

Investigating the effect of pointing error for FSO link and evaluating its performance in the face of atmospheric phenomena

H.R. Khodadadi* , M.H. Ghezel Ayagh , A.Chamanmotlagh 

*Associate Professor, Imam Hussein University, Tehran, Iran

(Received: 2024/07/23, Revised: 2024/12/20, Accepted: 2025/01/02, Published: 2025/02/01)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.4.6.0>

ABSTRACT

Free-Space Optical (FSO) Communication has many advantages such as high bandwidth, high security and can also be a good alternative to radio communication systems. Atmospheric conditions, rain, snow, fog, environmental factors such as strong winds and the movement or vibration of the transmitter platform can cause the transmission light to break or spread, and as a result lead to deviations in the signal propagation path and pointing errors or misalignment errors between the transmitter and receiver. Different methods are used to reduce the effect of weather conditions on pointing errors in FSO. Atmospheric conditions, rain, snow, fog, environmental factors such as strong winds and the movement or vibration of the transmitter platform can cause the transmission light to break or spread, and as a result lead to deviations in the signal propagation path and pointing errors or misalignment errors between the transmitter and receiver. Different methods are used to reduce the effect of weather conditions on pointing errors in open space communications. In this paper, a model to investigate the FSO attenuation and turbulence effects on its performance is presented and a closed-form expressions for calculating the Bit Error Rate (BER) has been proposed for the gamma-gamma atmospheric turbulence channel and pointing errors. Because of the atmospheric turbulence effects, in practice, terrestrial FSO links are used for two fixed points over distances up to several kilometers. In this paper using combinational mitigation techniques has shown that an FSO system having 4 transmitters with total 600mW of optical power and a receiver with at least 25cm optical aperture can communicate data, in the weak turbulence condition (weather conditions in arid and semi-arid), with a maximum range of 10 km and a BER of better than 10^{-6} .

Keywords: Free Space Optical communication (FSO), Turbulence, Bit Error Rate (BER), Pointing error

Cite this article: H.A.Khodadadi* , M.H. Ghezel Ayagh , A.Chamanmotlagh, "Investigating the effect of pointing error for FSO link and evaluating its performance in the face of atmospheric phenomena," Electronic and Cyber Defense, vol. 11, no. 2, pp. 55–63, Jun. 2023, .DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.4.6.0>

© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

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



بررسی اثر خطای نشانه‌روی بر عملکرد یک لینک مخابرات نوری فضای آزاد و ارزیابی آن در مواجهه با پدیده‌های جوی

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

۱- دانشیار ۲- دانشیار ۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۳، انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.4.6.0>

چکیده

سامانه‌های مخابرات نوری فضای آزاد (FSO)، به دلیل داشتن پهنای باند زیاد و امنیت بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای سامانه‌های رادیویی باشند. شرایط جوی نظیر باران، برف، مه، بادهای قوی و حرکت یا لرزش سکوی فرستنده باعث شکست، انحراف و یا پخش نور ارسالی در مسیر انتشار سیگنال شده و خطاهای نشانه‌روی یا خطای عدم هم‌راستاسازی بین فرستنده و گیرنده را ایجاد می‌کنند. برای کاهش تأثیر این خطاها بر روی عملکرد یک سامانه FSO، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این مقاله بررسی هم‌زمان تضعیف‌های محیط انتشار و تلاطم اتمسفری در کانال گاما - گاما مورد مطالعه قرار گرفته و روابط تحلیلی به‌صورت فرم بسته‌ای برای محاسبه متوسط نرخ خطای بیت (BER) و باوجود خطاهای هم‌راستاسازی آورده شده است. طبق نتایج حاصل از روابط تحلیلی و شبیه‌سازی صورت گرفته، در صورت به‌کارگیری روش‌های مناسب کاهش خطاهای نشانه‌روی با داشتن ۴ فرستنده و توان ارسالی ۶۰۰ mW، یک گیرنده با قطر دهانه اپتیک ۲۵ cm ارتباط مخابراتی با نرخ خطای بیت کمتر از 10^{-6} برای فاصله بین فرستنده و گیرنده ۱۰ km، در شرایط تلاطم اتمسفری ضعیف (شرایط آب‌وهوایی مناطق خشک و نیمه‌خشک) امکان‌پذیر است.

کلیدواژه‌ها: مخابرات نوری فضای آزاد، تلاطم اتمسفری، نرخ خطای بیت، خطای نشانه‌روی.

۱. مقدمه

در مقابل اثر تلاطم اتمسفری، استفاده از روش دایورسیتی مکانی با استفاده از چندین فرستنده و گیرنده (MIMO) است [۳-۴]. در این روش هر فرستنده و گیرنده متناظر باید نظیر به نظیر هم‌راستا باشند که در مورد لینک‌های با فاصله بین فرستنده و گیرنده بیش از چند کیلومتر، این کار به‌سادگی امکان‌پذیر نیست، لذا در این شرایط از حالت خاصی از MIMO یا روش چندین فرستنده و یک گیرنده (MISO) استفاده می‌شود [۵-۶]. هنگامی که پرتو نور از یک محیط با تلاطم اتمسفری عبور داده می‌کند، شدت نور دریافتی در گیرنده نوسانی خواهد شد و به‌صورت تصادفی در قسمت‌های مختلف سطح لنز گیرنده، شدت درخشش آن کم‌و‌زیاد می‌شود، حال اگر سطح مقطع گیرنده افزایش داده شود شدت سیگنال دریافتی بیشتر خواهد بود. به این روش متوسط‌گیری از سطح دهانه گیرنده^۴ گویند که در [۷-۸] مورد بررسی قرار گرفته است.

مخابرات نوری فضای آزاد (FSO)^۱ یکی از روش‌های ارتباطی بی‌سیم است که در آن انتقال داده‌های دیجیتال از طریق انتشار پرتوهای لیزری در فضای آزاد انجام می‌شود. استفاده از FSO در مقایسه با روش‌های دیگر ارتباطی بی‌سیم، مزایای بسیاری دارد. به‌عنوان مثال، سرعت بالا، پهنای باند بیشتر، کاهش تداخل و امکان انتقال داده‌ها در فواصل بلند، همچنین به دلیل باریک بودن پرتو لیزر در مقایسه با پرتو آنتن سامانه‌های رادیویی، این فناوری امنیت بالاتری را نیز فراهم می‌کند. 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 تلاطم اتمسفری و محوشدگی شده که تضعیف عملکرد سیستم را به دنبال خواهد داشت [۱-۲]. یکی از روش‌های بهبود عملکرد سامانه FSO

^۲ Multiple Input Multiple Output.

^۳ Multiple Input Single Output.

^۴ Aperture averaging.

^۱ Free Space Optical communications.

استاد: خدادادی، حمیدرضا، قزل‌ایاغ، محمدحسین، چمن مطلق، ابوالفضل "بررسی اثر خطای نشانه‌روی بر عملکرد یک لینک مخابرات نوری فضای آزاد و ارزیابی آن در مواجهه با پدیده‌های جوی"، پدافند الکترونیکی و سایبری، ۱۲(۴)، ۵۵-۶۳، ۱۴۰۳. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.4.6.0>

نویز گوسی جمع شونده سفید^۳ است.

مطابق با رابطه (۲) پارامترهای تأثیرگذار در کانال انتقال مشتمل بر سه قسمت، تلفات محیطی یا تضعیف (h_t)، تلاطم اتمسفری (h_a) و خطای عدم همراستاسازی بین فرستنده و گیرنده یا خطای نشانه‌روی (h_p) است که در ادامه به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$h = h_t h_a h_p \quad (2)$$

۱-۲. مدل سازی تلفات محیطی

تلفات محیطی از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۱۱].

$$h_t = \frac{A_r}{(\theta L)^2} A_{tt} \quad (3)$$

در این رابطه θ واگرایی شعاع بیم ارسالی، 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^۴ تضعیف بافاصله بین فرستنده و گیرنده (L) رابطه نمایی دارد [۱۱]:

$$A_{tt} = e^{-\alpha_{fog} L} \quad (4)$$

در این رابطه α_{fog} ضریب تضعیف اتمسفر است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱].

$$\alpha_{fog} = \frac{3.912}{V(km)} \left(\frac{\lambda}{550nm} \right)^{-q} \quad (5)$$

که در این رابطه V بیانگر میزان دید با چشم غیرمسلح بر حسب کیلومتر λ طول موج فرستنده و q یک ضریب متناسب با میزان پراکندگی است و بر اساس مدل کروس^۵ محاسبه می‌شود [۱۱].

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

۲-۲. مدل سازی اثر تلاطم اتمسفری

برای شرایط تلاطم اتمسفری متوسط تا قوی، h_a یک فرآیند تصادفی با توزیع گاما-گاما است. در این توزیع، شدت تلاطم اتمسفری ضعیف و قوی با دو تابع مستقل گاما به صورت زیر بیان شده است [۱۲].

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) \quad (7)$$

خطاهای نشانه‌روی^۱ یا خطای عدم همراستاسازی بین فرستنده و گیرنده می‌تواند ناشی از عواملی نظیر تغییرات مکانی محل نصب سامانه به خاطر وجود عوامل محیطی نظیر باد، لرزش ساختمان و غیره باشد این تغییرات مرکز پرتو فرستنده و گیرنده را از دید هم خارج نموده و موجب تلفات می‌شود. عدم جبران این تلفات، نرخ خطای بیت (BER)^۲، را افزایش می‌دهد و اصطلاحاً پایداری سامانه را خدشه‌دار می‌کند. در [۹-۱۰] خطای همراستاسازی مورد بررسی قرار گرفته است.

این مقاله در نظر دارد با تلفیق روش‌های مطرح‌شده، طراحی یک سامانه مخابرات نوری را دنبال و ارزیابی عملکرد آن را از دیدگاه پارامتر نرخ خطای بیت مورد بررسی قرار دهد. وجه تمایز کار انجام‌شده در این مقاله با کارهای دیگران در آن است که در دیگر مقاله‌ها عمدتاً برد سیستم ۱ و یا حداکثر ۵/۵ کیلومتر فرض شده است ولیکن در این مقاله بنا به ضرورت کاربردی، فاصله بین فرستنده و گیرنده ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. همچنین روش‌های ترکیبی کاهش اثر تلاطم اتمسفری ارائه و نرخ خطای بیت با فرض وجود خطای عدم همراستاسازی در شرایط جوی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

در بخش دوم مدل‌سازی کانال انتقال مخابرات نوری بیان‌شده است. در بخش سوم طراحی لینک، محاسبات مربوطه و نتایج شبیه‌سازی آن به همراه تحلیل در شرایط مختلف آب‌وهوایی و با فرض وجود خطای عدم همراستاسازی ارائه شده است. در بخش چهارم نیز جمع‌بندی مطالب و پیشنهادهایی برای به کارگیری سیستم در شرایط مختلف محیطی آورده شده است.

۲. مدل سازی سیستم و کانال انتقال FSO

در شکل (۱) یک سیستم FSO، نشان داده شده است.



شکل (۱): یک سیستم مخابرات نوری فضای آزاد

سیگنال دریافتی در گیرنده FSO به صورت زیر بیان می‌شود.

$$y = \sqrt{P_s} h x + n \quad (1)$$

در این عبارت P_s توان سیگنال ارسالی، x سمبل‌های ارسالی (یک سیگنال داده با مدولاسیون دیجیتال)، h کانال انتقال که بیانگر ضرایب تضعیف کانال مخابراتی بین فرستنده و گیرنده است و n

³ Additive White Gaussian Noise (AWGN).

⁴ Beer – Lambert law.

⁵ Kruse's model.

¹ Pointing error.

² Bit Error Rate.

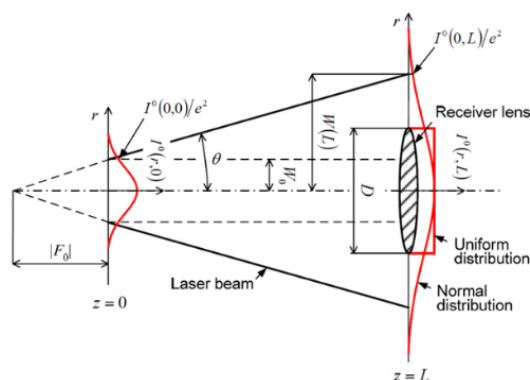
۳-۲ مدل سازی اثر خطای عدم همراستاسازی بین فرستنده و گیرنده

باتوجه به خطاهای ناشی از لرزش سکوی نصب سیستم ناشی از شرایط محیطی و خصوصاً برای سامانه برد بلند، امکان خطای عدم همراستاسازی (h_p) وجود دارد که در ادامه مدل سازی آن آورده شده است.

در مخابرات نوری فضای آزاد از دیود لیزر با واگرایی حداکثر چند میلی رادیان به عنوان منبع تولید نور استفاده می‌شود. پرتو نور از این دیود لیزر به صورت دایره‌ای منتشر می‌شود، از طرفی چگالی پخش شدگی انرژی شدت نور لیزر مطابق با شکل (۲) در جهت X و Y توزیع گوسی دارد.

توزیع نور منتشره در جهت انتشار نیز توزیع یکنواخت نداشته و از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۵].

$$I_{beam}(\rho, z) = \frac{2}{\pi\omega_z^2} \exp\left(-\frac{2\|\rho\|^2}{\omega_z^2}\right) \quad (10)$$



شکل (۲): توزیع شدت نور منتشره [۱۵]

در این عبارت ρ یک بردار و بیانگر جابه‌جایی از مرکز پرتو و ω_z کمر پرتو^۵ (پهنای باند در e^{-2}) در فاصله Z از فرستنده است و در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل (۳): توزیع تلفات ناشی از عدم همراستاسازی فرستنده و گیرنده

به دلیل وجود خطای عدم همراستاسازی، پرتو نور گیرنده در ماکزیمم سیگنال گوسی قرار نداشته و توان گیرندگی کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۴-الف) چنانچه خطای همراستاسازی وجود نداشته باشد ماکزیمم سیگنال گوسی در گیرنده دریافت می‌شود. در صورت وجود خطای همراستاسازی بیم از مرکز به میزان r منحرف می‌شود، مطابق با شکل (۴-ب)

که $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 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 [۱۲].

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_R^2}{\left(1 + 1.11\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

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

در این روابط σ_R^2 بیانگر واریانس پراکندگی نور به دلیل اثر تلاطم اتمسفری پرتو نور در گیرنده است و بر اساس رابطه ریتوو^۱ به صورت ذیل به دست می‌آید [۱۱].

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \quad (9)$$

در این رابطه $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج و C_n^2 پارامتر ساختاری ضریب شکست جو است. C_n^2 پارامتر مهمی در رابطه با تلاطم اتمسفری است و تابع عواملی نظیر ارتفاع از سطح زمین و شرایط آب‌وهوایی است. در جدول (۱) مقادیر تلاطم اتمسفری و واریانس پراکندگی آن برای یک سیستم با برد ۱۰ کیلومتر و شرایط مختلف آب‌وهوایی آورده شده است.

جدول ۱. مقدار پارامترهای سیستم برحسب شرایط آب‌وهوایی [۱۳]

شرایط تلاطم اتمسفری	σ_R^2 [m ²]	V [KM]	C_n^2 [m ^{-2/3}]	وضعیت آب‌وهوا
خیلی ضعیف	0.07	10.27	5×10^{-17}	هوای تمیز
ضعیف	0.23	3.50	1.7×10^{-16}	مه کم
متوسط	2.71	2.80	2×10^{-15}	باران سبک
قوی	13.56	0.77	1×10^{-14}	مه رقیق

بر اساس مقدار σ_R^2 ، شرایط تلاطم اتمسفری به سه ناحیه زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۱۴].

تلاطم ضعیف^۲ $\sigma_R^2 < 0.3$

تلاطم متوسط^۳ $0.3 \leq \sigma_R^2 < 5$

تلاطم قوی^۴ $\sigma_R^2 \geq 5$

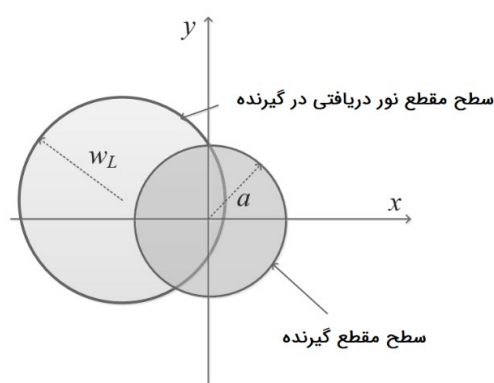
^۱ Raytov.

^۲ Weak turbulence.

^۳ Moderate turbulence.

^۴ Strong turbulence.

^۵ Beam waist



(ب) وجود خطای هم‌راستاسازی

شکل (۴): توزیع شدت لکه نورانی در گیرنده [۱۶]

در این رابطه $\zeta = \sqrt{a^2 - x^2}$ است. با به کارگیری تقریب مناسب مقدار این انتگرال به صورت زیر به دست می‌آید [۱۵-۱۶]

$$h_p(r, z) = A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_{Leq}^2}\right) \quad (۱۳)$$

در این رابطه از پارامترهای زیر استفاده شده است.

$$A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2$$

$$v = \frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}\omega_L} \quad (۱۴)$$

$$\omega_{Leq}^2 = \omega_L^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$$

ω_{Leq} پهنای باند معادل سیگنال گوسی در گیرنده است.

۳. شبیه‌سازی و بررسی نتایج

در این مقاله عملکرد یک لینک مخابرات نوری با فاصله لینک حداکثر $L = 10 \text{ km}$ و ساختار چند فرستنده و یک گیرنده و مدولاسیون ارسال PPM و پارامترهای بیان شده در جدول (۲) و از دیدگاه پارامتر نرخ خطای بیت و در شرایط مختلف آب‌وهوایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای ذکر شده در این جدول بر اساس تجربه کاری، سامانه‌های عملی و پارامترهای اقتباس شده از [۲, ۱۳, ۱۵] در نظر گرفته شده است. همچنین فرض بر آن است که داده‌های مخابراتی با پروتکل مناسب برای ارسال توسط دیود لیزر آماده شده و توسط یک دیود لیزر نیمه‌هادی و اپتیک فرستنده مناسب نور ارسال می‌شود و توان سیگنال ارسالی در حدی است که توان دریافتی در گیرنده فراتر از حد آستانه پذیرش گیرنده است.

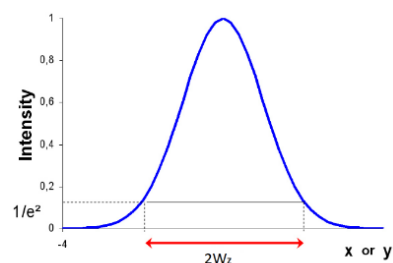
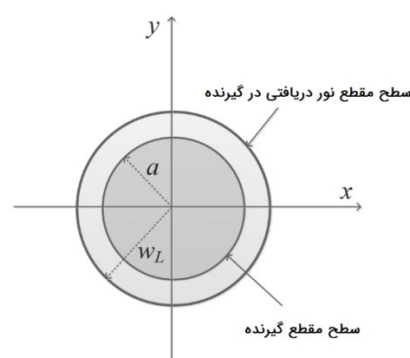
ابتدا فرض می‌شود خطای عدم هم‌راستاسازی وجود ندارد

تلفات عدم هم‌راستاسازی تابعی از سطح مقطع لنز گیرنده و شدت لکه نور دریافتی است. شدت لکه نور دریافتی در گیرنده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵].

$$h_p(r, z) = \int_A I_{beam}(\rho - r, z) d\rho \quad (۱۱)$$

$h_p(\cdot)$ بیانگر کسری توان دریافت شده در آشکارساز و A سطح مقطع گیرنده است. در حالتی که همانند شکل (۴-الف) خطای هم‌راستاسازی وجود نداشته باشد $h_p = 1$ است. در حالتی که خطای عدم هم‌راستاسازی همانند شکل (۴-ب) وجود داشته باشد تلفات خطای نشانه‌روی در فاصله $Z = L$ تابعی از میزان جابجایی مرکز نور دریافتی است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵].

$$h_p(r) = \int_{-a}^a \int_{-\zeta}^{\zeta} \frac{2}{\pi \omega_z^2} \exp\left(-\frac{2((x-r)^2 + y^2)}{\omega_z^2}\right) dy dx \quad (۱۲)$$



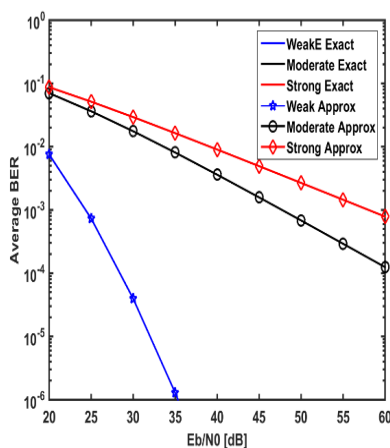
(الف) بدون خطای هم‌راستاسازی

(۱۶)

در این عبارت از تابع بسل نوع دوم استفاده شده است. این تابع مانع از حل انتگرال رابطه (۱۶) به صورت تحلیلی می‌شود. استفاده از تابع میجر^۳ $K_v(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[x^2/4 \left| \frac{v}{2}, -\frac{v}{2} \right. \right]$ که در نرم‌افزارهای محاسباتی ریاضی موجود است راه حل مرسوم است که برای حل این گونه انتگرال‌ها پیشنهاد می‌شود. می‌توان رابطه (۱۶) را به فرم بسته‌ای^۴ زیر بیان نمود [۱۵-۱۶].

$$\overline{Pe}_{SISO} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\sqrt{\pi^3} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{5,2}^{2,4} \times \left[\frac{8E_b}{N_0 \alpha^2 \beta^2} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \right. \right] \quad (17)$$

با استفاده از حل عددی انتگرال رابطه (۱۶) و روش تقریبی رابطه (۱۷) میزان متوسط خطا $\overline{Pe}$ برحسب نسبت سیگنال به نویز $\frac{E_b}{N_0}$ در شرایط مختلف آب‌وهوایی در شکل (۵) آورده شده است. برای حالت‌های تلاطم اتمسفری متوسط به بالا، حتی باوجود سیگنال به نویز ۴۰ دسی‌بل نرخ خطای بیت بیشتر از 10^{-4} است؛ لذا با شرایط موجود، این سیستم توانایی کار در شرایط تلاطم اتمسفری متوسط و قوی را ندارد. به‌منظور بهبود عملکرد سیستم، می‌توان بجای استفاده از یک فرستنده از چند فرستنده و یک گیرنده (MISO) استفاده نمود.



شکل (۵): نرخ خطای بیت برای حالت SISO به روش‌های دقیق و تقریب میجر و شرایط تلاطم اتمسفری ضعیف تا قوی

و سیستم برای بررسی می‌شود.

$$\overline{Pe}_{SISO} = \int_0^\infty f_{h_a}(h_a) Q \left(\sqrt{\frac{E_b h_a^2}{N_0}} \right) dh_a$$

$$= \int_0^\infty \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}h_a) Q \left(h_a \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) dh_a$$

$$Pe_{SISO} = Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (15)$$

جدول ۲. مقدار پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم مخابرات نوری

مقدار	توصیف	پارامتر
1-10km	فاصله بین فرستنده و گیرنده	L
1550nm	طول موج	λ
150mW	حداقل توان هر فرستنده	P_t
2mrad	زاویه واگرایی فرستنده	θ
25 cm	قطر دهانه گیرنده	D
1-4	تعداد فرستنده	M
1	تعداد گیرنده	N
300°k	دمای محیط برحسب درجه کلوین	T_0
1.38×10^{-23}	ثابت بولتزمن	K
0.1-12km	میزان قابلیت دید با چشم غیرمسلح	V

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 گوسی سفید جمع شونده و $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp \frac{-t^2}{2} dt$ تابع مارکوم است. در حالتی که شرایط آب‌وهوایی مناسب نباشد اثر تلاطم اتمسفری، شدت انرژی سیگنال دریافتی را به صورت تصادفی با توزیع $f_{h_a}(h_a)$ تغییر می‌دهد، در این حالت می‌توان متوسط نرخ خطای بیت را با رابطه (۱۶) بیان نمود [۱۵].

³ Meijer G-function.

⁴ A closed-form expression.

¹ Single Input Single Output.

² Pulse Position Modulation.

$$Q(x) \approx \frac{1}{12} e^{-\frac{x^2}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2x^2}{3}} \quad (23)$$

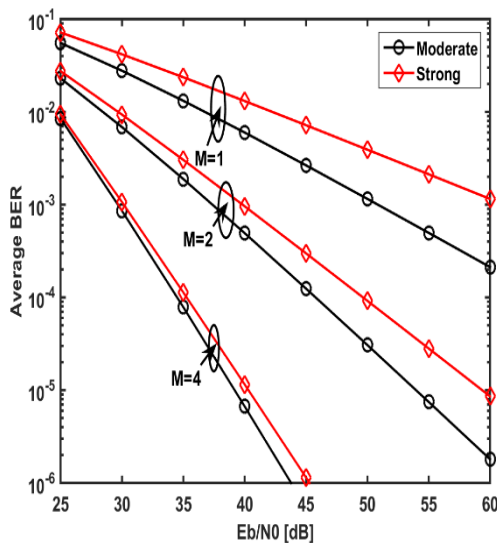
با ترکیب روابط (۲۲) و (۲۳) خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} \overline{P e}_{MISO} &\approx \frac{1}{12} \left(\int_0^\infty f_{h_a}(h_a) e^{-\frac{h_a^2 E_b}{4MN_0}} dh_a \right)^M \\ &+ \frac{1}{4} \left(\int_0^\infty f_{h_a}(h_a) e^{-\frac{h_a^2 E_b}{3MN_0}} dh_a \right)^M \end{aligned} \quad (24)$$

می‌توان با استفاده از تقریب میجر، رابطه (۲۴) را به صورت بسته‌ای زیر بیان نمود [۱۹].

$$\begin{aligned} \overline{P e}_{MISO} &\approx \frac{1}{4} \left(\frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\sqrt{\pi^3} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \right)^M \times \\ &\left[\frac{1}{3} \left(\frac{8E_b}{MN_0 \alpha^2 \beta^2} G_{4,1}^{1,4} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 0, 1 \right| \right)^M \right]_n^{(25)} dh_{a_m} \\ &+ \left(\frac{8E_b}{MN_0 \alpha^2 \beta^2} G_{4,1}^{1,4} \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 0, 1 \right| \right)^M \end{aligned}$$

به منظور مقایسه حالت SISO و MISO در شرایط مختلف جوی، می‌توان با استفاده از حل عددی انتگرال رابطه (۲۲) و با روابط تقریبی (۲۵) منحنی نرخ خطای را مطابق با شکل (۶) به دست آورد. طبق این شکل، در شرایط تلاطم متوسط و قوی و MISO با M=4 نرخ خطای بیت کمتر از ۱۰ به نسبت سیگنال به نویز حدود 44dB حاصل می‌شود.



شکل (۶): نرخ خطای بیت برای حالت مختلف MISO و شرایط تلاطم اتمسفری متوسط و قوی

چنانچه M فرستنده با سیگنال ارسالی مستقل در نظر گرفته شود در گیرنده سیگنال حاصل از فرستنده‌ها باهم جمع شده و با رابطه (۱۸) بیان می‌شود.

$$y = \sum_{m=1}^M \sqrt{P_{rm}} h_{a_m} + v_n \quad (18)$$

در این رابطه $\sqrt{P_{rm}} h_{a_m}$ شدت سیگنال دریافتی از هر فرستنده است. روش استفاده از چند فرستنده این حسن را دارد که مسیر ارسال بجای یک مسیر به M مسیر تبدیل می‌شود و طبیعتاً پایداری مدار در مقابل تلاطم اتمسفری و یا موانع جوی اتفاقی بهتر خواهد شد همچنین توان مورد نظر بجای یک لیزر با M لیزر تأمین می‌شود. در حالت MISO می‌توان با نتیجه‌گیری از رابطه (۱۶) و (۱۸)، نرخ خطای بیت متوسط کانال را به صورت زیر به دست آورد [۱۷-۱۸]:

(۱۹)

در این رابطه $f_{h_a}(\mathbf{h}_a)$ و $\mathbf{h}_a = (h_{a1}, h_{a2}, h_{a3}, \dots, h_{aM})$ تابع احتمال توأم کانال MISO است. محاسبه این انتگرال بسیار پیچیده است. از آنجاکه در این سامانه‌ها مسیرهای فرستنده و گیرنده مستقل و توان فرستنده‌ها و تابع توزیع کانال یکسان است رابطه (۲۰) به فرم زیر ساده می‌شود [۱۷].

$$\overline{P e}_{MISO} = \int_{h_a} f_{h_a}(\mathbf{h}_a) Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \eta \mathbf{h}_a \right) d\mathbf{h}_a \quad (20)$$

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

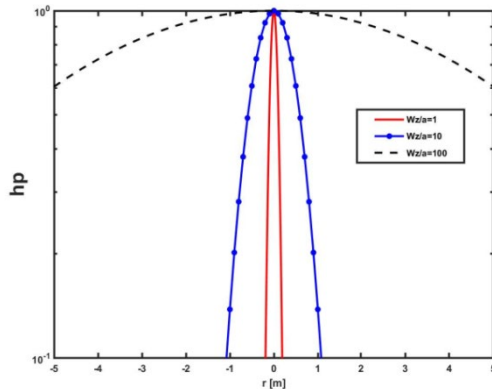
$$f_{h_a}(\mathbf{h}_a) = \prod_{m=1}^M f_{h_{a_m}}(h_{a_m}) = \left(f_{h_a}(h_a) \right)^M \quad (21)$$

با این فرض رابطه (۲۰) به فرم ساده‌تر زیر تبدیل خواهد شد.

$$\overline{P e}_{MISO} = \left[\int_0^\infty f_{h_a}(h_a) \left(Q \left(\frac{\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \sum_{m=1}^M h_{a_m}}{M} \right) \right)^{\frac{1}{M}} dh_a \right]^M \quad (22)$$

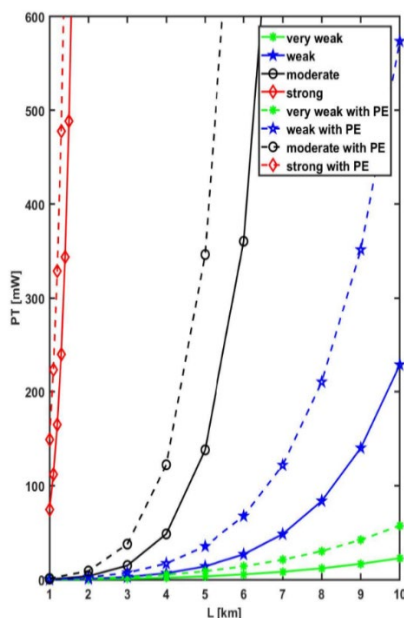
می‌توان برای بیان عبارت فوق بر حسب توابع میجر از تقریب تابع Q استفاده نمود.

خطای جابجایی ± 5 متر در سمت گیرنده و یا به عبارت دیگر پایداری سکوی نصب سامانه بهتر از 0.5 میلی رادیان، تلفات توان $h_p = 4\text{dB}$ خواهد شد. این مقدار تلفات باید با ارسال توان بیشتر توسط فرستنده جبران شود.



شکل (۸): منحنی توزیع تلفات ناشی از عدم همراستاسازی برحسب میزان جابجایی از مرکز

در شکل (۹) توان موردنیاز سیستم برای سیستم مورد مطالعه و شرایط مختلف تلاطم اتمسفری آورده شده است. در این شکل خطوط خطچین مربوط به حالت در نظر گرفتن خطای همراستاسازی به میزان ۴dB است. قاعدتاً هرچه خطای عدم همراستاسازی بیشتر باشد به توان فرستنده بیشتری نیاز است.



شکل (۹): حداقل توان موردنیاز برای حالت ۴ فرستنده و یک گیرنده تکی، روش متوسط‌گیری دهانه با $D=25\text{cm}$ و برحسب فاصله بین فرستنده و گیرنده برای داشتن $BER < 10^{-6}$

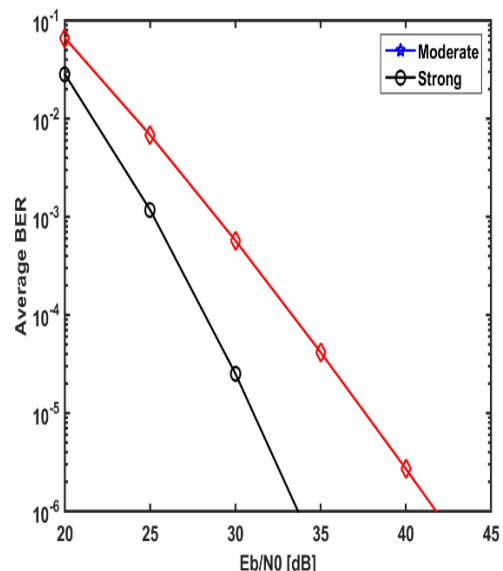
می‌توان رابطه نرخ ارسال بیت R_b و فاصله بین فرستنده و گیرنده L را به شکل زیر بیان کرد.

در صورت استفاده از لنز با قطر دهانه D ، نور دریافتی متمرکز شده و واریانس تلاطم اتمسفری به نسبت ضریب F کمتر خواهد شد [۸].

$$F = \left[1 + 1.07 \left(\frac{kD^2}{4L} \right)^{7/6} \right]^{-1} \quad (26)$$

با در نظر گرفتن تعداد فرستنده $M=4$ و لنز گیرنده با قطر دهانه $D=25\text{cm}$ میزان خطا در شرایط مختلف آب‌وهوایی به صورت شکل (۷) به دست آمده است. میزان بهبود عملکرد روش متوسط‌گیری سطح لنز با مقایسه منحنی‌های شکل‌های (۶) و (۷) قابل بررسی است. براین اساس و به عنوان مثال در شرایط تلاطم اتمسفری متوسط، و فرض داشتن چهار فرستنده، نرخ خطای بیت 10^{-6} با نسبت سیگنال به نویز نزدیک به ۴۴ دسی‌بل در شکل (۶) و ۳۴ دسی‌بل در شکل (۷) حاصل می‌شود، لذا ۱۰ دسی‌بل بهبود حاصل شده است.

باتوجه به خطای اندازه‌گیری خصوصاً برای سامانه برد بلند، امکان خطای همراستاسازی وجود دارد. این عدم تطابق پرتو موجب می‌شود گیرنده در ماکزیمم سیگنال گوسی قرار نگیرد و توان گیرندگی کاهش یابد. در طراحی این سامانه‌ها به طور معمول مقدار خطای بین ۳ تا ۶ دسی‌بل به عنوان خطای همراستاسازی در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۸) تلفات h_p برحسب چند مقدار ω_z/a و r میزان رسم شده است. طبق این شکل هرچه واگرایی فرستنده کمتر باشد مشکل همراستاسازی فرستنده و گیرنده حادث می‌شود.



شکل (۷): نرخ خطای بیت برای حالت فرستنده چندگانه و گیرنده تکی MISO و به کارگیری روش متوسط‌گیری دهانه با $D=25\text{cm}$

مطابق شکل (۸) و به عنوان مثال در حالت $\omega_z/a = 1$ با مقدار جزئی خطا، به شدت دامنه سیگنال نوری افت پیدا خواهد کرد ولیکن در حالت $\omega_z/a = 100$ برای سامانه FSO مورد مطالعه، درازای

پرتو فرستنده و گیرنده را از دید هم خارج کرده و موجب می‌شود گیرنده در ماکزیمم سیگنال گوسی قرار نگیرد و تلفات نشانه‌روی را موجب می‌شود.

در این مقاله شبیه‌سازی یک لینک FSO طبق مشخصات جدول (۲) انجام شده که نتایج حاصله بیانگر آن است که برای شرایط آشفته‌گی ضعیف (حداکثر قابلیت دید افقی ۳/۵km) و با فرض هم‌راستا بودن فرستنده و گیرنده به توان حدود ۲۲۰ میلی وات برای فاصله لینک ۱۰km نیاز است، با فرض عدم هم‌راستا بودن فرستنده و گیرنده و وجود تلفات خطای نشانه-روی (h_p) توان فرستنده مورد نیاز حدود ۶۰۰mW می‌شود.

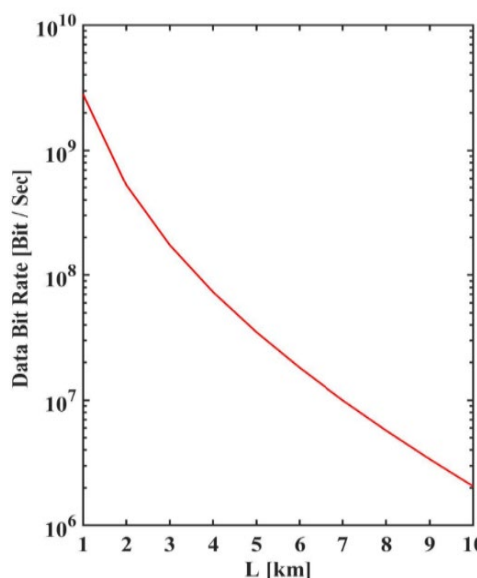
در صورت به‌کارگیری این لینک با توان فرستنده ۶۰۰mW در شرایط آشفته‌گی متوسط (حداکثر قابلیت دید افقی ۲/۸km) برای فواصل لینک بیش از ۵km نرخ خطای بیت $BER \geq 10^{-6}$ می‌شود. همچنین طبق شبیه‌سازی انجام شده در حالت آشفته‌گی قوی (حداکثر قابلیت دید افقی ۱km) توان مورد نیاز برای تضمین $BER \leq 10^{-6}$ حتی برای فواصل لینک کوتاه، خیلی بیشتر از ۶۰۰ میلی وات می‌شود که به لحاظ محدودیت توان خروجی دیودهای لیزر نیمه‌هادی، تأمین آن به‌سادگی امکان پذیر نیست لذا نتیجه دیگر این مقاله آن است که به‌کارگیری FSO برای فواصل لینک بیش از ۵km در شرایط آشفته‌گی متوسط و قوی منطقی به نظر نمی‌رسد، این نتیجه با سامانه‌های موجود در عمل نیز سازگار است.

۷. مراجع

- [1] S. A. Al-Gailani et al, "A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks," in IEEE Access, vol. 9, pp. 7353-7373, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048049.
- [2] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourthquarter 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501.
- [3] E.E. Elsayed, B.B. Yousif, "Performance enhancement of hybrid diversity for M-ary modified pulse-position modulation and spatial modulation of MIMO-FSO systems under the atmospheric turbulence effects with geometric spreading," Opt. Quantum Electron., 2020, <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02612-1>.
- [4] O. Mowlavi, and S. M. S. Sadough, "Feedback-based Differential Signaling for 2x 2-FSO System under Atmospheric Turbulence Channel with Pointing Errors," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 18, no. 3, pp.121-133, 2021, doi: 10.52547/jiaee.18.3.121.
- [5] H. R. Khodadadi, M. H. Ghezel Ayagh, and A. Chaman Motlagh, "Designing a Free Space Optical communication system and performance evaluation in the face of climate phenomena," Sayber Defence 4, no. 4, pp 89-98, 2016, in persian. [dor: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1395.4.4.7.5](https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1395.4.4.7.5)
- [6] M. R. Bhatnagar, "A One Bit Feedback Based Beamforming Scheme for FSO MISO System Over Gamma-Gamma Fading," in

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_r T_b}{N_0} \propto \frac{1}{N_0 R_b} \times \frac{e^{-\alpha_{fog} L}}{L^2} = \frac{1}{N_0 R_b} \times \frac{1}{L^2 e^{\alpha_{fog} L}} \quad (28)$$

طبق این رابطه افزایش L و R_b نسبت $\frac{E_b}{N_0}$ را کاهش می‌دهد ولیکن میزان کاهش در مورد L به مراتب شدیدتر است، در شکل (۱۰) منحنی BER بر حسب L آورده شده است. طبق این نمودار در صورت به‌کارگیری این لینک با همان پارامترهای سیستمی ارائه شده در جدول (۲) و برای فاصله یک کیلومتر، ارسال اطلاعات با نرخ بیش از یک گیگا بیت بر ثانیه امکان پذیر است ولیکن در فواصل بیشتر و فرض ثابت نگهداشتن نرخ خطای بیت، نرخ ارسال به صورت نمایی کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰): منحنی نرخ بیت ارسالی بر حسب فاصله بین فرستنده و گیرنده و شرایط آشفته‌گی اتمسفری ضعیف

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی عملکرد یک لینک مخابرات نوری فضای آزاد (FSO) با چند فرستنده و یک گیرنده (MISO) همراه با روش متوسط‌گیری دهانه گیرنده و در شرایط مختلف آب‌وهوایی مورد بررسی قرار گرفت و روابط فرم بسته بودجه لینک و نرخ خطای بیت (BER) در کانال گاما - گاما ارائه گردید.

در لینک‌های FSO فرستنده و گیرنده باید دقیقاً هم‌راستا باشند، ولیکن به دلیل عوامل محیطی نظیر وزش باد، لرزش ساختمان محل نصب، سرد و گرم شدن محل نصب سامانه و انبساط و انقباض آن و غیره، هم‌راستاسازی دقیق فرستنده و گیرنده غیرممکن است. وجود خطای عدم هم‌راستاسازی، مرکز

- [13] M. A. Amirabadi, V. Tabataba Vakili, "A novel hybrid FSO / RF communication system with receive diversity," *Optik*, vol. 184, pp. 293–298, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.037>.
- [14] K. Anbarasi, C. Hemanth, R.G. Sangeetha, "A review on channel models in free space optical communication systems," *Optics & Laser Technology*, Vol. 97, Pages 161-171, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.018>.
- [15] A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 25, pp. 1702-1710, 2007, doi: 10.1109/JLT.2007.899174.
- [16] Djordjevic, Goran T., Milica I. Petkovic, Miodrag Spasic, and Dragan S. Antic, "Outage capacity of FSO link with pointing errors and link blockage," *Optics express* 24, no. 1, pp. 219-230, 2016, <https://doi.org/10.1364/OE.24.000219>.
- [17] H. Li-Qiang and W. Zhibin, "A Closed-form Expression for BER of FSO Links over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channels with Pointing Errors," *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* vol. 6 pp. 1272-1275, 2013, doi:10.19026/rjaset.6.3943.
- [18] 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, <https://doi.org/10.1364/OE.23.022371>.
- [19] T. Tsiftsis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis, and M. Uysal, "FSO links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels," *IEEE International Conference on*, pp. 5379-5384, 2008, doi:10.1109/ICC.2008.1008.
- IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 4, pp. 1306-1318, April 2015, doi: 10.1109/TCOMM.2015.2391178.
- [7] G.G. Soni, A. Tripathi, A. et al. Mandloi and S. Gupta, "Compensating rain induced impairments in terrestrial FSO links using aperture averaging and receiver diversity," *Optical and Quantum Electronics*, 51, pp.1-11, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1962-1>.
- [8] E. E. Elsayed, and B. B. Yousif, "Performance enhancement of the average spectral efficiency using an aperture averaging and spatial-coherence diversity based on the modified-PPM modulation for MISO FSO links," *Optics Communications*, 463, p.125463, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125463>.
- [9] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou and T. Zhang, "A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1104-1123, Secondquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2804323.
- [10] M. R. Bhatnagar and S. Anees, "On the Performance of Alamouti Scheme in Gamma-Gamma Fading FSO Links With Pointing Errors," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 94-97, Feb. 2015, doi: 10.1109/LWC.2014.2376958.
- [11] L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser beam propagation through random media." 2nd Edition, SPIE Optical Engineering Press, 2005.
- [12] M. R. Bhatnagar and Z. Ghassemlooy, "Performance analysis of Gamma-Gamma fading FSO MIMO links with pointing errors," *Journal of Lightwave Technology*, vol.34,no.9, pp.2158–2169, 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2526053.