinkovitosti upravljača. Svaka modulacijska shema koja održava prosječan radni ciklus ili gustoću signala može se koristiti za kontrolu i prigušenje svjetlećih dioda. Radi postizanja preciznije kontrole LED rasvjete i reduciranja kromatskih pomaka/otklona, poželjnije je korištenje digitalnih tehnika prigušenja svjetla u odnosu na analogne [31].

3.2.1 Tehnike VLC modulacija s digitalnim prigušenjem svjetlosti

Scheme modulacije integrirane s digitalnim prigušenjem svjetla za VLC su [10]:

- **Variable Pulse Position Modulation (VPPM)** varijabilna impulsno pozicijska modulacija, predstavlja spoj PPM-a i PWM-a sa samo jednim bitom informacije prenesenim po periodu simbola. Pri nižim razinama osvjjetljenja, podatkovna brzina i performanse znatno su umanjene uslijed male energije po bitu [30].

- **Variable On-Off Keying (VOOK)** varijabilna on-off modulacija, postiže se promjenom podatkovnog radnog ciklusa i ispunjavanjem bez-podatkovnog dijela simbola bitovima ispunjene za ostvarivanje prigušenja svjetla. Podatci se ne mogu prenositi pri punoj jačini osvjjetljenja. VOOK prigušenje može se postići i promjenom prosječne razine intenziteta emitirane svjetlosti, što pak može dovesti do kromatskog otklona [16], [30].

- **CSK (Color Shift Keying)** prigušenje moduliranjem promjene boja svjetlosti, koristi prigušenje amplitude i kontrolira svjetlinu izvora svjetlosti mijenjajući struju koja njim upravlja. CSK ima sljedeće prednosti: informacija je osigurana koordinatama boja, ukupna prosječna snaga je konstantna, i omogućena je promjena bitske brzine [42].

- **Pulse Width Modulation With Discrete Multi-Tone (PWM-DMT)** impulsno širinska modulacija sa diskretnim multi-tonom. U shemama sa diskretnim multi-tonom (DMT), izlazni DMT signal iz digitalno-analognog pretvornika DAC (Digital-to-Analog Converter) multipliciran je PWM signalom kako bi se postiglo prigušenje svjetla. Pri pre niskim PWM frekvencijama preklapanje spektra dovodi do interferencije između pod-nositelja, dok previsoke PWM frekvencije (iznad LED pojasa od 3 dB) degradiraju performanse sustava. Stoga, je potrebno odabrati odgovarajuću PWM frekvenciju kako prigušenje ne bi degradiralo performanse sustava [32].

- **Reverse Polarity OFDM (RPO-OFDM)** OFDM sa obrnutim polaritetom, predstavlja novi format signala koji kombinira brzu optičku OFDM (O-OFDM) komunikaciju sa relativno sporijim PWM signalom prigušenja, gdje oba signala doprinose efektivnoj svjetlini LED-ova. Ova tehnika prigušenja svjetla omogućuje veliku preciznost, održavanje velike podatkovne brzine u širokom rasponu prigušenja u cilju istodobne rasvjete i štednje energije [33].

- **Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (ACO-OFDM)** optička asimetrično ograničena OFDM modulacija, u kojoj više slojeva ACO-OFDM koji zauzimaju različite podnositelje je kombinirano tako da gotovo svi podnositelji mogu biti iskorišteni za podatkovni prijenos. Polariteti različitih slojeva ACO-OFDM-a su promijenjeni radi postizanja fleksibilne valne forme u vremenskoj domeni, što u potpunosti iskorištava dinamički opseg svjetlosnih dioda i daje bolje performanse. Ova shema modulacije, podržava komuniciranje u širokom opsegu prigušenja i postiže veću spektralnu učinkovitost u usporedbi sa postojećim metodama pod različitim zahtjevima prigušenja svjetla [34].

- **Direct Current Optical OFDM (DCO-OFDM)** optička OFDM modulacija sa istosmjernim napajanjem, naveliko se koristi u VLC sustavima zbog svoje jednostavnosti i velike spektralne učinkovitosti. Kako bi se otklonili neki nedostaci DCO-OFDM razvijena je i "eDCO-OFDM" (enhanced DCO-OFDM) ili poboljšana DCO-OFDM modulacija. U ovoj poboljšanoj shemi, uvedena je tzv. podijeljena funkcija sa adaptivnim krivuljama sukladnim željenoj optičkoj snazi

na predajniku, kojom se efektivno otklanja šum nastao uslijed ograničenja kod DCO-OFDM-a [35].

3.2.2 Ostale tehnike prigušenja svjetlosti

- **Inverse Source Coding (ISC)** inverzno kodiranje na izvoru, koristi omjer "1" i "0" kao "on" i "off" stanja za postizanje željenog omjera prigušenja (npr. za omjer prigušenja 70%, isti postotak izlaznih bita moraju biti "1"). Općenito se koristi Huffman-ovo kodiranje, a shema kodiranja za postizanje željenog omjera prigušenja povećava broj emitiranih podatkovnih bita. Za veliki omjer prigušenja (iznad 50%), ova shema dodaje sve više bitova ispune radi postizanja bitskog balansa (istosmjerna komponenta), što zauzvrat smanjuje podatkovnu brzinu [36].

- **Idle Pattern Dimming - Color Visibility Dimming (CVD)** prigušenje umetanjem praznih okvira sa prigušenjem vidljivosti boja, gdje je prazan (neiskorišten) okvir umetnut između podatkovnih okvira kako bi se postiglo prigušenje svjetlosti. Radni ciklus umetnutog okvira može se mijenjati, kako bi se postigla promjena svjetline. Color Visibility Dimming (CVD) okviri ili okviri prigušenja vidljivosti boje, pružaju informacije korisniku o stanju komunikacije i kvalitetu kanala putem različitih boja. Naime, LED emitira svjetlo ali ne vrši komunikaciju za vrijeme prijenosa CVD okvira, te tako ispunjava svoju funkciju rasvjete [37], [42].

- **Probability Based Dimming** prigušenje temeljeno na vjerojatnosti, u kom se vjerojatnost pojedinačnih simbola može mijenjati u skladu sa kriterijem prigušenja. Kod ove tehnike, OOK modulacija je proširena na PAM i može se ukombinirati sa analognim prigušenjem tvoreći tako hibridnu shemu prigušenja svjetlosti. Hibridna shema sprovodi kontrolu prigušenja združeno optimizirajući vjerojatnost i intenzitet PAM konstelacijskih točaka. U početku, intenzitet simbola je promijenjen za određeni postotak, dok je preostala promjena prema ciljanoj razini prigušenja ostvarena mijenjajući vjerojatnost simbola. Optimalna kontrola prigušenja svjetlosti može se postići mijenjanjem samo vjerojatnosti, a ne nužno i promjenom intenziteta [38].

4. PREGLED IEEE STANDARDA 802.15.7: BEŽIČNA OPTIČKA KOMUNIKACIJA PUTEM VIDLJIVE SVJETLOSTI NA KRAĆIM RASTOJANJIMA

4.1 Opći opis i arhitektura

Standard IEEE 802.15.7 podržava tri osnovne topologije komuniciranja: peer-to-peer (od uređaja do uređaja), zvjezdasta (star) i razašiljanje (broadcast). Gdje se obično kod prva dva načina komunikacije može zahtijevati dvosmjerna veza, dok je kod trećeg načina komuniciranja to uglavnom jednosmjerna veza. Arhitektura ovog standarda u pogledu broja slojeva i podslojeva je definirana u cilju pojednostavljenja standarda. Svaki sloj odgovara jednom dijelu standarda i pruža usluge višim slojevima. Sučelje između slojeva služi za definiranje logičkih linkova opisanih ovim standardom. Uređaj za komuniciranje vidljivom svjetlošću u personalnim mrežama VPAN sastoji se od fizičkog sloja (PHY), koji sadrži optički primo-predajnik zajedno sa kontrolnim mehanizmom niže razine, i podsloja kontrole pristupa mediju (MAC), koja omogućuje pristup fizičkom kanalu za sve tipove prijenosa.

Fizički (PHY) sloj podržava nekoliko tipova upotrebe:

- a) PHY I: Ovaj tip namijenjen je upotrebi na vanjskim prostorima u slučajevima kada se ne zahtijeva velika brzina prijenosa podataka.
- b) PHY II: Ovaj tip upotrebe odnosi se na zatvorene prostorije, kada se zahtijeva nešto veća brzina u odnosu na prvi slučaj ili tzv. umjerena brzina prijenosa podataka.
- c) PHY III: Kod ovog tipa koristi se modulacija boje svjetlosti CSK (Color Shift Keying) sa više svjetlosnih izvora i detektora.

Struktura okvira fizičkog sloja se dobiva na sljedeći način. Protokolarna podatkovna jedinica sloja kontrole pristupa mediju MPDU (MAC Protocol Data Unit) na izlazu iz MAC podsloja prolazi kroz fizički sloj i postaje uslužna podatkovna jedinica PSDU (PHY Service Data Unit) PHY sloja. Ona je označena sinkronizacijskim zaglavljem SHR (Synchronization Header), koje sadrži sinkronizacijsko polje preambule i zaglavlje fizičkog sloja PHR (Physical Layer Header), koje sadrži duljinu PSDU-a u oktetima. Sekvenca preambule omogućuje sinkronizaciju prijemnika. SHR, PHR, i PSDU zajedno formiraju fizički (PHY) okvir ili podatkovnu jedinicu fizičkog sloja PPDU (PHY Layer Data Unit).

Prethodno pobrojani tipovi upotrebe fizičkog sloja koegzistiraju ali međusobno ne surađuju. PHY I i PHY II zauzimaju različite dijelove frekvencijskog spektra, što kao mehanizam koegzistencije omogućuje frekvencijsko multipleksiranje FDM (Frequency Division Multiplexing). Ovo također važi i za odnos između PHY I i PHY III. Frekvencije optičkog takta kod PHY II i PHY III se preklapaju što uzrokuje i preklapanja u frekvencijskoj domeni [42].

4.1.1 Prigušenje svjetlosti

Prigušenje svjetlosti definira se kao kontrola vidljive svjetline svjetlosnog izvora prema korisničkim zahtjevima, te predstavlja funkciju između fizičkog (PHY) i sloja kontrole pristupa mediju (MAC).

4.1.2 Izbjegavanje treperenja svjetlosti

Treperenje se definira kao promjena svjetline emitirane svjetlosti koja može prouzročiti primjetne psihološke promjene kod ljudi. Ovaj standard za komuniciranje vidljivom svjetlošću nastoji izbjeći ove probleme, koji mogu biti prouzročeni modulacijom svjetlosti na izvoru koja se koristi za komunikaciju. Maksimalni vremenski period treperenja MFTP (Maximum Flickering Time Period) definira se kao maksimalni vremenski period tijekom kojeg se intenzitet svjetlosti može mijenjati, ali za koji rezultirajuće treperenje nije primjetno ljudskom oku. Kako bi izbjegli treperenje nužno je izbjeći promjenu svjetline tijekom perioda koji su dulji od MFTP. U komuniciranju vidljivom svjetlošću treperenje se može klasificirati u dvije kategorije prema mehanizmu njihovog generiranja: treperenje "unutar" okvira i treperenje "između" okvira. U prvom slučaju treperenje se definira kao primjetna promjena intenziteta svjetlosti unutar okvira, dok se u drugom slučaju ono definira kao primjetna fluktuacija svjetlosti između uzastopnih okvira.

4.1.3 Model prijenosa podataka

Standard 802.15.7 podržava tri temeljna modela prijenosa podataka:

- a) prijenos prema predajniku (koordinatoru) gdje uređaj (terminal) šalje podatke
- b) prijenos podataka od predajnika (koordinatora) gdje korisnički uređaj prima podatke
- c) prijenos podataka između dva uparena uređaja

Optički takt (brzina optičke modulacije) za komunikaciju se uspostavlja korištenjem sloja kontrole pristupa mediju (MAC) i može se prenijeti primatelju prije samog prijenosa podataka. Sa sigurnosnog aspekta ovaj standard podržava šifriranje bazirano na simetričnim ključevima, koje osiguravaju procesi na višim slojevima.

4.2 Specifikacija protokola podsloja kontrole pristupa mediju (MAC)

MAC podsloj upravlja svim pristupom prema fizičkom sloju i odgovoran je za sljedeće zadatke:

- a) Generiranje "beacon" okvira ako je uređaj predajnik (koordinator)
- b) Sinkroniziranje sa mrežnim "beacon" okvirima
- c) Podrška VPAN pridruživanju i razdruživanju
- d) Podrška funkciji boja
- e) Podrška vidljivosti
- f) Podrška prigušenju
- g) Shema izbjegavanja treperenja
- h) Podrška vizualnoj indikaciji statusa uređaja i kvalitete kanala
- i) Podrška sigurnosti uređaja
- j) Osiguranje pouzdane veze između dva MAC entiteta koja komuniciraju
- k) Podrška mobilnosti

Koordinator (predajnik) na VPAN mreži može opcionalno ograničiti svoje vrijeme na kanalu koristeći strukturu superokvira. Superokvir je ograničen prijenosom "beacon" okvira i može imati aktivni dio i neaktivni dio. Koordinator može ući u tzv. mod mirovanja (sleep) ili mod male snage (energije) tijekom perioda neaktivnosti. MAC podsloj osigurava održavanje takta superokvira npr. kompenzirajući greške sata koji osigurava optički takt (optičku brzinu modulacije).

Podsloj kontrole pristupa mediju treba određeno vrijeme kako bi procesirao podatke primljene sa fizičkog sloja. Kako bi ovo bilo moguće dva uzastopna okvira transmitirana od uređaja moraju biti razdvojena najmanje periodom razmaka između okvira IFS (Inter Frame Spacing). Veličina ovog perioda ovisi o veličini okvira koji je upravo prenesen.

Kada se periodični "beacon" okviri koriste u VPAN mreži, MAC podsloj primjenjuje verziju algoritma slučajnog pristupa RA (Random Access) sa odsječcima za prijenos u periodu natjecanja za pristup CAP (1) (Content Access Period) superokvira. Suprotno, ukoliko se periodični "beacon" okviri ne koriste u VPAN mreži ili ukoliko ovaj okvir ne može biti lociran u mreži koja ga podržava, MAC podsloj vrši prijenos koristeći verziju algoritma slučajnog pristupa bez odsječaka. U oba slučaja on je implementiran korištenjem odgode vremena natjecanja za medij (backoff), odnosno povećanjem vremena čekanja nakon kolizije.

Svi uređaji u mreži moraju biti u mogućnosti izvoditi pasivno skeniranje kroz specificiranu listu kanala. Dodatno, predajnici moraju biti u mogućnosti izvoditi aktivno skeniranje. Aktivno skeniranje, kod kojeg imamo zahtjev za slanje "beacon" okvira omogućuje bilo kojem uređaju da locira bilo koji predajnik koji odašilje "beacon" okvire unutar svog područja pokrivanja. Tijekom aktivnog skeniranja, MAC podsloj odbacuje sve okvire primljene preko fizičkog sloja (PHY) podatkovnog servisa koji nisu "beacon" okviri. Pasivno skeniranje, poput aktivnog skeniranja, omogućuje lociranje bilo kojeg predajnika koji emitira "beacon" okvire. Pri čemu se, dakako, komanda zahtijeva za ovim okvirima ne prenosi kod pasivnog skeniranja. Ovaj tip skeniranja uređaj može koristiti prije pridruživanja u mrežu. U mrežama koje podržavaju "beacon" okvire, sinkronizacija se sprovodi kroz prijem i dekodiranje ovih okvira. U protivnom, sinkronizacija se realizira prozivajući, odnosno tražeći podatke od predajnika. MAC podsloj uređaja koji nije pridružen u mrežu inicira proceduru pridruživanja šaljući komandu zahtijeva za pridruživanje predajniku u postojećoj mreži. Ukoliko ova komanda ne može biti poslana, MAC podsloj obavještava o tome susjedni viši sloj. Pošto ova komanda sadrži zahtjev za potvrdom (acknowledgment) predajnik njen prijem mora potvrditi slanjem okvira potvrde. Ukoliko uređaj u mreži želi da napusti istu, entitet za upravljanje linkom podsloja kontrole pristupa mediju MLME (Medium access control Link Management Entity) uređaja šalje predajniku komandu obavijesti o razdruživanju. U situacijama kada u istom području rada imamo dvije VPAN mreže sa identičnim VPAN identifikatorima, predajnik i prijemni uređaji sprovode proceduru za razrješavanje konflikta identifikatora u mreži. Plan opsega propusnosti podržava sedam logičkih kanala u MAC podsloju. U cilju podrške pridruživanju bez poznavanja mogućnosti prijemnika i podrške jednosmjernom odašiljanju, VLC prijemnik mora podržavati prijem na cijelom spektru vidljive svjetlosti sa bilo kojom vrstom optičkog izvora svjetla.

Garantirani vremenski odsječak GTS (Guaranteed Time Slot) omogućuje rad uređaja na kanalu unutar dijela superokvira koji je dodijeljen ekskluzivno tom uređaju. GTS treba biti alociran samo od strane predajnika, te korišten samo za komunikaciju između predajnika i prijemnika pridruženih u mrežu preko predajnika. Kada predajnik nema dovoljno vremenskih odsječaka koje treba

dodijeliti novim korisnicima, on u tom slučaju proširuje resurse korištenjem više frekvencijskih pojaseva.

Često je potrebno podržati preklapanje pojedine veze zbog fizičkog kretanja korisnika ili interferencije. Postoje dva osnovna tipa mobilnosti: fizička (uslijed fizičkog kretanja korisnika u području pokrivanja jedne bežične pristupne točke) i logička (kada se korisnički uređaj kreće iz područja pokrivanja jedne pristupne točke u područje pokrivanja druge pristupne točke). Kada je uređaj koji pristupa mreži združen sa predajnikom, predajnik određuje veličinu i lokaciju ćelije u cilju opsluživanja novog uređaja koji pristupa u mrežu.

Standard daje podršku vidljivosti u sljedeće svrhe: poravnanje - pozicioniranje (u cilju otkrivanja pristupnih uređaja, pregovaranja, i povezivanja istih), vizualno navođenje za pozicioniranje (poravnanje), infrastruktura sa kontinuiranim svjetlosnim izlazom, treperenje za neočekivane smetnje i upozorenje o prekidu veze.

Format MAC okvira sastoji se iz: zaglavlja kontrole pristupa mediju MHR (MAC Header), MAC uslužne (servisne) podatkovne jedinice MSDU (MAC Service Data Unit), i MAC podnožja MFR (MAC Footer). MHR polja se javljaju u fiksnom redosljedu, dok adresna polja ne moraju biti uključena u sve okvire.

Ovaj standard podržava agregiranje kanala i zaštitne kanale kako bi podržao bilo koji optički izvor vidljive svjetlosti za VLC koji mogu imati različite spektralne širine i centralne frekvencije [42].

4.2.1 Specifikacija usluge (servisa) podsloja kontrole pristupa mediju (MAC)

Podsloj kontrole pristupa mediju MAC (Medium Access Control) omogućava sučelje između podsloja konvergencije specifičnog za pojedinu uslugu SSCS (Service Specific Convergence Sublayer), entiteta za upravljanje podacima uređaja DME (Data Management Entity), i fizičkog sloja (PHY). Opcionalno, MAC podsloj uključuje upravljajući entitet zvani entitet za upravljanje linkom podsloja kontrole pristupa mediju MLME (MAC Link Management Entity). Ovaj entitet osigurava servisna sučelja kroz koja mogu biti pozvane funkcije upravljanja slojem. MLME je također odgovoran i za održavanje baze podataka o upravljanim objektima koji se odnose na MAC podsloj. Ova podatkovna baza se naziva informacijska baza fizičkog sloja personalne mreže PIB (Physical-layer Personal-Area-Network Information Base) MAC podsloja.

MAC podsloj omogućuje sljedeće dvije usluge, do kojih se pristupa kroz dvije uslužne pristupne točke SAPs (Service Access Points):

- a) MAC podatkovna usluga, do koje se pristupa kroz podatkovnu uslužnu pristupnu točku (SAP) MAC zajedničkog podsloja MCPS (MAC Common Part Sublayer), odnosno SAP-MCPS,
- b) MAC upravljajuća usluga, do koje se pristupa kroz uslužnu pristupnu točku (SAP) upravljajućeg entiteta MAC veze, odnosno SAP-MLME.

Ove dvije usluge obezbjeđuju sučelje između podsloja konvergencije specifičnog za pojedinu uslugu SSCS (Service Specific Convergence Sublayer) i fizičkog sloja (PHY), preko sučelja uslužne pristupne točke podataka fizičkog sloja PD-SAP (Physical layer Data - SAP) i uslužne pristupne točke upravljajućeg entiteta fizičkog sloja PLME-SAP (Physical Layer Management Entity - SAP). Dodatno, na ova dva eksterna sučelja, također postoji implicitno sučelje između MLME i MCPS koje omogućava MLME-u korištenje MAC podatkovne usluge. MCPS-SAP

podržava prijenos protokolarnih podatkovnih jedinica podsloja konvergencije specifičnog za pojedinu uslugu SPDU (SSCS Protocol Data Unit).

Standard 802.15.7 podržava više brzina optičkog takta u cilju osiguranja podrške za široki spektar optičkih izvora i prijemnika. Ovaj standard, takođe podržava upotrebu asimetričnih taktova između predajnika i prijemnika, pošto oni tvore neovisne lance u prijenosu i mogu podržavati različite opsege taktova.

4.2.2 Specifikacije sigurnosti

Podsloj kontrole pristupa mediju (MAC) je odgovoran za pružanje usluga sigurnosti na specificiranim dolaznim i odlaznim okvirima, kada to od njega zahtijevaju viši slojevi. Standard IEEE 802.15.7 podržava sljedeće usluge sigurnosti:

- a) povjerljivost (tajnost) podataka
- b) autentičnost podataka
- c) zaštita ponovnog slanja (odgovora)

Uređaji mogu opcionalno implementirati sigurnost. Oni uređaji koji ne implementiraju sigurnost ne mogu osigurati MAC podsloju izvođenje bilo kakvih kriptografskih transformacija na dolazećim i odlazećim okvirima, te ne zahtijevaju bilo kakve attribute informacijske baze fizičkog sloja personalne mreže (PIB) koji se odnose na sigurnost. Uređaj koji implementira sigurnost osigurava MAC podsloju mehanizam za obavljanje kriptografskih transformacija na dolaznim i odlaznim okvirima, koristeći informacije o sigurnosnim atributima iz informacijske baze fizičkog sloja personalne mreže (PIB), kada je atribut koji omogućuje MAC sigurnost postavljen na TRUE (istinito).

Informaciju o primijenjenoj vrsti zaštite za pojedini okvir pruža polje kontrole sigurnosti dužine jednog okteta. Dok, podpolje o primijenjenoj razini sigurnosti pruža informaciju o osiguranoj razini zaštite okvira, ovim standardom su predviđene dvije razine zaštite SEC1 i SEC2, ovisno o ponuđenoj odgovarajućoj kriptografskoj zaštiti.

Atributi sigurnosti PIB informacijske baze MAC podsloja sadrže sljedeće informacije: tabelu (popis) sigurnosnih ključeva, tabelu spojenih uređaja, tabelu minimalne razine sigurnosti, brojač okvira, attribute automatskih zahtijeva, stvarni izvor sigurnosnog ključa, i adresu koordinatora.

4.3 Specifikacije fizičkog (PHY) sloja (razine)

Fizički sloj je odgovoran za sljedeće zadaće:

- a) Aktivacija i deaktivacija VLC primopredajnika
- b) Naznaka kvalitete valne duljine WQI (Wavelength Quality Indication) za primljene okvire
- c) Izbor kanala
- d) Korekcija grešaka
- e) Sinkronizacija

Odgovarajući fizički sloj standarda IEEE 802.15.7 mora implementirati barem jedan od obaveznih fizičkih modova PHY I ili PHY II. Fizički modulacijski modovi moraju raditi i uz prisustvo prigušenja. OOK (On-Off Keying) modulacija uz prigušenje osigurava konstantan domet i

promjenljivu podatkovnu brzinu prijenosa umetanjem kompenzacijskog vremena. Dok VPPM (Variable Pulse Position Modulation) modulacija uz prigušenje osigurava konstantnu brzinu prijenosa podataka i promjenljiv domet podešavanjem širine impulsa.

Ovaj standard daje podršku kodiranju kanala za korekciju grešaka. PHY I mod podržava tzv. ulančano kodiranje uz RS (Reed-Solomon) i CC (Convolutional Coding) kodiranje, pošto je dizajniran za upotrebu u vanjskim (otvorenim) prostorima sa kratkim okvirima. PHY II i PHY III modovi podržavaju samo RS kodiranje. PHY I i PHY II modovi takođe podržavaju kod sa ograničenom dužinom trajanja RLL (Run Length Limited), kako bi osigurali balans DC napajanja, sinkroniziranje takta, i izbjegavanje zagušenja. Uz modulaciju i kodiranje, višestruke optičke prijenosne brzine su osigurane za sve fizičke modove, kako bi podržali više klasa optičkih predajnika (LED) za različite primjene. Izbor brzine optičkog takta određuje MAC podsloj tijekom procesa izbora takta. Ukoliko se više optičkih izvora koristi za komunikaciju, preporučljivo je da oni imaju slične frekventne odzive, kako bi pomogli komunikaciji. Digitalni ulazi u sve optičke izvore sa fizičkog sloja trebaju biti sinkronizirani.

Razmak između okvira IFS (Inter Frame Spacing) se koristi kako bi se omogućio razmak između uzastopnih okvira. Minimalni razmak između okvira ovisi o MAC modu rada. Standard omogućuje tri vrste razmaka između okvira: dugi LIFS (Long IFS), kratki SIFS (Short IFS), i reducirani RIFS (Reduced IFS).

Mjerenje naznake kvalitete valne duljine WQI predstavlja karakterizaciju snage i/ili kvalitete primljenog okvira. Ovo mjerenje može biti obavljeno detektiranjem energije na prijemu, utvrđivanjem omjera signal šum (SNR), ili kombiniranjem ovih metoda. WQI mjerenje treba biti sprovedeno za svaki primljeni okvir i rezultat treba biti javljen MAC podsloju.

Fizički sloj treba podržati sljedeća tri moda za normalan prijenos podataka:

- 1) Pojedinačni mod prenosi jednu podatkovnu jedinicu fizičkog sloja PPDU po okviru, što se može koristiti za vrlo kratku podatkovnu komunikaciju poput potvrda, pridruživanja, beacon okvire, ili za mod emitiranja informacija.
- 2) Paketski mod sadrži više PPDU jedinica po okviru i koristi se za slanje višestrukih uzastopnih PPDU jedinica unutar okvira na isto odredište, radi veće propusnosti.
- 3) Praskoviti podatkovni mod koristi reduciranu preambulu fizičkog sloja nakon prvog paketa u prasku, jer to povećava učinkovitost i propusnost u ovom modu.

Sva polja sa više okteta trebaju biti prenesena ili primljena na način da se prvo šalje, odnosno prima najmanje značajan oktet (oktet najmanje važnosti), dok se unutar okteta prvo šalje, odnosno prima bit najmanje važnosti LSB (Least Significant Bit). Isti redoslijed prijenosa treba primijeniti na podatkovna polja koja se prenose između fizičkog sloja i MAC podsloja. Osnovni format podatkovne jedinice fizičkog sloja PPDU sastoji se iz: preambule, zaglavlja fizičkog sloja, kontrolne sekvence zaglavlja, opcionalnih polja, i podatkovne jedinice usluge fizičkog sloja PSDU [42].

4.3.1 Specifikacije usluge (servisa) fizičkog (PHY) sloja

Fizički sloj osigurava sučelje između podsloja kontrole pristupa mediju (MAC) i fizičkog optičkog kanala. Ovaj fizički sloj konceptualno uključuje upravljajući entitet koji se naziva upravljajući entitet fizičkog sloja PLME (Physical Layer Management Entity). Ovaj entitet omogućuje uslužna

(servisna) sučelja za upravljanje slojem, kroz koje mogu biti pozvane funkcije upravljanja slojem. PLME je također odgovoran za održavanje baze podataka objekata kojim upravlja, a koji se odnose (pripadaju) fizičkom sloju. Ova baza podataka se označava kao informacijska baza fizičkog sloja personalne mreže PIB (PHY PAN Information Base). Fizički sloj pruža dvije usluge, kroz koja se pristupa kroz dvije uslužne pristupne točke SAP (Service Access Point): podatkovna usluga fizičkog sloja, kojoj se pristupa kroz podatkovnu uslužnu pristupnu točku fizičkog sloja PD-SAP (PHY Data-SAP), i uslugu upravljanja fizičkim slojem, kojoj se pristupa kroz uslužnu pristupnu točku upravljajućeg entiteta fizičkog sloja PLME-SAP. PLME-SAP omogućuje prijenos upravljačkih komandi između entiteta za upravljanje vezom MAC podsloja MLME (MAC Link Management Entity) ili entiteta za upravljanje uređajem DME (Device Management Entity) i PLME. Podatkovna uslužna pristupna točka fizičkog sloja (PD-SAP) podržava prijenos protokolarnih podatkovnih jedinica MAC podsloja (MPDU) između lokalnog MAC podsloja i lokalnog entiteta fizičkog sloja.

Osnovim zahtjevom za promjenu stanja entiteta fizičkog sloja mijenja se unutarnje radno stanje primopredajnika. Primopredajnik može imati tri glavna (temeljna) stanja: primopredajnik ugašen (TRX_OFF), predajnik upaljen (TX_ON), i prijemnik upaljen (RX_ON).

Konstante koje definiraju karakteristike fizičkog sloja su ovisne o hardveru i ne trebaju se mijenjati tijekom rada. Informacijska baza fizičkog sloja personalne mreže (PIB) sadrži attribute neophodne za upravljanje fizičkim slojem uređaja.

4.3.2 Specifikacije PHY I načina rada fizičkog sloja

PHY I način rada fizičkog sloja primjenjuje se kada se zahtijevaju manje brzine prijenosa podataka. U PHY I modu rada, zaglavlje fizičkog sloja se šalje brzinom od 11.67 kb/s ukoliko je odabrana brzina optičkog takta (optičke modulacije) od 200 kHz, ili se zaglavlje fizičkog sloja šalje brzinom prijenosa od 35.56 kb/s ukoliko je odabrana brzina prijenosa optičkog takta od 400 kHz. Pri čemu je podrška za prvu navedenu brzinu prijenosa, pri danom taktu obvezna. Pri ovom načinu rada kaskadno kodiranje se koristi u kombinaciji sa vanjskim konvolucijskim kodom i RS (Reed-Solomon) unutarnjim kodom. Izlaz iz RS koderu je dopunjen nulama, kako bi se formirala granica za uređaj za umetanje podataka. Umetnute nule se nakon toga odbacuju i rezultat se šalje na unutarnji konvolucijski koder. Dijelovi okvira koji pripadaju zaglavlju fizičkog sloja PHR (Physical-layer Header) i podatkovnoj jedinici usluge fizičkog sloja PSDU (PHY Service Data Unit) nakon toga postaju subjekti unaprijedne korekcije pogrešaka FEC (Forward Error Correction), radi zaštite od grešaka, što važi i za PHY II način rada. Zaglavlje fizičkog sloja je kodirano korištenjem parametara koji odgovaraju najnižoj brzini prijenosa podataka za trenutno dogovorenu brzinu takta, kao i za PHY II način rada.

4.3.3 Specifikacije PHY II načina rada fizičkog sloja

Ovaj način rada primjenjuje se u slučajevima kada se zahtijevaju veće brzine prijenosa podataka. Za PHY II mod rada zaglavlje fizičkog sloja se šalje pri jednoj od sljedećih brzina: 1.25 Mb/s, 2.5 Mb/s, 6 Mb/s, 12 Mb/s, 24 Mb/s, ili 48 Mb/s, ovisno o odabranoj brzini optičkog takta. Podrška za prijenosnu brzinu od 1.25 Mb/s pri brzini optičkog takta od 3.75 MHz je obvezna. Sustavski RS kod se koristi za PHY II, kako bi ispravio greške i povećao pouzdanost sustava. Ovaj kod može biti skraććen za posljednji blok ukoliko ne odgovara zahtjevima veličine bloka. Za ovaj kod ne zahtijeva se umetanje dodatnih nula.

4.3.4 Specifikacije PHY III načina rada fizičkog sloja

Pri ovom načinu rada, zaglavlje fizičkog sloja se šalje pri prijenosnoj brzini od 12 Mb/s pri odabranoj brzini optičkog takta od 12 MHz, a isto to zaglavlje se šalje pri prijenosnoj brzini od 24 Mb/s ukoliko je odabrana brzina optičkog takta od 24 MHz. Pri čemu je obavezna podrška za prvu navedenu brzinu prijenosa i prvi navedeni optički takt. Uređaji koji rade u ovom modu moraju koristiti uređaje koji rade u PHY II modu za otkrivanje uređaja. Nakon pronalaska svih uređaja u mreži i ukoliko svi oni podržavaju PHY III režim rada, predajnik može odlučiti da se prebaci u PHY III mod rada. Također, PHY III uređaji moraju sa predajnikom razmjeniti informacije o frekventnim područjima koja podržavaju za rad u režimu sa modulacijom promjenom boja CSK (Color Shift Keying), a nakon toga predajnik treba verificirati da frekvencijska područja podržana u svim PHY III uređajima u mreži daju podršku za pouzdanu CSK komunikaciju. Ovo se čini, kako bi se osiguralo da prijenos na dva optička frekventna područja predajnog uređaja se ne nalazi unutar frekvencijskog područja jednog optičkog filtra prijemnog uređaja za CSK način rada, što vodi ka greškama u komunikaciji u CSK načinu djelovanja. U CSK konfiguraciji sustava za PHY III mod rada imamo izvore svjetlosti u tri boje (područja i, j, k). Nakon skremliranja i kodiranja kanala, podaci se transformiraju u xy vrijednosti, prema pravilima pridruživanja za xy koordinate boja bloka za kodiranje boja. VLC sustav može imati određene degradacije, kao što je neuravnoteženost više boja, interferencije više boja, ili druge greške na xy koordinatama boja prouzročene ambijentalnom svjetlošću ili svjetlosnim karakteristikama uređaja. Stoga, je CSK metoda kompenzacije na prijemu osiguran ovim standardom korištenjem kalibracije boja za poboljšanje performansi.

Ovaj standard IEEE 802.15.7 za Bežičnu Optičku Komunikaciju Putem Vidljive Svjetlosti na Kraćim Rastojanjima sadrži i dodatne anekse: A, B, C, D, E, i F koji pobliže opisuju i reguliraju pojedine aspekte komunikacije vidljivom svjetlošću [42].

5. SPECIFIČNOSTI I PROBLEMI VLC SUSTAVA

5.1 Utjecaj karakteristika rasvjete na VLC tehnologiju

Postoje dva primarna načina za stvaranje bijelog svjetla pomoću svjetlosnih dioda. Prvi je ujedno najjeftiniji i najpopularniji, a to je tzv. fosforna konverzija u kojoj je plava svjetlosna dioda presvučena žutim fosforom, kako bi emitirala bijelu svjetlost širokog spektra. Drugi način je kombinacija monokromatskih svjetlosnih dioda različite boje koje stvaraju bijelu svjetlost, čime je omogućena rasvjeta sa mogućnošću promjene boje. VLC kanal ima neke jedinstvene karakteristike [43]:

- a) modulacija optičkog nositelja, postiže se modulacijom intenziteta bez informacije o frekvenciji i fazi;
- b) emitirana valna forma se modulira na trenutnu snagu, što rezultira stvarnom i pozitivnom valnom formom;
- c) prosječna emitirana snaga je srednja vrijednost snage ulaznog signala, umjesto srednje kvadratne vrijednosti amplitude signala kod radijskog prijenosa;
- d) veličina prenesene snage je ograničena na unaprijed definiranu vrijednost, zbog propisa o zaštiti vida i dopuštenoj potrošnji, te ograničenja dinamičkog područja svjetlosnih dioda.

Degradacija signala nastaje uslijed kombiniranih učinaka proporcionalnosti odnosa signal-šum (SNR) kvadratu prosječne primljene snage optičkog signala (gubici pri prijenosu), ambijentalnog zrnatog šuma, sunčevog svjetla i vještačkog osvjetljenja, termalnog zrnatog šuma unutar elektronike prijemnika, i interferencije među simbolima (ISI) zbog više putova prostiranja svjetlosti.

5.1.1 Ograničenja rasvjete

Općenito, možemo identificirati dvije kategorije ograničenja rasvjete koje utječu na mogućnost umetanja podataka kod VLC sustava. Sa gledišta komunikacijskog inženjerstva, ova ograničenja se javljaju kao ograničenja na predajnoj strani. Prva kategorija ograničenja uglavnom odražava korisničke preferencije i odnosi se na razinu osvjetljenja (razinu prigušenja), zatim temperaturu boje CT (Color Temperature), indeks predstavljanja/emitiranja boje CRI (Color Rendering Index), difuzivnost, te neestetski i praktični razlozi pri pozicioniranju LED rasvjetnih tijela unutar prostorije. Podjednako važno ograničenje potječe od činjenice da komunikacijska funkcionalnost treba biti neprimjetna korisniku. Nagla privremena promjena jačine svjetlosti, poznatija kao treperenje je jako neugodna za korisnike. Ovi neželjeni efekti kod VLC sustava mogu se izbjeći potiskujući spektralni sadržaj emitiranih podatkovnih sekvenci ispod frekvencije od 1 kHz, npr. korištenjem Manchester koda ili ubacivanjem sekvenci specijalnih simbola između transmisija paketa.

Druga kategorija ograničenja se odnosi na komponente koje čine LED rasvjetna tijela. U prvom redu, to su LED svjetlosni izvor zajedno sa upravljačkom elektronikom i optičkim sustavom. Oni su odgovorni za više funkcija, poput prigušivanja svjetlosti, učinkovitog napajanja, kontrole temperature LED izvora, hlađenja, i realiziranja načina emitiranja svjetlosti [44].

5.1.2 Mjerenje i karakteristike svjetlosti

Karakteristike razlikovanja današnjih LED rasvjetnih tijela su struktura emitiranja, svjetlosni fluks, boja svjetla, i svojstvo prikaza boja. Dok struktura emitiranja ovisi o optičkom spoju i kućištu rasvjete, ostala svojstva mogu biti izvedena iz spektralne distribucije snage SPD (Spectral Power Distribution). SPD se matematički definira kao derivacija svjetlosnog fluksa u odnosu na valnu duljinu. Ona daje informaciju o spektralnoj kompoziciji svjetlosti, odnosno intenzitetu izlaza na različitim valnim duljinama. Također, manje egzaktna mjera boja, poznatija i kao korelirana temperatura boje CCT (Correlated Color Temperature) je na tržištu češće specificirana za bijele svjetlosne diode. CCT pridružuje temperature boje na skali i to, da crvenije nijanse pridružuje toplom dijelu skale, a plave nijanse bijelog svjetla pridružuje hladnom dijelu skale. U kontekstu VLC tehnologije, najistaknutija karakteristika spektralne distribucije snage je njeno odstupanje kao funkcija upravljačke struje svjetlosnih dioda. Njen pomak može unijeti i primjetan kromatski pomak i utjecati na svojstva prikaza boje. Slično, pojedine VLC tehnike modulacije su otpornije na opadanje kvalitete boje od drugih tehnika modulacije.

Na svojoj fundamentalnoj razini, VLC tehnologija se oslanja na nisku propusnost ljudskog vizualnog sustava da filtrira umetnutu modulaciju podataka visoke frekvencije. Također, poznato je da je ljudsko oko manje osjetljivo na boju u prigušenim postavkama osvjetljenja, nego u svjetlijim usljed činjenice da ljudsko oko koristi različite retinalne ćelije za različite razine osvjetljenja. Ograničena sposobnost ljudskog oka za razlikovanje spektralne distribucije snage svjetlosnog signala je još jedna karakteristika koja se može iskoristiti za komuniciranje vidljivom svjetlošću. Pošto ljudsko oko ima samo tri tipa ćelija za prijem boja u osvijetljenim okruženjima, moguće je da svjetlosni izvori sa različitom spektralnom distribucijom snage mogu izgledati kao da su iste boje. Ovo svojstvo je poznatije kao metamerizam. Pa tako naprimjer, kod modulacije promjenom boje svjetlosti (CSK), boje koje se brzo mijenjaju ljudsko oko vidi kao bijelu boju, uslijed svog dugog vremena integracije, ali pojedinačni kanal koji predstavlja svaka boja svjetla može se detektirati ispravno filtriranim prijemnicima. Sa druge strane, metamerička modulacija kodira sekvence podataka u kombinacije svjetlosnih dioda, koje su sve metamerički istovjetne, ali imaju različite spektralne distribucije koje se mogu razlikovati na prijemniku. Uslijed metamerizma trenutna boja je uvijek ista. Ova modulacija ima potencijal da eliminira efekte treperenja boje koji mogu biti prisutni kod CSK modulacije [43].

5.1.3 Karakteristike i ograničenja svjetlosnih dioda (LED)

Općenito, postoje dva glavna tipa svjetlosnih dioda koje se koriste za rasvjetu, a to su fosforoscentna i višebojna RGB (Red-Green-Blue) svjetlosna dioda. Fosforoscentni tip se sastoji od plave LED koja je premazana slojem žutog fosfora. Dok se tip sa više boja sastoji iz tri, a u nekim slučajevima i četiri pojedinačne diode uglavnom crvene, zelene, i plave RGB (Red, Green, Blue). Prvi (fosforoscentni) tip omogućuje troškovno učinkovito instaliranje, uglavnom zbog jednostavnijeg dizajna njegovog upravljačkog sklopa i omogućuje samo uski modulacijski propusni opseg oko 2 MHz, zbog sporog vremena odziva fosforoscentnog materijala. Neka istraživanja pokazuju da se ovaj propusni opseg može proširiti i na 20 MHz filtrirajući (potiskujući) fosforoscentni dio optičkog spektra pomoću filtra plave svjetlosti na prijemniku. Sa druge strane, RGB tip svjetlosne diode koji emitira bijelu svjetlost omogućuje tri pojedinačna kanala različite boje, gdje svaki pojedinačno daje propusni opseg od oko 15 MHz. Paralelnim korištenjem tri upravljačka sklopa (drivers), moguće je realizirati multipleksiranje valnih duljina WDM (Wavelength Division Multiplexing), ali po cijenu viših troškova implementacije. Ovim troškovima implementacije će dominirati tri čimbenika. Prvi čimbenik je da nam je ispred

svjetlosnih dioda na predajniku potreban određeni sklop za modulaciju velike brzine. Drugi se odnosi na snažni LED upravljač na predajniku i pojačalo niske razine šuma nakon fotodiode na prijemu. Treći, potreban je čip u osnovnom opsegu modulacije koji se temelji na npr. OFDM i koji pruža sučelje ka mrežnoj infrastrukturi [45].

Podatkovna brzina VLC veze je ograničena modulacijskim propusnim opsegom LED žarulja korištenih u klasičnim stropnim rasvjetnim tijelima. Usljed kompromisa između potrošnje i propusnosti, kao i raznih parazitnih impedancija LED svjetiljki, signali modulirani na visokim frekvencijama su jako oslabljeni. Visoke brzine prijenosa podataka pri tako limitiranom propusnom opsegu moguće je jedino ostvariti iskorištavanjem visokog ostvarenog omjera signal-šum SNR (Signal to Noise Ratio) kroz upotrebu konstelacija višeg reda. Takva spektralno učinkovita modulacija zahtijeva linearan odziv signala u propusnom dijelu spektra. Korištenje linearnih pojačivača snage za postizanje ovoga može biti kontra-produktivno, pošto su ovi uređaji veliki potrošači, te se na taj način može anulirati jedna od najvažnijih karakteristika LED rasvjete, a to je niska potrošnja. Jedan od načina za rješavanje ovog problema je korištenje učinkovitijih konfiguracija pojačivača u pogledu potrošnje i dopuštanjem višeg stupnja nelinearnosti. Ultimativno rješenje također, može biti korištenje skupina manjih svjetlosnih dioda, manje snage u rasvjetnim tijelima. Istraživanja pokazuju, da je moguće postići prijenosne brzine reda nekoliko stotina megabita u sekundi korištenjem jednostavne binarne modulacije. Veći propusni opseg ovih mikro svjetlosnih dioda, proizlazi iz njihovih niskih unutarnjih kapacitivnosti i niskih parazitnih impedancija, kada se one integriraju sa CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) upravljačkim sklopovima. Još jedna metoda za povećanje podatkovne brzine je prijenos različitih tokova podataka preko svjetlosnih dioda različite boje, koje se kombiniraju kako bi se dobila bijela svjetlost CSK (Color Shift Keying) [46].

5.1.4 Karakteristike i ograničenja prijemnika

Ukoliko se kao kao prijemni uređaj u komuniciranju vidljivom svjetlošću koristi fotodioda iz jednog elementa, onda se takav sustav vrlo teško može koristiti na izravnoj sunčevoj svjetlosti. Pošto je direktna sunčeva svjetlost obično jaka, te može biti primljena sa prosječnom snagom koja je mnogo veća u odnosu na snagu signala koji zapravo želimo primiti, a dolazi sa VLC omogućenog rasvjetnog tijela. Štoviše, vrlo je teško reducirati ogromnu količinu šuma zbrajajući sva pozadinska svjetla u vidnom polju na razini optičkog signala, čak i ako se koristi optički propusni filter. Kada se jednoelementna fotodioda koristi na vanjskom prostoru, nužno je povezivanje sa malom divergencijom ili odstupanjem optičke zrake. U protivnom, foto-dioda se ne može koristiti na direktnoj sunčevoj svjetlosti. Zbog svoje sposobnosti da prostorno razdvaja signale iz različitih izvora svjetla, senzor slike kao VLC prijemnik koristi samo one piksele koji prepoznaju izvore LED prijenosa, a odbacuje sve druge piksele, uključujući i one koji detektiraju izvore šuma. Prostorno razdvajanje izvora svjetlosti otvara mogućnost prijema i procesiranja prijema iz više izvora emitiranja za VLC upotrebom senzora slike. Valna duljina spektra vidljive svjetlosti (380-780 nm) je mnogo manja od tipične površine fotodetektora, što učinkovito uklanja feding nastao uslijed više putova prostiranja signala u sustavu, što je protivno radijskoj (RF) komunikaciji. CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) senzori slike stekli su veliku popularnost proteklih nekoliko godina zbog svoje prednosti u multifunkcionalnosti, malim troškovima proizvodnje, i male potrošnje energije. Ključni element CMOS senzora slike je fotodioda PD (Photo Diode), i predstavlja jednu komponentu piksela. Fotodiode su obično organizirane u pravokutnu mrežu (rešetku), kako bi stvorile digitalnu elektronsku reprezentaciju scene. Pri radu, svjetlost koja prođe kroz leće pada na fotodiodu, gdje se pretvara u naponski signal

i propušta kroz analogno-digitalni (A/D) konvertor. Izlaz iz ovog konvertora se često označava kao osvjetljenje. Većina ovih senzora slike je dizajnirana uzimajući u obzir karakteristike ljudskog oka. Tipičan primjer je broj okvira komercijalno dostupnih CMOS senzora, koji je općenito ograničen na 30 okvira u sekundi ili nekoliko puta veći. Sve navedeno dovodi do zaključka da bi CMOS senzori slike u budućnosti mogli biti osnovni prijemnici za VLC komunikaciju [47].

5.1.5 Karakteristike LED upravljačke elektronike

Poznato je da su svjetleće diode (LED) osjetljive na veće struje i napone napajanja zbog svoje male dinamičke otpornosti, što proces komuniciranja i prigušivanja čini još kompleksnijim. LED rade pod malim naponima jednosmjernog (DC) napajanja, dok su općenito glavni izvori napajanja naizmjenični (AC). Upravo ovu AC-DC pretvorbu izvode LED upravljači. Ovi LED upravljači također koriste DC-DC pretvornike za snižavanje linijskog napona, ovisno o radnom naponu svjetleće diode. Uzimajući u obzir karakteristike svjetlećih dioda, ovaj sniženi DC napon se treba precizno održavati, što se može izvesti dodavanjem kontrolera povratne veze (feedback) topologiji upravljačkog kruga. Kombiniranje rasvjete sa komunikacijom postavlja strože zahtjeve pred dizajniranjem LED upravljačkog sklopa. CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) tehnologija omogućuje realizaciju sustava na čipu SoC (System on Chip) upravljačkih krugova integrirajući više funkcija na jednu malu površinu za kontrolu performansi, svjetline, i podatkovne modulacije LED-a za pametno umrežavanje pomoću vidljivog svjetla. Za razliku od komercijalnih LED upravljača, VLC upravljači moraju biti prilagođeni karakteristikama VLC-a, bez narušavanja kontrole rasvjete poput prigušenja. Pored ovih ograničenja, općenito svi upravljački krugovi moraju raditi pri malim snagama, imati dug vijek trajanja, i moraju biti u mogućnosti koristiti impulsnu struju za upravljanje svjetlećim diodama [48].

U upravljačkoj elektronici postoje neki opći problemi koji ograničavaju VLC performanse i primjene u rasvjeti. Tako primjerice, rezonantna frekvencija DC-DC konvertora ograničava ukupni propusni opseg petlje povratne veze, koja je obično u kilohercnom (kHz) rasponu, uslijed velikih vrijednosti induktiviteta i kapaciteta. Ova niska propusnost ograničava brzinu emitiranja podataka VLC predajnika. Gubitci pri AC pretvorbi svjetlosti, koja uključuje AC-DC-DC konverziju smanjuju učinkovitost komercijalnih LED svjetiljki i do 14% [49].

5.2 Problemi i karakteristike komunikacijskog kanala

VLC sustavi su nedvojbeno podložni ograničenjima koja su prisutna u svim bežičnim optičkim sustavima sa modulacijom intenziteta i izravnom detekcijom IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection), poput šuma i interferencije. Dakako, velika emitirana snaga u združenim rasvjetno/komunikacijskim sustavima može voditi ka neuobičajenoj ovisnosti omjera signal-šum (SNR) o propagacijskoj udaljenosti u slobodnom prostoru. U IM/DD sustavima, pored termalnog šuma koji potječe od elektronike u prijemniku, također postoji šum povezan sa prirodom brojanja fotona. Brojanje fotona je Poisson-ov proces, što implicira da nivo šuma ovisi o prosječnom broju primljenih fotona. Dok fotoni koji ne nose informacije i koji potječu od izvora sa konstantnim intenzitetom stvaraju određeno odstupanje u DC napajanju, te mogu biti lako uklonjeni, dodatno razmatranoj komponenti šuma ovisnoj o signalu, postoji i komponenta šuma proporcionalna ovoj razini odstupanja u DC napajanju. Na VLC sustave također djeluje i tzv. parazitna svjetlost koja dolazi do prijemnika, naročito su to u prvom redu fotoni iz drugih vještačkih izvora svjetla. Stoga, se u cilju reduciranja efekata šuma ambijentalnog svjetla i interferencije, kako u optičkoj, tako i u električnoj domeni, može koristiti kombinacija dizajniranja i procesiranja signala, kao i filtriranja signala. Važno je primijetiti, da ponašanje fotodetektora prouzrokuje da omjer signal-šum na prijemniku ima neuobičajenu ovisnost o udaljenosti

propagacije. Dok u radijskim sustavima antena stvara signal proporcionalan amplitudi dolaznog signala (zračenja), u IM/DD sustavima fotodetektor stvara četvrtaste signale, koji su proporcionalni intenzitetu dolaznog vala. Ovo implicira, da omjer signal-šum ovisi o udaljenosti propagacije "d" slično bežičnim radijskim linkovima ($1/d^2$), kada dominira Poisson-ov šum ovisan o signalu, dok se jača ovisnost ($1/d^4$) javlja kada termalni šum ili ambijentalno svjetlo iz drugih izvora određuju razinu šuma u prijemniku. U VLC sustavima, dio šuma ovisan o signalu može biti značajan jer je izvor informacija (predajnik) primarno izvor rasvjete. Ustvari, koegzistencija šuma ovisnog o signalu, zajedno sa doprinosima termalnog šuma i ambijentalnog svjetla neovisnih o signalu, čine teškim intuitivno razumijevanje i predviđanje ponašanja VLC sustava, kao i dizajniranje učinkovitih shema kodiranja i dekodiranja [44].

VLC komunikacija velike prijenosne brzine zahtijeva specijalizirane prijemnike (fotodiode) velike brzine na prijemnoj strani, dok se na predajnoj strani koristi amplitudna modulacija LED izvora, a odgovarajuća tehnika komunikacije se tipično odnosi na modulaciju intenziteta emitirane svjetlosti sa izravnom detekcijom IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection). VLC kanal nije podložan Doplerovim efektima pri prostiranju signala pošto destruktivni i konstruktivni uzorci interferencije događaju na mikroskopskoj razini i efektivno se dovode na srednju vrijednost pomoću prijemnika (fotodiode), čija je veličina nekoliko tisuća puta veća. Ovo znači da nam nisu potrebni složeni algoritmi za nadzor kanala na prijemniku, pošto je kanal efektivno vremenski invarijantan. Naime, zasjenjivanje može prouzročiti prekid veze, ali se to može izbjeći automatskim zahtjevom za ponavljanje prijenosa ARQ (Automatic Repeat Request). Frekvencijski odziv svjetlosnih dioda nije ravan, ali nasreću neke tehnike modulacije poput diskretnog multitona DMT (Discrete Multitone) su naročito podesne jer razlažu kanal na više paralelnih frekvencijskih ravnih kanala. Moduliranje pojedinačnih nositelja se također može primjenjivati, uz odgovarajuće ekvilizatore kanala na strani prijemnika [45].

VLC komunikacija male prijenosne brzine mogu se realizirati korištenjem postojećeg hardvera ugrađenog u mobilne uređaje. Ovi slučajevi upotrebe uključuju i određivanje pozicije mobilnih uređaja u zatvorenim prostorima i uparivanje uređaja. Naime, senzor slike kamere ugrađene u većinu današnjih mobilnih uređaja u suštini predstavlja gusto dvodimenzionalno polje fotodioda, gdje svaka fotodiode predstavlja jedan piksel. Vršne podatkovne brzine koje se mogu ostvariti sa kamerama ugrađenim u današnje mobilne uređaje su na razini kilobita u sekundi, što je sasvim dovoljno za prethodno navedene slučajeve korištenja. Današnji mobilni uređaji na tržištu uglavnom imaju dvije ugrađene kamere, prednju i zadnju. Prednja se može koristiti za pozicioniranje u zatvorenom prostoru, pošto je ista obično okrenuta ka stropnim rasvjetnim tijelima kada korisnik gleda u ekran mobilnog uređaja, te je stoga u mogućnosti dekodirati VLC signale koje ona odašilju. Sa druge strane, stražnja kamera na mobilnim uređajima može se koristiti za dekodiranje signala koji dolaze od strane LED ekrana TV uređaja, zatim raznih LED reklamnih panoa, te ostalih mobilnih uređaja, kako bi učinkovito i neupadljivo podržali slučajeve primjene koji se trenutačno djelomično obavljaju pomoću QR (Quick Response) kodova. Prednosti VLC tehnologije nad QR tehnologijom su veći domet, veća robusnost na osvjetljenje, asimetrija, i druge optičke distorzije [46].

5.2.1 Problemi pri MIMO prijenosu signala putem vidljive svjetlosti

Pošto je većina VLC predajnika sastavljena od više svjetlećih dioda, oni uglavnom rade na principu istodobnog višestrukog paralelnog odašiljanja sa više ulaza i više izlaza MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) prema pojedinačnom prijemu ili više njih. U MIMO VLC sustavima postoje neki izraženi problemi pri prijenosu, na čije otklanjanje u budućnosti treba obratiti posebnu pozornost [10], [11], [39], [40], [41], [50], a posebice su to:

- Preslušavanje među kanalima (Channel Cross-Talk), koje nastaje kada drugi ili susjedni komunikacijski kanali stvaraju smetnje u primljenom signalu na željenom kanalu. Naime, kod VLC-a svjetlo sa jednog predajnika može biti detektirano od strane više prijemnika, te tu dolazi do neizbježnog preklapanja, posebice u slučaju kada imamo više predajnika [39], [40].
- Mobilnost uređaja/terminala (Terminal Mobility) u kom pomicanje mobilnog uređaja utječe na prijem na površini detektora. Stoga je za prijem podataka potrebna inteligentna kontrola, posebice u slučaju primo-predaje (handover) između više različitih predajnika. Korištenjem inteligentnog algoritma učenja, matrica kanala se nadopunjava u vremenu. Dinamičko rješenje sa tehnikama adaptivne brzine sukladne promjeni uvjeta u kanalu i uslijed nepotpune matrice kanala, zahtjeva reduciranje broja predajnika radi dobivanja punog ranga matrice kanala [41].
- Razdvajanje signala predajnika (Transmitter Signal Separation) u određenim situacijama svjetlo sa nekoliko predajnih lampi dolazi do pojedinačnog detektora prijemnika, renderirajući na taj način matricu kanala tako da ona nema puni rang, što zauzvrat čini nemogućim ekstrakciju signala iz svih kanala. Ovo nekada može biti i posljedica nepravilnog poravnanja predajnika i prijemnika na pojedinim lokacijama u prostoriji [39], [40], [41].
- Pokrivanje ili prekrivanje (Coverage) svjetlosti sa predajnika drugom svjetlošću, pošto za normalan rad prijemnik treba biti u mogućnosti da detektira signale sa većine izvora svjetla u prostoriji, to zahtjeva širi kut emitiranja sa predajnika i šire vidno polje FOV (Field-of-View) prijemnika. Ovo međutim reducira intenzitet detektiranog signala, te može prouzročiti veću smetnju izazvanu ambijentalnom svjetlošću na prijemniku. Sa povećanim vidnim poljem (FOV) prijemnika, refleksije (Lambert-ove) od zidova u prostoriji, mogu stvoriti sekundarne slike predajnika na površini detektora što može uzrokovati preslušavanje, interferencije, reduciranje propusnosti, te reduciranje podatkovne brzine prijenosa [39], [40], [41].
- Zasjenjivanje (Shadowing) ili blokiranje (zaklanjanje izvora svjetla predajnika), također predstavlja jednu od glavnih smetnji pri prijenosu u sustavima temeljenim na komuniciranju putem vidljive svjetlosti u zatvorenim i otvorenim prostorima. Najčešće nastaje u situacijama kada pojedini predmeti (npr. namještaj u prostoriji) ili kretanje osoba mogu izazvati prekid, odnosno smetnju pri izravnom putu svjetlosnog signala između predajnika i prijemnika, ovisno o njihovoj međusobnoj poziciji [11], [50].

5.2.2 Otklanjanje problema zasjenjivanja pri MIMO VLC prijenosu signala

Pošto jednu od glavnih smetnji pri prijenosu u sustavima temeljenim na komuniciranju putem vidljive svjetlosti predstavlja zasjenjivanje, različiti istraživači su predložili različite metode i tehnike za otklanjanje ili ublažavanje posljedica ovih problema. Tako istraživač u [50] predlaže distribuirani model (višestrukih predajnika), kako bi se ublažili problemi vezani uz sjene ili zasjenjivanje svjetlosti. Naime, pošto svaka LED emitira isti tok podataka, u ovoj metodi, više svjetlosnih izvora koji su pravilno raspoređeni na stropu prostorije, su u mogućnosti smanjiti tamna područja ili sjene. Dakako, prema autoru ova metoda je podložna interferenciji među simbolima ISI (Intersymbol Interference). Kako bismo riješili probleme zasjenjivanja i blokiranja svjetlosti emitirane od strane LED rasvjetnog tijela, na raspolaganju je potrebno imati signale iz više od jednog izvora emitiranja. Tako da se model sa više različitih ili distribuiranih izvora čini kao obećavajuće rješenje, te on može imati visok omjer signala i šuma (SNR). Ali to kod ovog modela ne znači i veću prijenosnu brzinu ili rješenje problema vezano uz interferenciju među simbolima (ISI). Upravo je MIMO model sa više istovremenih različitih podatkovnih tokova od izvora, gdje se paketi dijele na blokove, rješenje za ove probleme. Stoga, ovaj model zahtijeva potpunu tzv. "matricu kanala", odnosno ukoliko je bilo koje LED emitirajuće tijelo blokirano ili oštećeno, komunikacijski link je prekinut. Sa druge strane, ovaj problem vezan uz prekid linka uslijed blokade ili oštećenja pojedinog LED tijela, se tehnički može riješiti modelom sa višestrukim predajnicima [50].

Kao jedna vrlo učinkovita metoda za otklanjanje prethodno navedenih problema, pri digitalnom prijenosu informacija putem vidljivog dijela EM spektra, određeni autori spominju i kombinaciju gore spomenutih metoda prijenosa. Istraživači u [11] predlažu promjenjivi (preklopivi) "MIMO-distribuirani model" odnosno sustav, koji se može realizirati hardverskim preklapanjem unutar el. kola ili softverskim preklapanjem putem COM porta. Oni navode da, sustav u pravilu radi u MIMO režimu. Kada se bilo koji prijemnik susretne sa znatnim smanjenjem snage primljenog optičkog signala, sustav će prebaciti predajnik na paralelni distribuirani mod, tako da sve LED doprinose povećanju smanjene snage signala. Model koji predlažu ovi autori ustvari je kombinacija tehnika različitih predajnika i MIMO tehnike preklapanja, koja kombinira zajedno prednosti od obje tehnike preklapanja. Također, na temelju simulacija i testova pokazalo se da je softverski kontroliranom preklapanju putem COM porta potrebno više vremena za prebacivanje između MIMO i distribuiranog modela, u odnosu na hardversko preklapanje unutar el. kola [11].

Pošto je tehnologija komuniciranja vidljivom svjetlošću još u svojoj razvojnoj fazi, stoga imamo jako ograničen skup metoda za poboljšanje prijenosa uz upotrebu ove tehnologije, a koje su i praktično dokazane u ograničenim uvjetima, kao gore spomenute metode. Pretpostavlja se, da će u budućnosti "pametni" MIMO sustavi poput ovih biti još efikasniji, jer će biti dalje prilagođeni za kontrolu modulacijskih tehnika u LED klasterima, za kontrolu matrice svjetla u slučaju problema ili poteškoća pri radu.

5.2.3 Poboljšanje performansi VLC sustava

Iako posjeduju određene prednosti u usporedbi sa tradicionalnim komunikacijskim sustavima, VLC sustavi se još uvijek susreću sa brojnim izazovima koje treba riješiti. Tako, komercijalne svjetleće diode sa fosfornim premazom (pc-LED) velike svjetline imaju vrlo nizak propusni opseg modulacije. Naime, u slučaju pc-LED sama plava LED dioda bez fosfornog premaza ima propusni opseg od 20Mb/s mjereno kod gušenja 3 dB, dok fosforni premaz koji služi za pretvaranje plave svjetlosti u bijelu dodatno snižava taj propusni opseg na brzinu od približno 2 Mb/s. Također, veliki problem u ovim sustavima predstavlja i udaljenost prijenosa uslijed naglog opadanja jačine

svjetlosti sa povećanjem udaljenosti od predajnika, te problem ambijentalne svjetlosti, kao izraženog izvora šuma u sustavu. Stoga, postoji mnogo metoda za unaprjeđenje i poboljšanje propusnog opsega i performansi VLC sustava, te ublažavanje ili potpuno otklanjanje spomenutih problema [51], [52], [53], a to su:

- Filtriranje plave svjetlosti
- Modulacija izvan nominalnog propusnog opsega od 3 dB
- Ekvilizacija predajnika i prijemnika
- Adaptivna ekvilizacija
- Ekvilizacija pod-nositelja
- Uklanjanje interferencije i šuma
- Kompenziranje nelinearnosti i ograničenje signala
- Optičko usmjereno odašiljanje (beamforming)

5.3 Problemi pri planiranju VLC ćelija

Zahtjevi upravljanja pristupom za više uređaja u VLC mreži su različiti u odnosu na druge tipove mreža. Razlog za ovo je taj, što veličina ćelije može varirati ovisno o tome kako je realizirana rasvjeta. Moguće je naprimjer, da jedno rasvjetno tijelo sa više svjetlećih dioda koje se nalazi na stropu prostorije osigurava osvjetljenje za cijelu prostoriju. U tom slučaju, rasvjeta emitira podatke za više korisnika, koji mogu imati više uređaja. Ovaj tip ćelije neki istraživači označavaju kao "ato-ćeliju" (attocell), čiji radijus, ovisno o osvjetljenju ne prelazi 10 m [54]. Drugi tip ćelije ima još manji promjer, u kojem rasvjetno tijelo obično vrši osvjetljenje uglavnom za lične potrebe. Takva vrsta rasvjete se obično upotrebljava za osvjetljenje manjih površina u domovima (npr. stolne lampe). Ovaj tip ćelije poznatiji je kao zepto-ćelija (zeptocell). Tipični promjer zepto-ćelije ne prelazi 5 m i obično se na ovu vrstu ćelije povezuje manje uređaja. Pošto se obično više ato-ćelija koristi za osvjetljenje velikih zatvorenih prostora, među njima je stoga izraženija i interferencija među susjednim ćelijama ICI (Inter-Cell-Interference). Sa druge strane, kod zepto-ćelija, svako rasvjetno tijelo emitira manje svjetlosti u usporedbi sa onim kod ato-ćelija. Takođe, zepto-ćelije su mnogo udaljenije jedna od druge, pa je kod njih interferencija među ćelijama (ICI) manje izražena [55]. Izbor promjera ćelije pokrivanja rasvjetnog tijela određuje raspodjelu kašnjenja primljenog signala, koji se može optimizirati ovisno o prostornom rasporedu (distribuciji) prijemnika [56]. Standard IEEE 802.15.7 [42], daje prijedloge za upravljanje dizajnom ćelije i tehnikama za reduciranje ICI-a. Naime, pretpostavlja se da su sva LED rasvjetna tijela u prostoriji povezana na centralni kontroler, koji koordinira rad ćelija i mobilnost uređaja. Tako da se uređaj povezuje na onu ćeliju sa koje prima beacon (snop) najveće snage optičkog signala. Radni okvir za upravljanje mobilnošću sličan je onom kod Wi-Fi-ja ili ostalih ćelijskih mreža, gdje se primopredaja uređaja događa pri prelasku uređaja iz jedne ćelije u drugu. Za upravljanje interferencijom među ćelijama (ICI), predajnik koristi poskakivanje (hopping) frekvencije, gdje kontroler osigurava da ćelije koje međusobno interferiraju ne koriste isti frekvencijski pojas u isto vrijeme. Važno je znati, da podrška frekvencijskom poskakivanju ovisi o mogućnostima LED-ova, naprimjer ukoliko se radi o RGB LED-ovima, moguće je obezbjediti mnogo pojaseva boja koji se mogu iskoristiti za poskakivanje. Upravljanje ćelijama, mobilnošću i

interferencijom između ćelija može se pojednostaviti upotrebom centralnog kontrolera, ali je implementiranje takvog kontrolera u praksi skupo zbog troškova ugradnje međuveza između kontrolera i ćelija.

5.3.1 Integriranje prijenosa u silaznom i uzlaznom smjeru

Pri prijenosu podataka u silaznom smjeru, podaci se najprije moraju dopremiti do LED rasvjetnih tijela ili lampi, prije nego se oni mogu poslati kao signal putem vidljive svjetlosti. Postoji veliki broj tehnologija prijenosa pomoću kojih se podaci mogu dopremiti do rasvjetnih tijela. Korištenje bilo koje od ovih tehnologija zahtijeva neke modifikacije na rasvjetnim tijelima, kako bi ona bila u mogućnosti primiti i eventualno procesirati signale koji stižu preko prijenosne mreže, prije stvaranja strujnog signala kojim se upravlja svjetlosnim diodama. Pošto su rasvjetna tijela spojena na strujnu mrežu izmjenične struje, postoje i neki prijedlozi da se upravo ona koristi kao prijenosna mreža, što je odranije poznato i kao komuniciranje preko strujnih vodova PLC (Power Line Communications). U ovom slučaju potrebne su minimalne preinake na rasvjetnim tijelima jer se signal za PLC modeme može koristiti i za moduliranje svjetlosnih dioda. Naravno, postoje mnoge učinkovitije prijenosne tehnologije za realiziranje ove zadaće, poput napajanja putem eterneta PoE (Power over Ethernet) sa gigabitnim brzinama prijenosa i napajanja mrežnih uređaja preko istog kabela kabela televizije [45], [46].

Jedna od tehnologija izbora za prijenos u uzlaznom smjeru može biti Wi-Fi, pošto gotovo svi mobilni uređaji na tržištu danas imaju ugrađene ove radijske module. Na tržištu već postoje hibridni router/gateway uređaji dizajnirani za upravljanje prometnim tokovima preko heterogenih prijenosnih tehnologija. Oni se mogu modificirati da upravljaju simultanim radom VLC downlink-a i Wi-Fi uplink-a pridruženih mobilnih uređaja. Jedan od problema pri slanju potvrda za VLC okvire/pakete je stvaranje čestog manjeg podatkovnog prometa, koji reducira propusnost za pridružene uređaje koji koriste samo Wi-Fi. Prisustvo ovih uređaja koji koriste samo Wi-Fi utječe na kašnjenje i propusnost VLC linka. Zbog toga bilo bi poželjnije koristiti robusniju metodu za unaprijednu korekciju grešaka FEC (Forward Error Correction), kako bi reducirali broj potvrda ACK (Acknowledges), koje zahtijeva VLC tok. Wi-Fi uzlazni kanal može se koristiti za konfiguriranje parametara silaznog VLC kanala poput brzine, propusnosti kanala, i snage. U prisustvu više rasvjetnih tijela na kojima je omogućena komunikacija putem vidljivog svjetla, ove informacije prenesene putem uzlazne radijske veze, mogu se također koristiti za određivanje sa kojim točno rasvjetnim tijelom je povezan pojedini mobilni uređaj [46].

5.3.2 Dostignuća u brzini prijenosa u VLC ćelijama

U slučaju kada koristimo fosforoscentnu LED i jednostavnu on-off modulaciju (OOK), to nam omogućuje brzine prijenosa podataka između 100 i 230 Mb/s, ali se ove brzine prijenosa kontinuirano povećavaju primjenjujući spektralno učinkovitije formate moduliranja. Ovdje se u prvom redu misli na ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (OFDM). Pri LOS načinu prijenosa i uz korištenje fosforescentnih dioda postignute su brzine prijenosa do 1Gb/s, pa čak u nekim slučajevima i do 1.5 Gb/s, ukoliko se koristi RGB-LED konfiguracija u jednobojnom prijenosnom modu. U kontrastu sa izravnim (LOS) scenarijima prijenosa, u neizravnim (NLOS) scenarijima ili raspršenim konfiguracijama zahtijeva se upotreba adaptivnih shema prijenosa, uslijed specifičnih svojstava njihovih kanala. Veliko poboljšanje u smislu propusnosti može se postići korištenjem RGB-LED i multipleksiranja valnih duljina (WDM). U usporedbi sa prijenosom putem jedne boje, agregirana podatkovna brzina je pomjerena na 1.25 Gb/s, pri razini osvjetljenja od 1000 lx (luksa) na prijemniku, što je i preporučeno Europskim standardom za osvjetljenje iz 2003 godine, a odnosi se na nivo osvjetljenja za radna okruženja. U nekim

slučajevima uz korištenje odvojene obrade WDM-VLC i RGB-LED male snage postignute su agregirane brzine prijenosa od visokih 3.4 Gb/s. WDM se može naravno upotrijebiti i za uspostavljanje bidirekcionalnih (dvosmjernih) VLC linkova, koji rade u punom dupleks režimu [45], zatim korištenjem dvostrukih različitih vremensko-frekvencijskih optičkih shema modulacije [57]. Još veće prijenosne brzine od 8 Gb/s, mogu se ostvariti korištenjem CAP (Carrier-less Amplitude and Phase) odnosno shema modulacije amplitude i faze bez nositelja i sa korištenjem hibridne postekvilizacije, te korištenjem RGBY LED [58]. Najveće brzine prijenosa u VLC sustavima dosada od preko 10 Gb/s, ostvarene su korištenjem RGB laserskih dioda i usmjerenih raspršivača (difuzora) svjetlosti na predajnim rasvjetnim tijelima. Naime, difuzori raspršuju koherentne laserske zrake i stvaraju optičku ćeliju određenog promjera [59].

6. POZICIONIRANJE U SUSTAVIMA KOMUNICIRANJA VIDLJIVOM SVJETLOŠĆU

Široka rasprostranjenost rasvjetnih tijela temeljenih na svjetlosnim diodama pruža mogućnost da se ista koriste i za pozicioniranje putem vidljive svjetlosti VLP (Visible Light Positioning) i na taj način stvori osnova za unutarnji sustav koji je široko dostupan, ekonomičan, i lak za korištenje. Pozicioniranje je također poznato i kao lokaliziranje (localization), te predstavlja proces određivanja pozicije u prostoru neke osobe ili objekta. Precizno određivanje pozicije je ključno za razne primjene i aplikacije. Vrlo je važno, da prijenos signala za pozicioniranje ne ugrozi primarnu funkciju svjetlosnih dioda, a to je energetska učinkovita rasvjeta. Pošto se LED mogu modulirati na mnogo višim frekvencijama od konvencionalne rasvjete, signali za pozicioniranje mogu se lako prenijeti na frekvencijama koje ne prouzrokuju vidljivo treperenje svjetla. Informacije o poziciji mogu biti izdvojene iz nekoliko svojstava primljenog signala, kao što je snaga primljenog signala ili kut pod kojim signal stiže do prijemnika. Pošto je vijek trajanja LED-ova relativno dug, to znači da će izrada rasvjetnih tijela sa dodatnom funkcionalnošću pozicioniranja biti jeftinija u dugoročnom pogledu. VLP sustavi mogu biti dizajnirani sa mnogo fundamentalno različitih arhitektura, ovisno o tome da li postoji suradnja između rasvjetnih tijela koja emitiraju signale ili uređaja čija se pozicija određuje. Ukoliko nema suradnje između rasvjetnih tijela, ona emitiraju unaprijed određene signale. Telekomunikacijski standardi obično specificiraju format signala koji se emitira, ostavljajući dizajn prijemnika pojedinačnim proizvođačima. Iako ova arhitektura ne pruža možda najpreciznije određivanje pozicije, ona je najjednostavnija i najekonomičnija za ugradnju i ispravno dizajnirana ima najveći potencijal za šire prihvaćanje [60].

6.1 Karakteristike pozicioniranja putem LED rasvjete

Primarna karakteristika LED rasvjete je pružanje energetske učinkovite rasvjete, tako da kod VLP kao i kod VLC signali za pozicioniranje ne smiju ugroziti primarnu namjenu rasvjete. Mnogi rasvjetni sustavi omogućavaju prilagodbu razine osvjetljenja, te funkcija pozicioniranja mora biti kompatibilna sa ovom mogućnošću prigušenja rasvjete. Općenito bi standard za određivanje pozicije trebao biti kompatibilan i sa fosforoscentnim i sa RGB osvjetljenjem. Ovo implicira da pozicijske informacije ne trebaju biti kodirane u boju svjetla, a može imati i implikacije u pogledu najviše frekvencije na kojoj svjetlost može biti modulirana. Količina informacija potrebnih za lokalizacijske svrhe je prilično skromna. Što znači da učinkovitost propusnog opsega može biti žrtvovana ukoliko to rezultira jednostavnijim sustavom. Tako da npr. signali mogu biti emitirani učestalijim intervalima. Postoje mnoge važne prednosti sustava pozicioniranja pomoću LED rasvjete VLP (Visible Light Positioning), poput jednostavne ugradnje u postojeće sustave i nepostojanja potrebe za dodatnim ožičenjem i napajanjem. Nadalje, korištenjem komuniciranja preko električnih vodova (PLC), bit će moguće ostvariti podatkovni prijenos relativno velike brzine do pojedinih uređaja bez dodatnog ožičenja, što će biti važan faktor penetracije VLC sustava [45], [46], [60].

6.2 Tehnike pozicioniranja

Kada je potrebno precizno određivanje pozicije VLP prijemnik koristi primljene signale za određivanje relativne udaljenosti ili smjera LED svjetlosnih predajnika. Ova mjerenja se onda kombiniraju za određivanje pozicije prijemnika, a pri tom se koristi triangulacija tj. korištenje kuta dolaska informacije putem svjetla ili trilateracija tj. korištenje informacije o duljini puta ili o

vremenu dolaska svjetlosti. Prema nekim istraživanjima, metoda određivanja pozicije putem LED rasvjete koja najviše obećava je određivanje kuta dolaska svjetlosnih zraka AOA (Angle Of Arrival). Ovaj način pozicioniranja je rijedak u radijskim sustavima jer obično ne postoji izravna optička vidljivost između predajnika i prijemnika, kao i zbog problema uslijed višestruke propagacije radijskog signala. Dok sa druge strane kod VLP sustava, prijemnik će gotovo uvijek imati izravnu optičku vidljivost (LOS) prema nekoliko rasvjetnih tijela. Također, dodatno na LOS komponentu, primljeni optički signal će često imati difuznu komponentu uslijed svjetla reflektiranog od zidove i druge površine. Ova difuzna komponenta je obično vrlo mala u odnosu na izravnu (LOS) komponentu, tako da će bilo koja greška u određivanju kuta dolaska (upada) svjetla (AOA) biti relativno mala. Drugi faktor koji vrlo izvjesnim čini određivanje pozicije na temelju kuta dolaska svjetlosti je da su leće sa prilično preciznim dizajnom veoma jeftine za proizvodnju. Ovo znači da relativno jednostavni optički sustavi mogu osigurati vrlo precizne informacije o kutu dolaska svjetlosti. Još jedno važno razmatranje u dizajnu ovih sustava je da li je pozicija poznata u odnosu na neki opći koordinatni sustav (širina i dužina) ili se zahtijeva pozicija u odnosu na npr. kut prostorije. Stoga je potreban fleksibilan i robustan međunarodni VLP standard, koji će omogućiti obje opcije. Ovisno o primjeni, LED rasvjeta bi mogla u budućnosti emitirati identifikacijske kodove ili iz malog broja kodova koji se koriste unutar pojedine organizacije (tvrtke) ili globalno jedinstven kod poput EUI-64. Primjene koje uključuju i VLC, LED rasvjeta također može emitirati i IPv6 adrese. U primjenama u kojima se zahtijeva poznavanje pozicije pojedinog uređaja u globalnom ili lokalnom koordinatnom sustavu, LED rasvjeta će emitirati informacije o njihovoj poziciji koristeći trodimenzionalne (3D) globalne koordinate ili lokalne 3D koordinatne sheme u odnosu na npr. kut ili rub prostorije [60].

6.3 Tipovi, karakteristike VLP prijemnika i format emitiranog signala

Za primjene gdje je potrebno odrediti samo identitet najbližeg rasvjetnog tijela, moguće je dizajnirati prijemnike koji se temelje na jednostavnim fotodetektorima sa širokim vidnim poljem, nakon čega slijedi odgovarajući sklop za procesiranje signala i izdvajanje identifikacijske informacije. Za određivanje informacije o kutu upada svjetla potreban je senzor slike, koji je općeprisutan na današnjim mobilnim uređajima. Međutim, osnovni problem tih relativno jeftinih kamera (senzora slike) ugrađenih u današnje mobilne uređaje je relativno mala brzina snimanja slikovnih okvira (frame-ova). Zbog toga, ovi senzori slike mogu primiti signale relativno niskih frekvencija, a to pak zahtijeva sporu signalizaciju i može prouzrokovati treperenje svjetla. Jedno od predloženih rješenja za ovaj problem je i iskorištavanje osobine blende (kao valnog modulatora) kod kamera u mobilnim uređajima, čija interakcija sa moduliranom svjetlošću rezultira uzorcima u slici, koji se mogu iskoristiti za identificiranje emitiranog signala. Odnosno izbjegavanje zasićenja CMOS senzora (blooming effect) i iskorištavanje efekta očitavanja piksela kamere red po red (rolling shutter) [61]. Također, neka od predloženih rješenja se odnose i na poduzorkovanje ili na kompenziranje rotacije mobilnog uređaja pomoću senzora kamere radi povećanja brzine prijema [62]. U današnjim VLP/VLC sustavima moguće je postići preciznost određivanja pozicije od svega nekoliko centimetara, korištenjem prednje kamere na mobilnom uređaju i rasporedom rasvjetnih tijela koje emitiraju pozicijske signale sa manjim omjerom visine u odnosu na razmak između lampi. Također, preciznost određivanja pozicije je veća sa upotrebom većeg broja lampi koje emitiraju pozicijske signale, koji dolaze do prednje kamere mobilnog uređaja i čiji kut upada određuje senzor prednje kamere [63]. Pošto, konvencionalne kamere na mobilnim uređajima imaju relativno usko vidno polje FOV (Field Of View), postoji mogućnost da zbog nedovoljne količine upadnog svjetla neće biti moguće realizirati triangulaciju i trilateraciju. Pretpostavlja se da će budući sustavi za precizno pozicioniranje koristiti nove konfiguracije leća sa poljima

fotodetektora, koji imaju nižu rezoluciju od kamera, ali i veći propusni opseg. Neki pak smatraju, da će budući mobilni uređaji imati kamere koje će koristiti i kao konvencionalna kamera i kao uređaj za određivanje kuta upada svjetlosti za pozicioniranje pomoću vidljivog svjetla (VLP).

Radi pojednostavljenja implementacije i smanjenja troškova, potrebno je i da sustav modulacije koji se koristi za pozicijske informacije bude što jednostavniji za generiranje i detekciju signala. Neki prijedlozi navode korištenje on-off (OOK) modulacije ili impulsno pozicijske modulacije u kraćem vremenskom intervalu za svu ili samo za dio svjetlosti koja se prenosi. Pošto je količina podataka potrebna za identifikacijski kod relativno mala, stoga je potreban samo mali dio raspoloživog vremena i propusnog opsega za njegov prijenos. Ukoliko se sustav koristi i za prijenos većih brzina podataka, korištenjem naprednijih formata prijenosa, poput OFDM-a, pozicijske informacije mogu se prenositi između podatkovnih okvira. Ustvari, izbor formata modulacije za potrebe pozicioniranja ne treba ograničavati izbor za druge primjene, sve dok je format cjelokupnog okvira pažljivo specificiran [60], [63].

7. IZAZOVI I MOGUĆNOSTI ZA ŠIRU IMPLEMENTACIJU VLC SUSTAVA

Komuniciranje vidljivom svjetlošću predstavlja formu komuniciranja, koja može dopuniti postojeće sustave komuniciranja temeljene na radijskim frekvencijama i omogućiti mnoge jedinstvene buduće slučajeve i načine korištenja mobilnih bežičnih uređaja. Velika brzina prijenosa podataka u silaznom smjeru u domu ili uredu, te precizno određivanje položaja korisnika u zatvorenim prostorima poput prodajnih mjesta, samo su neka od mogućih primjena ove nove tehnologije. Šira komercijalizacija VLC sustava i komunikacijskih uređaja će ovisiti o razvoju robusnih i učinkovitih inženjerskih rješenja, i ostvarenju strategije povećane komercijalizacije. Ključno svojstvo svjetlećih dioda koje omogućuje komunikaciju vidljivom svjetlošću je njihova osjetljivost na amplitudnu modulaciju na frekvencijama dovoljno visokim za postizanje znatnih podatkovnih brzina prijenosa, dok to istodobno ne utječe na njihovu primarnu funkciju osvjetljenja. Primarna funkcija osvjetljenja nije narušena jer ljudsko oko ne može razlučiti amplitudnu modulaciju svjetlosti sve dok je frekvencija modulacije iznad tzv. granice treperenja.

Svjetlosne diode su već postale općeprisutne u našem svakodnevnom životu. Koriste se u uređajima potrošačke elektronike poput TV ekrana, računalnih monitora, ekrana mobilnih telefona i tableta, reklamnih panoa, digitalnih displeja itd.. LED rasvjetna tijela se sve više penetriraju u opće tržište rasvjete, kako u poslovnom, tako i u privatnom segmentu. Ova rasvjetna tijela imaju mnoge prednosti u odnosu na konkurentne tehnologije rasvjete kao naprimjer: energetska učinkovitost, dugotrajnost, mogućnosti emitiranja raznih boja svjetla, i faktora vezanih uz zaštitu okoline. Zbog toga se predviđa da će ova rasvjetna tijela dominirati tržištem rasvjete do kraja ovog desetljeća.

Vidljiva svjetlost ima određene prednosti nad tradicionalnim radijskim frekvencijama. U prvom redu to je nelicencirano frekvencijsko područje koje je dosta opterećeno u radijskom dijelu spektra. Lakše implementiranje sigurnosti zbog činjenice da svjetlost ne prolazi kroz zidove, a što omogućava također i ponovnu upotrebu istog frekventnog spektra u različitim prostorijama. Relativno jeftini predajnici (svjetlosne diode) i prijemnici (fotodiode). Pošto se frekvencije vidljive svjetlosti nalaze u tzv. sub-mikronskom valnom području, moguće je precizno određivanje smjera dolaska svjetlosnih zraka sa skupinama fotodioda, kao što su senzori slike, koji omogućuju precizno određivanje položaja mobilnih uređaja u zatvorenim prostorima.

Sa druge strane, VLC ima određene nedostatke u usporedbi sa tradicionalnim radijskim komunikacijama. Glavni nedostatak je da podatkovna brzina prijenosa naglo opada sa povećanjem udaljenosti. Pošto je VLC nekoherentna forma komunikacije, gubici pri prijenosu su obrnuto proporcionalni udaljenosti na četvrti stupanj, dok je taj gubitak kod radijskih komunikacija na drugi stupanj. Brzine prijenosa podataka su znatno smanjene, uslijed tzv. zrnatog šuma, ukoliko je prijemnik izložen izravnom sunčevom svjetlu, tako da ova činjenica ograničava VLC komunikaciju uglavnom na upotrebu u zatvorenim prostorima. Nedostatak predstavlja i to što rasvjeta mora uvijek biti upaljena ukoliko želimo komunicirati i to na maksimumu, ukoliko želimo komunicirati maksimalnim brzinama, dok kod prijenosa na manjim brzinama rasvjeta može biti i prigušena. Zbog ovih razloga VLC neće nikada moći u potpunosti zamijeniti tradicionalne RF komunikacije, jer će uvijek postojati potreba za prijenosom na većim udaljenostima, na otvorenom, izvan vidnog polja. Ipak, VLC i RF komunikacije su komplementarne tehnologije koje skupa

moгу pružiti mnoge nove dobitke i prednosti u performansama bežičnih mreža. Primjena VLC tehnologije može biti podijeljena u dvije kategorije koje se definiraju kao slučajevi korištenja velikih brzina prijenosa podataka i slučajevi korištenja malih brzina prijenosa [46], [64].

7.1 Realizacija VLC sustava

Velika prednost sustava za komuniciranje vidljivom svjetlošću je ta, da je energija koja se koristi za komunikaciju faktički besplatna, zbog potrebe osvjetljenja unutarnjih prostorija. Odnosno, nije potrebna dodatna energija za prijenos informacija, uz minimalno dodatno napajanje potrebno za upravljanje sklopovima za komunikaciju. Ulaz VLC tehnologije na tržište preko LED rasvjetnih tijela kroz njihovu malu potrošnju, utire put ka široj implementaciji u budućim pametnim domovima i gradovima. Rješenja temeljena na binarnoj modulaciji su učinkovitija u pogledu potrošnje, dok su ona rješenja temeljena na višerazinskoj modulaciji učinkovitija u pogledu propusnosti tj. propusnog opsega. Naime, kod dvorazinske modulacije informacija se šalje za vrijeme perioda svakog simbola kroz promjenu dvije razine intenziteta svjetlosti, te se ona više preferira u odnosu na višerazinsku. Dok kod višerazinske modulacije, informacija se šalje modificiranjem vrijednosti intenziteta u kontinuiranom rasponu ili korištenjem skupa unaprijed definiranih vrijednosti.

Glavno ograničenje shema binarne modulacije predstavlja mali propusni opseg bijelih LED. Ove binarne sheme modulacije dosada su uglavnom korištene u žičnim komunikacijama, a njihova je glavna prednost jednostavna i jeftina implementacija. Sa druge strane, pošto sustavi sa višerazinskom modulacijom omogućuju bolje iskorištenje dostupnog propusnog opsega, sustavi temeljeni na ovim shemama modulacije omogućuju veće podatkovne brzine prijenosa. Sa tehničkog gledišta, najvažnija svojstva prototipa novog VLC sustava su mogućnost reprogramiranja, rekonfiguriranja, i fleksibilnost.

Sa ekonomskog gledišta, glavne osobine su reduciranje troškova i vremena izlaska na tržište. Za ovu vrstu implementacije preferira se rekonfigurabilan hardver i rješenja bazirana na mikroprocesorima ili uređajima sa programabilnom logikom. Ovo je moguće realizirati i u kraćem vremenu uz nedostatak teže ostvarivosti u pogledu ograničenja troškova. Drugačiji pristup realizaciji prototipa VLC sustava je korištenje softverskih tehnika baziranih na konceptu softverski definiranog radija SDR (Software Defined Radio). U ovom konceptu funkcije procesiranja signala se izvode u procesoru opće namjene GPP (General Purpose Processor), dok se radio frekvencija (RF) i pretvorba signala analogno-digitalna (A/D) i digitalno-analogna (D/A) izvode u programabilnom sklopovlju. Činjenica da se hardverski problemi pretvaraju u softverske probleme, omogućuje postizanje rješenja koja zahtijevaju manje specijaliziranog osoblja i imaju viši stupanj modularnosti i fleksibilnosti u odnosu na prethodno spomenuta hardverska rješenja [65].

7.2 Perspektiva buduće ugradnje VLC sustava u rasvjetna tijela

Od svog nastanka u kasnim 1960-im godinama, LED tehnologija je doživjela veliki napredak u pogledu učinkovitosti, opcija boja svjetlosti, nivoa izlazne snage, te smanjenje cijena uređaja. Ovaj trend opisan je vrstom "Moore-ovog" zakona, koji je u LED industriji poznatiji kao "Haitz-ov" zakon. Pozitivni ulazni signali na predajniku moduliraju intenzitet emitiranog vala, pošto kontrola faze optičkog nositelja nije moguća sa nekoherentnim svjetlosnim izvorima kao što su LED. Sa druge strane, na prijemniku, koristi se fotodetektor, kako bi pretvorio intenzitet ulaznog svjetla u izlazni strujni signal, linearno sa brojem primljenih fotona.

Svjetlosne diode namijenjene za rasvjetu imaju nelinearnu strujno-naponsku (I-V) karakteristiku. Pad napona u aktivnom području svjetlosne diode je konstantan, dok se izlaznom svjetlošću upravlja pomoću struje koja prolazi kroz aktivno područje, obično reda nekoliko stotina miliampera. Veliko aktivno područje, obično reda nekoliko kvadratnih milimetara, rezultira niskopropusnim odzivom sa graničnom frekvencijom reda 20 MHz. Ali ipak, omjeri signal-šum (SNR) su dostatni da omoguće propusni opseg modulacije od približno 200 MHz. Za organske LED (OLED), ovaj niskopropusni odziv je još više limitiran, jer su njihove granične frekvencije trenutno dva do tri reda veličine ispod razine neorganskih LED. Broj fotona koje emitira svjetlosna dioda nije točno proporcionalan broju elektrona injektiranih u njeno aktivno područje. Ovaj nelinearni odziv u nekim slučajevima može znatno degradirati dinamičko područje korisnih upravljačkih struja. Ovo je naročito relevantno u višeraznim i OFDM shemama modulacije, gdje npr. predistorzija signala može pomoći pri uklanjanju efekata nelinearnosti.

Glavni izazov u združenim rasvjetno/komunikacijskim sustavima je postavljen striktnim zahtjevom za učinkovitim radom u pogledu potrošnje i uglavnom se odnosi na upravljačku elektroniku za svjetlosne diode. Zapravo je upravljačka elektronika ta koja određuje ostvarive podatkovne brzine u združenim komercijalnim rasvjetno/komunikacijskim sustavima. Glavni zadatak upravljačkog sklopa je pretvorba električne energije u jednosmjernu (DC) upravljačku struju za LED, na prihvatljivoj razini energetske učinkovitosti i sa potrebnim faktorom snage, istodobno zadovoljavajući propise o električnoj sigurnosti pri komercijalno prihvatljivim troškovima materijala.

Općenito, za VLC sustave moguće je razmotriti dva različita pristupa. Najprikladniji pristup je iskorištavanje mogućnosti postojećih upravljačkih krugova u rasvjetnim tijelima. Naime, kontrolne petlje u LED upravljačkim sklopovima omogućuju modulacijski propusni opseg, koji se može proširiti do nekoliko stotina kiloherca u slučaju sustava kontroliranih amplitudnom modulacijom AM (Amplitude Modulation) ili impulsno-širinskom modulacijom PWM (Pulse Wide Modulation). Na taj način, LED rasvjetno tijelo se pretvara u komunikacijski uređaj bez bilo kakve dodatne elektronike. Jedini nedostatak ovog pristupa je da su podatkovne brzine reda nekoliko stotina kilobita u sekundi. Drugi pristup, korišten u naprednijim VLC sustavima, fokusiran je na moduliranje svjetlosti sa frekvencijama višim od nekoliko desetina megaherca. Stoga je uz kontrolu rasvjete, nužno redizajnirati postojeću upravljačku elektroniku, kako bi odgovorili na ove komunikacijske zahtjeve, ispunjavajući zahtjeve u pogledu ekonomičnosti i niske cijene sustava. Te su stoga, potrebna daljnja istraživanja u ovom smjeru, kako bi se dizajnirali upravljački sklopovi i upravljački programi koji će raditi na velikim brzinama komunikacije i sa visokom učinkovitosti u pogledu potrošnje [44], [65].

7.2.1 Budući izazovi za širu komercijalizaciju VLC tehnologije

Jedan od glavnih izazova za širu komercijalizaciju ove tehnologije proizlazi iz činjenice, da dvije velike globalne grane industrije moraju usko surađivati, a to su proizvođači LED rasvjetnih tijela i proizvođači mobilnih uređaja. Prvi moraju izvršiti neke preinake na budućem dizajniranju rasvjetnih tijela, dok drugi moraju u svoje buduće mobilne uređaje ugrađivati prijemnike za ovakav vid komunikacije u vidu brzih prijemnih fotodioda. Zbog toga što, gotovo svi mobilni uređaji na tržištu imaju ugrađene kamere, sami proizvođači mobilnih uređaja mogu unilateralno napraviti prvi iskorak u širem prihvaćanju ove tehnologije. Za slučaj korištenja VLC tehnologije u svrhu određivanja precizne pozicije u zatvorenom prostoru nije potrebno ugrađivati nikakve dodatne komponente, jer je za tu svrhu potrebna jedino već ugrađena kamera mobilnog uređaja. Još neki primjeri korištenja VLC tehnologije, koju bi proizvođači mobilnih uređaja mogli samostalno

pokrenuti su uparivanje mobilnih uređaja, prijenos datoteka između uređaja, i bežično spajanje mobilnih uređaja. Također, otvaraju se mnoga nova područja primjene, kao povezivanje pametnih telefona sa predmetima u stanu ili npr. igračkama za djecu putem VLC-a, te stvaranje interaktivne odjeće, obuće i stvari sposobnih za međusobnu komunikaciju.

U sva tri ova slučaja, pored LED predajnika, jedina dogradnja je dodavanje mobilnom uređaju brze prijemne fotodiode, što bi onda moglo nagnati i proizvođače LED rasvjetnih tijela da počnu proizvoditi rasvjetna tijela sa unaprijed omogućenom VLC tehnologijom. Vrlo važan aspekt koji se očituje u potencijalnim scenarijima primjene je mreža niske cijene u pozadini VLC tehnologije. Za postojeća zatvorena okruženja, bilo bi pogodno iskoristiti postojeće naponske vodiče do rasvjete u prostoriji kao infrastrukturu, u cilju implementacije i reduciranja troškova. Također, obećavajućim se čini i razmatranje instaliranja plastičnih optičkih vlakana POF (Plastic Optical Fibres), jer ona omogućuju unaprijeđenu sigurnost podataka. VLC tehnologija može biti kombinirana sa optičkom prijenosnom mrežom, postavljajući na taj način put za buduća sveoptička mrežna rješenja [45], [65], [66].

7.3 VLC u kontekstu budućih heterogenih mreža

Bežične heterogene mreže (HetNet-s) se uvelike smatraju budućnošću mobilnih komunikacija, jer se sve manje i manje ćelije koriste za rasterećenje i lokaliziranje prometa. Dakako, jednostavan koncept reduciranja veličine ćelije je povećao spektralnu učinkovitost sustava za faktor 2700 tijekom proteklih 50 godina. Još manje VLC ato-ćelije logičan dalji napredak, koji će omogućiti dalje povećanje kapaciteta sustava od 1000 puta, prema nekim predviđanjima. U ovom kontekstu komuniciranja vidljivom svjetlošću javlja se i termin "Li-Fi" (Light-Fidelity), koji je definiran kao podskup VLC, koji predstavlja punu mrežnu dvosmjernu komunikaciju velike brzine.

Kao budući trend, nazire se rasterećenje prometa sa makro baznih stanica (BS), putem Wi-Fi i Li-Fi tehnologija, jer je jedan od najvažnijih aspekata mobilnih operatera prostorna spektralna učinkovitost ASE (Area Spectral Efficiency), odnosno koje mobilne podatkovne brzine se mogu ponuditi za pojedinačnog korisnika. U tom kontekstu, predviđa se da će Li-Fi omogućiti poboljšanje prostorne spektralne učinkovitosti za bar jedan red veličine. Štoviše, iskorištavanje više spektara vidljive svjetlosti omogućuje povećanje gustoće podataka, pošto ćelije koje se fizički preklapaju mogu emitirati na različitim valnim duljinama i povećati dostupni propusni opseg po jedinici površine pokrivanja, te tako i prostornu spektralnu učinkovitost. Također, u cilju postizanja većih brzina prijenosa, izvjesno je da u VLC sustavima treba biti primijenjen i pristup višestrukog paralelnog odašiljanja i prijema MIMO (Multiple Input Multiple Output), sa višestrukim istodobnim transmisijama prema korisnicima.

Pošto je VLC link neograničen u smislu da korisnik nije ovisan o pojedinoj pristupnoj točki AP (Access Point), i može primati iste informacije od drugih optičkih pristupnih točaka, te se na taj način osigurava mobilnost i primo-predaja odnosno prijelaz korisnika između optičkih ćelija. Štoviše, svaki komunikacijski link može opsluživati više različitih korisničkih uređaja. Ovo mnogi smatraju budućnošću Li-Fi primjena u unutrašnjim prostorima, koje sada pružaju podatkovnu povezivost u scenarijima povezivanja od točke do točke (point-to-point) [64].

7.3.1 Li-Fi (Light-Fidelity) kao podskup (dio) VLC-a

Pošto je VLC smišljen kao podatkovna komunikacija od točke do točke, naprosto kao zamjena za kabele, to je rezultiralo i njegovom standardizacijom putem standarda IEEE 802.15.7 [42], koji se trenutno proširuje kako bi se njime obuhvatio i koncept Li-Fi-ja. U kontrastu sa VLC-om Li-Fi

opisuje cjelokupan sustav bežičnog komuniciranja. Ovo uključuje i bidirekcionalnu (dvosmjernu) komunikaciju za više korisnika istodobno, odnosno od jedne točke ka više točaka (point-to-multipoint) i od više točaka ka jednoj točki (multipoint-to-point). Koncept Li-Fi-ja također uključuje više bežičnih pristupnih točaka koje formiraju bežičnu mrežu malih optičkih ato-čelija sa primopredajom bez prekida korisničke komunikacije. To implicira da Li-Fi omogućuje punu mobilnost korisnika, te tako formira novi sloj unutar postojećih heterogenih bežičnih mreža.

Ključ za buduće šire prihvaćanje i komercijalizaciju Li-Fi-ja u primjenama poput: Interneta stvari IoT (Internet-of-Things), čelijskih sustava pete generacije (5G) i poslije njih, svjetla kao usluge u rasvjeti, komunikaciji između automobila, odbrani i sigurnosti, podvodnim komunikacijama i bežičnom povezivanju u podatkovnim centrima, je dostupnost tehnologije minijaturnih primopredajnika niske cijene i niske potrošnje energije. Zbog svega navedenog nužan je razvoj integriranih krugova za specifičnu primjenu ASIC (Application Specific Integrated Circuits) [67]. Nadalje, će u budućnosti podatci za laptose, tablete, pametne telefone, kao i stacionarne pristupne uređaje se moći prenositi putem svjetlosti u prostoriji ili na otvorenom prostoru primjenom Li-Fi tehnologije.

Istraživači već razvijaju LED tehnologiju na razini "mikrona" koja se može paliti i gasiti (on-off) oko tisuću puta brže u odnosu na velika LED rasvjetna tijela. One će omogućiti veće prijenosne brzine, te će zauzimati manje prostora, a ušteda prostora će omogućiti grupiranje više LED tijela na manju površinu, što će dalje ubrzati komunikacijski kanal. Naime, tisuću LED tijela veličine mikrona može stati na površinu koja je potrebna za smještaj jednog LED tijela veličine jednog kvadratnog milimetra. Tako da jedno polje LED tijela površine kvadratnog milimetra, može prenijeti milijun puta više informacija odjednom u odnosu na jedno LED tijelo površine kvadratnog milimetra. Ovi podatci nam govore da Li-Fi može imati uspješnu budućnost.

Li-Fi konzorcij pretpostavlja da je moguće postići i teoretske brzine iznad 10 Gb/s, što bi na primjer omogućavalo skidanje filma visoke razlučivosti u svega 30 sekundi. Stoga možemo reći da je Li-Fi nova i rastuća tehnologija, koja bi mogla predstavljati u budućnosti ozbiljnog konkurenta za razne druge tehnologije širokopolasnog Internetskog pristupa koje se razvijaju, kao i za one već postojeće. Pošto svjetlost predstavlja glavni izvor transmisije za ovu tehnologiju, stoga je ona veoma napredna i primjenjiva u raznim područjima na kojima se ne može primijeniti Wi-Fi i druge tehnologije. A može se koristiti i zajedno sa postojećim RF tehnologijama pristupa u okviru heterogenih mreža. Stoga se buduće primjene tehnologije komuniciranja vidljivom svjetlošću mogu predvidjeti, unaprijediti i proširiti na različita polja kao edukacijsko, medicinsko, transportno, industrijsko i razna druga polja i područja [45], [64], [74].

7.3.2 Integracija i interoperabilnost VLC-a i Wi-Fi-ja

Kako bismo objedinili performanse sustava sa garantiranom kvalitetom usluge QoS (Quality of Service) za sve povezane korisnike u mreži, moguće je implementirati novi heterogeni sustav bežičnog povezivanja, objedinjavanjem VLC-a i Wi-Fi-ja. Ova integracija omogućuje korištenje najboljih odlika obje tehnologije komunikacije. U prvom redu, pošto koriste različite dijelove EM spektra (optički i radijski), između njih nema interferencije, te je moguće iskorištavanje združene propusnosti obje tehnologije. Nadalje, korisnici u svim dijelovima ove heterogene mreže sa povećanim mogućnostima i dosegom mogu koristiti prednosti povećane propusnosti i kvalitete usluge. Također, oba komunikacijska sustava profitiraju kroz ovakav objedinjen pristup, Wi-Fi kroz reduciranje natjecanja za pristup, smanjenim spektralnim gubicima, i rasterećenju RF spektra, a VLC kroz RF pokrivanje neosvijetljenih površina (dead spots) [67].

Ispravno dizajnirana i osmišljena heterogena bežična RF-optička mreža (HetNet) učinkovito iskorištava sve svoje elemente. Svaki link u mreži je iskorišten najrelevantnije i najpodesnije za primjereni zadatak. Kao što su optička vlakna i kabeli najprikladniji za funkciju povezivanja sa jezgrenom mrežom velike brzine, a RF komunikacija je podesna za pristupne točke sa dobrim pokrivanjem, tako je VLC najpogodnija za velike podatkovne brzine, te kao sigurno sučelje između bazne stanice i mobilne stanice. Međutim, takva veza nije uvijek potrebna. Većinu vremena, mobilni uređaj jednostavno miruje (ne vrši komunikaciju), čekajući na dolazni prijenos podataka ili na zahtjev za prijenosom od strane korisnika. Kako bi ovi zahtjevi bili uspješno realizirani potrebna je stalna povezanost. Takva povezivost može se osigurati putem postojeće dobro uspostavljene povezanosti putem radijskih valova. Veliko opterećenje prijenosa podataka velike brzine može onda biti alocirano na VLC. Ukoliko, uspostavljanje veze putem vidljive svjetlosti trenutno nije moguće ili ne postoji na danoj lokaciji, mobilni uređaj može biti opslužen preko radijske pristupne točke, dok se promjenom lokacije ne ukaže mogućnost povezivanja putem vidljivog svjetla [64].

Hibridna LiFi/WiFi mreža se sastoji od primopredajnika za dvosmjernu komunikaciju i za Li-Fi i za Wi-Fi veze, i također od centralne jedinice CU (Central Unit) koja integrira ove dvije mreže. Svi korisnici u hibridnoj mreži su opremljeni sa radijskom (RF) antenom i fotodiodom (PD) za prijem obje vrste signala, radijskog i optičkog. Centralna jedinica vrši nadzor mreže u redovnim kratkim periodima i prima povratnu vezu o stanju kanala CSI (Channel State Information) od korisnika za Li-Fi i Wi-Fi veze. Na temelju toga, svaki korisnik je asociran (pridružen) na odgovarajuću pristupnu točku AP (Access Point) upravljaju od strane CU, i određeno je alociranje resursa RA (1) (Resource Allocation) za korisnike povezane na sve pristupne točke. Ovakav hibridni sustav nudi znatna poboljšanja u pogledu kapaciteta, robusnosti, sigurnosti i pouzdanosti što je vrlo važna metrika u masivnom rastu Interneta u smislu broja povezanih uređaja i količine prenesenog podatkovnog prometa. Internet stvari (IoT) će biti jedan od glavnih razloga (zahtjeva) ovakvog rasta [67].

7.3.3 Rješenja za interoperabilnost heterogenih sustava

Mnogi istraživači predlažu razna rješenja za interoperabilan rad ovih heterogenih mreža, a ta rješenja namijenjena su zadovoljenju određenih potreba pristupa i otklanjanju nedostataka pojedinačnih tehnologija. Tako naprimjer, istraživači u [67] i [68] predlažu dinamičku raspodjelu opterećenja (load balancing) između Wi-Fi-ja i Li-Fi-ja, na način, da statični korisnici budu opsluženi putem Li-Fi-ja u silaznom smjeru (downlink), dok bi pokretni korisnici bili opsluženi preko Wi-Fi-ja u downlinku zbog jednostavnijeg handover-a mobilnih korisnika između AP-ova [68]. Iskorištavanje agregiranog kapaciteta Wi-Fi-ja i VLC-a u silaznom smjeru komunikacije, te radijske pristupne točke za uplink i usmjeravanje prometa sa statičkim odredišnim IP adresama korisnika predloženo je u [69]. Prednost interoperabilnog djelovanja heterogenih RF-optičkih mreža za rješavanje problema prekida veze u silaznom smjeru preko VLC-a, uslijed blokiranja izravne vidljivosti između prijemnika i predajnika, te prebacivanja komunikacije u downlinku na Wi-Fi (vertical handover), do ponovnog uspostavljanja silazne optičke veze razmatrana je u [70]. Korištenje Wi-Fi AP za uplink i kao upravljajućeg/koordinirajućeg uređaja za upravljanje određenim brojem dodijeljenih VLC lampi za downlink, koje čine osnovni uslužni skup BSS (Basic Service Set) predloženo je u [71]. Također, je predložen tzv. lokalni roaming mobilnih korisnika između VLC lampi unutar istog BSS-a nazvan DLDM (Downlink Domain Multiplexing), gdje korisnik u slučaju promjene pozicije između dvije lampe prima oznake (beacon-e) sa druge lampe, nakon čega, šalje tu informaciju upravljajućoj bežičnoj radijskoj

pristupnoj točki u stvarnom vremenu, koja onda usmjerava nastavak trenutne sesije (veze) putem downlinka nove VLC lampe. U slučaju prelaska mobilnog korisnika iz jednog BSS-a u drugi BSS sa pripadajućim VLC lampama unutar istog proširenog uslužnog skupa ESS (Extended Service Set), upravljajuće Wi-Fi AP razmjenjuju informacije o trenutnoj korisničkoj sesiji, tako da mobilni korisnik ima praktički neprekinutu vezu pri prelasku između BSS-ova. Naime, korisnik nastavlja započetu sesiju (prijem informacija) putem optimalne VLC downlink lampe u susjednom BSS-u nakon prelaska iz jednog u drugi BSS, u okviru istog ESS-a.

Isti autori predlažu i dva scenarija pridruživanja mobilnih korisnika na upravljajuću radijsku AP, integrirani i separirani. Kod integriranog scenarija, VLC lampe permanentno šalju beacon-e, koje prima prednja kamera na mobilnom uređaju, te se zatim informacija o rednom broju optimalne lampe za bežični optički downlink šalje zajedno sa standardnim zahtjevom za pridruživanje na Wi-Fi AP. U slučaju odvojenog (separiranog) scenarija, mobilni korisnik prvo šalje standardni zahtjev za pridruživanje putem RF na upravljajuću Wi-Fi pristupnu točku, koja ga zatim obavještava o mogućnosti VLC downlinka, te traži potvrdu sposobnosti od korisnika za prijem putem VLC-a. Nakon toga, ukoliko je korisnik sposoban za bežični optički prijem putem vidljivog svjetla, upravljajuća radijska AP naređuje VLC lampama da počnu emitirati beacon-e. Koje, onda prima prednja kamera na mobilnom uređaju korisnika, te šalje na Wi-Fi AP odvojeni zahtjev za VLC asocijaciju i prijem u silaznom smjeru putem optimalne VLC lampe. Prednost integrirane asocijacije je učinkovitost, ali po cijenu kompleksnije procedure, dok je prednost odvojene asocijacije korisnika standardna procedura pridruživanja, ali po cijenu odvojene procedure za VLC pridruživanje [71].

7.3.4 VLC u kontekstu pametne rasvjete sa brigom o ljudskom zdravlju

Već ranije je spomenuto da VLC tehnologija ne predstavlja nikakvu smetnju i opasnost po ljudsko zdravlje, jer koristi vidljivi dio EM spektra za prijenos informacija. Pošto u osnovi ove tehnologije leži LED rasvjetno tijelo, čija je primarna zadaća osvjetljavanje određenog područja, važno je spomenuti kako se prilagođavanjem tzv. pametne LED rasvjete može povoljno utjecati na zdravlje ljudi. Dok je istodobno moguće i prenositi informacije, čak i pri smanjenom intenzitetu rasvjete.

Koncept rasvjete prilagođene ljudima HCL (Human Centric Lighting) [72], nastao je nešto ranije početkom ovog stoljeća, kada je otkriveno da pored standardnih receptora boje i razine svjetlosti u ljudskom oku (konusnih i trapezoidnih), postoji i fotoreceptor koji ne doprinosi vidu. Umjesto toga, on utječe na ritmove spavanja i budnosti (dnevne bioritmove) kod ljudi. Tako, prema američkom nacionalnom institutu za opće medicinske znanosti, dnevni bioritmovi su fizičke, mentalne i promjene u ponašanju koje slijede ugrubo 24-satni ciklus, odgovarajući primarno na svjetlo i tamu u okruženju. Fotoreceptor bioritma uključuje retinalne ćelije koje su jako osjetljive na plave nijanse spektra vidljive svjetlosti, koje pak čine znatan dio komponenti sunčeve svjetlosti. Takvi fotoreceptori izravno komuniciraju sa tzv. glavnim satom bioritma ljudskog tijela, koji regulira unutarnje fiziološke funkcije, uključujući i lučenje hormona.

Sa saznanjem da ljudsko tijelo reagira na svjetlost na biološkoj razini počelo istraživanje o utjecaju rasvjete na raspoloženje, produktivnost, percepciju, oštrinu vida, te na bioritam kod ljudi. Zbog mogućnosti promjene (regulacije) boje i razine osvjetljenja kod LED rasvjete u stvarnom vremenu, omogućeni su novi proizvodi i sustavi fokusirani na biološke učinke koje rasvjeta može prouzročiti, a u što se također može inkorporirati i komuniciranje putem vidljivog svjetla (VLC).

Podesiva rasvjeta može se implementirati te pozitivno utjecati na raspoloženje i zdravlje ljudi gotovo u svim prostorima gdje ljudi rade ili borave. Naprimjer, u putničkim zrakoplovima tijekom dužih prekoceanskih letova, LED rasvjetna tijela u putničkim kabinama mijenjaju boju sukladno različitim fazama noćnog leta, kao što su tamnije nijanse ljubičaste boje svjetlosti, koje odražavaju boju neba noću. Boja rasvjete u kabini se također mijenja u jače i svjetlije tonove tijekom polijetanja, slijetanja za vrijeme obroka, a također se postepeno pojačava tokom svitanja u skladu sa izlaskom sunca. Također, promjena boje i intenziteta rasvjete implementirana je u nekim učionicama i uredima kako bi se poboljšala koncentracija učenika (hladnija bijela boja) ili povećala produktivnost uposlenih individualnim prilagođavanjem boje i intenziteta osvjetljenja u užem radnom prostoru [72]. Zaključno sa gore spomenutim, VLC kao vid komuniciranja koji je u skladu sa brigom o raspoloženju i zdravlju ljudi, učvršćuje svoju poziciju u budućim sustavima komunikacije.

7.3.5 Istraživačke grupe za VLC

Na kraju bilo bi važno nabrojati neke najznačajnije istraživačke grupe iz oblasti VLC-a u svijetu, a prema [10], [55], [67], [73] to su:

- Keio Sveučilište u Japanu, koje je među prvima u svijetu istraživalo VLC, te je to rezultiralo osnivanjem konzorcija VLCC (VLC Consortium) u novembru 2003 godine, koji je 2014 preimenovan u VLCA (VLC Association), kao i prijedlogom standarda VLC System Standard i Visible Light ID System Standard;
- OMEGA Projekt (european hOME Gigabit Access), omogućavanje kućnim korisnicima gigabitnog bežičnog optičkog pristupa, a čiji je cilj objedinjavanje PLC-a, RFC-a i OWC i razvoj heterogenog komunikacijskog sustava za tzv. dom bez kabela. Osnovan je od strane europske komisije sa 19 partnerskih institucija poput Siemens AG, Fraunhofer Henrich-Hertz Institut, France Telecom, Infineon;
- Sveučilište u Edinburgu, jedno je od prvih u istraživanju VLC-a, jedan je od glavnih EPSRC (UK Engineering and Physical Sciences Research Council) nositelja UPVLC (Ultra-Parallel VLC) projekta, koji je rezultirao razvojem prvog komercijalnog VLC predajnika i prijemnika dovoljno malih dimenzija za komercijalnu ugradnju;
- Sveučilište Oxford, čija se istraživanja najviše baziraju na povećanju brzina podatkovnog prijenosa iskorištavanjem MIMO tehnologije;
- Sveučilište Boston, u sklopu kojeg je 2008 godine osnovan The Smart Lighting Engineering Research Center, fokusira se na istraživanje u oblasti VLC-a, nanofotonike i RF/VLC hibridne metode pristupa;
- Sant'Anna School of Advanced Studies, bavi se istraživanjem VLC veza velike brzine i kombinacije VLC sa plastičnim optičkim vlaknima, te lokalizacijom putem vidljivog svjetla;
- Sveučilište Yeungnam, uglavnom istražuje funkcionalnosti prigušenja svjetla u VLC sustavima, kao i šeme kodiranja za prigušenje svjetla;
- KAIST Sveučilište, najviše se bazira na istraživanje kontrole prigušenja svjetla korištenjem šema modulacije u VLC sustavima;

- Sveučilište Choshun, zajedno sa istraživačkim grupama sa Sveučilišta Northumbria, bavi se istraživanjem prigušenja svjetla u VLC sustavima temeljenog na PWM-u;
- Monash Sveučilište, najprije se fokusiralo na istraživanje bežičnih optičkih sustava temeljenih na OFDM-u, a u posljednje vrijeme sa popularizacijom VLC-a, bave se istraživanjem lokalizacije putem vidljivog svjetla u zatvorenim prostorima i MIMO sustavima.

8. ZAKLJUČAK

Sa sve većim razvojem tehnologije i njenoj primjeni u različite svrhe, bilo svakodnevne privatne ili industrijske, sve više se razmatra da se tehnologija komuniciranja vidljivom svjetlošću implementira za masovniju upotrebu. Pošto se svaka LED rasvjetna žarulja može iskoristiti kao bežična pristupna točka za bežični pristup Internetu ili za prijenos podataka, mnogi istraživači smatraju da nas to vodi ka čišćoj, zelenijoj, sigurnijoj i svjetlijoj budućnosti komuniciranja.

Koncepti VLC-a i Li-Fi kao njegovog dijela, trenutno privlače mnogo pozornosti i interesa iz razloga, jer nude jedinstvenu i učinkovitu alternativu kao i dopunu bežičnom radijskom pristupu. Uz sve veći broj stanovnika na zemlji, kao i sve veći broj uređaja koji pristupaju na Internet, ova tehnologija na jedan način omogućava veće pristupne brzine, a na drugi način vrlo je jeftina u usporedbi sa tradicionalnim bežičnim pristupom. Pošto spektar radijskih valova postaje sve zagušeniji, to čini sve težim dobivanje pouzdanog signala velike brzine. Tako da ova tehnologija pristupa može riješiti probleme kao što su, manjak slobodnog radio-frekvencijskog spektra, kao i pristup Internetu na mjestima gdje tradicionalni način pristupa nije dopušten (zrakoplovi, bolnice).

Kao temeljno predajno tijelo u tehnologiji komuniciranja vidljivom svjetlošću, LED ima mnoge prednosti kao što su, mala potrošnja energije, visoka otpornost na vlagu, malo generiranje topline, manje dimenzije i dulji radni vijek. Pošto se koristi u širokom spektru uređaja i primjena kao npr. od raznih displeja, prometnih znakova i automobila, do raznih drugih tipova osvjetljenja, LED se smatra za glavnog kandidata budućih tehnologija rasvjete. Daljnji razvoj u tehnologiji rasvjete i rasvjetnih tijela u kojem je sve više zastupljena LED tehnologija i uređaji temeljeni na njoj, otvaraju mogućnost iskorištavanja spektra vidljive svjetlosti za bežično komuniciranje.

Komuniciranje vidljivom svjetlošću u budućnosti može predstavljati vid komuniciranja, koji će dopuniti klasične komunikacijske sustave temeljene na radijskim valovima, odnosno radijskim frekvencijama. Stoga, VLC tehnologija može poboljšati performanse bežičnih mreža i pristupa na svakom mjestu gdje se koriste veze za kraće udaljenosti komuniciranja, poput domova ili ureda i omogućiti pristup Internetu u silaznom smjeru, ili prijenos podataka između uređaja i pregled (streaming) videa.

Ova tehnologija, može također omogućiti i određivanje pozicije ili lokalizaciju visoke preciznosti za pristupajuće mobilne uređaje u zatvorenim prostorima. Pošto ne zahtjeva ugradnju dodatnog hardvera u mobilne uređaje, te omogućuje funkcionalnost koja je usuglašena sa visokim zahtjevima postavljenim od strane isporučioaca opreme, to bi možda moglo predstavljati vrlo važan prvi korak u daljnjoj komercijalizaciji ove pristupne tehnologije.

Energetski učinkovito prigušenje svjetlosti i kontrola intenziteta boja svjetlosti, ostaju kao jedan od ključnih izazova u zadovoljenju potrebe za učinkovitom podatkovnom modulacijom velike brzine, uz istodobno zadovoljenje potrebe ljudi za rasvjetom. Budući razvoj i istraživanje ove tehnologije pristupa trebalo bi biti usmjereno ka daljnjoj optimizaciji sustava, hibridnoj integraciji sa drugim žičnim i bežičnim tehnologijama, i upotrebi višestrukog pristupa sa prostornom podjelom, kako bi se omogućio paralelni rad više bežičnih optičkih linkova. Jako važan aspekt je i međunarodno usuglašeno gledište u pogledu standardizacije u cilju stvaranja sustava neophodnog za buduće uvođenje ove tehnologije. Poput VLC tehnologije, i tehnologija pozicioniranja putem spektra vidljivog svjetla VLP, takođe predstavlja veoma zanimljivu novu tehnologiju sa mnogim

budućim primjenama. Sve ovo zahtijeva buduću interdisciplinarnu suradnju i istraživanja u mnogim inače razdvojenim poljima optike, teorije modulacije, i lokalizacije.

POPIS KRATICA

AC	alternating current
ACK	acknowledges
ACO-OFDM	asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing
A/D	analog-to-digital
AM	amplitude modulation
AOA	angle-of-arrival
AP	access point
APD	avalanche photodiode
ARQ	automatic repeat request
ASE	area spectral efficiency
ASIC	application specific integrated circuit
BS	base station
BSS	basic service set
CAP (1)	contention access period
CAP	carrier less amplitude and phase modulation
CC	convolutional code
CCT	correlated color temperature
CIM	color intensity modulation
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
COM	communication
CRI	color rendering index
CSK	color shift keying
CSI	channel state information
CT	color temperature
CU	central unit
CVD	color visibility dimming
D/A	digital-to-analog
DC	direct current

DCO-OFDM	direct current optical OFDM
DD	direct detection
DLDM	downlink domain multiplexing
DME	device management entity
DVD	digital versatile disc
EM	electromagnetic
EPRSC	UK Engineering and Physical Sciences Research Council
ESS	extended service set
EUI	extended unique identifier
FDM	frequency division multiplexing
FEC	forward error correction
FOV	field-of-view
FTTD	fiber-to-the-device
FTTH	fiber-to-the-home
GB	gigabyte
Gb/s	gigabits-per-second
GCM	generalized color modulation
GPP	general purpose processor
GSSK	generalized space shift keying
GTS	guaranteed time slot
HCL	human centric lighting
HetNet	heterogeneous network
ICI	inter-cell interference
ID	identifier
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
IFS	inter-frame space
IM	intensity modulation
IoT	internet-of-things
IP	internet protocol
IR	infrared

ISC	inverse source coding
ISI	inter simbol interference
KAIST	Korea Advanced Institute of Science and Technology
LAN	local area network
LCD	liquid crystal display
LED	light emitting diode
Li-Fi	light fidelity
LIFS	long inter-frame space
LOS	line-of-sight
LSB	least significant bit
MAC	medium access control
MAN	metropolitan area network
MCPS	medium-access-control common-part sublayer
MCPS-SAP	medium-access-control common-part sublayer - SAP
MFR	medium-access-control footer
MFTP	maximum flickering-time period
MHR	medium-access-control header
μ-LED	micro LED
MLME	medium-access-control link-management entity
MIMO	multiple-input multiple-output
MP3	music player
MPDU	medium-access-control protocol-data unit
MSDU	medium-access-control service-data unit
NLOS	non-line-of-sight
OCP	optical control panel
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing
OLED	organic light emitting diodes
OMEGA	European home gigabit access project
ONT	optical network terminal
OOK	on-off keying

OWC	optical wireless communication
PAN	personal area network
PAM	pulse amplitude modulation
PC	personal computer
PC-LED	phosphor converted LED
PD	photo diode
PD-SAP	physical layer data - SAP
PDSM	pulse dual slope modulation
PHR	physical-layer header
PHY	physical layer
PIB	physical-layer personal-area-network information base
PIN	positive intrinsic negative
PLC	power line communication
PLME	physical-layer management entity
PLME-SAP	physical layer management entity - SAP
PN	positive-negative junction
POF	plastic optical fiber
POTS	plain old telephone service
PPDU	physical-layer data unit
PPM	pulse position modulation
PPMPWM	pulse-position-pulse-width modulation
PSDU	PHY service data unit
PSTN	public switched telephone network
PWM	pulse width modulation
PWM-DMT	pulse width modulation with discrete multi-tone
QoS	quality-of-service
QR	quick response
RA	random access
RA (1)	resource allocation
rc-LED	resonant cavity LED

RF	radio frequency
RFC	radio frequency communication
RGB	red-green-blue
RGBY	red-green-blue-yellow
RIFS	reduced interframe space
RLL	run length limited
RPO-OFDM	reverse polarity OFDM
RS	Reed-Solomon
SAP	service access point
SDR	software defined radio
SHR	synchronization header
SIFS	short inter-frame space
SNR	signal-to-noise ratio
SoC	system-on-chip
SPD	spectral power distribution
SPDU	SSCS protocol data unit
SSCS	service-specific convergence sublayer
THz	terahertz
TV	television
UK	United Kingdom
UOV	underwater operating vehicle
UPVLC	ultra-parallel VLC
USB	universal serial bus
V-I	voltage-current (slope)
VLC	visible light communication
VLCA	VLC association
VLCC	VLC consortium
VLP	visible light positioning
VOOK	variable on-off keying
VPAN	visible-light communication personal area network

VPPM	variable pulse position modulation
WDM	wavelength division multiplexing
Wi-Fi	wireless fidelity
WOP	wireless optical communication
WOPCOM	wireless optical communication
WOPLAN	wireless optical local area network
WOPPAN	wireless optical personal area network
WOPNET	wireless optical network
WQI	wavelength quality indication

LITERATURA (REFERENCE)

- [1] J. Rani, P. Chauhan, R. Tripathi, "Li-Fi (Light Fidelity) - The future technology In Wireless communication," International Journal of Applied Engineering Research, Vol.7, No.11, (2012).
- [2] P. Dixit, K. Lala, "Li-Fi the Latest Technology in Wireless," Department of Electronics and Communication Engineering Raj Kumar Goel Institute of Technology for women, Ghaziabad, India, (2013).
- [3] M. Goyal, D. Saproo, A. Bhagashra, "New Epoch of Wireless Communication: Light Fidelity," International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering Vol. 1, Issue 2, April 2013.
- [4] Harald Haas, "Wireless data from every light bulb," TED Global, Edinburgh, July 2011.
- [5] L. C. Png, K. S. Yeo, "Optical Infrastructure for Visible Light Communication for Public Housing and Commercial Buildings," IEEE ISCC 2013, FESB, Split, Croatia.
- [6] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. de Fornel, P. N. Favennec, "Free-Space Optics Propagation and Communication," ISTE Ltd, 2006.
- [7] C. De Cusatis, "Handbook of Fiber Optic Data Communication," Academic Press, 2002.
- [8] R. Wood, "Next-Generation Network Services," Cisco Press, 2006.
- [9] E. Schubert, "Light-Emitting Diodes," Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2006.
- [10] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art," IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol. 17, No. 3, Third Quarter 2015.
- [11] L. C. Png, L. Xiao, K. S. Yeo, T. S. Wong, Y. L. Guan, "MIMO-Diversity Switching Techniques for Digital Transmission in Visible Light Communication," IEEE ISCC 2013, FESB Split, Croatia.
- [12] L. B. Zeng, D. C. O'Brien, H. L. Minh, G. E. Faulkner, K. W. Lee, D. W. Jung, Y. J. Oh, E. T. Won, "High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white-LED lighting," IEEE Journal in Selected Areas in Communications, vol. 27, no. 9, December 2009.
- [13] J. M. Kahn, J. R. Barry, "Wireless infrared communications," Proc. IEEE, vol. 85, no. 2, February 1997.
- [14] K. D. Langer, "Implementation of a 84 mbit/s visible-light link based on discrete-multitone modulation and LED room lighting," in Proc. 7th Int. Symp. CSNDSP, Newcastle, U.K., 2010.
- [15] O. Bouchet, "Visible-light communication system enabling 73 mb/s data streaming," in Proc. IEEE GC Wkshps, Miami, FL, USA, 2010.
- [16] S. Rajagopal, R. D. Roberts, S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support," IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 3, , March 2012.

- [17] S. He, G. Ren, Z. Zhong, Y. Zhao, "M-ary variable period modulation for indoor visible light communication system," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 7, July 2013.
- [18] Y. Fan, B. Bai, R. Green, "PPMPWM: A new modulation format for wireless optical communications," in *Proc. 7th Int. Symp. CSNDSP*, Newcastle, U.K., 2010.
- [19] S. H. Lee, K. I. Ahn, J. K. Kwon, "Multilevel transmission in dimmable visible light communication systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 20, October 2013.
- [20] M. Oh, "A flicker mitigation modulation scheme for visible light communications," in *Proc. 15th ICACT*, PyeongChang, Korea, 2013.
- [21] W. Popoola, H. Haas, "Demonstration of the merit and limitation of generalised space shift keying for indoor visible light communications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 10, May 2014.
- [22] IEEE 802.15 WPAN Taskgroup 7 (TG7) - "Visible Light Communication," 2014.
- [23] P. Das, B. Y. Kim, Y. Park, K. D. Kim, "Color-independent VLC based on a color space without sending target color information," *Opt. Commun.*, vol. 286, January 2013.
- [24] K. I. Ahn, J. Kwon, "Color intensity modulation for multicolored visible light communications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 24, December 2012.
- [25] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, B. Pricope, "OFDM visible light wireless communication based on white LEDs," in *Proc. IEEE 65th VTC*, Dublin, Ireland, 2007.
- [26] K. D. Langer, "Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs," in *Proc. 13th ICTON*, Stockholm, Sweden, 2011.
- [27] J. Armstrong, B. J. C. Schmidt, "Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 5, May 2008.
- [28] D. Tsonev, S. Sinanovic, H. Haas, "Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for optical wireless," in *Proc. IEEE 75th VTC*, Yokohama, Japan, 2012.
- [29] F. M. Wu, "3.22-gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation," in *Proc. OFC/NFOEC*, Anaheim, CA, USA, 2013.
- [30] K. Lee, H. Park, "Modulations for visible light communications with dimming control," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 16, August 2011.
- [31] S. Sarhan, C. Richardson, "A Matter of Light, Part 4—PWM Dimming," *Electronic Engineering (EE) Times*, 2012. (<http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4012236/A-matter-of-lightPart-4--PWM-dimming>)
- [32] G. Ntogari, T. Kamalakis, J. Walewski, T. Sphicopoulos, "Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible light communications based on discrete multitone," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 1, June 2011.
- [33] H. Elgala, T. D. C. Little, "Reverse Polarity Optical-OFDM (RPO-OFDM): Dimming compatible OFDM for gigabit VLC links," *Opt. Exp.*, vol. 21, no. 20, October 2013.
- [34] Q. Wang, Z. Wang, L. Dai, J. Quan, "Dimmable Visible Light Communications Based on Multilayer ACO-OFDM," *IEEE Photonics Journal*, Vol. 8, No. 3, June 2016.

- [35] Y. Yang, Z. Zeng, J. Cheng, C. Guo, "An Enhanced DCO-OFDM Scheme for Dimming Control in Visible Light Communication Systems," *IEEE Photonics Journal*, Vol. 8, No. 3, June 2016.
- [36] J. K. Kwon, "Inverse source coding for dimming in visible light communications using NRZ-OOK on reliable links," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 19, October 2010.
- [37] J. Kim, H. Park, "A coding scheme for visible light communication with wide dimming range," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 5, March 2014.
- [38] J. Y. Wang, J. B. Wang, M. Chen, X. Song, "Dimming scheme analysis for pulse amplitude modulated visible light communications," in *Proc. Int. Conf. WCSP*, Hangzhou, China, 2013.
- [39] T. A. Tran, D. C. O'Brien, "Performance metrics for Multi-Input Multi-Output (MIMO) visible light communications," in *Proc. IWOW Commun.*, Pisa, Italy, 2012.
- [40] A. Azhar, T. Tran, D. O'Brien, "A gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 2, January 2013.
- [41] A. H. Azhar, T. Tuan-Anh, D. O'Brien, "Demonstration of high-speed data transmission using mimo-ofdm visible light communications," in *Proc. IEEE GC Wkshps*, Miami, FL, USA, 2010.
- [42] IEEE Standards Association, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," *IEEE Computer Society*, September 2011.
- [43] J. Gancarz, H. Elgala, T. D. C. Little, Boston University, "Impact of Lighting Requirements on VLC Systems," *IEEE Communications Magazine*, December 2013.
- [44] A. Tsiatmas, C. P. M. J. Baggen, F. M. J. Willems, J. P. M. G. Linnartz, J. W. M. Bergmans, "An Illumination Perspective on Visible Light Communications," *IEEE Communications Magazine*, July 2014.
- [45] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz, F. Lassak, F. Hartlieb, C. Kottke, V. Jungnickel, K. D. Langer, Heinrich Hertz Institute, "High-Speed Visible Light Communication Systems," *IEEE Communications Magazine*, December 2013.
- [46] A. Jovicic, J. Li, T. Richardson, Qualcomm Research, "Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market," *IEEE Communications Magazine*, December 2013.
- [47] T. Yamazato, I. Takai, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, M. Andoh, T. Harada, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, "Image-Sensor-Based Visible Light Communication for Automotive Applications," *IEEE Communications Magazine*, July 2014.
- [48] A. Mirvakili, V. Koomson, "High efficiency LED driver design for concurrent data transmission and PWM dimming control for indoor visible light communication," in *Proc. IEEE Photon. Soc. Summer Topical Meet. Ser.*, Seattle, WA, USA, 2012.
- [49] J. Tsao, M. Coltrin, M. H. Crawford, J. Simmons, "Solid-state lighting: An integrated human factors, technology, and economic perspective," *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 7, July 2010.

- [50] T. Komine, "Visible Light Wireless Communications and its Fundamental Study," Ph.D. Dissertation, Keio University - Japan, 2005.
- [51] J. Grubor, S. Randel, K. D. Langer, J. W. Walewski, "Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting," *J. Lightw. Technol.*, vol. 26, no. 24, December 2008.
- [52] M. Biagi, T. Borogovac, T. Little, "Adaptive receiver for indoor visible light communications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 23, December 2013.
- [53] W. Popoola, E. Poves, H. Haas, "Error performance of generalized space shift keying for indoor visible light communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 5, May 2013.
- [54] H. Haas, "PureLiFi Attocell," (www.purelifi.com)
- [55] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, P. Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, fourth quarter 2015.
- [56] Z. Wang, C. Yu, W. D. Zhong, J. Chen, W. Chen, "Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems," *Opt. Exp.*, vol. 20, no. 4, February 2012.
- [57] A. Sewaiwar, P. P. Han, Y. H. Chung, "3-Gbit/s Indoor Visible Light Communications Using Optical Diversity Schemes," *IEEE Photonics Journal* Vol. 7, No. 6, December 2015.
- [58] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, N. Chi, "8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC System Employing High-Order CAP Modulation and Hybrid Post Equalizer," *IEEE Photonics Journal* Vol. 7, No. 6, December 2015.
- [59] A. T. Hussein, J. M. H. Elmirghani, "10 Gbps Mobile Visible Light Communication System Employing Angle Diversity, Imaging Receivers, and Relay Nodes," *J. Opt. Commun. and Netw.*, Vol. 7, No. 8, August 2015.
- [60] J. Armstrong, Y. A. Sekercioglu, A. Neild, Monash University, "Visible Light Positioning: A Roadmap for International Standardization", *IEEE Communications Magazine*, December 2013.
- [61] C. W. Chow, C. Y. Chen, S. H. Chen, "Enhancement of Signal Performance in LED Visible Light Communications Using Mobile Phone Camera," *IEEE Photonics Journal*, Vol. 7, No. 5, October 2015.
- [62] W. A. Cahyadi, Y. H. Kim, Y. H. Chung, C. J. Ahn, "Mobile Phone Camera-Based Indoor Visible Light Communications With Rotation Compensation," *IEEE Photonics Journal*, Vol. 8, No. 2, April 2016.
- [63] M. H. Bergen, A. Arafa, X. Jin, R. Klukas, J. F. Holzman, "Characteristics of Angular Precision and Dilution of Precision for Optical Wireless Positioning," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 20, October 2015.
- [64] H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv, H. Haas, "VLC: Beyond Point-to-Point Communication," *IEEE Communications Magazine*, July 2014.

- [65] C. G. Gavrinca, J. Baranda, P. Henarejos, "Rapid Prototyping of Standard-Compliant Visible Light Communications System," IEEE Communications Magazine, July 2014.
- [66] G. Corbellini, K. Aksit, S. Schmid, S. Mangold, T. R. Gross, "Connecting Networks of Toys and Smartphones with Visible Light Communication," IEEE Communications Magazine, July 2014.
- [67] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, C. Chen, "What is LiFi?," Journal of Lightwave Technology, Vol. 34, No. 6, March 2016.
- [68] Y. Wang, H. Haas, "Dynamic Load Balancing With Handover in Hybrid Li-Fi and Wi-Fi Networks," Journal of Lightwave Technology, Vol. 33, No. 22, November 2015.
- [69] S. Shao, A. Khreishah, M. Ayyash, M. B. Rahaim, H. Elgala, V. Jungnickel, D. Schulz, T. D. C. Little, J. Hilt, R. Freund, "Design and Analysis of a Visible-Light-Communication Enhanced WiFi System," J. Opt. Comm. and Netw., Vol. 7, No. 10, October 2015.
- [70] F. Wang, Z. Wang, C. Qian, L. Dai, Z. Yang, "Efficient Vertical Handover Scheme for Heterogeneous VLC-RF Systems," J. Opt. Comm. and Netw., Vol. 7, No. 12, December 2015.
- [71] F. Duvnjak, J. Ozegovic, A. Kristic, University of Split - Croatia, "Heterogeneous Wi-Fi and VLC (RF-Optical) Wireless Access Architecture," 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split – Bol, Croatia, September 2015.
- [72] Y. H. Hiebert, "The Health Benefits of Human-Centric Lighting Using LEDs," IEEE The Institute, (IEEE Members News Source), August 2016.
- [73] Visible Light Communications Consortium (VLCC), (www.vlcc.net).
- [74] Li-Fi Consortium, (www.lificonsortium.org).

