

## ارائه الگوریتم ترکیبی OFDM-CDMA مبتنی بر روش دسترسی چندگانه

### جهت بهبود عملکرد لینک مخابرات نور مرئی در فضای بسته

میثم بیات<sup>۱\*</sup>، روح اله صمدی<sup>۲</sup>، حسن عبدالهی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد برق

(دریافت: ۹۸/۰۸/۰۱، پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲)

#### چکیده

انتقال اطلاعات از طریق سامانه‌های مخابرات نوری در فضای بسته، به دلیل عدم انتشار امواج رادیویی یکی از روش‌های امن در مقابل شنود است. این روش یکی از روش‌های مقاوم در برابر اختلال برای کاربردهای نظامی است. در این مقاله یک الگوریتم ترکیبی با استفاده از ترکیب OFDM-CDMA مبتنی بر روش دسترسی چندگانه ارائه شده است. این الگوریتم باعث بهبود کارایی لینک مخابراتی نور مرئی (VLC) و افزایش تعداد کاربران در فضای بسته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، پارامتر BER برای تعداد ۴ کاربر به ازای سیگنال به نویز ۰dB از میزان ۰/۰۳۵ به ۰/۰۰۶ بهبود یافته است. میزان افزایش نرخ ارسال بیت برای تعداد ۴ کاربر به ازای سیگنال به نویز ۳۰dB از ۱Mb/s به ۵Mb/s رسیده است. همچنین با استفاده از الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، در شرایط نرخ ارسال و نرخ خطای بیت یکسان، تعداد کاربران از ۴ کاربر به ۲۰ کاربر افزایش پیدا کرده است. این بهبودها در ازای افزایش پیچیدگی سامانه ناشی از طیف گسترده ایجاد شده است.

**کلیدواژه‌ها:** مخابرات نور مرئی، دسترسی چندگانه بر اساس تقسیم کد، روش مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد، تنظیم سطح روشنایی

#### ۱- مقدمه

کرده است. کاربرد نظامی VLC در هواپیما و بالگردها، تانک، تونل‌ها، ناوچه‌ها و زیردریایی‌ها برای جلوگیری از انتشار امواج و ارتباط بی‌سیم امن است. همچنین در اتاق سرورها و اتاق جنگ بسیار حائز اهمیت است [۳]. سامانه VLC باعث بالا رفتن قابلیت اطمینان سامانه ارتباطی در مقابل شنود می‌گردد. علاوه بر این، این سامانه مقاوم در برابر جَمینگ است. روش‌های دیگری نیز به‌منظور مقاوم نمودن سامانه‌های مخابراتی در برابر تداخل و جَمینگ امواج الکترومغناطیسی وجود دارد [۴ و ۵]. البته این روش‌ها بیشتر برای سامانه‌های ناوبری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

انتخاب روش مدولاسیون ارسال تأثیر به‌سزایی در عملکرد سامانه VLC دارد. مدولاسیون‌های متنوعی با مزایا و معایب ذاتی می‌تواند برای انجام VLC مورد استفاده قرار گیرند. یکی از روش‌های مطرح در سامانه‌های مخابراتی، روش OFDM<sup>۴</sup> است. روش OFDM به‌هنگی پهنای باند بالا به همراه جبران سازی ساده در گیرنده را فراهم می‌آورد. در این روش امکان استفاده از مدولاسیون‌های سطح بالاتر در زیرحامل‌ها برای رسیدن به نرخ بیت ارسال بیشتر وجود دارد. همچنین می‌توان OFDM را با روش‌های دسترسی چندگانه ترکیب کرد. برای کاربردهای همه‌پخشی، کانال‌های همه‌پخشی مختلف به‌سادگی توسط تخصیص سمبل‌ها و زیرحامل‌های OFDM

میزان ترافیک کاربران در شبکه‌های دسترسی به دلیل کاربری‌های جدید نظیر ویدئوهای پیشرفته اینترنتی سه‌بعدی و باکیفیت HD<sup>۲</sup>، بازی‌های اینترنتی سه‌بعدی و تماس‌های ویدئویی افزایش یافته است. این افزایش کاربری‌ها نیازمند پهنای باند بالایی می‌باشد. استفاده از ارتباطات نوری معضل پهنای باند و سرعت را در شبکه‌های دسترسی حل می‌نماید [۱]. از طرفی نور مرئی به‌عنوان ادوات روشن کننده اتاق‌ها، دفاتر، جاده‌ها، صفحات نمایش تبلیغاتی و تجاری، لامپ‌های کوچک به‌کار رفته در تلویزیون مورد استفاده قرار گرفته شده است. اخیراً کاربرد دومی برای ادوات روشنایی مطرح شده است [۲]. مخابره اطلاعات با نور مرئی توجه زیادی را معطوف خود کرده است. به این ترتیب علاوه بر روشنایی اتاق، مخابره پرسرعت اطلاعات نیز در شبکه دسترسی صورت می‌گیرد [۲]. فناوری VLC از (LED<sup>۳</sup>)های سفید برای ارسال اطلاعات استفاده می‌کند و با خاموش و روشن کردن LED با راه‌اندازهای پرسرعت، اطلاعات ارسال می‌شود. از مزیت‌های اصلی VLC می‌توان به زیرساخت موجود برای ارسال اطلاعات در آن اشاره کرد. توانایی LEDها برای ارسال سیگنال با نور مرئی، آن را به یک بستر مناسب برای انتقال اطلاعات تبدیل

\* رایانامه نویسنده مسئول: m\_bayat@ssau.ac.ir

<sup>۲</sup> High Detector

<sup>۳</sup> Light Emitting Diode

<sup>۴</sup> Orthogonal Frequency Division Multiplexing

دوقطبی باید به سیگنال تک‌قطبی<sup>۶</sup> تبدیل شود. بنابراین سیگنالینگ مدولاسیون OFDM معمول در سامانه رادیویی باید تغییر کند تا نیازهای یک سامانه نوری را برآورده سازد [۳]. در ادامه به چند نمونه از روش‌های مطرح شده برای OFDM نوری در سامانه‌های VLC پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲- روش DCO-OFDM

یکی از اصلی‌ترین اشکال‌های استفاده از روش OFDM در سامانه‌های مبتنی بر مدولاسیون شدت نور احتیاج به استفاده از بایاس DC برای غیر منفی ساختن سیگنال ارسالی است. در شکل (۱) دنباله‌ای از سمبل‌های یک سیگنال ساده OFDM و همچنین اثر اضافه کردن بایاس DC به آن جهت غیر منفی ساختن آن، نشان داده شده است. خطوط ثابت قرمز رنگ بازه عملکرد خطی LED را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیگنال OFDM ساده دارای مقادیر مثبت و منفی است و کاملاً خارج از بازه عملکردی LED قرار دارد. با اضافه کردن یک مقدار مناسب بایاس DC به این سیگنال، سیگنال<sup>۷</sup> DCO-OFDM ساخته می‌شود که مقدار منفی ندارد و قابلیت مدولاسیون شدت نور را دارد [۱۰]. نکته دیگری که قابل توجه است بازه عملکرد غیر خطی LED است. در مقاله‌ای استفاده از ارائه میکرو ال ای دی جهت خطی کردن LED پیشنهاد شده است [۱۱]. در شکل (۱) با افزودن بایاس DC سیگنال OFDM در عملکرد بازه خطی LED قرار می‌گیرد. در این حالت قله‌های سیگنال OFDM ممکن است از محدوده خطی خارج شود. دو راه جهت رفع مشکل وجود دارد. نخست پس از بایاس DC مقداری از دامنه سمبل خارج از محدوده عملکرد خطی LED را قطع نموده و سمبل را ارسال کرد. در این صورت، شکل سمبل اصلی اندکی تخریب شده که منجر به افزایش احتمال آشکارسازی با خطا می‌شود.

راه حل دوم ضرب کردن دامنه سیگنال OFDM ارسالی در عددی کوچک‌تر از یک است که سیگنال حاصل از محدوده خطی LED خارج نشود. در این صورت توان سیگنال ارسالی کاهش خواهد یافت که این به نوبه خود منجر به کاهش سطح توان سیگنال به توان نویز<sup>۸</sup> و افت عملکرد می‌شود. نحوه تنظیم شدت نور روش کاهش جریان پیوسته CCR است. در این روش، سطح روشنایی با افزایش و کاهش میزان جریان عبوری از LED، تنظیم می‌شود. روش CCR بسیار ساده و ارزان قیمت است و معمولاً برای تنظیم سطح روشنایی در روش DCO-OFDM استفاده می‌شود.

به هر کانال بر اساس نرخ ارسال و کیفیت سرویس مورد نیاز، قابل تشخیص است. این قابلیت‌ها روش OFDM را یک گزینه جدی برای انتقال اطلاعات در سامانه‌های VLC نسل بعد مطرح می‌کند [۶].

ایجاد قابلیت برقراری ارتباط چند کاربر در فضای اتاق توسط سامانه VLC دیگر چالش مطرح برای این سامانه است. روش‌های متفاوتی برای ایجاد قابلیت دسترسی چندگانه در مخابرات مطرح است. یکی از روش‌های غالب برای تخصیص اطلاعات به چند کاربر به‌طور هم‌زمان، روش دسترسی چندگانه به کمک تقسیم کد (CDMA<sup>۱</sup>) است. این روش در شبکه‌های مخابرات سلولی نسل ۳ و ۴ در حال استفاده است [۷]. در این حالت به هر کاربر یک الگو کد خاصی اختصاص داده می‌شود و کاربر می‌تواند بدون تداخل با کاربران دیگر به کمک الگو کد خاص اطلاعاتش را ارسال کند. روش CDMA در سامانه‌های مخابرات نوری نیز مطرح و توسعه داده شده است. کدهای خاصی به نام کدهای متعامد نوری (OOC<sup>۲</sup>) بدین منظور طراحی شده‌اند. بدین ترتیب در سامانه‌های مخابرات نوری مانند VLC نیز می‌توان از روش CDMA استفاده کرد [۸ و ۹].

در این مقاله یک الگوریتم ترکیبی با استفاده از OFDM-CDMA مبتنی بر روش دسترسی چندگانه ارائه شده است. در این حالت، از یک فرستنده OFDM استفاده می‌شود تا کدهای CDMA در حوزه فرکانس در آن ضرب شود و بدین ترتیب می‌توان از مزایای هر دو روش استفاده کرد.

در ادامه و در بخش ۲ سیگنالینگ‌های متفاوت مبتنی بر OFDM مطرح شده است. در بخش ۳ روش‌های کنترل سطح روشنایی ضمن مخابره اطلاعات معرفی می‌شود. در بخش ۴ یک الگوریتم ترکیبی با استفاده از OFDM-CDMA مبتنی بر روش دسترسی چندگانه ارائه شده است. در بخش ۵ این مقاله نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی آورده شده و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری از تحلیل‌ها آورده شده است.

## ۲- سیگنالینگ سمبل OFDM

در حالت کلی، خروجی یک مدولاتور OFDM سیگنالی مختلط و دوقطبی<sup>۳</sup> است. در سامانه‌های نوری که مبتنی بر مدولاسیون شدت نور<sup>۴</sup> می‌باشند مدولاسیون تریبیتی<sup>۵</sup> مقدور نیست [۷]. در واقع سیگنال باید پایه باید حقیقی باشد تا از شدت نور LED برای تغییرات پوش سیگنال OFDM در مدولاسیون استفاده شود. همچنین سیگنال

<sup>1</sup> Code Division Multiple Access

<sup>2</sup> Optical Orthogonal Code

<sup>3</sup> Bipolar

<sup>4</sup> Intensity Modulation

<sup>5</sup> Quadrature Modulation

<sup>6</sup> Unipolar

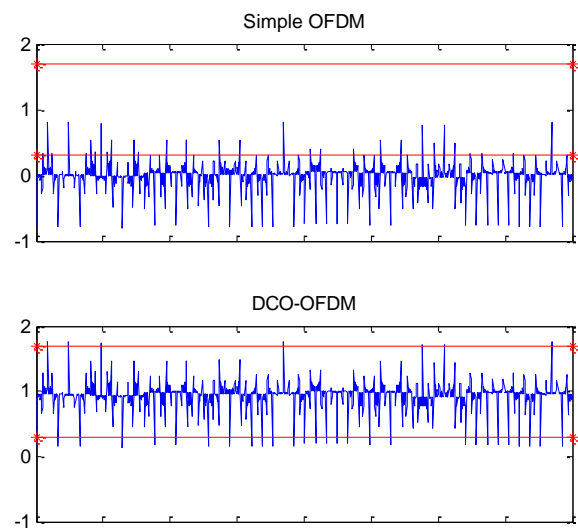
<sup>7</sup> Direct Current Biased Optical OFDM

<sup>8</sup> Signal to Noise Ratio (SNR)

OFDM قرار گرفته و سمبل حاصل Flip-OFDM نام‌گذاری می‌شود. در Flip-OFDM نیمی از نرخ ارسال حذف و بخش منفی وجود نخواهد داشت. دو روش ACO-OFDM و Flip-OFDM از نظر عملکرد BER با هم تفاوتی ندارند [۱۵]. هر دو روش نرخ ارسال یکسانی داشته که نصف نرخ ارسال OFDM ساده است. رنج دینامیکی ناحیه عملکرد خطی LED در دو روش فوق یکسان است. در این حالت بررسی پیچیدگی پیاده‌سازی دو روش ذکر شده نیز قابل بررسی است. با فرض اینکه پیچیدگی به‌صورت تعداد عملیات FFT/IFFT در فرستنده و گیرنده تعریف شود و نصف ورودی‌های IFFT در ACO-OFDM صفر باشد، مشاهده می‌شود که پیچیدگی روش ACO-OFDM در گیرنده دو برابر روش Flip-OFDM بوده و دو روش فوق پیچیدگی محاسباتی یکسانی دارند [۱۴]. در SNR یکسان، نرخ ارسال بیت در روش DCO-OFDM نسبت به ACO-OFDM بالاتر است [۱۵]. بنابراین روش Flip-OFDM روش ساده‌تری برای پیاده‌سازی می‌باشد. پس عملکرد روش ACO-OFDM مشابه Flip-OFDM بوده و از ارائه آن صرف نظر خواهد شد. در ادامه به مقایسه اثر استفاده از روش Flip-OFDM و DCO-OFDM در سامانه VLC مبتنی بر OFDM-CDMA پرداخته شده است.

### ۳- تنظیم سطح روشنایی

قابلیت تنظیم سطح روشنایی<sup>۲</sup> در سامانه‌های VLC یک نیاز اساسی محسوب می‌شود. این سامانه‌ها علاوه بر انتقال اطلاعات وظیفه تأمین روشنایی اتاق را نیز بر عهده دارند. به‌طور کلی دو روش برای تنظیم سطح روشنایی LED وجود دارد. روش اول کاهش جریان پیوسته (CCR<sup>۳</sup>) است که در آن سطح روشنایی با افزایش و کاهش میزان جریان عبوری از LED، تنظیم می‌شود. روش دیگر مدولاسیون پهنای پالس (PWM<sup>۴</sup>) است که با تنظیم دوره زمانی می‌توان توان اعمالی به LED را تغییر داد. در نتیجه روشنایی آن را تنظیم کرد [۱۳]. روش CCR بسیار ساده و ارزان قیمت است و معمولاً برای تنظیم سطح روشنایی در روش DCO-OFDM استفاده می‌شود. با این وجود با روش PWM ارتباط مطمئن‌تری خواهیم داشت و بنابراین این روش در صنعت کاربرد بیشتری دارد [۱۳ و ۱۶]. برای ایجاد قابلیت تنظیم روشنایی روی سیگنال OFDM می‌توان از روش RPO-OFDM<sup>۵</sup> استفاده کرد [۱۶]. عملکرد این روش بر اساس روش PWM است. در این روش سیگنال پر سرعت OFDM روی سیگنال کم سرعت PWM سوار می‌شود. به عبارت دیگر چندین سمبل متوالی OFDM با یکدیگر جمع و به‌صورت یک سمبل OFDM واحد در نظر گرفته



شکل (۱): اثر اضافه کردن DC بایاس به سمبل OFDM

### ۲-۲ روش ACO-OFDM

سیگنال دوقطبی OFDM ساده در شکل (۱) نشان داده شده است. با فرض تبدیل این سیگنال به سیگنال تک‌قطبی، بخش منفی دامنه قطع و برابر صفر قرار داده شده است. باقی مانده سیگنال شامل بخش مثبت است که در چنین حالتی قطعاً سیگنال OFDM ارسالی دچار تخریب خواهد شد. مطابق نتایج اثبات [۱۲]، تخریب ناشی از این تقطیع فقط روی زیرحامل‌های زوج ایجاد می‌شود. بر اساس این نکته، روش جدیدی برای ارسال به نام ACO-OFDM<sup>۱</sup> مطرح شده است. در روش ACO-OFDM فقط از زیرحامل‌های فرد برای مدوله کردن اطلاعات استفاده می‌شود. بخش منفی دامنه قطع و فقط بخش مثبت سیگنال ارسال می‌شود. نویز ناشی از این تخریب در شکل سیگنال فقط روی زیرحامل‌های زوج نمایان شده که حامل اطلاعات نمی‌باشند. در این روش، اگر چه نیمی از نرخ ارسال داده از بین می‌رود اما افتی در کیفیت سیگنال صورت نمی‌گیرد. همچنین امکان ارسال توان بالاتر و در نتیجه SNR بالاتری وجود خواهد داشت. زیرا سیگنال ACO-OFDM قابلیت مقیاس‌پذیری بیشتری نسبت به سیگنال DCO-OFDM در ناحیه عملکرد خطی LED دارد [۱۳].

### ۲-۳ روش Flip-OFDM

روش دیگری که برای ارسال سیگنال OFDM روی کانال نوری بی‌سیم با انجام مدولاسیون شدت نور مطرح است، روش Flip-OFDM نام دارد [۱۴]. در روش Flip-OFDM ابتدا بخش دامنه مثبت و منفی یک سمبل ساده OFDM از یکدیگر جدا می‌شوند. سپس بخش منفی قرینه شده و در ادامه بخش دوم قرار داده می‌شود. بدین ترتیب یک سمبل OFDM در بازه دو سمبل متوالی

<sup>۲</sup> Dimming

<sup>۳</sup> Continuous Current Reduction

<sup>۴</sup> Pulse Width Modulation

<sup>۵</sup> Reverse Polarity Optical-OFDM

<sup>۱</sup> Asymmetrically Clipped Optical OFDM

مورد نیاز کنترلر تصمیم گیرنده است که چند سمبل از ده سمبل در سطح بالا و مابقی در سطح پایین قرار گیرند. کاهش سمبل‌های تولیدی OFDM از بالاترین سطح جریان ممکن در LEDها در ناحیه خطی، اصطلاح سطح بالا نامیده شده است. یعنی با تعداد ۱۰ سمبل برای داشتن ۷۰ درصد سطح روشنایی می‌بایست ۷ سمبل در سطح بالا و ۳ سمبل به سطح پایین انتقال پیدا کند. اصطلاح سطح پایین هم عبارت است از افزایش سمبل‌های تولیدی OFDM به پایین‌ترین سطح جریان ممکن در LEDها می‌باشد [۱۶]. در نهایت مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) داده دیجیتال را به آنالوگ تبدیل کرده و سیگنال حاصل توسط LED ارسال می‌شود.

سیگنال ارسالی از کانال بی‌سیم نور مرئی عبور می‌کند. این سیگنال به همراه سیگنال تداخلی کاربران دیگر در سمت گیرنده دریافت می‌شود. یک فوتو دیکتور ( $PD^3$ ) سیگنال نوری دریافتی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. نویز الکتریکی  $n(t)$  به سیگنال داده دریافتی اضافه می‌شود. سپس روند معکوس فرستنده طی شده و اطلاعات کاربر استخراج می‌شود. در نهایت سیگنال استخراجی از زیرحامل‌های سمبل OFDM دریافتی، باید در کد یکتای مربوطه ضرب شود. در واقع هر کاربر، همبستگی کد مربوط به خود را با خروجی می‌سنجد. همبستگی کد هر کاربر با دیگر کاربران صفر است. بنابراین هر کاربر می‌تواند سمبل اطلاعات مربوط به خود را در میان کاربران تداخلی بازیابی کند. در سامانه‌های CDMA نوری از کدهای OOC استفاده می‌شود. در سامانه پیشنهادی، کدهای هادامارد [۱۷] به کار گرفته شده است. دلیل طراحی ویژه کدهای OOC برای کدگذاری در حوزه نوری است. اما کدگذاری سامانه پیشنهادی OFDM-CDMA در حوزه الکترونیک است، بنابراین کدهای هادامارد کارکرد مناسبی را در این حوزه خواهند داشت. ماتریس‌های هادامارد به صورت زیر تعریف می‌شوند:

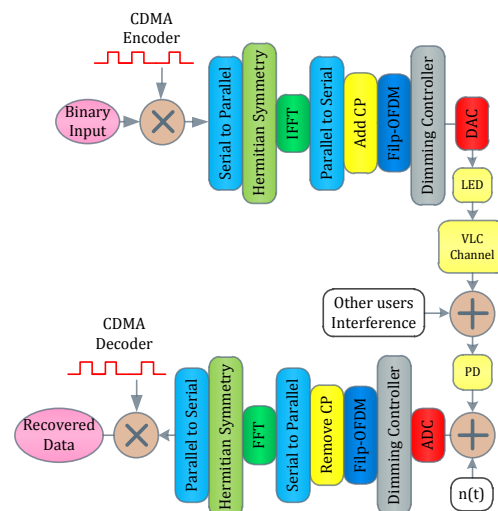
$$\begin{aligned} H_1 &= [1] \\ H_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\ H_4 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\ H_{2^k} &= \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه‌های بالا هر سطر ماتریس هادامارد به‌عنوان یک کد CDMA هادامارد در نظر گرفته می‌شود. این کدها نسبت به یکدیگر متعامدند و می‌توانند به‌عنوان کدهای یکتای کاربران متفاوت در نظر گرفته شوند.

می‌شود که قابلیت کنترل سطح روشنایی را خواهد داشت. چون در این حالت یک سمبل PWM شامل چندین سمبل OFDM است، سیگنال PWM کندتر از سیگنال OFDM خواهد بود. مزیت اصلی روش فوق محدود نشدن نرخ ارسال به فرکانس PWM بوده و می‌توان از کل رنج دینامیکی عملکرد خطی LED استفاده نمود.

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی سامانه VLC مبتنی بر OFDM-CDMA

بلوک دیاگرام مفهومی سامانه VLC مبتنی بر OFDM-CDMA در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام سامانه OFDM-CDMA مبتنی بر VLC.

در سمت فرستنده، رشته بیت داده‌های کاربر به وسیله کد یکتای آن کدگذاری می‌شود. طول دنباله این کد  $N/2$  است.  $N$  برابر با طول FFT تعریف می‌شود. مبدل سریال به موازی، دنباله چپ‌های کد را دریافت و در خروجی به‌طور موازی به‌عنوان زیرحامل‌های یک سمبل OFDM قرار می‌دهد. در ادامه توسط بلوک تقارن هرمیتی،  $N/2$  چپ دیگر تولید شده و به بلوک IFFT برای انجام تبدیل فوریه معکوس اعمال می‌شود. بدین ترتیب  $N$  زیرحامل در خروجی تولید می‌شود. بلوک موازی به سریال این زیرحامل‌ها را در حوزه فرکانس در کنار یکدیگر قرار می‌دهد. پیشوند دوری ( $CP^1$ ) جهت حذف ISI در گیرنده به مدار اضافه شده است. در ادامه بلوک Flip-OFDM قرار گرفته تا سیگنال مثبت برای مدولاسیون شدت نور تولید شود. سپس بلوک کنترلر سطح روشنایی در مدار گنجانده شده تا سیگنال ارسالی را در سطح روشنایی مورد نظر قرار دهد. ده سمبل متوالی OFDM به صورت یک گروه در نظر گرفته می‌شود. متناسب با سطح روشنایی

<sup>2</sup> Digital to Analogue Converter

<sup>3</sup> Photo Detector

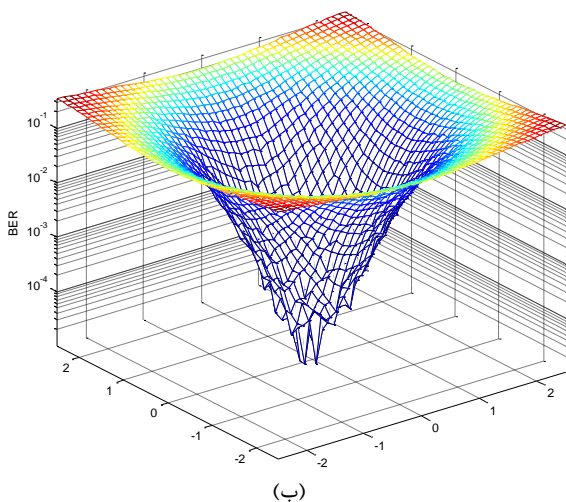
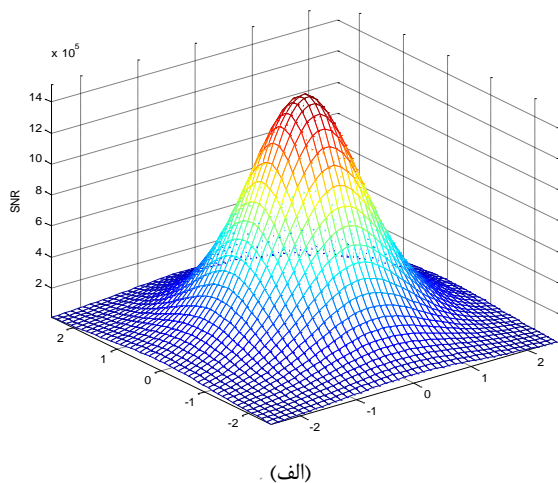
<sup>1</sup> Cyclic Prefix

## ۵- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

روی کیفیت سیگنال دریافتی با معیار BER را نشان می‌دهد. روند معیار BER نشان داده شده در نمودار نزولی است. زیرا با افزایش مقدار کیفیت سیگنال دریافتی بهبود می‌یابد. این روند به تعداد کاربران و نرخ ارسال وابسته نیست بلکه به شدت روشنایی وابسته است. برای رسیدن به نرخ بیت بالاتر همچنین افزایش تعداد کاربران با نرخ خطای بیت  $10^{-5}$  نسبت به مرجع [۱۸] تعداد چهار آزمایش مختلف انجام شد.

در آزمایش اول تعداد کاربران ۴ و نرخ ارسال بیت ۴ Mb/s فرض شده است. با نسبت SNR در حدود ۸ dB احتمال نرخ خطای بیت تقریباً  $10^{-5}$  را نتیجه می‌دهد که به هر کاربر یک مگا بیت نرخ ارسال اختصاص داده خواهد شد.

در آزمایش دوم با ثابت نگه داشتن تعداد کاربران در حدود ۴، نرخ ارسال را تا ۲۰ Mb/s با نرخ ارسال تخصیصی هر کاربر ۵ Mb/s افزایش داده که باعث افت عملکرد سامانه و افزایش BER شده و با مقداری افزایش SNR در حدود ۲۵ dB چالش برطرف می‌شود.



شکل (۳): الف. توزیع سطح توان و ب. کیفیت سیگنال دریافتی (نمایش BER در نقاط مختلف اتاق) برای تک لامپ در مرکز سقف اتاق.

در این بخش به شبیه‌سازی سامانه VLC مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی با توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل پرداخته شده است. با ارائه نتایج شبیه‌سازی عملکرد الگوریتم پیشنهادی سنجیده می‌شود. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌ها در برنامه MATLAB انجام گرفته است.

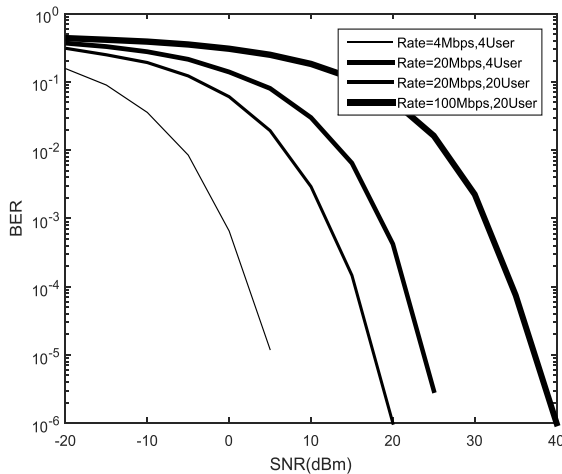
در این شبیه‌سازی دو حالت برای نصب لامپ LED در نظر گرفته شده است. حالت اول نصب یک لامپ در مرکز سقف مطابق شکل (۳- الف) و حالت دوم نصب ۴ لامپ در ۴ گوشه سقف مطابق شکل (۴) در فضای بسته‌ای به ابعاد  $5 \times 5 \times 3$  متر در نظر گرفته شده است. در حالت اول ۴ کاربر به‌طور هم‌زمان که هر کدام دارای نرخ ارسال ۱۰ Mb/s می‌باشند جهت استفاده از کانال VLC در نظر گرفته شده است. سطح توان سیگنال دریافتی به سطح توان نویز (SNR) و همچنین نرخ خطای بیت<sup>۱</sup> دریافتی در کف اتاق به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است SNR در محل نصب لامپ بیشینه است. در نتیجه BER در این نقطه کمینه می‌شود. با فاصله گرفتن از محل نصب لامپ، افت شدید SNR رخ می‌دهد. این افت کاملاً وابسته به مقدار روشنایی دریافتی در هر نقطه از اتاق است. افت SNR در نقاط مذکور منجر به افزایش خطا در میزان ارسال اطلاعات شده و در نتیجه BER در نقاط کناری اتاق افزایش می‌یابد.

حالت دوم: شکل (۴) اثر افزایش تعداد لامپ‌های LED نصب شده در سطح اتاق را نشان می‌دهد. اگر لامپ‌ها در فاصله‌های مساوی یک متری از یکدیگر نصب شوند، توان یکنواخت‌تری در سطح اتاق توزیع خواهد شد. اگر چه در نقطه مرکزی اتاق SNR برابر سناریوی قبلی نیست ولی در نقاط پراکندگی اتاق، بهبود عملکرد انتظار می‌رود. در نتیجه با کاهش BER در نقاط پراکنده اتاق، کاربر قابلیت جابه‌جایی بیشتری در سطح اتاق داشته و کیفیت مناسب انتقال داده بهبود خواهد یافت. دلایل استفاده از چهار لامپ LED جهت ارتباط VLC مطلوب شامل موارد زیر است:

۱- روشنایی اتاق، ۲- مخابره اطلاعات بهتر، ۳- جلوگیری از بروز چالش احتمالی سایه و ۴- جلوگیری از قطع شدن مسیر نور مستقیم LED. امروزه به ندرت از یک لامپ جهت روشنایی فضای یک اتاق یا سالن استفاده می‌شود؛ بنابراین می‌توان در فضای محدود از چند لامپ که نتیجه آن ارتباط توزیع شده باکیفیت بالاتر در سطح اتاق است را مد نظر قرار داد.

شکل (۵) اثر تغییرات تعداد کاربرانی که به‌طور هم‌زمان از کانال VLC استفاده می‌کنند و همچنین اثر تغییر نرخ ارسال کل کانال بر

<sup>۱</sup> Bit Error Rate (BER)



شکل (۵): اثر تغییر تعداد کاربران و نرخ ارسال کلی.

در جدول (۱) مقادیر عددی تغییرات احتمال خطا با افزایش تعداد کاربران و نرخ ارسال مقایسه شده است (اعداد  $10^{-1}$  تا  $30$  dB بیانگر قدرت سیگنال و حروف  $u$  و  $R_b$  به ترتیب بیانگر تعداد کاربر و نرخ بیت بر حسب مگابیت در ثانیه می‌باشد).

جدول (۱): مقایسه تغییرات احتمال خطا بر حسب تعداد کاربران و نرخ ارسال.

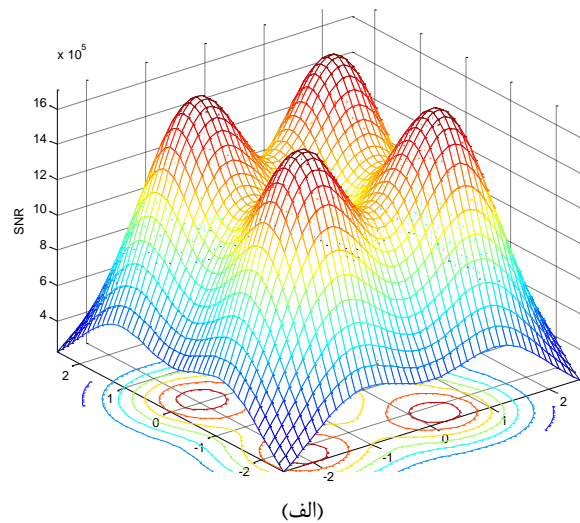
SNR(dB)	-10	0	10	20	30
BER( $u=4, R_b=1$ )	0.035	0.0006	$\ll 10^{-6}$	$\ll 10^{-6}$	$\ll 10^{-6}$
BER( $u=4, R_b=5$ )	0.2	0.21	0.03	0.0004	$\ll 10^{-6}$
BER( $u=20, R_b=1$ )	0.19	0.1	0.003	$\ll 10^{-6}$	$\ll 10^{-6}$
BER( $u=20, R_b=5$ )	0.38	0.3	0.24	0.11	0.0022

با توجه به نتایج جدول (۱) استدلال می‌شود که با افزایش SNR کیفیت سیگنال بهبود یافته و احتمال خطای بیت کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد کاربران از ۴ به ۲۰ کاربر و نرخ ارسال یکسان برای هر کاربر در حالت  $1$  Mb/s یا نرخ ارسال یکسان  $5$  Mb/s، BER افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش نرخ ارسال از ۱ به  $5$  Mb/s و تعداد کاربر یکسان برای ۴ کاربر و افزایش نرخ ارسال از ۱ به  $5$  Mb/s و تعداد کاربر یکسان برای ۲۰ کاربر احتمال خطای سامانه افزایش می‌یابد. در ازای افزایش SNR تا  $40$  dB این چالش برطرف خواهد شد. همچنین توجه به این نکته ضروری است که سامانه FLIP OFDM CDMA از لحاظ تغییر نداشتن در افزایش و کاهش توان روشنایی نسبت به DC OFDM CDMA عملکرد بهتری دارد.

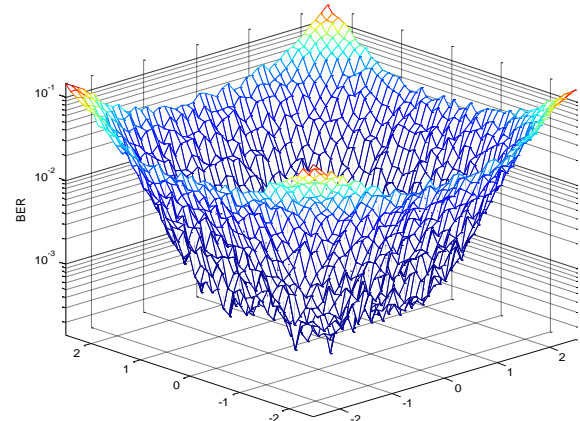
در مرجع [۱۸]، روش CDMA نوری جهت افزایش کاربران با استفاده از کد والش- هادامارد در سامانه VLC انجام شده است. این مرجع موضوع تداخل (ISI) به‌عنوان یک چالش مطرح شده است که با غلبه بر آن می‌توان تعداد کاربران را به‌طور قابل ملاحظه افزایش داد. نتایج حاصله از این روش با الگوریتم پیشنهادی در جدول (۲) مقایسه شده است.

در آزمایش سوم با ثابت نگه داشتن نرخ ارسال کل سامانه در حدود  $20$  Mb/s، تعداد کاربران را از ۴ کاربر به ۲۰ کاربر با نرخ ارسالی هر کاربر برابر  $1$  Mb/s افزایش داده که باعث افت عملکرد سامانه می‌شود. دقت شود که نرخ ارسال کل  $20$  Mb/s است و تعداد کاربران ۴ کاربر است. یعنی هر کاربر دارای نرخ ارسالی برابر  $5$  Mb/s است. اگر تعداد کاربران ۲۰ و نرخ ارسال کل  $20$  Mb/s فرض شود نرخ ارسال هر کاربر  $1$  Mb/s خواهد شد. به عبارت دیگر با افزایش تعداد کاربران در کانال مشترک، نرخ ارسالی هر کاربر کاهش می‌یابد. همچنین مقدار BER آن نیز کاهش خواهد یافت. یعنی در ازای افزایش کاربر و کاهش BER نرخ ارسال خواهد یافت.

در آزمایش چهارم تعداد کاربران برابر ۲۰ کاربر ثابت فرض شده است. جهت افزایش نرخ ارسال کل از ۲۰ به  $100$  Mb/s، می‌بایست مقدار SNR از ۲۰ به  $40$  dB افزایش پیدا کند. در نتیجه با نرخ ارسال  $5$  Mb/s برای هر کاربر مقدار نرخ خطای بیت به  $10^{-5}$  منتج شده است که در مجموع نسبت به روش CDMA نوری بهبود ده درصدی مشاهده می‌شود [۱۸].



(الف)



شکل (۴): (الف) توزیع سطح توان برای ۴ لامپ جاسازی شده در سقف اتاق و (ب) نمایش BER برای ۴ لامپ در نقاط مختلف اتاق.

- [6] M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, and D. Knipp, "BVisible Light Communication Using OFDM," In Proc. IEEE 2nd Int. Conf. Testbeds Res. Infrastructures Develop. Netw. Communities, Barcelona, Spain, pp. 129–134, Mar. 1–3, 2006.
- [7] M. Guerra-Medina, O. Gonzalez, B. Rojas-Guillama, F. D. J. A. Martin-Gonzalez, and J. Rabadan, "Ethernet-OCDMA System for Multi-User Visible Light Communications," Electron. Lett., vol. 48, no. 4, pp. 227–228, 2012.
- [8] M. Noshad and M. Brandt-Pearce, "High-speed Visible Light Indoor Networks Based on Optical Orthogonal Codes and Combinatorial Designs," In Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom), pp. 2436-2441, 2013.
- [9] S. Hara and R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA," IEEE Commun. Mag., vol. 35, no. 12, pp. 126–133, 1997.
- [10] S. D. Dissanayake, and J. Armstrong, "Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems," J. of Lightwave Technology vol. 31, no. 7, pp. 1063-1072, 2013.
- [11] H. Qian, S. C. Dai, S. Zhao, S. Z. Cai and H. Zhang, "A robust CDMA VLC System Against Front-End Nonlinearity," IEEE Photonics J., vol.7, no. 5, pp.1-9, 2015.
- [12] J. Armstrong and A. Lowery, "Power Efficient Optical OFDM," Electron. Lett., vol. 42, no. 6, pp. 370–372, Mar. 2006.
- [13] I. Stefan, H. Elgala, and H. Haas, "Study of Dimming and LED Nonlinearity for ACO-OFDM Based VLC Systems," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 990-994, 2012.
- [14] N. Fernando, Y. Hong, and E. Viterbo, "Flip-OFDM for Optical Wireless Communications," IEEE Information Theory Workshop (ITW), pp. 5-9, 2011.
- [15] Farahneh, Hasan, Fatima Hussain, and Xavier Fernando. "Performance Analysis of Adaptive OFDM Modulation Scheme in VLC Vehicular Communication Network in Realistic Noise Environment," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, DOI: 10.1186/s13638-018-1258-3, 2018.
- [16]
- [17] H. Elgala, and T. D. Little, "Reverse Polarity Optical-OFDM (RPOOFDM)," Dimming Compatible OFDM for Gigabit VLC Links," Optics Express, vol. 21, no. 20, pp. 24288-24299, 2013.
- [18] J. G. Proakis and M. Salehi, "Communication Systems Engineering," Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [19] Qiu. Yang, Chen. Shuyi, Chen. Hsiao-Hwa and Meng. Weixiao, "Visible Light Communications Based on CDMA Technology," IEEE Wireless Communications, vol.25, no.2, pp.178-185, 2018.

جدول (۲): مقایسه BER حاصل از CDMA نوری

با روش OFDM-CDMA با  $u=4$ .

SNR(dB)	0	5	10	20	
VLC-CDMA	0.035	0.2	$2 \times 10^{-6}$	$\ll 10^{-6}$	
VLC-OFDM-CDMA	0.0006	$10^{-6}$	$\ll 10^{-6}$	$\ll 10^{-6}$	

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا چند روش برای تبدیل سمبل تولیدی OFDM به سیگنال حقیقی و مثبت، جهت استفاده در مدولاسیون شدت نور معرفی شد. در VLC علاوه بر مخابره اطلاعات باید روشنایی محیط نیز تأمین شود. روش‌های تنظیم سطح روشنایی ارائه گردید. در ادامه مقاله به ارائه لینک مخابراتی VLC با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر OFDM-CDMA پرداخته شد. از مزایای هر دو روش CDMA و OFDM به‌طور هم‌زمان استفاده شد. از روش CDMA جهت تخصیص داده به چند کاربر و تفکیک آن در گیرنده استفاده شد. به‌طور هم‌زمان از روش OFDM جهت انتقال داده و مقابله با ISI به‌طور بهینه استفاده شد. بلوک دی‌گرام سامانه VLC پیشنهادی مبتنی بر OFDM-CDMA به‌طور کامل تشریح گردید. در نهایت نتایج شبیه‌سازی این سامانه در مقایسه با سامانه CDMA نوری با در نظر گرفتن اثر تعداد کاربران از ۱۴ به ۲۰ کاربر، افزایش نرخ ارسال از ۵ به ۲۰ Mb/s و سیگنالینگ‌های متفاوت، با بهبود ده درصدی ثبت شد.

## ۷- مراجع

- [1] Ji. Ruonan, Wa. Shaowei, Liu. Qingquan and lu. Wei, "High-speed Visible Light Communications: Enabling Technologies and State of the Art," Applied Sciences, vol. 8, no.4, pp.139-151, 2018.
- [2] Y. Zheng and M. Zhang, "Visible Light Communications—Recent Progresses and Future Outlooks," In IEEE Symp. on Photonics and Optoelectronic (SOPO), Chengdu, China, 2010.
- [3] O. Gonzalez, R. Perez-Jimenez, S. Rodriguez, J. Rabadan, and A. Ayala, "OFDM Over Indoor Wireless Optical Channel," IEEE Proc. Optoelectron., vol. 152, no. 4, pp. 199–204, 2005.
- [4] M. Bayat, M. H. Madani, and S. M. J. Razavi, "A Combined Improved Algorithm to Estimating The Delay of Sky Waves in Loran C Receiver," J. of Electronical & Cyber Defence, vol. 2, no. 4, pp. 55-63, 2014.
- [5] M. Bayat, M. H. Madani "A New Algorithm For Synchronous Continuous Wave Interference Cancellation in Loran Navigation System," J. of Electronical & Cyber Defence, vol. 4, no. 2, pp. 23-38, 2016.

---

**Introducing an OFDM-CDMA Hybrid Algorithm Based on the Multiple Access Technique to  
Improve Indoor Visible Light Communication Link**

M. Bayat\*, R. Samadi, H. Abdollahi

\*Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science & Technology

(Received: 23/10/2019, Accepted: 01/02/2020)

**ABSTRACT**

*Transmission of information through indoor optical telecommunication systems is one of the safe methods against eavesdropping due to the non-emission of radio waves. This method is one of the jamming-resistant techniques for military applications. In this paper, a hybrid algorithm using OFDM-CDMA based on the multiple access technique is presented. This algorithm improves the efficiency of visible light communications (VLC) and increases the number of indoor users. The simulation results show that the BER parameter for 4 users improves from 0.035 to 0.0006 when the SNR is 0dB. Also, the bit transmission rate for 4 users increases from 1 MB/s to 5 MB/s for SNR= 30 dB. Besides, the number of users can increase from 4 users to 20 users for the same bit rate and BER by using the proposed hybrid algorithm. These improvements were made in exchange for increasing the complexity of the system due to the wide spectrum.*

**Keywords:** Visible Light Communication (VLC), Code-Division Multiple Access (CDMA), Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Light Emitting Diode (LED).

---

\* Corresponding Author Email: m\_bayat@ssau.ac.ir