

کاهش اثرات آشفتگی جریان هوا در مخابرات نوری فضای آزاد با به کارگیری کدهای فضا- زمان بر اساس ساختار چند چشمه‌ای

حمید رضا خدادادی^۱، محمد حسین قزل ایاغ^۲، حسین خالقی بیزکی^۳، ابوالفضل چمن مطلق^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مخابرات، ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع) و ۳- استادیار گروه مخابرات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
(دریافت: ۹۲/۰۲/۱۱، پذیرش: ۹۲/۰۷/۲۲)

چکیده

سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد، به دلیل امکان ارسال پهنای باند زیاد و امنیت بالا می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیستم‌های رادیویی باشد. مشکل اصلی به کارگیری این سیستم‌ها، وجود پدیده‌های جوی محیط انتشار نظیر توربولنس است. توربولنس ناشی از تغییرات ضریب شکست محیط انتشار در مسیر بین فرستنده و گیرنده است که موجب تغییرات شدت نور در گیرنده می‌شود. برای بیان شدت نوسانات نور دریافتی لینک‌های مخابرات نوری زمینی عمدتاً از تابع توزیع گاما - گاما استفاده می‌شود. توربولنس موجب می‌شود که نور منتشرشده در کانال انتقال دچار پدیده چند مسیریگی گردد و رفتاری مشابه با پدیده محوشدگی در کانال مخابرات سیار داشته باشد. در سیستم مخابرات سیار نسل سوم به بعد، برای غلبه بر پدیده محوشدگی از روش چند فرستنده و چند گیرنده به صورت ساختار MIMO استفاده می‌شود. در این مقاله برای غلبه بر پدیده توربولنس، بنا بر ملاحظات عملی، استفاده همزمان از روش متوسط‌گیری دهانه لنز گیرنده و تکنیک چند فرستنده و یک گیرنده (MISO) به همراه کدهای فضا - زمان در کانال با تابع توزیع گاما - گاما ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که در یک لینک مخابرات نوری با ۴ فرستنده و یک گیرنده و برد ۱۰ کیلومتر نرخ خطای بیت همواره کمتر از 10^{-6} خواهد بود.

کلید واژه‌ها: مخابرات نوری فضای آزاد، توربولنس، روش چند فرستنده و یک گیرنده MISO، کدهای فضا - زمان.

Mitigation of Atmospheric Turbulence Impact on the Free Space Optical Communication using Space-Time Coding Based on MISO

H. R. Khodadadi, M. H. Ghezel Ayagh, H. Khalegi Bezaki, A. ChamanMotlagh*

Imam Hossien University

(Received: 01/05/2013, Accepted: 14/10/2013)

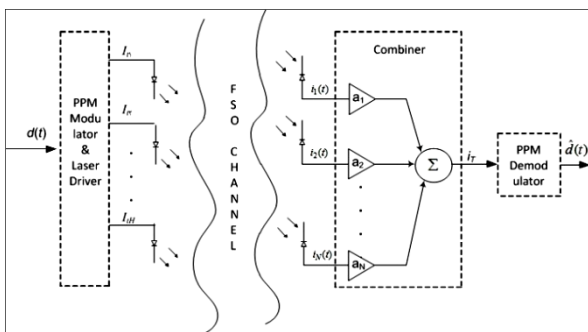
Abstract

Free-space optical communication has many advantages such as high bandwidth, high security and can be a good alternative for radio systems. The performance of this system could be degraded due to atmospheric turbulence. Turbulence-induced refractive index changes in the medium in the path between transmitter and receiver which leads fluctuation in light intensity on receiver. The gamma-gamma distribution is popularly accepted for modeling the received intensity fluctuations in the near-ground free-space optical communication. Turbulence can cause fading in mobile communication. In the third generation mobile communication systems, to overcome the fading phenomenon, multi-transmitter and multi-receiver MIMO structure is used. In this paper, mitigation of the turbulence effects, based on practical considerations, and using a MISO structure with space time-codes with aperture averaging method with gamma-gamma distribution has been studied. Simulation results show that the design link (MISO with 4 transmitter and 10km range) has BER of less than 10^{-6} even in the presence of strong turbulence.

Keywords: Free-Space Optical Communication, Turbulence, Multi Transmitter and Single Receiver (MISO), Space-Time Coding.

۱. مقدمه

جمع این دو پدیده موجب آن خواهد شد که در سمت گیرنده، دامنه شدت نور دریافتی متغیر بوده که اصطلاحاً به آن سوسوزدن می‌گویند. این پدیده موجب محوشدگی سیگنال در لحظاتی از زمان در گیرنده شده و در نهایت خطای سیستم را افزایش می‌دهد. این اثر مشابه پدیده چند مسیریگی کانال‌های مخابرات رادیویی بدون سیم (حالت فیدینگ عمیق) است. در چند سال اخیر پیاده‌سازی تکنیک MIMO توانسته تحولی را در مواجهه با پدیده چند مسیریگی کانال مخابراتی بدون سیم به‌وجود آورد. با توجه به شباهت کانال مخابرات نوری و رادیویی به‌نظر می‌رسد از این تکنیک بتوان برای کاهش اثر توربولنس محیط استفاده نمود. مطابق شکل (۲) در حالت MIMO از چندین فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود.

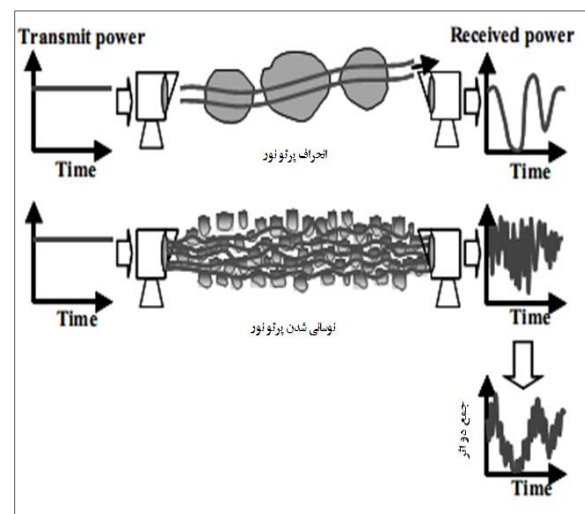


شکل ۲. به‌کارگیری روش MIMO در سیستم مخابرات نوری [۸]

مزیت سیستم MIMO داشتن ظرفیت یا دایورسیتی به‌ازای توان و پهنای باند ثابت است. در MIMO دریافت سیگنال در چند نقطه صورت می‌گیرد (دایورسیتی مکانی) بنابراین، تا حدودی اثر توربولنس نیز کاهش یافته و نرخ خطای بیت بهبود می‌یابد. به‌منظور کاهش بیشتر نرخ خطای بیت، باید میزان جابه‌جایی نوردریافتی در گیرنده، با استفاده از سیستم‌های اپتیکی محدود شود. طبیعی است که هرچه ابعاد گیرنده بزرگ‌تر باشد این امر بهتر انجام می‌شود. به‌دلیل اینکه در سیستم MIMO چند گیرنده وجود دارد، قرار دادن سیستم اپتیکی در ورودی هر گیرنده، ابعاد سیستم، پیچیدگی و هزینه آن را افزایش می‌دهد. علاوه بر این در سیستم MIMO، به‌علت وجود چند گیرنده نوری، توان نویز کل سیستم که ناشی از جمع نویز تمام آشکارسازهای گیرنده‌های نوری MIMO است نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است دیود آشکارساز گیرنده علاوه بر نویز حرارتی نویزهای دیگری نیز ایجاد می‌نماید. به‌دلیل معایب فوق، استفاده از سیستم چند فرستنده و یک گیرنده MISO^۴ در الویت است.

در این مقاله به‌کارگیری تکنیک MISO همراه با متوسط‌گیری زمانی و استفاده از کدهای متعامد فضا-زمان (برای ایجاد استقلال بین سیگنال فرستنده نوری) پیشنهاد شده است.

با توجه به تهدیدات جنگ الکترونیک در بسیاری از زمان‌ها نمی‌توان از سیستم‌های رادیویی در شرایط بحران استفاده کرد. در این شرایط سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد^۱ (FSO) می‌توانند جایگزین مناسب باشند. این سیستم‌ها از مزایای کم‌حجم بودن تجهیزات، توان مصرفی پایین، عدم نیاز به مجوز فرکانس، امکان ارسال پهنای باندهای بالاتر نسبت به سیستم‌های رادیویی و امنیت بهتر در برابر شنود و تهدیدات جنگ الکترونیک برخوردارند [۳-۱]. به‌دلیل داشتن امنیت بالا و مقاومت در مقابل اختلالات رادیویی این سیستم ارتباطی، می‌تواند در شرایط پدافند غیرعامل کارآمد باشد. در کنار این ویژگی‌های قابل توجه، 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 توربولنس و محوشدگی شده که تضعیف عملکرد سیستم را به‌دنبال خواهد داشت [۳]. تاکنون چندین روش برای مقابله با این محوشدگی پیشنهاد شده که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به تکنیک‌های متوسط‌گیری از سطح لنز [۴]، به‌کارگیری چندین فرستنده و گیرنده MIMO^۲ [۵-۷]، استفاده از تکنیک‌های کدینگ [۸-۹] و ترکیب لینک‌های نوری و رادیویی^۳ [۱۰] اشاره نمود. در این مقاله با ارائه تلفیق تکنیک‌های مخابراتی و اپتیکی، مدلی برای کاهش اثر توربولنس ارائه شده است. در سیستم‌های مخابرات نوری به‌خاطر اثر پخش‌شدگی ناشی از توربولنس نور به‌صورت کاملاً مستقیم منتشر نشده و دچار انحراف می‌شود. مطابق شکل (۱) ذرات بزرگ مثل قطرات آب موجود در مه مسیر نور را منحرف نموده و ذرات کوچک مثل گرد و غبار به‌صورت تصادفی مسیر نور را تغییر می‌دهد.



شکل ۱. توده‌های هوایی در اتمسفر [۱]

^۱ Free Space Optical Communication

^۲ Multiple Input Multiple Output

^۳ FSO / RF

^۴ Multiple Input Single Output

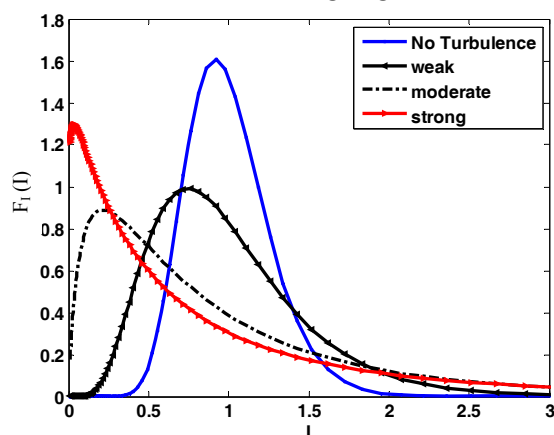
که در آن، I یک متغیر تصادفی و بیانگر شدت نور دریافتی، $K_{\alpha-\beta}$ تابع بسل مرتبه دوم، $\Gamma(\alpha)$ و $\Gamma(\beta)$ توابع توزیع گاما و α و β پارامترهای کانال انتقال هستند که به صورت تجربی به دست می آیند. این دو پارامتر رابطه مستقیمی با تعداد مؤثر پراکنده کننده ها (عوامل تفرق و پراکندگی اشعه) دارند که به صورت زیر بیان می شود [۱۱]:

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49\sigma_R^2}{\left(1 + 0.56\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

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

در شکل (۳) به ازای شرایط مختلف آب و هوایی تابع توزیع گاما - گاما رسم شده است. همان طور که دیده می شود در شرایط توربولنسی ضعیف، کانال به کانال گوسی (AWGN^۲) نزدیک است و در شرایط توربولنسی قوی، پراکندگی لکه های نور دریافتی بیشتر می شود.

تابع توزیع گاما - گاما



شکل ۳. تابع توزیع گاما-گاما به ازاء شرایط مختلف آب و هوا

۳. روش های کاهش اثرات شرایط محیطی بر کارایی سیستم مخابرات نوری فضای آزاد

تا کنون برای غلبه بر شرایط محیطی روش های مختلفی ارائه شده است [۷-۳]. با این حال هیچ کدام از این روش ها به تنهایی نمی تواند در شرایط توربولنسی قوی، میزان خطای سیستم را در حد مطلوب یک سیستم مخابراتی نگه دارد بنابراین، در مقاله حاضر استفاده هم زمان از روش های متوسط گیری دهانه لنز گیرنده، MISO و کدهای فضا-زمان پیشنهاد شده است.

۲. کانال انتقال سیستم های مخابرات نوری فضای آزاد

در یک سیستم مخابرات نوری فضای آزاد اتمسفر به عنوان یک محیط برای انتشار و انتقال نور در نظر گرفته می شود. تضعیف اتمسفری غالباً بر اثر وجود مه بوده ولی ابرهای کم ارتفاع، باران، برف، گرد و غبار و یا ترکیبی از هر کدام نیز بر کارایی سیستم اثر می گذارد. تضعیف در اتمسفر با عواملی همچون تلفات پراکندگی، تلفات جذب، اثر توربولنس و پاشیدگی بیان می شود. این تلفات تابع شرایط محیطی است و می تواند موجب قطع شدن لینک ارتباطی شود. مهم ترین عامل تضعیف در کانال مخابرات نوری توربولنس است که در شکل (۱) نشان داده شده است. طبق رابطه ریتوف^۱ میزان واریانس دامنه پرتو لیزر در اثر پدیده توربولنس به صورت زیر است [۱۱]:

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

در این رابطه $k = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$ عدد موج، λ طول موج پرتو، L فاصله بین فرستنده و گیرنده و C_n^2 پارامتر ساختاری ضریب شکست جو است و تابع عواملی نظیر ارتفاع از سطح زمین و دما و فشار است. در جدول (۱) مقدار C_n^2 در شرایط مختلف جوی آورده شده است.

جدول ۱. مقدار پارامتر C_n^2 در شرایط مختلف جوی [۱۰]

وضعیت تلامت اتمسفری	V (km)	C_n^2 ($m^{-2/3}$)	σ_R^2 (m^2)
بسیار ضعیف	۱۰/۲۷	5×10^{-17}	۰/۰۶۷۸
ضعیف	۳/۵	1.7×10^{-16}	۰/۲۳۰۶
ضعیف	۰/۷۷	3×10^{-16}	۰/۴۰۶۹
متوسط	۲/۸	6×10^{-16}	۰/۸۱۳۹
متوسط	۱/۹	4×10^{-16}	۰/۵۴۲۶
قوی	۰/۱۵	3×10^{-14}	۱۳/۵۶۴

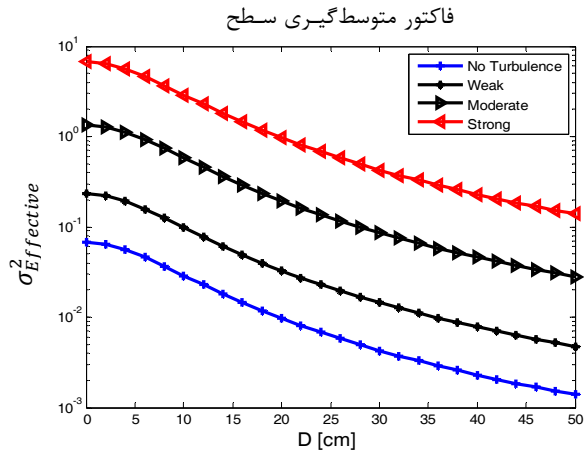
در جدول فوق پارامتر V بیانگر میزان دید با چشم غیرمسلح بر حسب کیلومتر و σ_R^2 میزان تغییرات دامنه پرتو نور برای یک لینک با برد ۱۰ کیلومتر است. اگر در مسیر انتشار نور، ذرات کوچک و بزرگ گرد و غبار و قطرات آب وجود داشته باشد، دامنه تغییرات توربولنس از یک محدوده ضعیف تا قوی در حال تغییر خواهند بود. از اینرو توزیع تغییرات تصادفی کانال می تواند با استفاده از توزیع گاما-گاما بیان شود [۱۲]. در این توزیع شدت توربولنس ضعیف و قوی با دو تابع مستقل گاما به صورت زیر بیان می شود:

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

² Additive White Gaussian Noise

¹ Raytov

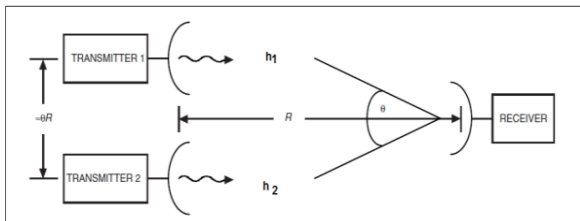
یک طول موج خاص برای هر مسیر است. اشکال این روش، به دلیل تنوع سیستم، پیچیدگی و در نتیجه افزایش هزینه است.



شکل ۴. تکنیک متوسط‌گیری سطح لنز

۳-۳. کدهای فضا - زمان

از کدهای بلوکی فضا- زمان برای مواجهه با چند مسیریگی و ایجاد تعامد و به دست آوردن بیشینه بهره دایورسیتی کانال‌های چندگانه رادیویی استفاده می‌شود. ساده‌ترین حالت این کدها کد الموتی است که از ترکیب دو فرستنده و یک گیرنده به صورت ساختار MISO استفاده می‌نماید [۱۳-۱۴]. این روش از یک عملیات ساده خطی در گیرنده بهره می‌گیرد. در شکل (۵) ساختار کانال 2×1 نشان داده شده است. در این شکل S_1 و S_2 سیگنال ارسالی توسط فرستنده ۱، ۲، h_1 و h_2 ضرایب تضعیف ناشی از کانال مسیریهای ۱، ۲، n_1 و n_2 نویز جمع شونده در نظر گرفته شده است. در روش الموتی، سیگنال ارسالی فرستنده‌ها در یک سمبل (نصف زمان) S_1 و S_2 و در سمبل دیگر S_1^* و $-S_2^*$ می‌باشد بنابراین، در گیرنده خواهیم داشت:



شکل ۵. دو فرستنده و یک گیرنده 2×1 [۱۴]

$$r_1 = r(t) = h_1 S_1 + h_2 S_2 + n_1 \quad (7)$$

$$r_2 = r(t + T) = -h_1 S_2^* + h_2 S_1^* + n_2$$

می‌توان r سیگنال دریافتی در گیرنده را به صورت ماتریسی نیز نمایش داد:

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ -h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = H \cdot S + N \quad (8)$$

پس از انجام دیکدینگ فضا- زمان خواهیم داشت:

۳-۱. تکنیک متوسط‌گیری با استفاده از لنز گیرنده

هنگامی که پرتو نور مسیری نسبتاً طولانی را پیموده و یا به عبارتی از درون یک توربولنس قوی عبور داده شود، مطابق شکل (۱) در گیرنده شدت نور دریافتی نوسانی است بنابراین، به صورت تصادفی در قسمت‌های مختلف سطح لنز گیرنده شدت درخشش کم و زیاد می‌شود که این امر منجر به محو شدن سیگنال در برخی نقاط می‌گردد. حال اگر سایز لنز گیرنده، متناسب با این بخش‌های نوری (قسمت‌های ضعیف و قوی) افزایش یابد، در حقیقت از این نوسانات و زیاد و کم شدن‌ها میانگین گرفته شده که این تکنیک متوسط‌گیری سطح لنز^۱ نامیده می‌شود. به دلیل محدودیت‌های کاربردی نظیر ابعاد سیستم و هزینه لنز، اندازه دهانه گیرنده بیشتر از ۲۵ سانتی‌متر توصیه نمی‌شود. میزان تأثیر متوسط‌گیری سطح لنز با یک عامل به نام F مشخص می‌شود [۴]:

$$F = \frac{\sigma_R^2(D)}{\sigma_R^2(0)} \quad (4)$$

که در آن، $\sigma_R^2(D)$ واریانس جابه‌جایی مکانی سیگنال دریافتی برای گیرنده با دهانه با قطر D و $\sigma_R^2(0)$ واریانس جابه‌جایی مکانی سیگنال دریافتی برای گیرنده نقطه‌ای برای موج مسطح است. با توجه به پارامترهای لنز F ، ضریب متوسط‌گیری دهانه، به صورت زیر بیان می‌شود [۴]:

$$F = \left[1 + 1.062 \left(\frac{kD^2}{4L} \right) \right]^{-7/6} \quad (5)$$

که در این رابطه، L فاصله بین فرستنده و گیرنده، $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج پرتو و D قطر دهانه گیرنده است. مطابق رابطه (۵)، برای $kD^2/4L \ll 1$ یعنی زمانی که قطر لنز گیرنده کوچک است فاکتور F برابر با یک می‌شود. برای لنزهای بزرگ‌تر، $kD^2/4L \gg 1$ شده و با افزایش سطح مقطع گیرنده عدد F کاهش می‌یابد. با به کارگیری رابطه (۱) در (۴) واریانس مؤثر سیستم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_{R,Effective}^2 = F \times (1.23 C_n^2 \lambda^{11/6} L^7) \quad (6)$$

طبق روابط (۵) و (۶) افزایش قطر عدسی گیرنده موجب کاهش F و در نتیجه کاهش اثر واریانس جابه‌جایی نور ناشی از توربولنس می‌شود. شکل (۴) نمودار ضریب کاهش عدد σ_R^2 را بر حسب افزایش سطح دهانه گیرنده، شرایط مختلف توربولنسی و لینک مخابرات نوری با برد ۱۰ کیلومتر نشان می‌دهد.

۳-۲. تکنیک چند فرستنده و یک گیرنده

به خاطر وجود توربولنس ممکن است در لحظاتی از زمان پرتو نور دریافتی محو گردد بنابراین، می‌توان به منظور افزایش ضریب امنیت سیستم از ترکیب چند فرستنده و یک گیرنده MISO استفاده نمود. شرط آنکه در سیستم MISO حداکثر راندمان حاصل شود آن است که سیگنال‌های ارسالی بین فرستنده‌ها نسبت به هم مستقل باشند. یکی از روش‌های متداول برای ایجاد این استقلال، در نظر گرفتن

¹ Aperture Averaging

$$Z = H^T \cdot H \cdot S + H^T \cdot N =$$

$$\begin{bmatrix} h_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_4^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1' \\ n_2' \\ n_3' \\ n_4' \end{bmatrix} \quad (13)$$

مشابه با حالت کد الموتی، سیگنال به نویز در خروجی آشکارساز از رابطه زیر به دست می آید [۱۲]:

$$SNR = \sum_{i=1}^4 |h_i^2| \left(\frac{E_b}{2N_0} \right) \quad (14)$$

۴. نتایج شبیه سازی

در این مقاله عملکرد یک لینک مخابرات نوری با برد ۱۰ کیلومتر و ساختار چند فرستنده و یک گیرنده و کدینگ کانال فضا-زمان و مدولاسیون ارسال PPM از نظر نرخ خطای بیت و شرایط مختلف توربولنسی مورد ارزیابی قرار می گیرد. بدین منظور، ابتدا مسئله برای حالت فرستنده و گیرنده تکی (SISO) بررسی می شود. در این حالت سیگنال دریافتی به صورت زیر خواهد بود.

$$r = \eta I s + n \quad (15)$$

به طوری که S سیگنال ارسالی، I متغییر تصادفی با توزیع گاما - گاما بیانگر شدت نور سیگنال دریافتی، η ضریب بازده سیگنال نوری به الکتریکی آشکارساز و n نویز گوسی جمع شونده است. به منظور سادگی کار، آشکارساز ایده آل در نظر گرفته می شود. میزان خطا در این لینک مخابرات نوری به شرط آنکه در فرستنده از مدولاسیون PPM استفاده شود و $f_1(I)$ تابع توزیع توربولنس کانال باشد از رابطه زیر به دست می آید [۱۲]:

$$Pe = \int_0^{\infty} f_1(I) Q \left(\sqrt{\frac{E_b I^2}{2N_0}} \right) dI \quad (16)$$

که در آن، E_b انرژی سیگنال دریافتی درگیرنده، N_0 چگالی نویز سفید و $Q(x)$ تابع مارکوم است. چنانچه توزیع کانال $f_1(I)$ توزیع توربولنس گاما - گاما در نظر گرفته شود، میزان خطا در شرایط مختلف آب و هوایی به صورت شکل (۶) خواهد بود.

همان طور که در شکل (۶) دیده می شود، برای حالت های توربولنسی متوسط به بالا، حتی با وجود سیگنال به نویز نسبت به نویز ۴۰ دسیبل نرخ خطای بیت بیشتر از 10^{-4} است بنابراین، با شرایط موجود، این سیستم توانایی کار در شرایط آب و هوایی نامناسب را ندارد.

حال چنانچه یک سیستم MISO با M فرستنده با سیگنال ارسالی مستقل در نظر گرفته شود، در گیرنده سیگنال حاصل از فرستنده ها با هم جمع شده و با رابطه زیر بیان می شود:

$$r_{total} = \eta \sum_{m=1}^M I_m S_m + n \quad (17)$$

در این رابطه S_m ، سیگنال ارسالی هر فرستنده، I_m متغییر تصادفی با توزیع گاما-گاما و بیانگر شدت نور سیگنال دریافتی است. چنانچه در لینک مخابرات نوری، فرستنده از کد فضا-زمان با

$$Z = H^+ \cdot H \cdot S + H^+ \cdot N =$$

$$\begin{bmatrix} h_1^2 & 0 \\ 0 & h_2^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1' \\ n_2' \end{bmatrix} \quad (9)$$

در این رابطه، H^+ مزدوج ترانهاده ماتریس H است و به دلیل خاصیت تعامد بین المان های ماتریس H نویز همچنان سفید خواهد بود و سیگنال های دریافتی r_1 و r_2 نسبت به هم مستقل هستند بنابراین، آشکارسازی با روش بیشترین شباهت^۱ به سادگی صورت گرفته و نسبت سیگنال به نویز، در خروجی آشکارساز از رابطه زیر به دست می آید:

$$SNR = (|h_1^2| + |h_2^2|) \left(\frac{E_b}{2N_0} \right) \quad (10)$$

به منظور کنترل تغییرات ناشی از توربولنس در یک صفحه، می توان به جای دو فرستنده از چهار فرستنده استفاده کرد. این روش علاوه بر ایجاد دایورسیتی مکانی بهتر از این امتیاز برخوردار است که از چهار لیزر کم توان به جای یک لیزر پر توان استفاده می کند و در نتیجه سیستم اقتصادی تر و ساخت آن را ساده تر می شود.

دیود لیزر نمی تواند سیگنال مختلط را ارسال نماید بنابراین، از کدینگ فضا-زمان با استفاده از کد جعفرخانی [۱۵] که از کد الموتی نتیجه گرفته شده و ماتریس آن در زیر آورده شده، استفاده می شود:

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ -S_2 & S_1 & -S_4 & S_3 \\ -S_3 & S_4 & S_1 & -S_2 \\ -S_4 & -S_3 & S_2 & S_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در اینجا $\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ سیگنال های ارسالی است و در هر $\frac{T}{4}$ از زمان، یک ستون از ماتریس فوق ارسال می شود. به عبارت دیگر، هر ستون از این ماتریس با پیوند تکرار T ارسال می گردد. در سمت گیرنده برای آشکارسازی، باید سیگنال دریافتی را در ترانهاده ماتریس H که ماتریس تخمین کانال است ضرب نمود. برای به دست آوردن H در بین سیگنال ارسالی یک سری بیت راهنما قرار داده می شود. با توجه به معلوم بودن مکان بیت های دریافتی و مقدار آن و رابطه ای که بین آنها حاکم است ماتریس H محاسبه می گردد.

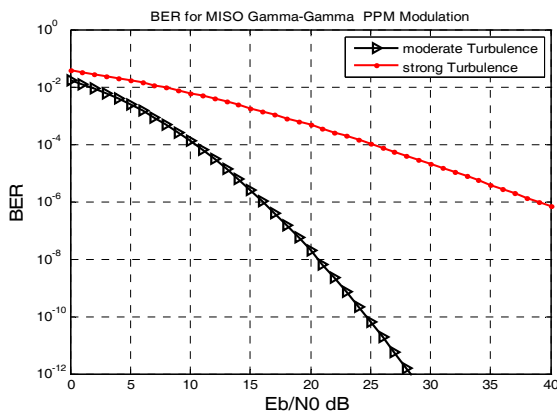
$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_2 & -h_1 & h_4 & -h_3 \\ h_3 & -h_4 & -h_1 & h_2 \\ h_4 & h_3 & -h_2 & -h_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

قبل از مرحله آشکارسازی سیگنال در مدولاتور باید دیکدینگ کد فضا-زمان انجام پذیرد:

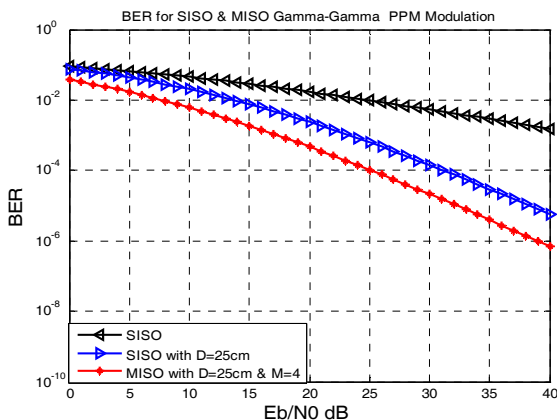
³ Single Input Single Output

¹ Maximum Likelihood
² Pilot

در شکل (۹) به منظور مقایسه و ارزیابی بهتر نرخ خطای بیت برای سه سیستم، شامل یک سیستم SISO با گیرنده نقطه‌ای، یک سیستم SISO همراه با لنز گیرنده با قطر ۲۵ سانتی‌متر و یک سیستم با ۴ فرستنده و لنز گیرنده با قطر ۲۵ سانتی‌متر و شرایط توانی یکسان و توربولنس قوی مقایسه شده‌اند. طبق شکل بالا، افزایش تعداد فرستنده، بهبود عملکرد سیستم را به دنبال داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که با داشتن سیگنال به نویز ۴۰dB در حالت MISO می‌توان به نرخ خطای بیت کمتر از 10^{-6} رسید، در حالی که با همین سیگنال به نویز در حالت SISO و گیرنده نقطه‌ای حداکثر نرخ خطای حدود 10^{-3} را می‌توان انتظار داشت.



شکل ۸. نرخ خطای بیت برای حالت فرستنده چندگانه و گیرنده تکی MISO و به کارگیری روش متوسط‌گیری دهانه با یک لنز به قطر ۲۵ سانتی‌متر



شکل ۹. نرخ خطای بیت برای توربولنس قوی و سیستم‌های SISO و MISO

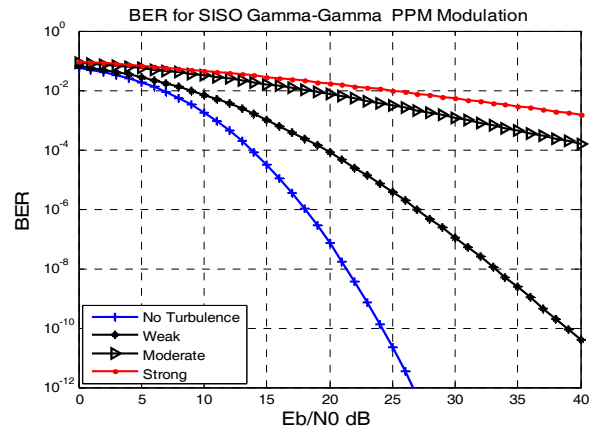
۵. نتیجه‌گیری

به کارگیری کدهای فضا-زمان در سیستم‌های مخابرات نوری MISO همراه با روش متوسط‌گیری در حالت‌های مختلف شرایط آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که هر چه تعداد فرستنده‌ها، توان ارسالی آنها و همچنین سطح مقطع گیرنده بزرگ‌تر باشد، BER سیستم کاهش می‌یابد. امتیاز روش ارائه شده نسبت به حالت MIMO در آن است که سیستم یک گیرنده دارد

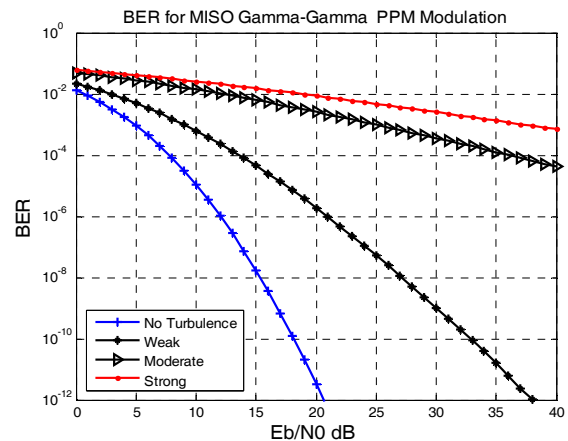
مدولاسیون PPM استفاده کرده و $f_I(I_m)$ تابع توزیع توربولنس کانال باشد می‌توان با نتیجه‌گیری از رابطه (۱۳)، نرخ خطای بیت متوسط کانال را به صورت زیر به دست آورد:

$$P_e = \int_{\mathcal{X}} f_I(I_m) Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0} \sum_{m=1}^M I_m^2}\right) dX \quad (18)$$

با در نظر گرفتن $M=4$ میزان خطا در شرایط مختلف آب و هوایی به صورت شکل (۷) خواهد شد.



شکل ۶. نرخ خطای بیت برای حالت فرستنده و گیرنده تکی SISO و شرایط مختلف جوی



شکل ۷. نرخ خطای بیت برای حالت فرستنده چندگانه و گیرنده تکی MISO و شرایط مختلف جوی

از مقایسه شکل (۶) و (۷) و شرایط توربولنسی یکسان و نرخ خطای بیت 10^{-6} می‌توان نتیجه گرفت که روش MISO با $M=4$ حدود 6dB بهبود سیگنال به نویز به وجود می‌آورد. این سیستم نیز برای ایجاد نرخ خطای بیت کمتر از 10^{-6} به توان بالایی نیاز دارد بنابراین، سیستم توانایی کار در شرایط آب و هوایی نامناسب را ندارد. حال چنانچه علاوه بر روش فرستنده چندگانه و گیرنده تکی، از یک لنز با قطر ۲۵ سانتی‌متر برای متوسط‌گیری دهانه استفاده شود، وضعیت BER بهتر خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود، این سیستم به غیر از حالت توربولنس شدید (شرایط مه غلیظ) توانایی ایجاد نرخ خطای بیت بهتر از 10^{-6} با توان کمتر از 20dB را دارد.

- [5] Bayaki, E.; Schober, R.; Mallik, R. K. "Performance Analysis of MIMO Free-Space Optical Systems in Gamma-Gamma Fading"; IEEE Trans. Communication 2009, 57, 3415-3424.
- [6] Abouei, J.; Plataniotis, K. N. "Multiuser Diversity Scheduling in Free-Space Optical Communications"; J. Lightwave Tech. 2012, 30, 1351-1358.
- [7] Senaratne, D.; Tellambura, C.; Suraweera, H. A. "Performance Analysis of MIMO Channel Inversion in Rayleigh Fading"; IEEE Trans. on Vehicular Tech. 2012; 61, 1188-1196.
- [8] Popoola, W. O.; Ghassemlooy, Z. "BPSK Subcarrier Intensity Modulated Free-Space Optical Communication in Atmospheric Turbulence"; J. Lightwave Tech. 2009, 27, 967-973.
- [9] Navidpour, S. M.; Uysal, M.; Kavehrad, M. "BER Performance of Free-Space Optical Transmission with Spatial Diversity"; IEEE Trans. Wirel. Comm. 2007, 6, 2813-2819.
- [10] Lee, I. E.; Ghassemlooy, Z.; Ng, W. P.; Rajbhandari, S. "Fundamental Analysis of Hybrid Free Space Optical and Radio Frequency Communication Systems"; 12 Th. annual Postgraduate Symp. on Convergence of Telecommunication, Networking and Broadcasting, 2011, 27-28.
- [11] Yang, G.; Khalighi, M. A.; Bourennane, S.; Ghassemlooy, Z. "Approximation to the Sum of Two Correlated Gamma-Gamma Variants and Its Applications in Free-Space Optical Communications"; IEEE Wireless Communications Letters 2012, 1, 621-624.
- [12] Bayaki, E.; Schober, R.; Mallik, R. K. "Performance Analysis of MIMO Free-Space Optical Systems in Gamma-Gamma Fading"; IEEE Trans. Comm. 2009, 57, 3415-3424.
- [13] Alamouti, S. M. "A Simple Transmitter Diversity Scheme for Wireless Communications"; J. IEEE Commun. 1998, 16, 1451-1458.
- [14] Simon, M. K.; Vilnrotter, V. "Alamouti-Type Space-Time Coding for Free-Space Optical Communication with Direct Detection"; J. IEEE Trans. Wireless Communication Information Theory 2003, 49, 1385-1399.
- [15] Jafarkhani, H.; Seshadri, N. "Super-Orthogonal Space-Time Trellis Codes"; J. IEEE Trans. Wireless Communication Information Theory 2003, 49, 937-950.

بنابراین، می‌توان با متوسط‌گیری توسط لنز گیرنده، تغییرات نور ناشی از توربولنس را تا حد زیادی محدود نمود. در ضمن چون سیگنال ارسالی با کد زمان-فضا ارسال می‌شود، تداخل فاز سیگنال‌های مسیره‌های مختلف در گیرنده موجب محوشدگی سیگنال نمی‌شود. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده نشان داد که برای به‌دست آوردن نرخ خطای بیت بهتر از 10^{-6} برای لینک با برد ۱۰ کیلومتر و شرایط توربولنس قوی، توان سیگنال نسبت به نویز ۴۰ دسیبل مورد نیاز است. البته در عمل این شرایط به‌ندرت اتفاق می‌افتد و در حالت عادی می‌توان با کم کردن توان فرستنده‌ها و یا تعداد آنها توان ارسالی را کمتر نمود. به‌عبارت دیگر مدیریت توان متناسب با شرایط جوی جزء الزامات این سیستم‌ها است. از آنجا که لینک‌های مخابرات نوری به‌صورت دو طرفه^۱ کار می‌کنند، می‌توان در این در سیستم‌ها با گزارش‌گیری از نرخ خطای بیت لینک و انعکاس آن به سمت فرستنده، توان فرستنده‌ها و تعداد آنها را به‌نحوی تنظیم کرد که BER مناسب حاصل شود.

۶. مراجع

- [1] Demers, F.; Yanikomeroğlu, H.; St-Hilaire, M. "A Survey of Opportunities for Free Space Optics in Next Generation Cellular Networks"; In Proc. CNSR; 2011, 210-216.
- [2] Hennier, H.; Wilfert, O. "An Introduction to Free space Optical Communications"; J. Radio Eng. 2010, 19, 203-212.
- [3] Prokeš, A. "Modeling of Atmospheric turbulence Effect on Terrestrial FSO Link"; J. Radio Eng. 2009, 18, 42-47.
- [4] Yuksel, H.; Davis, C. C. "Aperture Averaging Analysis and Aperture Shape Invariance of Received Scintillation in Free Space Optical Communication Links"; In Proc. SPIE Free-Space Laser Commun. 2006, 6304.

¹ Full Duplex