

طراحی یک سامانه مخابرات نوری فضای آزاد و ارزیابی عملکرد آن در مواجهه با پدیده‌های جوی

حمیدرضا خدادادی^{۱*}، محمدحسین قزل‌ایاغ^۲، ابوالفضل چمن‌مطلق^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۵/۰۴/۰۲، پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۰)

چکیده

سامانه‌های مخابرات نوری فضای آزاد (FSO)، به دلیل امکان ارسال پهنای باند زیاد و امنیت بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای سامانه‌های رادیویی باشند. مشکل اصلی به‌کارگیری این سامانه‌ها، وجود پدیده‌های جوی محیط انتشار شامل جذب، پراکندگی و آشفستگی است. این اثرات موجب می‌شود که نور منتشرشده در کانال انتقال علاوه بر تضعیف دچار پدیده چندمسیرگی گردد و رفتاری مشابه با پدیده محوشدگی در کانال مخابراتی داشته باشد. در این مقاله مدلی برای بررسی هم‌زمان تضعیف‌های محیط انتشار FSO و آشفستگی ارائه شده است. طراحی یک سامانه FSO با استفاده از ترکیب روش‌های کاهش اثر آشفستگی نظیر متوسط‌گیری از سطح دهانه گیرنده، روش چند فرستنده و یک گیرنده (MISO) و کد برخط 1B4B مورد بررسی قرار گرفته و رفتار آن با استفاده از نمودارهای نرخ احتمال خطا (BER) و احتمال قطع (Outage) در شرایط مختلف آب و هوایی شبیه‌سازی شده است. تحلیل بودجه لینک نشان می‌دهد که یک سامانه FSO با ۴ فرستنده با توان ارسالی ۲۰۰ میلی‌وات و یک گیرنده با قطر دهانه اپتیک ۲۵cm می‌تواند یک لینک مخابرات نوری با برد حداکثر ۱۰ کیلومتر و نرخ خطای بیت بهتر از 10^{-6} را در شرایط آشفستگی ضعیف برقرار نماید.

واژه‌های کلیدی: مخابرات نوری فضای آزاد، آشفستگی، احتمال خطا، احتمال قطع، کدهای برخط 1B4B

۱- مقدمه

مکانی^۴ با استفاده از چندین فرستنده و گیرنده^۵ [۴-۶] است. در این روش فرستنده‌ها و گیرنده‌ها باید نظیر به نظیر هم‌راستا باشند که در مورد لینک‌های بافاصله بین فرستنده و گیرنده بیش از یک کیلومتر، این کار به‌سادگی امکان‌پذیر نیست، لذا در این شرایط از حالت خاصی از MIMO، با عنوان روش چند فرستنده و یک گیرنده^۶ [۷-۹] استفاده می‌شود. هنگامی که پرتو نور از درون یک محیط با وجود آشفستگی اتمسفری عبور داده شود، شدت نور دریافتی در گیرنده نوسانی خواهد شد و به‌صورت تصادفی در قسمت‌های مختلف سطح لنز گیرنده، شدت آن کم‌وزیاد می‌شود، حال اگر سطح مقطع گیرنده افزایش داده شود شدت سیگنال دریافتی بیشتر خواهد شد. این روش متوسط‌گیری از سطح دهانه گیرنده^۷ نامیده می‌شود و در مقالات [۱۰-۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از روش‌های کدگذاری [۱۲-۱۳] نیز می‌توان نرخ خطای ناشی از آشفستگی اتمسفری را کاهش داد. این مقاله مراحل طراحی یک لینک FSO با برد ۱۰ km را دنبال می‌کند، اکثر مقالات موجود در زمینه سامانه‌های FSO.

با توجه به تهدیدات جنگ الکترونیک در بسیاری از زمان‌ها نمی‌توان از سامانه‌های رادیویی در شرایط بحران استفاده کرد. در این شرایط سامانه‌های مخابرات نوری فضای آزاد (FSO)^۱ می‌توانند جایگزین مناسبی باشند. این سامانه‌ها از مزایایی از قبیل کم حجم بودن تجهیزات، توان مصرفی پایین، عدم نیاز به مجوز فرکانس، امکان ارسال پهنای باندهای بالاتر نسبت به سامانه‌های رادیویی و امنیت بهتر در برابر شنود و تهدیدات جنگ الکترونیک برخوردارند [۱]. در کنار این ویژگی‌های قابل‌توجه، مهم‌ترین عاملی که سبب کاهش کارایی آن‌ها می‌شود، تأثیرپذیری نور لیزر از شرایط اتمسفری است. تغییرات دائمی دما و فشار توده‌های جوی باعث پدیده‌هایی همچون آشفستگی^۲ و محوشدگی^۳ شده و تضعیف عملکرد این سامانه را به دنبال خواهد داشت [۲-۳]. یکی از روش‌های بهبود عملکرد سامانه FSO در مقابل اثر آشفستگی ناشی از اتمسفر، استفاده از روش تنوع‌بخشی

* رایانامه نویسنده مسئول: hkhdadi@ihu.ac.ir

4 -Diversity

5 -Multiple Input Multiple Output (MIMO)

6 - Multiple Input Single Output (MISO)

7 -Aperture averaging

1 -Free Space Optical communications

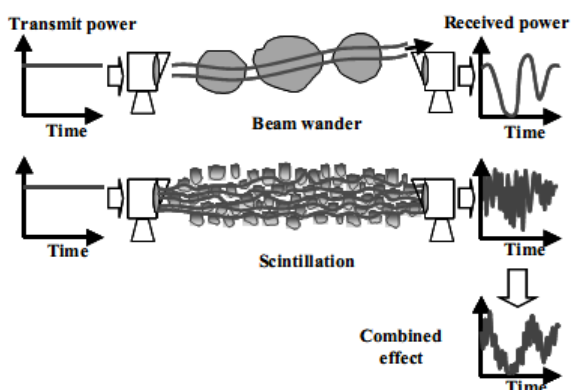
2 -Turbulence

3 -Fading

به صورت تصادفی مسیر نور را تغییر می‌دهد. جمع این دو پدیده موجب آن خواهد شد که در سمت گیرنده نور دریافتی دچار لرزش گردد که اصطلاحاً به آن پدیده سوسوزدن گویند.



شکل (۱). یک سامانه مخابرات نوری فضای آزاد



شکل (۲). توده‌های هوایی در اتمسفر [۱۴]

اثر سوسوزدن موجب محوشدگی سیگنال در لحظاتی از زمان در گیرنده شده و در نهایت خطای سامانه را افزایش می‌دهد و رفتاری مشابه با پدیده چندمسیرگی کانال‌های مخابرات رادیویی بدون سیم دارد. میزان تغییرات شعاع پرتو لیزر در اثر پدیده آشفستگی بر اساس رابطه ریتوف به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k \frac{7}{6} L \frac{11}{6} \quad (1)$$

در این رابطه، σ_R^2 واریانس پراکندگی نور در گیرنده، L فاصله بین فرستنده و گیرنده، $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج، λ طول موج پرتو و C_n^2 پارامتر ساختاری ضریب شکست جو است. C_n^2 پارامتر مهمی در رابطه با آشفستگی است و تابع عواملی نظیر ارتفاع از سطح زمین و شرایط آب و هوایی است و در بهترین شرایط (هوای تمیز) مقدار 10^{-17} و بدترین شرایط (مه غلیظ) 10^{-13} دارد [۱]. در جدول (۱) مقادیر آشفستگی و واریانس پراکندگی برای یک سامانه با برد ۱۰ کیلومتر و شرایط مختلف آب و هوایی آورده شده است. در این جدول V بیانگر قابلیت دید افقی با چشم غیر مسلح است.

بررسی خود را بر روی فاصله بین فرستنده و گیرنده یک و یا حداکثر چند کیلومتر انجام داده‌اند. نوآوری مقاله و آنچه این برد را امکان‌پذیر نموده، استفاده از تلفیق چند روش کاهش اثر آشفستگی است. در مقاله با ارائه بودجه‌بندی لینک، توابع و نمودارهای احتمال خطای بیت^۱ و احتمال وقوع قطع^۲ نشان داده که سامانه FSO می‌تواند در شرایط آشفستگی ضعیف، شرایطی مثل آب‌وهوای مناطقی از ایران که برد دید افقی^۳ طبق اطلاعات مرکز هواشناسی^۴ بیشتر از ۳/۵ km باشد با حداکثر فاصله بین فرستنده و گیرنده ۱۰ km به عنوان یک سامانه ارتباطی با احتمال خطای کمتر از 10^{-6} به کارگیری شود. همچنین مبدل کد خط^۵ برای تبدیل سیگنال‌های مخابراتی به نوری و بالعکس پیشنهاد شده و دیگرام‌های طراحی مدار کدکننده و آشکارساز کد ارائه شده است. ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است:

در بخش دوم شرایط کانال مخابرات نوری بیان شده و در بخش سوم کدهای برخط متداول مطرح و پیشنهاد کد مناسب به همراه دیگرام حالت کدکننده و آشکارساز کد ارائه شده است. بودجه لینک و محاسبات مربوطه در بخش چهارم و نتایج شبیه‌سازی سامانه به همراه تحلیل در شرایط مختلف آب و هوایی و جمع‌بندی در بخش‌های پایانی آورده شده است.

۲- کانال انتقال FSO

در شکل (۱) یک سامانه FSO، نشان داده شده است. این سامانه از قسمت‌های، لیزر نیمه‌هادی در فرستنده، اپتیک و مدارهای الکترونیکی در سمت فرستنده و گیرنده، دیود آشکارساز نیمه‌هادی در گیرنده و مدارات مخابراتی باند پایه برای تبدیل سیگنال‌های مخابراتی به نوری و بالعکس تشکیل شده است. در یک سامانه FSO، اتمسفر به عنوان محیط انتشار و انتقال نور خروجی سیستم در نظر گرفته می‌شود. تضعیف اتمسفری غالباً بر اثر مه است ولیکن به ابرهای کم، باران، برف، گردوغبار و یا ترکیبی از هر کدام نیز بستگی دارد [۳]. به‌طور کلی تضعیف در اتمسفر می‌تواند ناشی از عواملی همچون تلفات پراکندگی، تلفات جذب و پاشندگی باشد. این تلفات تابع شرایط محیطی است و می‌تواند موجب قطع شدن لینک ارتباطی گردد. در سامانه مخابرات نوری به خاطر چندمسیرگی ناشی از اثر آشفستگی اتمسفری، پرتو نور به صورت کاملاً مستقیم منتشر نشده و دچار انحراف می‌گردد.

مطابق شکل (۲)، ذرات بزرگ مثل قطرات آب موجود در مه، مسیر نور را منحرف نموده و ذرات کوچک مثل گردوغبار

- 1 -Bit Error Rate (BER)
- 2 -Outage probability
- 3 -Visibility
- 4 -www.irimo.ir
- 5 -Line code

اغلب از وضعیت روشن خاموش برای ارسال اطلاعات استفاده می‌شود. به همین دلیل یکی از ویژگی‌های دیگر کد کننده خط در انتقال نوری آن است که کد دوسطحی باشد. در قسمت باند پایه، فرض بر آن است که سامانه FSO بخواهد در فرستنده اطلاعات خروجی یک لینک مخابرات دیجیتال را به سیگنال نوری تبدیل نموده و در گیرنده نیز عکس این کار را انجام دهد. در لینک‌های مخابرات دیجیتال، برای انتقال ترافیک چندین مشترک با یک خط، از روش تسهیم زمانی^۳ استفاده می‌شود. این سامانه‌ها چون برای کارکرد بر روی خطوط کابلی طراحی شده‌اند نمی‌توانند سیگنال دیجیتال 0 و 1 را به صورت مستقیم ارسال کنند و برای این منظور از کدهای خط استاندارد سه سطحی AMI^۴ و یا HDB3^۵ استفاده می‌کنند. در این سیگنال از سه سطح ولتاژ 0 و ± 5 ولت استفاده می‌شود، از طرفی لیزر نیمه‌هادی نمی‌تواند سیگنال با سطح ولتاژ منفی را ارسال کند، لذا وظیفه قسمت باند پایه سامانه FSO تبدیل سیگنال سه سطحی به دوسطحی در فرستنده و انجام عکس این کار در گیرنده است. یک کد خط دوسطحی خوب سه ویژگی دارد.

۱. توزیع صفر و یک آن یکنواخت است.

۲. تعداد لبه کافی برای آشکارسازی پالس ساعت دارد.

۳. پهنای باند تا حد ممکن کم است.

با توجه به ویژگی‌های شمرده شده برای کد خط سامانه مخابرات نوری، تاکنون کدهای CMI^۶ و بهبود یافته آن MCMI^۷ مطابق با جدول (۲) مطرح شده است [۱۶].

جدول (۲). ارائه مشخصات چند کد خط

Data	HDB3	MCMI	1B4B
0	0	01	0011
1	+1	11	0111
	-1	00	0001

به منظور ارزیابی عملکرد کد MCMI، این کد در یک سامانه FSO مورد استفاده قرار گرفت. در شرایط آزمایشگاهی این سامانه عملکرد مناسبی داشت ولیکن در تست‌های میدانی خصوصاً با فواصل بیش از یک کیلومتر، نرخ خطای بیت زیاد بود. با بررسی سیگنال‌های دریافتی این نتیجه بدست آمد که همانند شکل (۲)، بر روی سیگنال دریافتی نویز و یا به عبارت دیگر لبه‌های اضافی به وجود می‌آید، هر چه شدت آشفستگی بیشتر باشد دامنه لبه‌های اضافی نیز قوی‌تر خواهد شد. در کد MCMI در دنباله خروجی

جدول (۱). مقدار پارامترهای سامانه بر حسب شرایط آب و هوایی

شرایط آشفستگی	σ_R^2 [m ²]	V [KM]	C_n^2 [m ^{-2/3}]	وضعیت آب‌وهوا
خیلی ضعیف	۰/۰۷	۱۰/۲۷	5×10^{-17}	هوای تمیز
ضعیف	۰/۲۳	۳/۵	$1/7 \times 10^{-17}$	مه کم
متوسط	۲/۷۱	۲/۸	2×10^{-15}	باران سبک
قوی	۱۳/۵۶	۰/۷۷	1×10^{-14}	مه رقیق

همانند کانال‌های رادیویی که در آن از توزیع رابلی برای بیان اثر چندمسیرگی استفاده می‌شود، در کانال‌های نوری توزیع گاما - گاما به کار گرفته می‌شود. در این توزیع، شدت آشفستگی ضعیف و قوی با دو تابع مستقل گاما به صورت زیر بیان شده است [۱۵].

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \quad I \geq 0 \quad (2)$$

که در آن، I یک متغیر تصادفی و بیانگر شدت آشفستگی، $K_{\alpha-\beta}$ تابع بسل مرتبه دوم، $\Gamma(\alpha)$ و $\Gamma(\beta)$ توابع توزیع گاما و α و β پارامترهای کانال انتقال هستند که به صورت تجربی به دست می‌آیند و رابطه مستقیمی با عوامل تفرق و پراکندگی اشعه دارند.

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49\sigma_R^2}{\left(1 + 1.11\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51\sigma_R^2}{\left(1 + 0.69\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

۳- کدهای برخط سامانه FSO

یکی از بخش‌های اصلی سامانه FSO، قسمت باند پایه^۱ آن است. در اینجا تغییرات مورد نیاز بر روی سیگنال پیام به نحوی اعمال می‌شود که سیگنال ویژگی‌های مورد نظر برای انطباق با کانال نوری را داشته باشد. در سامانه‌های مخابراتی برای ارسال اطلاعات اغلب از کدکننده خط در آخرین طبقه استفاده می‌شود. کد خط مورد استفاده در ارتباطات نوری باید دارای بالانس DC بوده و قابلیت هم‌زمان‌سازی^۲ داشته باشد. در فرستنده‌های نوری،

3 -Time-Division Multiplexing (TDM)

4 -Alternate Mark Inversion (AMI)

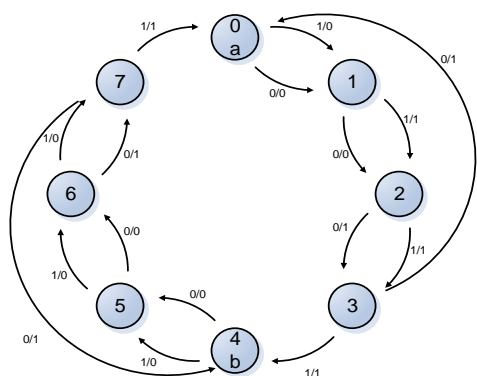
5 -High-Density Bipolar order 3 (HDB3)

6 -Code Mark Inversion (CMI)

7 -Modify Code Mark Inversion (MCMI)

1 -Base band

2 -Clock recovery



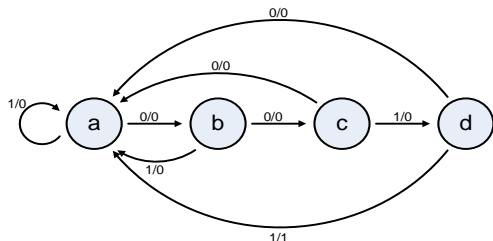
شکل (۴). دیاگرام حالت جزئی مدار کد کننده 1B4B

مدار کد کننده 1B4B فقط سه خروجی چهار بیتی 0011، 0001 و 0111 را تولید می‌کند لذا برای انجام عمل آشکارسازی کد بلوک دیاگرام شکل (۵) پیشنهاد می‌شود. برای تشریح عملکرد شکل (۵) فرض کنید مدار در حالت a قرار دارد و یکی از ورودی‌های 0001، 0001 و 0111 وارد شود، خروجی با دنبال کردن مراحل بلوک دیاگرام به شرح ذیل خواهد بود.

0001 → 0000
 0011 → 0001
 0111 → 0000

چنانچه به واسطه نویز کلمه‌ای غیر از این سه کد وارد بلوک دیاگرام دیکد کننده شود مطابق با بلوک دیاگرام، کد آشکار نشده و مدار به حالت a برمی‌گردد. به منظور دستیابی به اطلاعات ورودی باید عکس حالت کد کننده که هر بیت ورودی را به چهار بیت تبدیل می‌کرد، هر چهار بیت به یک بیت تبدیل شود. برای این منظور کافی است با یک گیت مناسب چهار ورودی این خروجی به دیتای اصلی تبدیل گردد.

0000 → 1
 0001 → 0
 0000 → 1

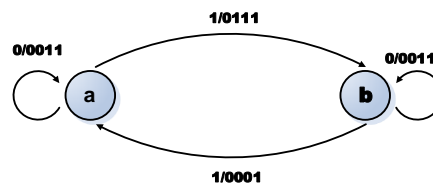


شکل (۵). دیاگرام حالت مکان صرفها در مدار آشکارساز کد

۴- محاسبات بودجه لینک

در مخابرات نوری فضای آزاد با دید مستقیم، از پرتوهای نوری باریک با واگرایی بسیار کوچک در حد چند میکرو رادیان استفاده می‌شود. برای دریافت این پرتوها نیاز است فرستنده و

حالت 00 وجود دارد یعنی لیزر نیمه‌هادی فرستنده در این حالت خاموش است و لذا گیرنده لبه‌ای برای تصحیح پالس ساعت ندارد. در این حالت نویز ناشی از آشفتگی، مدارهای زمان‌بندی حلقه قفل فاز^۱ گیرنده را دچار اختلال نموده و اصطلاحاً لبه‌های کناری پالس ساعت تولید شده همراه با لرزش^۲ خواهد بود. برای رفع اشکال مدار باید کاری کرد که در خروجی کد کننده حالت تمام صفر نباشد، بعبارت دیگر مدار آشکارساز گیرنده، به ازاء هر پالس اطلاعات لبه‌ای برای استخراج پالس ساعت داشته باشد. برای این منظور در این مقاله استفاده از ساختار کد خط دوسطحی 1B4B مطابق با جدول (۲) پیشنهاد شده است [۱۷]. در این کد هر بیت از اطلاعات ورودی به چهار بیت تبدیل می‌شود. در این کد به جای بیت صفر باینری 0011 و بجای بیت یک باینری، یک‌درمیان 0001 و 0111 تولید می‌گردد. در این کد بالانس DC برقرار بوده و همچنین به علت وجود حداقل یک لبه پالس در هر قسمت از اطلاعات ارسالی، زمان‌بندی مناسب جهت هم‌زمان‌سازی وجود دارد. ساختار دیاگرام حالت این کد در شکل (۳) و دیاگرام حالت کامل این کد در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۳). دیاگرام حالت کلی مدار کد کننده 1B4B

برای تولید کد 1B4B به پالس ساعت با فرکانس ۴ برابر و سنکرون با نرخ اطلاعات ورودی نیاز است. در ادامه با فرض وجود این پالس ساعت عملکرد مدار تشریح می‌شود. چون با سرعت چهار برابر از اطلاعات ورودی نمونه‌برداری انجام می‌شود، به ازای 0 مقدار 0000 و به ازای 1 مقدار 1111 تولید خواهد شد. حال فرض کنید مدار در حالت a دیاگرام حالت شکل (۴) قرار داشته باشد، اگر 0000 به ترتیب با هر پالس ساعت وارد شود مدار، مطابق دیاگرام به حالت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ یا b رفته و خروجی 0011 تولید خواهد شد. به طریق مشابه چنانچه در حالت a دیاگرام حالت شکل (۴) ورودی 1111 به ترتیب با هر پالس ساعت وارد شود، مدار مطابق دیاگرام به حالت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ یا b رفته و خروجی 0111 تولید خواهد شد. در حالت b نیز با ورود 0000 کد 0011 و با ورود 1111 کد 0001 تولید خواهد شد.

1 -Phase Lock Loop (PLL)
 2 - Pulse Jitter

۵- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

در این مقاله عملکرد یک لینک مخابرات نوری با برد حداکثر ۱۰ Km و ساختار چند فرستنده و یک گیرنده و مدولاسیون ارسال PPM^f و پارامترهای بیان شده در جدول‌های (۱) و (۳) و از دیدگاه دو پارامتر نرخ خطای بیت و احتمال قطع و شرایط مختلف آب و هوایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا مسئله برای حالت فرستنده و گیرنده تکی^۵ بررسی می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده در قسمت ۳ مقاله فرض بر آن است که داده‌های مخابراتی با پروتکل مناسب برای ارسال توسط لیزر نیمه‌هادی آماده شده و توسط یک لیزر نیمه‌هادی و اپتیک فرستنده مناسب نور ارسال می‌شود. سیگنال دریافتی در گیرنده FSO به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$r = \eta\sqrt{P_r I} + v_n \quad (10)$$

در این عبارت، $\sqrt{P_r I}$ شدت سیگنال دریافتی در گیرنده، η ضریب بازده سیگنال نوری به الکتریکی آشکارساز و v_n نویز گوسی جمع شونده است. اگر کانال با آشفتگی مواجه نباشد ($I=1$)، میزان خطا در این لینک مخابرات نوری به شرط آن که در فرستنده از مدولاسیون PPM استفاده شود از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۴].

$$P_{eSISO} = Q\left(\eta\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (11)$$

در این رابطه، $E_b = P_r T_b$ انرژی سیگنال دریافتی در گیرنده، T_b نرخ ارسال بیت توسط فرستنده، N_0 چگالی نویز سفید و $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ تابع مارکوم است. در حالتی که شرایط آب و هوایی مناسب نباشد اثر آشفتگی اتمسفری، شدت انرژی سیگنال دریافتی را به‌صورت تصادفی با توزیع $f_I(I)$ تغییر می‌دهد، در این حالت می‌توان متوسط احتمال خطا را با رابطه (۱۲) بیان نمود [۴].

$$\begin{aligned} \overline{P_{eSISO}} &= \int_0^\infty f_I(I) Q\left(\eta\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) dI \\ &= \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty I^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}) Q\left(\eta\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) dI \end{aligned} \quad (12)$$

در این عبارت از تابع بسل نوع دوم استفاده شده است. این تابع مانع از حل انتگرال رابطه (۱۲) به‌صورت تحلیلی می‌شود.

گیرنده هم‌راستا باشند. در مرجع [۱۸] مدل بودجه‌بندی لینک ارائه شده است. مطابق با این مدل توان دریافتی از رابطه زیر تبعیت می‌کند.

$$P_r = P_t \frac{A_r}{(\theta L)^2} A_{tt} \quad (4)$$

در این رابطه P_t توان ارسالی، θ واگرایی شعاع بیم، A_r سطح مقطع مفید دهانه گیرنده و A_{tt} تضعیف‌های ناشی از اتمسفر است. برای بیان تضعیف‌های اتمسفر از داده‌های تجربی استفاده می‌شود. مطابق با قانون بیرلامبرت^۱ تضعیف با مسافت رابطه‌نمایی دارد [۱۹]:

$$A_{tt} = e^{-\alpha_{fog} L} \quad (5)$$

در این رابطه α_{fog} ضریب تضعیف اتمسفر است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\alpha_{fog} = \frac{3.912}{V(km)} \left(\frac{\lambda}{550nm}\right)^{-q} \quad (6)$$

که در این رابطه، V بیانگر میزان دید با چشم غیرمسلح برحسب کیلومتر، λ طول موج فرستنده و q یک ضریب متناسب با میزان پراکندگی است و بر اساس مدل کروس^۲ محاسبه می‌شود.

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50km \\ 1.3 & 6km \leq V \leq 50km \\ 0.585V^{\frac{1}{3}} & V < 6km \end{cases} \quad (7)$$

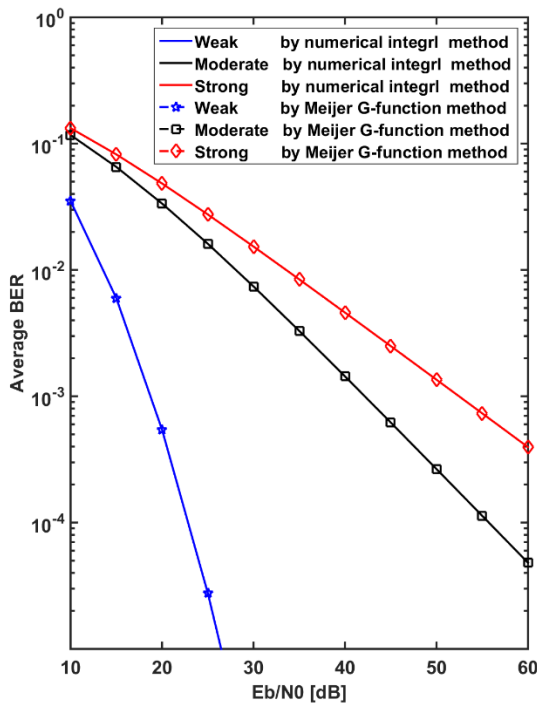
به‌عنوان یک قاعده سرانگشتی وقتی $V < 1$ km باشد میزان مه هوا غلیظ و در حالت $1 < V < 5$ km مه رقیق است. حداقل برد یک لینک مخابرات نوری تابعی از توان ارسالی، پارامترهای لینک و شرایط آب و هوایی است از ترکیب روابط (۴) و (۵) خواهیم داشت:

$$L_{fog}^2 e^{\alpha_{fog} L} = \frac{P_t A_r}{P_r \theta^2} \quad (8)$$

با حل معادله برحسب L_{fog} با استفاده از تقریب لامبرت^۳ مقدار L_{fog} به دست می‌آید [۱۸].

$$L_{fog} = \frac{2W_0\left(\frac{\alpha_{fog}}{2\theta} \sqrt{\frac{P_t A_r}{P_r}}\right)}{\alpha_{fog}} \quad (9)$$

در این عبارت $W_0(\cdot)$ بیانگر قسمت حقیقی تابع لامبرت است.



شکل (۶). نرخ خطای بیت برای حالت فرستنده و گیرنده تکی به روش‌های دقیق و تقریب میجر و شرایط آشفستگی ضعیف تا قوی

لازم به ذکر است لیزرهای توان بالا تولید گرما می‌کنند و باید با استفاده از مدارهای خنک‌کننده دمای آن را تحت کنترل داشت که این کار پیچیدگی و هزینه سامانه را افزایش می‌دهد. در حالت چند فرستنده و یک گیرنده می‌توان با نتیجه‌گیری از رابطه (۱۲) و (۱۴)، نرخ خطای بیت متوسط کانال را به صورت زیر به دست آورد [۲۲]:

$$\overline{Pe}_{MISO} = \int_0^\infty f_I(I) Q\left(\frac{\eta}{M\sqrt{N_0}} \sum_{m=1}^M \sqrt{P_{rm}} I_m\right) dI_m \quad (15)$$

در این رابطه، $I = (I_1, I_2, I_3, \dots, I_M)$ و $f_I(I)$ تابع احتمال توأم کانال است. محاسبه این انتگرال بسیار پیچیده است لذا برای محاسبه آن می‌توان دو فرض زیر را در نظر گرفت. الف) مسیره‌های فرستنده و گیرنده مستقل و تابع توزیع کانال متفاوت باشد، در این صورت رابطه (۱۵) به فرم زیر تبدیل می‌شود [۲۲].

$$\overline{Pe}_{MISO} = \prod_{m=1}^M \int_0^\infty f_{I_m}(I_m) \left[Q\left(\frac{\eta}{M\sqrt{N_0}} \sum_{m=1}^M \sqrt{P_{rm}} I_m\right) \right]^{\frac{1}{M}} dI \quad (16)$$

برای سامانه FSO زمینی سرعت نرخ ارسال به مراتب سریع‌تر از سرعت تغییرات کانال است از طرفی مسیره‌های بین فرستنده‌ها و گیرنده شرایط آشفستگی یکسانی را تجربه می‌کنند لذا می‌توان تقریباً توزیع کانال را تقریباً یکسان در نظر گرفت.

استفاده از تابع میجر $K_v(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[x^2/4 \left| \begin{matrix} - \\ \frac{v}{2}, \frac{v}{2} \end{matrix} \right. \right]$ که در اکثر نرم‌افزارهای محاسباتی ریاضی موجود می‌باشد راه حل مرسوم است که برای حل این‌گونه انتگرال‌ها پیشنهاد می‌شود [۸، ۲۰ و ۲۱]. بر این اساس می‌توان رابطه (۱۲) را به فرم بسته-ای^۲ زیر بیان نمود.

$$\overline{Pe}_{ISO} = \frac{2\alpha+\beta-3}{\sqrt{\pi^3} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{5,2}^{2,4} \times \left[\frac{8E_b}{N_0 \alpha^2 \beta^2} \left| \begin{matrix} 1-\alpha, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (13)$$

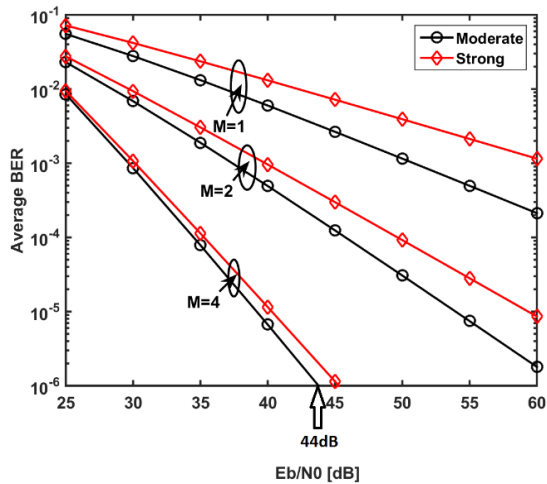
با استفاده از حل عددی انتگرال رابطه (۱۲) و روش تقریبی رابطه (۱۳) میزان متوسط خطا \overline{Pe} بر حسب نسبت سیگنال به نویز $\frac{E_b}{N_0}$ در شرایط مختلف آب و هوایی در شکل (۶) آورده شده است. همان‌طور که از این شکل دیده می‌شود، دو روش از دقت یکسانی برخوردارند و نمودارهای متناظر برهم منطبق شده است. در [۲۲] نیز با دو روش حل عددی و استفاده از توابع میجر شبیه‌سازی انجام شده که نتیجه مشابه حاصل شده است. (تطابق کامل دو نمودار به خاطر آن است که نرم‌افزار متلب توابع میجر را نیز به صورت عددی تحلیل می‌نماید). طبق شکل (۶) برای حالت‌های آشفستگی متوسط به بالا، حتی با وجود سیگنال به نویز ۴۰ دسی‌بل نرخ خطای بیت بیشتر از 10^{-4} است. لذا با شرایط موجود، این سامانه توانایی کار در شرایط با آشفستگی متوسط و قوی را ندارد. به منظور بهبود عملکرد سامانه، می‌توان بجای استفاده از یک فرستنده از چند فرستنده و یک گیرنده استفاده نمود. چنانچه M فرستنده با سیگنال ارسالی مستقل در نظر گرفته شود در گیرنده سیگنال حاصل از فرستنده‌ها با هم جمع شده و با رابطه (۱۴) بیان می‌شود [۷].

$$r = \sum_{m=1}^M \eta \sqrt{P_{rm}} I_m + v_n \quad (14)$$

در این رابطه، $\sqrt{P_{rm}} I_m$ سیگنال دریافتی از هر فرستنده، I_m متغیر تصادفی با توزیع گاما - گاما و بیانگر شدت آشفستگی هر مسیر است. روش استفاده از چند فرستنده این حسن را دارد که اولاً مسیر ارسال به جای یک مسیر به M مسیر تبدیل می‌شود و طبیعتاً پایداری مدار در مقابل آشفستگی و یا موانع جوی اتفاقی بهتر خواهد شد و ثانیاً توان مورد نظر به جای یک لیزر با M لیزر تأمین می‌شود.

1 -Meijer G-function
2 -A closed-form expression

است. می‌توان در گیرنده با استفاده از لنز اپتیکی سطح دهانه گیرنده را افزایش داد و شدت تغییرات سیگنال دریافتی را کمتر نمود. بدیهی است در این حالت دیود آشکارساز باید در کانون لنز گیرنده قرار داده شود.



شکل (۷). نرخ خطای بیت برای حالت مختلف MISO و شرایط آشفته‌گی متوسط و قوی

در صورت استفاده از لنز با قطر دهانه D ، نور دریافتی متمرکز شده و واریانس آشفته‌گی به نسبت ضریب F کمتر خواهد شد [۲۳].

$$F = \left[1 + 1.07 \left(\frac{kD^2}{4L} \right)^{\frac{7}{6}} \right]^{-1} \quad (23)$$

با در نظر گرفتن تعداد فرستنده $M=4$ و لنز گیرنده با قطر دهانه $D=25\text{cm}$ و دیگر پارامترهای بیان شده در جدول (۳) میزان خطا در شرایط مختلف آب و هوایی به صورت شکل (۸) به دست آمده است. میزان بهبود عملکرد روش متوسط‌گیری سطح لنز با مقایسه منحنی‌های شکل‌های (۷) و (۸) قابل مشاهده است. به عنوان مثال برای داشتن $\text{BER}=10^{-6}$ در شرایط آشفته‌گی متوسط $M=4$ ، نسبت سیگنال به نویز مورد نیاز از 44dB مشخص شده در شکل (۷) به 34dB مشخص شده در شکل (۸) کاهش یافته است.

با توجه به وجود آشفته‌گی و دیگر تضعیف‌های ناشی از کانال انتشار، در مواقعی از زمان سیگنال نوری دچار افت شدید شده و شدت سیگنال دریافتی از آستانه قابل قبول گیرنده کمتر خواهد شد که به این شرایط، حالت قطع گویند و احتمال وقوع آن به عنوان یک معیار ارزیابی سامانه تلقی می‌گردد و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_{\text{outage}} = P_r(\gamma \leq \gamma_{\text{th}}) = \int_0^{\gamma_{\text{th}}} f_I(I) dI \quad (24)$$

(ب) مسیرهای فرستنده و گیرنده مستقل و توان فرستنده‌ها و تابع توزیع کانال یکسان باشد، در این صورت رابطه (۱۵) به فرم ساده زیر تبدیل می‌شود [۲۲].

$$\overline{P e}_{MISO} = \int_I f_I(I) Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \eta I \right) dI \quad (17)$$

با توجه به یکسان و مستقل بودن کانال‌ها می‌توان تابع توزیع کانال را به شکل زیر در نظر گرفت.

$$f_I(I) = \prod_{m=1}^M f_{I_m}(I_m) = (f_I(I))^M \quad (18)$$

با این فرض رابطه (۱۷) به فرم ساده‌تر زیر تبدیل خواهد شد.

$$\overline{P e}_{MISO} = \left[\int_0^{\infty} f_I(I) \left(Q \left(\frac{\eta \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \sum_{m=1}^M I_m}{M} \right) \right)^{\frac{1}{M}} dI \right]^M \quad (19)$$

می‌توان برای بیان عبارت فوق بر حسب توابع میجر از تقریب تابع Q استفاده نمود.

$$Q(x) \approx \frac{1}{12} e^{-\frac{x^2}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2x^2}{3}} \quad (20)$$

با ترکیب روابط (۱۹) و (۲۰) خواهیم داشت.

$$\overline{P e}_{MISO} \approx \frac{1}{12} \left(\int_0^{\infty} f_I(I) e^{-\frac{\eta^2 I^2 E_b}{4MN_0}} dI \right)^M + \frac{1}{4} \left(\int_0^{\infty} f_I(I) e^{-\frac{\eta^2 I^2 E_b}{3MN_0}} dI \right)^M \quad (21)$$

می‌توان با استفاده از تقریب میجر، رابطه (۲۱) را به صورت بسته‌ای زیر بیان نمود.

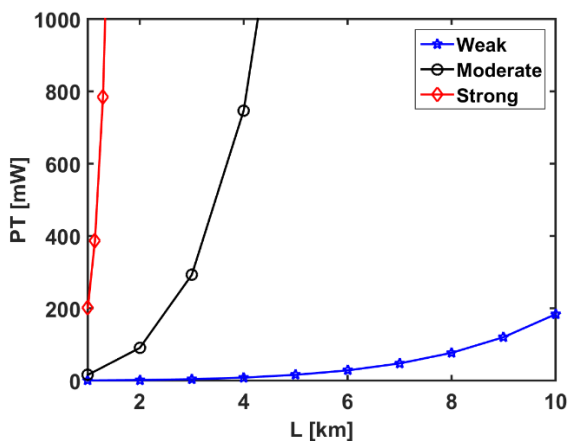
$$\overline{P e}_{MISO} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\sqrt{\pi^3} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \right)^M \times \left[\frac{1}{3} \left(\frac{8E_b}{MN_0 \alpha^2 \beta^2} G_{4,1}^{1,4} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 0, 1 \right. \right)^M + \left(\frac{8E_b}{MN_0 \alpha^2 \beta^2} G_{4,1}^{1,4} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 0, 1 \right. \right)^M \right] \quad (22)$$

به منظور مقایسه حالت SISO و MISO در شرایط مختلف جوی، می‌توان با استفاده از حل عددی انتگرال‌های روابط (۱۲) و (۱۶) و یا روابط تقریبی (۱۳) و (۲۲) منحنی احتمال خطا را مطابق با شکل (۷) به دست آورد. طبق این شکل، در شرایط آشفته‌گی متوسط و قوی و MISO با $M=4$ احتمال خطای کمتر از 10^{-6} با نسبت سیگنال به نویز حدود 44dB حاصل می‌شود. این مقدار توان زیاد است و با فرض گیرنده نقطه‌ای به دست آمده

جدول ۳. مقدار پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی سامانه مخابرات نوری

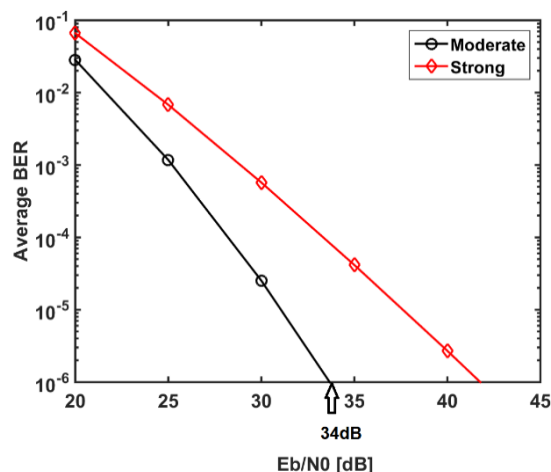
پارامتر	توصیف	مقدار
L	فاصله بین فرستنده و گیرنده	۱-۱۰ km
λ	طول موج	۱۵۵۰ nm
P_t	حداقل توان هر فرستنده	۵۰ mW
θ	زاویه واگرایی فرستنده	۱ mrad
D	قطر دهانه گیرنده	۲۵ cm
M	تعداد فرستنده	۱-۴
N	تعداد گیرنده	۱
Fs	نرخ ارسال سیگنال مخابراتی	۲/۰۴۸ Mbit/sec
F ₀	نرخ ارسال سیگنال نوری	۸/۱۹۲ Mbit/sec
T ₀	دمای معادل نویز	۱۹۳ ^۰ K
K	ثابت بولتزمن	۱/۳۸ × ۱۰ ^{-۲۳}
η	ضریب تبدیل آشکارساز	۰/۸
V	میزان قابلیت دید با چشم غیر مسلح	۰/۱ - ۱۲ km

مطابق با این شکل در شرایط آشفتگی ضعیف که قابلیت دید با چشم غیرمسلح بیشتر از ۳/۵ km باشد می‌توان با توان فرستنده بیشتر از ۲۰۰ mw تا برد ۱۰ km ارتباط با احتمال خطای بهتر از ۱۰^{-۶} داشت. همین شرایط برای آشفتگی متوسط و قوی، با توان بیشتر از یک وات حاصل می‌شود که به خاطر محدودیت توان خروجی لیزر نیمه‌هادی تأمین آن به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. نتیجه دیگر شکل (۱۰) آن است که عملکرد لینک مخابرات نوری FSO به‌شدت تابع شرایط آب و هوایی است و سامانه باید حتماً مدیریت توان داشته باشد تا بتواند متناسب با گزارش‌گیری میزان احتمال خطا، توان خروجی فرستنده را کنترل نماید و نیز با توجه به همان شکل، به‌کارگیری سامانه برای بردهای بیش از چند کیلومتر در شرایط آشفتگی متوسط و قوی منطقی به نظر نمی‌رسد که این نکته با سامانه‌های موجود در عمل نیز سازگار است.

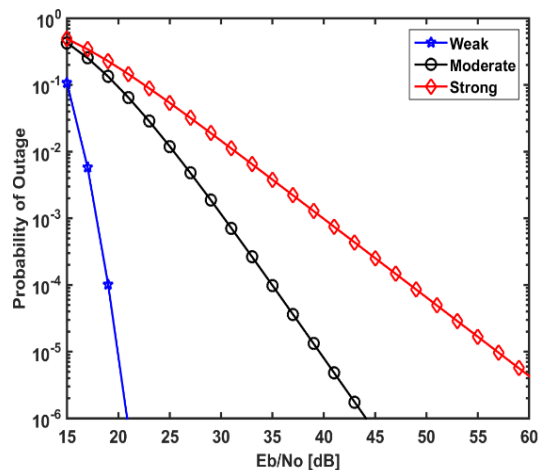


شکل (۱۰). حداقل توان موردنیاز برای حالت چهار فرستنده و یک گیرنده تکی، روش متوسط‌گیری دهانه و برحسب فاصله بین فرستنده و گیرنده برای داشتن $BER \leq 10^{-6}$

در این رابطه، $\gamma = \frac{E_b}{N_0}$ یا نسبت سیگنال به نویز و γ_{th} حداقل سیگنال به نویز قابل قبول و یا حد آستانه گیرنده است. طبق شکل (۹) در شرایط آشفتگی قوی، برای داشتن یک لینک ارتباطی با تابع احتمال قطع کمتر از 10^{-6} ، شدت سیگنال به نویز در گیرنده باید بیشتر از ۶۰ dB و برای آشفتگی متوسط حدود ۴۵ dB باشد.



شکل (۸). نرخ خطای بیت برای حالت فرستنده چندگانه و گیرنده تکی MISO و به‌کارگیری روش متوسط‌گیری دهانه



شکل (۹). بررسی احتمال قطع برای حالت فرستنده چندگانه و گیرنده تکی MISO و به‌کارگیری روش متوسط‌گیری دهانه

یکی دیگر از مباحث مهم در طراحی سامانه، محاسبه بودجه لینک سامانه شامل توان فرستنده و دیگر پارامترهای سیستمی و ارتباط آن با شرایط محیطی است. بدین منظور با به‌کارگیری روابط (۴) تا (۷)، شرایط مطرح‌شده برای حداقل سیگنال به نویز و پارامترهای بیان‌شده در جداول (۲) و (۳)، شکل (۱۰) حاصل خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی عملکرد سامانه‌های مخابرات نوری MISO همراه با روش متوسط‌گیری در حالت‌های مختلف شرایط آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از شبیه‌سازی عملکرد سامانه و بیان نمودارهای نرخ احتمال خطا (BER) و احتمال وقوع قطع (Outage) نشان داده شد که تضعیف‌های ناشی از آشفتنگی، برد این سامانه‌ها را محدود می‌نماید. انتخاب کد خط 1B4B برای قسمت باند پایه سامانه جهت انطباق سیگنال خروجی فرستنده مخابراتی به نوری پیشنهاد داده شد و دیگرام‌های حالت تولید و آشکارسازی این کد ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی بودجه لینک نشان داد که برای به دست آوردن نرخ خطای بیت کمتر از 10^{-6} در سامانه FSO با برد ۱۰ km و شرایط آشفتنگی ضعیف، ۴ فرستنده با توان جمعی حدود ۲۰۰ mw مورد نیاز است. در حالت آشفتنگی متوسط و قوی، توان مورد نیاز خیلی بیشتر از این مقدار است لذا در این شرایط باید توان فرستنده و یا تعداد آن‌ها را افزایش داد. اگر از این لینک‌ها در مناطق ساحلی و با رطوبتی بالا استفاده نشود در مقاطع کمی از زمان آشفتنگی متوسط و قوی اتفاق می‌افتد و در حالت عادی شرایط کانال آشفتنگی ضعیف است. مدیریت توان فرستنده متناسب با شرایط جوی جزء الزامات این سامانه‌ها است، چون این لینک‌ها به صورت دوطرفه کار می‌کنند، می‌توان با گزارش‌گیری از نرخ خطای بیت و انعکاس آن به سمت فرستنده، توان فرستنده‌ها و تعداد آن‌ها را به نحوی تنظیم کرد که BER مناسب حاصل گردد. این سامانه‌ها در شرایط آشفتنگی قوی یعنی هوای مه‌آلود یا رطوبتی بالا عملکرد مناسبی نداشته و در این شرایط بهتر است از سامانه‌های رادیویی استفاده شود.

۷- مراجع

- [6] H. R. Khodadadi, M. H. Ghezel Ayagh, K. B. Hossain, and A. Chaman-Motlagh, "Mitigation of Atmospheric Turbulence Impact on the Free Space Optical Communication using Space-Time Coding Based on MISO," *Passive Defence Sci. & Tech.*, vol. 3, pp. 231-237, 2013.
- [7] M. R. Bhatnagar, "A One Bit Feedback Based Beamforming Scheme for FSO MISO System Over Gamma-Gamma Fading," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 63, pp. 1306-1318, 2015.
- [8] R. Boluda-Ruiz, A. García-Zambrana, B. Castillo-Vázquez, and C. Castillo-Vázquez, "On the capacity of MISO FSO systems over gamma-gamma and misalignment fading channels," *Optics express*, vol. 23, pp. 22371-22385, 2015.
- [9] M. R. Bhatnagar and S. Anees, "On the performance of Alamouti scheme in Gamma-Gamma fading FSO links with pointing errors," *Wireless Communications Letters, IEEE*, vol. 4, pp. 94-97, 2015.
- [10] C. Ben Naila, A. Bekkali, K. Kazaura, and M. Matsumoto, "BPSK intensity modulated free-space optical communications using aperture averaging," In *Photonics (ICP), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-5.
- [11] M. Khalighi, N. Schwartz, N. Aitamer, and S. Bourennane, "Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems," *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 1, pp. 580-593, 2009.
- [12] I. B. Djordjevic, J. A. Anguita, and B. Vasic, "Error-correction coded orbital-angular-momentum modulation for FSO channels affected by turbulence," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 30, pp. 2846-2852, 2012.
- [13] I. Djordjevic, W. E. Ryan, and B. Vasic, *Coding for optical channels: Springer*, 2010.
- [14] F. Demers, H. Yanikomeroglu, and M. St-Hilaire, "A survey of opportunities for free space optics in next generation cellular networks," In *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2011 Ninth Annual*, 2011, pp. 210-216.
- [15] M. Al-Habash, R. Phillips, and L. Andrews, "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media," *Optical Engineering*, vol. 40, pp. 1554-1562, 2001.
- [16] M. Brahms and Z. Chahabadi, "Method for the transmission of data between two stations by means of optical waveguides," ed: Google Patents, 1992.
- [17] Z. Song, H. Zhou, Z. Geng, and Y. Takasaki, "Dependence of Jitter Accumulation on Line Codes for Clock Recovery with Minimal Filtering," in *Telecommunications, 2008. AICT'08. Fourth Advanced International Conference on*, 2008, pp. 381-385.
- [18] A. Vavoulas, H. G. Sandalidis, and D. Varoutas, "Weather effects on FSO network connectivity," *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. 4, pp. 734-740, 2012.
- [19] F. Nadeem, V. Kvicera, M. S. Awan, E. Leitgeb, S. Muhammad, and G. Kandus, "Weather effects on hybrid FSO/RF communication link," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 27, pp. 1687-1697, 2009.
- [20] H. Li-Qiang and W. Zhibin, "A Closed-form Expression for BER of FSO Links over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channels with Pointing Errors," 2013.
- [21] A. Chaman-Motlagh, V. Ahmadi, and Z. Ghassemlooy, "A modified model of the atmospheric effects on the performance of FSO links employing single and multiple receivers," *Journal of Modern Optics*, vol. 57, pp. 37-42, 2010.
- [1] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 16, pp. 2231-2258, 2014.
- [2] A. Vats and H. Kaushal, "Analysis of free space optical link in turbulent atmosphere," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, pp. 2776-2779, 2014.
- [3] M. Ijaz, S. Wu, Z. Fan, W. Popoola, and Z. Ghassemlooy, "Study of the Atmospheric Turbulence in Free Space Optical Communications," 2014.
- [4] E. Bayaki, R. Schober, and R. K. Mallik, "Performance analysis of MIMO free-space optical systems in gamma-gamma fading," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3415-3424, 2009.
- [5] Z. Ghassemlooy, W. O. Popoola, V. Ahmadi, and E. Leitgeb, "MIMO free-space optical communication employing subcarrier intensity modulation in atmospheric turbulence channels," in *Communications Infrastructure. Systems and Applications in Europe*, ed: Springer, 2009, pp. 61-73.

- [22] T. Tsiftsis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis, and M. Uysal, "FSO links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels," In Communications, 2008. ICC'08. IEEE International Conference on, 2008, pp. 5379-5384.
- [23] H. Yuksel and C. C. Davis, "Aperture averaging analysis and aperture shape invariance of received scintillation in free-space optical communication links," in SPIE Optics+ Photonics, 2006, pp. 63041E-63041E-11.

Designing of a Free Space Optical Communication System and Evaluation of its Performance in the Face of Climatic Change Phenomena

H. R. Khodadadi*, M. H. Ghezel Ayagh, A. Chaman Motlagh

*Imam Hossain University

(Received: 22/06/2016, Accepted: 31/10/2016)

ABSTRACT

Free-Space Optical (FSO) Communication has many advantages such as high bandwidth and high security and can also be a good alternative to radio communication systems. The main problem with the use of FSO is the presence of atmospheric phenomena such absorption, scattering and turbulence. This effect causes not only the weakening of the laser light transmission but also causes the multipath phenomena and behavior similar to the fading in the radio communication channels. In this paper, a model is presented to investigate the FSO attenuation and turbulence effect on its performance. Designing of an FSO system using a combination of methods such as Aperture averaging, Multiple Input Single Output (MISO) and Line code 1B4B to reduce the effects of turbulence has been examined and the behavior of system using error probability rate (BER) diagram and the probability of cutting (Outage) in different climatic conditions has also been simulated. Link budget analysis shows that an FSO system with 4 transmitters each with 200mW of optical power and a receiver with at least 25cm optical aperture can communicate data, in the moderate turbulence condition, with a maximum range of 10 km and a BER better than 10^{-6} .

Keywords: Free Space Optical Communication (FSO), Turbulence, Bit Error Rate (BER), Outage Probability, Line Code 1B4B

* Corresponding Author Email: hkhaddadi@ihu.ac.ir