

**Dr. sc. Irena Jurdana / Ph. D.**

**Marko Štrlek**

Sveučilište u Rijeci / *University of Rijeka*

Pomorski fakultet u Rijeci /

*Faculty of Maritime Studies Rijeka*

Studentska 2, 51000 Rijeka

**Srećko Kunić, dipl. inž. el. / B. Sc.**

Hrvatska radiotelevizija

Prisavlje 3, 10000 Zagreb

Hrvatska / *Croatia*

**Pregledni članak**

*Review article*

UDK / *UDC*:

654.165

681.7.068

Primljeno / *Received*:

19. ožujka 2013. / *19<sup>th</sup> March 2013*

Odobreno / *Accepted*:

6. svibnja 2013. / *6<sup>th</sup> May 2013*

## **BEŽIČNE OPTIČKE MREŽE – MOBILNE KOMUNIKACIJE UPORABOM VIDLJIVOG SVJETLA**

### ***WIRELESS OPTICAL NETWORKS – MOBILE COMMUNICATIONS BY USING VISIBLE LIGHT***

#### **SAŽETAK**

*Potreba za većim brzinama prijenosa podataka postaje sve izraženija na današnjem informacijskom i komunikacijskom tržištu. S obzirom na zahtjeve korisnika telekomunikacijskih usluga, računalni, informatički i multimedijalni sustavi srednje i velike mobilnosti traže veliku propusnost podataka. Rast u trendovima korištenja multimedijalnih sadržaja na tim sustavima ubrzo će dovesti postojeće telekomunikacijske brzine prijenosa podataka do granica fizičkih mogućnosti. Radiofrekvencijski spektar je ograničen, a broj korisnika u velikom je porastu. Jedna od sve realnijih mogućnosti zamjene radiokomunikacijske veze je bežična optička veza. U članku se opisuju mogućnosti uporabe i tehnologije bežičnih optičkih komunikacijskih sustava četvrte generacije. Prikazana su moguća poboljšanja i rješenja za neke od problema koji se pojavljuju pri uporabi vidljivog svjetla kao medija za prijenos podataka.*

**Ključne riječi:** *bežične optičke mreže, 4G komunikacija, lokalne komunikacijske mreže, komunikacija vidljivim svjetlom*

#### **SUMMARY**

*In nowadays information and communication market, the demands for constantly greater data transmission speeds become more prominent. Considering the requirements of telecommunication services users, computer, IT and multimedia systems of medium and large mobility require large bandwidth. Growth in the trends of multimedia content use in these systems will soon bring existing telecommunication data transmission rates to the limits of physical possibility. Radio-frequency spectrum is limited, and the number of users is increasing significantly. One of more and more realistic possibilities of replacing radio-communication connections is a wireless optical connection. This paper describes the features and the use of the technology of fourth generation wireless optical communication systems. Possible improvements and solutions to some of the problems that occur when using visible light as a medium for data transmission are presented.*

**Key words:** *wireless optical networks, 4G communications, local communication networks, visible light communication*

## 1. UVOD

Bežična optička veza može se koristiti na dvije osnovne razine telekomunikacijske mreže. U gradskoj mreži (engl. MAN – Metropolitan Area Network) koristi se za povezivanje korisnika u topologiji od točke do točke (engl. point to point). To je alternativa povezivanju korisnika svjetlovodnom kabelskom mrežom prema konceptu uvođenja svjetlovodne niti čim bliže krajnjem korisniku (FTTx – Fiber To The x). Drugo područje primjene je korištenje bežičnih optičkih komunikacija u lokalnim mrežama unutar zgrade kao zamjena ili nadopuna postojećoj skupini standarda IEEE 802.11x namijenjenih bežičnim lokalnim mrežama (engl. WLAN – Wireless Local Area Network).

Prijenos optičkog signala bežičnim putem (FSO – Free Space Optics), često se koristi kod mreža topologije od točke do točke. Sam naziv implicira korištenje atmosfere kao medija za prijenos optičkog signala što pruža određene prednosti, ali i ograničenja uvjetovana samom tehnologijom [1]. Ipak, daljnjim razvojem ove tehnologije za očekivati je da će se u skoroj budućnosti poboljšati već postojeći komercijalni sustavi za FSO. Težnja ovoga sustava je integracija s radiokomunikacijskim, odnosno RF (engl. Radio Frequency) sustavima prijenosa podataka u sinergijsku cjelinu koja sadrži kvalitete obje tehnologije i pri tome neutralizira njihove mane.

S druge strane, sve više raste interes za istraživanje i razvoj bežičnog optičkog prijenosa podataka koji bi se koristio u lokalnim bežičnim mrežama. Ova tehnologija, iako konceptijski i temeljno identična FSO-u, najčešće se povezuje s optičkim bežičnim prijenosom (engl. OW – Optical Wireless ili Indoor Optical Wireless). Kombinacija OW i FSO tehnologije objedinjena je pod terminom komunikacija vidljivim svjetlom, odnosno VLC – Visible Light Communication. U ovome će se članku koristiti izraz OW za lokalne bežične optičke mreže, a FSO za mreže od točke do točke za veće udaljenosti. Težnja u razvoju OW-a je korištenje Lambertovog izvora svjetla koje ima dvostruku ulogu, rasvjetu prostorije i odašiljanje moduliranog svjetlosnog signala. Lambertov izvor svjetla emitira jednaku osvjetljenost u svakom smjeru. Mišljenje je autora ovoga rada da će tehnologija bežične optike imati značajnu ulogu u komunikacijskim mrežama četvrte generacije (4G).

## 1 INTRODUCTION

Wireless optical connection can be used in two basic levels of telecommunication network. In MAN (Metropolitan Area Network) it is used for connecting the user in a point-to-point topology. It is an alternative to connecting users via optical cable network according to the concept of introducing an optical fiber as close as possible to the end user (FTTx - Fiber To The x). Another area of application is the use of wireless optical communications in local area networks within buildings as a replacement or supplement to an existing group of standards IEEE 802.11x designed for wireless local area networks (WLAN).

Wireless transmission of optical signals (FSO - Free Space Optics) is often used in point-to-point topology networks. The name implies the use of atmosphere as the medium for optical signal transmission. This gives particular advantages, but also the limitations caused by technology itself [1]. However, with further development of this technology, it is expected that in the near future the existing commercial systems for the FSO will improve. The aim of this system is the integration with radio-communications or RF (Radio Frequency) data transmission systems into a synergistic whole which contains the qualities of both technologies, thereby neutralizing their weaknesses.

On the other hand, there is a growing interest for the research and development of wireless optical data transmission which would be used in local wireless networks. This technology, although conceptually and essentially identical to FSO, is usually associated with Optical Wireless (OW) or Indoor Optical Wireless (IOW) transmission. The combination of OW and FSO technology is unified in the term of Visible Light Communication. In this article, the term OW for local wireless optical networks and FSO for point-to-point networks for longer distances will be used. The tendency in the development of OW is the one of using Lambert light source that has a dual role, lighting a room and transmitting a modulated light signal. Lambert light source emits equal lighting in every direction. The authors of this study opine that wireless optics technology will have an important role in fourth generation communication networks (4G).

It is clear that 4G communication networks will look for high speeds of data transmission, but the very definition of 4G communication

Izvjesno je da će 4G komunikacijske mreže tražiti velike brzine prijenosa podataka, no sama definicija potreba 4G komunikacijskih mreža je subjektivna i ovisi o poslovnim odlukama davatelja usluga krajnjim korisnicima. Unatoč tome, izvjesno je da će osnovna potražnja 4G komunikacijskih sustava biti proširena širokopojasna mobilna veza. Bežična optika može pružati velike brzine prijenosa [2], no implementacija 4G komunikacija svakako će zahtijevati sinergijsku kombinaciju i heterogenost postojećih i novih tehnologija bežičnog prijenosa podataka, npr. hibridni RF/OW sustavi [3]. 4G predstavlja četvrtu generaciju komunikacijskih tehnologija širokopojasnog pristupa. Uz poboljšanja u samoj tehnologiji prijenosa, značajne su i promjene u sučeljavanju ove tehnologije s krajnjim korisnikom. Propusnost 4G sustava iznosi od 3 do 5 Mbit/s, s brzinama od 500 Mbit/s u odlaznom (*uplink*) te 1 Gbit/s u dolaznom smjeru (*downlink*). Frekvencijski pojas 4G mreža je od 2 do 8 GHz.

Radiofrekvencijski spektar definiran je unutar pojasa elektromagnetskog zračenja od 3 kHz do 300 GHz. U počecima radiokomunikacija taj je spektar bio razmjerno velik, pogotovo što su neki dijelovi spektra bili teže iskoristivi od drugih. Razvojem tehnologije polako se omogućavalo iskorištavanje sve većeg dijela spektra. Povećanjem tehnoloških mogućnosti povećavala se i primjena, a time se polako sve više iskorištavao RF spektar. Upravo je ta iskoristivost spektra jedan od faktora u korist bežičnoj optici. Korištenje vidljivog spektra elektromagnetskog zračenja također može zamijeniti RF tehnologiju na lokacijama poput zrakoplova ili u okolini osjetljive elektroničke opreme, gdje je ona prethodno bila zabranjena iz sigurnosnih razloga.

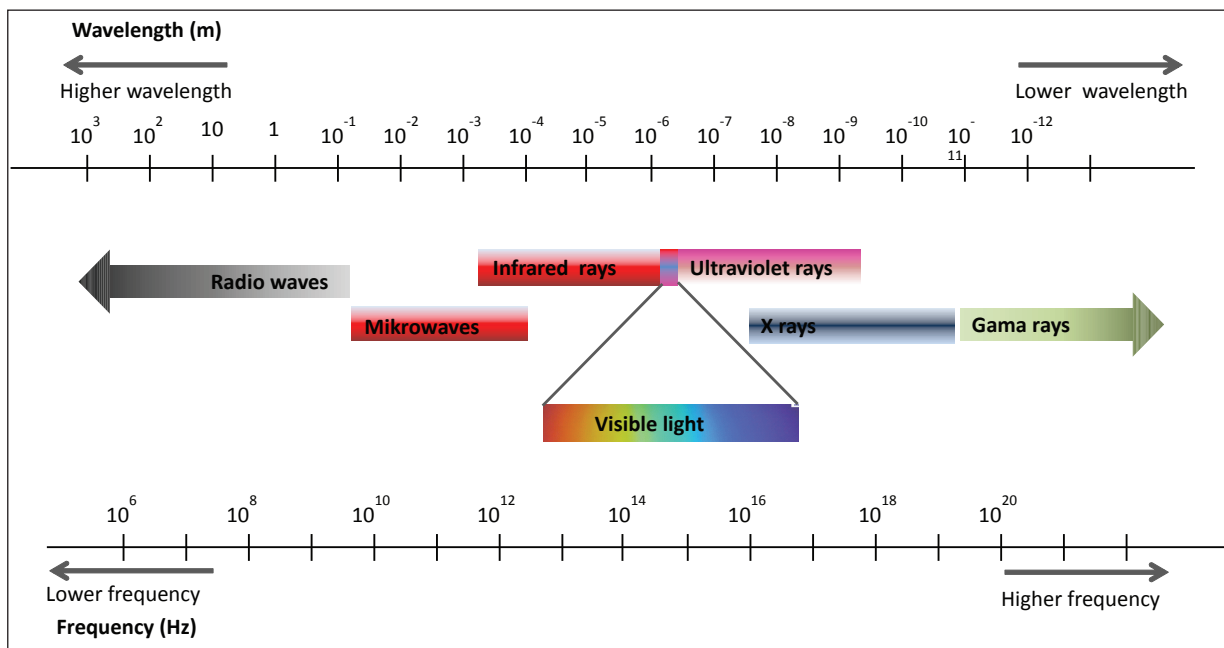
Svjetlost je samo jedan dio spektra različitih elektromagnetskih valova koji se rasprostiru prostorom. Elektromagnetski spektar čini vrlo široki raspon valova, od radiovalova s valnim dužinama od metra do nekoliko kilometara, pa sve do x-zraka s valnim dužinama manjim od milijarditog dijela metra. Svjetlosno zračenje nalazi se u dijelu spektra između radiovalova i x-valova, čineći jedinstveni spoj osobina koje pokazuju zrake, valovi i elementarne čestice (Slika 1.). Dio spektra uočljiv ljudskim okom zove se vidljivi spektar. Vidljivo područje pokriva raspon valnih dužina od 390 do 760 nm.

networks needs is subjective and depends on the business decisions of the end users' service providers. Nevertheless, it is certain that the basic demand of 4G communication systems will be expanded broadband mobile connection. Wireless optics can provide high transmission speeds [2], but the implementation of 4G communications will certainly require a synergistic combination and the heterogeneity of existing and new wireless data transmission technologies, such as hybrid RF/OW systems [3]. 4G represents the fourth generation of broadband communication technology. Beside the improvements in transmission technology, the changes in interfacing this technology with an end user are significant. 4G system's bandwidth is 3 to 5 Mbit/s, with speeds of 500 Mbit/s in uplink and 1 Gbit/s in downlink. Frequency band of 4G network is 2-8 GHz.

Radio-frequency spectrum is defined within an electromagnetic radiation band of 3 kHz to 300 GHz. In the early days of radio-communications, that spectrum was relatively large, especially because some parts of the spectrum were more difficultly usable than others. The development of technology slowly allowed the usage of an increasing part of the spectrum. The increase of technological capabilities also increased the application, which thereby slowly increased the usage of RF spectrum. It is this very use of the spectrum which is one of the factors in favor of wireless optics. Using the visible spectrum of electromagnetic radiation can also replace RF technology in locations such as airplanes or in the vicinity of sensitive electronic equipment where it had previously been banned for safety reasons.

Light is just one part of the spectrum of different electromagnetic waves which spread through space. Electromagnetic spectrum makes a very wide range of waves, from radio waves having wavelengths of one meter to several kilometers, to the x-rays with wavelengths of less than a billionth part of a meter. Light radiation is in the part of the spectrum between radio waves and x-waves, making a unique mixture of traits shown by rays, waves and elementary particles (Fig. 1). The part of the spectrum visible to the human eye is called the visible spectrum. The visible area covers a range of wavelengths from 390 to 760 nm.

IEEE 802.11x group of standards for wireless communication in local area networks (including protocols a, b, g, n and ac) uses communication radio frequencies in the band from



Slika 1. Elektromagnetski spektar  
 Figure 1 Electomagnetic spectrum

Izvor / Source: Autori / Authors

IEEE 802.11x je skupina standarda za bežičnu komunikaciju u lokalnim mrežama (uključujući protokole a, b, g, n i ac) koristi komunikacijske radiofrekvencije u pojasu od 2,4 do 5 GHz uz propusnosti od 20 do 160 MHz [4]. Iako se ovi komunikacijski protokoli koriste za lokalne bežične računalne mreže, iskorištenost frekvencijskog spektra ne predstavlja toliko kritični problem. U maksimalno povoljnim uvjetima, domet Wi-Fi (engl. Wireless Fidelity) signala ne prelazi stotinjak metara. Međutim, javljaju se drugi problemi poput mogućnosti spajanja prevelikog broja korisnika na jednu vezu ili pomanjkanja propusnosti. Propusnost podataka kod IEEE 802.11x standarda je ovisna o udaljenosti od odašiljača, npr. za 802.11 b/g standarde, korištenjem multipleksiranja signala OFDM (engl. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) propusnost svakih desetak metara opada prosječno 10 Mbit/s [5].

Ovi problemi mogu doći do izražaja na javno dostupnim *hot spotovima* poput čekaonica, putničkih lučkih terminala, ili općenito na mjestima okupljanja većeg broja potencijalnih korisnika koja se nalaze u dometu Wi-Fi signala. Termin *hot spot* označava područje pokrivenosti bežičnog primopredajnika. Kada je jednom takvom *hot spotu* pristupi povećani broj korisnika, propusnost se uvelike smanjuje.

2,4 to 5 GHz with the bandwidth of 20-160 MHz [4]. Although these communication protocols are used for local wireless computer networks, the utilization of the frequency spectrum is not a very critical problem. In maximum favorable conditions, the range of Wi-Fi (Wireless Fidelity) signal does not exceed a hundred meters. However, there are other problems such as the possibility of too many users connecting to one connection, or a lack of bandwidth. Data bandwidth in IEEE 802.11x standards depending on the distance from the transmitter, for example for 802.11 b/g standards, using OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) signal multiplexing, the bandwidth decreases for an average of 10 Mbit/s every ten meters [5].

These problems can become clearer at publicly available *hot spots*, like waiting rooms, passenger port terminals, or generally in gathering places of large number of potential users which are in the range of a Wi-Fi signal. The term *hot spot* represents the coverage area of a wireless transceiver. When such a *hot spot* is simultaneously accessed by an increased number of users, the bandwidth is greatly reduced.

The remainder of this paper will present discussions on the basic concepts of wireless optical transmission technology, the past develop-

U nastavku rada razmatrat će se osnovni koncepti tehnologije bežičnog optičkog prijenosa, dosadašnji razvoj fizičkog sloja, mogućnosti i područja primjene ove tehnologije u pomorstvu te u ostalim granama prometa i telekomunikacija.

## 2. OSNOVNI KONCEPTI PRIJENOSA PODATAKA BEŽIČNOM OPTIČKOM MREŽOM

U uvodu je navedeno postojanje dviju osnovnih tehnologija bežičnog optičkog prijenosa. Jedna koristi usku kolimiranu svjetlost lasera, a druga difuzijski Lambertov poluvodički svjetlosni izvor. Prijamni uređaji su pri tome u oba slučaja poluvodičke PIN ili lavinske fotodiode APD (engl. Avalanche Photo Diode). PIN i APD fotodiode imaju vrlo dobru osjetljivost i frekvencijske karakteristike.

Težnja pri razvoju svake nove komunikacijske tehnologije je njezina što jednostavnija tehnička izvedba, s obzirom da je to ujedno i najvažniji faktor utjecaja na cijenu konačnog proizvoda. FSO koncept je pouzdaniji kod komunikacije između fiksnih sustava ili sustava smanjene mobilnosti. Iako postoje razmatranja o primjeni u potpuno mobilnim sustavima [6], takvi bi sustavi morali biti opremljeni osjetljivim mehanizmima pozicioniranja odašiljača i prijarnika. Time su oni i znatno podložniji mehaničkom stresu od fiksnih sustava, uz već prethodno spomenuto povišenje cijene uslijed kompleksnosti izrade samoga sustava.

Fiksni FSO sustavi s druge strane predstavljaju zanimljivu alternativu RF vezama jer ne zahtijevaju zakup frekvencijskog spektra. Preslušavanje podataka je praktički nemoguće, a sama izrada primopredajnog sustava, čak i za velike propusnosti razmjerno je jednostavna i jeftina, tim više što već duže vrijeme postoje komercijalno raspoloživi FSO sustavi.

FSO sustavi koriste poluvodički laser kao odašiljač. Laser zrači kolimiranu, koherentnu zraku, odnosno zrači svjetlost čije su zrake paralelne, konstantne faze, valne dužine i amplitude. S obzirom da se svjetlost prostire atmosferom, potrebno je odaslati što kvalitetniju kolimiranu zraku. U tu svrhu najčešće se koristi VCSEL tip poluvodičkog lasera (VCSEL – Ver-

ment of the physical layer, the possibilities and areas of the application of this technology in the maritime industry, as well as in other fields of transport and telecommunications.

## 2 BASIC CONCEPTS OF WIRELESS OPTICAL NETWORK DATA TRANSMISSION

It was noted in the introduction that there are two basic technologies of wireless optical transmission. One uses narrow collimated laser light and the other a diffusion Lambert semiconductor light source. Receiving devices in both cases are semiconductor PIN or avalanche photo diodes (APD). APD and PIN photo diodes have very good sensitivity and frequency properties.

The goal in the development of any new communication technology is its simplest as possible technical performance, since it is also the most important influence factor for the price of the final product. FSO concept is more reliable in communication between fixed systems or reduced mobility systems. Although there are considerations about the application in fully mobile systems [6], such systems would have to be equipped with sensitive mechanisms of transmitter and receiver positioning. That makes them considerably more susceptible to mechanical stress than fixed systems, in addition to previously mentioned increase in prices due to the complexity of the system's development.

Fixed FSO systems, on the other hand, represent an interesting alternative to RF connections because they do not require the frequency spectrum lease. Signal crosstalk is practically impossible, and the transceiver system development, even for relatively large bandwidths, is simple and cheap, especially since, for a long time now, there are commercially available FSO systems.

FSO systems use a semiconductor laser as a transmitter. Laser radiates a collimated, coherent beam, i.e. it radiates light with parallel rays, of constant phase, wavelength and amplitude. Given that light spreads through the atmosphere, it is necessary to send the collimated beam of best quality. For this purpose, the most commonly used type of semiconductor laser is VCSEL (Vertical-Cavity Surface Emitting Laser). VCSEL is composed of several layers of

tical Cavity Surface Emitting Laser). VCSEL je sastavljen od nekoliko slojeva poluvodiča. Na osnovni sloj n-tipa poluvodiča nadograđuju se prvo slojevita struktura donjih Braggovih zrcala (reflektora), zatim slojevita struktura kvantnih zdenaca (engl. quantum well) od indij-galij-arsena (InGaAs) debljine do 8 nm, te na kraju niz slojeva poluvodiča p-tipa na koje se ugrađuje metalni električni kontakt. Za valne dužine od 650 do 1300 nm koristi se baza od galij-arsena (GaAs). Za Braggova zrcala koriste se slojevi aluminij-galij-arsena (AlGaAs).

Laserska zraka ima distribuciju intenziteta opisanu Gaussovom (normalnom) razdiobom, te se često naziva Gaussova zraka. Pokazano je da parcijalno koherentna zraka manje trpi od utjecaja atmosfere za jednake atmosferske uvjete u odnosu na potpuno koherentnu zraku [7]. Drugim riječima parcijalno koherentna zraka ima bolji odnos srednje snage signala i srednje snage šuma (SNR – Signal to Noise Ratio).

Korištenjem parcijalno koherentnog izvora zračenja (ili narušavanjem koherentnosti laserskog izvora) moguće je doseći veće udaljenosti, odnosno smanjiti prigušivački utjecaj atmosfere. Unatoč tome, FSO komunikacijski sustavi izrazito su ovisni o vremenskim uvjetima. Magla, kiša i snijeg mogu utjecati na vezu, čak i dovesti do potpunog prekida optičke veze. S obzirom na stohastičku prirodu atmosferskih uvjeta jedino idealno rješenje bila bi integracija FSO sustava s RF komunikacijskim sustavom. RF komunikacijski sustav može u slučaju prekida FSO veze preuzeti komunikaciju, makar i uz smanjenu propusnost poput sustava opisanog u [8].

Uz zemaljske FSO mreže, razmatraju se i metode komunikacijskih povezivanja satelita u orbiti oko Zemlje [9], [10], [11]. Američka svemirska agencija NASA – National Aeronautics and Space Administration nedavno je demonstrirala FSO komunikacijsku vezu ostvarenu sa satelitom u orbiti oko Mjeseca (Lunar Reconnaissance Orbiter) simboličkim prijenosom digitalne fotografije slavne Mona Lise [12].

Koncept FSO sustava kod bežične komunikacije vidljivim svjetlom prikazan je na slici 2. Na slici su prikazane dvije osnovne komponente primopredajnog FSO uređaja; laserski odašiljač koji zrači usku kolimiranu koherentnu svjetlost i fotodetektor koji prihvaća signal. FSO sustav je simetričan jer svaki terminal ima ugrađene predajne i prijамne sklopove.

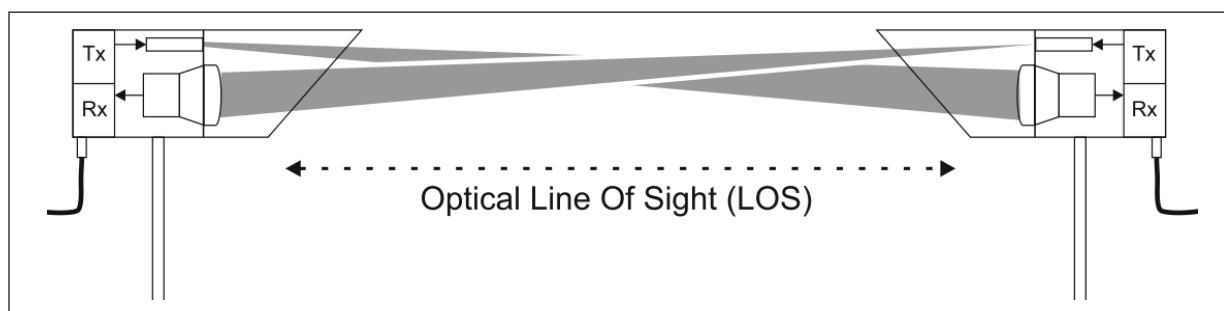
semiconductors. On the base layer of n-type semiconductor, a layered structure of lower Bragg mirrors (reflectors) is added. Then follows a layered structure of quantum wells of indium-gallium-arsenic (InGaAs) of thickness up to 8 nm, and in the end comes a series of p-type conductor layers, which have a metal electrical contact built on them. For wavelength of 650 to 1300 nm, a gallium-arsenide (GaAs) base is used. Layers of aluminum-gallium-arsenic (AlGaAs) are used for Bragg mirrors.

Laser beam has intensity distribution described by Gaussian (normal) distribution and is often called a Gaussian beam. It is shown that partially coherent beam suffers less from the effects of the atmosphere for the same atmospheric conditions compared to a fully coherent beam [7]. In other words, partially coherent beam has a better SNR-Signal to Noise Ratio.

By using partially coherent radiation sources (or by distorting the coherence of a laser source), it is possible to reach greater distances, i.e. to reduce the silencer influence of the atmosphere. Despite this, FSO communication systems are highly dependent on weather conditions. Fog, rain and snow can affect connection, and even lead to a complete break of an optical connection. Given the stochastic nature of atmospheric conditions, the only ideal solution would be the integration of a FSO system with a RF communication system. In the event of a FSO connection break, a RF communication system can take over the communication, even with a reduced bandwidth, such as the system described in [8].

Beside terrestrial FSO networks, the methods of communication linking the satellites orbiting the earth [9][10][11] are also discussed. National Aeronautics and Space Administration (NASA) has recently demonstrated a FSO communication connection achieved with a satellite orbiting around the Moon (Lunar Reconnaissance Orbiter) by a symbolic transfer of digital photography of the famous Mona Lisa [12].

The concept of FSO systems in a visible light wireless communication is shown in Figure 2. The image shows two basic components of a transceiver FSO device, a laser transmitter that emits a narrow collimated coherent light and a photodetector that accepts the signal. FSO system is symmetrical since each terminal has a built-in transmission and reception circuits.



**Slika 2.** Koncept FSO sustava kod bežične komunikacije vidljivim svjetlom  
**Figure 2** The concept of FSO systems in a visible light wireless communication

Izvor / Source: Autori / Authors

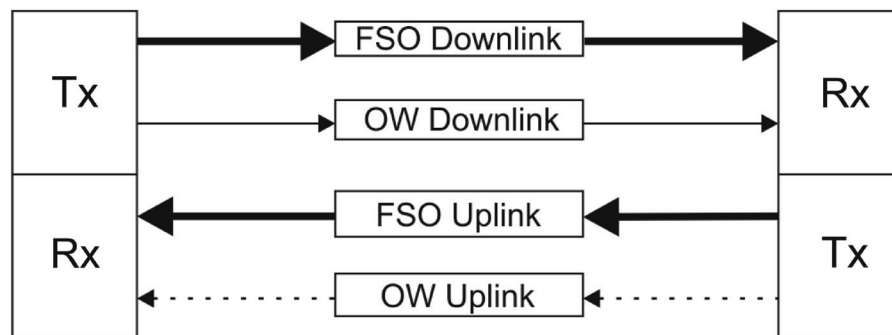
Razvoj bežičnih optičkih komunikacija u lokalnim mrežama (OW) teži primjeni povezivanja skupova računalnih, informatičkih i multimedijalnih sustava srednje i velike mobilnosti. OW je općenito ograničena na zatvoreni prostor unutar kojeg je moguće provesti povezivanje – zatvoreni prostor povezivosti (engl. Closed Area Network). Zatvoreni prostor povezivosti objedinjuje osobni prostor povezivosti (engl. Personal Area Network – PAN) i tjelesni prostor povezivosti (engl. Body Area Network – BAN). Za razliku od lokalnog prostora povezivosti (engl. Local Area Network – LAN) OW je omeđen fizičkim granicama prostora u kojoj se koristi uslijed netransparentnih

The development of wireless optical communications in local networks (OW) aims at connecting sets of computer, IT and multimedia systems of medium and high mobility. OW is generally limited to a closed area within which it is possible to implement connection - Closed Area Network. Closed Area Network combines Personal Area Network (PAN) and Body Area Network (BAN). Unlike Local Area Network (LAN), it is bounded by physical limits of the room in which it is used because of the non-transparent properties of the materials of which a room is commonly built. It may not always be the case; for example, if the room is relatively large (such as a passenger port terminal or a

**Tablica 1.** Komparacija bežičnih optičkih tehnologija FSO i OW  
**Table 1** Comparison of FSO and OW wireless optical technologies

	<b>FSO</b>	<b>OW</b>
Brzina prijenosa podataka <i>Data transmission rate</i>	1.5 Gbit/s	1Gbit/s
Radna valna dužina <i>Operating Wavelength</i>	1550 nm	400 – 700 nm
Tip odašiljača <i>Transmitter type</i>	VCSEL, Kolimirana LED <i>VCSEL, Collimated LED</i>	LED
Tip prijammnika <i>Receiver type</i>	APD, PIN, Kvadrantna fotodioda <i>APD, PIN, Quadrant photodiode</i>	APD, PIN
Domet signala <i>Signal range</i>	3 km	< 20 m
Ograničenja u dometu signala <i>Signal range limitations</i>	Atmosferska prigušenja <i>Atmospheric attenuation</i>	Atmosferska prigušenja <i>Atmospheric attenuation</i>
Topologija mreže <i>Network topology</i>	Isprepletana <i>Mesh</i>	Zvjezdasta <i>Star</i>
Primjena <i>Application</i>	Komunikacija od točke do točke, pristupna mreža, FTTx <i>Point-to-point communication, access network, FTTx</i>	Lokalne bežične mreže <i>Local wireless networks</i>

Izvor / Source: Autori / Authors



**Slika 3.** Blok shema s usporedbom FSO i OW tehnologija bežičnog prijenosa putem vidljivog svjetla  
**Figure 3** Schematic diagram comparing the FSO and OW visible light wireless transmission technology

Izvor / Source: Autori / Authors

svojstava materijala od kojih je prostorija izgrađena. To ne mora uvijek biti slučaj, npr. ako je prostorija razmjerno velika (poput putničkog lučkog terminala ili željezničkog terminala). No, općenito se može reći da je bežična optička veza ograničena fizičkim granicama prostora primjene, koja je u općem slučaju izolirana od vanjskih atmosferskih uvjeta.

Na slici 3. prikazana je blok-shema i usporedba OW i FSO sustava bežične komunikacije pomoću vidljivog svjetla. Naglašena je razlika između metoda prijenosa podataka za obje tehnologije. Bitno je primijetiti da se kod FSO prijenos u oba smjera izvodi korištenjem jednake tehnologije, dok su kod OW-a dolazni smjer komunikacije prema korisničkom području (engl. downlink) i odlazna komunikacijska veza (engl. uplink) ostvareni različitom tehnologijom. Također, važno je napomenuti da je razvoj kvalitetne odlazne komunikacijske veze za OW trenutno jedno od glavnih područja istraživanja.

Osnovna razlika između FSO-a i OW-a je način odašiljanja svjetlosnog signala. FSO kao što je to ranije navedeno koristi usku Gaussovu zraku, dok OW koristi Lambertov izvor svjetlosti. S obzirom da je svrha OW povezivanje uređaja velike mobilnosti, drugi način odašiljanja signala pruža znatnu prednost. Poprilično bi teško bilo implementirati bilo kakav mehanizam praćenja zrake u FSO sustavu prijenosa, uzmu li se u obzir tipične dimenzije uređaja velike mobilnosti poput tableta, mobitela ili laptop računala.

OW ne zahtijeva aktivno praćenje zrake jer izvor zrači svjetlost na način da je intenzitet zračenja proporcionalan kosinusu kuta između ravnog pravca od odašiljača do prijammnika i

rail terminal). However, it can generally be said that wireless optical connection is limited by physical boundaries of its usage space, which is, in a general case, insulated from external weather conditions.

Figure 3 shows a block diagram and the comparison of OW and FSO visible light wireless communication systems. The difference between the methods of data transmission for both technologies is emphasized. It is important to note that in FSO transmission in both directions is performed using the same technology, while in OW incoming direction of communication toward the user area (downlink) and outgoing communication connection (uplink) are achieved with different technology. Also, it is important to note that the development of a quality uplink for OW is currently one of the main areas of research.

The main difference between FSO and OW is the way of sending a light signal. As stated above, FSO uses a narrow Gaussian beam, while OW uses a Lambert light source. Given that the purpose of OW is connecting devices of great mobility, latter way of signal transmitting provides a significant advantage. It would be quite difficult to implement any beam monitoring mechanism in a FSO transmission system, if we take into account typical dimensions of high mobility devices, such as tablets, mobile phones or laptops.

OW does not require active beam monitoring because the source radiates light in such a way that the radiation intensity is proportional to the cosine of the angle between the straight line from the transmitter to the receiver and the perpendicular to the transmitter or the source of radiation. In other words, the radiat-



normale na sam odašiljač, odnosno izvor zračenja. Drugim riječima, zračenja svjetlost se širi u svim smjerovima, što povećava područje pokrivenosti signala.

Uz to, neki razmatrani sustavi bežičnih optičkih komunikacija u lokalnim mrežama primjenjuju prijam ne samo izravno zračenog signala, već i reflektiranog [13] te na taj način povećavaju povezivost i pružaju rješenje problemu prekida komunikacija pri prekidu optičke linije od odašiljača do prijarnika.

Iako je korištenje Gaussove zrake pri odašiljanju signala znatno češće kod FSO-a zbog ograničavanja nepotrebnih gubitaka u snazi zračenog signala, postoje primjeri primjene i u sustavima lokalnih bežičnih optičkih mreža [14] u kojima se za komunikaciju u oba smjera koriste laserski odašiljači.

Trenutno razmatrane metode odašiljanja signala obuhvaćaju difuzno odašiljanje, odašiljanje širokom optičkom linijom, uskom optičkom linijom (FSO), uskom optičkom linijom uz korištenje više odašiljača, te refleksno ili kvazi-difuzno odašiljanje (Slika 4.) [3].

Pod metode prijama signala spadaju jednokanalni prijarnik [3], prijarnik s kutnim (engl.

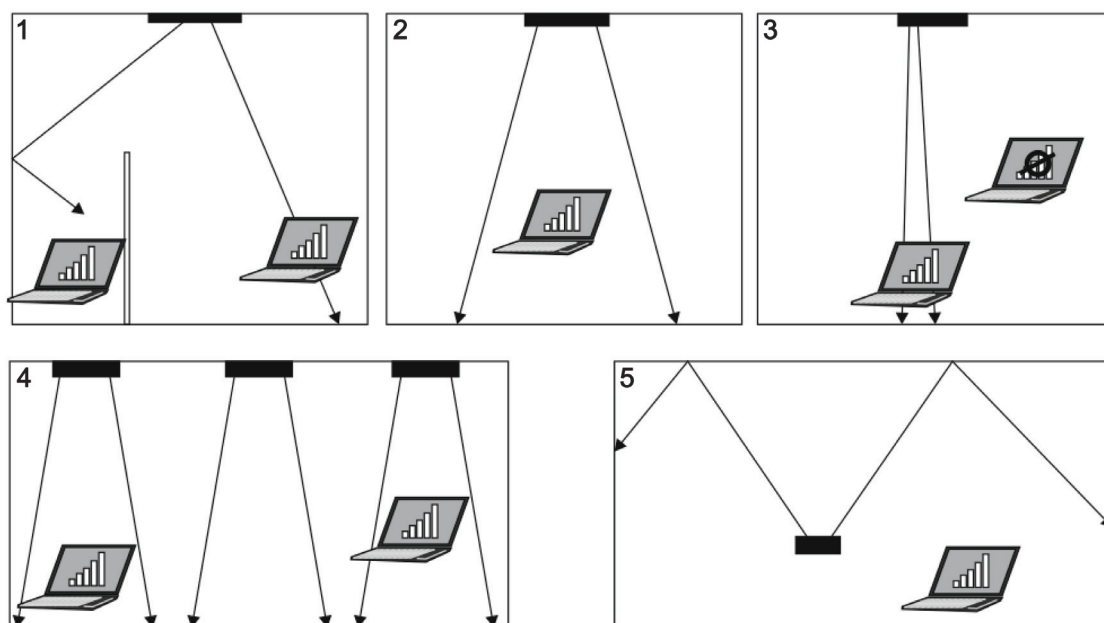
ed light spreads in all directions, which increases the signal's coverage area.

In addition, some considered wireless optical communication systems in local networks apply the reception of not only the directly radiated signal, but also of the reflected one [13]. Thus, they increase connectivity and provide a solution to the problem of communication breaks due to the breaks of optic line from the transmitter to the receiver.

Although the use of Gaussian beam when transmitting signals is much more frequent in FSO because of the limitations of unnecessary losses in the power of the radiated signal, there are examples of applications in the systems of local wireless optical networks [14] in which laser transmitters are used for communication in both directions.

Currently observed methods of signal transmission include diffusive transmission, wide optical line transmission, narrow optical line transmission (FSO), narrow optical line transmission with the use of multiple transmitters, and reflexive or quasi-diffusive transmission (Figure 4)[3].

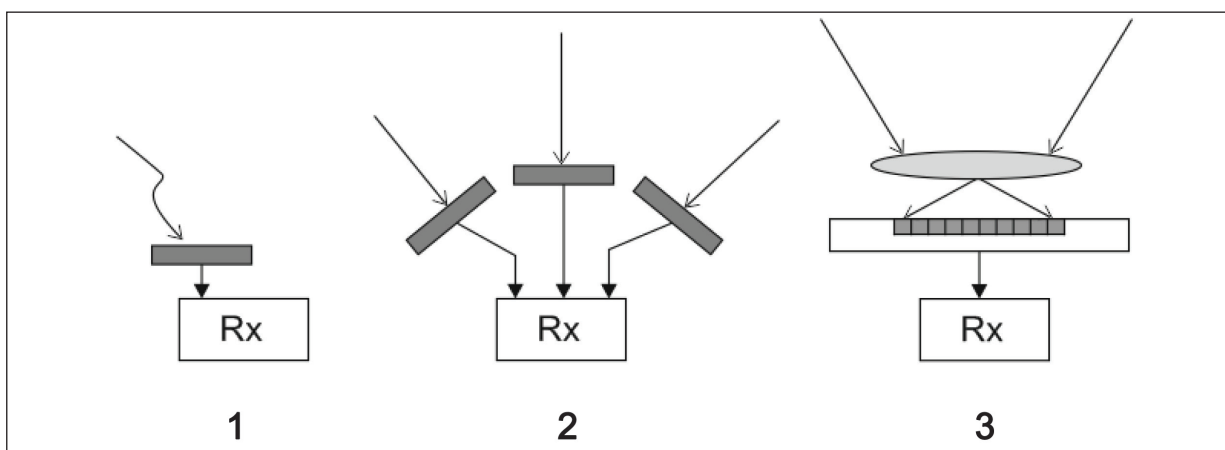
The methods of signal reception are mono receiver [3], angle diversity receiver [15] and



**Slika 4.** Metode odašiljanja OW signala: 1. difuzna, 2. široka optička linija, 3. uska optička linija, 4. korištenje više odašiljača, 5. refleksno odašiljanje

**Figure 4** Methods of OW signal transmitting: 1. diffusive, 2. wide optical line, 3. narrow optical line, 4. multiple transmitters use, 5. reflexive transmission

Izvor / Source: O'Brian, Katz, *Short-Range Optical Wireless Communication*, 2004.



Slika 5. Metode prijama optičkog signala: 1. jednokanalni prijam, 2. prijam s kutnim razlučivanjem, 3. prijam s grafičkim razlučivanjem

Figure 5 Methods of optical signal reception: 1. mono reception, 2. angle diversity reception, 3. image diversity reception

Izvor / Source: O'Brian, Katz, *Short-Range Optical Wireless Communication*, 2004.

angle diversity) [15] i grafičkim razlučivanjem (engl. image diversity) [16]. Na slici 5. prikazane su navedene metode prijama signala.

### 3. FIZIČKI SLOJ BEŽIČNOG OPTIČKOG KOMUNIKACIJSKOG SUSTAVA

Iako je FSO tehnologija trenutno na većem stupnju komercijalnog razvoja od OW i dalje postoje mnogi aspekti koje treba poboljšati kako bi se povećao stupanj primjene. Komercijalni FSO sustavi osim ograničenog dometa podložni su meteorološkim uvjetima i mehaničkim vibracijama. Ovaj je rad usmjeren na prikaz razvoja OW-a. On za razliku od FSO-a nije još u tolikoj mjeri komercijalno implementiran, a jedan od razloga je i taj što je FSO fizički izdvojeni komunikacijski sustav. Drugim riječima, FSO komunikacijski kanal omeđen je samostojecim primopredajnicima koji se standardnim priključcima vežu na postojeće terminale poput računala ili usmjerivača (engl. router). OW pak, već po samoj koncepcijskoj zamisli zahtijeva ugradnju jedne terminacije komunikacijskog kanala u sam mobilni uređaj koji se želi umrežiti.

Razvoj OW-a usmjeren je k pronalaženju najučinkovitijeg načina odašiljanja i prijama signala, uz minimalnu kompleksnost sustava, cijenu, potrošnju snage te što kvalitetniji prijenos informacija.

image diversity receiver [16]. Figure 5 shows above mentioned methods of signal reception.

### 3 THE PHYSICAL LAYER OF A WIRELESS OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM

Although FSO technology is currently at a greater level of commercial development than OW, there are still many aspects that need to be improved in order to increase the degree of application. Apart from a limited range, commercial FSO systems are subject to weather conditions and mechanical vibrations. This paper focuses on the OW development presentation. Unlike FSO, it is not yet so much commercially implemented, and one of the reasons is that FSO is a physically separated communication system. In other words, FSO communication channel is bounded with detached receivers which are connected to the existing terminals, such as a computer or a router, via standard ports. OW, however, by its very conceptual ideas requires the installation of one communication channel termination in a mobile device which is to be networked.

OW development aims at finding the most effective way of signal transmitting and receiving, with a minimal system complexity, cost, power consumption and best quality information transfer.

One of the most important concepts in the development of OW is the integration of light-

Jedna od najznačajnijih zamisli u razvoju OW-a je integracija rasvjete i odašiljača signala za prijenos informacija u jednu cjelinu [17]. Kod ovoga koncepta, rasvjeta svjetlećim diodama (LED – Light Emitting Diode) ugrađena u rasvjetni objekt kao što je stolna lampa ili rasvjeta ugrađena u samu prostoriju, može se modulirati nekom od postojećih metoda modulacije (OOK (engl. On Off Keying), ASK (engl. Amplitude Shift Keying) itd.) kako bi istodobno odašiljala digitalni signal. Uslijed tromosti oka, čovjek nije u stanju razlučiti promjene čija je učestalost odašiljanja svjetlosnih impulsa veća od otprilike 20 Hz, odnosno promjene koje su međusobno razdvojene vremenskim intervalom većim od 50 milisekundi. To ograničava minimum propusnosti kanala na 20 bit/s.

S obzirom da je namjera integrirati OW komunikaciju s rasvjetom, LED odašiljači koji bi se koristili u takvoj komunikaciji morali bi zračiti bijelu svjetlost, što se može postići na više načina. Korištenjem trobojne RGB (Red-Green-Blue) LED diode moguće je modulirati izvore tih triju boja kako bi se njihovom kombinacijom dobila bijela svjetlost. Modulacijom svake zasebne boje moguće je ostvariti WDM (Wavelength Division Multiplexing) komunikaciju. Zračenje različitih boja postiže se određenom kombinacijom poluvodiča.

Tako se za crvenu boju koriste aluminij-galij-arsen, galij-arsen-fosfor i aluminij-galij-indij-fosfor, za zelenu indij-galij-nitrat, galij-fosfor i aluminij-galij-fosfor, a za plavu cink-selen, indij-galij-nitrid te silicij-karbid. LED izvori bazirani na fosfornom sloju izrađuju se tako da se na poluvodički sloj plave LED diode (indij-galij-arsen) nanosi sloj fosfora određenih boja kako bi zračena svjetlost bila bijela. Ovi izvori imaju veliki potencijal kod OW komunikacija jer se filtriranjem plave komponente na prijmniku može povećati propusnost komunikacijskog kanala.

### 3.1. Dolazni smjer komunikacijske veze (*downlink*)

Postoji nekoliko tehnologija koje su uzete u obzir pri razmatranju OW komunikacijskih sustava. Jedna od potencijalnih tehnologija je i korištenje infracrvenog zračenja. Valne dužine između 780 nm i 950 nm predstavljaju najbolji izbor za OW komunikaciju u infracrvenom spektru zbog jeftinih odašiljača i prijmnika

ing and signal transmitter for information transfer into a single unit [17]. In this concept, lighting via light emitting diode (LED) embedded in a lighting object such as a table lamp or lighting installed in a room itself, can be modulated by any of the existing modulation methods (OOK - On Off Keying, ASK - Amplitude Shift Keying, etc.) to simultaneously emit a digital signal. Because of the eye inertia, a person is not able to distinguish changes which have the frequency of light impulses transmission greater than some 20 Hz, i.e. the changes that are separated from each other with an interval greater than 50 milliseconds. This limits the minimum channel bandwidth to 20 bit/s.

Given that the intention is to integrate OW communication with lighting, LED transmitters to be used in such a communication would have to radiate white light. This can be accomplished in several ways. By using a three-color RGB (Red-Green-Blue) LED diode, it is possible to modulate the sources of these three colors in order to get white light through their combination. With modulation of each individual color, WDM (Wavelength Division Multiplexing) communication can be achieved. The radiation of different colors is achieved by a specific combination of semiconductors. So, aluminum-gallium-arsenic, gallium-arsenic-phosphorus and aluminum-gallium-indium-phosphorus are used for red, indium-gallium-nitrate, gallium-phosphorus and aluminum-gallium-phosphor for green and zinc-selenium, indium-gallium-nitride and silicon-carbide for blue. LED sources based on phosphor are produced in a way that a layer of phosphorus of certain colors is added onto a semiconductor layer of blue LED diode (Indium-Gallium-Arsenide) so that the radiated light is white. These sources have great potential in OW communications because filtering blue components of the receiver can increase communication channel bandwidth.

### 3.1 Downlink Communication

There are several technologies that are taken into account when considering OW communication systems. One of the potential technologies is the use of infrared radiation. Wavelengths between 780 nm and 950 nm are the best choice for OW communication in the infrared spectrum because of the cheap transmitters and receivers [17]. On the other hand, the integration of lighting and transmitters in OW communication represents a very attractive so-

[17]. S druge strane integracija rasvjete i odašiljača kod OW komunikacije predstavlja jako atraktivno rješenje s tehničkog gledišta. Težnja 4G komunikacijskih sustava je postizanje propusnosti od 100 Mbit/s za platforme veće mobilnosti, odnosno 1 Gbit/s za platforme manje mobilnosti [17].

Optički odašiljač postavljen idealno u najvišoj točki prostorije, pružao bi pokrivenost za cijelu prostoriju. Tu se, međutim, moraju uzeti u obzir i fizičke prepreke koje prekidaju izravnu optičku liniju. Također, korištenjem jednog izvora raste odnos signal/šum (s obzirom da optički put nije jednak za sve točke unutar prostorije). Da bi se smanjio problem pokrivenosti razvijene su rasvjetne konfiguracije [18] koje uvelike poboljšavaju odnos signal/šum (SNR) smanjujući ga na 0,9 dB. Ovakve konfiguracije podržavale bi veći broj spojenih korisnika pružajući svim terminalima jednaku kvalitetu komunikacija.

U ovakvim sustavima najčešće korišteni odašiljač je bijela LED poluvodička komponenta. Korištenjem ove komponente postignuti su relativno kvalitetni rezultati u prijenosu podataka. Postoje tri tehnologije koje LED koriste za zračenje bijelog svjetla. Trikromatski LED izvori sadrže zapravo tri izvora (plavi, zeleni i crveni). Kombinacija ta tri izvora daje bijelu boju zračenja vidljivog svjetla. Trikromatska LED najčešće ima odvojene odašiljačke terminale za svaku boju, što u osnovi znači da bi se ovaj izvor mogao koristiti kod WDM-a. Jedan nedostatak kod korištenja multipleksiranja valnih dužina (WDM – Wavelength Division Multiplexing) za OW je činjenica da je u osnovi ograničen na korištenje isključivo u sustavima odašiljača uske ili široke izravne optičke linije. Razlog tome je činjenica da dozvoljavanjem refleksije signala od zidova može doći do gubitka cijelog informacijskog kanala. U slučaju da je zid obojen jednom od boja koja odgovara valnoj dužini jednog od kanala prijenosa podataka, dolazi do gubitka jedne valne komponente WDM signala.

Druge dvije tehnologije su ultraljubičasti (engl. UV – ultraviolet) LED izvor prekriven RGB (engl. Red Green Blue) slojem i plavi LED izvor prekriven fosfornim slojem. Ova druga tehnologija dokazano daje vrlo dobre rezultate što se tiče propusnosti [2]. Naime, iako je sama LED ograničena na propusnost od 10 do 20 MHz, korištenjem pojedinih vrsta modulacije ili plavog filtra neposredno prije prijama

lution from a technical standpoint. The goal of 4G communication systems is to achieve bandwidth of 100 Mbit/s for greater mobility platforms, and 1 Gbit/s for lower mobility platforms [17].

Optical transmitter placed ideally, at the highest point of the room, would provide coverage for the entire room. However, the physical barriers that interrupt the direct optical line must also be taken into account. Also, using a single source increases the signal/noise ratio (given that the optical path is not the same at all points within the room). To minimize the problem of coverage, lighting configurations [18] have been developed, which greatly improve the signal/noise ratio (SNR), reducing it to 0,9 dB. Such configuration would support a larger number of users connected, providing to all terminals the same quality of communication.

In these systems, the most commonly used transmitter is a white LED semiconductor component. Relatively good quality results in the transfer of data have been achieved by using this component. There are three technologies that are used by LED for radiating white light. Trichromatic LED sources actually contain three sources (blue, green and red). The combination of these three sources gives white color to the radiation of visible light. Trichromatic LED usually has a separate transmitter terminals for each color, which basically means that this source could be used in WDM. One disadvantage with using Wavelength Division Multiplexing for OW is the fact that it is basically limited to use only in systems of the transmitters of a narrow or wide direct optical line. The reason for this is in the fact that allowing the signal reflection from walls can cause a loss of an entire information channel. In case of the wall being painted in one of the colors corresponding to the wavelength of one of the data transfer channels, the loss of one wave component of WDM signals occurs.

Other two technologies are ultraviolet LED source covered with an RGB (Red Green Blue) layer and a blue LED source is covered with a layer of phosphorus. The latter technology is proven to give very good results in terms of bandwidth [2]. Even though the LED itself is limited to the bandwidth of 10 to 20 MHz, using certain types of modulation or a blue filter immediately prior to the signal reception, stops the slow response of yellow light [19].

signala, poništava se spori odziv žutog svjetla [19].

Prijam signala izvodi se fotoosjetljivom poluvodičkom komponentom, najčešće PIN ili APD fotodiodom. Kod FSO sustava razmatraju se i mogućnosti korištenja kvadrantnih fotodioda, s obzirom da se u teoriji, pomoću njih mogu odrediti mehanički pomaci odašiljača te ih je kroz povratnu vezu moguće kompenzirati. PIN fotodiode češće se koriste kod OW-a zbog niske cijene i tolerancije na velike temperaturne fluktuacije u odnosu na APD fotodiode [17]. S druge strane, kod prijama korištenjem APD-a, propusnost se uvelike povećava [2], što dakako predstavlja jako veliku prednost makar to dovodi i do povećanja kompleksnosti sustava. Osim fotodioda, razmatrana je i mogućnost korištenja samog LED izvora kao prijavnika [20]. Naime, uslijed tzv. Mims efekta, LED je najosjetljivija na valnu dužinu upadnog zračenja u okolini zračene valne dužine same LED. Uz sam prijavnika, razvijene su i metode optimizacije prijama signala korištenjem tehnika prijama poput kutnog [15] i grafičkog razlučivanja [16].

### 3.2. Odlazni smjer komunikacijske veze (*uplink*)

Odlazni smjer komunikacijske veze (*uplink*), predstavlja zaseban i specifičan problem. Velika većina istraživačkog rada vezanog uz OW koncentrirana je na komunikaciju u samo jednom smjeru. Da bi se ostvarila realna iskoristiva povezivost upotrebljiva za potpuno umrežavanje, potrebno je primijeniti dvosmjernu komunikacijsku vezu u sustavu.

S obzirom da se kod razvoja OW konfiguracije podrazumijeva integracija odašiljača s rasvjetnim elementom, postavljanje odašiljača za *uplink* korištenjem istog koncepta impliciralo bi instalaciju jakog svjetlosnog izvora na mobilni uređaj. To dakako nije poželjno jer bi takav odašiljač smetao korisniku mobilnog uređaja, utjecao na rasvjetu u prostoriji i ometao prijam ostalih uređaja. Kod razvoja veze za *uplink* razmatrane su razne metode bežičnog povezivanja, bilo korištenjem optičke ili RF veze. Korištenje RF veze je pomalo kontradiktorno, s obzirom da je jedan od ciljeva OW komunikacija upravo pružanje alternative RF bežičnim komunikacijama. Npr. korištenje RF veze zabranjeno je na nekim lokacijama, poput zrakoplova

Signal reception is performed with a photo-sensitive semiconductor component, usually a PIN or APD photodiode. For FSO systems, the possibility of using the quadrant photodiode is considered, since in theory, by using them one can determine mechanically shifts of the transmitter, and compensate them through feedback. PIN photodiodes are often used in OW due to their low prices and high tolerance to temperature fluctuations, as opposed to APD photodiodes [17]. On the other hand, in the reception using APD, the bandwidth is greatly increased [2], which of course is a very big advantage even though it leads to an increase in system complexity. In addition to photodiodes, the possibility of using LED sources as receivers is discussed [20]. Due to the so-called Mims effect, LED is the most sensitive to the wavelength of the incident radiation in the environment of the radiated wavelength same as the one of the LED. Beside the receiver, optimal signal reception methods using reception techniques such as angle [15] and image resolution have been developed as well [16].

### 3.2 Uplink Communication

Uplink communication connection, represents a separate and specific problem. The vast majority of research related to OW is concentrated on communication in only one direction. To achieve realistically usable connectivity usable for a complete networking, it is necessary to apply a two-way communication connection in the system.

Since the development of OW configuration includes the integration of a transmitter with a lighting element, setting the uplink transmitter using the same concept would require the installation of a strong light source on a mobile device. This, of course, is not desirable because such a transmitter would bother the mobile device user, would influence the lighting in the room and interfere with the reception of other devices. In developing connections for uplink various methods of wireless connectivity have been discussed, either by using an optical or RF connection. Using an RF connection is somewhat contradictory, given that one of the goals of OW communication is providing alternatives to RF wireless communications. For example, the use of RF connections is prohibited at some locations, such as airplanes or hospitals, where the signal can affect their sensitive electronic equipment.

ili bolnica, gdje signal može utjecati na osjetljivu elektroničku opremu.

Ostale alternative za dvosmjernu komunikaciju podrazumijevaju korištenje LED koje zrače na IR (oko 850 nm) i UV (oko 375 nm) valnim dužinama. Također se predviđa uporaba LED koje zrače svjetlost u vidljivom spektru, ali modulirane su na način da tromost oka ne registrira kratke modulirane impulse zračenja. Korištenje IR i UV izvora pruža modulacijsku propusnost od otprilike 50 MHz, što je dovoljno uzmu li se u obzir brzine prijenosa koje zadovoljavaju trenutne potrebe korisnika [21]. Korištenjem izvora u vidljivom spektru sa širokom modulacijom smanjuje se propusnost na 500 kbit/s [17]. Uz samu tehnologiju odašiljanja, potrebno je razviti i metode dvosmjernog istovremenog prijenosa podataka. Dvije metode koje se razmatraju su WDD (engl. Wavelength Division Duplexing) i TDD (engl. Time Division Duplexing).

### 3.3. Modulacije signala primjenjive na komunikacije vidljivim svjetlom

Osim problema fizičkog odašiljanja i prijama signala potrebno je postići kvalitetan način modulacije signala. Primijenjena modulacija ovisi o korištenju tehnologija odašiljanja i prijama jer, ovisno o korištenoj tehnologiji, razne modulacije pružaju razne razine propusnosti, odnosno signal/šum (SNR) i kvalitete signala (BER – Bit Error Rate).

Pri odabiru modulacije signala moraju se uzeti u obzir čimbenici poput više korisničkog pristupa, dvosmjernosti veze, ciljane propusnosti itd. Važno je uzeti u obzir sigurnosne zahtjeve OW sustava. S obzirom na komunikacijsku izoliranost OW komunikacijskog sustava, pitanje preslušavanja nije toliko veliki problem.

Korištenjem kvalitetne enkripcije, moguće je zadržati visoku propusnost komunikacijskog kanala te istovremeno ostvariti sigurnu komunikaciju. Veći problem javlja se kod analiziranja stabilnosti veze. Naime, OW, kao i FSO, traži neprekinutost optičke linije kako bi se ostvarila komunikacija između predajnika i prijarnika, uz razliku što OW može iskoristiti refleksiju signala od zidova prostorije.

Istraživani sustavi OW komunikacija obično koriste OOK pri profiliranju karakteristika komunikacijskog kanala. Korištenjem ASK, pro-

Other alternatives for two-way communication involve the use of LED that radiate at IR (850 nm) and UV (around 375 nm) wavelengths. It also predicts the use of LEDs that radiate light in the visible spectrum, but are modulated in such a way that the inertia of the eye does not register the short modulated pulses of radiation. Using IR and UV sources provides modulation bandwidth of about 50 MHz, which is sufficient, if we take into account the speeds which meet current users' needs [21]. Using the sources in the visible spectrum with a wide modulation, bandwidth is reduced to 500 kbit/s [17]. In addition to the transmission technology, it is necessary to develop the methods of simultaneous two-way data transfer. Two methods that are considered are WDD (Wavelength Division Duplexing) and TDD (Time Division Duplexing).

### 3.3 Signal Modulations Applicable to Visible Light Communication

In addition to physical problems of sending and receiving signals, it is necessary to achieve a satisfactory manner of signal modulation. The applied modulation depends on the use of transmitting and receiving technology because, depending on the technology used, various modulation provide various levels of bandwidth, signal/noise ratio (SNR) and signal quality (BER - Bit Error Rate).

When selecting a signal modulation, factors such as more user access, two-way connections, targeted bandwidths, etc. must be taken into consideration. It is important to take into account the security requirements of OW system. With regard to the communication isolation of OW communication system, the issue of cross-talk is not such a big problem.

By using high-quality encryption, it is possible to maintain a high bandwidth of communication channel and simultaneously achieve secure communication. Bigger problem arises when analyzing connection stability. OW, the same as FSO, asks for the continuity of optic line in order to achieve communication between transmitter and receiver, with the difference that OW can utilize signal reflection from the walls of the room.

Investigated OW communication systems commonly use OOK in the profiling of the communication channel. Bandwidth significantly increases by using ASK. It is shown that the

pusnost se znatno povećava. Pokazano je da se korištenjem 4-ASK i digitalnog filtriranja propusnost može povećati 20 puta u odnosu na izravnu modulaciju [19]. Pridoda li se tome još i WDM, propusnost znatno naraste.

Pronalaženje najefikasnije metode modulacije signala nije jedini problem. Treba se uzeti u obzir činjenica da OW mora omogućavati mobilnost korisnicima. Metode kojima će se omogućiti neprimjetno prespajanje na različite odašiljače (npr. pri prijelazu korisnika iz jedne u drugu prostoriju) mogu se istovremeno iskoristiti za proširivanje pristupa na veći broj korisnika. Korištenjem većeg broja optičkih pristupnih točaka u raznim konfiguracijama (jedna pristupna točka po korisniku, jedna pristupna točka za više korisnika, više pristupnih točaka za više korisnika) [17] može se automatski povećati pokrivenost u velikim zatvorenim prostorima poput čekaonica.

#### 4. PODRUČJA PRIMJENE BEŽIČNIH OPTIČKIH KOMUNIKACIJA

Područja primjene ove tehnologije zaista su široke uzmu li se u obzir ciljane teoretske mogućnosti i brzine prijenosa podataka koje ona nudi. Korištenje OW-a omogućuje korištenje širokopoljarnih veza na mjestima gdje su one prethodno bile zabranjene zbog utjecaja RF sustava, poput zrakoplova ili u prisutnosti osjetljivih bolničkih uređaja. Važno je spomenuti i značajno poboljšanje u odnosu nad RF sustavima s obzirom na teoretske brzine prijenosa koje dosežu i brzine od 1 Gbit/s [2]. Uzmu li se u obzir fizikalna ograničenja OW-a, može se zaključiti da će, makar u početku, ova tehnologija biti češće primjenjivana za širokopoljarno povezivanje uređaja velike mobilnosti unutar zatvorenih prostorija. Dakle, mogu se očekivati primjene u domaćinstvima, gdje bi svaka soba bila opremljena konfiguriranim optičkim pristupnim točkama koje istovremeno služe i kao rasvjeta same prostorije [18]. U većim prostorijama kao što su putnički terminali, čekaonice ili ostala zatvorena mjesta okupljanja može se povećati pokrivenost korištenjem većeg broja optičkih pristupnih točaka. OW služi kao zadnji korak u umrežavanju mobilnih uređaja, te uzme li se u obzir i da bi se OW optička pristupna točka koristila i kao rasvjeta, moguće je u ovaj sustav integrirati izravno i sustave komuni-

use of 4-ASA and digital filtering of bandwidth can be increased 20 times compared to direct modulation [19]. If we add to that WDM as well, the bandwidth increases significantly.

Finding the most effective method of signal modulation is not the only problem. One should take into account the fact that OW has to enable users' mobility. The methods which will allow unnoticeable switching to different transmitters (eg. when a user passes from one room into another) can be simultaneously used to expand the access to a larger number of users. By using a large number of optical access points in various configurations (one access point per user, a single access point for multiple users, multiple access points for multiple users) [17] coverage in large indoor spaces like waiting rooms can increase automatically.

#### 4 WIRELESS OPTICAL COMMUNICATIONS APPLICATION AREAS

Application areas of this technology are really wide if we take into account target theoretical possibilities and data speeds it offers. Using OW enables the use of broadband connections in places where they were previously prohibited due to the effects of RF systems, such as in an airplane or in the vicinity of sensitive hospital equipment. It is also important to mention the significant improvement of RF systems with respect to the theoretical transfer speeds which can reach speeds of 1 Gbit/s [2]. Taking into account the physical limitations OW, it can be concluded that, at least in the beginning, this technology will be used more often for broadband connectivity devices of great mobility within closed areas. Therefore, applications in households can be expected, where each room is equipped with optical access points configured to simultaneously serve as the lighting of the room [18]. In larger areas such as passenger terminals, waiting rooms or other closed places of gathering, coverage can be increased by using a larger number of optical access points. OW serves as the last step in networking mobile devices, and, if one takes into account that the OW optical access point is used as lighting as well, it is possible to integrate this system directly into communication systems which use power infrastructure (Power Line Communication). For a high-definition video signal, a transfer speed of 12 to 20 Mbit/s is required, de-

kacija koji koriste infrastrukturu napajanja (engl. Power Line Communication). Za jedan videosignal visoke razlučivosti (engl. HD – High Definition) potrebna je brzina prijenosa od 12 do 20 Mbit/s, ovisno o stupnju kompresije signala. OW se može koristiti za prijenos jednog ili više HD signala, kao i za prijenos 3D videosignala.

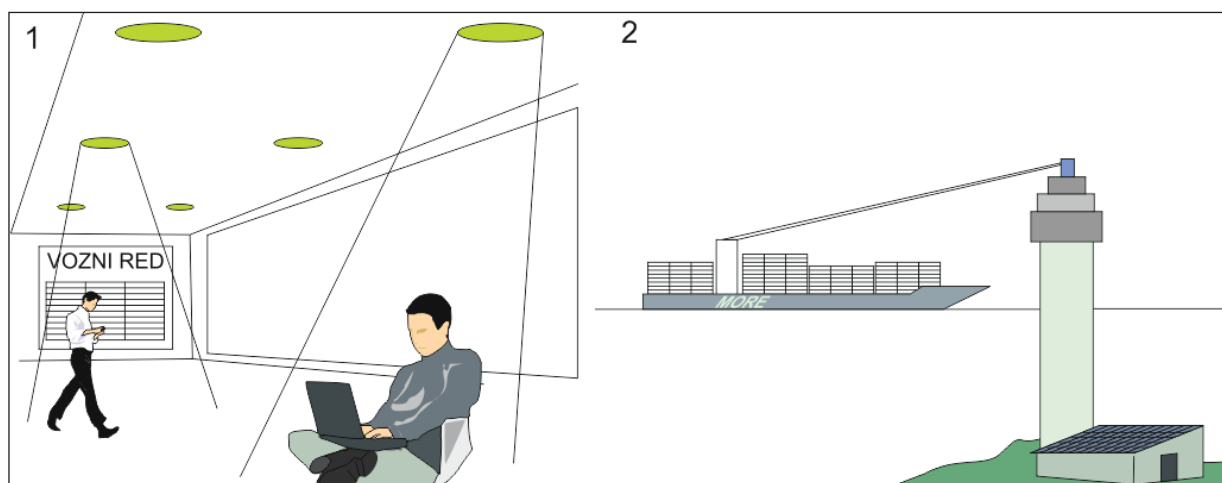
FSO koncept bi uz dodatan rad na razvoju mobilnosti mogao pružiti širokopojasni pristup sustavima smanjene mobilnosti poput brodova. Konkretno, iskorištavanjem postojeće obalne infrastrukture moguće je pokriti cijelo područje terestričke navigacije. Npr. instalacijom FSO sustava na svjetionike, VHF i AIS (Automatic Identification System) bazne postaje na jadranskoj obali ostvarila bi se pokrivenost cijele jadranske obale. Osim izravnog povezivanja, može se uzeti u obzir i situacija u kojoj bi brod služio kao relejna FSO stanica kojom bi se proširivao opseg kopnenog FSO terminala. Isto tako FSO se može koristiti kao link za dvosmjerni prijenos audio i videosignala.

Primjene ove tehnologije su veoma široke, no i dalje postoji mogućnost unaprjeđivanja. Slika 6. prikazuje područja primjene VLC-a. Da bi pokrivenost bila bolja, prostorije većih dimenzija poput putničkih terminala trebale bi biti opremljene s više OW odašiljača. U područjima terestričke navigacije, moguće je iskoristiti postojeću infrastrukturu za implementaciju FSO veze s plovnim objektima.

pending on the degree of signal compression. OW can be used for transferring one or more high-definition signals, as well as for transmitting 3D video signals.

With some additional work on the development of mobility, FSO concept could provide broadband access to the systems of reduced mobility, such as ships. In particular, by taking advantage of existing coastal infrastructure, it is possible to cover the entire area of terrestrial navigation. For example, installing FSO system on lighthouses, VHF and AIS (Automatic Identification System) base stations on the Adriatic coast, the coverage of the entire Adriatic coast would be achieved. In addition to direct connection, the situation in which the ship would serve as a relay FSO station, which would expand the scope of land FSO terminal, can be taken into account as well. Also, FSO can be used as a link for two-way transmission of audio and video signals.

The applications of this technology are very broad, but there is still a possibility of improvement. Figure 6 shows the application scope of VLC. To make coverage better, larger areas, such as passenger terminals, should be equipped with multiple OW transmitters. In the areas of terrestrial navigation, it is possible to use existing infrastructure for the implementation of FSO connection with vessels.



**Slika 6.** Primjene komunikacija uporabom vidljivog svjetla: 1. zatvoreni prostor, 2. područje terestričke navigacije  
*Figure 6 Applications of visible light communication: 1. closed space, 2. terrestrial navigation area*

Izvor / Source: Autori / Authors



## 5. ZAKLJUČAK

U radu su obrađene različite tehnologije za implementaciju bežičnih optičkih komunikacija u lokalnim mrežama. Razmatrani su sustavi odašiljanja i prijama, metode kodiranja podataka te problematika u razvoju i implementaciji OW komunikacijskih sustava. Velika je vjerojatnost da će VLC komunikacijski sustavi igrati veliku ulogu u razvoju mobilnih komunikacijskih sustava četvrte generacije. Idealno rješenje predstavljalo bi implementaciju hibridnih tehnologija koje koriste OW/FSO komunikacije, ali i poboljšanja postignuta na području RF komunikacija.

Činjenica je da kod korisnika raste potražnja za sve većim propusnostima komunikacijskih kanala. Također se sve više upotrebljavaju multimedijalni sadržaji dostupni preko telekomunikacijske mreže, a korištenje oblaka za pohranu podataka tu svakako predstavlja zanimljivu, ali i u kontekstu povezivosti zahtjevnu tehnologiju koja dobiva na popularnosti, kako kod poslovnih, tako i kod privatnih korisnika.

Koraci k standardizaciji ove tehnologije već se poduzimaju, što svjedoče standardi IEEE 802.15.7 te JEITA CP-1221 i JEITA CP-1222 razvijeni od strane VLCC (engl. Visible Light Communication Consortium). Na sadašnjem stupnju razvoja predstavljene tehnologije potrebno je dalje razvijati i ulagati u daljnji razvoj i istraživanje usmjereno poboljšanju kvalitete prijenosa i povećanju propusnosti.

Razvojem tehnologija odašiljanja i prijama svjetlosnog signala te razvojem dvosmjernih komunikacijskih veza, uporaba vidljivog spektra svjetlosnog signala u umrežavanju mobilnih korisničkih platformi zasigurno bi opravdala primjenu pri povezivanju plovni objekata s kopnenom telekomunikacijskom mrežom kao i u zatvorenim prostorima s velikim brojem korisnika.

## 5 CONCLUSION

This paper covers various technologies of implementing wireless optical communications in local networks. The systems are transmitting and receiving, data encoding methods and problems in the development and implementation of OW communication systems have been considered. It is very likely that VLC communication systems will have a major role in the development of mobile communication systems of fourth generation. The ideal solution would be in the implementation of a hybrid technology used by OW/FSO communication, but also the improvements achieved in the area of RF communications.

The fact is that users increase their demand for increasingly larger bandwidths of communication channels. Users increasingly use multimedia contents accessible via telecommunication networks, and the use of data storage clouds certainly represents an interesting, but in the context of connectivity a demanding, technology which is gaining in popularity, both with business, as well as with private users.

Steps toward the standardization of this technology are already being undertaken, as is evidenced by IEEE 802.15.7, and JEITA CP-1221 and CP-1222 JEITA developed by VLCC (Visible Light Communication Consortium). At the present stage of the development of the presented technology, it is necessary to invest in further research and development aimed at transmission quality improvement and bandwidth increase.

With the development of the technology of transmitting and receiving light signals, as well as the development of two-way communication connections, the use of the visible spectrum of light signals in the users mobile platform networking certainly justify the application in connecting vessels with mainland telecommunication network, as well as in closed spaces with a large number of users.

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Jurdana, I., M. Štrlek, R. Ivče, *Primjena bežičnih optičkih komunikacijskih mreža u pomorstvu*, 33. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku MIPRO 2010., Opatija, Hrvatska, 2010.
- [2] Paraskevopoulos A., et al., *Optical wireless network built on white-light LEDs reaches 800Mb/s*, 2011.
- [3] O'Brien, D., M. Katz, *Short-Range Optical Wireless Communications*, 2004.
- [4] IEEE Std 802.11™-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007), Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 29 March 2012.
- [5] Romano, P., <http://www.eetimes.com/design/communications-design/4009276/The-Range-vs-Rate-Dilemma-of-WLANs>; accessed: 3. 10. 2012.
- [6] Verma, P., A. K. Ghosh, A. Venugopalan, *Free-Space Optics Based Wireless Sensor Network Design*, 2008.
- [7] Krotkova, O., L. C. Andrews, R. L. Phillips, *The Effects of Partially Coherent Quasi-Monochromatic Gaussian Beam on the Probability of Fade*, 2003.
- [8] Leitgeb, E., et al., *Hybrid Wireless Networks combining WLAN, FSO and Satellite Technology for Disaster Recovery*, 2005.
- [9] [http://www.rp-photonics.com/free\\_space\\_optical\\_communications.html](http://www.rp-photonics.com/free_space_optical_communications.html); 2011.
- [10] Lutz, H. P., *Optical Communications in Space - Twenty Years of ESA Effort*, <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet91/b91lutz.htm>; accessed: 18. 11. 2012
- [11] Oppenhäuser, G., *A World First: Data Transmission Between European Satellites Using Laser Light*, [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Telecommunications\\_Integrated\\_Applications/A\\_world\\_first\\_Data\\_transmission\\_between\\_European\\_satellites\\_using\\_laser\\_light](http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/A_world_first_Data_transmission_between_European_satellites_using_laser_light); accessed: 19. 11. 2012.
- [12] Neal-Jones, N., E. Zubritsky, *NASA Beams Mona Lisa to Lunar Reconnaissance Orbiter at the Moon*, [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/LRO/news/mona-lisa.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/news/mona-lisa.html); accessed: 10. 12. 2012.
- [13] Messer, A., *Wireless Optical Transmission Key to Better Indoor Communications*, <http://live.psu.edu/story/44147>; accessed: 3. 2. 2013.
- [14] Wen-Yi, Lin, et al., *10m/500Mbps WDM Visible Light Communication Systems*, 2012.
- [15] Carruthers, J. B., J. M. Kahn, *Angle Diversity for Nondirected Wireless Infrared Communication*, 2000.
- [16] Kahn, J. M., et al., *Imaging Diversity Receivers for High-Speed Infrared Wireless Communication*, 1998.
- [17] Elgala, H., R. Mesleh, H. Haas, *Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-the-Art*, 2011.
- [18] Wang, Z., et al., *Performance of a Novel LED Lamp Arrangement to Reduce SNR Fluctuation for Multi-user Visible Light Communication Systems*, 2012.
- [19] Yeh, C. H., et al., *Investigation of 4-ASK Modulation with Digital Filtering to Increase 20 Times of Direct Modulation Speed of White-light LED Visible Light Communication System*, 2012.
- [20] Radcliffe, C., *LED Light Emitter and Detector*, 2007.
- [21] Cui, K., et al., *Indoor Optical Wireless Communication by Ultraviolet and Visible Light*, 2009.