

MODULACIONE TEHNIKE U VLC-u ZA MOGUĆNOST PRIMENE U SAOBRAĆAJU

Aleksandra Kostić-Ljubisavljević¹, Branka Mikavica¹, Momir Manović¹, Jovana Perišić²

¹Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,

a.kostic@sf.bg.ac.rs, b.mikavica@sf.bg.ac.rs, m.manovic@sf.bg.ac.rs

²Univerzitet u Beogradu - Institut za molekularnu genetiku i genetičko inženjerstvo,
jovana.perisic@imgge.bg.ac.rs

Rezime: Ubrzani razvoj informaciono-komunikacionih tehnologija dovodi do sve većih zahteva u pogledu dostupnih resursa, posebno u domenu propusnog opsega. Savremene bežične tehnologije, koje se dominantno oslanjaju na radiofrekventni (RF) spektar, suočavaju se sa njegovim ograničenjima i nedostatkom slobodnog spektra neophodnog za dalji rast i razvoj komunikacionih sistema. VLC (Visible Light Communication) predstavlja perspektivnu tehnologiju koja omogućava prenos podataka u okviru vidljivog dela elektromagnetnog spektra, pri čemu je proces komunikacije integrisan sa funkcijom osvetljenja. Upotreba vidljivog spektra otvara nove kanale prenosa, ali istovremeno donosi i izazove koji proizlaze iz složenosti medijuma, kao što su izraženije slabljenje signala i veća zavisnost od spoljašnjih uslova. Radi obezbeđivanja efikasnog prenosa podataka i prilagođavanja specifičnostima prenosnog medijuma, od ključnog značaja je izbor adekvatne modulacione tehnike. U ovom radu razmatrani su različiti tipovi modulacija koje se primenjuju u VLC sistemima, počevši od jednostavnijih rešenja do složenijih pristupa. Pored toga, analizirane su i mogućnosti primene ove tehnologije u saobraćajnim sistemima, sa posebnim osvrtom na njenu ulogu u unapređenju bezbednosti i efikasnosti saobraćaja.

Ključne reči: VLC, modulacija, V2V, pametni gradovi

1. Uvod

U eri digitalne transformacije, moderna bežična komunikacija suočava se sa sve većim zahtevima, kako po pitanju brzine prenosa i kašnjenja, tako i u pogledu bezbednosti, energetske efikasnosti i ukupnog kapaciteta mreža.

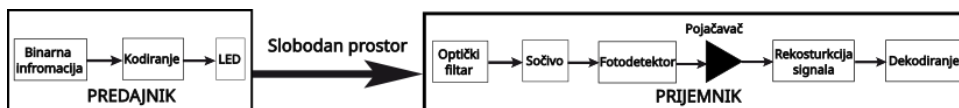
Peta generacija komunikacionih sistema teži da odgovori na ove zahteve obezbeđujući veoma mala kašnjenja, visok nivo bezbednosti, izuzetno nisku potrošnju energije i kapacitet za simultano povezivanje ogromnog broja uređaja. Ove karakteristike nisu samo poželjne, već postaju nužnost u uslovima eksponencijalnog rasta broja povezanih uređaja i bežičnih komunikacija koje zahtevaju velike brzine prenosa i stabilne veze. Međutim, RF (Radio Frequency) spektar, koji je do sada bio osnova bežičnih komunikacija, pokazuje znake zasićenja i ograničenosti. Upravo zbog ovih izazova,

inženjerska zajednica se sve više okreće alternativnim rešenjima, a jedno od najperspektivnijih jeste VLC (*Visible Light Communication*) [1]. Ovaj koncept, prvi put predložen od Aleksandra Grahama Bela još 1880. godine, danas koristi prednosti modernih LED (*Light Emitting Diode*) izvora koji istovremeno osvetljavaju prostor i prenose informacije. Standardizacija VLC tehnologije započeta je IEEE 802.15.7-2011 standardom, dok su 2018. proširene specifikacije uključivale i optičke komunikacije putem kamera (*Optical Camera Communication, OCC*), što je naročito značajno za IoT (*Internet of Things*) i V2X (*Vehicle to Everything*) komunikaciju [2]. VLC tehnologija koristi vidljivi deo elektromagnetnog spektra, u opsegu talasnih dužina od 380 do 750 nm, što omogućava istovremeni prenos podataka i osvetljenje, uz širok i neometan spektar za komunikaciju. Frekvencije koje se koriste su bezbedne po zdravlje ljudi, ne izazivaju elektromagnetne smetnje u osetljivim elektronskim uređajima, ne zahtevaju licenciranje i energetski su efikasne zahvaljujući malim i pouzdanim LED diodama [3].

Nakon uvodnih razmatranja, u drugom delu rada dat je opšti model VLC arhitektura. Treći deo rada se bazira na različitim tipovima modulacija koji se koriste u VLC sistemima, sa njihovim prednostima i manama. Četvrti deo rada razmatra primenu VLC tehnologije. U petom delu data su zaključna razmatranja.

2. Arhitektura VLC sistema

Sistem komunikacije putem vidljive svetlosti sastoji se od tri osnovne komponente: VLC predajnika, VLC prijemnika i VLC kanala. Osnovni princip rada ove tehnologije podrazumeva da se bela svetlost, koju emituju LED diode na strani predajnika moduliše, a zatim prenosi kao optički signal kroz bežični optički kanal. Na prijemnoj strani, modifikovana svetlost se detektuje pomoću fotodetektora, koji konvertuje svetlosni signal u električni. Najčešće korišćena tip modulacije i demodulacije jeste modulacija intenziteta sa direktnom detekcijom (*Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD*). Ovaj način prenosa informacija omogućava jednostavno i efikasno kodiranje i dekodiranje, kao i implementaciju. Pojednostavljeni blok dijagram celog sistema, prikazan na Slici 1[4].



Slika 1. Blok šema VLC sistema

VLC predajnik ima dvostruku ulogu, pored emitovanja podataka neophodno je da pruža i adekvatno osvetljenje. Ove uloge postavljaju dodatne zahteve predajniku, jer je neophodno obezbediti dovoljan nivo snage na predaji kako bi informacija bila preneti bez grešaka, ali je takođe potrebno implementirati i funkcionalnost zatamnjenja. Kako bi se izbeglo neželjeno treperenje pri nižim intenzitetima svetlosti, neophodno je modulisati izvor frekvencijama iznad 200 Hz. IEEE standard 802.15.7 definiše frekvencije modulacije od nekoliko MHz do nekoliko stotina MHz, koje u odgovarajućim uslovima mogu obezbediti protoke i do 100 Mb/s. U praksi se koriste četiri tipa LED dioda: PC LED (*Phosphor-Converted*), organske (*Organic Light Emitting Diodes, OLED*),

višebojne (*Red-Green-Blue Light Emitting Diodes*, RGB LED) i mikro-LED diode (μ -LED).

Prijemni deo VLC sistema podrazumeva detekciju svetlosnog signala putem fotodiode, koje pretvaraju primljeni svetlosni signal u električni. Fotodiode mogu biti samostalni uređaji ili deo većih senzora slike, kao što su kamere koje zbog ograničene brzine prenosa, nisu pogodne za komunikacione sisteme visoke brzine. Nasuprot tome, klasične fotodiode omogućavaju prenos podataka brzinama i do 100 Mb/s. Najčešće korišćene vrste fotodioda u VLC sistemima su lavinske fotodiode (*Avalanche Photodiode*, APD), PIN fotodiode, MSM (*Metal Semiconductor Metal*) fotodiode i fototranzistori. PIN i APD diode su posebno popularne zbog dobrih karakteristika detekcije koje odgovaraju zahtevima VLC aplikacija. Svetlosni signal koji dospe do fotodiode konvertuje se u električnu struju, koja se zatim pojačava i prosleđuje ekvilajzeru [4].

VLC kanal, kao treća komponenta sistema, obuhvata optički medijum kroz koji se signal prostire. Zbog svoje elektromagnetne prirode, intenzitet svetlosti u vidljivom delu spektra opada proporcionalno kvadratu rastojanja. Međutim, za razliku od RF talasa, vidljiva svetlost je značajno podložnija apsorpciji i rasipanju, što dovodi do bržeg smanjenja snage u praktičnim uslovima. Pri projektovanju VLC sistema, neophodno je uzeti u obzir razliku između unutrašnjih i spoljašnjih okruženja. U zatvorenim prostorima može doći do refleksija od zidova i objekata što uzrokuje intersimbolsku interferenciju, kao i do pojave ko-kanalne interferencije u prisustvu više korisnika. U spoljašnjim uslovima dodatni faktori koji mogu uticati na kvalitet veze uključuju prirodne izvore svetlosti, veštačka osvetljenja, vremenske uslove poput kiše ili magle, kao i kretanje korisnika i gustina saobraćaja.

3. Modulacione tehnike u VLC-u

U kontekstu VLC sistema, specifičnosti prenosa putem vidljive svetlosti nameću posebne zahteve na oblikovanje modulišućih signala. Za razliku od tradicionalnih RF komunikacija, gde su signali nosioci kompleksni i mogu imati negativne vrednosti, u VLC sistemima signal mora biti realan i unipolaran, što direktno utiče na izbor i dizajn modulacionih tehnika. Modulacioni formati primenjeni u ovim sistemima zahtevaju pažljivo projektovanje kako bi se postigla optimalna ravnoteža između ključnih parametara: brzine prenosa podataka, energetske efikasnosti i neophodnog očuvanja osnovne funkcije osvetljenja. Imajući u vidu ove specifične zahteve, modulacione tehnike u VLC sistemima mogu se klasifikovati u tri osnovne kategorije:

1. Direktna modulacija - OOK (*On-Off Keying*), PAM (*Pulse Amplitude Modulation*), PWM (*Pulse Width Modulation*) i PPM (*Pulse Position Modulation*). Ove tehnike su jednostavne za implementaciju i pogodne za manje brzine prenosa, ali su osetljive na intersimbolsku interferenciju i zahtevaju dodatne metode ekvilizacije.

2. Modulacije sa više nosilaca - OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) i njegove varijante: DCO-OFDM (*Direct Current-biased Optical-OFDM*), ACO-OFDM (*Asymmetrically Clipped Optical-OFDM*), PAM-DMT (*Pulse Amplitude Modulation – Discrete MultiTone*), Flip-OFDM, U-OFDM (*Unipolar-OFDM*), omogućavaju visok kapacitet i efikasno iskorišćenje propusnog opsega, uz određene zahteve u pogledu kompleksnosti implementacije i PARP (*Peak-to-Average Power Ratio*) kontrole.

3. Specijalizovane tehnike - obuhvataju hibridne pristupe, kodirane šeme, kombinuju različite strategije u cilju poboljšanja efikasnosti i robusnosti prenosa.

3.1. Direktna modulacija

U savremenim VLC sistemima, modulacioni postupci u osnovnom opsegu zauzimaju centralno mesto kao osnovne tehnike prenosa podataka. Među najvažnijim i najčešće primenjivanim modulacionim šemama su OOK, PAM, PWM i PPM. Ove tehnike su posebno prilagođene principu IM/DD, koji podrazumeva da se informacija prenosi modulacijom intenziteta svetlosti, dok je prijemni deo zasnovan na direktnoj detekciji prijemnog signala pomoću fotodetektora. Zbog jednostavnosti realizacije i energetske efikasnosti, smatraju se idealnim rešenjem za VLC sisteme koji ciljaju na prenos podataka manjih protoka.

Jedan od najjednostavnijih i ujedno najpopularnijih modulacionih formata u VLC sistemima je OOK. Brzina prenosa podataka u OOK sistemima značajno zavisi od kvaliteta fotodetektora. Sa klasičnim PIN fotodiodama moguće je dostići brzine do 125 Mb/s, dok primena APD omogućava povećanje brzine prenosa do oko 230 Mb/s. Dalji razvoj koristi napredne metode obrade signala, kao i primenu veštačkih neuronskih mreža (*Artificial Neural Networks*, ANN) kao adaptivnih ekvilajzera, što omogućava dostizanje brzina do 614 Mb/s. Ovi napreci značajno doprinose povećanju propusnog opsega i poboljšanju otpornosti na šumove i smetnje [1].

Druga značajna tehnika modulacije je PWM, koja osim prenosa podataka omogućava i preciznu kontrolu osvetljenja. Kod PWM-a, širina impulsnog signala varira u zavisnosti od željenog nivoa zatamnjenja, što omogućava dinamičko upravljanje intenzitetom svetlosti bez promene spektra emitovane svetlosti. Pored svoje efikasnosti, PWM se često kombinuje sa DMT (*Discrete Multitone Modulation*), što znatno poboljšava spektralnu efikasnost sistema i omogućava veće brzine prenosa uz održavanje kvaliteta osvetljenja. DMT razlaže dostupni frekvencijski opseg na veliki broj usko raspoređenih podnosioca, pri čemu se na svakom od njih prenosi deo podataka, što omogućava bolju otpornost na šum i smetnje. Ova sinergija čini PWM izuzetno pogodnim za primenu u modernim LED sistemima koji integrišu osvetljenje i komunikaciju.

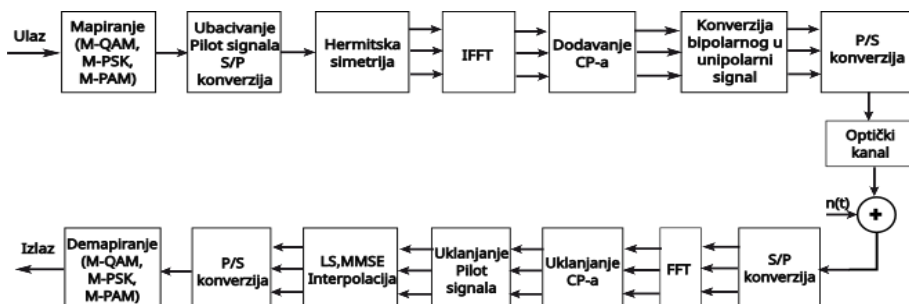
Tehnika PPM kodira podatke pomoću položaja svetlosnog impulsa unutar vremenskog okvira, što omogućava jednostavnu implementaciju i otpornost na šum. Klasični PPM ima ograničenu spektralnu efikasnost, pa su razvijene napredne varijante, kao što su OPPM (*Overlapping PPM*), MPPM (*Multipulse PPM*), DPPM (*Differential PPM*), EPPM (*Expurgated PPM*) i MEPPM (*Multilevel EPPM*). Ove modifikacije omogućavaju efikasniju upotrebu dostupnog spektra, poboljšanu podršku za zatamnjenje i smanjenje neželjenog treperenja svetlosti, što je od velike važnosti za udobnost korisnika. VPPM (*Variable Pulse Position Modulation*) predstavlja posebno značajnu tehniku, jer kombinuje principe PPM-a i PWM-a, čime se obezbeđuje visok nivo preciznosti i prilagodljivosti u simultanom prenosu podataka i regulaciji osvetljenja [1].

Međutim, uprkos njihovim prednostima, ovi formati imaju inherentna ograničenja, naročito kada se primenjuju u kanalima sa izraženom disperzijom svetlosnog signala. Disperzija u optičkom kanalu dovodi do pojave intersimbolske interferencije, koja uzrokuje preklapanje susednih impulsa i dovodi do narušavanja pouzdanosti detekcije podataka, povećavajući verovatnoću grešaka u prenosu. Da bi se uspešno

prevazišla ova otežavajuća okolnost i održala visoka pouzdanost sistema, neophodno je ugraditi napredne tehnike digitalne obrade signala. Među njima su DFE (*Decision Feedback Equalization*), MLSD (*Maximum Likelihood Sequence Detection*) i LFFE (*Linear feed-forward equalization*), koje omogućavaju efikasno smanjenje efekata intersimbolske interferencije i optimizuju performanse sistema.

3.2. Modulacione tehnike sa više nosilaca

U cilju postizanja visokih brzina prenosa podataka uz istovremeno smanjenje složenosti implementacije, u VLC sistemima su uvedene napredne modulacione tehnike koje koriste više nosilaca poput OFDM-a. Najznačajnija osobina OFDM-a ogleda se u njegovoj sposobnosti da kanale sa složenom frekvencijskom zavisnošću transformiše u skup jednostavnijih podkanala. Time se omogućava efikasna i jednostavna frekvencijska ekvilizacija, budući da se izobličenja kanala na svakom podkanalu mogu lako korigovati. Ova karakteristika čini OFDM posebno pogodnim za prenos podataka kroz kanale sa *multipath* efektom i nejednakim slabljenjem različitih frekvencija. Zbog ovih karakteristika, OFDM je postao veoma popularan, jer omogućava visok protok podataka, otpornost na frekvencijsku interferenciju, efikasnu borbu protiv intersimbolske interferencije, kao i efikasno korišćenje spektra [1]. Još jedna važna prednost OFDM-a je podrška višekorisničkoj komunikaciji, gde se svakom korisniku može dodeliti određeni podnosioci. Ovo omogućava jednostavan pristup kanalu, što nije lako postići sa drugim modulacionim šemama poput OOK, PPM ili M-PAM.



Slika 2. Blok šema DCO-OFDM modulacije i demodulacije

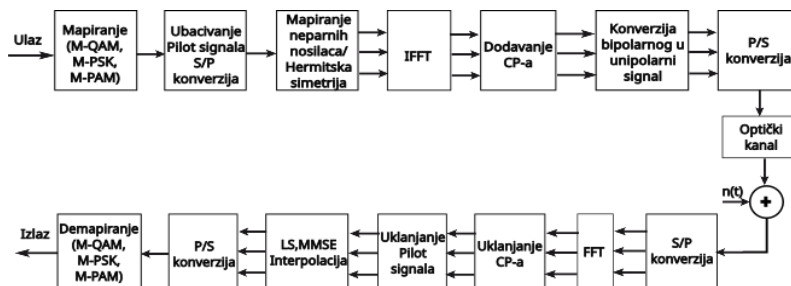
Na Slici 2 prikazan je konvencionalni DCO-OFDM sistem, koji predstavlja jednu od najranijih i najvažnijih varijanti optičkog OFDM-a. Ulazni tok digitalnih podataka najpre se kodira u simbole pomoću modulacionih formata kao što su M-PSK, M-QAM i M-PAM, gde M označava red konstelacije i zavisi od zahteva prenosa i kvaliteta veze. Da bi se obezbedila pouzdana komunikacija, u tok se ubacuju pilot simboli prema “*comb-type*” rasporedu, koji omogućava preciznu procenu i praćenje karakteristika optičkog kanala. Nakon serijsko-paralelne konverzije i IFFT transformacije, simboli se prevode u vremenski domen. Dodavanjem DC *bias* komponente bipolarni signal postaje unipolarni i spreman za optički prenos putem LED predajnika.

Nakon toga, simboli se pomoću serijsko-paralelnog konvertera pretvaraju u paralelni tok, što omogućava slanje više tokova podataka manjeg protoka na različite podnosioce. Primenom IFFT-a simboli prelaze iz frekvencijskog u vremenski domen i

formiraju realan bipolarni signal. Pošto optički predajnici mogu emitovati samo pozitivnu svetlost, dodaje se DC *bias* kako bi se signal pomerio u nenegativnu oblast i postao unipolarnan. Ovim procesom sistem omogućava efikasno i pouzdano prenošenje digitalnih podataka u optičkim OFDM komunikacionim sistemima.

ACO-OFDM predstavlja jednu od naprednijih metoda za generisanje unipolarnog signala u optičkoj OFDM komunikaciji, posebno dizajniran da prevaziđe značajnu manu DCO-OFDM sistema, a to je energetska neefikasnost nastala usled potrebe za dodavanjem DC *bias*-a. Za razliku od DCO-OFDM, gde se signal bipolarne prirode "pomera" dodavanjem konstantnog DC napona da bi se postigao pozitivan signal, ACO-OFDM postiže unipolarnost drugačijim pristupom selektivnom modulacijom samo neparnih podnosioca, dok se parni podnosioci postavljaju na nulu. Ova selektivna modulacija, u kombinaciji sa Hermitskom simetrijom, omogućava da izlazni signal IFFT transformacije bude realan, tj. da nema imaginarnih komponenti. Hermitska simetrija postavlja frekvencijske komponente tako da su simetrične u kompleksnoj ravni, što u vremenskoj oblasti rezultira asimetričnim oblikom signala – signal je organizovan tako da levi i desni deo talasnog oblika imaju suprotan predznak ili oglednu strukturu. Ovaj oblik je potreban da bi signal pravilno prenosio informacije i mogao se efikasno demodulisati u sistemu, istovremeno zadržavajući svoj realni karakter.

Na Slici 3 prikazana je šema procesa procene kanala u ACO-OFDM sistemu zasnovanom na IFFT-u sa Hermitskom simetrijom. Ulazni simboli se modulišu na neparnim podnosiocima, dok su parni postavljeni na nulu, čime se smanjuje broj efektivno korišćenih podnosilaca. Zbog Hermitske simetrije, od ukupnog broja N , samo četvrtina prenosi informaciju, dok su ostali kompleksni konjugati iskorišćenih neparnih podnosilaca. Time se smanjuje spektralna efikasnost u odnosu na DCO-OFDM, ali se eliminiše potreba za DC *bias*-om, čime se štedi energija. Nakon IFFT-a, signal je realan, ali bipolarnan, pa se primenjuje ciklički prefiks i *hard clipping*, pri čemu se prenose samo pozitivne vrednosti. Zbog asimetrične prirode signala ne dolazi do gubitka informacija. *Clipping* šum nastaje odbacivanjem negativnih komponenti, ali se ne preklapa sa korisnim signalom jer se projektuje na parne podnosiocce [5].



Slika 3. Blok šema ACO-OFDM modulacije i demodulacije

PAM-DMT je modulacioni princip koji predstavlja poboljšanu verziju ACO-OFDM sistema. Dok ACO-OFDM koristi samo neparne podnosiocce za prenos podataka, a parne postavlja na nulu, PAM-DMT moduliše imaginarne delove svih dostupnih nosioca, dok su realni delovi isključeni. Ovo omogućava da se iskoriste svi podnosioci za prenos podataka, čime se značajno povećava spektralna efikasnost sistema. Kao i kod ACO-OFDM, vremenski signal u PAM-DMT-u poseduje asimetrična svojstva, što znači

da negativni delovi signala mogu biti isečeni bez gubitka informacije, jer za svaki isečeni negativni vrh postoji odgovarajući pozitivan vrh iste apsolutne vrednosti. Ova karakteristika omogućava PAM-DMT-u da, slično ACO-OFDM-u, generiše unipolarni signal bez potrebe za dodatnim DC pomakom, ali sa znatno boljim iskorišćenjem spektra. Na prijemnoj strani, detektuje se samo imaginarni deo podnosilaca, dok se realni deo zanemaruje, što je dovoljno za pouzdano prepoznavanje prenetih podataka [1].

3.3. Hibridne modulacione tehnike

U okviru superpozicionih varijanti optičke OFDM modulacije izdvajaju se sledeći sistemi: eU-OFDM (*Enhanced Unipolar Optical OFDM*), GREENER-OFDM (*Generalized Enhanced Unipolar*), eACO-OFDM (*Enhanced ACO-OFDM*), ePAM-DMT (*Enhanced PAM-DMT*), SEE-OFDM (*Spectrally and Energy-Efficient OFDM*), LACO-OFDM (*Layered ACO-OFDM*) i UOT (*Unipolar Orthogonal Transmission*) [1]. Sve ove varijante imaju za cilj da znatno poboljšaju spektralnu efikasnost u poređenju sa ranijim varijantama optičke OFDM, kao što su ACO-OFDM, PAM-DMT i *Flip-OFDM*. Suštinska metoda u ovim sistemima zasniva se na slojevitom superponiranju višestrukih OFDM talasnih oblika u jednom vremenskom okviru, što dovodi do povećanja spektralne efikasnosti i često je čak i dvostruko veća od one kod prvobitnih sistema.

Prva od unapređenih varijanti je eU-OFDM, koja značajno povećava spektralnu efikasnost superpozicijom više U-OFDM okvira u jedan složeni signal u vremenskom domenu. Princip rada se može predstaviti sledećim načinom: bipolarni OFDM signal se deli na dva dela. Jedan koji sadrži apsolutne vrednosti negativnih uzoraka gde su pozitivni zamenjeni nulama, i drugi koji sadrži pozitivne vrednosti uzoraka gde su negativni zamenjeni nulama, uz dodatak cikličkog prefiksa radi očuvanja kontinuiteta signala. Na prvom nivou dubine, signal se generiše kao u klasičnom U-OFDM sistemu, dok se na višim dubinama dodatni U-OFDM podtokovi superponiraju na postojeći tok podataka. Svaki sledeći tok se replicira određeni broj puta, a amplituda se odgovarajuće skalira kako bi se očuvala ukupna energija signala.

Na prijemnoj strani prvo se demoduliše tok na najnižem nivou dubine, koristeći standardni U-OFDM prijemnik. Pošto više slojeva superponiranih signala može izazvati međusobne smetnje, primenjuje se postupak oduzimanja rekonstruisanog signala sa nižeg nivoa kako bi se uklonile smetnje i omogućila demodulacija sledećeg sloja. Ovaj proces se ponavlja za sve slojeve, čime se postiže zbir spektralnih efikasnosti svih slojeva i povećava ukupna efikasnost sistema.

Povećanjem broja slojeva, spektralna efikasnost eU-OFDM-a može da se približi onoj kod DCO-OFDM-a, mada zbog praktičnih ograničenja kao što su računarska složenost, kašnjenje i memorijski zahtevi, potpuno uklanjanje ove razlike nije moguće. Da bi se dodatno unapredile performanse, razvijena je generalizovana verzija pod nazivom GREENER-OFDM, koja dozvoljava proizvoljne kombinacije slojeva sa različitim veličinama konstelacija i alokacijama snage, što pruža veću fleksibilnost u optimizaciji sistema. GREENER-OFDM sistem pokazuje značajna poboljšanja u odnosu na DCO-OFDM, naročito u pogledu uštede električne i optičke energije, što je potvrđeno simulacijama sa različitim vrstama modulacija (QAM i PAM) i spektralnim efikasnostima. Na nižim spektralnim efikasnostima, GREENER-OFDM čak nadmašuje performanse DCO-OFDM-a sa nižom potrošnjom energije, dok kod viših efikasnosti zadržava značajne uštede energije i manje procenat pogrešnih bitova.

Koncept superpozicije slojeva je proširen i na PAM-DMT sistem u varijanti poznatoj kao ePAM-DMT. Zbog asimetričnih svojstava PAM-DMT signala, moguće je superponirati slojeve tako da međusobne smetnje padaju samo na realni deo signala, dok korisni podatak ostaje u imaginarnoj komponenti, što olakšava njihovo odvajanje na prijemniku. ePAM-DMT pokazuje visoku energetska efikasnost u smislu električnog signala, dok kod optičke energije nešto zaostaje u odnosu na DCO-OFDM. Ovo je ipak kompromis koji omogućava bolje ispunjavanje zahteva za osvetljenje u troškovno efikasnim VLC sistemima [5].

4. Primena VLC-a u saobraćaju

Razvoj informaciono-komunikacionih tehnologija ima ključnu ulogu u transformaciji grada u pametan grad, omogućavajući unapređenje saobraćaja kroz implementaciju inteligentnih transportnih sistema (*Intelligent Transport System*, ITS), kao i razvoj pametne urbane infrastrukture. Suštinski zadatak pametnog grada je korišćenje različitih IoT senzora za prikupljanje podataka i sticanje uvida koji omogućavaju efikasno upravljanje gradskim resursima i uslugama. Na taj način, prikupljeni podaci omogućavaju nesmetano funkcionisanje gradskih sistema. Iako se u mnogim pametnim gradovima široko koristi RF tehnologija, istraživanja pokazuju da RF neće moći u potpunosti da zadovolji buduće zahteve za kvalitetom servisa zbog porasta mobilnih uređaja. Komunikacija vidljivom svetlošću može obezbediti neprekidnu povezanost između ljudi, infrastrukture, transporta, državnih službi, zdravstvenih ustanova i drugih sektora u pametnom gradu [1].

VLC predstavlja najprikladnije rešenje za kontinuiranu pokrivenost grada zahvaljujući mogućnosti istovremene podrške visokim brzinama prenosa podataka i osvetljenju. Ova tehnologija se lako integriše sa drugim sistemima u pametnom gradu, kao što su saobraćajne svetlosne signalizacije, javna rasveta, transportna infrastruktura, instrument tabla u vozilima i informativni displeji. Generalna arhitektura pametnog grada zasnovana na VLC tehnologiji sastoji se iz nekoliko ključnih komunikacionih slojeva koji omogućavaju efikasnu razmenu podataka i kontrolu sistema. U fizičkom sloju, LED diode, pored svoje osnovne funkcije osvetljenja, koriste se za prenos podataka između uređaja, dok posebni senzori prikupljaju informacije u realnom vremenu, na primer o gustini saobraćaja, udaljenosti između vozila ili detekciji opasnih zona i hitnih situacija poput požara ili poziva hitne pomoći. Prikupljeni podaci se zatim distribuiraju kroz komunikacione slojeve sistema, omogućavajući brzu i preciznu reakciju infrastrukture i korisnika.

Kada je reč o primeni VLC-a jedna od ključnih oblasti u kojoj VLC značajno doprinosi jeste bezbednost i efikasnost saobraćaja kroz napredne sisteme za komunikaciju među vozilima i između vozila i saobraćajne infrastrukture. Integracija VLC tehnologije u vozila i saobraćajna svetla omogućava inteligentnu razmenu podataka u realnom vremenu, čime se poboljšava upravljanje saobraćajem, smanjuju gužve i sprečavaju nezgode, što je jedan od najvažnijih zahteva savremenih pametnih gradova [1].

Model V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) komunikacije bazirane na LED diodama u velikoj meri zavisi od razumevanja prostorne geometrije položaja vozila na putu. Ključni parametri su distanca između vozila, kao i međusobna horizontalna rastojanja u istoj i susednim saobraćajnim trakama. Pored ovih linearnih rastojanja, bitan je i ugao između

vozila, koji predstavlja prostorni odnos njihovih položaja u okviru puta i direktno utiče na usmerenost i kvalitet svetlosnog signala koji se prenosi.

U [6] je kroz analitičku studiju pokazano da performanse V2V-VLC sistema zavise od prostornih odnosa i pozicije vozila u toku prenosa signala u dnevnim uslovima, pri čemu su vremenske prilike tretirali uglavnom kao refleksiju signala u NLoS (*Non Line of Sight*) uslovima. Međutim, ta analiza nije obuhvatila detaljan uticaj atmosferskih faktora na VLC kanal. U [7], sprovedeno je eksperimentalno istraživanje koje se bavi uticajem magle na slabljenje svetlosnog signala u slobodnom prostoru. U eksperimentu je korišćeno više predajnika i prijemnika, koji su bili opremljeni specijalnim optičkim pojačivačima, kako bi se smanjili negativni efekti magle i poboljšao kvalitet prenosa svetlosti kroz atmosferu. Međutim, kada je reč o V2V komunikaciji baziranoj na LED svetlima, kao što su zadnja svetla automobila, nije praktično koristiti veliki broj predajnika i prijemnika. Takva konfiguracija uslovljava znatno veću potrošnju električne energije i povećanje složenosti sistema, što nije poželjno za vozila koja treba da budu energetski efikasna i jednostavna za implementaciju. Iako su rezultati tog istraživanja korisni za razumevanje problema slabljenja signala zbog magle, njihova primena u realnim LED V2V sistemima je ograničena zbog praktičnih problema sa složenošću i potrošnjom energije [8].

5. Zaključak

VLC tehnologija integriše funkcionalnost razmene podataka između uređaja sa njihovom osnovnom funkcijom osvetljenja. Komunikacija se ostvaruje u vidljivom delu elektromagnetnog spektra, koji omogućava veće brzine prenosa podataka u poređenju sa RF spektrom, ali istovremeno donosi i dodatne izazove usled složenosti samog medijuma prenosa. S obzirom na izraženu zavisnost performansi od karakteristika medijuma, izbor odgovarajuće modulacije ima ključnu ulogu u ostvarivanju efikasnog prenosa podataka. Tip modulacije se bira u skladu sa zahtevima sistema, propusnim opsegom kanala i kvalitetom prenosnog medijuma, pri čemu se uvek pravi kompromis između brzine prenosa, složenosti implementacije i pouzdanosti komunikacije. U radu je predstavljen pregled najzastupljenijih postupaka modulacije, koji se mogu svrstati u tri osnovne kategorije: IM/DD modulacije, modulacije sa više podnosilaca, i hibridne modulacije. Prva kategorija obuhvata jednostavnije metode namenjene primenama koje zahtevaju niže brzine prenosa i jednostavniju implementaciju, dok preostale dve kategorije omogućavaju ostvarivanje većih propusnih opsega, ali uz povećanu složenost sistem. VLC tehnologija nalazi široku primenu u različitim oblastima, pri čemu je fokus rada usmeren na njen značaj u savremenim saobraćajnim sistemima, sa ciljem unapređenja bezbednosti i efikasnosti u saobraćaju. Prikazani su primeri primene VLC tehnologije u konceptu pametnih gradova, aktuelna istraživanja koja se odnose na njenu upotrebu u oblasti komunikacije između vozila.

Literatura

- [1] S. Vappangi, V. V. Mani, and M. Sellathurai, *Visible Light Communication: A Comprehensive Theory and Applications with MATLAB®*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2021. doi: 10.1201/9781003191537.

- [2] E. Khorov and I. Levitsky, "Current Status and Challenges of Li-Fi: IEEE 802.11bb," *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 35–41, Jun. 2022, doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100104.
- [3] C. He and W. Ali, "Advances in Visible Light Communication," *Photonics*, vol. 10, no. 11, p. 1277, Nov. 2023, doi: 10.3390/photonics10111277.
- [4] R. Al Hasnawi and I. Marghescu, "A Survey of Vehicular VLC Methodologies," *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 598, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24020598.
- [5] F. Hossain and Z. Afroze, "Eliminating the effect of fog attenuation on FSO link by multiple TX/RX system with travelling wave semiconductor optical amplifier," in *2013 2nd International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, Dkaka, Bangladesh: IEEE, Dec. 2013, pp. 267–272. doi: 10.1109/ICAEE.2013.6750345.
- [6] P. Luo, Z. Ghassemloooy, H. L. Minh, E. Bentley, A. Burton, and X. Tang, "Performance analysis of a car-to-car visible light communication system," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 7, p. 1696, Mar. 2015, doi: 10.1364/AO.54.001696.
- [7] M. S. Islim, D. Tsonev, and H. Haas, "A generalized solution to the spectral efficiency loss in unipolar optical OFDM-based systems," in *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London: IEEE, Jun. 2015, pp. 5126–5131. doi: 10.1109/ICC.2015.7249137.
- [8] Y. H. Kim, W. A. Cahyadi, and Y. H. Chung, "Experimental Demonstration of VLC-Based Vehicle-to-Vehicle Communications Under Fog Conditions," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 6, pp. 1–9, Dec. 2015, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2499542.

Abstract: *The rapid development of ICT leads to increasing demands in terms of available resources, especially in the domain of bandwidth. Modern wireless technologies, which predominantly rely on the radio frequency (RF) spectrum, face its limitations and the lack of free spectrum necessary for further growth and development of communication systems. VLC (Visible Light Communication) represents a promising technology that enables data transmission within the visible part of the electromagnetic spectrum, whereby the communication process is integrated with the lighting function. The use of the visible spectrum opens up new transmission channels, but at the same time brings challenges arising from the complexity of the medium, such as more pronounced signal attenuation and greater dependence on external conditions. In order to ensure efficient data transmission and adaptation to the specifics of the transmission medium, the choice of an adequate modulation technique is of key importance. In this paper, different types of modulations applied in VLC systems are discussed, starting from simpler solutions to more complex approaches. In addition, the possibilities of applying this technology in traffic systems were analyzed, with special reference to its role in improving traffic safety and efficiency.*

Keywords: *VLC, modulation, V2V, smart cities*

MODULATION TECHNIQUES IN VLC FOR THE POSSIBILITY OF APPLICATION IN TRAFFIC

Aleksandra Kostić-Ljubisavljević, Branka Mikavica, Momir Manović, Jovana Perišić