

# Hiệu năng mạng cảm biến không dây sử dụng kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược và các cơ chế lựa chọn

## On performance of wireless sensor network using ambient backscatter communication technique and selection combining

Hà Kim Tùng<sup>a,b</sup>, Trương Văn Trương<sup>a,b\*</sup>, Hà Đắc Bình<sup>a,b</sup>  
Ha Kim Tung<sup>a,b</sup>, Trương Văn Trương<sup>a,b\*</sup>, Ha Dac Binh<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>a</sup>Faculty of Electrical - Electronics Engineering, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

<sup>b</sup>Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>b</sup>Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 03/5/2023, ngày phản biện xong: 01/6/2023, ngày chấp nhận đăng: 05/7/2023)

### Tóm tắt

Bài báo này khảo sát một mô hình mạng cảm biến không dây sử dụng kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược và các cơ chế lựa chọn ăng-ten thu và lựa chọn nút cảm biến. Dựa vào các đặc tính thống kê của kênh truyền không dây, chúng tôi xây dựng các biểu thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống. Dựa trên các biểu thức này, chúng tôi thu được các kết quả số về xác suất dừng hệ thống theo các tham số chính của hệ thống là công suất phát, số lượng ăng-ten, và số lượng nút cảm biến được cung cấp để đánh giá sự hoạt động của hệ thống. Cuối cùng, chúng tôi kiểm chứng tính đúng đắn của biểu thức phân tích bằng mô phỏng Monte-Carlo.

*Từ khóa:* Mạng cảm biến không dây; truyền thông tán xạ ngược; xác suất dừng hệ thống; kết hợp lựa chọn.

### Abstract

This paper investigates a model of a wireless sensor network using ambient backscatter communication technique and receiving antenna as well as sensor node selection schemes. Based on the statistical characteristics of wireless channels, we derive the exact closed-form expression of the system outage probability over Rayleigh fading channels. According to this expression, we obtain numerical results to gain insight into the behavior of this considered system versus the main parameters of the system, such as transmit power, number of antennas, and number of sensor nodes. Finally, we verify the correctness of the analytical expression by Monte-Carlo simulation.

*Keywords:* Wireless sensor network; backscatter communication; system outage probability; selection combining.

### 1. Giới thiệu

Hiện nay giới học thuật và công nghiệp đã bắt đầu cuộc đua nhắm đến một thế hệ mạng thông tin di động của tương lai như mạng sau 5G (B5G) và mạng thế hệ thứ sáu (6G) nhằm

đáp ứng tốt hơn nhu cầu người dùng với các yêu cầu kết nối với số lượng lớn thiết bị, tốc độ truyền dữ liệu và hiệu quả sử dụng năng lượng cao, vùng phủ sóng rộng, độ tin cậy cực cao và độ trễ thấp [1-2]. Trong bối cảnh IoT, công

\*Tác giả liên hệ: Trương Văn Trương  
Email: truongvantruong@dtu.edu.vn

nghe không dây giải quyết hai thách thức là phạm vi giao tiếp và năng lượng của thiết bị. Xem xét hai khía cạnh chính này, các công nghệ mới đã được đề xuất, có thể liệt kê như: nhận dạng đối tượng bằng tần số vô tuyến (RFID) [3], LoRaWAN [4], Zigbee [5], và Bluetooth [6].

Một công nghệ gần đây và đầy hứa hẹn tiềm năng giải quyết những hạn chế về phạm vi phủ sóng và giúp tiết kiệm năng lượng là truyền thông tán xạ ngược xung quanh (ambient backscatter communication - AmBC) [7]. Công nghệ này cho phép truyền thông công suất cực thấp, để các thiết bị có thể tự cung cấp năng lượng bằng cách sử dụng năng lượng thu được từ sóng tần số vô tuyến (RF). Tương tự, với công nghệ RFID, các thiết bị tán xạ ngược xung quanh truyền dữ liệu theo cách thụ động nhưng cũng khai thác sóng điện từ (EM) xung quanh.

Bước đột phá với công nghệ truyền thông không dây theo kỹ thuật AmBC đang “tái sử dụng” sóng điện từ từ môi trường xung quanh. Cụ thể, trong mạng cảm biến không dây AmBC, mỗi nút được gắn một thiết bị có tên thẻ (tag) điều chế sóng điện từ (RF) đến từ các nguồn RF xung quanh, chẳng hạn như tháp truyền hình (TV), điểm phát sóng wifi, trạm gốc mạng di động, v.v... Tín hiệu do nguồn sóng điện từ xung quanh phát ra sẽ được điều chế và đáp ứng các tiêu chuẩn của công nghệ nguồn phát. Tuy nhiên, thẻ tán xạ ngược xung quanh điều chỉnh tín hiệu xung quanh với tốc độ chậm gọi là điều chế thẻ. Một bộ thu dành riêng cho AmBC, còn được gọi là bộ đọc, có thể phát hiện thông tin được điều chế gửi từ thẻ trong tín hiệu xung quanh thu được. Cách triển khai đơn giản nhất là thẻ điều chỉnh biên độ của tín hiệu xung quanh với hai trạng thái khác nhau: ở một trạng thái (chẳng hạn phát bit ‘1’), thẻ phản xạ sóng xung quanh theo mọi hướng, tức là thẻ phản xạ ngược tín hiệu. Ở trạng thái thứ hai (chẳng hạn phát bit ‘0’), thẻ gần như trong suốt đối với tín hiệu điện từ và hầu như

không ảnh hưởng đến tín hiệu xung quanh. Bằng cách chuyển đổi điện từ từ trạng thái này sang trạng thái khác, thẻ điều chỉnh tín hiệu tán xạ ngược theo thông tin để truyền, dẫn đến các biến thể mức công suất của tín hiệu xung quanh ở phía đầu đọc. Từ các biến thể này, đầu đọc có thể giải mã tín hiệu để khôi phục thông tin gửi từ thẻ. Như vậy, truyền thông tán xạ ngược là kỹ thuật cho phép mạng thẻ hệ tiếp theo kết nối vạn vật (IoT) đáp ứng được yêu cầu kết nối số lượng lớn thiết bị với năng lượng thấp và chi phí triển khai thấp.

Các công trình nghiên cứu về AmBC bao gồm cả phân tích lý thuyết và dựa trên mô hình. Lưu và cộng sự lần đầu tiên tạo ra nguyên mẫu của hệ thống AmBC thu năng lượng từ các tín hiệu TV xung quanh và có thể kết nối với tốc độ truyền 1 Kbps ở cả môi trường trong nhà cũng như ngoài trời [8]. Công trình [9] đã tạo ra một bộ thu nhiều ăng-ten có thể phân biệt tín hiệu tán xạ ngược với tín hiệu nguồn RF trực tiếp đến, trong khi vẫn duy trì tốc độ dữ liệu lên tới 1 Mbps mà không cần thông tin ước tính kênh. Các tác giả trong [10] đã xem xét hệ thống AmBC với đầu đọc nhiều ăng-ten và tiến hành phân tích dừng hệ thống bằng cách giả định kỹ thuật phân tập MRC tại đầu đọc. Trong công trình [11], xác suất dừng hệ thống AmBC cơ bản được phân tích trên các kênh Gaussian phức.

Khác với các công bố nêu trên, trong bài báo này chúng tôi phân tích hiệu năng của hệ thống mạng cảm biến không dây sử dụng kỹ thuật AmBC và cơ chế kết hợp lựa chọn (lựa chọn ăng-ten thu và lựa chọn nút cảm biến) dựa trên đặc tính thống kê của kênh truyền pha-định Rayleigh bằng cách tìm ra các biểu thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống. Đóng góp khoa học của bài báo này như sau:

- Đưa ra một mô hình hệ thống mạng cảm biến không dây sử dụng kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược AmBC. Đề xuất giao thức hoạt động của hệ thống dựa trên cơ

chế lựa chọn ăng-ten thu và lựa chọn cụm trường cho cụm cảm biến.

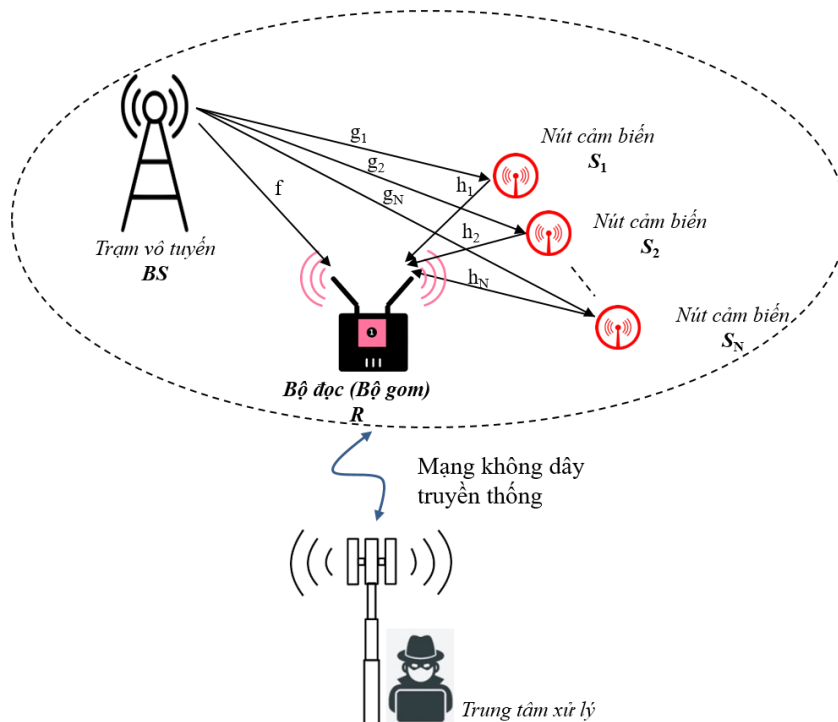
- Xây dựng biểu thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống để đánh giá hiệu năng cho hệ thống trên.
- Thực hiện mô phỏng và khảo sát đưa ra kết quả số và đánh giá sự ảnh hưởng của một số thông số chính như công suất phát, số lượng ăng ten và số lượng nút cảm biến đến hiệu năng của hệ thống. Qua đó khẳng định hiệu quả của giải pháp sử dụng kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược AmBC cũng như các cơ chế lựa chọn ăng-ten thu và nút cảm biến.

Phần còn lại của bài viết này được tổ chức như sau: mục 2 trình bày mô hình hệ thống; mục 3 trình bày phân tích hiệu năng của hệ thống theo xác suất dừng hệ thống; mục 4 cung cấp kết quả số và thảo luận. Cuối cùng, chúng tôi kết luận nội dung nghiên cứu trong mục 5.

## 2. Mô hình hệ thống

Chúng tôi khảo sát một mô hình hệ thống mạng cảm biến không dây sử dụng kỹ thuật

truyền thông tán xạ ngược và cơ chế lựa chọn phát và thu như Hình 1. Hệ thống này bao gồm một điểm phát sóng vô tuyến **BS**,  $N$  thiết bị cảm biến  $S_i$  với  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  và một bộ gom có gắn đầu đọc **R**. Giả thiết, trạm vô tuyến và tất cả các thiết bị cảm biến đều được trang bị đơn ăng-ten và hoạt động ở chế độ bán song công. Riêng bộ đọc R được trang bị  $K$  ăng-ten và cũng hoạt động ở chế độ bán song công. Bộ gom thu thập thông tin từ các nút cảm biến và chuyển về trạm trung tâm để xử lý và phục vụ cho nhu cầu của người dùng. Trong khuôn khổ nghiên cứu này, chúng tôi chỉ tập trung vào khảo sát phần hệ thống mạng cảm biến không dây sử dụng kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược. Chúng tôi giả định rằng khoảng cách giữa các nút cảm biến là không đáng kể và tất cả các nút cảm biến tán xạ ngược đồng thời về phía bộ đọc. Do đó, tại bất kỳ thời điểm nào, tín hiệu từ nút cảm biến cũng như trạm vô tuyến đều đến được bộ đọc. Giả thiết bộ đọc có đầy đủ thông tin trạng thái kênh truyền từ trạm vô tuyến và từ các cảm biến đến bộ đọc. Ngoài ra, chúng tôi xem xét các kênh truyền của hệ thống là các kênh fading Rayleigh.



Hình 1. Mô hình hệ thống mạng cảm biến không dây sử dụng AmBC

Chúng tôi đưa ra giao thức cho hệ thống theo mô hình Hình 1 này như sau:

- *Bước 1:* Căn cứ vào thông tin kênh truyền, bộ đọc lựa chọn ăng-ten tốt nhất trong  $K$  ăng-ten để thu tín hiệu và lựa chọn được cụm trường  $\mathbf{S}^*$ . Giả thiết lựa chọn cụm trường này được đưa ra là do các nút cảm biến được triển khai ở gần nhau để giám sát các thông số giống nhau. Tiêu chí lựa chọn cụm trường trong công trình này là chọn nút cảm biến có kênh truyền tốt nhất từ nút cảm biến đó đến bộ đọc.
- *Bước 2:* Các thiết bị cảm biến  $\mathbf{S}$  thu thập dữ liệu của môi trường và thu năng lượng từ trạm vô tuyến  $\mathbf{BS}$ . Sau đó điều chế các bit thông tin số theo sóng điện từ đến từ trạm vô tuyến  $\mathbf{BS}$ .
- *Bước 3:* Sau khi điều chế xong, cụm trường  $\mathbf{S}^*$  được lựa chọn trong  $N$  nút cảm biến  $\mathbf{S}$  gửi cho bộ đọc  $\mathbf{R}$  thông qua hình thức tán xạ ngược.
- *Bước 4:* Bộ đọc nhận được thông tin và gửi dữ liệu cảm biến nhận được về trung tâm xử lý.

Nội dung tiếp theo, chúng tôi trình bày các bước của giao thức trên bằng các mô hình toán học cụ thể như sau:

Không mất tính tổng quát, ta giả thiết cụm trường được chọn là nút cảm biến thứ  $n$ . Giả sử tín hiệu RF từ môi trường xung quanh (trạm vô tuyến + nhiễu từ môi trường) để biểu diễn bit thứ  $m$  được ký hiệu là  $s[m]$  và tín hiệu nhận được ở nút thứ  $n$  được ký hiệu là  $x_n[m]$  và có thể được biểu diễn như sau:

$$x_n[m] = h_n s[m], \quad (1)$$

trong đó,  $h_n$  lần lượt là hệ số kênh truyền từ  $\mathbf{BS}$  đến nút cảm biến  $\mathbf{S}_n$  và tuân theo phân bố Rayleigh với tham số là  $\lambda$ . Giả sử,  $s[m]$  là tín hiệu có trung bình bằng 0 và phương sai là  $P_s$ .

Đặt dữ liệu nhị phân từ nút cảm biến thứ  $n$  là  $b_n$ . Do đó, tín hiệu tán xạ ngược của thiết bị cảm biến được viết là

$$x_n^b[m] = \eta b_n[m] x_n[m], \quad (2)$$

trong đó,  $\eta$  là hệ số tán xạ,  $|\eta| < 1$ .

Tín hiệu nhận được tại bộ đọc là:

$$\begin{aligned} y_n[m] &= fs[m] + g_n x_n^b[m] + w[m] \\ &= (f + \eta g_n h_n b_n[m]) s[m] + w[m], \end{aligned} \quad (3)$$

trong đó,  $w[m]$  là nhiễu trắng cộng Gaussian (AWGN) có trung bình bằng 0 và phương sai là  $N_0$ .

Do kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược có tốc độ truyền thấp hơn rất nhiều so với truyền không dây truyền thống, cho nên chúng ta xem  $b_n[m]$  không đổi cho mỗi  $M$  bit của ký tự liên tục của  $s[m]$ . Mỗi ký tự mà bộ đọc  $R$  nhận được mô tả bằng vector như sau:

$$\mathbf{y}^* = [y_n^*[1] \quad y_n^*[2] \quad \dots \quad y_n^*[M]]^T. \quad (4)$$

Ký hiệu  $*$  mô tả kết quả nhận được ở ăng-ten tốt nhất trong  $K$  ăng-ten của bộ đọc.

Như vậy, ứng với giá trị từng bit của các ký tự thu được, ta biểu diễn tín hiệu ở bộ đọc như sau:

$$y^*[m] = \begin{cases} fs[m] + w[m], & b_n[m] = 0 \\ (f + \eta g_n h_n) s[m] + w[m], & b_n[m] = 1 \end{cases} \quad (5)$$

Ở bộ đọc có trang bị mạch khử nhiễu liên tiếp (SIC) thực hiện khử nhiễu liên tiếp để giải mã tín hiệu tán xạ ngược khi có tín hiệu RF [12]. Tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời (SNR) của tín hiệu nhận được từ cụm trường đến ăng-ten tốt nhất được biểu thị như sau:

$$\gamma^* = \begin{cases} \bar{\gamma} |f|^2, & b_n = 0 \\ \eta^2 \bar{\gamma} |g|^2 |h|^2, & b_n = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó,  $\bar{\gamma} = \frac{P_s}{N_0}$  được gọi là SNR phát trung bình của cụm trường. Lưu ý, ở đây ta bỏ các ký hiệu chỉ số  $n$  và  $m$  để dễ đọc.

Với fading Rayleigh, hàm phân bố xác suất tích lũy (CDF) và hàm mật độ xác suất (PDF) của  $|f|^2, |g|^2, |h|^2$  lần lượt như sau:

$$F_{|f|^2}(x) = \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_1}}\right)^K, \quad (7)$$

$$F_{|g|^2}(x) = \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_2}}\right)^N, \quad (8)$$

$$F_{|h|^2}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_3}}, \quad (9)$$

trong đó,

$\lambda_1 = \mathbb{E}[|f|^2], \lambda_2 = \mathbb{E}[|g|^2], \lambda_3 = \mathbb{E}[|h|^2]$  với  $\mathbb{E}[\cdot]$  là toán tử kỳ vọng.

### 3. Phân tích hiệu năng

Trong phần này, chúng tôi phân tích hiệu năng hệ thống thông qua việc xây dựng biểu thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống mạng đề xuất.

Xác suất dừng hệ thống ( $\Phi$ ) được định nghĩa là xác suất tỉ số tín hiệu trên nhiễu tức thời thấp hơn ngưỡng hoạt động cho trước  $\gamma_{th} > 0$ , tức là:

$$\Phi = \Pr(\gamma^* < \gamma_{th}). \quad (10)$$

Chúng tôi có được Định lý 1 như sau:

**Định lý 1.** Đối với hệ thống mạng cảm biến không dây đề xuất, xác suất dừng hệ thống được tính theo biểu thức dạng tường minh sau:

$$\Phi = \begin{cases} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\lambda_1 \bar{\gamma}}}\right)^K, & b = 0. \\ 1 + 2 \sum_{i=1}^N \frac{N!(-1)^i}{i!(N-i)!} \sqrt{\frac{\gamma_{th} i}{\lambda_2 \lambda_3 \eta^2 \bar{\gamma}}} \kappa_1 \left(2 \sqrt{\frac{\gamma_{th} i}{\lambda_2 \lambda_3 \eta^2 \bar{\gamma}}}\right), & b = 1 \end{cases}, \quad (11)$$

trong đó,  $\kappa_1(\cdot)$  là hàm Bessel hiệu chỉnh loại 2 bậc 1 (modified Bessel function of the second kind and 1st order).

*Chứng minh:* Xem Phụ lục A.

### 4. Kết quả số và thảo luận

Trong phần này, chúng tôi trình bày kết quả số của xác suất dừng hệ thống mạng cảm biến đã đề xuất. Chúng tôi sử dụng phương pháp mô

phỏng Monte-Carlo để kiểm tra tính chính xác của việc phân tích hệ thống. Các thông số dùng trong việc mô phỏng chi tiết như tại Bảng 1.

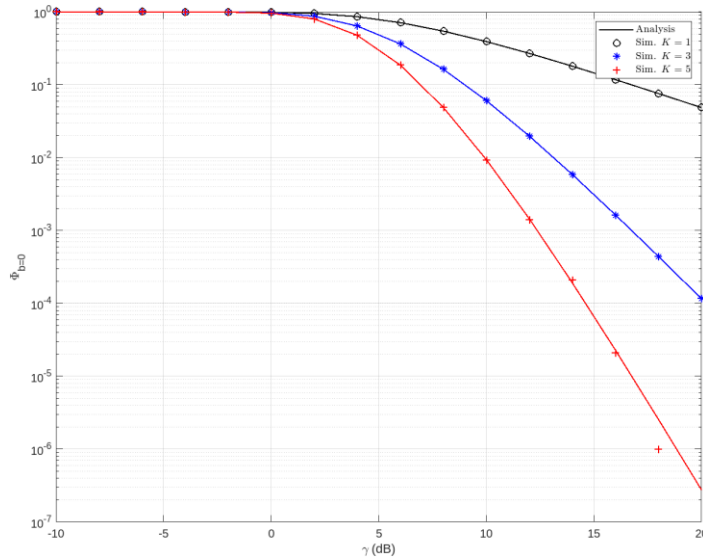
**Bảng 1.** Các thông số mô phỏng

Thông số	Ký hiệu	Giá trị sử dụng
Môi trường		Rayleigh
Tham số phân bố Rayleigh	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	1, 1, 1
Tỉ số tín hiệu trên nhiễu phát trung bình	$\gamma$	-10 – 20 dB
Hệ số tán xạ	$\eta$	0.5
Số ăng-ten của bộ đọc	$K$	1, 3, 5
Số nút cảm biến	$N$	1, 3, 5
Ngưỡng định trước	$\gamma_{th}$	10

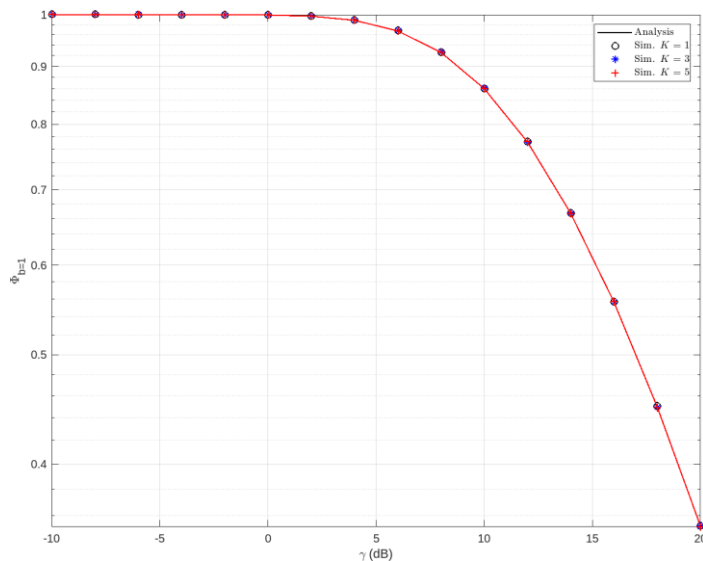
#### 4.1 Ảnh hưởng của SNR trung bình và số lượng ăng-ten

Ở Hình 2, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của tỉ số tín hiệu trên nhiễu phát trung bình và số lượng ăng-ten đến hiệu năng của hệ thống thông qua xác suất dừng hệ thống cho trường hợp gửi bit  $b = 0$ . Từ đồ thị, chúng ta có thể thấy rằng khi SNR trung bình cũng như số lượng ăng-ten của bộ đọc tăng lên thì xác suất dừng hệ thống giảm. Điều này có nghĩa là chúng ta có thể tăng hiệu năng của hệ thống bằng cách tăng số lượng ăng-ten của bộ đọc hoặc nâng cao công suất phát.

Ở Hình 3, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của tỉ số tín hiệu trên nhiễu phát trung bình và số lượng ăng-ten đến hiệu năng của hệ thống thông qua xác suất dừng hệ thống cho trường hợp gửi bit  $b = 1$ . Dễ dàng nhận thấy rằng khi SNR trung bình tăng lên thì xác suất dừng hệ thống giảm. Tuy nhiên, khi số lượng ăng-ten của bộ đọc tăng lên thì xác suất dừng hệ thống cũng có xu hướng không đổi. Lúc đó, do bộ đọc chỉ nhận tín hiệu từ thẻ, vốn có khoảng cách đến bộ đọc là không đổi. Vì vậy, việc tăng hay giảm số lượng ăng-ten ở bộ đọc không ảnh hưởng đến xác suất dừng của hệ thống.



**Hình 2.** Xác suất dừng hệ thống theo SNR phát trung bình và số ăng-ten  $K$  với  $b = 0$ .



**Hình 3.** Xác suất dừng hệ thống theo SNR phát trung bình và số ăng-ten  $K$  với  $b = 1$ .

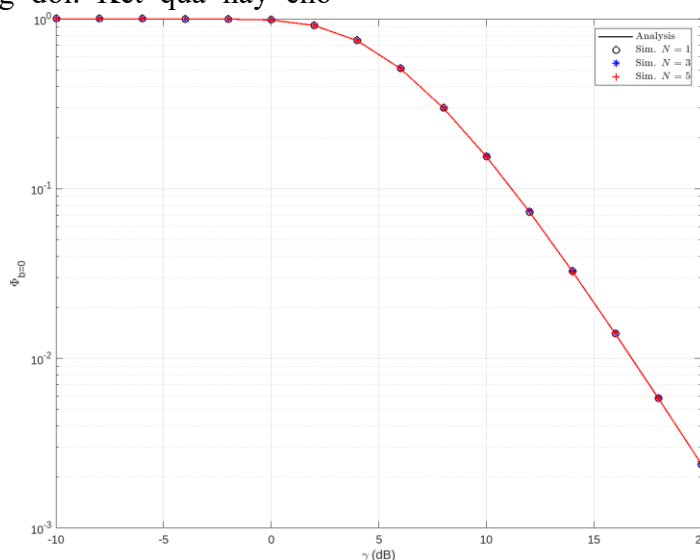
### 4.2 Ảnh hưởng của SNR trung bình và số lượng nút cảm biến

Tương tự, Hình 4 và Hình 5 trình bày kết quả khảo sát ảnh hưởng của SNR trung bình và số lượng nút cảm biến.

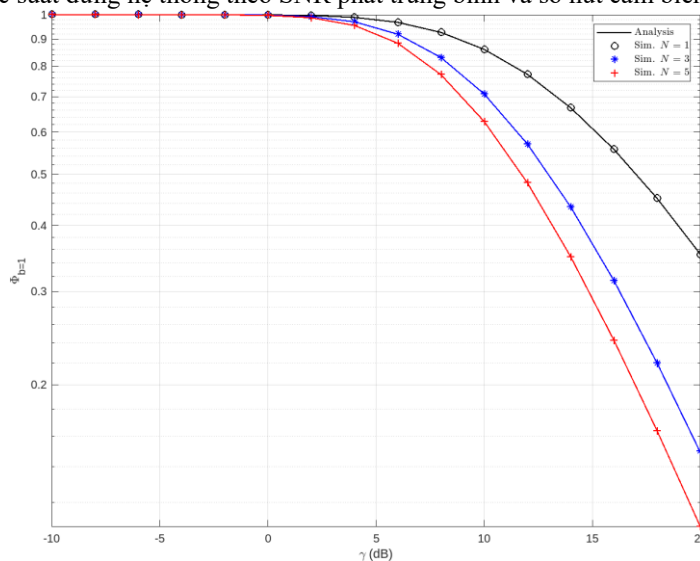
Ở Hình 4, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của tỉ số tín hiệu trên nhiễu phát trung bình và số lượng thiết bị cảm biến đến hiệu năng của hệ thống thông qua xác suất dừng hệ thống cho trường hợp gửi bit  $b = 0$ . Từ đồ thị, chúng ta có thể thấy rằng khi SNR trung bình tăng lên thì xác suất dừng hệ thống giảm. Tuy nhiên, khi số lượng thiết bị cảm biến tăng lên thì xác suất dừng hệ thống không đổi. Kết quả này cho

chúng ta thấy ta có thể tăng hiệu năng của hệ thống bằng cách tăng công suất phát.

Ở Hình 5, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của tỉ số tín hiệu trên nhiễu phát trung bình và số lượng thiết bị cảm biến đến hiệu năng của hệ thống thông qua xác suất dừng hệ thống cho trường hợp gửi bit  $b = 1$ . Từ đồ thị, chúng ta có thể thấy rằng khi SNR trung bình cũng như số lượng thiết bị cảm biến tăng lên thì xác suất dừng hệ thống giảm. Điều này có nghĩa là chúng ta có thể tăng hiệu năng của hệ thống bằng cách tăng số lượng thiết bị cảm biến hoặc nâng cao công suất phát.



**Hình 4.** Xác suất dừng hệ thống theo SNR phát trung bình và số nút cảm biến  $N$  với  $b = 0$ .



**Hình 5.** Xác suất dừng hệ thống theo SNR phát trung bình và số nút cảm biến  $N$  với  $b = 1$ .

Kết quả từ các Hình 2-5 ta thấy sự trùng khớp rất tốt giữa kết quả mô phỏng và kết quả phân tích, điều này khẳng định sự chính xác của biểu thức phân tích.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất một mô hình mạng cảm biến không dây sử dụng kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược và các cơ chế lựa chọn ăng-ten thu và lựa chọn nút cảm biến. Từ mô hình này, chúng tôi đã xây dựng được

biểu thức xác suất dừng hệ thống để khảo sát hiệu năng của hệ thống. Cuối cùng, chúng tôi đã trình bày kết quả số của việc khảo sát ảnh hưởng của những tham số chính lên hiệu năng của hệ thống. Qua đó, chúng tôi kết luận rằng hiệu năng của hệ thống đề xuất có thể được cải thiện bằng cách tăng số lượng ăng-ten hoặc tăng số lượng nút cảm biến. Nói cách khác, việc áp dụng kỹ thuật AmBC sẽ giúp nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng của mạng cảm biến không dây và làm tăng sự kết nối của mạng.

**PHỤ LỤC A:** Chứng minh Định lý 1.

Với bit  $b = 0$ :

$$\Phi_{b=0} = \Pr(\bar{\gamma} | f |^2 < \gamma_{th}) = \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\lambda_3 \bar{\gamma}}}\right)^K. \quad (A-1)$$

Với bit  $b = 1$ :

$$\begin{aligned} \Phi_{b=1} &= \Pr(\eta^2 \bar{\gamma} | g |^2 | h |^2 < \gamma_{th}) \\ &= \Pr\left(|g|^2 < \frac{\gamma_{th}}{\eta^2 \bar{\gamma} |h|^2}\right) \\ &= \frac{1}{\lambda_3} \int_0^{\infty} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\lambda_2 \eta^2 \bar{\gamma} x}}\right)^N e^{-\frac{x}{\lambda_3}} dx \\ &= 1 + \sum_{i=1}^N \frac{N!(-1)^i}{i!(N-i)!} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\gamma_{th} i}{\lambda_2 \eta^2 \bar{\gamma} x} - \frac{x}{\lambda_3}} dx \\ &= 1 + 2 \sum_{i=0}^N \frac{N!(-1)^i}{i!(N-i)!} \sqrt{\frac{\gamma_{th} i}{\lambda_2 \lambda_3 \eta^2 \bar{\gamma}}} \mathcal{K}_1 \left(2 \sqrt{\frac{\gamma_{th} i}{\lambda_2 \lambda_3 \eta^2 \bar{\gamma}}}\right). \end{aligned} \quad (A-2)$$

Lưu ý, trong tính toán (A-2) này chúng tôi sử dụng các công thức (21) và (22) của công trình [13]. Định lý 1 đã được chứng minh.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Gartner. (2017, February 7). Gartner Says 8.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016. Available: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3598917>
- [2] Newman, C., Edwards, D., Martek, I., Lai, J., Thwala, W. D., & Rillie, I. (2021). Industry 4.0 deployment in the construction industry: a bibliometric literature review and UK-based case study. *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(4), 557-580.
- [3] Finkenzeller, K. (2010). *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*. John Wiley & Sons.
- [4] Mikhaylov, K., Petäjäjärvi, J., Haapola, J., & Pouttu, A. (2017). D2D communications in LoRaWAN low power wide area network: From idea to empirical validation. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 737-742. IEEE.
- [5] Gislason, D. (2008). *Zigbee wireless networking*. Newnes.
- [6] Bisdikian, C. (2001). An overview of the Bluetooth wireless technology. *IEEE Communications magazine*, 39(12), 86-94.



- [7] Lietzen, J., Liljemark, A., Duan, R., Jäntti, R., & Viikari, V. (2020). Polarization conversion-based ambient backscatter system. *IEEE Access*, 8, 216793-216804.
- [8] Liu, V., Parks, A., Talla, V., Gollakota, S., Wetherall, D., & Smith, J. R. (2013). Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air. *ACM SIGCOMM computer communication review*, 43(4), 39-50.
- [9] Parks, A. N., Liu, A., Gollakota, S., & Smith, J. R. (2014). Turbocharging ambient backscatter communication. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44(4), 619-630.
- [10] Li, D., & Liang, Y. C. (2018). Adaptive ambient backscatter communication systems with MRC. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(12), 12352-12357.
- [11] Zhao, W., Wang, G., Fan, R., Fan, L. S., & Atapattu, S. (2018). Ambient backscatter communication systems: Capacity and outage performance analysis. *IEEE access*, 6, 22695-22704.
- [12] Xing, S., Ding, M., & Lin, Z. (2018). Outage capacity analysis for ambient backscatter communication systems. In *2018 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, 1-6. IEEE.
- [13] Ha, D. B., Tran, D. D., Truong, T. V., & Vo, N. V. (2016). Physical layer secrecy performance of energy harvesting networks with power transfer station selection. In *2016 IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, 451-456. IEEE.