

برآورد تأثیرات سایز لنز گیرنده بر نرخ خطا در سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد امن

مهدی مفیدی^۱، ابوالفضل چمن مطلق^۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۲۶

چکیده

برقراری یک سیستم مخابراتی امن و مقاوم در برابر تهدیدات جنگ الکترونیک، همواره جزء چالش‌های اصلی مخابرات نظامی بوده است. فرکانس بالای امواج نوری، ظرفیت بالای انتقال اطلاعات و انتشار در خط مستقیم این امواج، سیستم‌های مخابرات نوری در فضای آزاد (FSO) را به یک تکنولوژی ارتباطی محبوب در کاربردهای پدافندی و نظامی تبدیل کرده است ولی عمل کرد این سیستم‌ها می‌تواند تحت تأثیر توربولانس جوی، که منجر به ایجاد نوسانات تصادفی در دامنه و فاز سیگنال دریافتی می‌گردد، به شدت کاهش یابد. روش‌هایی همچون متوسط‌گیری از سطح لنز و یا به کارگیری مدولاسیون‌های مختلف در مقابله با اثرات مخرب این پدیده نقش بسزایی دارند. هدف این مقاله، بررسی تکنیک متوسط‌گیری سطح لنز و مقایسه نرخ خطا در مدولاسیون‌های مختلف در شرایط توربولانسی متفاوت است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که تأثیر سایز لنز گیرنده در شرایط توربولانسی قوی بیشتر بوده و همچنین بهبود حاصل از تکنیک متوسط‌گیری سطح لنز در مدولاسیون M-Ary PPM، $(M > 2)$ نسبت به مدولاسیون OOK و DPSK بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: توربولانس اتمسفری، تکنیک متوسط‌گیری سطح لنز، مدولاسیون، مخابرات نوری امن در فضای آزاد، نرخ خطا

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد برق - الکترونیک، Email:mehdi.mofidi@yahoo.com

۲- مدرس و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع) - گروه برق - الکترونیک،

۱- مقدمه

سیستم‌های مخابرات نوری فضای آزاد^۱ که با نام سیستم‌های مخابرات نوری بی‌سیم نیز شناخته می‌شوند به‌دلایلی همچون پهنای باند بالا (GHz)، عدم نیاز به کسب مجوز فرکانسی، عدم تداخل، امنیت خوب (به‌دلیل انتشار در خط مستقیم) و نویزپذیری کم، محبوبیت رو به گسترشی دارند. از دیگر مزایای مخابرات نوری در فضای آزاد نسبت به سیستم‌های RF می‌توان به تجهیزات کوچک‌تر و توان مصرفی کمتر اشاره کرد [۱].

از بین مزایای مذکور، در یک شبکه مخابرات نظامی، «امنیت» یکی از مهم‌ترین فاکتورهاست. عموماً برای غلبه بر امنیت یک شبکه، به انجام رسیدن دو مسئله لازم است: ۱) شنود کافی سیگنال برای بازیافت اطلاعات، ۲) توانایی لازم برای رمزگشایی اطلاعات. اگر این دو موضوع تحقق نیابد، امنیت اطلاعات شبکه پابرجا خواهد ماند. سیستم‌های FSO برخلاف سیستم‌های RF، به‌دلیل دارا بودن بیم بسیار نازک و جهت‌دار برای انتقال اطلاعات به‌صورت LOS^۲ قابل شنود و آشکارسازی در محدوده کوچکی (در حد قطر پرتو لیزر در سمت‌گیرنده) بوده و همچنین به‌دلیل اختلاف فرکانسی بسیار زیاد با سیستم‌های مخابرات رادیویی رایج، در برابر تکنیک‌های جنگ الکترونیک که مبتنی بر ایجاد اختلال فرکانسی در محدوده طیفی سیستم‌های مخابراتی هستند، مقاوم‌اند (این اختلالات در فرکانس‌های موردنظر، با توان بالا و در جهات مختلف، در محدوده مکانی خاص منتشر شده و موجب مختل شدن ارتباطات بی‌سیم می‌شوند) [۱].

در کنار مزایای اصلی مخابرات FSO، پیاده‌سازی عملی این تکنیک با چالش‌هایی روبه‌رو است و مهم‌ترین آنها توربولانس اتمسفری است. توربولانس نتیجه تغییرات در ضریب شکست توده‌های هوا می‌باشد، که این خود ناشی از نوسانات دائمی در فشار و دمای هوا بوده که از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. این عامل سبب نوسانات سریع در سیگنال نوری دریافتی شده و به‌عبارتی نوعی محوشدگی لحظه‌ای^۳ پدید می‌آورد که می‌تواند عمل‌کرد مخابرات FSO را به‌شدت کاهش دهد.

تاکنون چند روش برای مقابله با این محوشدگی پیشنهاد شده که از جمله می‌توان به بهره‌گیری از دایورسیتی^۴ در ارسال و دریافت پرتوها اشاره کرد [۲]؛ راه‌حلی که مدت‌هاست در سیستم‌های RF استفاده می‌شود. در این شیوه احتمال سد شدن همزمان پرتوهای ارسالی بسیار کاهش پیدا کرده و به سیستم اجازه می‌دهد تا فواصل طولانی‌تری را تحت پوشش قرار دهد. یکی از مهم‌ترین ضعف‌های این تکنیک، وجود همپوشانی^۵ بین پرتوهای دریافتی هنگام آشکارسازی

است. علاوه بر آن، استفاده همزمان از چند فرستنده و چند گیرنده باعث افزایش پیچیدگی سیستم و دشواری در پیاده‌سازی آن می‌شود. محدودیت‌های یک لینک^۶ MIMO اولین بار در مرجع [۳] مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به مشکلات فوق، استفاده از یک فرستنده و چند گیرنده^۷ (SIMO) و یا بالعکس (MISO)، از دیگر روش‌های پیشنهادی بوده است. نویسنده در مرجع [۴] ضمن بررسی یک سیستم SIMO اثرگذاری طول موج و همچنین تعداد گیرنده‌ها را در این نوع سیستم‌ها مورد مطالعه قرار داده است. همچنین در مرجع [۵] ثابت شده است که در فواصل کم بین گیرنده و فرستنده افزایش تعداد گیرنده‌ها نه تنها به بهبود نرخ خطا کمکی نکرده، بلکه باعث کاهش SNR لازم در یک نرخ خطای ثابت هم خواهد شد.

راه حل دیگر، استفاده از الگوریتم^۸ MLSD [۶] است که در واقع آشکارسازی، براساس یک سطح آستانه (ترشولد) بهینه صورت می‌گیرد. از آنجایی که این روش با محاسبات پیچیده ریاضی دست‌وپنجه نرم می‌کند، کمتر مورد استفاده است. استفاده از کدهای کشف یا تصحیح خطا در رشته‌بیت‌های ارسالی نیز از دیگر روش‌های مورد استفاده است [۷]. در مواردی نیز این تکنیک به‌عنوان یک پشتیبان برای سیستم‌های RF استفاده می‌شود، به‌طوری‌که دو سیستم نوری و رادیویی با یکدیگر در یک لینک ترکیب^۹ شده و خصوصاً در مواردی که شرایط جوی مساعد است می‌توان به‌جای مخابرات RF از پهنای باند بالای سیستم‌های FSO استفاده کرد. کاربرد نظامی این سیستم‌ها به‌دلیل پوشش هم‌جانبه آن‌ها نیز گسترده است. مرجع [۸]، این نوع سیستم‌ها، نحوه سوئیچینگ بین دو سیستم و همزمانی آنها را مورد بررسی قرار داده است.

علاوه بر روش‌های ذکر شده، سایز لنز اپتیکی در قسمت گیرنده نیز تاثیر به‌سزایی در بهبود عمل‌کرد لینک دارد. با افزایش قطر لنز، تغییرات واریانس در سطح سیگنال دریافتی کاهش می‌یابد. مطالعه اثر این سایز بر روی تغییرات سطح سیگنال، معادل‌سازی سطح لنز یا Aperture Averaging نامیده می‌شود که موضوع مورد بررسی ما در این مقاله می‌باشد. به‌واقع اگر محدودیتی بر روی سایز لنز نداشتیم، اثرات سوسونزی^{۱۰} یا نوسان سیگنال هم از بین می‌رفت ولی در عمل، مصالحه‌ای بین سایز لنز گیرنده، وزن گیرنده و توان فرستنده در ردیابی^{۱۱} گیرنده وجود دارد. یک سایز بهینه برای لنز می‌تواند با توجه به نمودار فاکتور F که فاکتور تأثیرگذاری این تکنیک برحسب قطر لنز است انتخاب گردد.

ادامه این مقاله، شامل قسمت‌های زیر می‌باشد. بخش دوم به بررسی برخی مدولاسیون‌های مورد استفاده در FSO می‌پردازد. مدل آماری

6- Multiple Input-Multiple Output

7- Single Input Multiple Output

8- Maximum Likelihood Sequence Detection

9- Hybrid

10- Scintillation

11- Tracking

1- Free Space Optical Communication

2- Line of Sight

3- Fading

4- Spatial Diversity

5- Correlation

مورد استفاده برای توربولانس کانال در بخش بعدی تجزیه و تحلیل می‌شود. در بخش‌های ۴ و ۵، تکنیک معادل سازی سطح لنز گیرنده و تاثیر آن بر SNR و BER مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه سازی و جمع بندی نهایی به ترتیب در بخش‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند.

مورد استفاده برای توربولانس کانال در بخش بعدی تجزیه و تحلیل می‌شود. در بخش‌های ۴ و ۵، تکنیک معادل سازی سطح لنز گیرنده و تاثیر آن بر SNR و BER مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه سازی و جمع بندی نهایی به ترتیب در بخش‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند.

۲- بررسی مدولاسیون‌های مورد استفاده

پرتوهای نوری اعم از امواج صفحه‌ای، کروی و یا گاوسی (لیزر) سه مشخصه اصلی دارند که عبارت‌اند از: شدت، فاز و پلاریزاسیون. با تغییر هر کدام از این سه فاکتور می‌توان رشته بیت مورد نظر را بر روی حامل نوری سوار و یا اصطلاحاً مدوله کرد. توربولانس اتمسفری بیشترین تضعیف را بر دامنه (شدت) سیگنال ارسالی اعمال می‌کند، لذا در سیستم‌های FSO زمین به فضا و یا بالعکس غالباً از مدولاسیون PPM استفاده می‌شود که در آن، دامنه و عرض پالس ثابت نگاه داشته شده و محل هر پالس نسبت به یک رشته پالس مرجع تغییر می‌کند. این تغییر، متناسب با مقدار لحظه‌ای هر نمونه موج مدوله کننده صورت می‌گیرد [۹-۱۲]. اما از آنجایی که استفاده از مدولاسیون‌های OOK و DPSK در شبکه‌های فیبر نوری، بسیار رایج است، استفاده از آن‌ها در سیستم‌های FSO زمینی نیز رواج یافته است. سادگی و طراحی آسان، مهم‌ترین مزیت مدولاسیون OOK بوده و فرمت DPSK به دلیل کد کردن اطلاعات به صورت تفاضلی بر روی فاز سیگنال نوری، قابلیت مقابله با اثر نوسانات در دامنه سیگنال را دارد. نشان خواهیم داد در بین این مدولاسیون‌ها، مرتبه‌های بالاتر مدولاسیون PPM (مثل 4PPM و 8PPM) عمل کرد بهتری را به ازای سائزهای مختلف لنز گیرنده نشان می‌دهند.

۳- مدل آماری مورد استفاده برای توربولانس کانال

هنگامی که یک پرتو لیزر، جو را می‌پیماید به دلیل تغییرات دائمی توزیع فضایی ضریب شکست توده‌های هوایی، شدت سیگنال دریافتی همواره در حال نوسان است (پدیده سوسوزنی). با فرض یک موج صفحه‌ای، Rytov تخمینی برای واریانس این نوسانات به صورت ذیل بیان می‌کند [۹]:

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

که در آن L فاصله بین گیرنده و فرستنده، k عدد موج پرتو نوری) $(k = 2\pi/\lambda)$ و C_n^2 پارامتر ساختاری ضریب شکست جو است که تابع مکان، سرعت باد، فشار و ارتفاع از سطح زمین بوده و برای سیستم‌های FSO افقی تقریباً ثابت است. مقدار این پارامتر از

$$\sigma_I^2 = 1 + \frac{0.86}{(\sigma_R^2)^{2/5}} \quad (2)$$

که σ_R^2 همان واریانس Rytov است که در معادله (۱) محاسبه گردید.

۴- تکنیک معادل سازی سطح لنز یا

Aperture Averaging

میزان تاثیر تکنیک معادل سازی سطح لنز یا Aperture Averaging توسط یک عامل با نام F مشخص می‌گردد که عبارت است از واریانس سیگنال دریافتی در سمت گیرنده‌ای با قطر D نسبت به مقدار این واریانس در یک گیرنده نقطه‌ای [۱۳]:

$$F = \frac{\sigma_I^2(D)}{\sigma_I^2(0)} \quad (3)$$

که در بدترین حالت یعنی برای یک گیرنده نقطه‌ای، F ، برابر یک می‌باشد. یک رابطه برای F که در محاسبه آن از توابع وابستگی (که مقدار همبستگی بین پرتوهای دریافتی را نشان می‌دهد) عبارت است از [۱۴]:

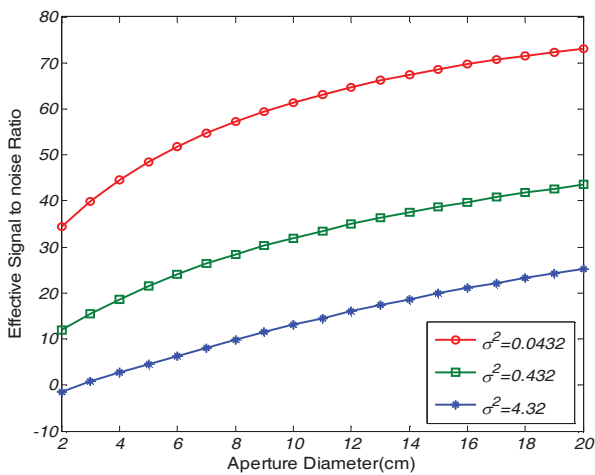
$$F = \frac{16}{\pi D^2} \int_0^\infty \frac{b_I(\rho)}{b_I(0)} K(\rho) \rho d\rho \quad (4)$$

که در آن $b_I(\rho)$ تابع کواریانس پرتوهای دریافتی، $b_I(0)$ واریانس پرتوها و D قطر لنز گیرنده است و [۱۶]:

$$K(\rho) = \arccos(\rho/D) - (\rho/D) \left[1 - (\rho^2/D^2) \right]^{1/2} \quad (5)$$

هستند. مقدار BER در یک سیستم مخابراتی نوری به سه عامل وابسته است: متوسط توان نوری دریافتی، نویز گیرنده و شدت توربولانس. در واقع دو عامل اول تعیین کننده مقدار SNR در غیاب توربولانس هستند. با در نظر گرفتن تأثیرات اتمسفری مثل انحراف پرتو در اثر پراکندگی^۱، مقدار پهن شدگی پرتو در سمت گیرنده و همچنین فاکتور F ، مقدار SNR مؤثر به صورت ذیل بیان می‌گردد [۱۵-۱۶]:

$$SNR_{eff} = \frac{SNR_0}{\left[1 + 1.33\sigma_I^2 \left(\frac{2L}{kw_L^2} \right)^{5/6} \right] + F \cdot \sigma_I^2 \cdot SNR_0} \quad (۸)$$



شکل ۲- منحنی SNR_{eff} به ازای مقادیر متفاوت سایز لنز گیرنده

که در آن، مقدار SNR_0 مقدار SNR در غیاب توربولانس جوی، در گیرنده، $w_L = (w_0^2 + L^2\theta^2)^{0.5}$ مقدار قطر پرتو لیزر^۲ در فاصله L پرتو لیزر^۳ است. شکل (۲) بیانگر منحنی SNR مؤثر بر حسب مقادیر مختلف قطر لنز گیرنده است.

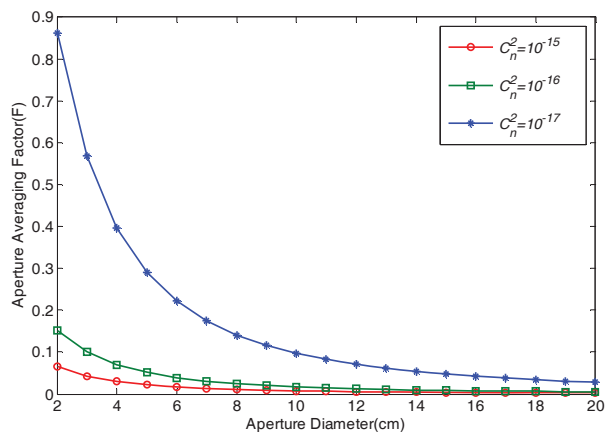
با توجه به شکل مشخص است که هرچه قطر لنز گیرنده زیاد می‌شود، مقدار SNR_{eff} بیشتر می‌شود، البته به ازای واریانس‌های بالاتر مقدار SNR_{eff} در یک قطر ثابت کمتر خواهد بود.

حال می‌خواهیم مقدار BER را محاسبه کنیم. با در نظر گرفتن مدولاسیون OOK و فرض اینکه آشکارساز در گیرنده نویز گاوسی با میانگین صفر و واریانس $\langle i_N^2 \rangle$ دارد ($\langle \rangle$ نشان‌دهنده مقدار متوسط است)، احتمال اینکه نویز مقداری کمتر از i_s (شدت سیگنال)

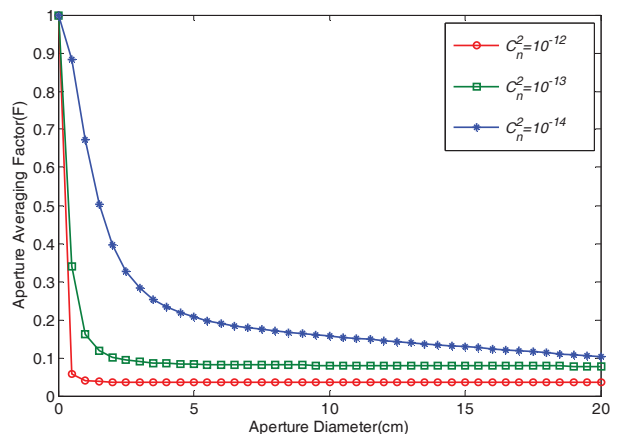
$$b_I(z, \rho) = \exp[4B_\chi(z, \rho)] - 1 \quad (۹)$$

$$B_\chi(\rho) = 0.011443 - 1.010639\rho + 3.302727\rho^2 + 1.950915 \times 10^3 \rho^3 - 7.407465 \times 10^4 \rho^4 + 1.174496 \times 10^6 \rho^5 - 8.738721 \times 10^6 \rho^6 + 2.507501 \times 10^7 \rho^7 \quad (۱۰)$$

مقدار F به ازای واریانس‌های متفاوت در شکل (۱) رسم شده است. همان‌طور که از شکل‌ها بر می‌آید هرچه قطر لنز گیرنده افزایش می‌یابد، مقدار F کمتر شده و به صفر نزدیک‌تر می‌شود؛ یعنی تأثیر نوسانات سیگنال دریافتی کمتر می‌گردد. ضمناً مشاهده می‌شود در توربولانس‌های قوی‌تر، افت شیب F سریع‌تر، یعنی تأثیر آن بیشتر است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- فاکتور F به ازای مقادیر متفاوت سایز لنز گیرنده

(الف) در شرایط توربولانس ضعیف، (ب) در شرایط توربولانس قوی

۵- تأثیر F بر SNR و BER

SNR و BER دو فاکتور مهم در تعیین کیفیت یک سیستم مخابراتی

1- Scattering

2- Spotsizes

3- Beam Deviation

داشته باشد برابر است با [۱۷]:

به‌طور مشابه و با طی فرآیندی طولانی‌تر، نرخ خطا در مدولاسیون‌های DPSK و Q-PPM به‌صورت ذیل به‌دست می‌آید [۱۸، ۹]:

$$BER_{MPPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{M \log_2 \frac{S}{N}} \right) \quad (۱۶)$$

$$BER_{DPSK} = \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{S}{N} \right) \quad (۱۷)$$

که در آن، M مرتبه مدولاسیون در فرمت MPPM است. با جایگذاری SNR مؤثر در معادلات (۱۶، ۱۷) می‌توان اثر تمام عوامل اعم از نویز گیرنده، تضعیفات جوی و فاکتور F را روی BER مشاهده کرد.

۶- نتایج حاصله از شبیه‌سازی

از آنجایی که حداکثر توان قابل ارسال یک منبع در مخابرات FSO به‌دلایلی همچون ایمنی چشم (لیزرها) و مصرف انرژی محدود است (و خصوصاً در سیستم‌های پدافندی که قابلیت جابه‌جایی مهم بوده و منابع تغذیه با توان بالا در دسترس نیست)، مقایسه مدولاسیون‌ها جهت انتخاب بهترین فرمت که در یک SNR و پهنای باند مشخص، دارای کمترین نرخ خطاست، ضروری است. در این بین قطر لنز گیرنده، عاملی اساسی در تعیین SNR_{eff} و طراحی سیستم است، لذا نمودارها بر حسب این پارامتر ترسیم شده‌اند. در محاسبات فاصله بین فرستنده و گیرنده ۴ km و طول موج پرتو ۷۵۰ nm در نظر گرفته شده است.

شکل (۳) منحنی BER بر حسب مقادیر مختلف، قطر لنز گیرنده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، در یک قطر لنز معین با افزایش واریانس، شاهد افزایش خطا خواهیم بود و همچنین می‌بینیم با گذر از واریانس ۰/۳ (ورود به توربولانس‌های قوی)، BER به‌طور قابل توجهی بالا می‌رود که در صورت عدم استفاده از لنزهای بزرگتر با فرض توان ارسالی ثابت، دستیابی به BER مطلوب امکان‌پذیر نمی‌باشد. سادگی به‌کارگیری مدولاسیون OOK به قیمت BER بیشتر آن نسبت به دیگر مدولاسیون‌ها تمام می‌شود.

به‌علت اینکه مدولاسیون DPSK اطلاعات در فرستنده را به‌صورت تفاضلی بر روی فاز کد می‌کند، در گیرنده احتیاجی به سیگنال مرجع هم‌فاز با فرستنده نیست که باعث کاهش پیچیدگی در طراحی گیرنده و در نتیجه، کاربرد وسیع این مدولاسیون شده است. شکل (۴) نمایش BER این فرمت است. نکته قابل توجه، اختلاف ۵ تا ۲۵ سانتیمتری در قطر لنز لازم بین این فرمت و مدولاسیون OOK، برای رسیدن به یک BER ثابت است.

$$P(i_N \leq i_s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{i_s} e^{-x^2/2\sigma^2} dx \quad (۹)$$

که در آن، $\sigma^2 = \langle i_N \rangle^2$ و نسبت سیگنال به نویز در غیاب توربولانس عبارت است از:

$$SNR_0 = \frac{S}{N} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_N^2} \quad (۱۰)$$

فرض می‌کنیم ترشولد (آستانه تصمیم‌گیری) در مدار آشکارساز برابر نصف مقادیر سیگنال دریافتی باشد یعنی $I/2$ ، پس در آشکارسازی بیتی با مقدار "۱" خطا رخ می‌دهد اگر:

$$I + i_N < I/2 \Rightarrow i_N < -I/2 \quad (۱۱)$$

یعنی دامنه سیگنال دریافتی به‌علاوه نویز آشکارساز، کمتر از سطح آستانه باشد در این صورت به‌جای "۱"، "۰" در خروجی ثبت می‌گردد و بیتی با مقدار "۰" به اشتباه "۱" شنجیده می‌شود، اگر نویز آشکارساز به تنهایی بزرگ‌تر از سطح آستانه شود یعنی:

$$i_N > I/2 \quad (۱۲)$$

پس خطای کل عبارت است از:

$$BER_{OOK} = \frac{1}{2} (P_{one} + P_{zero}) \quad (۱۳)$$

$$= \frac{1}{2} (P(i_N < -I/2) + P(i_N > I/2))$$

که با استفاده از معادله (۹) می‌تواند به‌صورت ذیل بازنویسی گردد:

$$BER_{OOK} = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \left(\int_{-\infty}^{-I/2} e^{-x^2/2\sigma^2} dx + \int_{I/2}^{\infty} e^{-x^2/2\sigma^2} dx \right)$$

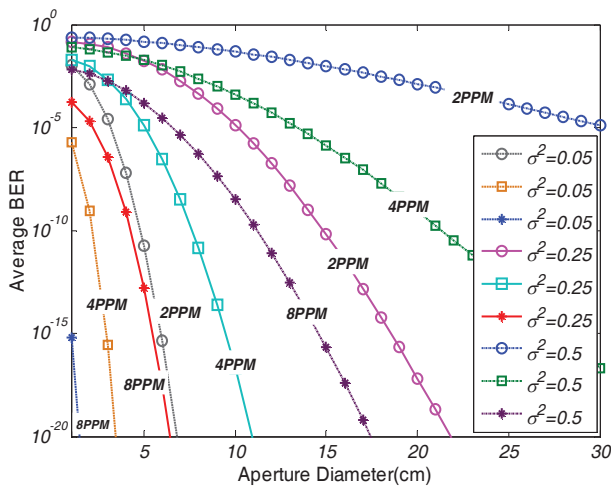
$$= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{S}{N}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{S}{N}} \right) \right] \quad (۱۴)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{S}{N}} \right)$$

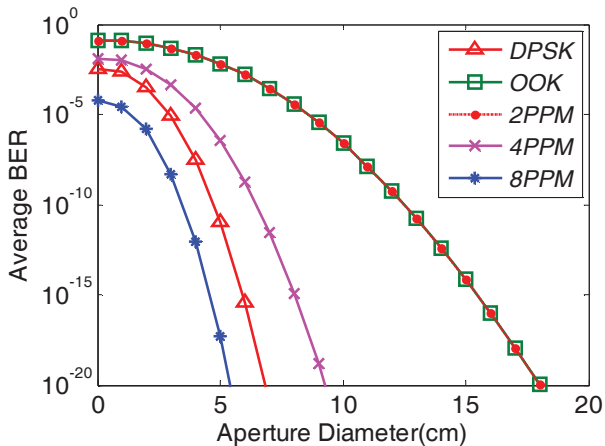
که در آن:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (۱۵)$$

هنگام آشکارسازی شد، ولی این امر، خود منجر به افزایش نویز حرارتی می‌شود. در صورت توانایی غلبه بر نویز حرارتی مذکور، فرمت M-PPM برای مقادیر بزرگ M بهترین عمل کرد را در کوچک‌ترین قطرهای از لحاظ BER خواهد داشت. در شکل (۵) نرخ خطای مدولاسیون‌های 2PPM، 4PPM و 8PPM را برای واریانس‌های ۰/۰۵، ۰/۲۵ و ۰/۵ نشان می‌دهد.



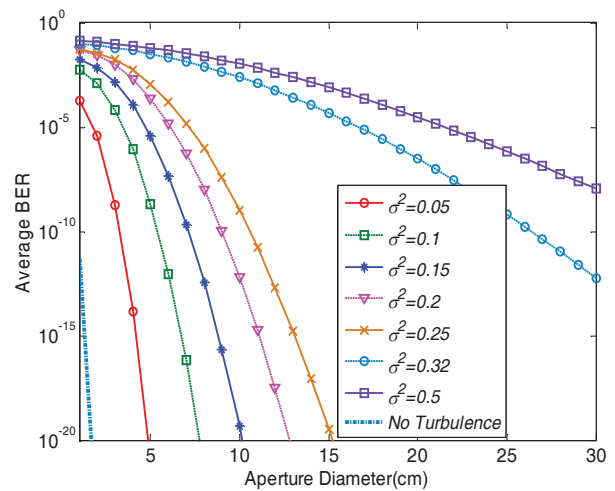
شکل ۵- منحنی BER با مدولاسیون‌های 2PPM، 4PPM و 8PPM به ازای مقادیر متفاوت سایز لنز گیرنده



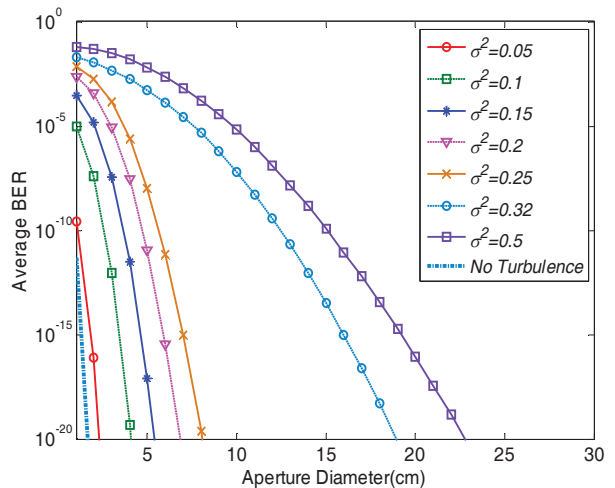
شکل ۶- مقایسه BER با مدولاسیون مختلف به ازای مقادیر متفاوت سایز لنز گیرنده به ازای واریانس ۰/۲

۷- نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد تأثیر فاکتور F در کاهش واریانس بسیار قابل توجه است، به‌عنوان مثال قطر لنزی که مقدار F متناظر با آن بوده واریانسی را که مقدار آن در یک گیرنده نقطه‌ای برابر $1/38$ است به مقدار $1/138$ تبدیل می‌کند و این یعنی تبدیل شرایط توربولانسی قوی به ضعیف. از سوی دیگر شاهد برتری



شکل ۳- منحنی BER با مدولاسیون OOK به ازای مقادیر متفاوت سایز لنز گیرنده



شکل ۴- منحنی BER با مدولاسیون DPSK به ازای مقادیر متفاوت سایز لنز گیرنده

با توجه به رابطه (۱۶) در می‌یابیم که جاگذاری $M=2$ (2PPM)، رابطه (۱۴)، یعنی معادل با مدولاسیون OOK را به‌دست می‌دهد. تفاوت آن این است که در PPM احتیاجی به تعیین سطح آستانه در گیرنده جهت آشکارسازی نداشته و بازدهی توان نسبت به OOK بالاتر بوده ولی همزمانی با فرستنده و وجود پهنای باند بیشتر در آن ضروری است. در M-PPM (که M مرتبه مدولاسیون را نشان می‌دهد)، یک بلوک $\log_2 M$ تایی از بیت‌ها بر یکی از M سمبل ممکن نگاشته می‌شود. هر سمبل شامل یک پالس با دامنه ثابت است که یک شکاف از M شکاف زمانی را اشغال می‌کند. به‌عبارت دیگر، بیت‌ها توسط مکان پالس مذکور در یک سمبل مشخص می‌شوند. با افزایش M یا کاهش مدت زمان هر پالس، علاوه بر دستیابی به نرخ‌های ارسال بالاتر می‌توان باعث کاهش جذب نورهای محیطی

8. F. Nadeem, A. Chaman Motlagh, et al., "Switch over implementation and analysis for hybrid wireless network of optical wireless and GHz links", *Wireless Telecommunications Symposium*, 22-24 April (2009).
9. W. Gappmair and M. Flohberger, "Error performance of coded FSO links in turbulent atmosphere modeled by Gamma- Gamma distribution", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 8, No. 5, pp. 2209–2213, May (2009).
10. N. Letzepis, I. Holland, and W. Cowley, "The Gaussian free space optical MIMO channel with Q-ary pulse position modulation", *IEEE Trans. Wireless Communication*, Vol. 7, No. 5, pp. 1744–1753, May (2008).
11. I. B. Djordjevic, B. Vasic, and M. A. Neifeld, "Multilevel coding in free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM over the atmospheric turbulence channel", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 18, No. 14, pp. 1491–1493, Jul. 15, (2008).
12. N. Letzepis and A. G. Fabregas, "Outage Probability of the Gaussian MIMO Free-Space Optical Channel With PPM". [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0804.0050>
13. Mohammad-Ali Khalighi, Noah Schwartz, Naziha Aitamer, and Salah Bourennane, "Fading Reduction by Aperture Averaging and Spatial Diversity in Optical Wireless Systems", *J. Optical Communication Network*, Vol. 1, No. 6, November (2009).
14. L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, "Laser Beam Scintillation with Applications", SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, (2001).
15. H. Yuksel, "Studies of the Effects of Atmospheric Turbulence on Free Space Optical Communications," Ph.D. Thesis, University of Maryland, (2005).
16. L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser Beam Propagation through Random Media", SPIE Optical Engineering Press, (1998).
17. John G. Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, New York, (1995).
18. D. Lim and Y. Chong, "The effect of mismatched filtering on the BER performance of DQPSK", in Proc. APCC/ MDMC, Beijing, China, (2004), Vol. 2, pp. 779–781.

مدولاسیون‌های M-PPM ($M > 4$) در دستیابی به نرخ‌های خطای کمتر، آن‌هم در قطرهای کوچک‌تر هستیم، ولی نکته مهم برقراری مصالحه بین تمام عوامل از قبیل قطر لنز گیرنده و متعاقباً وزن آن، قابلیت تحرک، ردیابی (از فاکتورهای مهم یک سیستم مخابراتی نظامی) و همچنین میزان نویز وارده در مدولاسیون‌هاست که در شرایط گوناگون ما را به‌سوی بهترین انتخاب سوق می‌دهد.

مراجع

1. L. Baedke, "Performance Analysis of Multipulse PPM on MIMO Free-Space Optical Channels," Ph.D. Thesis, University of Virginia, (2004).
2. A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, "Introduction to Space-Time Wireless Communications". Cambridge, UK: Cambridge University Press, (2003).
3. S. M. Haas and J. H. Shapiro, "Capacity of wireless optical Communication," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 8, pp. 1346-1357, Oct. (2003).
4. A. Chaman-Motlagh, V. Ahmadi and Z. Ghassemlooy, "Performance of Free Space Optical Communication using M-array Receivers at Atmospheric Condition", *ICEE* (2009).
5. 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, No. 1, 10 January (2010), 37–42.
6. X. Zhu and J. M. Kahn, "Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 51, no. 3, pp. 509-516, Mar. (2003).
7. M. Uysal, S. M. Navidpour, and J. T. Li, "Error rate performance of coded free-space optical links over strong turbulence channels", *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 8, pp. 635-637, Oct. (2004).

Effects of Receiver Aperture Size on BER Performance in the Secure Free-Space Optical Communications

M. Mofidi¹

A. Chaman-motlagh²

Abstract

The implementation of a secure and resistant communication system into the electronic warfare menaces, have always been a part of main challenges in military communications. The high frequency, high capacity of data transmission and also direct line of sight of optical waves have changed Free-Space Optical communication systems, into a popular technology in defensive and military uses but, the performance of a FSO communication link could be severely degraded due to atmospheric turbulence, which causes random fluctuations of the phase and the amplitude of the received signal. Both the aperture averaging technique and different modulation formats can mitigate the impairments of atmospheric turbulence. The purpose of this paper is to study and compare the Bit-Error-Rate (BER) performance of several modulation formats under different atmospheric turbulence scenarios with aperture averaging technique. The simulation results show that the aperture size is so effective in strong turbulence and the achieved performance improvement by aperture averaging is more significant for M-ary PPM [$M > 2$] modulation, than other formats such as OOK, DPSK.

Key Words: *Atmospheric Turbulence, Aperture Averaging Technique, Modulation, Secure Free-Space Optical Communication, BER*

1- Email: mehdi.mofidi@yahoo.com

2- Lecturer and Academic Member of Imam Hossein Comprehensive University