

Performance Analysis of Hybrid FSO/RF Systems Using the \mathcal{M} Distribution and Markov Function

M. Aghaei, A. M. A. Hemmatyar*, A. Chaman Motlaq, M. Fooladian

*Assistant Professor, Faculty of Computer Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
(Received: 19/11/2020, Accepted: 27/02/2021)

ABSTRACT

In passive defense, communication security is very important. Free space optic (FSO) communication has a lot of advantages such as high security and high bandwidth, but it suffers from atmospheric turbulence. For the mitigation of this effect on FSO performance, some methods have been proposed, such as adaptive rate (AR) transmission and automatic repeat request (ARQ). In this paper, the performance of hybrid multi-layer design FSO/RF systems with AR transmission and ARQ, in different atmospheric turbulence conditions is evaluated using the \mathcal{M} distribution model for the optical channel. For two designs (namely multi-layer with AR and standard-ARQ, and multi-layer with AR and frame combining ARQ), the spectral efficiency (SE) criteria, the average expected number (AEN) and the level crossing rate (LCR) have been compared. The simulation results show that at the first transmission rate, the maximum LCR= 80, occurs at SNRs 6dB and 2dB, for the first and second designs, respectively. Also, at average spectral efficiency (3.5 bits /sym) and at the persistence level $k=2$, the maximum LCR= 80 occurs at the SNRs equals to 25dB and 20dB, for the first and second designs, respectively; which shows the advantages of the second design over the first, although these advantages are achieved at higher costs. For example, when SNR equals to 20 dB, the average expected number is 1.00057 in the first and 1.35 in the second design, which indicates the higher energy consumption of the second design. .

Keywords: Hybrid FSO/RF, \mathcal{M} Distribution, Level Crossing Rate, Spectral Efficiency, Expected Number of Transmissions.

*Corresponding Author Email: Hemmatyar@sharif.edu

بررسی عملکرد سامانه‌های ترکیبی FSO/RF با استفاده از توزیع M و تابع مارکوف

محمد رضا آقایی^۱، علی محمدافشین همت‌یار^{۲*}، ابوالفضل چمن مطلق^۳، مجید فولادیان^۴

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ۴- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹)

چکیده

در پدافند غیرعامل امنیت ارتباطات بسیار مهم است. مخابرات نوری فضای آزاد (FSO) دارای مزایای زیادی نظیر امنیت و پهنای باند است. اما بسیار تحت تأثیر تلاطم اتمسفری است. برای کاهش این اثرات در کارایی مخابرات FSO روش‌هایی پیشنهاد شده‌اند، مانند ارسال با نرخ وفقی (AR) و درخواست تکرار خودکار (ARQ). در این مقاله کارایی یک سامانه ترکیبی FSO/RF با طرح چند لایه و ارسال نرخ وفقی و درخواست تکرار خودکار تحت شرایط مختلف اتمسفری با استفاده از مدل M برای کانال نوری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای دو طرح (چند لایه با AR و ARQ استاندارد و چند لایه با AR و ARQ) و با ترکیب فریم‌ها) معیارهای راندمان طیفی، متوسط عدد انتظار ارسال و نرخ عبور از سطح (LCR) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند در نرخ ارسال اول، $LCR=80$ است که در نسبت سیگنال به نویز (SNR) برابر ۶dB و ۲dB به ترتیب برای طرح‌های اول و دوم رخ می‌دهد. همچنین در راندمان طیفی $3/5$ bits/sym و در سطح اصرار برابر ۲ به ترتیب برای طرح اول و دوم در SNR برابر ۲۵dB و ۲۰dB رخ می‌دهد؛ که نشان‌دهنده مزیت طرح دوم نسبت به طرح اول است. اگرچه برای به‌دست آوردن مزایای فوق‌نیاز به صرف هزینه بیشتر می‌باشد. به‌طور مثال در SNR برابر ۲۰dB، متوسط عدد انتظار ارسال در طرح اول ۱/۰۰۵۷ و در طرح دوم برابر ۱/۳۵ است که نشان‌دهنده مصرف انرژی بالاتر طرح دوم است.

کلیدواژه‌ها: سامانه‌های ترکیبی نوری / رادیویی، توزیع M ، نرخ عبور از سطح، راندمان طیفی، عدد انتظار ارسال

۱- مقدمه

مطمئنی را تا فاصله حدود چهار کیلومتر و با نرخ ارسال بالا ایجاد نمایند. از ویژگی‌های مهم سامانه‌های FSO می‌توان به پهنای باند وسیع، مقاومت در برابر استراق سمع، مقاومت در برابر تداخل الکترومغناطیسی، عدم نیاز به مجوز سازمان تنظیم مقررات رادیویی و البته تأثیرپذیری از تلاطم اتمسفری اشاره کرد [۹-۱]. هوای مه‌آلود و تلاطم اتمسفری شدید کارایی سامانه‌های FSO را به شدت کاهش می‌دهند. بنابراین از یک سامانه رادیویی پشتیبان نیز استفاده می‌شود تا با تشکیل یک سامانه ترکیبی FSO/RF، امکان برقراری ارتباط پایدار وجود داشته باشد. البته کارایی سامانه رادیویی نیز در هوای بارانی کاهش می‌یابد که در این شرایط سامانه نوری می‌تواند کارایی مناسبی داشته باشد. بنابراین این دو سامانه می‌توانند به‌صورت مکمل یکدیگر عمل نمایند و ترکیب آن‌ها می‌تواند به‌عنوان یک راه حل مؤثر برای انتقال داده با نرخ بیت بالا در فواصل کوتاه مورد توجه قرار گیرند. در کنار استفاده از سامانه‌های ترکیبی، به‌کارگیری روش‌های ارسال با نرخ

۱-۱- معرفی

سامانه‌های مخابرات نوری فضای آزاد^۱ (FSO) در دهه‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، جایگاه ویژه‌ای در حوزه دفاعی و به خصوص پدافند غیرعامل^۲ به خود اختصاص داده است. در حال حاضر با توجه به بحران‌های بسیاری که هر ساله در کشور شاهد آن هستیم، آشنایی با سامانه‌ها و تجهیزات مخابراتی جدید که بتواند در شرایط بحران به‌عنوان یک ابزار کارآمد پدافندی کمکی به حل مشکلات بنماید، از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به قیمت مناسب و راه‌اندازی و به‌کارگیری سریع سامانه‌های FSO در شرایط بحران، اهمیت آشنایی با این سامانه‌ها بیشتر از گذشته احساس می‌شود.

سامانه‌های FSO فعلی قادرند در شرایط هوای صاف ارتباط

* رایانامه نویسنده مسئول: Hemmatyar@sharif.edu

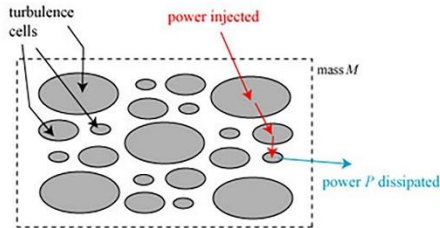
¹ Free Space Optical Communication

² Passive Defense

به صورت زیر است [۴]:

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

در رابطه (۱)، L فاصله بین فرستنده و گیرنده $k=2\pi/\lambda$ عدد موج، λ طول موج پرتو و C_n^2 پارامتر ساختاری ضریب شکست جو و تابع عواملی نظیر ارتفاع از سطح زمین و شرایط آب و هوایی است [۱۲].



شکل (۱): توده‌های هوایی در اتمسفر [۱۲].

برای کانال‌های با تلاطم اتمسفری، واریانس ریتوف برای تلاطم‌های ضعیف، متوسط، قوی و رژیم اشباع به ترتیب: $\sigma_R^2 < 1$ و $\sigma_R^2 = 1$ و $\sigma_R^2 > 1$ می‌باشد [۱۲].

۳-۱- معرفی انواع مدل‌های تلاطم اتمسفری

تاکنون توزیع‌های آماری زیادی برای شرایط تلاطم ضعیف تا قوی پیشنهاد شده‌اند که معروف‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱. توزیع لاگ-نرمال^۶: این توزیع برای توصیف تلاطم ضعیف استفاده می‌شود که در آن I یک متغیر تصادفی و بیانگر شدت نور دریافتی است [۸].

$$f_I(\ln I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln I}^2}} \frac{1}{I} \exp\left\{-\frac{(\ln I - \langle \ln I \rangle)^2}{2\sigma_{\ln I}^2}\right\} \quad I \geq 0 \quad (2)$$

۲. توزیع K : این توزیع برای توصیف تلاطم قوی استفاده می‌شود [۸].

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha)^{\frac{\alpha+1}{2}}}{\Gamma(\alpha)} I^{\frac{\alpha-1}{2}} K_{\alpha-1}(2\sqrt{\alpha I}) \quad I \geq 0 \quad (3)$$

۳. توزیع نمایی منفی^۷: این توزیع برای توصیف تلاطم رژیم اشباع استفاده می‌شود [۸].

$$f_I(I) = \frac{1}{I_0} \exp\left(-\frac{I}{I_0}\right) \quad I \geq 0 \quad (4)$$

۴. توزیع گاما-گاما^۸: این توزیع برای توصیف تلاطم‌های ضعیف تا قوی استفاده می‌شود [۸].

وفقی^۱ و درخواست تکرار خودکار ARQ^۲ نیز می‌تواند موجب افزایش کارایی سامانه‌های FSO شود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود [۱۰ و ۱۱].

کارایی توزیع M برای مدل‌سازی کانال نوری در مرجع [۱۲] نشان داده شده است. در این مقاله با استفاده توأم از توزیع M و تابع مارکوف سامانه‌های ترکیبی FSO/RF ارزیابی شده‌اند.

در مرجع [۱۲] مدل‌سازی کانال‌های نوری تحت شرایط مختلف اتمسفری با استفاده از توزیع M انجام گردید و نشان داده شد که برخلاف توزیع‌های آماری قبلی (که در ادامه این توزیع‌ها به صورت اجمال معرفی می‌شوند)، توزیع M یک توزیع جامع بوده که تحت همه شرایط اتمسفری قابل استفاده است. در این خصوص دو طرح نرخ وفقی معمولی و طرح چند لایه AMR^۳/ARQ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در این مقاله با استفاده از توزیع M و تابع مارکوف معیارهای مهمی نظیر LCR^۴، عدد انتظار ارسال، متوسط راندمان طیفی به‌عنوان شاخص ارزیابی استفاده شده و از توزیع M برای مقایسه کارایی دو طرح چند لایه مختلف استفاده می‌شود.

در حوزه مدل‌سازی کانال‌های مخابرات نوری، انواع مدل‌های ریاضی، برای شرایط مختلف تلاطم اتمسفری از تلاطم ضعیف تا رژیم اشباع پیشنهاد شده‌اند. البته هیچ یک از مدل‌های قبلی قابل استفاده برای کلیه شرایط تلاطمی نیستند. به تازگی مدل ریاضی جدیدی به نام توزیع M معرفی شده که برخلاف مدل‌های قبلی قادر است مدل‌سازی کانال را در همه شرایط تلاطم انجام دهد. در این مقاله ضمن معرفی تلاطم اتمسفری، به معرفی اجمالی انواع مدل ریاضی و کاربرد آن‌ها پرداخته می‌شود و مزیت مدل M نسبت به آن‌ها بیان می‌شود.

۲-۱- تلاطم اتمسفری

در اثر تابیدن نور خورشید به اتمسفر، مولکول‌های هوا گرم شده و به صورت یکسری بسته‌ها یا توده‌های هوایی مطابق شکل (۱) با فشار و دمای متفاوت درمی‌آیند. عبور پرتو نوری از بین این توده‌های هوایی که ضریب شکست متفاوت در هر نقطه نسبت به نقطه قبل دارد، باعث تغییراتی در مشخصات آن می‌شود. از آنجایی که این توده‌ها از لحاظ مکانی و زمانی حالت پایداری ندارند تغییرات ضریب شکست، در واقع پدیده‌ای تصادفی بوده و تأثیر به‌سزایی در عملکرد یک سامانه مخابراتی FSO دارد. طبق رابطه ریتوف^۵ میزان واریانس پرتو لیزر در اثر پدیده تلاطم

¹ Adaptive Rate

² Automatic Repeat Request

³ Adaptive Multi Rate

⁴ Level Crossing Rate

⁵ Rytov

⁶ Log- Normal Distribution

⁷ K Distribution

⁸ Negative Exponential Distribution

⁹ Gamma-Gamma Distribution

فاز مؤلفه تزویج شده با مؤلفه LOS و $2b_0$ برابر توان متوسط مجموع مؤلفه‌های پراکندگی است.

۵-۱- معرفی تابع توزیع \mathcal{M}

تابع توزیع \mathcal{M} با نماد $I \sim M^{(G)}(\alpha, \beta, \gamma, \rho, \Omega')$ بیان می‌شود، که در آن پارامترهای $\alpha, \beta, \gamma, \rho, \Omega'$ و همگی حقیقی و مثبت هستند. α و β به ترتیب نشان دهنده عدد مؤثر ذرات مقیاس بزرگ و مقیاس کوچک فرآیند پراکندگی هستند. ρ مقدار توان مؤلفه پراکندگی تزویج شده با مؤلفه LOS در مدل انتشاری را نشان می‌دهد و $0 \leq \rho \leq 1$ است. فاکتور ρ به طول مسیر انتشار (L)، شدت تلاطم اتمسفری، طول موج نوری λ ، پهنای پرتو و میزان ناهمگونی متوسط ($l = \sqrt{\lambda L}$) بستگی دارد. Ω' و γ نیز با رابطه (۱۱) تعریف می‌شوند [۱۳].

$$\begin{cases} \Omega' = \Omega + \rho 2b_0 + 2\sqrt{2b_0\Omega\rho}\cos(\phi_A - \phi_B) \\ \gamma = 2b_0(1-\rho) \end{cases} \quad (11)$$

تابع چگالی احتمال توزیع \mathcal{M} با رابطه (۱۲) تعریف می‌شود که در آن I بهره محوشدگی کانال FSO است [۱۲ و ۱۳]:

$$f_I(I) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'}} \right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $K_V(\cdot)$ تابع بسل اصلاح شده نوع دوم و ν مرتبه تابع بسل است، و A با رابطه (۱۳) تعریف می‌شود [۱۲ و ۱۳]:

$$\begin{cases} A \triangleq A^{(G)} \left(\frac{\gamma\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \\ a_k \triangleq \frac{(\beta-1)}{(k-1)} \frac{1}{(k-1)!} \left(\frac{\Omega'}{\beta} \right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^k (\gamma\beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}} \end{cases} \quad (13)$$

۶-۱- طرح‌های AR و ARQ

ارسال با نرخ وقتی (AR) عامل کلیدی برای افزایش راندمان طیفی سامانه‌های FSO می‌باشد. راهکار دیگر برای افزایش راندمان طیفی، ارسال مجدد قاب‌های دارای خطا می‌باشد. بنابراین ARQ یک ساختار کنترلی مؤثر برای ارسال‌های مطمئن در سامانه‌های FSO ارائه می‌دهد. استفاده هم‌زمان این دو طرح در سامانه‌های نوری موجب می‌شود که تطبیق بهتری با شرایط نویز کانال ایجاد شده و توانایی لازم برای کنترل خطا نیز فراهم شود [۱۴].

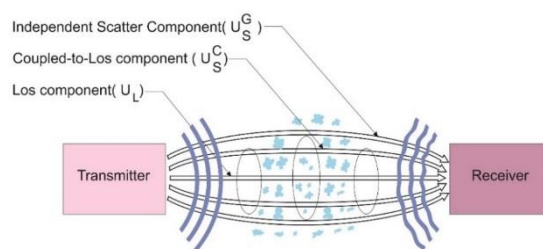
برای افزایش کارایی سامانه‌های نوری تحت شرایط تلاطم اتمسفری کانال، روش‌های AR و ARQ به ترتیب در لایه‌های فیزیکی و پیوند - داده^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته در سامانه‌های جدیدتر برای بهسازی بیشتر از AR و ARQ به صورت مشترک استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از مدل توزیع

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}) \quad I \geq 0 \quad (5)$$

در ادامه به معرفی توزیع \mathcal{M} می‌پردازیم.

۴-۱- مدل انتشاری توزیع \mathcal{M}

شکل (۲) مؤلفه‌های امواج دریافتی در شرایط تلاطم اتمسفری با شاخص انکسار تصادفی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مؤلفه‌های امواج دریافتی در شرایط تلاطم اتمسفری با شاخص انکسار تصادفی [۱۲].

مؤلفه اول، مؤلفه مسیر دید مستقیم (LOS^T) است که با نام U_L نشان شده است. مؤلفه دوم، مؤلفه پراکندگی ناشی از جریان گردابی و تزویج شده با مؤلفه LOS است که با نام U_S^C مشخص شده است. مؤلفه سوم که با نام U_S^G نشان شده است، ناشی از پراکندگی انرژي به دلیل خارج از محور بودن جریان گردابی است.

روابط (۶ تا ۱۰) مؤلفه‌های امواج دریافتی را معرفی می‌کنند [۱۲].

$$U = (U_L + U_S^C + U_S^G) \exp(X + jS) \quad (6)$$

$$U_L = \sqrt{G}\sqrt{\Omega} \exp(j\varphi_A) \quad (7)$$

$$U_S^C = \sqrt{\rho}\sqrt{G}\sqrt{2b_0} \exp(j\varphi_B) \quad (8)$$

$$U_S^G = \sqrt{(1-\rho)U_S^C} \quad (9)$$

$$2b_0 = E[|U_S^C|^2 + |U_S^G|^2] \quad (10)$$

در روابط فوق، U مجموع سه مؤلفه دریافتی در گیرنده را نشان می‌دهد، X و S به ترتیب متغیرهای تصادفی حقیقی مربوط به اندازه و فاز میدان ایجاد شده توسط تلاطم اتمسفری هستند. G یک متغیر تصادفی حقیقی با توزیع گاما و امید ریاضی برابر یک ($E[G]=1$) و Ω و φ_A به ترتیب نشان دهنده توان متوسط و فاز مؤلفه LOS هستند ($\Omega = E[|U_L|^2]$) [۱۳].

U_S^G یک متغیر تصادفی مختلط گوسی دایروی با پارامتر ρ ، φ_B

^۱ Data Link

^۱ Malaga Distribution

^۲ Line of Sight

$$\text{Max } R \mid R \in \{0, R_f, \dots, mR_f, R_f, \dots, nR_f\} \quad (18)$$

$$\text{Subject to } \text{BER}_R \leq \text{BER}_0$$

که در آن، BER_R مقدار BER شرطی سامانه و R نرخ ارسال است. BER_R با توجه به نوع مدولاسیون و با فرض نویز سفید جمع شونده (AWGN^6) به صورت تقریبی بر اساس روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$\text{BER}(N, \gamma_f) \cong \frac{N-1}{N \log_2^N} \text{erFfc} \left(\sqrt{\frac{3\gamma_f}{2(N-1)(2N-1)}} \right) \quad (19)$$

$$\text{BER}(M, \gamma_r) \cong 0.2 \exp \left[-\frac{3\gamma_r}{2(M-1)} \right] \quad (20)$$

بر اساس روابط (۱۸) الی (۲۰) سطح آستانه کلیدزنی از روابط زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\gamma_{fj} = \frac{2(2^j - 1)(2^{j+1} - 1)}{3} \left[\text{erFfc}^{-1} \left(\frac{2^j \text{BER}_0}{2^j - 1} \right) \right]^2 \quad (21)$$

$$\gamma_{ri} = \frac{2}{3} (2^i - 1) \ln \left(\frac{1}{5 \text{BER}_0} \right) \quad (22)$$

۹-۱- طرح نرخ و فقی چند لایه (فیزیکی و پیوند داده)

در طرح نرخ و فقی چند لایه، توانایی کنترل خطای ARQ در نظر گرفته شده و از نرخ خطای قاب هدف $(\text{FER}_0)^7$ به عنوان مبنای کیفیت سرویس مورد نیاز استفاده می‌شود. با استفاده از ARQ انتظار می‌رود کارایی کلی سامانه بالاتر رود. زمانی که قاب‌ها با طول I بیت ارسال می‌شوند، در صورتی که هیچ‌گونه رمزگذاری روی این قاب‌ها انجام نشده باشد، احتمال شرطی خطای قاب FER_R از رابطه (۲۳) به دست می‌آید [۱۸].

$$\text{FER}_R(\gamma) = 1 - [1 - \text{BER}_R(\gamma)]^I \text{ for } \gamma \in \{\gamma_f, \gamma_r\} \quad (23)$$

با توجه به بسط دو جمله‌ای دارید [۱۸]:

$$1 - [1 - \text{BER}_R(\gamma)]^I \leq I \text{BER}_R(\gamma) \quad (24)$$

با افزایش γ ، $\text{BER}_R(\gamma)$ کاهش می‌یابد، و نامساوی رابطه (۲۴) به مساوی نزدیک‌تر می‌شود. ولی با کاهش γ ، $\text{BER}_R(\gamma)$ افزایش می‌یابد و طرف چپ نامساوی به یک نزدیک می‌شود. بنابراین فرم بسته تقریبی برای احتمال شرطی خطای قاب به شکل روابط (۲۵) و (۲۶) به دست می‌آید:

$$\text{FER}(N, \gamma_f) \cong \begin{cases} I \text{BER}(N, \gamma_f), & \text{if } \gamma_f \geq \Delta_f^N \\ 1, & \text{if } 0 < \gamma_f < \Delta_f^N \end{cases} \quad (25)$$

M برای کانال نوری، طرح چند لایه AR و ARQ استاندارد، و طرح چند لایه AR و ARQ با ترکیب قاب‌ها^۱ مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

۷-۱- کلیدزنی بین کانال‌های RF و FSO

اگر سطح آستانه کلیدزنی^۲ سیگنال به نویز (SNR^3) بین کانال FSO و کانال RF را γ_{th} بنامیم، در زمان n انتخاب کانال برای ارسال داده X_n به شکل زیر انجام می‌شود [۱۵]:

$$X_n = \begin{cases} \text{FSO}, & \text{if } \gamma_{th} \leq \gamma_f < \infty, \\ \text{RF}, & \text{if } 0 \leq \gamma_f < \gamma_{th}. \end{cases} \quad (14)$$

در کانال FSO از مدولاسیون N-QAM با نرخ نشانه R_f استفاده می‌شود. در حالی که در کانال RF از مدولاسیون M-PAM با نرخ نشانه R_r مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بنابراین نرخ بیت ارسال در کانال FSO از رابطه $R = R_f \log_2 N$ و در کانال RF از رابطه $R = R_r \log_2 M$ محاسبه می‌شود [۱۵]. در عمل هر وقت که یک کانال انتخاب می‌شود، وابسته به اطلاعات وضعیت کانال (CSI^4) در گیرنده نرخ ارسال و فقی مناسب انتخاب می‌شود. اگر n تعداد مقادیر تعریف شده برای N و m تعداد مقادیر تعریف شده برای M باشند، دامنه تغییرات SNR کانال FSO را به $n+1$ ناحیه و دامنه تغییرات SNR کانال RF را به $m+1$ ناحیه تقسیم می‌شود [۱۶ و ۱۷]. نرخ ارسال برای کانال FSO و RF به ترتیب مطابق روابط (۱۵) و (۱۶) انتخاب می‌شوند [۱۵].

$$R = jR_f \text{ if } \gamma_{fj} \leq \gamma_f < \gamma_{f(j+1)} \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (15)$$

$$\begin{cases} iR_r \text{ if } \gamma_{ri} \leq \gamma_r < \gamma_{r(i+1)} & i = 1, 2, \dots, m-1 \\ 0 \text{ if } 0 \leq \gamma_r < \gamma_{r1}. \end{cases} \quad (16)$$

توجه شود که:

$$\gamma_{f(n+1)} = \gamma_{f(m+1)} = \infty \quad (17)$$

۸-۱- طرح نرخ و فقی در لایه فیزیکی

هدف از به‌کارگیری طرح نرخ و فقی، بهره‌مندی از بالاترین نرخ ارسال ممکن با حفظ کیفیت سرویس می‌باشد. در لایه فیزیکی، یک نرخ خطای بیت هدف^۵ (BER_0) به عنوان سطح مشترک نیازمندی کیفیت سرویس برای هر دو کانال نوری و رادیویی، مد نظر قرار می‌گیرد. بنابراین مسئله به صورت رابطه (۱۸) فرمول‌بندی می‌شود [۱۶ و ۱۷].

¹ Frame

² Switching Threshold

³ Signal to Noise Ratio

⁴ Channel State Information

⁵ Bit Error Rate

⁶ Additive White Gaussian Noise

⁷ Frame Error Rate

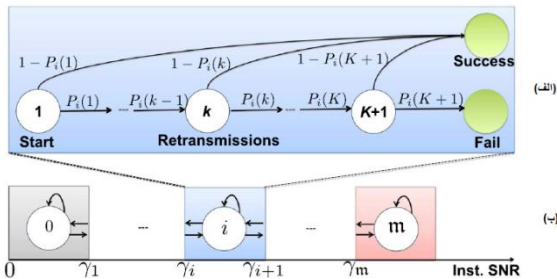
افزایش می‌یابد [۲۰].

کارکرد این سامانه از نظر عملی به این صورت است که، با توجه به شرایط جوی کانال در لایه فیزیکی نرخ داده وفقی ارسال می‌شود و در لایه پیوند داده نیز به دلیل وجود قابلیت AR، فریم‌های خراب در گیرنده تشخیص داده شده و درخواست ارسال مجدد این فریم‌ها از سمت گیرنده برای فرستنده صادر می‌شود.

با توجه به توضیحات پارگراف قبل، در کانال با محوشدگی آهسته، فرض می‌شود که انتقال تنها بین وضعیت‌های مجاور هم رخ می‌دهد. هنگامی که کیفیت کانال خراب می‌شود سامانه به وضعیت نرخ پایین‌تر می‌رود. در بدترین وضعیت کانال، سامانه حالت نرخ صفر را انتخاب می‌کند. هنگامی که کیفیت کانال بدون تغییر باشد (یا بهتر شود)، سامانه در همان حالت می‌ماند (و یا به نرخ بالاتر می‌رود). ماتریس انتقال حالت Q که دارای ابعاد (m+1)×(m+1) است، به صورت رابطه (۴۱) تعریف می‌شود [۲۰].

$$Q = \begin{pmatrix} q_{0,0} & q_{0,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ q_{1,0} & q_{1,1} & q_{1,2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & q_{m-1,m-2} & q_{m-1,m-1} & q_{m-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & q_{m,m-1} & q_{m,m} \end{pmatrix} \quad (41)$$

درایه ماتریس انتقال حالت، q_{ij} احتمال انتقال از حالت نرخ ارسال i به حالت نرخ ارسال j می‌باشد. به منظور یافتن احتمالات حالت انتقال، از نتایج تجربی استفاده می‌شود که رفتار متغیر با زمان تلاطم اتمسفری را نیز پوشش می‌دهد. در حالت خاص بازای هر SNR، سطح آستانه γ_{th} تابعی از نرخ عبور از سطح (LCR) است که در ادامه به معرفی آن پرداخته می‌شود:



شکل (۵): زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی عملکرد AR و ARQ [۱۸]

نرخ عبور از سطح (LCR) یکی از مشخصه‌های مهم کانال‌های نوری است که به کیفیت سیگنال‌های دریافتی در گیرنده وابسته می‌باشد. LCR غالباً برای تعیین مشخصات آماری محوشدگی سیگنال استفاده می‌شود که با افزایش تلاطم زیاد شده و از رابطه (۴۲) محاسبه می‌شود [۲۰].

$$N(\gamma_{th}) = \frac{1}{4\pi\sigma_0^2} \exp\left(\frac{1}{2(1-e^{4\sigma_s^2})} \left(\frac{\gamma_{th} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}\right)^2\right) \quad (42)$$

در رابطه (۴۲)، $\bar{\gamma}$ SNR متوسط و γ_{th} سطح آستانه SNR

پارامترهای (p_k, R_k, FER_k) می‌باشند؛ به طوری که $1 \leq k \leq 2$ است. p_k و FER_k از روابط (۳۷ تا ۴۰) به دست می‌آیند [۱۵].

$$p_1 = \int_{\gamma_{fj}}^{\infty} f_{\gamma_f}(\gamma_f) d\gamma_f = F_{\gamma_f}(\gamma_{fj}) \quad (37)$$

$$p_2 = 1 - p_1 \quad (38)$$

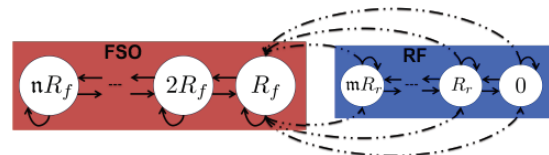
$$FER_1 = \int_{\gamma_{fj}}^{\infty} FER(2^j, \gamma_f) f_{\gamma_f}(\gamma_f) d\gamma_f \quad (39)$$

$$FER_2 = \int_0^{\infty} FER(2^j, \gamma_r) f_{\gamma_r}(\gamma_r) d\gamma_r \quad (40)$$

۳-۲- مدل‌سازی سامانه ترکیبی با زنجیره مارکوف^۱

شکل (۴) مدل مارکوف یک سامانه ترکیبی FSO/RF را نشان می‌دهد. زنجیره مارکوف زمان گسسته برای مدل‌سازی سامانه‌هایی نظیر سامانه مورد نظر ما که هر وضعیت آن تنها وابسته به وضعیت قبلی است، مناسب است [۱۹].

در شکل (۴) با توجه به عملکرد نرخ وفقی در هر کدام از فازهای FSO و RF، نرخ ارسال به تدریج از چپ به راست کاهش می‌یابد. در ابتدا سامانه در فاز FSO و با بالاترین نرخ ارسال می‌کند (اول وضعیت سمت چپ). زمانی که کیفیت کانال FSO کاهش می‌یابد، سامانه به سمت وضعیت ارسال با نرخ پایین‌تر می‌رود. زمانی که کیفیت کانال بدون تغییر است، سامانه در همان مود فعلی خود باقی می‌ماند و در نهایت زمانی که کیفیت کانال بهتر می‌شود، به مود با نرخ بالاتر می‌رود. در فاز FSO و پایین‌ترین مود ارسال، اگر کیفیت کانال FSO خراب شود، سامانه به فاز RF سوییچ می‌شود. در این زمان بر اساس کیفیت جاری کانال RF، سامانه مناسب‌ترین مود قابل دسترس m ام را برای ارسال انتخاب می‌نماید. در حالتی که کیفیت کانال RF نیز خیلی بد باشد، سامانه ارسال را متوقف می‌کند [۱۹].



شکل (۴): مدل زنجیره مارکوف برای عملکرد AMR [۱۹]

۴-۲- طرح نرخ وفقی

شکل (۵-الف) عملکرد نرخ وفقی یک سامانه FSO چند لایه AR/ARQ را نشان می‌دهد که با زنجیره مارکوف مدل شده است. در زنجیره مارکوف تعداد $m+1$ حالت وجود دارد که هر وضعیت یک نرخ ارسال را بیان می‌کند، که به تدریج از چپ به راست

¹ Markov Chain

به‌منظور محاسبه P می‌بایست رابطه (۴۸) تبدیل به یکسری معادلات خطی معمولی شده و سپس به وسیله روش حذف گوسی استاندارد حل شوند [۲۲].

۲-۵- مدل سازی درخواست تکرار خودکار

فرض می‌شود در زمان ارسال‌های یک قاب، نرخ ارسال وفقی ثابت بماند. مطابق شکل (۵-الف) برای مدل‌سازی عملکرد ARQ از زنجیره گسسته زمان مارکوف برای کوچک‌سازی محاسبات استفاده می‌شود. در مدل نشان داده شده شکل (۵-ب) هر وضعیت^۱ با شاخصی به نام مرتبه ارسال تعریف شده و با k نشان داده می‌شود. احتمال جابه‌جا شدن در هر یک از وضعیت‌ها با $P_1(k)$ نشان داده می‌شود که در واقع احتمال خطای قاب می‌باشد. علاوه بر این وضعیت‌های "موفقیت" و "شکست" به ترتیب برای نشان دادن موفقیت و شکست ارسال تعریف شده است. مدل منتهی به یک حالت خاص زنجیره مارکوف می‌باشد که دو وضعیت جذب دارد، "موفقیت" و "شکست" و حالت انتقال (که یک وضعیت دیگر است). برای تحلیل بیشتر، ماتریس T را که دارای مرتبه $(k+1) \times (k+1)$ است، بررسی می‌شود. این ماتریس یک ماتریس انتقال از یک حالت مارکوف به یک حالت دیگر مارکوف است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & P_1(1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_1(2) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & P_1(k) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (49)$$

$P_1(1)$: احتمال خطای قاب در ارسال مرتبه اول

$P_1(2)$: احتمال خطای قاب در ارسال مرتبه دوم

⋮

$P_1(k)$: احتمال خطای قاب در ارسال مرتبه k ام

ماتریس اساسی در مدل زنجیره زمان گسسته برابر است با [۱۸]:

$$E = (I - T)^{-1} \quad (50)$$

هر عنصر ماتریس اساسی نشان دهنده متوسط تعداد دیدارهای حالت‌های گذر قبل از عبور به هر حالت جذب است. مجموع عناصر ردیف a ام ماتریس E ($\sum_{b=1}^{k+1} E_{a,b}$) نشان دهنده متوسط تعداد مجموع ارسال‌هاست. وقتی یک حالت گذرای a شروع می‌شود، E دلالت بر عدد متوسط مجموع ارسال قبل از اینکه جذب شود به هر دو حالت موفقیت و شکست است. بدون افت کلی، فرض می‌شود حالت "۱" همیشه حالت شروع زنجیره است.

لحظه‌ای است. t_0 زمان همدوسی موقت یا زمان به‌هم پیوستگی تلاطم اتمسفری است. این زمان در مقایسه با مدت ارسال یک نشانه خیلی بزرگ‌تر است. بنابراین کانال با تلاطم اتمسفری به‌عنوان یک کانال با محوشدگی آهسته مدل می‌شود. همچنین σ_s^2 واریانس لگاریتم شدت سیگنال می‌باشد و از رابطه (۴۳) محاسبه می‌شود [۲۱].

$$\sigma_s^2 = \exp \left[\frac{0.49\sigma_2^2}{(1 + 0.18d^2 + 0.56\sigma_2^{12/5})^{7/6}} - \frac{0.56\sigma_2^2(1 + 0.69\sigma_2^{12/5})^{-5/6}}{1 + 0.90d^2 + 0.62d^2\sigma_2^{12/5}} \right] - 1 \quad (43)$$

که در آن [۲۱]:

$$d = \sqrt{\frac{kD^2}{4L}} \quad (44)$$

همچنین σ_2^2 (واریانس ریتوف^۱) میزان واریانس تغییرات دامنه پرتو لیزر در اثر پدیده تلاطم می‌باشد که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۳].

احتمال جابه‌جایی از نرخ ارسال i به نرخ ارسال j از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$q_{i,j} = \begin{cases} 0, & |i-j| \geq 2 \\ \frac{N(\gamma_{i+1})T_i}{P_i}, & j = i+1 \\ \frac{N(\gamma_i)T_i}{P_i}, & j = i-1 \\ 1 - q_{i,i+1} - q_{i,i-1}, & j = i \text{ and } j \notin \{0, m\} \\ 1 - q_{m,m-1}, & j = i = m \\ 1 - q_{0,1}, & j = i = 0 \end{cases} \quad (45)$$

که در آن، $T_i = \frac{L}{iR_0}$ زمان ارسال قاب در نرخ i و با نرخ سمبل R_0 و P_i احتمال انتخاب نرخ ارسال i ام می‌باشد که از رابطه (۴۶) محاسبه می‌شود [۱۸].

$$P_i = \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma = F_{\gamma}(\gamma_{i+1}) - F_{\gamma}(\gamma_i) \quad (46)$$

فرض کنید ماتریس احتمال حالت ماندگار با رابطه زیر تعریف شود؛ که در آن، p_i احتمال حالت i ام در تساوی فوق می‌باشد [۱۸].

$$P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_{m+1}] \quad (47)$$

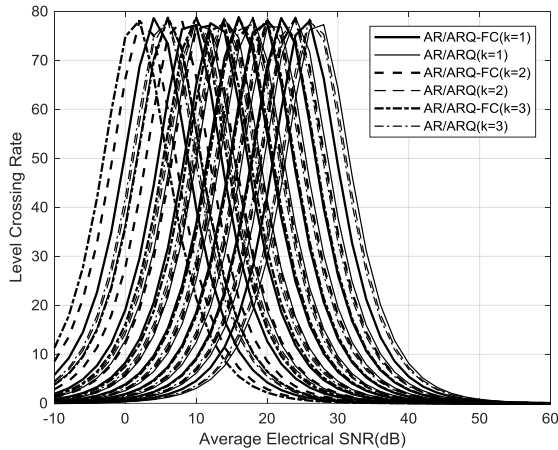
در این صورت بر طبق نظریه زنجیره مارکوف دارید [۱۸]:

$$\begin{cases} P = PQ \\ \sum_{i=1}^{m+1} p_i = 1 \end{cases} \quad (48)$$

² State

¹ Rytov

ارسال مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود حداکثر نرخ عبور از سطح برای هر نرخ ارسال، در طرح AR/ARQ-FC در SNRهای پایین‌تری نسبت به طرح AR/ARQ رخ می‌دهد.



شکل (۶): نرخ عبور از سطح در حالت تلاطم ضعیف برای دو طرح AR/ARQ و AR/ARQ-FC به ازای نرخ ارسال‌های مختلف

۲-۳- متوسط عدد انتظار ارسال

شکل‌های (۷ و ۸) به ترتیب منحنی‌های عدد انتظار ارسال را در حالت تلاطم ضعیف برای طرح‌های AR/ARQ-FC و AR/ARQ در سه سطح اصرار مختلف ($K=1, 2, 3$) را نشان می‌دهد. این شکل‌ها بیانگر هزینه استفاده از پروتکل‌های ARQ هستند و نشان می‌دهد افزایش سطح اصرار باعث افزایش متوسط تعداد ارسال‌ها می‌شود. مقایسه شکل‌های (۷ و ۸) نشان می‌دهد که هزینه ارسال داده در طرح AR/ARQ-FC نسبت به طرح AR/ARQ بالاتر است. بدیهی است هزینه ارسال در هر دو طرح برای سطح اصرار ۳ بالاتر از سطح اصرار ۲ است.

۳-۳- متوسط راندمان طیفی

شکل (۹) متوسط راندمان طیفی را برای دو طرح AR/ARQ و AR/ARQ-FC را در حالت تلاطم ضعیف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طرح AR/ARQ-FC نسبت به طرح AR/ARQ دارای راندمان طیفی بالاتری است. در طرح AR/ARQ-FC نیز متوسط راندمان طیفی برای سطح اصرار ۲ بهترین عملکرد را دارد.

بنابراین عدد انتظار ارسال برای هر قاب از رابطه (۵۱) به دست می‌آید [۱۸]:

$$N_i = \sum_{b=1}^{k+1} E_{1,b} \quad (51)$$

۶-۲- معیارهای ارزیابی

الف) نرخ عبور از سطح

تعداد دفعاتی که در واحد زمان، سطح سیگنال دریافتی از سطح آستانه مورد نظر پایین‌تر می‌رود را نرخ عبور از سطح (LCR) می‌نامند، و مانند کمیت‌هایی نظیر احتمال قطع^۱ و میانگین مدت محوشدگی^۲ برای ارزیابی کانال‌های نوری استفاده می‌شود.

ب) عدد انتظار ارسال

حداکثر میانگین تعداد دفعات ارسال که بیانگر هزینه استفاده از درخواست تکرار خودکار است را عدد انتظار ارسال نامیده می‌شود و طبق رابطه (۵۲) تعیین می‌شود [۱۸].

$$N_{\max} = \max(N_1, N_2, \dots, N_{m+1}) \quad (52)$$

عدد انتظار ارسال که برای نرخ وفقی تعیین می‌شود، را می‌توان برای مصالحه بین عدد ارسال و راندمان طیفی قابل حصول مورد استفاده قرار داد [۱۸].

ج) متوسط راندمان طیفی

وقتی سامانه در حالت نرخ ارسال وفقی نام ارسال انجام می‌دهد، هر نشانه‌های R_i بیت اطلاعات را حمل می‌کند. همچنین یک فیلتر شکل دهنده پالس با پهنای باند $B=1/R_0$ در نظر گرفته می‌شود. راندمان طیفی قابل حصول (بیت بر واحد پهنای باند) از رابطه (۵۳) به دست می‌آید که در آن $R_i=iR_0$ است [۱۲]:

$$S_{\text{achievable}} = \frac{1}{R_0} \sum_{i=1}^{m+1} P_i R_i \quad (53)$$

در حالت نام به دلیل عملکرد ARQ، هر قاب (و همچنین هر بیت اطلاعات) ممکن است N_i بار ارسال شود. بنابراین متوسط راندمان طیفی طرح چند لایه از رابطه (۵۴) به دست می‌آید [۱۲]:

$$S_{\text{average}} = \frac{1}{R_0} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{N_i} P_i R_i \quad (54)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- نرخ عبور از سطح

شکل (۶) منحنی‌های نرخ عبور از سطح را در حالت تلاطم ضعیف برای دو طرح AR/ARQ و AR/ARQ-FC به ازای ۷ نرخ

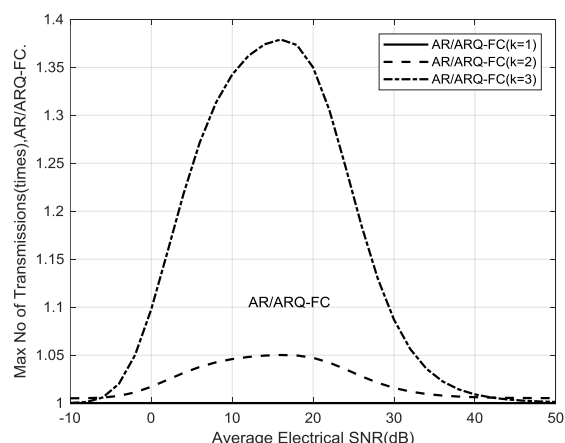
^۱ Outage Probability

^۲ Average Fading Duration

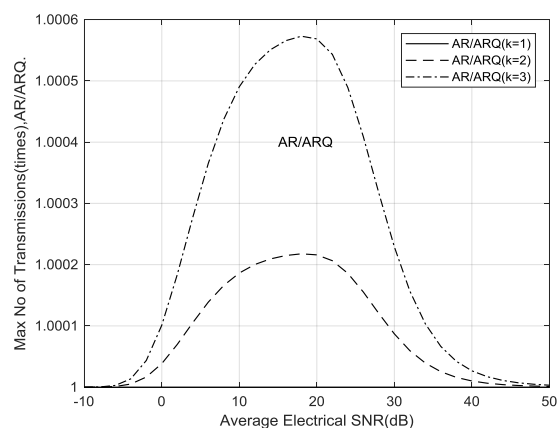
تحلیل شده و مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند. طرح‌های چند لایه راندمان طیفی و قابلیت اطمینان ارسال بهتری دارند و در میان آن‌ها طرح AR/ARQ-FC نسبت به طرح AR/ARQ کارآمدتر است. به علاوه نشان داده شد که برای طرح‌های چند لایه، سطح اصرار ۲ مناسب‌تر است. نتایج عددی نشان می‌دهد که اثر تلاطم اتمسفری بر روی کارایی سامانه شدید می‌باشد. در هر صورت با استفاده از طرح‌های چند لایه و با انتخاب سطح اصرار بهینه، کارایی کلی سامانه بهبود معنی‌داری پیدا می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست آمده نشان داده شد با استفاده از مدل ریاضی M چگونه می‌توان یک محدوده SNR متوسطی را یافت که کارایی سامانه تحت تأثیر شرایط مختلف تلاطم حداکثر باشد.

۵- مراجع

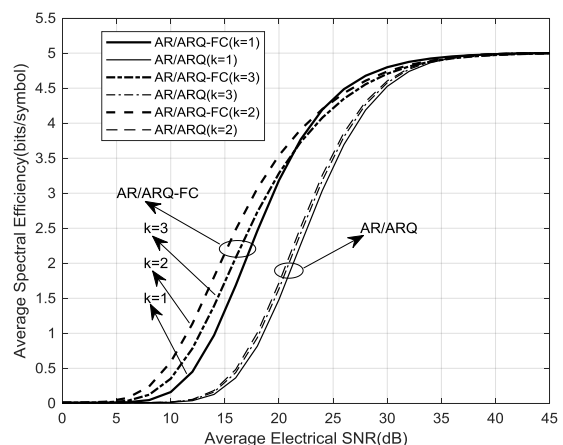
- [1] M. H. Tavazeh, I. Kouroshian, and A. Rouhi Qadiklayi, "Study of Free Space Optical Communication Systems as a Secure Communication System in Crisis Conditions," National Conference on Passive Defense in Science and Engineering with Emphasis on Camouflage, Concealment, Passive Defense Organization of the Country, February 20, 2014 (In Persian).
- [2] M. Feizi and A. Chaman Motlagh, "Simulation of Optimal FSM Algorithm in Automatic Tracking Systems for Stabilizing Secure Links of Free Space Optical Communications," Scientific-Research Journal Electronic and Cyber Defense, Second Year, No.1, Spring 2014, pp. 61-69 (In Persian).
- [3] H. R. Khodadadi, M. H. Ghezeliagh, H. Khaleghi Bizaki, and A. Chaman Motlagh, "Reducing the Effects of AirFlow Turbulence on Free Space Optical Communications by Using Space-Time Codes Based on Structure Several Sources," Scientific-Research Journal of Passive Defense Sciences and Technologies, Fourth Year, No. 3, Fall 2013, pp. 231-237 (In Persian).
- [4] K. Prabu and S. Thakkar, "Analysis of FSO Link with Time Diversity over M -distribution Channel Model with Pointing Errors and GVD Effects," Elsevier, Optics Communications 421, pp. 115-124, 2018.
- [5] O. M. S. Al-Ebraheemy, A. M. Salhab, A. Chaaban, S. A. Zummo, and M. S. Alouini, "Precise Performance Analysis of Dual-Hop Mixed RF/Unified-FSO DF Relaying with Heterodyne Detection and Two IM-DD Channel Models," IEEE Photonics Journal, IWCNC, vol. 11, no. 1, 2017.
- [6] K. O. Odeyemi, P. A. Owolawi, and V. M. Srivastava, "A Comparison between Mathematical Tools for Analyzing FSO Systems over Gamma-Gamma Atmospheric Channel," IEEE Africon, Proceedings, 978-1-5386-2775-4/17, 2017.
- [7] J. Balsells, F. Martinez, M. Vazquez, A. Navas, and A. Notario, "Performance Analysis of FSO Communications under LOS Blockage," Optics Express, Vol. 25, No. 21, 2017.



شکل (۷): عدد انتظار ارسال برای طرح AR/ARQ-FC در سه سطح اصرار مختلف (K=1, 2, 3) و در حالت تلاطم ضعیف



شکل (۸): عدد انتظار ارسال برای طرح AR/ARQ در سه سطح اصرار مختلف (K=1, 2, 3) در حالت تلاطم ضعیف



شکل (۹): متوسط راندمان طیفی در حالت تلاطم ضعیف برای دو طرح AR/ARQ-FC و AR/ARQ

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرح چند لایه AR/ARQ استاندارد و طرح چند لایه AR/ARQ-FC با استفاده از مدل ریاضی M و تابع مارکوف

- Channels," in Proceeding of IEEE GLOBECOM WS-OWC, pp. 554–559, 2014.
- [16] H. D. Le, V. V. Mai, C. T. Nguyen, and A. T. Pham, "Sliding Window Protocols with Rate Adaptation for FSO Burst Transmission over Turbulence Channels," IEEE, 978-1-5386-5041-7/18, pp.821–826, 2018.
- [17] I. Trigui, N. Cherif, S. Affes, X. Wang, V. Leung, and A. S. Ephenne, "Interference-Limited Mixed Málaga-M and
- [18] Generalized α -K Dual-Hop FSO/RF Systems," NSERC, IEEE, 978-1-5386-3531-5/17, 2017.
- [19] V. V. Mai and A. T. Pham, "Cross-Layer Designs And Analysis of Adaptive-Rate Transmission and ARQ for Free-Space Optical Communications," IEEE Photonics Journal, , vol. 3, no. 1, pp. 1-90, 2016.
- [20] J. Mo, "Performance Modeling of Communication Networks with Markov Chains," Synthesis Lectures on Data Management, vol. 3, no. 1, pp. 1–90, 2010.
- [21] Ch. T. Nguyen, H. D. Le, and V. V. Mai, "A Cross Layer Analysis of TCP/link Adaptation Technologies over Free-space Optical Links with Markov Error Model," Springer, Photonic Network Communications, pp. 279–288, 2018.
- [22] H. D. Le, C. T. Nguyen, V. V. Mai, N. T. Dang, and A. T. Pham, "On the Performance of TCP Cubic over Fading Channels with AMC Schemes," IEEE, 978-1-5386-2896-6/17, International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2017.
- [23] N. Cherif, I. Trigui, and S. Affes, "Dual-hop Málaga- \mathcal{M} FSO Systems with Pointing Errors," NSERC, IEEE, 978-1-5386-3531-5/17, 2017.
- [8] M. A. Khalighi, M. Uysal, "Survey on Free Optical Communication: A Communication Theory Perspective," IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, 2231–2258, 2014.
- [9] N. Cherif, I. Trigui, and S. Affes, "Dual-Hop Málaga-M FSO Systems with Pointing Errors," IEEE, 28 Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, 2017.
- [10] K. O. Odeyemi and P. A. Owolawi, "Impact of Transmission Techniques in Asymmetric RF/FSO System over Nakagami and Gamma Fading Channels with Pointing Errors," John Wiley & Sons, pp. 1 -20, 2018.
- [11] M. Z. Hassan, M. J. Hossain, J. Cheng, and V. Leung, "Delay-QoS-Aware Adaptive Modulation and Power Allocation for Dual-Channel Coherent OWC," Journal of Opt. Commun. Netw, vol. 10, no. 3, pp. 131-151, 2018.
- [12] M. R. Aghaei, A. M. A. HemmatyAR, A. Chamanmotlagh, and M. Fouladian, "Analysis of Adaptive Multi-Rate FSO/RF Hybrid Systems Using Málaga- \mathcal{M} Distribution Model in Turbulent Channels," Journal of Modern Optics, vol. 67, no. 13, pp. 1159-1169, 2020.
- [13] A. Jurado-Navas, J. M. Garrido-Balsells, J. F. Paris, and A. Puerta-Notario, "A Unifying Statistical Model for Atmospheric Optical Scintillation," Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes, Chapter 8, pp. 181-206, 2011.
- [14] S. Sharma, A. S. Madhukumar, and R. Swaminathan, "Switching-Based Hybrid FSO/RF Transmission for DF Relaying System," IEEE, WCNC, 978-1-5386-1734-2/18, 2018.
- [15] V. V. Mai and A. T. Pham, "Adaptive Multi-Rate Designs For Hybrid FSO/RF Systems Over Fading