

Optimal Design of Wireless Visible Light Communication Network with the Aim of Minimizing the Outage Probability at the Location of the Mobile Receiver

M. Mohammadi, S. M. S. Sadough*

*Professor, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received: 29/08/2021, Accepted: 23/02/2022)

ABSTRACT

The subject of this paper is to determine the optimal placement for deploying light emitting diodes (LEDs) in order to implement the visible light communication (VLC) network in an indoor environment. More precisely, determining the optimal placement consists of installing the optical transmitter in a place of the ceiling for an indoor environment in a building to minimize the outage probability in the location of the moving receiver. Here, we consider the scenario of a LiFi-based wireless communication link in which several LEDs are placed on the ceiling of a room and communicate with a mobile receiver in a high data rate communication network. First, we derive the closed-form expression for the outage probability at the user's location. Then, we study the effect of parameters such as power and height of the ceiling on the outage probability in the desired location. Finally, we design the optimal placement of the LEDs by minimizing the outage probability at the receiver. Numerical results show that the optimization of the transmitter location reduces significantly the outage probability compared to the non-optimal choices of LEDs placement.

Keywords: Visible Light Communication, LiFi, Outage Probability, Mobile User, Optimal LED Placement.

*Corresponding Author Email: S_sadough@sbu.ac.ir

طراحی بهینه شبکه بی سیم مخابرات نور مرئی با هدف کمینه سازی احتمال قطع در محل گیرنده متحرک

محمود محمدی^۱، سید محمدسجاد صدوق^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴)

چکیده

موضوع مورد توجه در این مقاله، تعیین موقعیت بهینه مکانی برای نصب دیود ساطع کننده نور (LED) به منظور پیاده سازی شبکه بی سیم مخابرات نور مرئی (VLC) در یک محیط بسته است. به طور دقیق تر، منظور از تعیین موقعیت بهینه، نصب فرستنده نوری در مکانی از سقف یک محیط بسته در فضای درونی یک ساختمان است که احتمال قطع در محل گیرنده متحرک به حداقل برسد. در اینجا، سناریوی یک لینک مخابراتی بی سیم مبتنی بر LiFi در نظر گرفته می شود که در آن چندین LED در سقف یک اتاق قرار داده شده اند و با گیرنده متحرک موجود در محیط ارتباط پرسرعت مخابراتی برقرار می کنند. ابتدا، عبارت بسته ای برای احتمال قطع در محل کاربر به دست آمده، سپس تأثیر پارامترهایی مانند توان و ارتفاع LEDها بر روی احتمال قطع در محل مورد نظر مطالعه و بررسی می شود. در نهایت، با به حداقل رساندن احتمال قطع در گیرنده، مکان بهینه LEDها طراحی می شود. نتایج شبیه سازی های عددی نشان می دهد که بهینه سازی مکان فرستنده به طور قابل ملاحظه ای احتمال قطع را در مقایسه با انتخاب های غیر بهینه مکان LEDها کاهش می دهد.

کلیدواژه ها: مخابرات نور مرئی، LiFi، احتمال قطع، کاربر متحرک، چیدمان بهینه LED

۱- مقدمه

برای طراحی، پیاده سازی و راه اندازی یک سیستم VLC کارآمد، مدل سازی محیط انتشار بی سیم ضروری است [۳]. این عرصه به طور معمول از دو مدل کانال استفاده می شود: (۱) کانال دید مستقیم^۵ (LOS) و (۲) کانال دید غیرمستقیم^۶ (NLOS). در هر یک از این دو مدل کانال، نحوه قرارگیری اجزای سیستم مخابراتی VLC، یکی از مؤلفه های اساسی است که تعیین مکان فرستنده ها با توجه به موقعیت کاربران، یکی از مهم ترین عوامل برقراری ارتباط مخابراتی کارآمد به حساب می آید.

از سوی دیگر، آنچه در چیدمان فرستنده ها در سیستم های VLC باید لحاظ گردد، تأمین روشنایی هم زمان با برقراری لینک مخابراتی است. به دلیل آن که LiFi^۷ معمولاً از آرایه های دیودهای ساطع کننده نور (LED^۸) به عنوان فرستنده استفاده می کند، به منظور استفاده از تعداد مناسب LED در مکان های مناسبی از سقف، باید محدودیت هایی را در نظر گرفت تا روشنایی و برقراری ارتباطات به صورت توأمان تضمین گردد [۳]. از جمله این محدودیت ها می توان به ملزومات معماری و زیبایی شناسی ساختمان، طراحی داخلی و استفاده از سقف های کاذب اشاره نمود.

امروزه ارائه خدمات با کیفیت و پرسرعت مخابراتی به یکی از نیازها و حتی ملزومات اساسی زندگی اجتماعی تبدیل شده است. به طور خاص، دسترسی بی سیم به شبکه اینترنت پرسرعت، از بارزترین نمونه های پیشرفت در حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات است. در حال حاضر بیشتر داده های تولید شده، بر بستر طیف فرکانس رادیویی^۲ (RF) ارسال می شوند [۱].

در سال های اخیر، تقاضای کاربران برای استفاده از پهنای باند گسترده تر در شبکه های ارتباطی RF جهت پشتیبانی از ترافیک داده بی سیم افزایش چشمگیری داشته است. برای افزایش ظرفیت یک سیستم مخابراتی، فناوری های جایگزین مختلفی معرفی شده است که در این میان مخابرات بی سیم نوری^۳ (OWC) به عنوان راه حلی مطمئن، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۲]. مخابرات نور مرئی (VLC^۴) و به ویژه نوع شبکه ای VLC که از ارتباطات دوسویه پشتیبانی می نماید و به LiFi معروف است، نقش مهمی در توسعه سیستم های OWC ایفا می نماید [۳].

* رایانامه نویسنده مسئول: s_sadough@sbu.ac.ir

² Radio Frequency

³ Optical Wireless Communication

⁴ Visible Light Communication

⁵ Line-of-Sight

⁶ Non-Line-of-Sight

⁷ Light Fidelity

⁸ Light Emitting Diode



فرستنده‌ها ارائه داده‌اند و از این حیث با مقاله حاضر که معیار احتمال قطع در قالب حل یک مسئله بهینه‌سازی تحلیلی بهینه شده است، لحاظ شده است، کاملاً متفاوت است.

در جمع‌بندی محتوایی پژوهش‌های پیشین، می‌توان به چند نکته زیر اشاره کرد:

- رابطه تحلیلی بسته‌ای برای احتمال قطع ارائه نشده است؛
- مدل غالب مقالات بر مبنای تنها یک فرستنده طراحی شده است؛
- توزیع آماری خاصی برای حضور کاربران در محیط موردنظر لحاظ نشده است یا اینکه توزیع یکنواخت لحاظ شده است.

بنابراین، در تکمیل پژوهش قبلی [۱۷]، در این مقاله می‌خواهیم با در نظر گرفتن توزیع مناسب برای حضور گیرنده‌ها در محیط، عبارتی بسته برای احتمال قطع در محل گیرنده بر حسب محل فرستنده‌ها به دست آوریم.

به این ترتیب، می‌توان احتمال قطع را برای به دست آوردن مکان بهینه برای فرستنده‌ها به حداقل رساند.

به صورت فهرست‌وار، نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از:

۱) کانال VLC با پیکربندی دید مستقیم (LOS) برای کاربران متحرک در محیط موردبررسی توصیف و مدل‌سازی می‌گردد. در مدل پیشنهادی، از چندین LED به عنوان فرستنده و یک کاربر متحرک که به طور تصادفی توزیع شده به عنوان گیرنده استفاده می‌شود.

۲) با محاسبه مقدار SNR در محل گیرنده، عبارتی بسته به صورت تحلیلی برای احتمال قطع استخراج می‌شود. لازم به ذکر است کمینه‌سازی احتمال قطع در شبکه LiFi برای کاربردهایی نظیر داتلود و مشاهده آنلاین ویدئو اهمیت بسزایی دارد.

۳) با استفاده از رابطه بسته به دست آمده، مکان LEDها که در واقع همان نقاط دسترسی (AP) هستند به گونه‌ای تعیین می‌شوند که احتمال قطع در محل گیرنده کمینه گردد.

ساختار ادامه این مقاله به صورت زیر است: در بخش ۲، مدل سیستم و کانال مخابراتی و توزیع گیرنده‌ها برای محیط بسته معرفی و روابط مربوط به آن آورده شده است. پس از آن در بخش ۳، مسئله بهینه‌سازی محل LEDها از منظر احتمال قطع تعریف شده و رابطه بسته مربوط به احتمال قطع استخراج می‌گردد. بخش ۴، به نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌های مربوطه اختصاص دارد و منحنی‌های حاصل از آن ارائه شده است و نهایتاً در بخش ۵، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه می‌گردد.

مطالعات متعددی به موضوع چیدمان بهینه LED برای سیستم‌های VLC در محیط بسته پرداخته‌اند. در یکی از اولین پژوهش‌ها، وانگ^۱ و همکاران در [۴] و [۵]، تأثیر چیدمان دایروی LED را در کاهش نوسان نسبت سیگنال به نویز^۲ (SNR) در مکان‌های مختلف اتاق برای چند کاربر بررسی کرده‌اند که البته این نوع چیدمان از لحاظ معماری در همه‌جا قابل پیاده‌سازی نیست.

در [۶] استفان و هاس^۳ با به حداکثر رساندن بازده طیفی محلی به عنوان یک سنج، چیدمانی برای آرایه LED را پیشنهاد داده‌اند و پارامترهای طراحی آرایه مانند فاصله بین دو LED مجاور و محل دقیق سقف را با حل یک مسئله بهینه‌سازی به دست آورده‌اند. نویسندگان در [۷] عملکرد سیستم مخابراتی را برای چیدمان مثلثی LEDها بر اساس میانگین نسبت قطع تجزیه و تحلیل کرده‌اند. دستغیب و همکاران نیز در [۸] و [۹] چیدمان LED را با توجه به محدودیت روشنایی، عملکرد قطع و نرخ داده از نظر عددی بررسی نموده‌اند. اگرچه در این دو مقاله روش‌های جدیدی برای بهینه‌سازی محل فرستنده تعیین شده، ولی رابطه بسته‌ای برای احتمال قطع^۴ محاسبه نشده است.

نویسندگان در [۱۰] به بررسی مسئله چیدمان بهینه LEDها در محیط‌های داخلی، مشروط به محدودیت در روشنایی و بر اساس نرخ داده کاربر پرداخته‌اند. عبدالله و همکاران در [۱۱] احتمال قطع را با یک مدل احتمالی توصیف کرده‌اند که در آن مکان نقاط دسترسی با توجه به تأخیر واگذاری^۵ و سرعت کاربر مشخص شده است. در [۱۲] و [۱۳]، سینگ^۶ و همکاران عملکرد سیستم VLC چند ورودی را با چیدمان تصادفی LEDها و انسداد سیگنال در حضور افراد تجزیه و تحلیل کرده‌اند. در [۱۴] نویسندگان بر روی به حداقل رساندن تعداد LEDهای نصب‌شده به منظور روشنایی و با محدودیت متوسط کیفیت تجربه^۷ و نیز بهینه‌سازی متوسط کیفیت تجربه با تعداد ثابت LED تمرکز کرده‌اند.

مقاله [۱۵] ویژگی‌های تداخل را با توجه به روشنایی LED و توزیع گیرنده‌های نوری و ارسال سیگنال با LEDهای متعدد در یک هواپیما ارزیابی می‌کند و روش چیدمان بهینه را بر اساس نتایج ارزیابی به دست می‌آورد. در [۱۶] نیز از یک ویژگی آماری برای تجزیه و تحلیل اثر چیدمان LEDها بر یکنواختی روشنایی استفاده شده است.

نویسندگان مقاله حاضر نیز در گذشته [۱۷]، یک روش تماماً مبتنی بر محاسبات عددی را برای تعیین مکان بهینه

¹ Z. Wang

² Signal-to-Noise Ratio

³ I. Stefan and H. Haas

⁴ Outage Probability

⁵ Handover

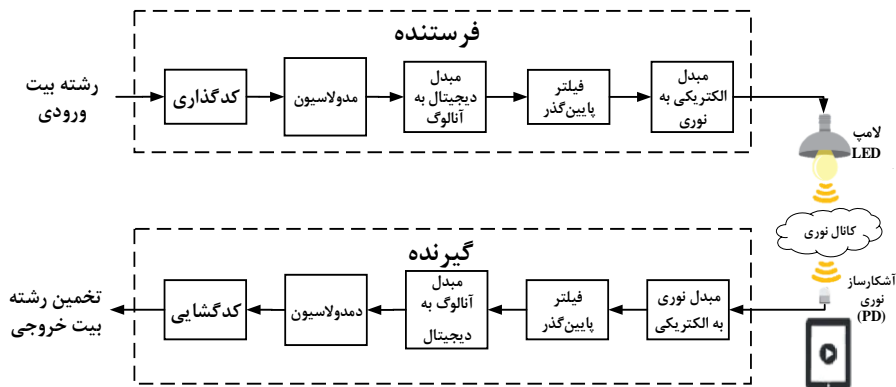
⁶ A. Singh

⁷ Quality of Experience

⁸ Access Point



شکل (۱). مدل سیستم VLC محیط بسته شامل چندین LED در سقف و یک گیرنده متحرک که به‌طور تصادفی در محیط قرار می‌گیرد



شکل (۲). مدل فرستنده و گیرنده سیستم VLC موردنظر

بلوک دیاگرام فرستنده و گیرنده در شکل (۲) نشان داده شده است. بیت‌های داده پس از کدگذاری با استفاده از مدولاسیون قطع-وصل^۳ (OOK) تحت مدولاسیون شدت^۴ با آشکارسازی مستقیم^۵ (IM/DD) قرار می‌گیرند [۱۸]. به عبارت دقیق‌تر، شدت تابش LEDها که با $x(t)$ مشخص می‌شود، با سیگنال ورودی مدوله می‌گردد. سیگنال الکتریکی که از طریق PD در گیرنده از سیگنال نوری فرسوی^۶ دریافت شده تولید می‌شود با $y(t)$ نشان داده شده و به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۱۹]:

$$y(t) = Rx(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (1)$$

که در آن $h(t)$ پاسخ ضربه کانال، $n(t)$ نویز سفید گوسی است که به‌صورت $N(0, \sigma_n^2)$ توزیع می‌شود، R ضریب پاسخ‌دهی^۷ آشکارساز نوری و \otimes نشان‌دهنده کانولوشن است.

۲- مدل سیستم و کانال

۲-۱- پیکربندی لینک

همان‌طور که شکل (۱) نشان می‌دهد، سناریوی در نظر گرفته شده، یک محیط داخلی است که در آن شبکه مخابراتی LiFi با نصب LEDها به‌عنوان فرستنده در سقف پیاده‌سازی می‌شود. گیرنده نیز مجهز به یک ابزار هوشمند موسوم به آشکارساز نوری^۱ (PD) است که با توزیع مشخصی به‌صورت تصادفی در محیط قرار گرفته است.

در این سناریو، علاوه بر لینک‌های LOS که با خطوط پر مشخص شده‌اند، مسیرهای دید غیرمستقیم^۲ (NLOS) وجود دارد که با خطوط نقطه‌چین مشخص شده‌اند و حاصل بازتابش نور از دیوارها و سطوح محیط است. لازم به ذکر است در سیستم‌های VLC به دلیل ضریب بازتاب نوری بسیار کم از دیوارها و اجسام موجود در محیط، توان دریافتی از مسیرهای NLOS بسیار کمتر از مسیرهای LOS است و در نتیجه این مسیرها قابل چشم‌پوشی هستند [۷].

^۳ On-Off Keying

^۴ Intensity Modulation

^۵ Direct Detection

^۶ Downlink

^۷ Responsivity

^۱ Photodetector

^۲ Non-Line-of-Sight

۲-۲- مدل کانال VLC محیط بسته

که $B = (m_i + 1)A / 2\pi T_s(\psi_i)g(\psi_i)$ را می توان ضریبی

ثابت در نظر گرفت و $rect(\psi_i/\psi_c)$ تابع مربعی در فضاست.

۲-۳- توزیع مکانی گیرنده متحرک

بدون از دست دادن حالت کلی مسئله، موقعیت نسبی فرستنده و گیرنده در بُعد طولی فضا ثابت در نظر گرفته می شود. فرض بر آن است که کاربر با توجه به مدل تحرک تصادفی^۲ (RWP) با یک توزیع نرمال (x_R) در بُعد عرض قرار گرفته باشد. با توجه به این که کاربر انسانی به احتمال زیاد از رایانه شخصی، تلفن همراه یا تبلت برای دریافت سیگنال نوری استفاده می کند، محتمل ترین ارتفاع گیرنده از ۱ تا ۱٫۵ متر نسبت به سطح زمین است^۳؛ بنابراین در مورد توزیع ارتفاع گیرنده (z_R)، از توزیع ویبول^۴ استفاده شده که احتمال توزیع ارتفاع را در این بازه افزایش می دهد.

با توجه به فرضیات فوق، توزیع نرمال بریده شده^۵ x_R که با نشان $f_{x_R}(x_R)$ می شود، می تواند به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$f_{x_R}(x_R) = \frac{e^{-\frac{(x_R-\mu)^2}{2\sigma^2}} (U(x_R) - U(x_R - W))}{\sqrt{2\pi\sigma^2} (Q(\frac{-\mu}{\sigma}) - Q(\frac{W-\mu}{\sigma}))} \quad (6)$$

که در آن $U(\cdot)$ تابع پله واحد و $Q(\cdot)$ تابع Q معروف است، $\mu = W/2$ و σ^2 به ترتیب میانگین و واریانس x_R را نشان می دهد و W عرض محیط فیزیکی در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب، متغیر تصادفی z_R با توزیع ویبول بریده شده^۶ $f_{z_R}(z_R)$ مشخص می شود. می توان نوشت:

$$f_{z_R}(z_R) = \frac{\frac{k}{\lambda} (\frac{z_R}{\lambda})^{k-1} e^{-\frac{z_R}{\lambda}}}{1 - e^{-\frac{H}{\lambda}}} (U(z_R) - U(z_R - H)) \quad (7)$$

که $k > 0$ پارامتر شکل دهی^۷ و $\lambda > 0$ پارامتر مقیاس دهی^۸ توزیع است. لازم به ذکر است برای $H > \lambda$ و $k \gg 1$ ، بنابراین $e^{-\frac{H}{\lambda}} \simeq 0$.

در ادامه، فرض بر آن است که پاسخ ضربه کانال $h_{LOS}(t)$ حاصل مجموع مؤلفه های مسیره های LOS برای LEDهای موجود در بالای گیرنده باشد (شکل ۱). بنابراین، پاسخ ضربه کانال دید مستقیم (LOS CIR) در هر لحظه t به صورت زیر نوشته می شود:

$$h_{LOS}(t) = \sum_{i=1}^{N_e} h_{LOS}^i(t) \quad (2)$$

که N_e تعداد LEDهایی است که سیگنال های آن ها توسط گیرنده دریافت می شود و $h_{LOS}^i(t)$ مؤلفه LOS CIR مربوط به i امین LED است. با فرضیاتی که ذکر گردید می توان نوشت $|\lambda|$:

$$h_{LOS}^i(t) = \begin{cases} \frac{(m_i + 1)A}{2\pi d_i^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi_i) \times g(\psi_i) \cos(\psi_i) \delta\left(t - \frac{d_i}{c}\right), & 0 \leq |\psi_i| \leq \psi_c \\ 0, & |\psi_i| > \psi_c \end{cases} \quad (3)$$

که در آن A مساحت حساس به نور PD برحسب m^2 فاصله بین فرستنده و گیرنده برحسب m ، زاویه برخورد و ψ_i زاویه تابش هر دو برحسب درجه، $T_s(\psi_i)$ فیلتر میان گذر نوری مربوط به فرستنده i ام، ψ_c FOV گیرنده برحسب درجه، $m_i = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$ مرتبه انتشار لامبرتین^۱، $\phi_{1/2}$ زاویه نیمه روشنایی برای i امین LED برحسب درجه و در نهایت، $g(\psi_i)$ بهره متمرکزکننده است که به صورت زیر نوشته می شود:

$$g(\psi_i) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)}, & 0 \leq |\psi_i| \leq \psi_c \\ 0, & |\psi_i| > \psi_c \end{cases} \quad (4)$$

که در آن n ضریب شکست متمرکزکننده است.

مطابق شکل (۳)، موقعیت LEDها در عرض، طول و ارتفاع با بردار سه بعدی مختصات آن ها $[x_T, y_T, H]$ و موقعیت گیرنده با بردار سه بعدی $[x_R, y_R, z_R]$ در دستگاه مختصات دکارتی نشان داده می شود. در این صورت LOS CIR مربوط به i امین LED در محل گیرنده به صورت زیر نوشته می شود [۲۰]:

$$h_{LOS}^i(t) = B \frac{(H - z_R)^{m_i} \cos(\psi_i)}{\left[(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2 + (H - z_R)^2 \right]^{\frac{m_i+1}{2}}} \times rect\left(\frac{\psi_i}{\psi_c}\right) \delta\left(t - \frac{d_i}{c}\right), \quad (5)$$

^۲ Random Waypoint

^۳ قد انسان بالغ به طور معمول بین ۱۶۰ تا ۱۸۰ سانتی متر است که در این صورت فرض توزیع تصادفی ارتفاع گیرنده در بازه ۱ تا ۱٫۵ متر منطقی و معقول به نظر می رسد.

^۴ Weibull Distribution

^۵ Truncated Normal Distribution

^۶ Truncated Weibull Distribution

^۷ Shape Parameter

^۸ Scale Parameter

^۱ Lambertian

۳- بهینه‌سازی مکان LEDها

مخرج رابطه (۵) استفاده کرد؛ بنابراین، عبارت LOS CIR با فرض $y_R = y_{T_i}$ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$h_{LOS} \simeq \sum_{i=1}^{N_e} \frac{\mathbf{B}(H - z_R)^{m_i+1}}{\left[(x_{T_i} - x_R)^2 + (H - \bar{z}_R)^2 \right]^{\frac{m_i+3}{2}}} \quad (10)$$

$$\times \text{rect} \left(\frac{\psi_i}{\psi_c} \right) \delta \left(t - \frac{d_i}{c} \right) = \sum_{i=1}^{N_e} \mathbf{A}(H - z_R)^{m_i+1},$$

که در آن \mathbf{A} برابر است با:

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^{N_e} \frac{\mathbf{B}}{\left[(x_{T_i} - x_R)^2 + (H - \bar{z}_R)^2 \right]^{\frac{m_i+3}{2}}} \quad (11)$$

$$\times \text{rect} \left(\frac{\psi_i}{\psi_c} \right) \delta \left(t - \frac{d_i}{c} \right),$$

و متغیر تصادفی z_R با میانگین خود یعنی

$$\bar{z}_R = \lambda \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right) \simeq \lambda \quad (12)$$

تابع Γ گاما است.

اکنون می‌توان نوشت:

$$f_h(h) = \int_0^W f_{h|x_R}(h) f_{x_R}(x_R) dx_R, \quad (13)$$

که در آن $f_{x_R}(x_R)$ در (۶) تعریف شده است و $f_{h|x_R}(h)$ PDF شرطی h به شرط x_R است. از (۱۰) داریم:

$$f_{h|x_R}(h) = \frac{d}{dh} \Pr \{ \mathbf{A} H - z_R^{m_i+1} < h | x_R \}$$

$$= \frac{d}{dh} \Pr \left\{ z_R > H - \left(\frac{h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}} \middle| x_R \right\}$$

$$= - \frac{d}{dh} F_{z_R} \left(H - \left(\frac{h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}} \right) \quad (14)$$

$$= \frac{1}{m_i + 1} \mathbf{A}^{-\frac{1}{m_i+1}} h^{-\frac{m_i}{m_i+1}} f_{z_R} \left(H - \left(\frac{h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}} \right),$$

که در آن $F_{z_R}(\cdot)$ تابع توزیع تجمعی (CDF) z_R است. با به‌کارگیری از (۷) در (۱۳)، می‌توان نوشت:

$$f_{h|x_R}(h) = \frac{1}{m_i + 1} \frac{k}{\lambda} \mathbf{A}^{-\frac{1}{m_i+1}} h^{-\frac{m_i}{m_i+1}}$$

$$\times \left[\frac{H}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}} \right]^{k-1}$$

$$\times \exp \left[- \left(\frac{H}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}} \right)^k \right], \quad (15)$$

۳-۱- مسئله کمینه‌سازی احتمال قطع

با توجه به سناریوی نشان داده شده در شکل (۳)، هدف در اینجا یافتن فاصله مطلوب LEDها از دیوار مرجع (یعنی x_T) است که منجر به بهبود عملکرد سیستم مخابراتی شود. عملکرد سیستم مخابراتی بر اساس معیارهای مختلف همچون نرخ داده، SNR، احتمال قطع و... قابل بررسی است. با توجه به آن که سیستم معرفی شده قرار است به‌عنوان یک راه‌حل جایگزین جهت اتصال به اینترنت استفاده شود و یکی از کاربردهای آن داندلود یا مشاهده آنلاین ویدئو است، در این موارد اتصال دائمی و قابل اطمینان از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است؛ لذا معیار مناسب به‌عنوان قابلیت اطمینان، احتمال قطع است که در ادامه به محاسبه روابط مربوط به آن پرداخته شده است.

با توجه به هدف موردنظر، در اینجا قابلیت اطمینان شبکه مخابراتی با حداقل شدن احتمال قطع در محل گیرنده معنا می‌شود. همان‌گونه که عنوان شد یکی از پارامترهای اثرگذار در احتمال قطع سیستم پیشنهادی، محل قرارگیری فرستنده‌هاست. بنابراین، مسئله بهینه‌سازی مربوط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{x}_T = \arg \min_{x_T} P_{out}, \quad (16)$$

که P_{out} احتمال قطع، یعنی احتمال آن است که SNR لحظه‌ای^۱ به زیر آستانه γ_{th} برسد و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]:

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} f_\gamma(\gamma) d\gamma = \int_0^{h_{th}} f_h(h) dh, \quad (17)$$

که در آن $h_{th} = \sqrt{\sigma_n^2 \gamma_{th}} / RP_t$ و R ضریب پاسخ‌دهی PD موجود در رابطه (۱)، P_t توان متوسط نوری ارسال شده و σ_n^2 توان کل نویز است.

۳-۲- محاسبه احتمال قطع بر اساس توزیع گیرنده

برای استخراج عبارت بسته احتمال قطع در (۹)، ابتدا تابع چگالی احتمال^۲ (PDF) h بر اساس (۲) استخراج می‌شود. با فرض این‌که همه LEDها در ارتفاع H از کف زمین نصب شده باشند، در سناریوی LOS که در اینجا مفروض است، می‌توان گفت $\cos(\psi_i) = (H - z_R) / d_i$ برای مقادیر نسبتاً بزرگ H (یعنی $H > 2.5\lambda$)، می‌توان از تقریب z_R در

³ Cumulative Distribution Function

¹ Instantaneous Signal-to-Noise Ratio

² Probability Density Function

مقادیر مختلف x_T به دست آید. در طول شبیه‌سازی، فرض بر این است که دو LED در عرض محیط قرار گرفته‌اند و هدف بهینه‌سازی مقدار پارامتر x_T است. به دلیل لزوم تأمین روشنایی هم‌زمان، LED دوم در یک فاصله متقارن یعنی در $W - x_T$ قرار می‌گیرد.

شکل (۴) احتمال قطع در محل گیرنده را برحسب x_T برای ارتفاع‌های مختلف LED نشان می‌دهد. با استفاده از این نتایج می‌توان مقدار بهینه x_T را برای چیدمان به دست آورد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع محیط، محل بهینه LEDها به مرکز سقف نزدیک‌تر می‌شوند. برای ارتفاع سقف برابر با ۲.۵ متر، محل بهینه LED کمتر از ۱ متری دیوار مرجع است در حالی که برای ارتفاع‌های بالاتر سقف، محل بهینه LED به فاصله بیشتر از ۱ متر از دیوار منتقل می‌شود.

الگوریتم (۱). الگوریتم بهینه‌سازی چیدمان LEDها

۱: تنظیم پارامترها از جدول (۱)

۲: مکان‌های قابل قبول برای LED را در نظر بگیرید (x_T)

۳: شروع حلقه تکرار: برای برداری از مقادیر قابل قبول از P_t و H

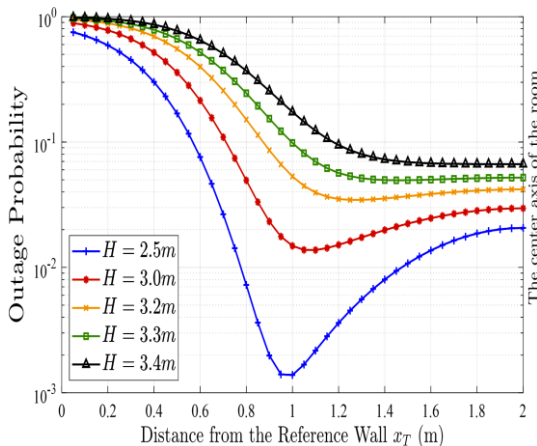
۴: مکان‌های تصادفی را برای گیرنده در نظر بگیرید که با بردار تصادفی $[x_R, y_R, z_R]$ مشخص می‌شود.

۵: متغیر A را از (۱۱) محاسبه کنید.

۶: احتمال قطع P_{out} برای هر موقعیت احتمالی LED را با استفاده از (۱۷) و (۱۸) محاسبه کنید.

۷: مقدار حداقل احتمال قطع و x_T بهینه را از (۸) پیدا کنید.

۸: پایان حلقه تکرار



شکل (۴). احتمال قطع برحسب x_T برای $N_e = 2$ و $P_t = 3Watt$

۲. این سناریو را می‌توان به‌مثابه راهرویی در نظر گرفت که ۲ عدد LED در عرض آن قرار می‌گیرد و هر گیرنده از LEDهای نزدیک به خود سیگنال دریافت می‌کند.

و این رابطه به صورت رابطه (۱۵) نوشته می‌شود:

$$f_{h|x_R}(h) = \frac{\partial g(h)}{\partial h} \cdot g(h), \tag{15}$$

که در آن $g(h)$ در آن برابر است با:

$$g(h) = \frac{H}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}}. \tag{16}$$

حال که توزیع شرطی $f_{h|x_R}(h)$ طبق رابطه (۱۴) به دست آمد، می‌توان احتمال قطع را در محل گیرنده محاسبه کرد. با استفاده از (۹) و (۱۲) نتیجه گرفته می‌شود که:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \int_0^{h_h} \int_0^W f_{h|x_R}(h) f_{X_R}(x_R) dx_R dh \\ &= \int_0^W \left(\int_0^{h_h} f_{h|x_R}(h) dh \right) f_{X_R}(x_R) dx_R \\ &= \int_0^W P_{out|x_R} f_{X_R}(x_R) dx_R, \end{aligned} \tag{17}$$

که در آن

$$\begin{aligned} P_{out|x_R} &= \int_0^{h_h} f_{h|x_R}(h) dh = \int_0^{h_h} \frac{\partial g(h)}{\partial h} g(h) dh \\ &= g(h_h) - g(0) \\ &= \exp \left[- \left(\frac{H}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{h_h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{H}{\lambda} \right)^k \right] \\ &\simeq \exp \left[- \left(\frac{H}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{h_h}{\mathbf{A}} \right)^{\frac{1}{m_i+1}} \right)^k \right], \end{aligned} \tag{18}$$

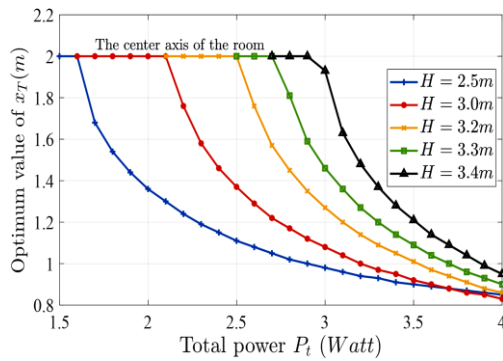
و \mathbf{A} در (۱۱) تعریف شده است و تابعی از x_R است. لازم به ذکر است در استخراج رابطه بسته اخیر، از فرض $H > 2.5\lambda$ و تقریب $e^{-\left(\frac{H}{\lambda}\right)^k} \simeq 0$ استفاده کرده‌ایم.

به این ترتیب، رابطه (۱۸) رابطه بسته‌ای از احتمال قطع را برای هر مقدار x_T دلخواه مشخص می‌سازد و می‌توان برای طراحی بهینه از آن استفاده کرد. شبه کد روش ارائه شده در این مقاله برای بهینه‌سازی موقعیت LEDها با به حداقل رساندن احتمال قطع در گیرنده در الگوریتم (۱) ارائه شده است. در این الگوریتم مقدار x_T با توجه به شکل (۳) تعیین می‌شود.

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی چیدمان LEDها، شبیه‌سازی الگوریتم (۱) در نرم‌افزار^۱ MATLAB با استفاده از مقادیر عددی جدول (۱) انجام شده تا احتمال قطع را برای

^۱ نرم‌افزار MATLAB نسخه 2020b تحت سیستم عامل ویندوز ۱۰ اجرا شده بر روی Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80GHz 1.99 GHz



شکل (۶). مقدار بهینه x_T برحسب توان P_t برای $N_e = 2$ بهینه آن‌ها توانست میزان احتمال قطع را کمینه کند.

جدول (۲). مقدار احتمال قطع میانگین و مقدار بهینه محل اولین LED. برای توان $P_t = 3W$ برای $H_T = 3m$

محل بهینه (متر)	احتمال قطع (dB)	آستانه SNR	تعداد LED
۱/۱	-۱/۹۵	۴۰	۲
۱/۱	-۲/۵	۳۷	
۰/۸	-۲/۲	۴۰	۳
۰/۸	-۲/۷	۳۷	

۵- نتیجه‌گیری

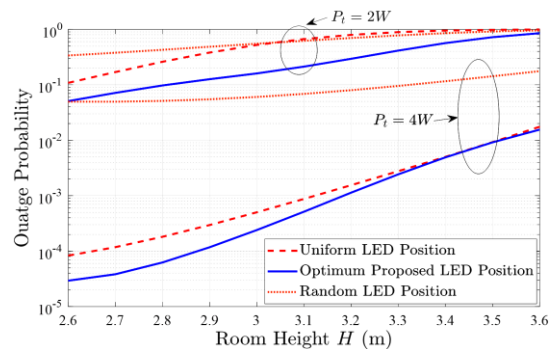
با توجه به کاربردهای موجود برای یک سیستم مخابراتی LiFi مانند دانلود و مشاهده آنلاین ویدئو، کمینه‌سازی احتمال قطع در این شبکه‌ها یک ضرورت است. لذا در این مقاله، با هدف به حداقل رساندن احتمال قطع در محل گیرنده، به بهینه‌سازی محل قرارگیری LEDها در سقف پرداخته شد. با توجه به آن‌که محل قرارگیری LEDها بسته به زاویه پوشش و فاصله از گیرنده‌ها، در میزان توان رسیده به آن‌ها مؤثر است، تعیین محل نتایج حاصل از تعیین مکان بهینه فرستنده‌ها در سقف، به معماران جهت طراحی ساختمان‌های هوشمند که از فناوری LiFi استفاده می‌کنند، کمک خواهد نمود. در این مقاله با فرض وجود لینک LOS بین LEDها و گیرنده، از مدل‌های مستقل گوسی و ویبول برای مشخص کردن موقعیت کاربر به ترتیب در عرض و ارتفاع محیط استفاده گردید. سپس عبارت بسته‌ای برای احتمال قطع به دست آمد که برای محاسبه مکان مطلوب هر فرستنده LED با کمینه‌سازی متریک احتمال قطع از آن استفاده شد.

نتایج حاصل نشان داد که با چیدمان بهینه در فرستنده‌ها، می‌توان احتمال قطع را تا حدود ۲۵٪ در مقایسه با چیدمان یکنواخت و بسیار بیشتر نسبت به چیدمان تصادفی LED کاهش داد. نتایج عددی نشان داد که با افزایش ارتفاع یا کاهش توان LEDهای نصب شده روی سقف، مکان نصب LEDها به سمت مرکز سقف متمایل می‌گردد.

جدول (۱). پارامترهایی که در شبیه‌سازی استفاده می‌شوند

عنوان پارامتر (نماد)	مقدار (واحد)
زاویه FOV (ψ_c)	۶۰ درجه
زاویه نیمه روشنایی ($\phi_{1/2}$)	۶۰ درجه
تعداد LED (N_e)	۲
ضریب ثابت (A)	۱
عرض محیط (W)	۴ متر
ارتفاع محیط (H)	۲/۵ تا ۳/۵ متر
توان LED (P_t)	۲ تا ۴ وات
ضریب شکست (n)	۱/۵
پاسخ‌دهی PD (R)	۰/۶
آستانه SNR	۴۰ دسی‌بل

شکل (۵) عملکرد احتمال قطع برحسب H را برای سه نوع چیدمان مختلف LED نشان می‌دهد. این چیدمان‌ها عبارت‌اند از چیدمان بهینه که در این مقاله پیشنهاد شده و منحنی آن در شکل با خط با خط پرشده رسم شده است، چیدمان یکنواخت [۶] که بدیهی‌ترین چیدمان قابل تصور برای برقراری روشنایی است و در آن است و چیدمان تصادفی [۱۳] در عرض محیط که منجر به نتایج بسیار ضعیفی از نظر احتمال قطع (خط نقطه‌چین) شده است. همان‌طور که دیده می‌شود چیدمان بهینه LEDها، بهبود قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به حالت‌های یکنواخت و تصادفی فراهم می‌نماید. کاملاً واضح است در صورتی که محل بهینه x_T به مقدار حاصل از طراحی یکنواخت نزدیک شود، دو نمودار احتمال قطع به هم نزدیک می‌شوند.



شکل (۵). احتمال قطع با روش‌های چیدمان پیشنهادی بهینه، یکنواخت و تصادفی LED در حالت $N_e = 2$

در شکل (۶)، مقادیر بهینه x_T برحسب کل توان ارسالی رسم شده است. در توان‌های کمتر، مکان بهینه LEDها به مرکز محیط متمایل می‌شود. برای محیط‌های با ارتفاع بیشتر، این رفتار در توان بالاتر رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، می‌توان نتیجه گرفت در SNRهای پایین، مکان مطلوب LEDها به مرکز سقف متمایل می‌شود و بالعکس. در جدول (۲) مقادیر بهینه محل اولین LED برای تعداد ۲ یا ۳ عدد LED برای دو مقدار حد آستانه آورده شده است.

- [8] M. A. Dastgheib, H. Beyranvand, & J. A. Salehi, "Optimal Visible Light Communication Access Point Placement under Stationary Distribution of Users Mobility," in 2018 9th International Symposium on Telecommunications (IST). IEEE, pp. 96-101, 2018.
- [9] M. A. Dastgheib, H. Beyranvand, & J. A. Salehi, "Optimal Placement of Access Points in Cellular Visible Light Communication Networks: An Adaptive Gradient Projection Method," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 10, pp. 6813-6825, 2020.
- [10] A. M. Vegni & M. Biagi, "Optimal LED Placement in Indoor VLC Networks," Optics Express, vol. 27, no. 6, pp. 8504-8519, 2019.
- [11] I. Abdalla, M. B. Rahaim, & T. D. Little, "Investigation of Outage Probability and AP Placement for Mobile Users in Indoor VLC System Design," in 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, pp. 1-6, 2019.
- [12] A. Singh, G. Ghatak, A. Srivastava, V. A. Bohara, & A. K. Jagadeesan, "Performance Analysis of Indoor Communication System Using Off-the-shelf LEDs with Human Blockages," IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 2, pp. 187-198, 2021.
- [13] A. Singh, A. Srivastava, V. A. Bohara, & A. K. Jagadeesan, "Performance of Indoor VLC System under Random Placement of LEDs with Nonimaging and Imaging Receiver," IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 1, pp. 868-879, March 2022.
- [14] J. Li, X. Bao, & W. Zhang, "Led Adaptive Deployment Optimization in Indoor VLC Networks," China Communications, vol. 18, no. 6, pp. 201-213, IET Research Journals, pp. 1-5, 2021.
- [15] Y. Kamei, S. Tomisato, S. Denno & K. Uehara, "LED Lighting Arrangement for Spatially Parallel Signal Transmission in Visible Light Communication," 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 1123-1126. IEEE, 2019.
- [16] K. Masroor, V. Jeoti & M. Drieberg, "Analyzing the Effects of LED Lamp Arrangements on Performance of an Indoor Visible Light Communication System," 2019 IEEE 14th Malaysia International Conference on Communication (MICC), pp. 54-58, IEEE, 2019.
- [17] M. Mohammadi & S. M. S. Sadough, "Outage Probability Improvement through Optimal LED Placement for Visible Light Communications," in 2020 3rd West Asian Symposium on Optical Wireless Communications (WASOWC). IEEE, pp. 1-5, 2020.
- [18] O. Mowlavi, M. Karimi, & S. Sadough, "Performance Analysis of Free Space Optical Communication Links Under M-PAM and M-PSK Modulations Using Adaptive Power and Modulation Techniques," Electronic and Cyber Defense, vol. 7, no. 1, pp. 63-75, 2019 (In Persian).

همچنین بر اساس نتایج جدول (۲) می‌توان گفت اگر افزایش تعداد LEDها همراه با ثابت نگه داشتن توان کل آنها باشد، مقدار احتمال قطع کاهش می‌یابد. دلیل این امر توزیع یکنواخت تر توان در کل محیط است که موجب می‌شود احتمال قرارگیری گیرنده‌ها در نزدیکی حداقل یک AP بیشتر باشد. با افزایش تعداد LEDها، محل بهینه قرارگیری اولین LED به سمت دیوارها نزدیک تر می‌گردد.

با توجه به مقادیر جدول (۲) می‌توان گفت در مورد اثر حد آستانه SNR، می‌توان گفت با کاهش این آستانه، مقدار احتمال قطع کل کاهش می‌یابد و بالعکس ولی این امر تأثیر محسوسی در محل بهینه قرارگیری LEDها ندارد. تنها در حالتی که آستانه خیلی زیاد یا خیلی کم انتخاب شود، به شکلی که مقدار احتمال قطع در همه جا به ۱ یا ۰ برسد، محل بهینه یکتایی برای LED به دست نمی‌آید و نمودار احتمال قطع نسبت به محل LED دارای مقدار مینیمم نخواهد بود.

۶- مراجع

- [1] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, & C. Chen, "What is LiFi?," Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, 2015.
- [2] F. R. Gfeller & U. Bapst, "Wireless In-house Data Communication via Diffuse Infrared Radiation," Proceedings of the IEEE, vol. 67, no. 11, pp. 1474-1486, 1979.
- [3] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, & S. Rajbhandari, "Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®," Taylor & Francis, 2012. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=jpXGCN1qVQ4C>
- [4] Z. Wang, W.-D. Zhong, C. Yu, & J. Chen, "A Novel LED Arrangement to Reduce SNR Fluctuation for Multi-user in Visible Light Communication Systems," in 2011 8th International Conference on Information, Communications & Signal Processing. IEEE, pp. 1-4, 2011.
- [5] Z. Wang, C. Yu, W.-D. Zhong, J. Chen, & W. Chen, "Performance of A Novel LED Lamp Arrangement to Reduce SNR Fluctuation for Multi-user Visible Light Communication Systems," Optics Express, vol. 20, no. 4, pp. 4564-4573, 2012.
- [6] I. Stefan & H. Haas, "Analysis of Optimal Placement of LED Arrays for Visible Light Communication," in 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, pp. 1-5, 2013.
- [7] R. Sharma, A. C. Kumari, M. Aggarwal, & S. Ahuja, "Optimal LED Deployment for Mobile Indoor Visible Light Communication System: Performance Analysis," AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 83, pp. 427-432, 2018.

- Random Device Orientation,” in 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, pp. 1-6, 2019.
- [21] M. T. Dabiri & S. M. S. Sadough, “Optimal Placement of UAV-Assisted Free-Space Optical Communication Systems with DF Relaying,” IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 1, pp. 155-158, Jan. 2020.
- [19] Z. Ghassemlooy, L. Alves, S. Zvanovec, & M. Khalighi, “Visible Light Communications: Theory and Applications,” CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=ZgsqDwAAQBAJ>
- [20] M. A. Arfaoui, M. D. Soltani, I. Tavakkolnia, A. Ghayeb, C. Assi, H. Haas, & M. Safari, “SNR Statistics of Indoor Mobile VLC Users with