



DOI:10.22144/jvn.2017.007

MÔ PHỎNG KÊNH TRUYỀN CHO TRUYỀN THÔNG MIMO QUANG KHÔNG DÂY

Phan Cẩm Thảo, Đặng Lê Khoa, Nguyễn Minh Trí, Nguyễn Thanh Tú, Lê Hữu Phúc và Nguyễn Hữu Phương

Khoa Điện tử - Viễn thông, Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TP. HCM

Thông tin chung:

Ngày nhận: 18/08/2016

Ngày chấp nhận: 28/04/2017

Title:

Channel simulation of optical wireless MIMO communications

Từ khóa:

Internet của vật, LiFi, mô hình kênh truyền, quang không dây, thế hệ thứ 5

Keywords:

5th generation, channel model, Internet of Things LiFi, optical wireless

ABSTRACT

Optical wireless communication is a potential candidate for 5th generation wireless communication systems (5G). The technology is orientated towards a commercial product called LiFi. This is technology for high-speed transmission and is especially effective in applications of Internet of Things (IoT). In order to evaluate the transmission quality of optical wireless systems, the wireless optical channel needs to be simulated through mathematical equations. The popular simulation methods of optical channel nowadays need to take many operations, particularly in the multiple-input and multiple-output (MIMO). In this paper, the response of the MIMO optical wireless communication and methods to reduce the number of operations in determining response of MIMO optical wireless channel were studied. Analysis results show that this method was reduced four times the complexity in 2x2 MIMO antenna configuration with reflection factor of 2.

TÓM TẮT

Truyền thông quang không dây là một ứng viên tiềm năng cho mạng truyền thông không dây thế hệ thứ 5 (5G). Công nghệ này đang hướng tới sản phẩm thương mại mang tên LiFi. Đây là công nghệ truyền dẫn tốc độ cao và đặc biệt hiệu quả trong các ứng dụng Internet của vật (IoT). Để đánh giá chất lượng truyền dẫn trong hệ thống quang không dây, kênh truyền quang không dây cần được mô phỏng thông qua các phương trình toán học. Các phương pháp mô phỏng kênh truyền quang phổ biến hiện nay cần thực hiện nhiều phép tính toán, đặc biệt trong hệ thống nhiều anten phát nhiều anten thu (MIMO). Trong bài báo này, chúng tôi sẽ nghiên cứu về đáp ứng của kênh truyền MIMO quang không dây và phương pháp nhằm giảm số phép tính toán khi xác định đáp ứng kênh truyền MIMO quang không dây. Kết quả phân tích cho thấy phương pháp này đã giảm được số phép tính toán 4 lần trong cấu hình MIMO 2x2 với bậc phản xạ là 2.

Trích dẫn: Phan Cẩm Thảo, Đặng Lê Khoa, Nguyễn Minh Trí, Nguyễn Thanh Tú, Lê Hữu Phúc và Nguyễn Hữu Phương, 2017. Mô phỏng kênh truyền cho truyền thông MIMO quang không dây. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ. 49a: 47-55.

1 GIỚI THIỆU

Truyền thông quang không dây (OWC) là một ứng viên tiềm năng cho truyền dẫn không dây trong nhà. Kỹ thuật này sử dụng sóng ánh sáng để

truyền dẫn thông tin thay cho sóng điện từ đã hạn chế về băng thông. Do sóng ánh sáng không thể xuyên qua các vật cản nên sẽ không gây can nhiễu với các hệ thống khác và bảo mật cao. Hệ thống OWC có các ưu điểm như thiết lập nhanh, tốc độ

$$h_{TR}^0(t) = \frac{\cos(\varphi_{TR})\cos(\theta_{TR})A_R}{\pi R_{TR}^2} \delta\left(t - \frac{R_{TR}}{c}\right), \quad (2)$$

trong đó φ_{TR} là góc phát và θ_{TR} là góc thu, A_R là diện tích đầu thu, R_{TR} là khoảng cách giữa T và R, và c là tốc độ của ánh sáng. Đáp ứng sau một lần phản xạ khỏi một thành phần i có được bằng cách xem i như một máy thu nên cần N phép tính, và sau đó i là một nguồn nên cần N phép tính. Khi chia thành N bề mặt phản xạ thì đáp ứng 1 lần phản xạ cần $2N$ phép tính. Đáp ứng xung 1 lần phản xạ được cho bởi công thức (3)

$$h_{TR}^1(t) = \frac{\cos(\varphi_{Ti})\cos(\theta_{Ti})A_i}{\pi R_{Ti}^2} \times \frac{\rho_i \cos(\varphi_{iR})\cos(\theta_{iR})A_R}{\pi R_{iR}^2} \times \delta\left(t - \frac{R_{Ti} + R_{iR}}{c}\right), \quad (3)$$

trong đó A_i là diện tích thành phần phản xạ i , và ρ_i là hệ số phản xạ tại i . Đáp ứng từ hai lần

phản xạ của thành phần i và thành phần j như trong công thức (4). Khi chia thành N bề mặt phản xạ, đáp ứng nguồn đến thành phần i cần N phép tính, thành phần i và thành phần j cần N^2 phép tính, và thành phần j đến đầu thu cần N phép tính. Đáp ứng kênh 2 lần phản xạ từ đầu phát đến đầu thu cần $(2N + N^2)$ phép tính cho bởi:

$$h_{i,j,R}^2(t) = \frac{\cos(\varphi_{Ti})\cos(\theta_{Ti})A_i}{\pi R_{Ti}^2} \times \frac{\rho_i \cos(\varphi_{ij})\cos(\theta_{ij})A_j}{\pi R_{ij}^2} \times \frac{\rho_j \cos(\varphi_{jR})\cos(\theta_{jR})A_R}{\pi R_{jR}^2} \times \delta\left(t - \frac{R_{Ti} + R_{ij} + R_{jR}}{c}\right) \quad (4)$$

Đáp ứng xung tổng hợp được tính bằng cách cộng các đáp ứng xung trực tiếp và các đáp ứng xung phản xạ (Perez-Jimenez *et al.*, 1997).

2.2 Giảm số phép tính toán cho mô hình kênh truyền MIMO quang không dây

Mô hình kênh truyền quang không dây được phân tích với 2 anten phát và 2 anten thu như Hình 2. Kích thước và các thông số của mô hình thể hiện như Bảng 1, và Bảng 2.

Bảng 1: Thuộc tính đầu phát và đầu thu

Thuộc tính	Giá trị	
	anten 1	anten 2
Vị trí đầu phát	T ₁ (1.25, 2.5, 3)	T ₂ (3.75, 2.5, 3)
Kích thước LED	mảng 7x7	mảng 7x7
Công suất 1 LED	20 mW	20 mW
Bậc Lambert	1	1
Góc đặt bộ phát	-90 ⁰	-90 ⁰
Góc nửa công suất	70 ⁰	70 ⁰
Vị trí bộ thu	R ₁ (1.25, 2.5, 0.85)	R ₂ (3.75, 2.5, 0.85)
Diện tích đầu thu	1 cm ²	1 cm ²
FOV của bộ thu	85 ⁰	85 ⁰
Góc đặt bộ thu	90 ⁰	90 ⁰

Bảng 2: Thuộc tính phòng

Thuộc tính	Giá trị
Kích thước phòng	5x5x3 m ³
Hệ số phản xạ trần	0.8
Hệ số phản xạ tường	0.8
Hệ số phản xạ nền	0.2
Δt	0.5 ns
T _s	1
R	0.75 A/W

Tổng số phép tính đáp ứng xung của hệ thống 1 anten phát và 1 anten thu bằng phương pháp trực tiếp sẽ là:

$$C_D = 1 + 4N + N^2. \quad (5)$$

Đáp ứng xung kênh MIMO với N_T anten phát và N_R anten thu bằng phương pháp trực tiếp với hai lần phản xạ ($K = 2$) sẽ là:

$$C_D^{MIMO} = N_T N_R (1 + 4N + N^2). \quad (6)$$

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng mô hình tính đáp ứng xung mới nhằm giảm bớt số lượng tính toán. Hình 2 là đáp ứng xung từ một đầu phát đến một đầu thu. Dựa vào khả năng tính toán ma trận nhanh chóng và dễ dàng của phần mềm Matlab, khi chia thành N bề mặt phản xạ mô hình kênh truyền được chia làm 4 phần nhỏ gồm đường truyền thẳng, nguồn phát đến N bề mặt phản xạ, N bề mặt phản xạ với nhau, N bề mặt phản xạ với đầu thu (Lopez-Hernandez *et al.*, 1998). Mô hình tính nhanh đáp ứng kênh truyền MIMO quang

không dây như Hình 3. Đáp ứng xung tổng hợp \mathbf{H} giữa đầu phát và đầu thu với K phản xạ cho ở (7)

$$\mathbf{H} = \sum_{i=0}^K \mathbf{H}^{(i)} = \mathbf{H}^{(0)} + \mathbf{F}_T \mathbf{\Phi}_K \mathbf{G}_R, \quad (7)$$

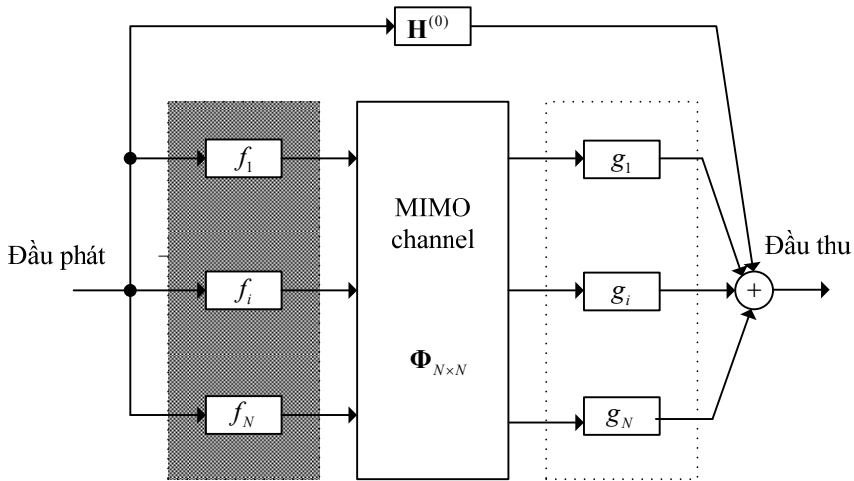
với phần thứ nhất $\mathbf{H}^{(0)}$ là thành phần LOS, \mathbf{F}_T là thành phần đầu phát đến N bề mặt phản xạ, $\mathbf{\Phi}_K$ là ma trận N bề mặt phản xạ với nhau, \mathbf{G}_R là N bề mặt phản xạ tới đầu thu.

Phần thứ hai thể hiện hàm chuyển giữa đầu phát và các thành phần phản xạ. Thành phần này được mô hình như một hệ thống đơn đầu vào – đa đầu ra, thể hiện ở (8)

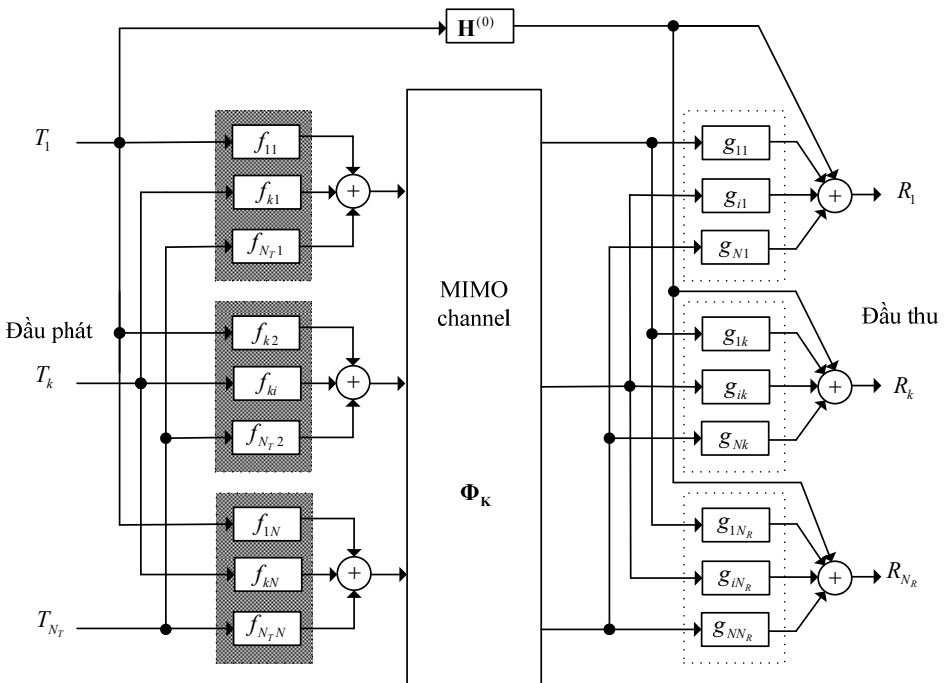
$$f_{ki} = \rho_i \delta \left(t - \frac{R_{ik}}{c} \right) \frac{\cos(\theta_{ki}) \cos(\varphi_{ki}) A_i}{\pi R_{ki}^2} \times \delta \left(t - \frac{R_{ki}}{c} \right) u \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{ki} \right), \quad (8)$$

với một đầu phát thứ k , vector \mathbf{F}_k với N thành phần bề mặt thể hiện ở (9)

$$\mathbf{F}_k = [f_{k1}, \dots, f_{kN}]. \quad (9)$$



Hình 2: Mô hình tính nhanh kênh truyền



Hình 3: Mô hình tính nhanh kênh truyền MIMO

Phần thứ ba là sự phụ thuộc vào việc chia số lượng thành phần phản xạ và các hệ số phản xạ trong phòng. Thành phần này bao gồm các hàm

chuyển giữa 2 thành phần phản xạ bất kỳ ở công thức (10)

$$\Phi_K = \begin{cases} I_{N \times N} + \phi + \phi^2 + \phi^3 + \dots + \phi^{K-1}, & K \geq 2 \\ I_{N \times N}, & K = 1 \end{cases}, \quad (10)$$

với $I_{N \times N}$ là ma trận đơn vị kích thước $N \times N$ và ϕ cho bởi (11).

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \dots & \phi_{NN} \end{bmatrix}, \quad i, j = 1, \dots, N.$$

Thành phần ϕ_{ij} thể hiện hàm chuyển giữa 2 thành phần i và j cho bởi (11)

$$\phi_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j \\ \frac{\rho_j \cos(\theta_j) \cos(\phi_j) A_j}{\pi R_j^2} \times \delta\left(t - \frac{R_j}{c}\right) u\left(\frac{\pi}{2} - \theta_j\right), & i \neq j \end{cases}. \quad (11)$$

Phần cuối cùng là đáp ứng xung phụ thuộc vào các thông số bộ thu như vị trí và góc thu FOV. Đây là hàm chuyển giữa bộ thu và các thành phần bề mặt. Ở dạng vector, đáp ứng xung có dạng là $\mathbf{G}_R = [g_{1k}; \dots; g_{Nk}]$, với g_{ik} cho bởi (12)

$$g_{ik} = \frac{\cos(\theta_{ik}) \cos(\phi_{ik}) A_R}{\pi R_{ik}^2} \times \delta\left(t - \frac{R_{ik}}{c}\right) u(FOV_k - \theta_{ik}). \quad (12)$$

Xét trường hợp phản xạ bậc 2 ($K = 2$), số phép toán để tính cho đường LOS sẽ là $N_T N_R$, số phép toán ở phần \mathbf{F}_k là $N_T N$, số phép toán ở phần Φ_K là N^2 , số phép toán ở phần \mathbf{G}_R là NN_R . Đáp ứng xung của hệ thống MIMO khi giảm số phép toán sẽ là:

$$C_L^{MIMO} = N_T N_R + N_T N + N^2 + NN_R. \quad (13)$$

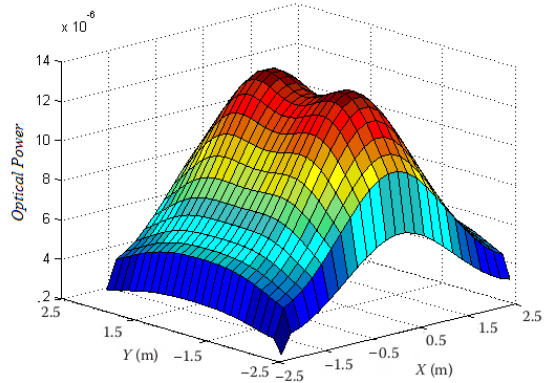
Ví dụ, với hệ thống MIMO 2 anten phát và 2 anten thu thì số phép toán tính trực tiếp sẽ là $C_D^{2 \times 2} = 4(1 + 4N + N^2)$ và khi giảm số phép toán sẽ là $C_L^{2 \times 2} = 4 + 4N + N^2$. Vậy thuận toán mới giảm gần 4 lần so với phương pháp trực tiếp.

3 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Kết quả mô phỏng được chia làm 2 phần. Phần đầu là công suất phân bố trung bình kết và đáp ứng kênh truyền. Phần sau thể hiện độ trễ hiệu dụng và phân bố độ trễ trong mô phỏng kênh truyền. Hệ thống mô phỏng khi chia tường thành 26x16 điểm, sàn và trần là 26x26 điểm. Vậy N sẽ là 3016 điểm phản xạ. Ở đây, hệ thống xét với hai lần phản xạ ($K = 2$). Việc chia N , K càng lớn sẽ tăng độ chính xác nhưng cũng tăng số tính toán.

3.1 Đáp ứng thời gian và tần số của kênh

Dựa trên công thức để tính đáp ứng xung của anten thu và anten phát. Công suất máy phát chuẩn hóa ở 1 Watt, mỗi đáp ứng xung sẽ là tổng công suất tương ứng đạt được sau khi qua mô hình kênh truyền và phân bố như 0. Để khảo sát phân bố công suất quang trong căn phòng, vị trí hai anten phát đặt trên trần nhà với tọa độ tương ứng $T_1(1.25, 2.5, 3)$ và $T_2(3.75, 2.5, 3)$, đồng thời quét toàn bộ bề mặt sàn để tính toán đáp ứng xung từ hai anten phát đó đến tất cả điểm trên mặt sàn để có phân bố công suất quang trong căn phòng.



Hình 4: Phân bố công suất của kênh

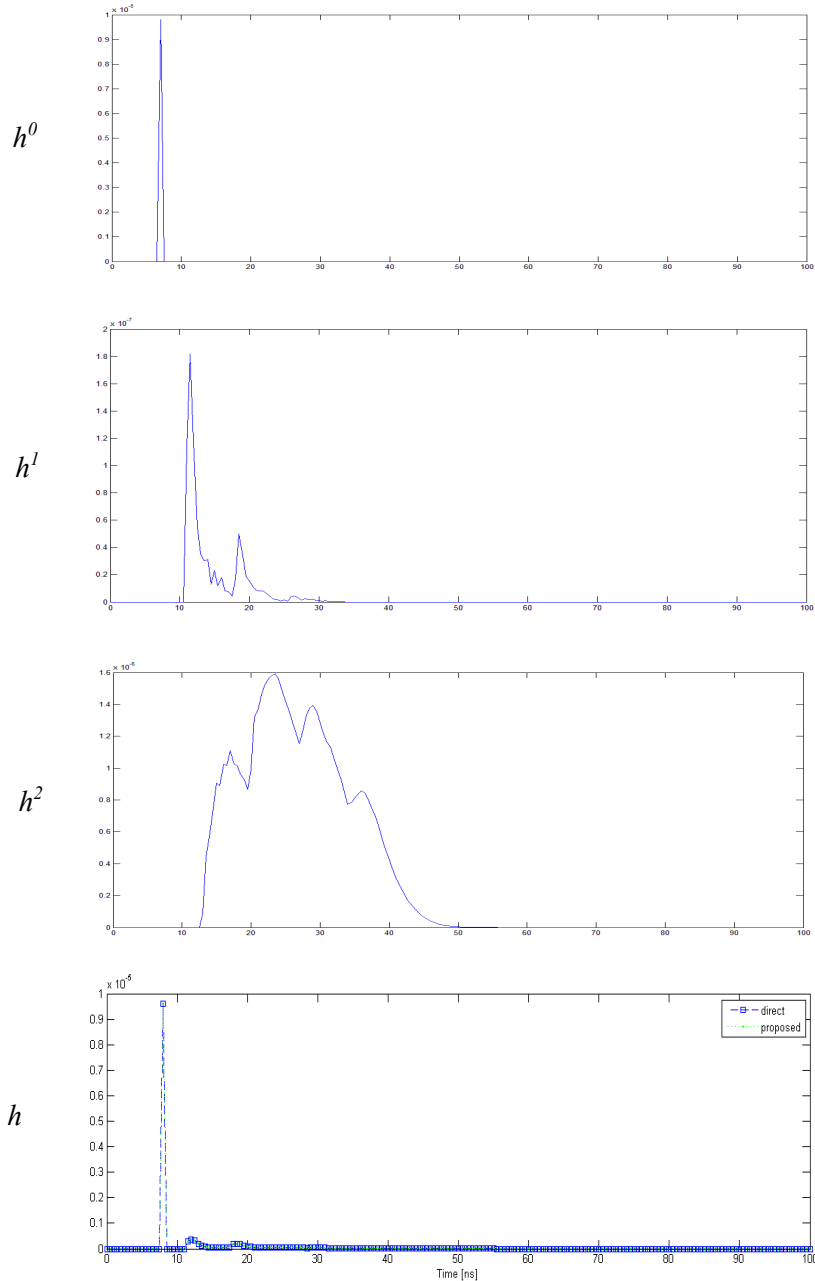
Dựa vào mật độ phân bố công suất quang trong căn phòng thu được, công suất quang sẽ cao khi vị trí máy thu đặt ở trung tâm căn phòng bởi vì khi ấy tín hiệu LOS lớn nhất giữa hai anten. Khi máy thu di chuyển dần từ trung tâm phòng ra gần bề mặt tường thì đáp ứng xung và công suất quang tương ứng càng giảm dần. Đặc biệt máy thu đặt càng gần góc tường, thì đáp ứng xung kênh là thấp nhất. Khi đặt máy thu về góc tường, khoảng cách giữa hai anten là xa nhất, đồng thời đầu thu không nhận được các thành phần phản xạ từ các bề mặt phản xạ khác.

Đáp ứng xung từng đường LOS và NLOS theo nhiều bậc phản xạ được trình bày như Hình 5 và Hình 6 với $K = 2$. Kết quả cho thấy phương pháp tính trực tiếp đáp ứng xung (direct) và giảm số bước tính toán (proposed) giống nhau. Như vậy, khi giảm số bước tính toán không làm ảnh hưởng đến kết quả tính toán vì phương pháp này tính các đường ít phản xạ bằng cách gom chung với các đường nhiều phản xạ. Kết quả đáp ứng xung cho thấy đáp ứng đường LOS cao hơn hẳn so với đáp ứng của các đường NLOS. Đối với riêng các thành phần phản xạ thì đáp ứng xung càng giảm khi bậc phản xạ càng tăng. Do tính chất đối xứng của việc sắp xếp anten thu phát, đáp ứng kênh của cặp anten phát thứ nhất với anten thu thứ nhất sẽ bằng đáp

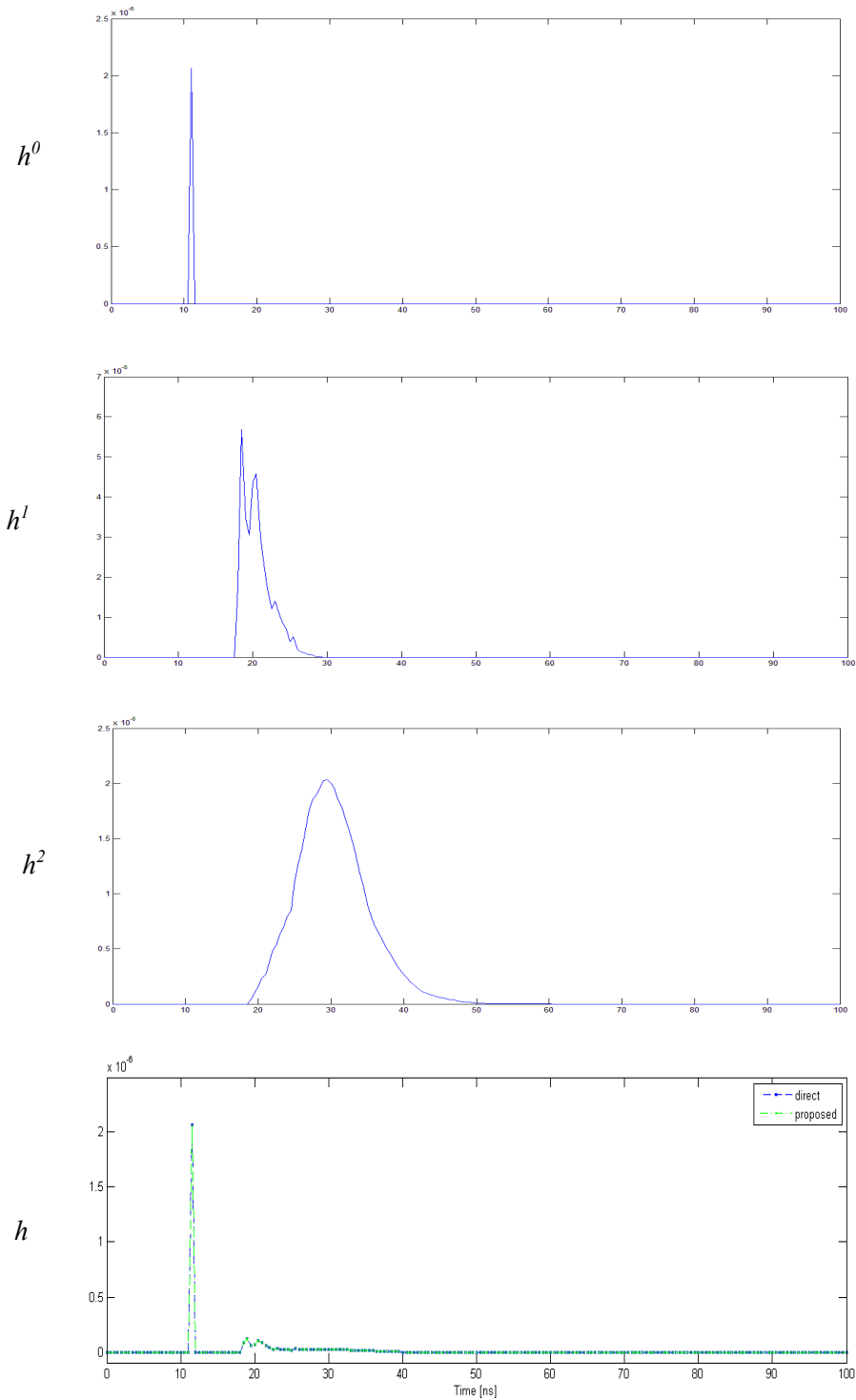
ứng xung của cặp anten phát thứ 2 và anten thu thứ 2 ($h_{11} = h_{22}$). Và điều đó cũng xảy ra với đáp ứng kênh của cặp anten $h_{12} = h_{21}$.

Xét cặp anten $T_1 - R_1$, với công suất nguồn là 1

Watt, tổng công suất đường LOS là 10^{-5} W, tổng công suất của các đường phản xạ thứ nhất là $2 \cdot 10^{-7}$ W. Công suất giảm khi bậc phản xạ của đáp ứng xung tăng. Hơn nữa, đáp ứng xung bậc cao sẽ đến chậm hơn so với đáp ứng xung bậc thấp.



Hình 5: Đáp ứng xung của đường LOS và đường phản xạ của $T_1 - R_1 / T_2 - R_2$



Hình 6: Đáp ứng xung của đường LOS và đường phản xạ của $T_1 - R_2 / T_2 - R_1$

Để đánh giá băng thông của kênh truyền, đáp ứng tần số của kênh được xác định bằng cách sử dụng biến đổi Fourier rời rạc.

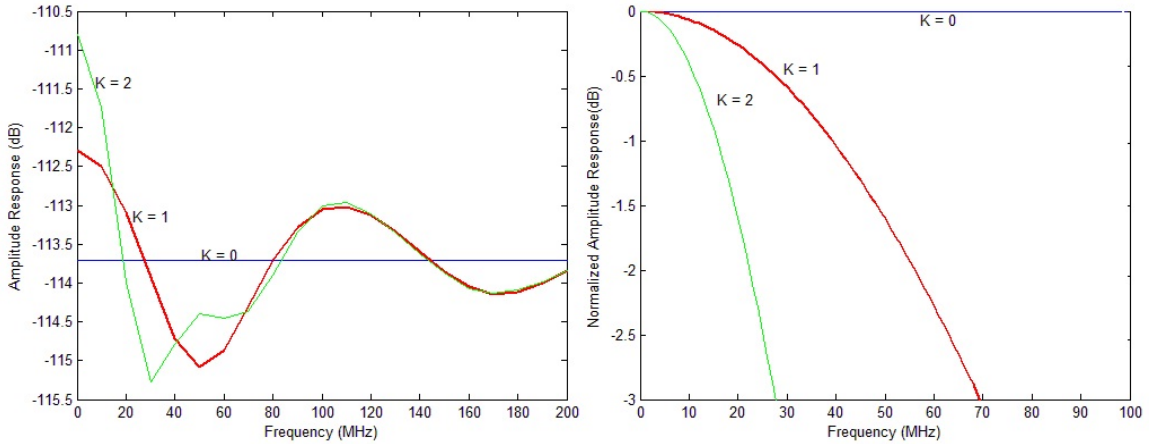
$$H_j(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h_j(n\Delta t)e^{-j\omega n\Delta t} . \tag{14}$$

Sau đó, đáp ứng biên độ của kênh truyền được chuẩn hóa để tìm ra giá trị băng thông -3 dB của kênh.

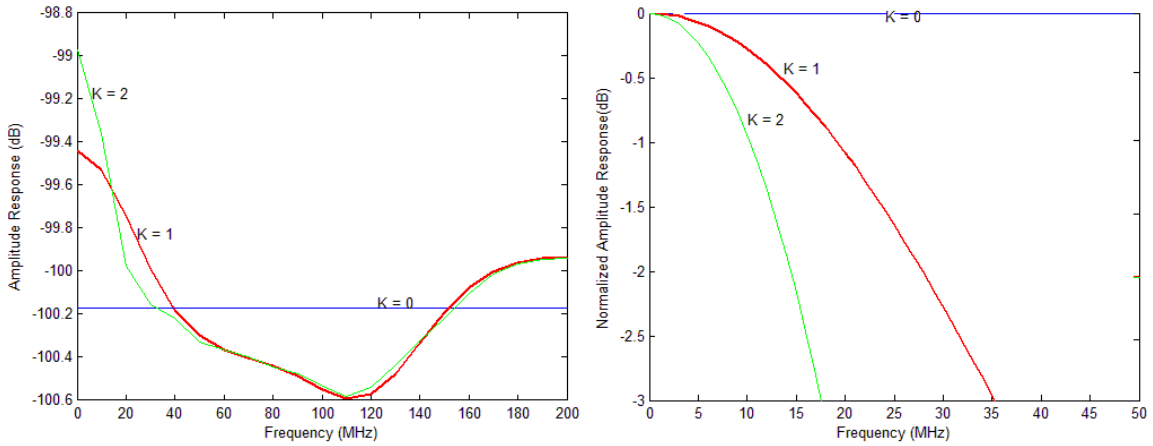
$$|H_j(\omega_{-3dB})|^2 = 0.5 |H_j(0)|^2 . \tag{15}$$

Đáp ứng biên độ chuẩn hóa của $T_1 - R_1 / T_2 - R_2$ thể hiện ở Hình 7. Mỗi phản xạ thêm vào sẽ kéo dài thời gian đáp ứng xung và làm giảm băng thông của kênh. Hệ số K thể hiện bậc phản xạ. Ở đây, các đáp ứng tần số chỉ khảo sát qua tối đa hai lần phản xạ. Với cặp Anten $T_1 - R_1$ hay $T_2 - R_2$, băng thông -3 dB là 70 MHz khi kênh có $K = 1$, trong

khí băng thông chỉ còn 28 MHz khi kênh có $K = 2$. Còn với cặp Anten $T_1 - R_2$ hay $T_2 - R_1$, băng thông -3 dB là 35 MHz khi $K = 1$, băng thông chỉ có 17 MHz khi kênh có $K = 2$ như Hình 8. Vậy, khi bậc phản xạ càng tăng sẽ làm băng thông -3 dB của kênh sẽ giảm.



Hình 7: Đáp ứng biên độ chuẩn hóa của $T_1 - R_1 / T_2 - R_2$



Hình 8: Đáp ứng biên độ chuẩn hóa của $T_1 - R_2 / T_2 - R_1$

3.2 Độ trải trễ trung bình của kênh

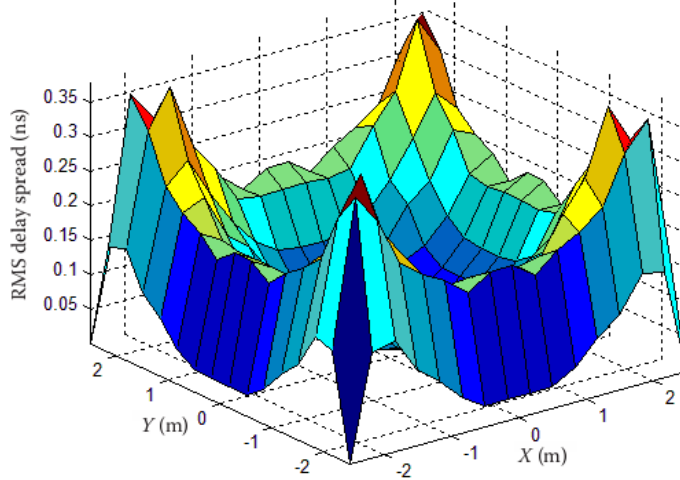
Độ trải trễ bình phương (D_{RMS}) là một tham số thường được sử dụng để định lượng thời gian tán sắc của các kênh đa đường, và được định nghĩa là moment trung tâm bậc 2 của đáp ứng xung.

$$D_{RMS} = \left[\frac{\int (t - \mu)^2 h^2(t) dt}{\int h^2(t) dt} \right]^{1/2} \quad (16)$$

với μ là độ trải trễ trung bình cho bởi:

$$\mu = \frac{\int t h^2(t) dt}{\int h^2(t) dt} \quad (17)$$

Dựa trên phương trình (16), (17), độ trải trễ bình phương trung bình được trình bày như 0. Độ trải trễ càng tăng khi dịch chuyển vị trí máy thu từ trung tâm dần về phía tường và đặc biệt độ trải trễ là cao nhất ở bốn góc tường.



Hình 9: Độ trải trễ

4 KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp xây dựng mô hình kênh truyền MIMO quang không dây và đề xuất một tiếp cận mới để xác định nhanh đáp ứng kênh truyền MIMO quang không dây trong nhà. Việc sử dụng thuật toán tính nhanh kênh truyền cho phép giảm số lượng tính toán gần 4 lần. Bài báo này cũng trình bày các kết quả mô phỏng của kênh truyền MIMO quang không dây gồm phân bố công suất, đáp ứng thời gian, đáp ứng tần số và độ trải trễ. Khi xét đến phân xạ bậc 2 thì băng thông của kênh còn khoảng 30 MHz. Việc tối ưu hóa thông số cần được phân tích ở các nghiên cứu tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (VNU-HCM) trong khuôn khổ đề tài mã số C2014-18-05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Alqudah Y. A., Kavehrad M., 2003. MIMO characterization of indoor wireless optical link using a diffuse-transmission configuration. *IEEE Transactions on Communications*. 51: 1554-1560.

Gfeller F. R., Bapst U., 1979. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. *Proceedings of the IEEE*. 67: 1474-1486.

Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S., 2012. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®*, CRC Press, 77 pages.

Lopez-Hernandez F. J., Perez-Jimenez R., Santamaria A., 1998. Monte Carlo calculation of impulse response on diffuse IR wireless indoor channels. *Electronics Letters*. 34: 1260-1262.

Lopez-Hernandez F. J., Perez-Jimenez R., Santamaria A., 1999. Novel ray-tracing approach for fast calculation of the impulse response on diffuse IR-wireless indoor channels. In: *Proc. SPIE on Optical Wireless Communications II*, December 1999, Boston, 100-107.

Lopez-Hernandez F. J., Perez-Jimenez R., Santamaria A., 2000. Ray-tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse IR wireless indoor channels. *Optical Engineering*. 39: 2775-2780.

Perez-Jimenez R., Berges J., Betancor M. J., 1997. Statistical model for the impulse response on infrared indoor diffuse channels. *Electronics Letters*. 33: 1298-1300.

Tan J. J., Zou C. Q., Du S. H., Tan J. T., 2014. Simulation of MIMO channel characteristics for indoor visible light communication with LEDs. *International Journal for Light and Electron Optics*. 125: 44-49.

Zeng L., Brien D. C. O., Minh H. L., Faulkner G. E., Lee K., Jung D., Oh Y., Won E. T., 2009. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white led lighting. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 27: 1654-1662.

Zhang H., Gong M., Wang D., Cui R., 2005. SMC based on Phong's model. *Optical Engineering*. 44: 020506-020506-2.