

بررسی تاثیرات شرایط جوی و مقادیر مختلف بودجه توان فرستنده بر نرخ خطای بیت، نرخ ارسال داده و سیگنال به نویز در یک کانال مخابرات نوری فضای آزاد با دود و مه

مهدی اکبری^۱، سعید علیائی^۲

mahdiakbari@sru.ac.ir

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران

^۲ نویسنده مسئول، استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران.

s_olyaee@sru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

چکیده

عملکرد یک سامانه مخابرات نوری فضای آزاد، به شدت توسط اثرات محیطی از جمله شرایط جوی و وجود رطوبت و مه آلود بودن کانال، تحت تأثیر قرار می گیرد. در این مقاله، عملکرد مدولاسیون های محل پالس (PPM)، مدولاسیون غیر بازگشت به صفر (NRZ) و مدولاسیون بازگشت به صفر (RZ) در نرخ سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت و در شرایط مختلف جوی از جمله با حضور مه، مقایسه می شود. این سامانه با استفاده از یک منبع نور به طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، در نرم افزار MATLAB و با انتخاب مدل خط انتقال اطلاعات کیم با قابلیت های رؤیت مختلف و با استفاده از روابط تحلیلی مخابرات نوری فضای آزاد، شبیه سازی شده است. اثرات تضعیف کم، متوسط و زیاد محیطی و توان های مختلف فرستنده بر نرخ خطای بیت و نرخ سیگنال به نویز برای هر سه مدولاسیون بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که مدولاسیون PPM، مؤثرترین مدولاسیون در مقایسه با دیگر مدولاسیون ها بوده و عملکرد بهتری در شرایط مختلف تضعیف جوی از خود در مقادیر نرخ خطای بیت و سیگنال به نویز، در سه حالت تضعیف محیطی کم، متوسط و زیاد و در توان فرستنده ۱ و ۵ میلی وات نشان می دهد. نوآوری این پژوهش ارائه یک سامانه تخصیص توان بلادرنگ با تأخیر کم و دقت نزدیک به روش تحلیلی است که به افزایش نرخ داده دریافتی و بهبود عملکرد سیستم در شرایط تضعیف مختلف کمک می کند

واژه های کلیدی: مخابرات نوری فضای آزاد، تضعیف، مدولاسیون، نرخ خطای بیت، نرخ سیگنال به نویز

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، فناوری مخابرات نوری فضای آزاد (FSO) به عنوان یک فناوری مخابرات بی‌سیم مقرون‌به‌صرفه برای شبکه‌های بی‌سیم با نرخ چند گیگابیتی معرفی شده و توجه زیادی را به خود جلب کرده است. پژوهش‌های زیادی برای بهبود نرخ ارسال داده، برای این فناوری انجام شده است که مدیریت منابع از جمله توان در این سامانه‌ها یکی از راه‌حل‌های حیاتی برای رسیدن به یک سامانه‌ی مخابراتی با سرعت بالای انتقال داده است [۶-۱]. در همین راستا Zhou و همکاران مسئله‌ی بهینه‌سازی توان عملیاتی شبکه FSO را تحت محدودیت بودجه توان معین و تعدادی فرستنده و گیرنده‌ی FSO بررسی کردند [۷]. این موضوع به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح و مختلط (MINLP) بیان شده است. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های پیشنهادی از طرح غیر مشارکتی و یک پروتکل انتخاب رله با دقت قابل توجهی از طریق شبیه‌سازی بهتر عمل می‌کنند [۷]. در تحقیق دیگری Chaudhar و همکاران بر روی سیستم انتقال نوری فضای آزاد تحت تأثیر عوامل تضعیف جوی مختلف متمرکز شدند. در این کار، یک داده ۱۰ گیگابیت بر ثانیه از طریق پیوند نوری فضای آزاد ۱ کیلومتری منتقل می‌شود و عملکرد بر اساس نمودارهای SNR، BER و چشمی اندازه‌گیری می‌شود [۸]. این محققان در تحقیق دیگری، در ارتباطات بین ماهواره‌ای برای انجام بررسی‌های طرح قطبش با ترکیب طرح چندگانه تقسیم طول‌موج متراکم (DWDM) در سیستم ارتباط بین ماهواره‌ای متمرکز تحقیق کردند. در این طرح، کل انتقال داده ۱۲۰ گیگابیت بر ثانیه به‌دست آمده است [۹]. همچنین Chaudhary و همکاران برای انجام بررسی‌های طرح قطبش با ترکیب طرح چندگانه تقسیم طول‌موج متراکم (DWDM) در سیستم ارتباط بین ماهواره‌ای تحقیقاتی را انجام دادند. در این تحقیق، نتایج نیز با تأثیر طرح‌های مدولاسیون RZ و NRZ گزارش شده است [۹]. این محقق و همکارانش در تحقیق دیگری بر روی انتقال هم‌زمان چهار کانال مستقل مبتنی بر OFDM کار کردند که هر کانال از ۲۰ تا ۴۰ گیگابیت بر ثانیه داده را حمل می‌کنند.

در نهایت، عملکرد سیستم پیشنهادی تحت تأثیر تلاطم‌های جوی مختلف مانند مه سبک، مه رقیق و مه غلیظ نیز ارزیابی شده است [۱۰]. در پژوهش دیگری، بر روی اتخاذ رمزگذاری وارونگی علامت جایگزین (AMI) برای شبکه‌های Ro-FSO مبتنی بر تقسیم حالت (MDM) تحقیق شده است. در این پژوهش، دو کانال مستقل وجود داشت که هر کدام، داده‌های ۲/۵ تا ۱۰ گیگابیت بر ثانیه را در ۱۴ کیلومتر پیوند نوری فضای آزاد (FSO) منتقل می‌کردند [۱۱]. محققان از طرح‌های PDM و OCDMA برای طراحی یک پیوند Ro-FSO با سرعت ۵۰ گیگابیت بر ثانیه استفاده کردند. در این تحقیق ده کانال، هر کدام با ۵ Gbps داده، از طریق پیوند FSO 3500 m منتقل می‌شوند [۱۲].

در پژوهش دیگری، Amphawan و همکاران یک طرح مالتی پلکسی تقسیم طول‌موج 2×2 کانال (MWD) برای یک سیستم اپتیکی رادیویی بیش از فضای آزاد (Ro-FSO) ارائه کردند. نتایج عددی نشان می‌دهد که بهبود فاصله قابل دستیابی برای سیستم MWD Ro-FSO در همان سطح BER در مه متوسط و سنگین مشهود است [۱۳]. همین محققان با فناوری اپتیک رادیویی ظرفیت شبکه‌های Ro-FSO را با یک طرح مالتی پلکسی تقسیم حالت نوری (MDM) افزایش دادند [۱۴]. این محققان در پژوهش دیگری انتقال موازی چهار کانال رادیویی مستقل مبتنی بر OFDM، بررسی شد. در این طرح هر کانال، داده‌های ۲۰ گیگابیت بر ثانیه را برای تحقق ۸۰ گیگابیت بر ثانیه حمل می‌کنند. عملکرد سیستم پیشنهادی تحت تأثیر سطوح مختلف مه، نتایج خوبی را ارائه می‌کرد [۱۵].

همچنین Sharma و همکاران، طراحی جدید مبتنی بر ادغام سیستم OFDM و FSO را پیشنهاد دادند. در این پژوهش، پیوند FSO با نرخ انتقال بالا بهبود یافت [۱۶]. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ترکیب OFDM-FSO در مقایسه با سامانه‌های FSO سنتی، به‌طور قابل توجهی پیوند فضای آزاد را با SNR و BER قابل قبول بهبود می‌بخشد [۱۶]. همین محققان در پژوهش دیگری یک سیستم فیبر هیبریدی ۳۲ کاناله ۳۲۰ گیگابیت بر ثانیه را با استفاده از مدولاسیون کلید

$$P_t \exp(-\alpha L) = P_r$$

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{if } V > 50\text{Km} \\ 1.3 & \text{if } 6\text{Km} < V < 50\text{Km} \\ 0.16V + 0.34 & \text{if } 1\text{Km} < V < 6\text{Km} \\ V - 0.5 & \text{if } 0.5\text{Km} < V < 1\text{Km} \\ 0 & \text{if } 0.5\text{Km} < V \end{cases} \quad (2)$$

که در آن $V(\text{Km})$ بیشینه برد قابل دید، λ_1 طول موج پرتو نور برحسب نانومتر و λ_0 طول موج مرجع به میزان 1550nm است. همچنین مقدار q به V وابسته است. ضریب تضعیف محاسبه شده از مدل Kim در مرحله بعد برای محاسبه افت مسیر کانال نوری استفاده شده است. این ضریب مطابق قانون بیر-لامبرت، در محاسبه توان دریافتی به کار می رود که در آن P_t توان فرستنده، P_r توان دریافتی و L طول لینک است. توان دریافتی P_r سپس برای محاسبه جریان دیود نوری و در ادامه، نسبت سیگنال به نویز در رابطه (۱) مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجاکه نرخ خطای بیت در روابط (۴) تا (۶) تابعی از SNR است، بنابراین ضریب تضعیف جوی به صورت غیرمستقیم اما بنیادی در محاسبه BER نیز اثرگذار است. برای بررسی اثرات شرایط جوی بر عملکرد کانال FSO، شدت تضعیف کانال در سه سطح کم، متوسط و زیاد تعریف شده است. این سطوح بر اساس ضریب تضعیف α (km^{-1}) محاسبه شده از رابطه مدل Kim [۴] و قابلیت رؤیت V تعیین می شوند. به طور مشخص، سطح تضعیف کم با α بین ۰ تا ۰/۱ و قابلیت رؤیت بیش از ۶ کیلومتر، سطح متوسط با α بین ۰/۱ تا ۰/۵ و قابلیت رؤیت بین ۲ تا ۶ کیلومتر، و سطح تضعیف زیاد با α بالای ۰/۵ و قابلیت رؤیت کمتر از ۲ کیلومتر تعریف شده است. این مقادیر عددی جایگزین توصیف های کیفی قبلی شده و در شبیه سازی های BER و SNR به کار می روند. با این تعریف، عملکرد مدولاسیون های NRZ، RZ و PPM تحت شرایط مختلف تضعیف جوی به طور دقیق و عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

محوشدگی در کانال های FSO عموماً به تغییرات شدت سیگنال نوری عبوری از جبهه های مختلف هوا اطلاق می شود. یکی از اولین مدل های معرفی شده برای این پدیده که به دلیل سادگی بسیار پرکاربرد بوده است، مدل لگاریتم نرمال است. این مدل تنها برای محوشدگی های ضعیف

OFF کارآمد با استفاده از طرح چندگانه تقسیم طول موج متراکم ترکیبی پیشنهاد کردند. در این تحقیق اثر متغیر تلاطم اقلیمی با در نظر گرفتن شرایط آسمان صاف، مه سبک، مه متوسط و شرایط مه متراکم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۷]. در تحقیق دیگری Upadhyay و همکاران، یک سیستم انتقال چند حالتی تقسیم کد نوری رمزگذاری دامنه طیف مقرون به صرفه (SAC-OCDMA) را با ادغام طرح چندگانه تقسیم حالت (MDM) به منظور انتقال ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه، بر روی لینک چند حالتی ۱۱ کیلومتر طراحی کردند. نتایج گزارش شده، انتقال موفقیت آمیز داده ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه را از طریق پیوند چند حالتی نشان می دهد [۱۸].

در این مقاله با انتخاب سه مدولاسیون مختلف شامل مدولاسیون های محل پالس، غیر بازگشت به صفر و بازگشت به صفر، اثرات تضعیف محیطی کم، متوسط و زیاد و همچنین مقادیر مختلف توان فرستنده بر نرخ سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت با مدل خط انتقال اطلاعات کیم، برای قابلیت رؤیت صفر تا ۱۰ کیلومتر در نرم افزار MATLAB بررسی و مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که در این مقایسه، مدولاسیون PPM بهترین عملکرد را در نرخ خطای بیت و نرخ سیگنال به نویز نسبت به سایر مدولاسیون ها در شرایط تعریف شده خواهد داشت.

۲. طراحی سیستم تحلیلی

کیفیت کانال FSO به شدت به شرایط جوی وابسته است. کانال FSO مطابق با شکل (۱) در شرایط مه گرفتگی دچار افت مسیر بالایی می شود. درواقع، اصلی ترین چالش برقراری یک لینک نوری بی سیم در فضای آزاد، تضعیف ناشی از جو است که در اثر جذب و یا پراکندگی توسط ذرات معلق در هوا مثل مه و یا گردوغبار رخ می دهد [۴]. تضعیف ناشی از این عوامل بر اساس قابلیت دید سنجیده می شود. در این مورد، سه مدل معرفی شده است که معروف ترین آن ها مدل کیم است. در این مدل ضریب تضعیف برحسب طول موج به صورت رابطه (۱) و (۲) تعریف می شود [۱۹]:

$$\alpha = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (1)$$

$$SNR(i) = \frac{I_p^2(i)}{\left(2 \times q_0 \times B \times (I_F(i) + I_D) + \left(\frac{4 \times K_b \times T \times B \times F_a}{R_1}\right)\right)} \quad (3)$$

نرخ خطای بیت در یک سامانه‌ی مخابرات نوری فضای آزاد برحسب مقدار سیگنال به نویز سیستم برای مدولاسیون‌های NRZ، RZ و مدولاسیون محل پالس به صورت روابط (۴) تا (۵) تعریف می‌شود. در مدولاسیون NRZ دو سطح ولتاژ مختلف، مقادیر دودویی را شامل می‌شود که ولتاژ مثبت نشان‌دهنده ۱ و سطح ولتاژ منفی نشان‌دهنده ۰ است که BER در این مدولاسیون به صورت رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود (در این رابطه، erfc تابع خطای مکمل است) [۸]:

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (4)$$

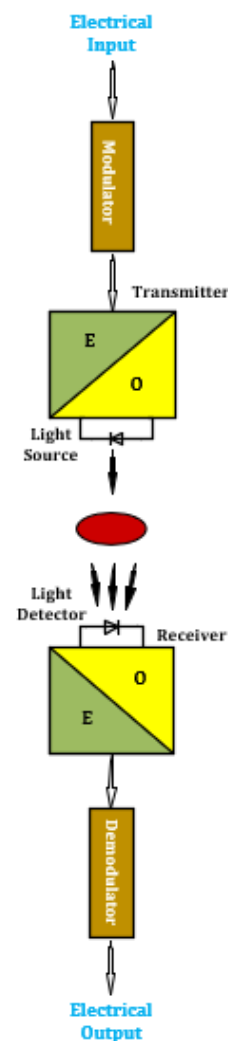
$$\text{BER}_{NRZ}(i) = 0.5 \times \text{erfc}(0.353 \times \sqrt{\text{SNR}(i)})$$

مدولاسیون RZ با استفاده از سه سطح ولتاژ کار می‌کند. ولتاژ مثبت به نمایش "۱"، ولتاژ منفی به نمایش "۰" و ولتاژ صفر بیان‌کننده حالت "هیچ‌کدام" است. در این مدولاسیون، BER به صورت رابطه‌ی (۵) تعریف می‌شود [۸]:

$$\text{BER}_{RZ}(i) = 0.5 \times \text{erfc}(1.15 \times \sqrt{\text{SNR}(i)}) \quad (5)$$

مدولاسیون PPM (مدولاسیون محل پالس) را به راحتی می‌توان از PWM به دست آورد. اگر PWM و نحوه تولید آن در نظر گرفته شود، مشاهده می‌شود که هر پالس دارای یک لبه جلویی و یک لبه عقبی است (مانند هر پالس دیگر). در این مورد سرعت تکرار لبه جلویی ثابت است، اما این سرعت برای لبه عقبی ثابت نیست. محل این لبه بستگی به عرض پالس دارد و این عرض، با دامنه سیگنال در آن لحظه تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که لبه عقبی پالس‌های PWM مدوله‌ی محل شده است و روش به دست آوردن PPM بلافاصله روشن می‌شود. اگر از رشته پالس‌هایی که به دست می‌آید دیفرانسیل گرفته شود، رشته پالس دیگری حاصل می‌شود که از پالس‌های مثبت باریک مربوط به لبه جلویی و پالس‌های منفی متعلق به لبه عقبی حاصل شده است. اگر محل لبه عقبی پالس‌های مدوله نشده

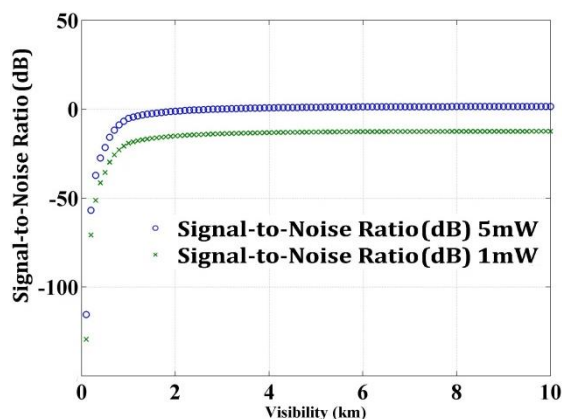
کاربرد دارد و نتایج عملی در اغتشاشات شدید با این مدل هم‌خوانی ندارد. به همین دلیل در طی سال‌ها، مدل‌های متعددی معرفی شد تا در گستره‌ی بیشتری از اغتشاشات معتبر باشند. از جمله معروف‌ترین این مدل‌ها مدل گاما-گاما است که در سال‌های اخیر برای بررسی عملکرد FSO به کار برده شده است. این مدل بر اساس یک توزیع دو پارامتری تشکیل شده است و نوسانات تابشی را به صورت حاصل ضرب محوشدگی با معیار کوچک و محوشدگی با مقیاس بزرگ در نظر می‌گیرد که هر کدام با یک توزیع گاما و به صورت مستقل از هم تعریف شده‌اند.



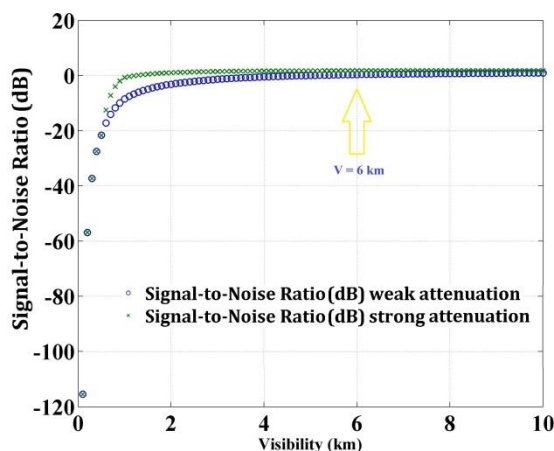
شکل ۱. ساختار کلی سیستم FSO

در یک سامانه‌ی مخابرات نوری فضای آزاد مقدار سیگنال به نویز برحسب جریان فوتون در گیرنده، دما و جریان تاریکی به صورت رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود [۴]:

بر اساس شکل (۲)، در شرایطی که قابلیت رؤیت بیش از ۶ کیلومتر باشد، مشاهده می‌شود که مقادیر SNR برای توان‌های مختلف تقریباً برابر هستند. علت این موضوع به رفتار ضریب تضعیف کانال در شرایط محیطی با قابلیت رؤیت بالا بازمی‌گردد. طبق مدل تضعیف Kim ضریب تضعیف α با افزایش قابلیت رؤیت V کاهش می‌یابد و در محدوده $V > 6$ km تغییرات آن بسیار کم است. با توجه به رابطه SNR (رابطه ۳)، هنگامی که ضریب تضعیف بسیار کوچک باشد، اثر افزایش توان فرستنده بر جریان دیود نوری و در نتیجه SNR محدود می‌شود، به‌طوری‌که مقادیر SNR برای توان‌های ۱ mW و ۵ mW تقریباً یکسان خواهد بود. بنابراین در این محدوده، افزایش توان فرستنده اثر محسوسی بر SNR ندارد و خطوط مربوط به توان‌های مختلف روی هم منطبق می‌شوند.



شکل ۲. تغییرات سیگنال به نویز برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده با مدل Kim



شکل ۳. تغییرات سیگنال به نویز برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف

به‌عنوان جابه‌جایی مربوط به سطح سیگنال صفر در نظر گرفته شود، لبه عقبی پالس‌های دیگر نسبت به آن زودتر یا دیرتر خواهد رسید. یعنی دارای جابه‌جایی زمانی غیر صفر خواهد بود. این جابه‌جایی زمانی متناسب با مقدار لحظه‌ای ولتاژ سیگنال است. در این مدولاسیون، BER به‌صورت رابطه‌ی (۶) [۴، ۸] محاسبه می‌شود. همچنین مقادیر نرخ ارسال داده مطابق با رابطه‌ی (۷) [۵] برحسب تعداد بیت‌ها به ازای یک نمونه، پهنای باند و نرخ سیگنال به نویز به تداخل، محاسبه می‌شود [۴، ۵، ۸]:

$$BER_{PPM}(i) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(0.44 \times \sqrt{SNR(i) \times (m/2) \times \log(2 \times m)}) \quad (6)$$

$$\text{نرخ ارسال داده} = N_{os} \times B \times \log_2(1 + SINR_k) \quad (7)$$

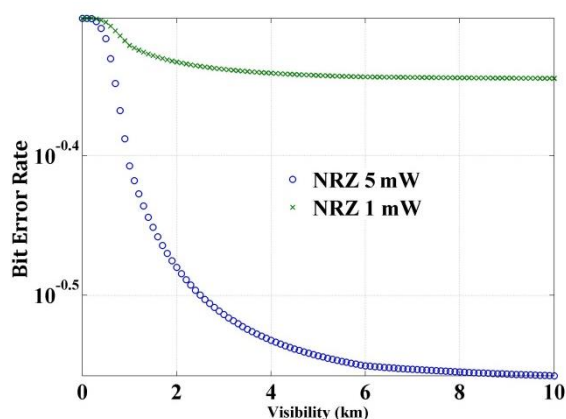
۳. شبیه‌سازی نرخ خطای بیت در وضعیت مه و دود

در این قسمت، مدل‌سازی خط انتقال اطلاعات و پیاده‌سازی روابط تحلیلی سامانه‌ی مخابرات نوری فضای آزاد، با شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب نشان داده شده است. در شکل (۲) تغییرات سیگنال به نویز برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده نشان داده شده است. بنابر این شکل، با افزایش قابلیت رؤیت نرخ سیگنال به نویز افزایش می‌یابد.

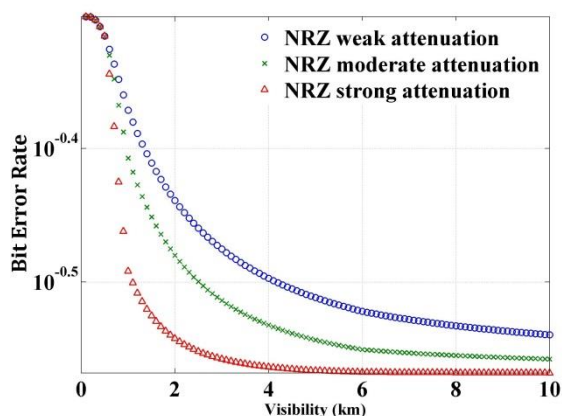
جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی در متلب

پارامتر	مقدار	واحد
طول موج مرکزی	۱۵۵۰	nm
طول خط انتقال	۱/۵	Km
توان فرستنده	۱-۵	mW
قطر آشکارساز	10^{-5}	m
واگرایی پرتو	10^{-3}	rad
بار الکترون	$1/6 \times 10^{-19}$	c
پهنای باند	۱	GHz
ضریب پاسخ	۱/۶۸	A/W
جریان تاریکی	10^{-8}	A
دما	۲۹۸	K
ثابت بولتزمن	$1/38 \times 10^{-23}$	J/K
عدد نویز	۱	--
مقاومت بار	۱۰	KΩ
قابلیت رؤیت	۰-۱۰	Km

مدولاسیون NRZ دارد. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف کانال برای مدولاسیون RZ در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، با افزایش توان فرستنده این نرخ کاهش می‌یابد. در این حالت تضعیف، اثر بیشتری در نرخ خطای بیت نسبت به مدولاسیون NRZ حاصل می‌شود.



شکل ۵. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده برای مدولاسیون NRZ

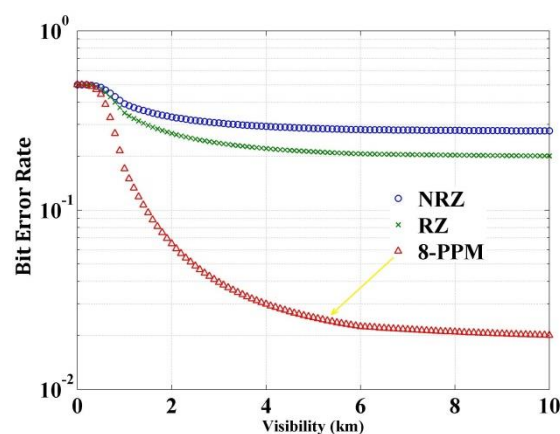


شکل ۶. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف کانال برای مدولاسیون NRZ

شکل (۳) تغییرات سیگنال به نویز را برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با قابلیت رؤیت بیش از ۶ Km، مقادیر سیگنال به نویز روی هم منطبق خواهند شد. شکل (۴) تغییرات نرخ خطای بیت را برحسب قابلیت رؤیت به ازای مدولاسیون‌های مختلف نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش قابلیت رؤیت، نرخ خطای بیت کاهش می‌یابد. در این حالت، مدولاسیون PPM بهترین عملکرد را در نرخ خطای بیت خواهد داشت.

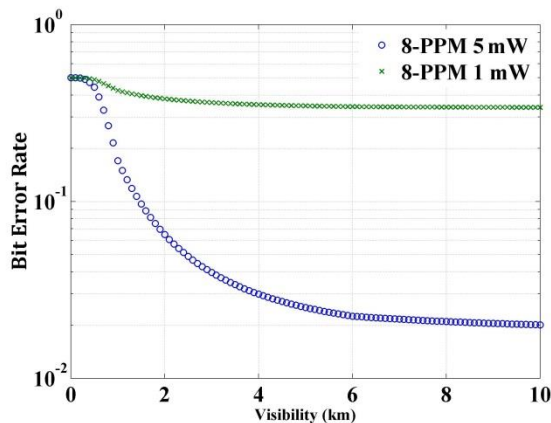
شکل (۵) تغییرات نرخ خطای بیت را برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده برای مدولاسیون NRZ نشان می‌دهد. با افزایش توان فرستنده، این نرخ کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش توان در جهت افزایش قابلیت رؤیت موجب کاهش نرخ خطای بیت می‌شود.

تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف کانال برای مدولاسیون NRZ در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۶)، با افزایش تضعیف، این نرخ کاهش می‌یابد. همانطور که مشخص است، به ازای قابلیت رؤیت بیش از ۶ Km در حالت تضعیف زیاد کانال، میزان نرخ خطای بیت ثابت می‌شود.

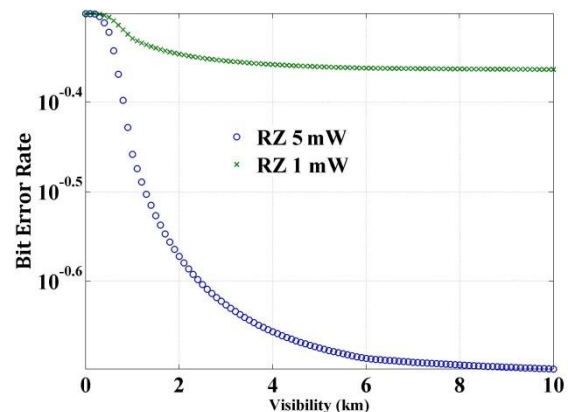


شکل ۴. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت به ازای مدولاسیون‌های مختلف در کانال با مدل Kim

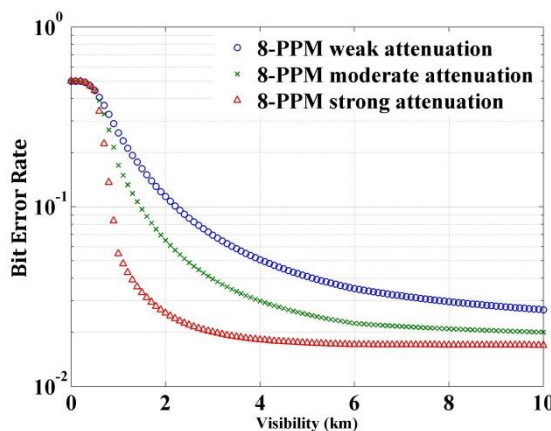
شکل (۷) تغییرات نرخ خطای بیت را برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده برای مدولاسیون RZ نشان می‌دهد که با افزایش توان فرستنده این نرخ کاهش می‌یابد. اثر افزایش توان در این مدولاسیون شباهت زیادی به



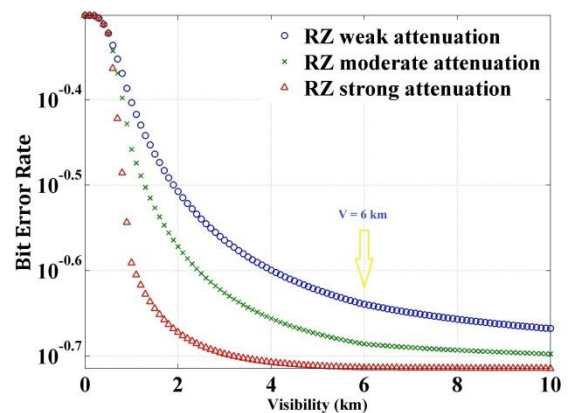
شکل ۹. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده برای مدولاسیون محل پالس



شکل ۷. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده برای مدولاسیون RZ



شکل ۱۰. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف کانال برای مدولاسیون محل پالس



شکل ۸. تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف کانال برای مدولاسیون RZ

همان‌طور که بیان شد، اغتشاش در کانال نوری فضای آزاد با دود و مه با مدل توزیع Kim تعریف می‌شود. در قسمت بعدی شبیه‌سازی، نرخ خطای بیت و نرخ بیت‌های دریافتی در گیرنده برحسب بودجه‌ی توان مورد بررسی قرار می‌گیرد و قابلیت رؤیت ۲/۲۵ Km تعریف می‌شود. مطابق با شکل (۱۱)، نرخ خطای بیت در کمترین مقدار 3.2×10^{-4} و در بیشترین مقدار ۰/۰۴۹ برای تخصیص تحلیلی، ۰/۰۴۷ برای تخصیص فازی و ۰/۰۵۱ برای تخصیص عصبی است که به ترتیب کمترین و بیشترین توان فرستنده به ازای هر روش به آن‌ها تخصیص می‌یابد.

در کانال نوری فضای آزاد با دود و مه، کمترین نرخ بیت‌های دریافتی ۱/۹۰۲ Mbps برای تخصیص فازی است. با توجه به شکل (۱۲)، در این حالت با افزایش قابلیت رؤیت، نرخ

شکل (۹) تغییرات نرخ خطای بیت را برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف توان فرستنده برای مدولاسیون محل پالس نشان می‌دهد. مطابق شکل (۹)، با افزایش توان فرستنده این نرخ کاهش می‌یابد. در این حالت مشاهده می‌شود که افزایش توان، اثر بیشتری در نرخ خطای بیت نسبت به دو مدولاسیون قبلی خواهد داشت. همچنین تغییرات نرخ خطای بیت برحسب قابلیت رؤیت با مقادیر مختلف تضعیف کانال برای مدولاسیون محل پالس در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با افزایش تضعیف، این نرخ کاهش می‌یابد. در این حالت، تضعیف کانال، اثرات بیشتری بر نرخ خطای بیت نسبت به دو مدولاسیون قبل خواهد داشت.

خطای بیت کاهش یافته و توان کمتری برای انتقال داده نیاز خواهد بود.

در این مقاله، برای هر یک از مدولاسیون‌های NRZ، RZ و PPM، تغییرات نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت بر اساس ضریب تضعیف کانال α ، توان فرستنده و قابلیت رؤیت V تحلیل شده است. مطابق رابطه توان دریافتی، با افزایش ضریب تضعیف کانال ناشی از کاهش قابلیت رؤیت و افزایش مه یا دود، توان دریافتی به صورت نمایی کاهش می‌یابد که این امر مستقیماً موجب کاهش SNR و در نتیجه افزایش BER می‌شود. این رفتار در تمامی مدولاسیون‌ها مشاهده می‌شود، اما شدت آن متفاوت است.

مدولاسیون PPM به دلیل انتقال انرژی سیگنال در بازه زمانی کوتاه‌تر و تمرکز توان در پالس‌های مجزا، دارای توان اوج بالاتری نسبت به NRZ و RZ است. این ویژگی، سبب افزایش تفکیک پذیری سیگنال در گیرنده و بهبود SNR مؤثر می‌شود. در نتیجه، PPM در شرایط تضعیف محیطی و مه، حساسیت کمتری نسبت به کاهش توان دریافتی داشته و BER پایین‌تری نسبت به NRZ و RZ نشان می‌دهد. در مقابل، در مدولاسیون‌های NRZ و RZ انرژی سیگنال در کل دوره بیت توزیع شده و بنابراین در شرایط کاهش توان، افت SNR سریع‌تر منجر به افزایش خطا می‌شود.

بر اساس مدل Kim با افزایش قابلیت رؤیت، ضریب تضعیف α به مقادیر بسیار کوچک میل می‌کند. در این شرایط، کانال تقریباً بدون تضعیف عمل کرده و نویز غالب سیستم از نوع حرارتی و نویز ساجمه‌ای گیرنده خواهد بود. مطابق رابطه SNR در محدوده تضعیف کم و متوسط، افزایش توان فرستنده موجب افزایش قابل توجه توان دریافتی و در نتیجه بهبود محسوس SNR و کاهش BER می‌شود. اما در شرایط قابلیت رؤیت بالا (تضعیف بسیار کم)، چون سهم تضعیف کانال ناچیز است، افزایش بیشتر توان فرستنده اثر محدودی بر SNR دارد و منحنی‌های BER به یک حد اشباع نزدیک می‌شوند.

در تحلیل هر نمودار نیز مشاهده می‌شود که با کاهش قابلیت رؤیت و افزایش پراکندگی نور ناشی از ذرات مه و دود، تضعیف ناشی از جذب و پراکندگی است. این پدیده باعث افت نمایی توان دریافتی، کاهش SNR و افزایش نرخ خطای بیت می‌شود. بنابراین روند تغییرات نمودارهای BER و SNR مستقیماً با فیزیک انتشار نور در کانال فضای آزاد و مدل تحلیلی ضریب تضعیف منطبق است. در مورد مدولاسیون‌های پیچیده‌تر مانند OFDM، این روش‌ها توانایی مقابله بهتری با اغتشاش کانال و افزایش نرخ داده دارند، اما پیاده‌سازی آن‌ها نیازمند مدل‌سازی کانال چندبخشی، هم‌زمانی دقیق فرکانس و پردازش سیگنال پیچیده است.

روش تخصیص توان تحلیلی با توجه به حجم محاسبات و روابط سنگین تحلیلی، دارای تأخیر بسیار زیادی است. همچنین، روش‌های تخصیص توان فازی و عصبی زمان پردازش بسیار کمتری نسبت به روش تخصیص توان تحلیلی دارد. در این مقاله با طراحی دو سامانه‌ی فازی و عصبی با تأخیر کم و دقت مناسب و نزدیک به نتایج روش تحلیلی یک سامانه‌ی تخصیص توان بلادرنگ پیشنهاد شد. با توجه به نتایج به دست آمده، به طور کلی در روش عصبی تعداد بیت‌های بیشتری در گیرنده در شرایط یکسان دریافت می‌شود و این روش دقت بیشتری نسبت به روش فازی دارد. در تخصیص توان‌های کمتر از ۱ mW، نتایج روش تخصیص فازی به روش تحلیلی همبستگی بیشتری دارد اما در توان‌های بالاتر، نمودارهای بودجه‌ی توان مربوط به روش تخصیص توان عصبی، به نتایج تحلیلی بسیار نزدیک است. با توجه به بهبود بیت‌های دریافتی در گیرنده با استفاده از سامانه‌های تخصیص توان فازی و عصبی، سرعت انتقال داده افزایش خوبی خواهد داشت. از طرف دیگر، با برقراری موازنه بین توان و نرخ خطای بیت، توان مناسبی به کانال‌های نوری تخصیص می‌یابد که این موضوع مشکل تداخل در گیرنده را نیز بهبود می‌دهد.

کاهش نرخ خطای بیت بیشتری به ازای افزایش توان فرستنده در این حالت خواهیم داشت. از طرفی، روش تخصیص توان تحلیلی با توجه به حجم محاسبات و روابط سنگین تحلیلی، دارای تأخیر بسیار زیادی است. همچنین، روش های تخصیص توان فازی و عصبی، زمان پردازش بسیار کمتری نسبت به روش تخصیص توان تحلیلی دارند.

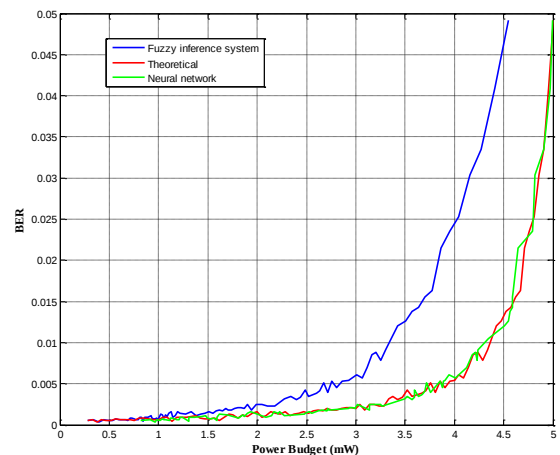
در این مقاله، با طراحی دو سامانه‌ی فازی و عصبی با تأخیر کم و دقت مناسب، یک سامانه‌ی تخصیص توان بلادرنگ پیشنهاد شد. با توجه به نتایج به دست آمده، به طور کلی در روش عصبی تعداد بیت های بیشتری در گیرنده در شرایط یکسان دریافت می شود و این روش دقت بیشتری نسبت به روش فازی دارد. در تخصیص توان های کمتر از 1 mW، نتایج روش تخصیص فازی به روش تحلیلی همبستگی بیشتری دارد اما در توان های بالاتر، نمودارهای بودجه‌ی توان مربوط به روش تخصیص توان عصبی به نتایج تحلیلی بسیار نزدیک است.

سپاسگزاری

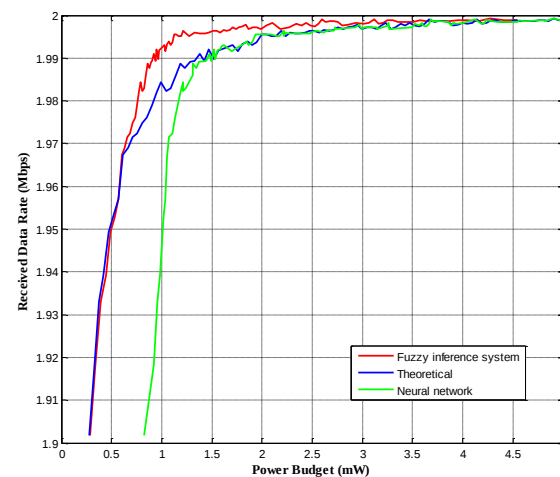
این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گزنت شماره ۱۴۰۴/۳۸۸۰۳۸ مورخ ۱۴۰۴/۰۴/۱۳ انجام گردیده است.

مراجع

- [1] Hassan MZ, Hossain MJ, Cheng J, Leung VCM. Statistical delay-QoS aware joint power allocation and relaying link selection for free space optics based fronthaul networks. IEEE Transactions on Communications 2018;66(3):1124–1138.
- [2] Heidari M, Akbari M, Olyaei, S. Investigating and Improving the Efficiency of Space-time Codes in Visible light Communication Systems based on a Multi-input-multi-output Channel Model. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering). 2024;17(7):687-697.
- [3] Sun H, Chen X, Shi Q, Hong M, Fu X, Sidiropoulos ND. Learning to optimize: Training deep neural networks for wireless resource management. IEEE Transactions on Signal Processing. 2018;66(20):5438–5453.
- [4] Akbari M, Olyaei S. Performance analysis of total attenuation effects and different values of transmitter power on bit error rate and signal-to-noise ratio for free space optical communication, Recent Advances



شکل ۱۱. بودجه‌ی توان بهینه‌ی فازی، تحلیلی و عصبی بر حسب نرخ خطای بیت برای کانال با دود و مه



شکل ۱۲. نرخ بیت های دریافتی در گیرنده بر حسب بودجه‌ی توان بهینه‌ی فازی، تحلیلی و عصبی برای کانال با دود و مه

۴. نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که در مدولاسیون محل پالس، به ازای مقادیر مختلف تضعیف پیونده، تغییرات مقدار نرخ خطای بیت نسبت به دو مدولاسیون NRZ و RZ، بیشتر خواهد بود. به بیان دیگر، مدولاسیون PPM عملکرد بهتری در مقادیر تضعیف بالای کانال، در نرخ خطای بیت پیونده مخابرات نوری فضای آزاد دارد. همچنین مدولاسیون محل پالس به ازای مقادیر قابلیت رؤیت بیشتر از ۴ کیلومتر به ازای مقادیر تضعیف زیاد، مقدار نرخ خطای بیت ثابتی خواهد داشت، اما در مدولاسیون های NRZ و RZ به ازای مقادیر قابلیت رؤیت بیشتر از ۶ کیلومتر این مقدار ثابت است. همچنین افزایش توان در مدولاسیون NRZ اثر بیشتری دارد و

- [18] Upadhyay KK, Shukla NK, Chaudhary S. A high speed 100 Gbps MDM-SAC-OCDMA multimode transmission system for short haul communication. *Optik*. 2020;202:163665.
- [19] Willebrand H, Willebrand BS. *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*, Sams Publishing, ISBN: 0-672-32248-x, USA, 2002. P.120.
- [5] Akbari M, Olyae S, Baghersalimi G. Design and Implementation of Real-Time Optimal Power Allocation System with Neural Network in OFDM-Based Channel of Optical Wireless Communications. *Electronics*. 2025;14(8):1580.
- [6] Gao Z, Eisen M, Ribeiro A. Optimal WDM power allocation via deep learning for radio on free space optics systems. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2013.
- [7] Zhou H, Hu D, Mao S, Agrawal P. Joint relay selection and power allocation in cooperative FSO networks. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2013.
- [8] Chaudhary S, Bansal P, Singh G. Implementation of FSO network under the impact of atmospheric turbulences. *International Journal of Computer Applications*. 2013;75(1):1-10.
- [9] Chaudhary S, Chaudhary N, Sharma S, Choudhary BC. High speed inter-satellite communication system by incorporating hybrid polarization-wavelength division multiplexing scheme. *Journal of Optical Communications*. 2017;39(1):87-92.
- [10] Chaudhary S, Amphawan A. High-speed millimeter communication through radio-over-free-space-optics network by mode-division multiplexing. *Optical Engineering*. 2017;56(11):116112-116112.
- [11] Chaudhary S, Amphawan A. High speed MDM-Ro-FSO communication system by incorporating AMI scheme. *International Journal of Electronics Letters*. 2019;7(3):304-310.
- [12] Chaudhary S, Choudhary S, Tang X, Wei X. Empirical evaluation of high-speed cost-effective Ro-FSO system by incorporating OCDMA-PDM scheme under the presence of fog. *Journal of Optical Communications*. 2024;44(s1):s1181-s1184.
- [13] Amphawan A, Chaudhary S, Ghassemloooy Z, Neo TK. 2×2-channel mode-wavelength division multiplexing in Ro-FSO system with PCF mode group demultiplexers and equalizers. *Optics Communications*. 202;467:125539.
- [14] Amphawan A, Chaudhary S, Din R, Omar MN. March. 5Gbps HG 0, 1 and HG 0, 3 optical mode division multiplexing for RoFSO. In 2015 IEEE 11th International Colloquium on Signal Processing & its Applications (CSPA) (pp. 145-149). IEEE.
- [15] Amphawan A, Chaudhary S, Chan V. Optical millimeter wave mode division multiplexing of LG and HG modes for OFDM Ro-FSO system. *Optics Communications*. 2019;431:245-254.
- [16] Sharma V, Chaudhary S. Implementation of hybrid OFDM-FSO transmission system. *Int J Comput Appl*. 2012;58(8):37-40.
- [17] Sharma A, Kaur S, Chaudhary S. Performance analysis of 320 Gbps DWDM—FSO system under the effect of different atmospheric conditions. *Optical and Quantum Electronics*. 2021;53(5):239.