

Nghiên cứu, phát triển mô hình mạng cảm biến không dây đa kết nối động

Đỗ Thành Quân¹, Bùi Tiến Anh², Tạ Chí Hiếu^{3*}

¹Khoa Chỉ huy tham mưu kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam;

²Lớp Nghiên cứu sinh, Hệ 2, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam;

³Khoa Vô tuyến điện tử, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: hieunda@mta.edu.vn

Nhận bài: 22/8/2024; Hoàn thiện: 07/10/2024; Chấp nhận đăng: 11/10/2024; Xuất bản: 25/10/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.98.2024.69-77>

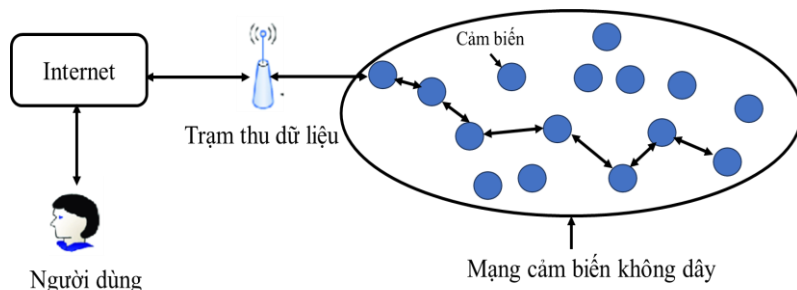
TÓM TẮT

Mạng cảm biến không dây (*Wireless Sensor Network, WSN*) bao gồm các cảm biến kết nối không dây để thu thập thông tin từ môi trường và truyền dữ liệu đến trung tâm xử lý. WSN được ứng dụng trong y tế, công nghiệp và tự động hóa nhờ khả năng cung cấp thông tin thời gian thực với chi phí thấp. Nghiên cứu này đề xuất mô hình mạng cảm biến không dây đa kết nối động (*Dynamic Multi-Connection Wireless Sensor Network, DMC WSN*) kết hợp với kỹ thuật đa truy cập phân chia theo thời gian (*Time Division Multiple Access, TDMA*) nhằm phân bổ hợp lý thời gian truyền dữ liệu, tránh xung đột tín hiệu và nâng cao hiệu quả truyền tin trong xưởng sản xuất. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi không sử dụng TDMA và không điều khiển công suất, dung lượng của cảm biến yếu nhất và dung lượng trung bình đều thấp nhất. Khi áp dụng thuật toán Max-Min để điều khiển công suất, dung lượng được cải thiện. Ngược lại, khi sử dụng TDMA, dù không điều khiển công suất, dung lượng của cảm biến yếu nhất và dung lượng trung bình đều đạt mức cao nhất, cho thấy TDMA giúp tăng hiệu quả truyền tin và đảm bảo dung lượng ổn định cho mô hình DMC WSN trong xưởng sản xuất.

Từ khóa: Mạng cảm biến không dây; Đa kết nối động; Đa truy cập phân chia theo thời gian; Dung lượng;

1. MỞ ĐẦU

Mạng cảm biến không dây (*Wireless Sensor Network, WSN*) đã trở thành một yếu tố quan trọng trong các hệ thống truyền thông hiện đại, đặc biệt là trong bối cảnh Internet vạn vật (*IoT*) phát triển mạnh mẽ. WSN cho phép thu thập và truyền tải dữ liệu từ môi trường xung quanh, góp phần vào nhiều ứng dụng khác nhau như giám sát môi trường, tự động hóa, y tế và công nghiệp. Trong ngành công nghiệp, đặc biệt là tại các nhà máy sản xuất, WSN đóng vai trò cấp thiết trong việc giám sát và tối ưu hóa quy trình vận hành. Nhờ tính năng tự động hóa cao và khả năng giám sát từ xa, WSN hiện đang được ứng dụng rộng rãi nhằm tối ưu hóa hiệu quả và nâng cao năng suất trong các nhà máy [1, 2].



Hình 1. Mô hình tổng quan WSN.

Các nghiên cứu về WSN đã chỉ ra những ưu điểm như khả năng triển khai linh hoạt và tiết kiệm năng lượng [3, 4]. Tuy nhiên, các nhược điểm đáng chú ý bao gồm hiện tượng nhiễu đa truy cập giữa các cảm biến và hạn chế về dung lượng mạng khi có nhiều thiết bị hoạt động đồng thời. Để

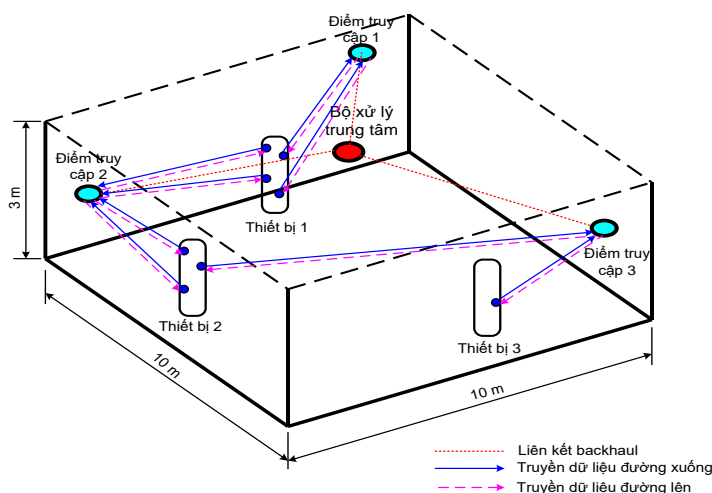
khắc phục những hạn chế này, chúng tôi đề xuất áp dụng kỹ thuật đa truy cập phân chia theo thời gian (*Time Division Multiple Access, TDMA*). Với TDMA, mỗi cảm biến được cấp phát một khe thời gian riêng biệt để truyền và nhận dữ liệu, giúp loại bỏ hoàn toàn nhiễu đa truy cập. Điều này không chỉ cải thiện hiệu quả truyền thông mà còn tối ưu hóa dung lượng mạng, đảm bảo dữ liệu được truyền tải chính xác và không xảy ra xung đột trong hệ thống.

Mặc dù các mô hình WSN đã được ứng dụng thành công trong nhiều lĩnh vực, khi triển khai trong môi trường phức tạp như xưởng sản xuất, vẫn có những thách thức lớn. Các nghiên cứu gần đây cho thấy, việc sử dụng số lượng lớn điểm truy cập (*Access Point, AP*) để phục vụ một số lượng người dùng hạn chế không chỉ gia tăng chi phí mà còn lãng phí tài nguyên mạng. Ví dụ, triển khai 100 AP để phục vụ 40 người dùng không chỉ tiêu tốn băng thông và năng lượng mà còn làm ảnh hưởng đến hiệu suất của mạng xương sống (*backhaul*) [5]. Ngoài ra, khi nhiều cảm biến cùng lúc truyền dữ liệu, hiện tượng nhiễu giữa chúng có thể làm giảm hiệu quả và độ tin cậy của mạng [6, 7]. Do đó, cần xây dựng một mô hình WSN mới trong môi trường xưởng sản xuất nhằm tối ưu hóa số lượng AP, giảm chi phí, tiết kiệm tài nguyên và hạn chế nhiễu, đồng thời duy trì kết nối ổn định và hiệu quả. Hơn nữa, do sự di chuyển của máy móc có thể gây gián đoạn kết nối, mô hình mới cần đảm bảo tính linh hoạt, cho phép các cảm biến duy trì kết nối ổn định với nhiều AP ngay cả khi có sự thay đổi vị trí của thiết bị.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG VÀ XỬ LÝ TÍN HIỆU

2.1. Mô hình hệ thống

Hình 2 mô tả mô hình hình mạng cảm biến không dây đa kết nối động (*Dynamic Multi-Connection Wireless Sensor Network, DMC WSN*) trong một xưởng sản xuất tại nhà máy có các cảm biến gắn trên bề mặt các thiết bị, các cảm biến này nhận và truyền dữ liệu trực tiếp đến các AP gắn trên tường thông qua kết nối không dây. Mỗi cảm biến và AP đều được trang bị một ăng-ten, kết nối với CPU qua mạng xương sống và đồng bộ qua kỹ thuật TDMA để đảm bảo truyền dữ liệu hiệu quả, tránh xung đột. Các AP được đồng bộ hóa thời gian bằng giao thức NTP hoặc PTP để duy trì hoạt động theo lịch trình. Mô hình DMC WSN sử dụng cảm biến nhiệt độ, độ ẩm, rung, áp suất và chất lượng không khí, kết hợp tần số UWB [8] cho phép định vị chính xác, giảm nhiễu, tiết kiệm năng lượng và hoạt động tốt trong môi trường có nhiều vật cản như xưởng sản xuất.



Hình 2. Mô hình hệ thống DMC WSN.

Để truyền dữ liệu giữa cảm biến và AP, mô hình đề xuất kết hợp phương thức song công phân chia theo thời gian (*Time Division Duplex, TDD*) và kỹ thuật TDMA. Cụ thể, trong một chu kỳ truyền tin được chia thành ba pha: pha huấn luyện đường lên, pha truyền dữ liệu đường lên và pha

truyền dữ liệu đường xuống [9]. Trong mỗi một pha lại chia thành các khe thời gian và mỗi một khe thời gian được dành cho việc truyền tin của từng cảm biến như mô tả chi tiết trong hình 3.

Pha huấn luyện đường lên τ^{cf}				Truyền dữ liệu đường xuống τ^d				Truyền dữ liệu đường lên τ^u			
Khe 1 (cảm biến thứ 1)	Khe 2 (cảm biến thứ 2)	...	Khe V (cảm biến thứ V)	Khe 1 (cảm biến thứ 1)	Khe 2 (cảm biến thứ 2)	...	Khe V (cảm biến thứ V)	Khe 1 (cảm biến thứ 1)	Khe 2 (cảm biến thứ 2)	...	Khe V (cảm biến thứ V)

Hình 3. Kết hợp phương thức TDD và kỹ thuật TDMA trong mô hình DMC WSN.

Sử dụng kỹ thuật TDMA trong mô hình DMC WSN mang lại nhiều lợi ích quan trọng, bao gồm: tránh nhiễu đa truy nhập bằng cách phân bổ khung thời gian riêng cho từng cảm biến, nâng cao độ tin cậy trong truyền tin, tiết kiệm năng lượng do các cảm biến chỉ hoạt động khi cần. Ký hiệu tổng số AP là M và tổng số cảm biến là V , hệ số kênh phản ánh sự suy giảm tín hiệu và sự ngẫu nhiên của kênh truyền trong môi trường thực tế giữa AP thứ m^{th} và cảm biến thứ v^{th} , ký hiệu là g_{mv} , bao gồm hai thành phần là hệ số pha-đỉnh dải rộng β_{mv} và hệ số pha-đỉnh dải hẹp h_{mv} [5] được thể hiện theo biểu thức sau:

$$g_{mv} = \sqrt{\beta_{mv}} h_{mv}. \quad (1)$$

Trong đó, hệ số pha-đỉnh dải hẹp h_{mv} phản ánh sự biến thiên nhanh của tín hiệu do các yếu tố như tán xạ, phản xạ, nhiễu đa đường và được giả định là các biến ngẫu nhiên phức với phân phối chuẩn có kỳ vọng bằng 0 và phương sai bằng 1, hệ số pha-đỉnh dải rộng β_{mv} mô tả suy hao tín hiệu theo quy mô lớn và bao gồm các thành phần như suy hao đường truyền (*path loss*) và che khuất (*shadowing*). Như vậy, g_{mv} là một biến ngẫu nhiên có phân phối Gauss phức với trung bình bằng 0 và phương sai bằng β_{mv} [5], trong đó, β_{mv} được tính toán theo biểu thức:

$$\beta_{mv} = 10^{\frac{PL_{mv}}{10}}. \quad (2)$$

Trong đó, PL_{mv} là thành phần suy hao đường truyền sử dụng mô hình thay đổi điểm chặn (*Floating-Intercept*, FI) [10]. Mô hình FI là một trong những mô hình suy hao đường truyền phổ biến, phù hợp với các ứng dụng sử dụng tần số UWB và phù hợp với các môi trường phức tạp như trong xưởng sản xuất [11]. Mô hình FI được biểu diễn như sau:

$$PL_{mv}^{FI}(d)[dB] = \alpha + 10\eta \log_{10}(d) + \sigma. \quad (3)$$

Trong đó, α là hệ số chặn, η là hệ số độ dốc, d là một số ngẫu nhiên thể hiện khoảng cách từ cảm biến thứ v^{th} đến AP thứ m^{th} , σ biểu thị sự thay đổi tín hiệu theo quy mô lớn.

2.2. Pha huấn luyện đường lên

Trong pha huấn luyện đường lên, cảm biến gửi tín hiệu dẫn đường (*pilot*) đến các AP để ước lượng kênh truyền giữa cảm biến và các AP. Trong mô hình DMC WSN tại một thời điểm chỉ có một cảm biến truyền dữ liệu đến nhiều AP, pha huấn luyện đường lên vẫn cần thiết đảm bảo rằng các AP có được thông tin kênh chính xác, từ đó tối ưu hóa hiệu suất truyền tin trong hệ thống. Chuỗi pilot (ký hiệu là μ_v) là một tín hiệu đã biết, được sử dụng để ước lượng kênh truyền và được chuẩn hóa để có năng lượng bằng 1 ($\|\mu_v\|^2 = 1$). Trong pha huấn luyện, mỗi cảm biến truyền chuỗi pilot trong các khe thời gian riêng, cho phép AP ước lượng kênh chính xác, tránh nhiễu xuyên kênh. AP phân biệt các chuỗi pilot nhờ tính trực giao, hoặc sử dụng phép chiếu và tương

quan. Nếu chuỗi không hoàn toàn trực giao, có thể áp dụng thuật toán tối ưu để gán chuỗi pilot theo vị trí hoặc mức nhiễu, giúp AP ước lượng chính xác kênh từ nhiễu cảm biến cùng lúc. Tín hiệu nhận được tại AP thứ m^{th} được mô tả bởi một biểu thức tuyến tính có dạng:

$$\mathbf{y}_m^p = g_{mv} \boldsymbol{\mu}_v + \mathbf{w}_m^p. \quad (4)$$

Trong đó, \mathbf{w}_m^p là vec-tơ nhiễu tập tại AP thứ m^{th} có trung bình bằng 0, phương sai bằng 1. Dựa trên tín hiệu pilot nhận được \mathbf{y}_m^p , AP thứ m^{th} ước lượng kênh g_{mv} cho cảm biến thứ v^{th} . Ước lượng này ký hiệu là \tilde{y}_{mv}^p là phép chiếu của \mathbf{y}_m^p lên vec-tơ liên hợp Hermitian chuỗi pilot của cảm biến thứ v^{th} :

$$\tilde{y}_{mv}^p = \boldsymbol{\mu}_v^H \mathbf{y}_m^p = (g_{mv} \boldsymbol{\mu}_v + \mathbf{w}_m^p) \boldsymbol{\mu}_v^H = g_{mv} + \boldsymbol{\mu}_v^H \mathbf{w}_m^p \quad (5)$$

Việc sử dụng các chuỗi pilot giống hệt nhau hoặc trực giao với nhau có thể dẫn đến các ước lượng tối ưu, trong khi sử dụng các chuỗi pilot ngẫu nhiên có thể dẫn đến các ước lượng không tối ưu. Phương pháp ước lượng sai số bình phương trung bình tối thiểu (*Minimum Mean Square Error*, MMSE) [11] sẽ giúp cải thiện độ chính xác của các ước lượng này. Ước lượng MMSE của g_{mv} , được trình bày như sau:

$$\hat{g}_{mv} = \mathbb{E}\{g_{mv} \tilde{y}_{mv}^{p*}\} \mathbb{E}\left(|\tilde{y}_{mv}^p|^2\right)^{-1} \tilde{y}_{mv}^p = b_{mv} \tilde{y}_{mv}^p. \quad (6)$$

Trong đó:

$$b_{mv} = \frac{\beta_{mv}}{\beta_{mv} + 1}. \quad (7)$$

2.3. Truyền dữ liệu đường lên

Trong pha truyền dữ liệu đường lên, một cảm biến đồng thời truyền dữ liệu đến nhiều AP sử dụng kỹ thuật điều chế di pha nhị phân (*Binary Phase Shift Keying*, BPSK). Mỗi cảm biến được cấp một khe thời gian riêng biệt để tránh nhiễu đa truy nhập giữa các tín hiệu từ các cảm biến khác. Các tín hiệu nhận được từ nhiều AP được kết hợp tại CPU để tận dụng tăng ích phân tập, qua đó cải thiện độ tin cậy và chất lượng của tín hiệu thu và giảm tỷ lệ lỗi bit (*Bit Error Rate*, BER). Trước khi truyền dữ liệu, cảm biến thứ v^{th} điều chỉnh ký tự (*symbol*) q_v , trong đó, $\mathbb{E}\{|q_v|^2\} = 1$, bằng một hệ số điều khiển công suất là $\sqrt{\zeta_v^u}$, thỏa mãn điều kiện $0 \leq \zeta_v^u \leq 1$. Theo lý thuyết điều chế số, điều này có nghĩa là mức công suất truyền của cảm biến có thể được điều chỉnh để nâng cao hiệu quả truyền tin mà không ảnh hưởng đến tính toàn vẹn của dữ liệu. Tín hiệu nhận được tại AP thứ m^{th} được biểu diễn theo biểu thức:

$$y_m^u = \sqrt{\zeta_v^u} g_{mv} q_v + w_m^u. \quad (8)$$

Trong đó, w_m^u là vec-tơ tạp âm tại AP thứ m^{th} , được giả định là có phân bố Gauss phức với kỳ vọng bằng 0 và phương sai đơn vị. Ban đầu, tất cả các cảm biến sẽ được phân bổ một mức công suất. Tín hiệu phát đi phải được chuẩn hóa để có công suất $P_t = 1$. Công suất trung bình của ở đầu vào máy thu (tại AP thứ m^{th}) sau khi ước lượng kênh là kỳ vọng bình phương của ước lượng MMSE \hat{g}_{mv} và được tính như sau:

$$\gamma_{mv} = \mathbb{E}\left\{|\hat{g}_{mv}|^2\right\} = b_{mv}^2 \mathbb{E}\left(\tilde{y}_{mv}^p\right)^2 = b_{mv}^2 \mathbb{E}\left(g_{mv} + \boldsymbol{\mu}_v^H \mathbf{w}_m^p\right)^2 = b_{mv}^2 \mathbb{E}\left[\left(g_{mv} + \boldsymbol{\mu}_v^H \mathbf{w}_m^p\right)\left(g_{mv} + \boldsymbol{\mu}_v^H \mathbf{w}_m^p\right)^H\right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{mv} &= b_{mv}^2 \mathbb{E} \left(g_{mv} g_{mv}^H + g_{mv} (\mu_v^H \mathbf{w}_m^p)^H + g_{mv}^H (\mu_v^H \mathbf{w}_m^p) + (\mu_v^H \mathbf{w}_m^p) (\mu_v^H \mathbf{w}_m^p)^H \right) \\ &= b_{mv}^2 \left[\left(\mathbb{E} (g_{mv} g_{mv}^H) \right) + \left(\mathbb{E} (g_{mv} (\mu_v^H \mathbf{w}_m^p)^H) \right) + \left(\mathbb{E} (g_{mv}^H (\mu_v^H \mathbf{w}_m^p)) \right) + \left(\mathbb{E} ((\mu_v^H \mathbf{w}_m^p) (\mu_v^H \mathbf{w}_m^p)^H) \right) \right] \\ &= b_{mv}^2 (\beta_{mv} + 1) = \frac{\beta_{mv}^2}{(\beta_{mv} + 1)^2} (\beta_{mv} + 1) = \frac{\beta_{mv}^2}{\beta_{mv} + 1} \end{aligned}$$

Đối với mô hình không sử dụng TDMA thì công thức (8) có dạng:

$$\gamma_{mv} = \mathbb{E} \left\{ |\hat{g}_{mv}|^2 \right\} P_t = \frac{\tau^{cf} \rho_p^{cf} \beta_{mv}^2}{\tau^{cf} \rho_p^{cf} \sum_{v'=1}^V \beta_{mv'} |\mu_v^H \mu_{v'}|^2 + 1} \quad (10)$$

Trong đó, τ^{cf} là khoảng thời gian dành cho huấn luyện pha đường lên và ρ_p^{cf} là tỷ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu của mỗi ký tự pilot đã được chuẩn hóa.

Công suất nhiễu nhiệt được biểu diễn dưới dạng:

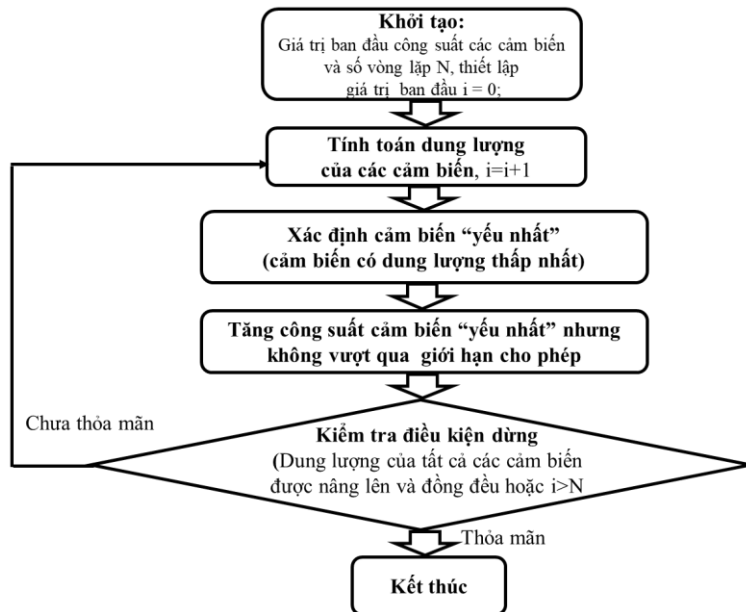
$$noise_power = B \times k_B \times T_0 \times noise_figure. \quad (11)$$

Trong đó, B là băng thông (Hz), k_B là hằng số Boltzmann, T_0 là nhiệt độ nhiễu thường được lấy giá trị chuẩn là 290 Kelvin, hệ số tạp ($noise_figure$) thể hiện độ suy hao SNR trong hệ thống. Theo công thức Shannon [12], giả định băng thông (B) là một hằng số không thay đổi, dung lượng kênh truyền của cảm biến thứ v^{th} trong điều kiện lý tưởng được mô tả bằng một biểu thức như sau:

$$C_v = B \times \log_2 \left(1 + SNR \times T \times h_{vb}^2 \right) = B \times \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{m=1}^M \gamma_{mv}}{noise_power} \times \mathbb{E}(g_{mv}) \right). \quad (12)$$

Trong đó, T là số lượng ăng-ten thu, do các cảm biến và AP đều trang bị một ăng-ten nên $T=1$, h_{vb}^2 là giá trị trung bình của các hệ số kênh, cụ thể $h_{vb}^2 = \mathbb{E}(g_{mv})$.

2.4. Thuật toán điều khiển công suất tối ưu hóa mức tối thiểu



Hình 4. Lưu đồ thuật toán điều khiển công suất max-min.

Khi mô hình DMC WSN không sử dụng kỹ thuật TDMA, nhiễu đa truy nhập giữa các cảm biến sẽ xuất hiện. Để giảm thiểu nhiễu đa truy nhập, từ đó nâng cao dung lượng của từng cảm biến, thuật toán điều khiển công suất tối ưu hóa mức tối thiểu (*Max-Min*, MM) [5] được sử dụng để điều chỉnh công suất của từng cảm biến sao cho cảm biến có dung lượng thấp nhất được nâng lên mức cao nhất có thể, tại điểm tối ưu, dung lượng của tất cả các cảm biến đồng đều như nhau. Thuật toán này giúp cải thiện dung lượng cảm biến yếu nhất trong hệ thống, đồng thời đảm bảo các giới hạn về công suất được tuân thủ (công suất của mỗi cảm biến P_v nằm trong khoảng từ 1mW đến 5mW). Điều này được thể hiện qua biểu thức dưới đây:

$$\begin{aligned} & \max_{\{\zeta_v^u\}} && \min_{v=1,\dots,V} C_v \\ & \text{subject to} && 0 \leq \zeta_v^u \leq 1, v = 1, \dots, V \\ & && 1\text{mW} \leq P_v \leq 5\text{mW}. \end{aligned} \tag{13}$$

3. MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kích bản mô phỏng

Trong xưởng sản xuất có K thiết bị máy móc, mỗi một thiết bị được gắn một số cảm biến trên bề mặt, với tổng số cảm biến là V . Các cảm biến truyền dữ liệu trực tiếp đến M AP, được gắn trên tường ở độ cao 2,5m trong khi các cảm biến có độ cao từ 0,5 m đến 1,5 m. Mô hình sử dụng tần số 4,5 GHz mang lại khả năng truyền dữ liệu với tốc độ cao hơn, đồng thời giảm thiểu hiện tượng nhiễu và xung đột tín hiệu khi có nhiều cảm biến hoạt động đồng thời. Với các cảm biến đo đặc các thông số môi trường như nhiệt độ, độ ẩm, vốn chỉ cần truyền tải lượng dữ liệu nhỏ, băng thông 1 MHz là đủ để đáp ứng các yêu cầu truyền tải mà không lãng phí tài nguyên băng thông không cần thiết. Hệ số suy hao tín hiệu được xem xét cho cả trường hợp *LoS* và *NLoS* với các giá trị được xác định trước. Phòng có kích thước 10m × 10m × 3m, phù hợp mô phỏng một xưởng sản xuất. Giới hạn công suất truyền của các cảm biến được điều chỉnh nằm trong giới hạn từ 40% đến 70% để tối ưu hóa hiệu suất và ổn định kết nối. Chi tiết tham số có trong bảng 1.

Bảng 1. Thiết lập tham số mô phỏng.

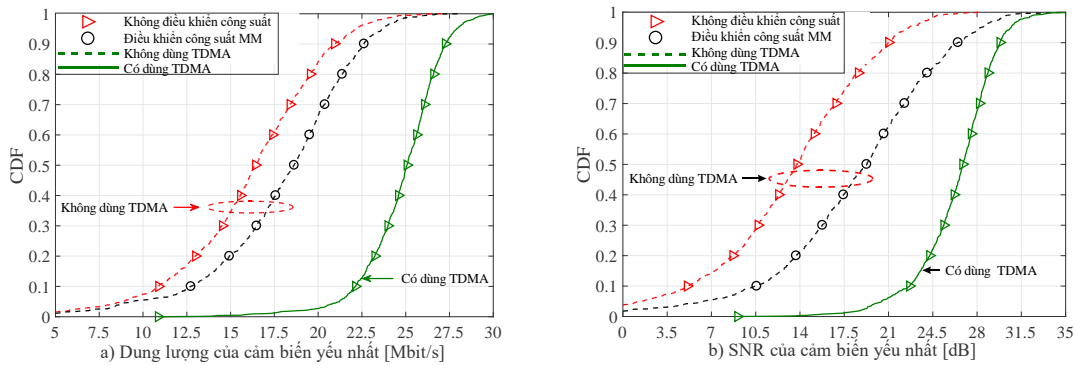
Tham số	Giá trị
Tần số (f) và băng thông (B)	4,5 GHz; 1 MHz
Số lượng điểm truy cập (M) và số lượng cảm biến (V)	3; 12
Các hệ số α, β, σ cho trường hợp tầm nhìn thẳng (<i>LoS</i>)	41,45; 1,32; 1,79
Các hệ số α, β, σ cho trường hợp bị che khuất hoàn toàn (<i>NLoS</i>)	16,22; 4,85; 3,91
Độ cao của AP được gắn trên tường (H_c)	2,5 m
Độ cao của cảm biến gắn trên bề mặt thiết bị máy móc (H_v)	từ 0,5 m đến 1,5 m
Kích thước căn phòng sản xuất (dài × rộng × cao)	10 m × 10 m × 3 m
Giới hạn trên, giới hạn dưới công suất (X, Y)	40%, 70%

3.2. Đánh giá kết quả mô phỏng

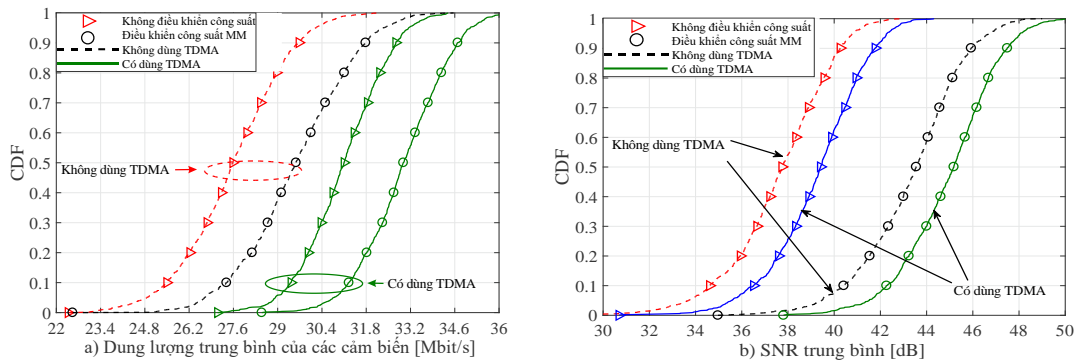
Trong mô hình DMC WSN, các cảm biến cần truyền dữ liệu liên tục và chính xác để đảm bảo quá trình sản xuất không bị gián đoạn. Dung lượng thấp của cảm biến "yếu nhất" (tức cảm biến có tốc độ truyền dữ liệu thấp nhất) có thể gây ra sự cố trong quá trình giám sát, điều khiển và đảm bảo độ tin cậy trong sản xuất, dẫn đến nguy cơ gián đoạn và giảm hiệu quả vận hành. Nâng cao dung lượng cho cảm biến yếu nhất là yếu tố quan trọng trong việc tối ưu hóa hoạt động của DMC WSN, đảm bảo giám sát liên tục và hiệu quả.

Kết quả mô phỏng trong hình 5a cho thấy: Đối với mô hình DMC WSN không sử dụng TDMA, dung lượng của cảm biến yếu nhất ở mức thấp nhất khi không áp dụng điều khiển công suất; việc sử dụng thuật toán điều khiển công suất MM giúp cải thiện dung lượng lên mức trung bình. Ngoài

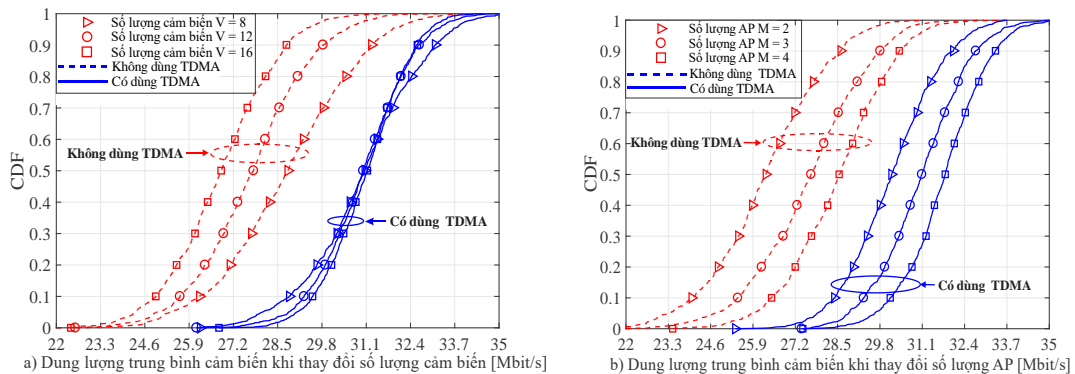
ra, hình 4a cũng cho thấy mô hình DMC WSN sử dụng TDMA luôn đạt dung lượng cao hơn so với mô hình không sử dụng TDMA, ngay cả khi mô hình không sử dụng TDMA áp dụng thuật toán điều khiển công suất MM. Bên cạnh đó, hình 5b cho thấy, SNR của mô hình sử dụng TDMA luôn cao hơn so với mô hình không sử dụng TDMA. Mức dung lượng trung bình của toàn hệ thống là một chỉ số quan trọng để đánh giá hiệu suất tổng thể của mạng cảm biến. Kết quả mô phỏng trong hình 6a cho thấy dung lượng trung bình của các cảm biến trong mô hình DMC WSN sử dụng kỹ thuật TDMA luôn vượt trội so với mô hình DMC WSN không sử dụng TDMA, ngay cả khi mô hình không sử dụng TDMA áp dụng thuật toán điều khiển công suất MM. Ngoài ra, hình 6b còn cho thấy, SNR trung bình của mô hình sử dụng TDMA luôn cao hơn so với mô hình không sử dụng TDMA kể cả khi có và không điều khiển công suất.



Hình 5. CDF dung lượng và SNR của cảm biến yếu nhất khi truyền dữ liệu đường lên.



Hình 6. CDF dung lượng và SNR trung bình của các cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên.



Hình 7. CDF dung lượng trung bình của các cảm biến khi thay đổi số lượng AP và cảm biến.

Kết quả mô phỏng trong hình 7a cho thấy, khi cố định số lượng AP là $M = 3$ và thay đổi số lượng cảm biến với các giá trị $V = 8, 12$ và 16 , mô hình không sử dụng TDMA cho thấy dung lượng trung bình giảm khi số lượng cảm biến tăng. Ngược lại, trong trường hợp sử dụng TDMA, dung lượng trung bình duy trì ổn định và luôn cao hơn so với mô hình không sử dụng TDMA, bất kể sự thay đổi về số lượng cảm biến. Sự khác biệt này là do TDMA phân bổ kênh truyền bằng cách cấp phát khe thời gian riêng cho mỗi cảm biến, giúp loại bỏ nhiễu giao thoa và duy trì dung lượng trung bình ổn định, ngay cả khi số lượng cảm biến tăng. Ngược lại, khi không sử dụng TDMA, các cảm biến chia sẻ kênh đồng thời, gây nhiễu đa truy nhập, làm giảm dung lượng trung bình khi số lượng cảm biến tăng. Bên cạnh đó, hình 7b cho thấy, khi cố định số lượng cảm biến là $V = 12$ và thay đổi số lượng AP với các giá trị $M = 2, 3$ và 4 , dung lượng trung bình của các cảm biến trong mô hình sử dụng TDMA luôn cao hơn so với mô hình không sử dụng TDMA. Đồng thời khi số lượng AP tăng, dung lượng trung bình của các cảm biến cũng tăng tương ứng. Khi số lượng AP tăng, mỗi cảm biến có nhiều kết nối trực tiếp hơn với các AP, dẫn đến cải thiện khả năng truyền dữ liệu và giảm thiểu tổn thất tín hiệu. Điều này làm tăng dung lượng trung bình của các cảm biến, bất kể có sử dụng TDMA hay không, vì các cảm biến có thêm lựa chọn kết nối và ít bị giới hạn bởi khoảng cách hay tín hiệu yếu từ các AP khác.

4. KẾT LUẬN

Bài báo có hai đóng góp chính. Thứ nhất, tác giả đề xuất mô hình DMC WSN áp dụng cho xưởng sản xuất, nơi dữ liệu được truyền từ một cảm biến đến nhiều AP và tổng hợp tại CPU, giúp nâng cao độ tin cậy, cải thiện chất lượng tín hiệu thu. Thứ hai, để loại bỏ hoàn toàn nhiễu đa truy nhập giữa các cảm biến, bài báo kết hợp phương thức TDD và kỹ thuật TDMA trong mô hình DMC WSN. Kết quả mô phỏng cho thấy việc sử dụng TDMA trong DMC WSN mang lại dung lượng vượt trội. Tuy nhiên, nghiên cứu tiếp theo sẽ xem xét so sánh TDMA với các kỹ thuật khác để đánh giá toàn diện hơn về hiệu quả của hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. C. Nguyen et al., "6G Internet of Things: A Comprehensive Survey," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 1, pp. 359-383, 1 Jan.1, (2022), doi: 10.1109/JIOT.2021.3103320.
- [2]. K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi and M. Mustaqim, "Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios," in IEEE Access, vol. 8, pp. 23022-23040, (2020), doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [3]. I. Surenter, K.P. Sridhar, Michaelraj Kingston Roberts, "Maximizing energy efficiency in wireless sensor networks for data transmission: A Deep Learning-Based Grouping Model approach", Alexandria Engineering Journal, Volume 83, Pages 53-65, ISSN 1110-0168, (2023).
- [4]. Hui Feng, Chen Xu, Bo Jin, Min Zhang, "A Deployment Optimization for Wireless Sensor Networks Based on Stacked Auto Encoder and Probabilistic Neural Network", Digital Communications and Networks, ISSN 2352-8648, (2024).
- [5]. H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson and T. L. Marzetta, "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, (2017), doi: 10.1109/TWC.2017.2655515.
- [6]. G. D. O'Mahony, J. T. Curran, P. J. Harris and C. C. Murphy, "Interference and Intrusion in Wireless Sensor Networks," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 35, no. 2, pp. 4-16, (2020).
- [7]. B. T. Anh, D. Thanh Quan, D. D. Quoc and P. Thanh Hiep, "Optimizing Transmission Power for Uplink Data in Cell-Free Wireless Body Area Networks," 2023 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), Hanoi, Vietnam, pp. 275-279, (2023).
- [8]. D. M. King, B. G. Nickerson and W. Song, "Evaluation of ultra-wideband radio for industrial wireless control," 2017 IEEE 38th Sarnoff Symposium, Newark, NJ, USA, pp. 1-6, (2017).
- [9]. Özlem Tugfe Demir, Emil Björnson and Luca Sanguinetti, "Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO", Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 14, No. 3-4, pp 162-472, (2021).

- [10]. M. B. Majed, T. A. Rahman, O. A. Aziz, M. N. Hindia, and E. Hanafi, "Channel characterization and path loss modeling in indoor environment at 4.5, 28, and 38 GHz for 5g cellular networks", International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2018, pp. 1–14, (2018), doi: 10.1155/2018/9142367.
- [11]. Al-Khero, S Kh and Abbosh, Y M, "Path Loss and Channel Modeling at 3.5GHz for 5G Cellular System", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol.1152, p.012006, (2021), doi: 10.1088/1757-899x/1152/1/012006.
- [12]. Ghayoula et al, "Capacity and Performance of MIMO systems for Wireless Communications", Journal of Engineering Science and Technology, vol. 7, pp.108-111, (2014), doi: 10.25103/jestr.073.17.

ABSTRACT

Research and development of the dynamic multi-connection wireless sensor network model

Wireless Sensor Networks (WSNs) consist of sensors connected wirelessly to collect information from the environment and transmit data to a central processing unit. WSNs are widely applied in healthcare, industry, and automation due to their ability to provide real-time information at a low cost. This research proposes a Dynamic Multi-Connection Wireless Sensor Network (DMC WSN) model integrated with Time Division Multiple Access (TDMA) to allocate transmission time efficiently, avoid signal interference, and enhance communication performance in production environments. Simulation results indicate that, when neither TDMA nor power control is employed, both the weakest sensor capacity and the average capacity are at their lowest levels. When the Max-Min algorithm is applied for power control, capacity is improved. Conversely, when TDMA is utilized, even without power control, both the weakest sensor capacity and the average capacity reach their highest levels. This demonstrates that TDMA significantly improves communication efficiency and ensures stable capacity for the DMC WSN model in production environments.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Dynamic Multi-Connection; Time Division Multiple Access; Capacity.