

Cơ chế lập lịch tài nguyên trong mạng truyền thông ánh sáng nhìn thấy sử dụng trạm phát đa chùm sáng

Trần Công Nam¹, Nguyễn Nam Hoàng¹ và Hoàng Trọng Minh²

¹Trường Đại học Công Nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

²Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

(trancongnam14@gmail.com, hoangnn@vnu.edu.vn, hoangtrongminh@ptit.edu.vn)

Tóm tắt - Công nghệ truyền thông bằng ánh sáng nhìn thấy VLC (Visible Light Communication) là một giải pháp công nghệ quang – vô tuyến tiên tiến để cung cấp các dịch vụ mạng không dây trong nhà. Yêu cầu cơ bản của hệ thống VLC là cung cấp truyền dẫn tốc độ cao và độ phủ sóng liên mạch. Để đáp ứng yêu cầu này, kiến trúc hệ thống VLC sử dụng trạm phát đa chùm sáng đã được đề xuất gần đây. Tuy nhiên, nâng cao hiệu năng hệ thống này vẫn đang là vấn đề mở đối với các nhà nghiên cứu và triển khai khi số lượng các điều kiện ràng buộc tăng lên. Vì vậy, trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một cơ chế lập lịch tài nguyên nhằm nâng cao hiệu năng hệ thống đa chùm sáng. Cơ chế lập lịch đề xuất bao gồm thuật toán lựa chọn chùm sáng truyền dữ liệu và thuật toán phân bổ tài nguyên kênh con cho người dùng nhằm giảm thiểu nhiễu đồng kênh CCI (Co-channel interference) và dẫn tới nâng cao hiệu năng hệ thống. Các kết quả mô phỏng trong nghiên cứu cho thấy sự cải thiện rõ rệt về tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm (SINR), thông lượng hệ thống và thông lượng người dùng.

Từ khóa - Truyền thông ánh sáng nhìn thấy, thiết kế hệ thống, trạm phát đa chùm sáng, lập lịch tài nguyên, nhiễu đồng kênh.

I. GIỚI THIỆU

Truyền thông bằng ánh sáng nhìn thấy VLC là công nghệ truyền thông sử dụng điốt phát quang điện năng thấp LED (Light Emitting Diode) để truyền thông dữ liệu. Đây được coi là một công nghệ bổ sung đầy hứa hẹn cho công nghệ tần số vô tuyến RF (Radio Frequency). Công nghệ VLC cung cấp nhiều tính năng ưu việt như sử dụng băng tần ánh sáng khả kiến (từ 400 THz đến 800 THz) rộng gấp 10 000 lần so với phổ RF, hiệu suất quang phổ khu vực cao, tiết kiệm năng lượng và không gây nhiễu điện từ với các thiết bị điện từ nhạy cảm tần số vô tuyến.

Trong thời gian gần đây, VLC được xem như một công nghệ mạng không dây tương lai trong nhà để đáp ứng nhu cầu truyền dữ liệu tốc độ cao cho người dùng. Để nâng cao chất lượng dịch vụ mạng khi đáp ứng nhu cầu đa truy cập của người dùng, hướng tiếp cận sử dụng cấu hình trạm phát tại điểm truy nhập AP (Access Point) có nhiều chùm sáng (multi-lightbeam) đã và đang được nghiên cứu phát triển trong thời gian gần đây [1-3]. Các đề xuất trên đã đem lại một số kết quả cụ thể. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm (SINR) của hệ thống VLC với bốn cấu hình trạm phát 1, 3, 7 và 19 chùm sáng đã được phân tích trong [1]. Trong [3], nhóm tác giả đã phân tích tính bảo mật ở lớp vật lý với các triển khai mạng khác nhau ứng với các cấu hình AP 1, 7 và 18 chùm sáng. Kết quả phân tích và mô phỏng cho thấy hệ

thống sử dụng cấu hình AP với càng nhiều chùm sáng thì tính bảo mật càng cao. Mặt khác, nhằm nâng cao hiệu suất quang phổ của hệ thống đa chùm sáng, các tác giả trong [2] đã cho thấy hiệu quả rõ rệt sử dụng phương pháp đa truy cập phân chia theo không gian thay vì đa truy nhập phân chia theo thời gian. Tuy nhiên, các đề xuất trên đây chưa đề cập tới vấn đề thiết kế cấu hình AP đa chùm sáng tối ưu với điều kiện đảm bảo không có vùng mù và giảm thiểu vùng chồng lấn.

Các AP trong hệ thống VLC thường được sử dụng chung tài nguyên băng tần để nâng cao hiệu quả quang phổ. Tuy nhiên, việc này gây ra nhiễu CCI cao cho người dùng trong vùng chồng lấn và làm giảm đáng kể SINR, dẫn đến tốc độ truyền dữ liệu bị suy giảm. Do đó, các giải pháp giảm thiểu nhiễu đồng kênh CCI được đặt ra như một mục tiêu then chốt trong thiết kế cấu hình. Trong [4], một phương pháp sử dụng quản lý nhiễu tự tổ chức dựa trên busrt bận để giảm thiểu CCI. Tuy nhiên, điều kiện thỏa hiệp giữa thông lượng người dùng và SINR luôn là một trở ngại lớn. Trong [8] đề xuất giải pháp truyền dẫn kết hợp đa điểm cho hệ thống VLC đa chùm sáng để giảm thiểu CCI và tăng SINR. Tuy nhiên, yêu cầu đồng bộ chính xác giữa các AP lân cận để hợp tác rất khó thực hiện trong thực tế. Thuật toán phân bổ chùm sáng để giảm thiểu nhiễu CCI được đề xuất trong [5]. Thuật toán đã cải thiện đáng kể SINR tuy nhiên chỉ có một chùm sáng có thể truyền dữ liệu tại một thời điểm. Điều này làm giảm hiệu suất của hệ thống với độ trễ gói tin cao và thông lượng thấp. Mặt khác, khi sử dụng cơ chế SDMA (Space Division Multiple Access) trong hệ thống VLC [11] nảy sinh việc tồn tại đồng thời hai loại nhiễu CCI trong hệ thống (nhiều nội ô và nhiễu liên ô). Điều này gây suy giảm đáng kể đến hiệu năng hệ thống và chất lượng người dùng. Theo như sự hiểu biết tốt nhất của chúng tôi, hiện tại chưa có nghiên cứu nào trình bày về phương pháp giải quyết giảm thiểu cả hai loại nhiễu này.

Trong bài báo này, hệ thống VLC truyền dẫn tốc độ cao sử dụng trạm phát đa chùm sáng được đề xuất trong đó cấu hình trạm phát đa chùm sáng được thiết kế tối ưu vùng chồng lấn và đảm bảo không có vùng mù [9]. Bài báo này sẽ trình bày cơ chế lập lịch tài nguyên để loại bỏ nhiễu CCI và nâng cao hiệu năng hệ thống và chất lượng người dùng.

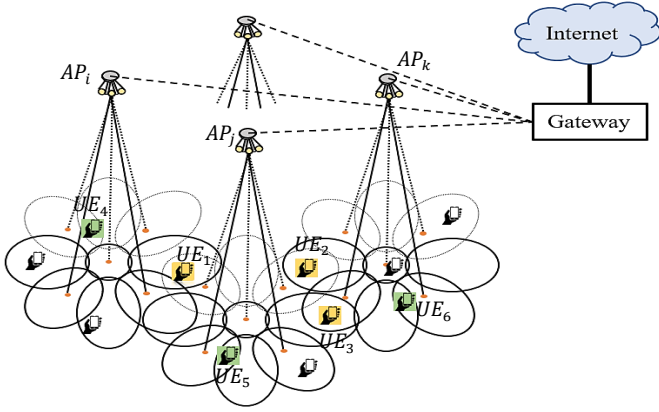
Bài báo được tổ chức như sau. Mô hình hệ thống và đề xuất cấu hình trạm phát đa chùm sáng và các cơ sở lý thuyết

liên quan sẽ được mô tả ở mục II. Cơ chế lập lịch tài nguyên đề xuất được trình bày chi tiết trong mục III. Trong mục IV, các kết quả mô phỏng được thể hiện và phân tích đánh giá. Cuối cùng, kết luận của bài báo được đưa ra trong mục V.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Một hệ thống VLC điển hình gồm nhiều ô (cell) phục vụ đa truy nhập người dùng được triển khai trong không gian kích thước $L \times W \times H$ (dài, rộng, cao) thể hiện trên hình 1. Các thành phần thiết bị chính của hệ thống bao gồm: gateway, các điểm truy cập AP và thiết bị người dùng UE (User Equipment). Trong đó, ứng với mỗi cell là một AP được thiết kế đa chùm sáng định hướng để cung cấp truyền thông tới người dùng bằng ánh sáng nhìn thấy. Các điểm truy nhập AP kết nối với internet thông qua một gateway.

Trong mô hình này, chúng tôi đề xuất sử dụng đa truy cập phân chia theo không gian SDMA kết hợp với đa truy cập phân chia theo tần số trực giao OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) cho đường xuống để đạt được đa truy cập và cung cấp truyền dẫn dữ liệu tốc độ cao.



Hình 1. Mô hình hệ thống VLC

A. Kênh đường xuống

Có hai loại đường truyền trong một hệ thống VLC gồm đường truyền thẳng LOS (Line of Sign) và đường truyền phản xạ NLOS (Non-Line of Sign). Với giả thiết sử dụng các chùm tia lightbeam có định hướng cao và góc bức xạ hẹp dẫn tới công suất nhận được từ đường NLOS nhỏ hơn rất nhiều so với LOS. Thêm vào đó, hoạt động tuần hoàn theo khung OFDM cho phép giảm tác động của nhiễu liên ký hiệu ISI (Inter Symbol Interferene) [4, 7]. Vì vậy, đặc trưng kênh quang đường xuống có thể xấp xỉ theo đường LOS như biểu diễn trên hình 2. Độ lợi kênh được tính toán như sau [6]:

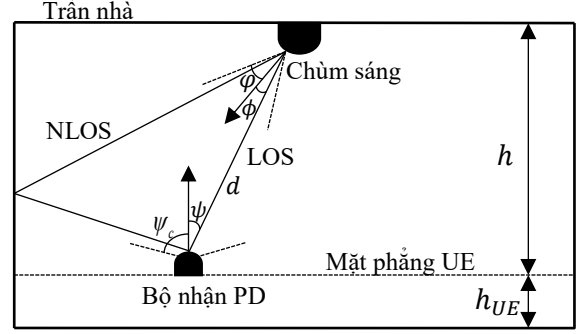
$$G = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (1)$$

Ở đây, A là diện tích vật lý của máy dò trong bộ photodetector (PD), d là khoảng cách giữa AP và PD; ψ là góc tới; ϕ là góc chiếu xạ; $T_s(\psi)$ là độ lợi của một bộ lọc quang học; $g(\psi)$ là độ lợi của bộ tập trung quang; m là đơn vị phát xạ Lambertian được cho bởi $-\ln(2)/\ln(\cos(\phi))$ với ϕ là góc nửa công suất của LED và ψ_c biểu thị góc nhìn của bộ nhận (FOV). Với n biểu thị chỉ số khúc xạ, bộ tập trung quang lý tưởng đạt được:

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

Với công suất quang truyền của mỗi beam trong AP là P_t , công suất quang trung bình nhận được ở PD được xác định như sau:

$$P_r = P_t \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad (3)$$



Hình 2. Mô hình kênh đường xuống

B. SDMA/OFDMA đường xuống

Giải pháp SDMA đã được đề xuất trong hệ thống VLC sử dụng trạm phát đa chùm sáng trong [2]. Tận dụng các đặc trưng chiếu sáng hạn chế của LED, các chùm ánh sáng định hướng với các vùng phủ sóng tách biệt có thể đồng thời phục vụ nhiều người sử dụng ở các vị trí khác nhau với cùng tài nguyên băng tần.

Trong hệ thống VLC đa chùm sáng, số lượng người dùng UE được phục vụ ở mỗi beam bị giới hạn bởi vùng phủ của mỗi tia. Trong nghiên cứu trước [5], khi mô hình hệ thống VLC chỉ cho phép mỗi thời điểm chỉ có một beam trong AP được truyền dữ liệu đã dẫn đến hiệu năng hệ thống chưa hiệu quả về mặt thông lượng và độ trễ gói tin. Vì vậy, trong bài báo này, chúng tôi đề xuất hệ thống VLC sử dụng giải pháp kết hợp SDMA/OFDMA cho đường xuống, mỗi AP sẽ có nhiều khối thành phần OFDMA ($N_t \geq 1$) và mỗi thành phần sẽ tương ứng là một đường truyền trong SDMA. Một cụm truyền dẫn TC (Transmission Cluster) được định nghĩa là một nhóm chùm sáng vật lý trong AP có thể truyền cùng một tín hiệu. Các người dùng được phục vụ bởi một TC sẽ được cấp phát kênh con bởi một khối thành phần OFDMA trong AP.

Với cơ chế OFDMA, băng tần của mỗi thành phần OFDMA được chia thành các sóng mang con N_{sc} . Các sóng mang con cạnh nhau được nhóm lại thành các khối được gọi là các đơn vị tài nguyên kênh con RU (Resource Unit) [4]. Một RU được biểu thị (k, n) trong đó k là chỉ số tần số và n là chỉ số thời gian. Mỗi AP có N_t khối thành phần OFDMA và dải băng tần của các thành phần này là giống nhau. Vì vậy, tài nguyên được tái sử dụng không chỉ giữa các AP mà còn trong chính mỗi AP. Giả sử rằng, mỗi thành phần của AP có một tập đơn vị tài nguyên (RU_S) như sau:

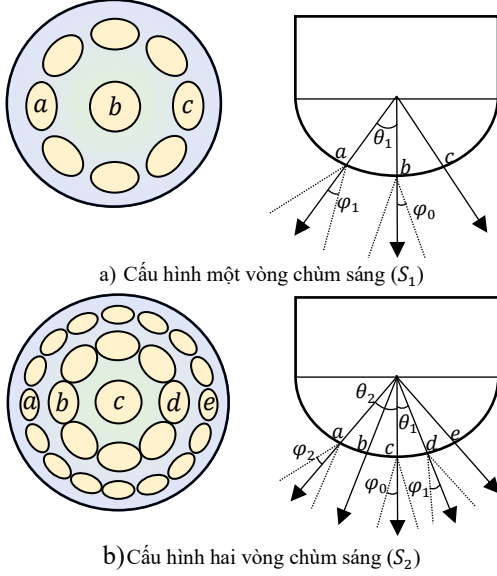
$$RU_S = \{RU_x\} \quad (4)$$

Ở đây, $x \in \{1, \dots, N_{ru}\}$, N_{ru} là số RU của mỗi thành phần OFDMA.

C. Thiết kế cấu hình trạm phát đa chùm sáng

Để phục vụ vùng phủ lớn, hệ thống VLC được triển khai qua cấu hình nhiều điểm truy cập trên mặt phẳng phát. Nhằm đảm bảo hai yêu cầu cơ bản của một hệ thống VLC gồm kết nối liên tục và không điểm mù (blink spots), thiết kế vùng phủ trên mặt phẳng người dùng phải đáp ứng hai ràng buộc như sau:

- Không có vùng mù giữa các vùng phủ của các chùm sáng trong AP;
- Không có vùng mù giữa các vùng phủ ở các AP với nhau.

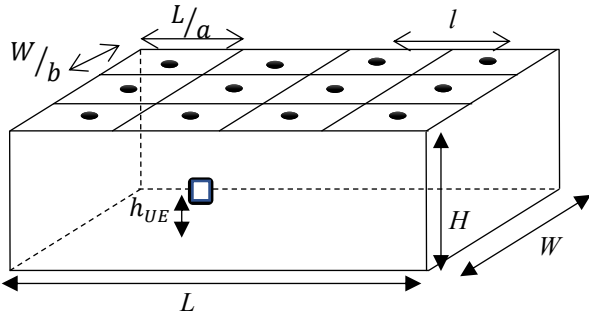


Hình 3. Thiết kế cấu hình trạm phát đa chùm sáng

Trong nghiên cứu này, hai thiết kế cấu hình trạm phát được đề xuất để giảm thiểu vùng chồng lấn trong khi vẫn đảm bảo không có vùng mù đó là cấu hình một vòng chùm sáng (S_1) và cấu hình hai vòng chùm sáng (S_2) như thể hiện trên hình 3. Cơ sở xây dựng và tính toán thiết kế cấu hình trạm phát đã được trình bày chi tiết trong [9]. Các thông số thiết kế của hai cấu hình S_1 và S_2 được thể hiện qua bảng 1.

BẢNG 1 THÔNG SỐ CẤU HÌNH S_1 VÀ S_2

Các thông số	S_1	S_2
Số lượng chùm sáng	9	25
Góc nửa công suất của chùm sáng	$\varphi_0 = \varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_0 = \varphi_1 = 15^\circ$, $\varphi_2 = 10^\circ$
Góc định hướng của chùm sáng	$\theta_1 = 37,17^\circ$	$\theta_1 = 29,36^\circ$, $\theta_2 = 47,92^\circ$



Hình 4. Triển khai lưới quang học trong mạng VLC

Tại mặt phẳng phát, các AP được triển khai theo dạng lưới trong không gian ($L \times W \times H$ m) (dài, rộng, cao) như

thể hiện trên hình 4. Để tiện tính toán, chiều dài và chiều rộng của trần nhà được chia thành a phần và b phần bằng nhau. Với l là khoảng cách giữa hai AP, điều kiện để đảm bảo rằng không có vùng mù giữa các AP đã đề xuất được đưa ra như sau:

$$\{S_1\}: \begin{cases} \frac{L}{2 \times a} \leq 2,2h \\ \frac{W}{2 \times b} \leq 2,2h \end{cases} \quad \text{và} \quad \{S_2\}: \begin{cases} \frac{L}{2 \times a} \leq 2,14h \\ \frac{W}{2 \times b} \leq 2,14h \end{cases} \quad (5)$$

III. CƠ CHẾ LẬP LỊCH TÀI NGUYÊN

Như đã thảo luận trong mục trước, việc phân hoạch thành cụm phát TC cho phép cải thiện hiệu quả sử dụng kênh, do đó cải thiện hiệu năng hệ thống. Tuy nhiên, ta cần có một cơ chế lập lịch tài nguyên hiệu quả để các chùm sáng không gây nhiễu.

A. Nhiễu đồng kênh CCI

Để thuận tiện trong truyền thông dữ liệu tới người dùng, các trạm phát AP trong hệ thống VLC sử dụng chung một tài nguyên băng tần. Có hai hiện tượng nhiễu xảy ra khi tất cả cùng sử dụng chung băng tần: nhiễu giữa các ô trong hệ thống gọi là nhiễu liên ô (inter-cell interference ICI); mỗi AP có N_t thành phần cùng sử dụng chung băng tần sẽ gây ra nhiễu nội ô (intra-cell interference). Như trên hình 1, UE_1 , UE_2 và UE_3 đang bị ảnh hưởng ICI do nằm trong vùng chồng lấn giữa các AP; UE_4 , UE_5 và UE_6 đang bị ảnh hưởng nhiễu nội ô do nằm trong vùng chồng lấn giữa các chùm sáng trong cùng một AP.

Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm SINR là một thông số thông dụng để đánh giá chất lượng tín hiệu của thiết bị người dùng. SINR $\xi_k(u)$ tại UE u trên sóng mạng con k được tính như sau:

$$\xi_k(u) = \frac{\sum_m (P_{otp,k} R_{pd} G_{u,m,i})^2 F_{OE}}{\sum_{m'} (P_{otp,k} R_{pd} G_{u,m',i})^2 F_{OE} + \sum_j \sum_n (P_{otp,k} R_{pd} G_{u,n,j})^2 F_{OE} + N} \quad (6)$$

Ở đây, $P_{otp,k}$ là công suất quang học của chùm sáng sử dụng trên sóng mang con thứ k ; $\sum_m (P_{otp,k} R_{pd} G_{u,m,i})^2 F_{OE}$ là cường độ tín hiệu nhận được bởi TC đang phục vụ u ; m là chỉ số chùm sáng của các chùm sáng trong TC đang phục vụ u ; $G_{u,m,i}$ là độ lợi kênh DC từ chùm sáng m của AP_i đến u ; $\sum_{m'} (P_{otp,k} R_{pd} G_{u,m',i})^2 F_{OE}$ là tổng công suất quang của nhiễu nội ô, $\sum_j \sum_n (P_{otp,k} R_{pd} G_{u,n,j})^2 F_{OE}$ là tổng công suất quang của nhiễu liên ô; m' là chỉ số chùm sáng của các chùm sáng được truyền dữ liệu trong AP_i không thuộc TC chứa u ; j là chỉ số AP lân cận gây nhiễu lên u ; n là chỉ số các chùm sáng được truyền dữ liệu trong các AP lân cận; R_{pd} là độ nhạy của PD; F_{OE} là hệ số chuyển đổi quang điện và N là công suất ồn trên mỗi sóng mang con; Công suất nhiễu nền được xác định như sau [4]:

$$N = 2qI_{bg}B_{sc} + \frac{4K_B T B_{sc}}{R_F} \quad (7)$$

Ở đây, I_{bg} là cường độ dòng điện do ánh sáng nền; B_{sc} là băng thông của một sóng mang con; $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C; K_B là hằng số Boltzmann; T biểu thị nhiệt độ tuyệt đối; R_F là điện trở phản hồi của bộ khuếch đại (TIA).

B. Cơ chế lập lịch tài nguyên

Để giảm thiểu nhiễu, một cơ chế lập lịch tài nguyên sử dụng thông tin về CCI và các thông tin có sẵn (độ dài hàng đợi và thông lượng trung bình) được đề xuất. Đầu tiên, gateway sẽ lựa chọn các chùm sáng vào các TC của AP dựa vào việc áp dụng thuật toán lựa chọn chùm sáng để chọn các chùm sáng không bị CCI dựa vào ma trận chùm sáng. Sau khi gateway hoàn thành việc lựa chọn chùm sáng, gateway sẽ gửi thông tin về các TC đến AP. Tại thời điểm đó, AP phân bổ kênh con cho các UE của mỗi TC theo thuật toán phân bổ tài nguyên kênh con. Cơ chế lập lịch tài nguyên đề xuất hướng tới hai mục tiêu sau:

- Loại bỏ nhiễu đồng kênh CCI nội ô và liên ô;
- Cải thiện hiệu năng hệ thống thông qua tăng thông lượng và giảm trễ gói tin.

1) Cập nhật ma trận quản lý nhiễu của các chùm sáng

Tập hợp các AP trong phòng được mô tả như sau:

$$AP_S = \{AP_{i,j}\}, i \in \{1, \dots, b\}, j \in \{1, \dots, a\} \quad (8)$$

Mỗi $AP_{i,j}$ có N_b chùm sáng với một chùm sáng trung tâm và các chùm sáng ở các vòng ngoài được mô tả như sau:

$$\text{Beams} = \{b_x^{i,j}\} x \in \{1, \dots, N_b\} \quad (9)$$

Chúng tôi đề xuất sử dụng ma trận nhiễu của các chùm sáng (M_{CCI}) để hỗ trợ việc quản lý nhiễu. Ma trận này được thực hiện tại gateway, trong đó gateway cập nhật thông tin về cường độ tín hiệu thu RSS (Received Signal Strength) của toàn bộ người dùng. Dựa vào thông tin RSS thu được, gateway xác định được sự ảnh hưởng CCI giữa các chùm sáng với nhau. Sự ảnh hưởng CCI của chùm sáng $b_x^{i,j}$ lên chùm sáng $b_y^{i',j'}$ được thể hiện qua chỉ số CCI $\alpha_{b_x^{i,j}, b_y^{i',j'}}$, chỉ số CCI được xác định như sau:

$$\alpha_{b_x^{i,j}, b_y^{i',j'}} = \begin{cases} 1 & \text{Có UE nhận RSS của cả } b_x^{i,j} \text{ và } b_y^{i',j'} \\ 0 & \text{Không có UE nhận RSS của cả } b_x^{i,j} \text{ và } b_y^{i',j'} \end{cases} \quad (10)$$

Thuật toán lựa chọn chùm sáng của cơ chế lập lịch đề xuất sẽ sử dụng chỉ số CCI này để thực hiện loại bỏ nhiễu đồng kênh CCI nhằm cải thiện SINR. Ta có ma trận nhiễu CCI của toàn hệ thống được xác định như sau:

$$M_{CCI} = \begin{bmatrix} \alpha_{b_1^{1,1}, b_1^{1,1}} & \alpha_{b_1^{1,1}, b_2^{1,1}} & \dots & \alpha_{b_1^{1,1}, b_{N_b}^{a,b}} \\ \alpha_{b_2^{1,1}, b_1^{1,1}} & \alpha_{b_2^{1,1}, b_2^{1,1}} & \dots & \alpha_{b_2^{1,1}, b_{N_b}^{a,b}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{b_{N_b}^{a,b}, b_1^{1,1}} & \alpha_{b_{N_b}^{a,b}, b_2^{1,1}} & \dots & \alpha_{b_{N_b}^{a,b}, b_{N_b}^{a,b}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Đường chéo chính của ma trận nhiễu này bằng không, do chùm sáng không thể gây nhiễu CCI lên chính nó. Rõ ràng ta thấy, khi hệ thống lắp đặt càng nhiều AP thì kích thước ma trận càng lớn và dẫn tới độ phức tạp tính toán tăng. Để tránh điều này, chúng tôi đề xuất thuật toán quản lý nhiễu như dưới đây.

2) Thuật toán lựa chọn chùm sáng truyền dẫn

Thuật toán này thực hiện việc lựa chọn các chùm sáng vào các TC của tất cả các AP trong hệ thống. Khi thực hiện thuật toán, gateway định nghĩa một active-beam là chùm sáng có dữ liệu để truyền. Gateway sẽ duy trì một danh sách tất cả các active-beam trong hệ thống ($list_of_activeBeams$). Gateway thực hiện lựa chọn chùm sáng có trọng số độ ưu tiên cao vào các TC. Trong khi đó, các chùm sáng có trọng số độ ưu tiên thấp và có nguy cơ gây ra CCI đến các UE ở các chùm sáng đã được chọn trước đó sẽ không được lựa chọn. Các chùm sáng không được chọn sẽ chỉ thực hiện chiếu sáng thông thường. Bằng cách này, các khu vực bị CCI đã được tách rời thông qua việc ngừng truyền dữ liệu ở các chùm sáng gây CCI. Các quá trình thực hiện thuật toán như sau:

Thủ tục 1: Thủ tục này thực hiện tạo và sắp xếp danh sách của tất cả active-beam trong toàn hệ thống ($list_of_activeBeams$). Gateway lấy các active-beam lần lượt theo từng AP trong ma trận AP vào danh sách. Gateway sắp xếp $list_of_activeBeams$ theo trọng số độ ưu tiên của chùm sáng được xác định theo công thức sau:

$$W_{b_{x,y}^{i,j}} = \frac{\delta_{b_{x,y}^{i,j}}}{\delta'_{b_{x,y}^{i,j}}} \times Q_{b_{x,y}^{i,j}} \quad (12)$$

Trong đó, $\delta_{b_{x,y}^{i,j}}$ là thông lượng yêu cầu cần đạt được của chùm sáng, bằng tổng thông lượng yêu cầu của các UE trong $b_{x,y}^{i,j}$; $\delta'_{b_{x,y}^{i,j}}$ là thông lượng đạt được hiện tại của chùm sáng, bằng tổng thông lượng hiện tại của các UE trong $b_{x,y}^{i,j}$. $Q_{b_{x,y}^{i,j}}$ là tổng số gói tin trên hàng đợi của tất cả các UE trong $b_{x,y}^{i,j}$.

Thủ tục 2: Thủ tục này thực hiện lựa chọn các active-beam vào trong các TC của các AP, đồng thời loại bỏ nhiễu CCI trong hệ thống. Các active-beam được lựa chọn vào các TC sẽ trở thành các transmission-beam (transmission-beam là các chùm sáng được truyền dữ liệu ở khung thời gian tiếp theo).

Bước 1: Lựa chọn một active-beam có trọng số độ ưu tiên cao nhất vào một TC và đồng thời đảm bảo beam đang xét không gây nhiễu nội ô.

- Gateway xem xét chùm sáng đầu tiên trong $list_of_activeBeams$. Giả sử rằng chùm sáng đầu tiên đó là beam $b_{x,y}^{i,j}$ của điểm truy cập $AP_{i,j}$. Xóa $b_{x,y}^{i,j}$ ra khỏi danh sách $list_of_activeBeams$.
- Kiểm tra sự ảnh hưởng CCI của $b_{x,y}^{i,j}$ đến các TC trong $AP_{i,j}$ dựa trên ma trận M_{CCI} . Giả sử K là số TC bị ảnh hưởng nhiều khi beam $b_{x,y}^{i,j}$ được lựa chọn để truyền dữ liệu.
 - Nếu $K > 1$ thì $b_{x,y}^{i,j}$ không được chọn vào bất kỳ TC nào của $AP_{i,j}$.
 - Nếu $K = 1$ và TC bị ảnh hưởng CCI là TC_x thì kiểm tra số chùm sáng đã có trong TC_x (giả sử số chùm sáng trong TC_x là z). Nếu $z < M$ thì $b_{x,y}^{i,j}$ được chọn vào TC_x .
 - Nếu $K = 0$ thì $b_{x,y}^{i,j}$ được lựa chọn vào TC_y . TC_y là TC mà có số lượng gói tin trên hàng đợi là ít nhất và số transmission-beam trong TC đó phải nhỏ hơn M .

Với việc chùm sáng $b_{x,y}^{i,j}$ không được lựa chọn nếu $K > 1$ và việc $b_{x,y}^{i,j}$ được lựa chọn vào TC_x trong trường hợp $K = 1$, hệ thống đã loại bỏ hoàn toàn được nhiễu nội ô. Với $K = 0$, $b_{x,y}^{i,j}$ được lựa chọn vào TC có số lượng gói tin trên hàng đợi ít nhất. Việc đề xuất số lượng chùm sáng trong mỗi TC là không vượt quá M giúp cho việc lựa chọn các chùm sáng truyền giữa các AP trở nên công bằng hơn.

Bước 2: Bước này thực hiện xem xét loại bỏ nhiễu liên ô ICI trong hệ thống.

- Nếu chùm sáng $b_{x,y}^{i,j}$ được lựa chọn vào một TC, gateway sẽ xóa tất cả các chùm sáng đang ảnh hưởng ICI đến $b_{x,y}^{i,j}$ của các AP lân cận ra khỏi *list_of_activeBeams*. Việc xác định các chùm sáng đó dựa trên ma trận chùm sáng nhiễu M_{CCI} .
- Gateway kiểm tra *List_of_activeBeams*. Nếu danh sách đã trống thì kết thúc chương trình. Ngược lại, nếu danh sách vẫn còn chùm sáng thì quay lại bước 1.

Khi một chùm sáng được lựa chọn để trở thành transmission-beam, các chùm sáng của AP lân cận mà gây ICI với chùm sáng được chọn sẽ được loại bỏ khỏi *list_of_activeBeams*. Các chùm sáng đã xóa sẽ không được xem xét để truyền dữ liệu ở khung thời gian tiếp theo. Kết quả là, thuật toán đề xuất loại bỏ hoàn toàn nhiễu ICI trong hệ thống.

3) Thuật toán phân bổ tài nguyên kênh con

Khi AP nhận được thông tin về các chùm sáng trong các TC của nó, quá trình phân bổ các RU tới các UE được thực hiện. AP có N_t thành phần-OFDMA và tại mỗi thành phần có K RU (ở đây 1 RU là 1 kênh con). Thuật toán được mô tả như sau:

Thủ tục 1: Thủ tục này thực hiện tạo danh sách các UE đang được phục vụ bởi các chùm sáng trong TC (*list_of_UE*). Thực hiện tính toán trọng số độ ưu tiên W_{u_i} của UE theo công thức dưới đây:

$$W_{u_i} = \frac{\delta_{u_i}}{\delta'_{u_i}} \times Q_{u_i} \quad (13)$$

Ở đây, δ_{u_i} là thông lượng yêu cầu tối thiểu của UE u_i ; δ'_{u_i} là thông lượng trung bình hiện tại được tính trong một khoảng thời gian T_c ; Q_{u_i} là số gói tin trên hàng đợi của u_i .

Thủ tục 2: Thủ tục này thực hiện cấp phát RU cho các UE.

Bước 1: Sắp xếp *list_of_UE* theo trọng số độ ưu tiên của UE.

Bước 2: Xem xét UE đầu tiên (giả sử là u_x) trong *list_of_UE*. UE đầu tiên trong danh sách là UE có độ ưu tiên cao nhất, điều này giúp hệ thống luôn lựa chọn được nhưng UE có độ ưu tiên cao để được truyền dữ liệu.

- Cấp phát một RU cho u_x .
- Cập nhật lại Q_{u_x} ; nếu $Q_{u_x} = 0$ thì xóa u_x ra khỏi *list_of_UE*.
- Cập nhật lại thông lượng trung bình của u_x như sau:

$$\delta'_{u_i}(n) = \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \delta'_{u_i}(n-1) + \frac{1}{T_c} R_n \quad (13)$$

Ở đây, R_n là lượng dữ liệu được phân bổ trên một RU, T_c là khung thời gian ($T_c = 1000$). $\delta'_{u_i}(n-1)$ là thông lượng trung bình trong quá khứ.

- Cập nhật trọng số độ ưu tiên W_{u_x} cho u_x .

Bước 3: Nếu *list_of_UE* rỗng hoặc đã cấp phát hết N_{ru} RU của thành phần thì kết thúc chương trình. Ngược lại, quay về bước 1.

IV. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

Nhằm kiểm chứng đề xuất, các tham số đầu vào mô phỏng được xác định như sau. Hệ thống VLC phục vụ cho một không gian (16 m×16 m×3 m). Chiều cao của UE so với sàn nhà là $h_{UE} = 1$ m. Góc FOV của UE hướng lên trần nhà và vuông góc với mặt phẳng sàn. Các UE được phân bố đều trong diện tích mô phỏng. Kết nối mới được tạo ra thông qua quá trình Poisson với tốc độ đến trung bình 4 kết nối/ phút với thời gian kết nối theo phân phối mũ trung bình là 180 giây.

Hệ thống VLC đa chùm sáng được mô phỏng trên hai cấu hình S_1 và S_2 . Để đảm bảo không có khu vực mù trong hệ thống, dựa vào công thức (5), chúng tôi xác định được cần ít nhất 4×4 AP được lắp đặt trong căn phòng. Các thông số mô phỏng được trình bày trong Bảng 1.

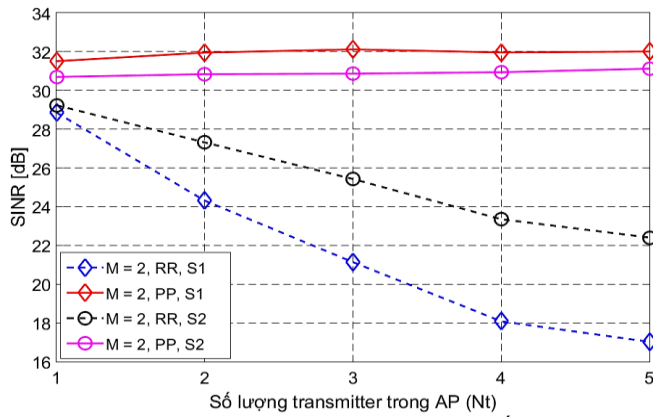
BẢNG 2 THÔNG SỐ MÔ PHỎNG

Các thông số mô phỏng	Ký hiệu	Giá trị
Thời gian mô phỏng	T	3600 (giây)
Thời gian của một khe	T_s	0,001 (giây)
Thời gian khung truyền	T_F	4 (khe thời gian)
Công suất quang của AP	P_{AP}	34 (W)
Diện tích vật lý của bộ nhận PD	A	1,5 (cm ²)
Góc nhìn của bộ nhận PD	ψ_C	70°
Dòng điện đo ánh sáng nền	I_{bg}	5100 (μA)
Điện trở phản kháng của TIA	R_F	6 (kΩ)
Hệ số chuyển đổi quang thành điện	F_{OE}	1/9
Băng thông của một thành phần OFDMA	B	20 (MHz)
SINR yêu cầu tối thiểu của điều chế 64-QAM OFDM	ξ	16,6 (dB) [4]
Số RUs trong mỗi thành phần OFDMA	N_{RU}	10 (RUs)
Kích thước gói	p	10,8 (Kb)

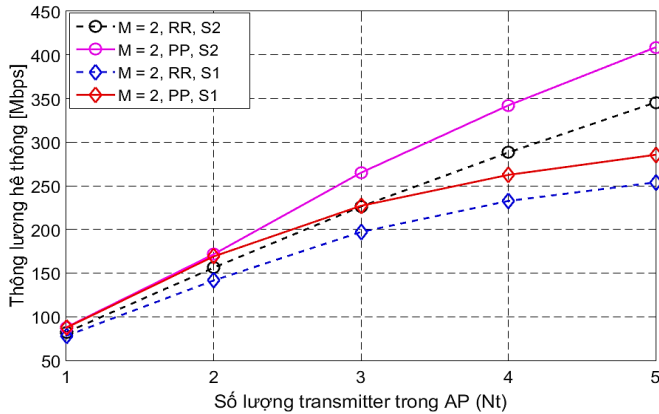
Trong nghiên cứu này, cơ chế đề xuất được đánh giá và so sánh với cơ chế tuần tự (Roundrobin-RR) [5]. Cơ chế RR cũng được thực hiện thông qua hai quy trình: lựa chọn chùm sáng truyền dẫn và phân bổ kênh con cho các UE. Tuy nhiên, cơ chế thông thường này được thực hiện mà không xem xét đến tác động về CCI, độ trễ gói tin và thông lượng đường xuống.

Hình 5 biểu diễn SINR trung bình tại bộ nhận của các UE. Trong tất cả các trường hợp về số lượng thành phần OFDMA (N_t từ 1 đến 5 và $M=2$), cơ chế đề xuất luôn đạt được SINR lớn hơn 30 dB. Trong khi đó, với cơ chế RR, SINR bị giảm sâu do tác động của CCI cao: chỉ đạt 17 dB tại $N_t = 5$ của cấu hình S_1 , 22,4 dB tại $N_t = 5$ của cấu hình S_2 . Do đã loại bỏ hoàn toàn nhiễu nội ô và nhiễu liên ô trong hệ thống, kết quả trong hình 5 đã thể hiện sự cải thiện rất nhiều về SINR của cơ chế đề xuất so với cơ chế RR trước đó. Số lượng chùm sáng ở cấu hình S_2 lớn hơn nhiều so với S_1 và vùng phủ sóng của mỗi chùm sáng tại S_2 cũng nhỏ hơn S_1 . Điều này làm giảm tác động CCI khi sử dụng cấu hình S_2 so với S_1 khi sử dụng cơ chế RR, dẫn đến SINR ở S_2 cao hơn so với S_1 khi cùng sử dụng cơ chế RR.

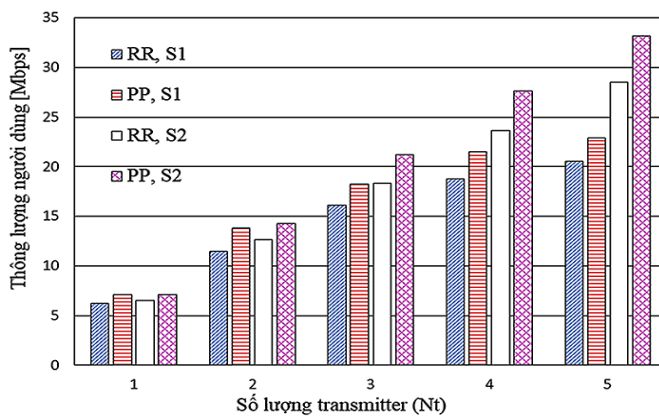
Thông lượng hệ thống đạt được ở các hệ thống VLC sử dụng các cơ chế khác nhau được đưa ra trong hình 6. Kết quả cho thấy sự cải thiện lên đến 14,4% ở S_1 và 14,2% ở S_2 của cơ chế đề xuất khi được so sánh với cơ chế RR. Với $N_t = 1$ và 2, thông lượng đạt được ở hai thiết kế cấu hình là sấp xỉ nhau, do đó với trường hợp này hệ thống VLC nên được triển khai với cấu hình S_1 để giảm chi phí và độ phức tạp tính toán. Tuy nhiên, khi $N_t > 2$, hệ thống VLC sử dụng cấu hình S_2 đạt thông lượng hệ thống vượt trội so với hệ thống sử dụng S_1 . Tại $N_t = 5$, thông lượng hệ thống với cơ chế đề xuất đạt được 408,61Mbps ở S_2 , trong khi đó hệ thống khi sử dụng S_1 chỉ đạt được 285,55 Mbps. Cho thấy sự cải thiện lên đến 43% ở $N_t = 5$ của hệ thống sử dụng S_2 so với S_1 .



Hình 5 SINR trung bình với N_t từ 1 đến 5



Hình 6 Thông lượng hệ thống với N_t từ 1 đến 5



Hình 7 Thông lượng người dùng với N_t từ 1 đến 5

Hình 7 cho thấy sự cải thiện lên đến 14,8% ở S_1 và 14,1% ở S_2 của cơ chế đề xuất so với cơ chế RR khi xem xét về

thông lượng người dùng. Với hệ thống sử dụng S_2 và cơ chế đề xuất, thông lượng người dùng ở $N_t = 5$ đạt 33,2Mbps gấp 4,66 lần so với $N_t = 1$ là 7,1 Mbps. Từ đó thấy được sự vượt trội về tốc độ truyền dữ liệu của hệ thống VLC SDMA/OFDMA đa chùm sáng khi so sánh với một hệ thống VLC đơn chùm sáng thông thường khi mà hệ thống đó chỉ có một thành phần OFDMA trong AP. Bằng việc loại bỏ hoàn toàn được CCI giúp nâng cao SINR, bên cạnh đó cơ chế luân lựa chọn các chùm sáng có độ ưu tiên cao để truyền dữ liệu và phân bổ RU cho các UE có độ ưu tiên cao. Do đó, Cơ chế đề xuất đã đạt được hiệu quả tốt hơn nhiều so với cơ chế RR.

V. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất một cơ chế lập lịch tài nguyên mới gồm thuật toán lựa chọn chùm và thuật toán phân bổ kênh con. Nghiên cứu đã đánh giá được cơ chế đề xuất khi so sánh với cơ chế tuần tự trước đó thông qua các thông số về SINR và thông lượng đường xuống. Bằng việc lựa chọn các chùm sáng truyền dẫn và phân bổ kênh con cho người dùng theo độ ưu tiên có sử dụng các thông tin về tổng số gói tin trên hàng đợi, thông lượng trung bình và thông tin về CCI. Qua phân tích và mô phỏng kiểm chứng cho thấy, thuật toán lập lịch đề xuất đã loại bỏ hoàn toàn nhiễu đồng kênh CCI nội ô và liên ô. Đồng thời, thuật toán đề xuất cho thấy sự cải thiện thông lượng rõ rệt so với cơ chế lập lịch Round-robin trong hệ thống VLC đa chùm sáng.

LỜI CẢM ƠN

Công trình này được hỗ trợ bởi Đại học Quốc gia Hà Nội, thông qua Đề tài QG.18.35 "Nghiên cứu giải pháp loại bỏ nhiễu, nâng cao hiệu năng mạng và phát triển phần mềm mô phỏng mạng truyền thông ánh sáng nhìn thấy sử dụng các chùm sáng định hướng".

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. S. Eroglu, A. Sahin, I. Guvenc, N. Pala, and M. Yuksel, "MultiElement Transmitter Design and Performance Evaluation for Visible Light Communication," in 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
- [2] Z. Chen, D. A. Basnayaka, and H. Haas, "Space division multiple access for optical attocell network using angle diversity transmitters," Journal of Lightwave Technology, vol. 35, no. 11, Jun. 2017, pp. 2118–2131.
- [3] L. Yin and H. Haas, "Physical-Layer Security in Multiuser Visible Light Communication Networks," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, no. 1, Jan. 2018, pp. 162-174.
- [4] B. Ghimire and H. Haas, "Self-organising interference coordination in optical wireless networks," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 1, no. 131, Apr. 2012, pp. 1–15.
- [5] Duc-Quan Nguyen, Ngoc-Tan Nguyen, and Nam-Hoang Nguyen, "Light Beam Allocation Algorithm for Eliminating Interference in Visible Light Communications," in International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Oct. 2016, pp. 419-425.
- [6] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lightings," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, Feb. 2004, pp. 100–107.
- [7] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor Broadcasting via White LEDs and OFDM," IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 55, no. 3, Aug. 2009, pp. 1127–1134.
- [8] C. Chen, D. Tsonev, and H. Haas, "Joint transmission in indoor visible light communication downlink cellular networks," in IEEE GLOBECOM Workshops 2013, Dec. 2013, pp. 1127–1132.
- [9] Trần Công Nam, "Thiết kế cấu hình và phân bổ tài nguyên trong mạng truyền thông ánh sáng nhìn thấy sử dụng trạm phát đa chùm sáng," Đại học Công Nghệ, ĐHQGHN, 2018.