

NGHIÊN CỨU TÍCH HỢP CÔNG NGHỆ UWB VÀ LORA TRONG TRUYỀN DẪN DỮ LIỆU CHO HỆ ROBOT CHỦ - TỐ

RESEARCH ON INTEGRATION OF UWB AND LORA TECHNOLOGIES
FOR DATA TRANSMISSION WITHIN MASTER-SLAVE ROBOTIC SYSTEMS

Tống Thị Lý¹, Nguyễn Hùng Minh¹, Lê Thị Lua¹,
Nguyễn Bá Khả¹, Hồ Minh Trung^{1,2,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.182>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu giải pháp kết hợp UWB và LoRa nhằm tối ưu hóa truyền thông cho hệ thống robot chủ-tớ song phương trong môi trường nhiều vật cản. Trong thực tế, việc tăng khoảng cách truyền dẫn thường làm giảm băng thông và tốc độ tín hiệu. Dù LoRa hỗ trợ truyền xa tốt, công nghệ này vẫn chưa đáp ứng đầy đủ yêu cầu về tốc độ và độ ổn định khi mở rộng phạm vi. Do đó, nghiên cứu đề xuất hệ thống lai: tận dụng UWB để định vị chính xác, truyền dữ liệu tốc độ cao và dùng LoRa để đảm bảo duy trì kết nối ở tầm xa. Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng truyền dữ liệu trong phạm vi 50m, qua đó cho thấy tiềm năng ứng dụng của hệ thống trong các hệ robot hoạt động trong môi trường nguy hiểm.

Từ khóa: Robot di động; Long Range, Môi trường độc hại, Ultra-wideband.

ABSTRACT

This paper investigates a hybrid communication solution combining UWB and LoRa to optimize data transmission for bilateral master-slave robot systems in obstacle-dense environments. In practice, increasing transmission distances typically leads to reduced bandwidth and signal speeds. Although LoRa excels in long-range transmission, it often falls short of meeting speed and stability requirements as the range extends. Consequently, this study proposes a hybrid system: leveraging UWB for high-precision positioning and high-speed data transfer, while utilizing LoRa to ensure robust connectivity over long distances. The research results demonstrate effective data transmission within a 50-meters range, highlighting the system's potential for mobile robots operating in hazardous environments.

Keywords: Mobile Robot, Long Range, Hazardous Environment, Ultra-wideband.

¹Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Viện Hóa học Môi trường Quân sự, Binh chủng Hóa học

*Email: 2024800002@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/12/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 23/3/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Hệ thống robot vận hành từ xa song phương cho phép con người điều khiển thiết bị trong môi trường nguy hiểm như xử lý chất độc hại [1], dịch vụ [2] và y tế [3]. Dù linh hoạt, hệ thống này đối mặt với thách thức lớn về độ trễ, nhiễu và băng thông. Trong môi trường đô thị, suy hao đường truyền có thể giảm tín hiệu tới 30dB khi khoảng cách tăng gấp đôi [5]. Nhiễu đồng tần ở dải 2,4GHz làm

giảm tốc độ dữ liệu [6], trong khi giao thức LoRa có độ trễ từ 100 ms đến vài giây [7]. Hiện nay, các công nghệ như MIMO hay Edge computing chủ yếu tối ưu cho tính toán hơn là truyền tải ảnh/video thời gian thực qua vật cản [4].

Để tối ưu hiệu suất điều khiển giữa robot chủ và robot tớ, nhiều giải pháp truyền thông đã được nghiên cứu. Việc kết hợp Wi-Fi và LoRa theo mô hình MIMO giúp giảm trễ cho dữ liệu nhỏ (5,4kB) nhưng thất bại khi truyền ảnh

(19,2kB) và giới hạn phạm vi ở 16m [8]. Trong khi đó, LoRa/LoRaWAN có thể phủ sóng tới 1km với tỷ lệ mất gói dưới 10% [9], nhưng khi truyền dữ liệu lớn, tỷ lệ này tăng lên 20 - 30% do suy hao tín hiệu [9]. Dù LoRa sở hữu ưu điểm về tầm xa (lên đến 15km [10]) và khả năng chống nhiễu tốt [11], nhưng tốc độ dữ liệu thấp (0,3 - 50kbps [12]) cùng tình trạng nhiễu đồng kênh khi tăng thiết bị [13] khiến nó chưa đáp ứng được yêu cầu băng thông cao cho video hoặc điều khiển thời gian thực. Do đó, việc phát triển các giải pháp bổ sung để tối ưu hóa kênh truyền cho robot song phương là vô cùng cần thiết.

Trong nghiên cứu này, bên cạnh những phương thức truyền thông phổ biến như LoRa, Wifi 5G, chúng tôi đề xuất sử dụng phương thức truyền thông công nghệ UWB, cho phép tận dụng ưu điểm của giao thức: UWB với khả năng định vị chính xác cao và truyền được các gói dữ liệu dung lượng lớn, trong khi đó LoRa với khả năng truyền tín hiệu ở khoảng cách xa. Ultra-Wideband (UWB) là công nghệ không dây có độ chính xác định vị cao, đạt $\pm 10\text{cm}$ nhờ đo thời gian bay (ToF) với độ phân giải cao [14]. UWB hoạt động ở dải tần 3,1 - 10,6GHz với công suất thấp ($< -41,3\text{dBm/MHz}$), giảm nhiễu và cải thiện khả năng truyền trong môi trường phức tạp [15]. Ngoài ra, với tốc độ truyền dữ liệu lên đến 675Mbps, UWB phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu băng thông lớn [16]. Do đó, trong bài báo này chúng tôi đề xuất một phương thức truyền thông tối ưu hơn khi sử dụng mạng UWB. Chuẩn mới cho thấy sự cải tiến rõ rệt về khoảng cách truyền, dung lượng dữ liệu truyền tải, cũng như tốc độ truyền so với các nghiên cứu trước đây. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống có thể duy trì kết nối ổn định trong môi trường có nhiễu cao và khoảng cách xa, đồng thời đáp ứng tốt yêu cầu về thời gian thực trong điều khiển robot. Bài báo có những đóng góp quan trọng như sau:

- Xây dựng mạng truyền thông LoRa cho hệ robot song phương
- Xây dựng mạng truyền thông theo chuẩn UWB cho hệ robot song phương
- Kiểm nghiệm và so sánh hiệu suất truyền thông giữa các công nghệ UWB và LoRa trên mô hình thực nghiệm
- Đề xuất thuật toán xác định vị trí khi sử dụng UWB
- Đề xuất kết hợp UWB và Lora tăng khoảng cách truyền và tăng tốc độ truyền, độ chính xác

Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau. Phần II mô tả về môi trường truyền thông. Phần III Thiết kế hệ thống. Phần IV Trình bày về kết quả thực nghiệm. Cuối cùng, kết luận và các phương án phát triển nghiên cứu.

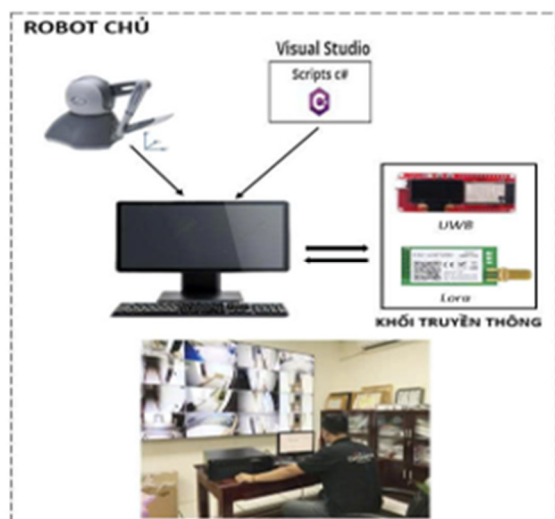
2. HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG TÍN HIỆU ĐIỀU KHIỂN

Môi trường truyền thông tín hiệu điều khiển song phương cánh tay robot di động tại các khu vực nguy hiểm như nhà máy hóa chất, cơ sở xử lý vật liệu nổ hay trong các khu vực xảy ra sự cố hóa chất cần tiến hành việc lấy mẫu, thậm chí là cứu hộ, cứu nạn... hệ thống truyền thông đóng vai trò thiết yếu để đảm bảo khả năng vận hành chính xác, liên tục và an toàn. Tuy nhiên, sự hiện diện của nhiều vật cản vật lý, vật cản hóa học gây ra những cản trở lớn đối với quá trình truyền thông điều khiển robot song phương. Các vật cản vật lý gây ra hiện tượng suy giảm biên độ tín hiệu gốc khi truyền từ robot - chủ điều khiển đến robot - tớ và ngược lại. Hệ quả là độ trễ trong truyền tín hiệu tăng lên bất thường, độ chính xác của tín hiệu lệnh và tín hiệu phản hồi giảm mạnh, dẫn đến nguy cơ mất đồng bộ trong vận hành song phương. Không giống như vật cản vật lý chỉ giới hạn ở sự ngăn cản cơ học, vật cản hóa học bao gồm các lớp bụi mịn đậm đặc, hơi hóa chất bay hơi, và các vùng plasma ion hóa có khả năng tác động trực tiếp lên đặc tính lan truyền của sóng điện từ. Các hạt bụi hoặc phân tử hóa học trong không khí có thể hấp thụ, tán xạ và làm lệch pha tín hiệu truyền dẫn, dẫn đến hiện tượng suy hao năng lượng của sóng. Trong các trường hợp điều khiển thời gian thực yêu cầu độ trễ thấp như thao tác gấp vật liệu nguy hiểm, sự trễ tín hiệu do vật cản có thể gây ra các sai số động học, giảm độ ổn định quỹ đạo thao tác của robot tớ

Hệ thống đo đạc môi trường sử dụng đa dạng các đầu cảm biến với đặc tính dữ liệu và yêu cầu trễ khác nhau để tối ưu hóa việc phân luồng thông tin trên hai giao thức LoRa và UWB. Nhóm băng thông cao (UWB): Máy quét LiDAR 2D có tốc độ 10Hz, tạo dữ liệu $\sim 1,5\text{KB/s}$. Yêu cầu độ trễ thấp (100 - 200ms) để robot nhận diện môi trường và tái tạo bản đồ thời gian thực chính xác. Nhóm dữ liệu thấp (LoRa): Cảm biến phóng xạ SVG2 hoạt động theo nguyên lý đếm tích lũy, cần 1 - 5 giây để đảm bảo độ chính xác. Gói tin nhỏ (50 - 100 byte/s) chỉ chứa chỉ số liều lượng hoặc cảnh báo, không yêu cầu phản hồi tức thời.

Tương tự, thiết bị RAID-M100 dùng trong phân tích hóa học - sinh học bằng phương pháp phổ ion di động cũng yêu cầu thời gian phản ứng từ vài giây, do cần thực hiện chu trình hút mẫu, ion hóa, tách phổ và phân tích đỉnh phổ. Cả hai dạng dữ liệu trên đều không đòi hỏi phản hồi tức thời, do sự thay đổi của môi trường thường diễn ra chậm và mang tính xu hướng. Đối với cảm biến đo nhiệt độ và độ ẩm, tín hiệu đầu ra có định dạng đơn giản (40 bit mỗi chu kỳ) với tốc độ truyền khoảng 30 - 50 byte/s, độ trễ trong khoảng 1 - 5 giây. Nguyên nhân là các

thông số môi trường như nhiệt độ, độ ẩm thường biến đổi chậm và không ảnh hưởng ngay đến quá trình điều khiển chính xác của robot, phù hợp để truyền qua LoRa sau khi được thuật toán nén và đóng gói tối ưu.



Hình 1. Sơ đồ mô tả môi trường truyền thông

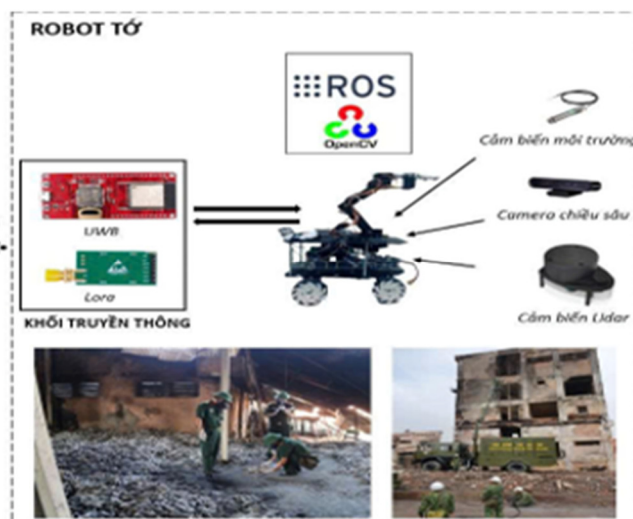
Cảm biến lực (force sensor), thường tích hợp tại các khớp hoặc đầu gắp của robot, cần truyền dữ liệu có dung lượng từ 200 - 300 byte/s với độ trễ rất thấp (100 - 200ms) do dùng trong phản hồi tức thì khi robot tiếp xúc vật thể. Mọi độ trễ vượt quá ngưỡng này đều có thể làm sai lệch lực tác động hoặc gây lỗi trong quá trình điều khiển momen chính xác, đặc biệt trong các ứng dụng thao tác tinh vi hoặc cần độ nhạy cao.

Bảng 1. Thông số truyền thông

Kiểu dữ liệu	Cảm biến	Kích thước gói tin	Yêu cầu độ trễ
Hình ảnh	Máy quét Lidar 2D	1,5 - 2 KB/s	100 - 200ms
Nồng độ phóng xạ	SVG2	50 - 100 byte/s	1 - 5s
Thông số hóa học, sinh học	RAID M100	80 - 120 byte/s	1 - 5s
Nhiệt độ, độ ẩm	DHT22	30 - 50 byte/s	1 - 5s
Cảm biến lực	Force sensor	200 - 300 byte/s	100 - 200ms

Đặc điểm vật lý và logic xử lý nội tại của từng loại cảm biến là cơ sở quan trọng để xác lập độ trễ cho phép. Cụ thể, các cảm biến phục vụ cho chức năng phản hồi thời gian thực (Lidar, force sensor) yêu cầu độ trễ dưới 200ms, trong khi các cảm biến đo môi trường hoặc tác nhân độc hại (phóng xạ, hóa học, nhiệt độ, độ ẩm) có thể hoạt động hiệu quả với độ trễ dao động từ 1 đến 5 giây. Việc phân chia này là nền tảng quan trọng để triển khai mô hình

truyền thông phân lớp, trong đó công nghệ LoRa được sử dụng cho các tín hiệu dung lượng thấp và yêu cầu độ trễ trung bình, còn UWB đảm nhận dữ liệu khối lượng lớn và yêu cầu phản hồi tức thời.

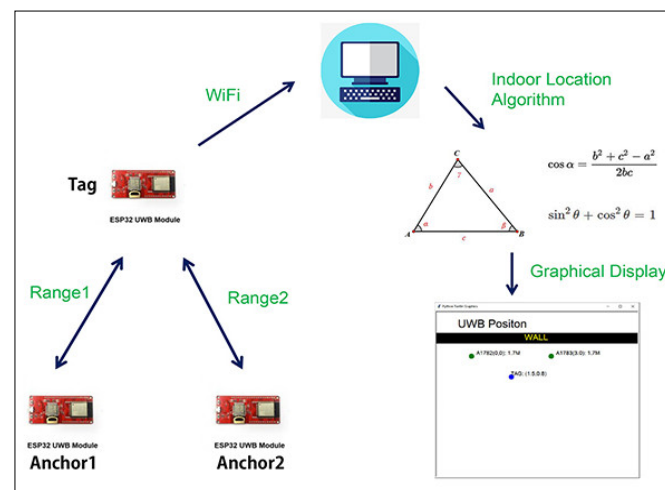


3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG

3.1. Thiết kế mạch truyền nhận tín hiệu

Sơ đồ khối hệ truyền nhận định vị, xác định khoảng cách UWB

Trong hình 2 cấu hình hệ thống định vị bao gồm ba mô-đun ESP32 UWB, được chia thành hai điểm neo cố định và một thẻ di động. 2 module được đặt tại các vị trí xác định trước, đóng vai trò làm mốc tham chiếu, trong khi 1 module được gắn vào đối tượng di chuyển để xác định vị trí của nó trong không gian thông qua phép đo khoảng cách với các điểm neo.

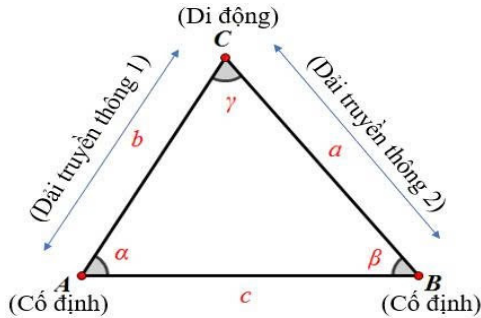


Hình 2. Sơ đồ định vị vị trí

Sử dụng thuật toán định để tính toán tọa độ chính xác của module di động trong không gian. Hiển thị tọa độ của đối tượng di chuyển lên giao diện người điều khiển.

3.2. Thuật toán định hướng mặt phẳng

Chúng ta hãy giả sử rằng cả ba mô-đun UWB đều có cùng chiều cao nằm ngang. UWB có thể lấy khoảng cách giữa Tag và hai neo, cộng với khoảng cách của hai neo được đặt trước, chúng ta có thể lấy chiều dài của ba cạnh của một tam giác.



Hình 3. Sơ đồ khối truyền nhận tín hiệu định vị

Từ hình 3, khoảng cách giữa ba cạnh của tam giác cho phép chúng ta tính toán tọa độ của điểm "C".

$$\cos \alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \quad (1)$$

Từ (1), sử dụng định luật cosin để tính cosin của Góc "A", ta có:

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \quad (2)$$

Áp dụng định lý Pitago ta có: Nếu đặt điểm "A" làm điểm gốc của hệ tọa độ (0,0), thì sẽ tìm được điểm là C (bcosα, bsina). Trong nghiên cứu này, việc xác định vị trí được thực hiện dựa trên nguyên lý đo thời gian truyền (Time of Flight - ToF) của tín hiệu UWB kết hợp với mô hình hình học tam giác. Các phương trình (1) và (2) được xây dựng dựa trên định lý cosin, đóng vai trò là nền tảng để xác định tọa độ của đối tượng trong mặt phẳng. Phương pháp này không nhằm để xuất một thuật toán định vị mới, mà là ứng dụng thuật toán định vị dựa trên ToF, với ưu điểm tính toán đơn giản, phù hợp với năng lực xử lý của vi điều khiển ESP32 trong các bài toán thời gian thực. Việc lựa chọn phương pháp này giúp giảm độ phức tạp tính toán so với các phương pháp định vị nâng cao, đồng thời vẫn đảm bảo đáp ứng yêu cầu xác định vị trí trong phạm vi nghiên cứu.

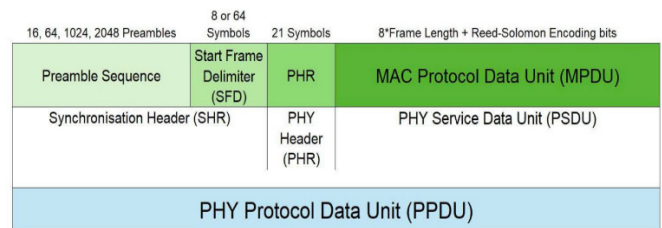
Nhận xét 1: Thuật toán định hướng mặt phẳng sử dụng dữ liệu từ cảm biến UWB để xác định vị trí chính xác của một đối tượng trong không gian ba chiều. Phương pháp này dựa trên việc tính toán góc giữa các vector từ các cảm biến đến điểm cần xác định. Bằng cách kết hợp thuật toán này với thông tin từ các cảm biến UWB, chúng ta có thể nâng cao độ chính xác trong việc xác định vị trí và hướng của đối tượng, đặc biệt trong các môi trường phức tạp có nhiều vật cản.

3.3. Thiết kế mạch phần cứng

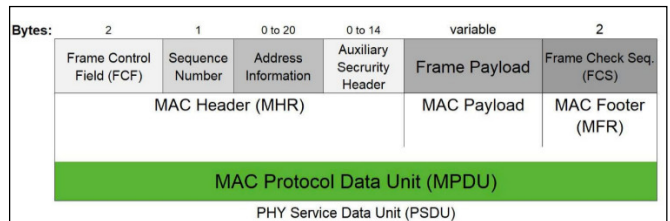
Mạch truyền nhận tín hiệu UWB

* Thiết bị vi điều khiển ESP32 WROVER: Sử dụng chip ESP32-D0WDQ6 mạnh mẽ cho các dự án IoT phức tạp. Thiết bị sở hữu 18 chân GPIO (hỗ trợ PWM), 12 chân analog input và đa dạng cổng giao tiếp (UART, SPI, I2C, I2S). Với bộ nhớ Flash 16MB và SRAM 8 MB, module đáp ứng tốt các ứng dụng yêu cầu xử lý dữ liệu lớn.

* Mạch nhận tín hiệu: ESP32-WROVER giao tiếp với chip UWB DW1000 qua giao thức SPI. Các kết nối chính bao gồm: GPIO 19 (MOSI), GPIO 23 (MISO), GPIO 18 (CS) và GPIO 4 (RSTn). Module DW1000 được cấp nguồn trực tiếp 3,3VDC từ ESP32.



Hình 4. Cấu trúc PPDU theo chuẩn IEEE 802.15.4-2011



Hình 5. Định dạng khung MAC theo chuẩn IEEE 802.15.4-2011

* Mạch truyền tín hiệu: Trung tâm xử lý tín hiệu là mạch ESP32-WROVER kết nối với module UWB DW1000. Tương tự như mạch nhận tín hiệu, hai chân địa chỉ truyền nhận dữ liệu GPIO 19 (MOSI) và GPIO 23 (MISO) của ESP32-WROVER nối với 2 chân MOSI, MISO trên module DW1000. Chân CS và RSTn trên DW1000 kết nối với GPIO 18 và GPIO 4 có nhiệm vụ điều khiển chọn chip và reset, module DW1000 được cấp nguồn 3,3VDC từ chân VCC, GND của ESP32-WROVER.

* Giao thức: Để thực nghiệm truyền thông UWB trên nhằm đánh giá hiệu suất giao tiếp thời gian thực với độ trễ thấp và độ tin cậy cao, việc hiểu giao thức truyền thông UWB là cần thiết để tái hiện chính xác quá trình truyền dữ liệu qua kênh vô tuyến. Giao thức này bao gồm các thành phần như điều chế tín hiệu, quản lý truy cập kênh, xử lý lỗi, đồng bộ hóa và tổ chức dữ liệu qua khung dữ liệu. Trong phạm vi nghiên cứu, nghiên cứu tập trung vào mô phỏng cấu trúc khung dữ liệu UWB, một thành phần cốt lõi của giao thức, để tổ chức dữ liệu

hiệu quả. Theo [17], PHY Protocol Data Unit (PPDU) là khung dữ liệu hoàn chỉnh ở tầng vật lý (Physical Layer) được truyền qua không khí trong giao thức UWB của DW1000. Quy trình truyền dữ liệu UWB qua các tầng giao thức trong bảng 2.

Bảng 2. Quy trình truyền dữ liệu UWB

1	Tầng MAC tạo MPDU gồm MHR, Payload và MFR, biểu diễn dữ liệu ở dạng bit.
2	Tầng PHY nhận MPDU, bổ sung bit sửa lỗi (Reed-Solomon) để tạo PSDU, PSDU vẫn ở dạng bit.
3	Tầng PHY ráp các thành phần sau thành một khung PPDU hoàn chỉnh: + SHR: Bao gồm Preamble (16 - 4096 symbols) và SFD (8 - 64 symbols), được tạo ra dưới dạng symbol để đồng bộ tín hiệu. + PHR: Được mã hóa thành 21 symbols, chứa thông tin về độ dài PSDU và các thông số khác. + PSDU: Các bit trong PSDU được mã hóa thành symbol bằng cách điều chế tín hiệu (BPM-BPSK).
4	+ Sau khi PPDU được tạo (dưới dạng một chuỗi symbol liên tục), toàn bộ khung PPDU được truyền qua không khí bằng các xung UWB với tần số PRF (16MHz hoặc 64MHz). + Thiết bị nhận sẽ giải mã chuỗi symbol này để lấy lại dữ liệu bit gốc trong PSDU, sau khi đã đồng bộ bằng SHR và đọc thông tin điều khiển từ PHR.

Sau khi tạo PSDU, tầng PHY điều chế các bit thành symbol để ghép thành khung PPDU và truyền qua không khí. Thời gian truyền phụ thuộc vào tốc độ dữ liệu và tần số PRF. Theo nghiên cứu [17], thời gian truyền cho từng symbol tương ứng với các cấu hình cụ thể, được trình bày chi tiết trong bảng 3.

Bảng 3. Thời gian gửi mỗi symbol

PRF (MHz)	Data Rate (Mbps)	SHR (ns)	PHR (ns)	Data (ns)
16	0,11	993,59	8205,13	8205,13
16	0,85	993,59	1025,64	1025,64
16	6,81	993,59	1025,64	128,21
64	0,11	1017,63	8205,13	8205,13
64	0,85	1017,63	1025,64	1025,64
64	6,81	1017,63	1025,64	128,21

Để đáp ứng các yêu cầu truyền dữ liệu cho robot, bao gồm đáp ứng thời gian thực, truyền khoảng cách xa và tiết kiệm năng lượng, cấu hình kênh tối ưu được chọn dựa trên bảng 3 về chip DW1000 là PRF = 16MHz và tốc độ dữ liệu = 0,11Mbps. Cấu hình này phù hợp vì tốc độ dữ liệu thấp 0.11 Mbps tập trung năng lượng trên mỗi bit, hỗ trợ

truyền khoảng cách xa trong không gian rộng, đồng thời PRF 16MHz giảm số lượng xung phát ra, tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng để kéo dài thời gian hoạt động của robot. Mặc dù thời gian truyền symbol dài (8205,13ns cho phần dữ liệu), cấu hình này vẫn đảm bảo đáp ứng thời gian thực nhờ ưu tiên các yêu cầu khác. Cụ thể, thời gian truyền các thành phần khung PPDU bao gồm SHR (993,59ns) đảm bảo đồng bộ hóa, PHR (8205,13ns) chứa thông tin điều khiển và Data (8205,13ns) truyền dữ liệu, đáp ứng hiệu quả các yêu cầu của bài toán.

Nhật xét 2: Cấu hình kênh tối ưu được chọn cho robot không chỉ đáp ứng các yêu cầu về truyền dữ liệu như thời gian thực và khoảng cách xa, mà còn đảm bảo tiết kiệm năng lượng. Với PRF 16MHz và tốc độ dữ liệu 0,11Mbps, hệ thống có thể duy trì hiệu suất tốt, tập trung năng lượng trên mỗi bit truyền. Mặc dù thời gian truyền symbol dài, cấu hình này vẫn đảm bảo đáp ứng các yêu cầu thời gian thực nhờ vào việc ưu tiên những yếu tố quan trọng khác, như thời gian truyền các thành phần khung PPDU, bao gồm SHR, PHR và Data, được thiết kế để tối ưu hóa hiệu suất truyền tải.

Mạch truyền nhận tín hiệu LoRa

* IC (chip) truyền thông vô tuyến LoRa: IC (chip) truyền thông vô tuyến LoRa bao gồm các chip SX1276 và SX1278 do Semtech sản xuất. Các module Ra-01 và Ra-02 được trang bị sẵn chip SX1276 hoặc SX1278 bên trong. Người dùng chỉ cần kết nối các chân SPI (MOSI, MISO, SCK, NSS, DIO0, RESET) với vi điều khiển như STM32, Arduino hoặc ESP32 là có thể sử dụng ngay. Hai cụm TCXO và XTAL trong Hình 7 là loại bộ tạo dao động tần số tham chiếu (Frequency Reference) dùng cho chip LoRa (như SX1278, SX1276...). Chúng là nguồn tạo tần số chuẩn, giúp mạch vô tuyến hoạt động chính xác.

* Ba tham số chính trong giao thức LoRa: Hệ thống LoRa được tối ưu hóa dựa trên ba tham số chính: Hệ số trải phổ (SF), Tỷ lệ mã hóa (CR) và Băng thông (BW) nhằm cân bằng giữa tầm xa, tốc độ và khả năng chống nhiễu. Trong nghiên cứu này, hệ thống ưu tiên tầm xa (1 - 5km) và độ bền vững cho các dữ liệu nhạy cảm bằng cách duy trì tốc độ truyền thấp (~100bps) để tiết kiệm năng lượng. Hệ số trải phổ (SF): Nghiên cứu khảo sát hai mức cực trị là SF = 6 (tốc độ cao, yêu cầu SNR > -5dB) và SF = 12 (tốc độ thấp, hỗ trợ thu tín hiệu yếu với SNR tới -20dB). Tỷ lệ mã hóa (CR): Là tỉ lệ giữa bit dữ liệu gốc và tổng số bit sau khi thêm các bit kiểm tra lỗi. Các bit bổ sung này cho phép bộ thu tự sửa lỗi nhỏ mà không cần truyền lại gói tin, giúp tăng cường độ tin cậy của đường truyền.

Bảng 4. Ảnh hưởng của CR đến đường truyền

CodingRate (RegTxCfg1)	Cyclic Coding Rate	Overhead Ratio	Giải thích
1	4/5	1,25	Tốc độ nhanh, ít chống nhiễu
2	4/6	1,5	Trung bình
3	4/7	1,75	Ổn định hơn
4	4/8	2	Rất ổn định, chống nhiễu tốt nhất

❖ **BandWide (BW)**

Băng thông là độ rộng của dải tần mà tín hiệu chiếm dụng trong quá trình truyền tải.

+ Băng thông hẹp: Cung cấp ít thông tin, tốc độ truyền chậm nhưng có khả năng truyền xa.

+ Băng thông rộng: Cho phép truyền tải nhiều thông tin hơn, tốc độ truyền nhanh nhưng khoảng cách truyền sẽ ngắn hơn.

Bảng 5. Ảnh hưởng của thông số BW

Bandwidth	Truyền xa	Tốc độ truyền	Độ nhạy thu
Nhỏ (7,8 - 62,5kHz)	Xa hơn	Chậm hơn	Nhạy hơn (bắt sóng yếu)
Lớn (125 - 500kHz)	Gần hơn	Nhanh hơn	Ít nhạy (dễ mất sóng hơn)

Nhận xét 3: Khi lựa chọn băng thông (BW), cần cân nhắc mục tiêu truyền tải. Nếu ưu tiên là khoảng cách truyền xa và ổn định, băng thông hẹp nên được lựa chọn. Ngược lại, nếu yêu cầu là tốc độ truyền nhanh và khả năng truyền tải khối lượng dữ liệu lớn, băng thông rộng sẽ là sự lựa chọn phù hợp.

* **Cấu trúc gói tín hiệu LoRa**

LoRa truyền preamble bằng các "symbol" đặc biệt (biểu tượng chirp lặp lại), Mặc định: 12 symbol, Có thể thay đổi: từ 6 đến 65535 symbol, độ dài này được lập trình qua thanh ghi PreambleLength trong chip SX1278.

- Một gói LoRa gồm 3 phần: A preamble; An optional header; The data payload

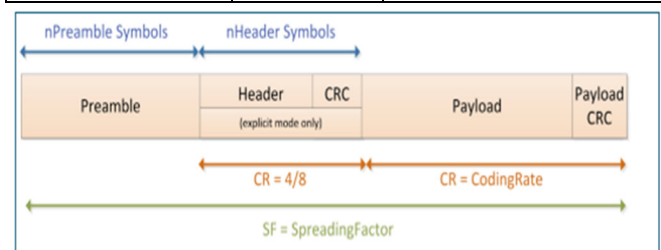
- Preamble là chuỗi tín hiệu mở đầu mỗi gói LoRa

Điều này là do modem LoRa tự động thêm 4 symbol cố định để đồng bộ và hiệu chỉnh, do đó tổng độ dài preamble được tính bằng công thức: $\$Total_preamble = (PreambleLength + 4)\$$. Preamble dài giúp tăng khả năng nhận diện tín hiệu nhưng làm kéo dài thời gian truyền tải. Song song đó, phần Header đóng vai trò mô

tả nội dung gói dữ liệu với hai chế độ hoạt động: Explicit Header: Việc kiểm tra CRC phụ thuộc vào bit RxPayloadCrcOn từ phía phát. Implicit Header: Cả bên phát và thu phải cài đặt đồng nhất giá trị CR và bit RxPayloadCrcOn trong thanh ghi để tránh lỗi và đảm bảo tính chính xác khi truyền tải. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc đồng bộ hóa giá trị của bit này giữa bộ phát và bộ thu để đảm bảo tính chính xác trong quá trình truyền tải dữ liệu.

Bảng 6. Ảnh hưởng của độ dài chuỗi symbol

Mục đích	Độ dài gợi ý	Giải thích
Gửi bình thường	~8 - 12 symbol	Đủ để đồng bộ, dùng mặc định
Môi trường nhiễu, xa	> 16 symbol	Giúp thu dễ nhận hơn
Tiết kiệm năng lượng bên thu (duty cycle thấp)	Preamble dài (32 - 100+)	Để thu chỉ "nghe định kỳ" mà vẫn bắt được



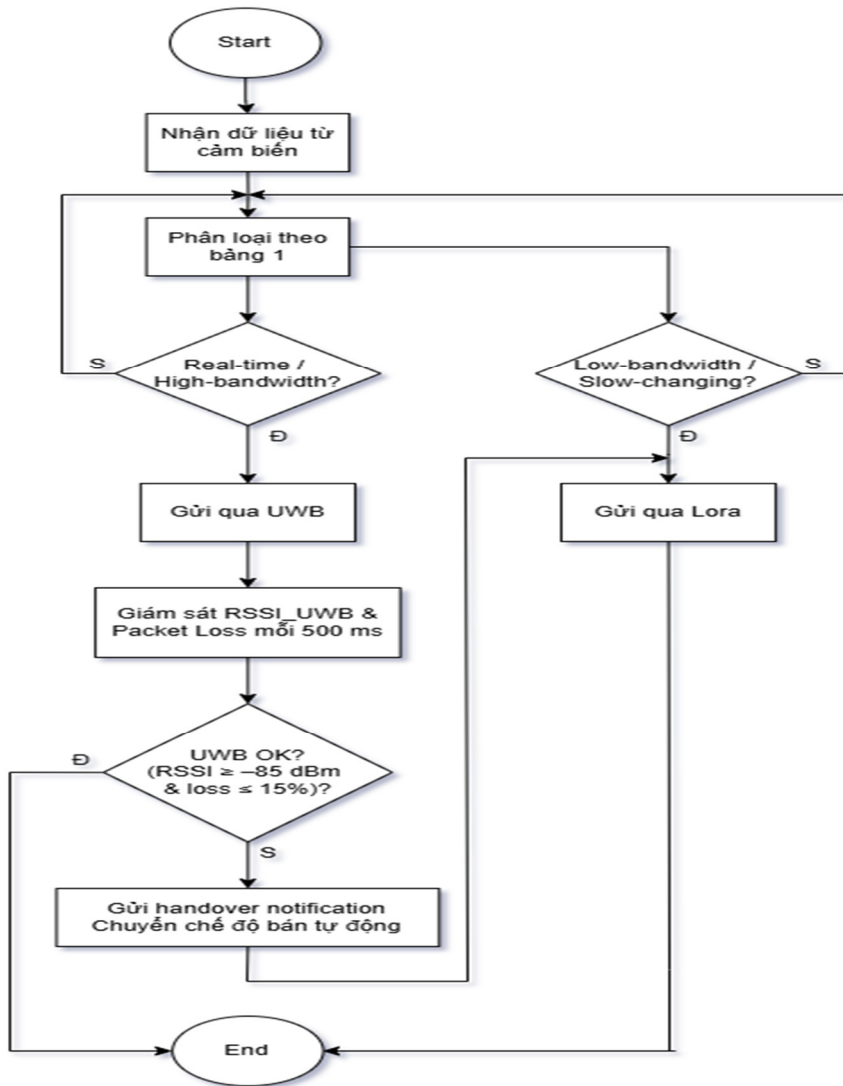
Hình 6. Cấu trúc gói dữ liệu LoRa

3.4. Thuật toán phân luồng dữ liệu và cơ chế chuyển mạch tự động giữa UWB và LoRa

Hệ thống áp dụng mô hình truyền thông phân lớp (**layered hybrid communication**) trên vi điều khiển ESP32-WROVER để tối ưu hóa luồng dữ liệu như hình 7, trong đó:

* **Phân luồng dữ liệu gồm UWB (Real-time):** Đảm nhận dữ liệu dung lượng lớn và yêu cầu độ trễ thấp (100 - 200ms) gồm LiDAR (1,5 - 2kB/s) và cảm biến lực (200 - 300 byte/s). Đồng thời, thực hiện định vị ToF với độ chính xác $\pm 10\text{cm}$. **LoRa (Dự phòng & Dữ liệu thấp):** Truyền dữ liệu môi trường biến đổi chậm (phóng xạ, hóa học, nhiệt ẩm) với độ trễ cho phép 1 - 5s và làm kênh điều lệnh dự phòng khi khoảng cách > 100m.

* **Cơ chế chuyển mạch tự động (Handover):** Hệ thống giám sát RSSI và tỷ lệ mất gói (packet loss) của UWB để thực hiện chuyển mạch. Kích hoạt khi $RSSI < -85\text{dBm}$ hoặc $packet\ loss > 15\%$ trong 3 gói liên tiếp. Hệ thống sẽ chuyển các dữ liệu quan trọng sang LoRa và thông báo cho robot chủ chuyển sang chế độ bán tự động. Khi $RSSI > -75\text{dBm}$ và $packet\ loss < 5\%$ trong 5 gói liên tiếp, hệ thống sử dụng cơ chế **make-before-break** để chuyển ngược lại mà không mất dữ liệu.



Hình 7. Lưu đồ thuật toán phân luồng dữ liệu và cơ chế chuyển mạch UWB-LoRa

4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

4.1. Thiết lập kịch bản thử nghiệm

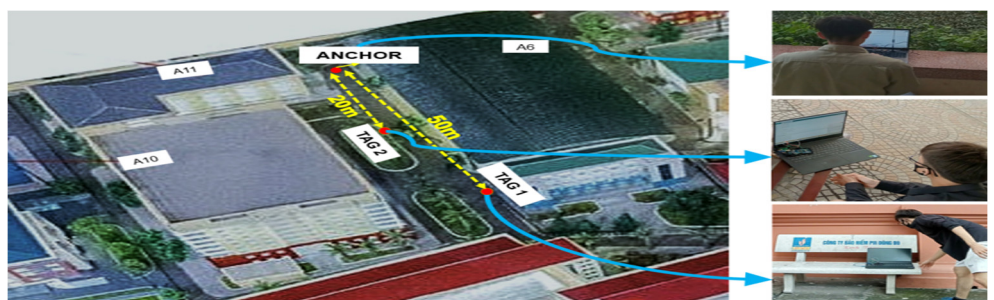
Trong các kịch bản thử nghiệm này, nhóm nghiên cứu đã tập trung vào việc đánh giá mối quan hệ giữa tốc độ truyền dữ liệu và khoảng cách truyền tín hiệu của các mô-đun UWB E32 và LoRa. Để đảm bảo tính khả thi và độ chính xác của các kết quả thu được, kịch bản thử nghiệm đã được xây dựng trong điều kiện môi trường thực tế, với kích thước gói dữ liệu cố định là 50 byte. Kịch bản đầu tiên được thực hiện trên mặt phẳng không có vật cản, cho phép tín hiệu truyền đi tự do mà không bị ảnh hưởng. Kịch bản thứ hai

tập trung vào việc đo tín hiệu trên mặt phẳng có vật cản, giúp phân tích khả năng xuyên thấu và độ ổn định của tín hiệu khi có sự can thiệp. Cuối cùng, kịch bản thứ ba được thiết kế để đo tín hiệu giữa các tầng của tòa nhà, nhằm đánh giá hiệu suất truyền thông trong môi trường phức tạp với sự thay đổi độ cao.

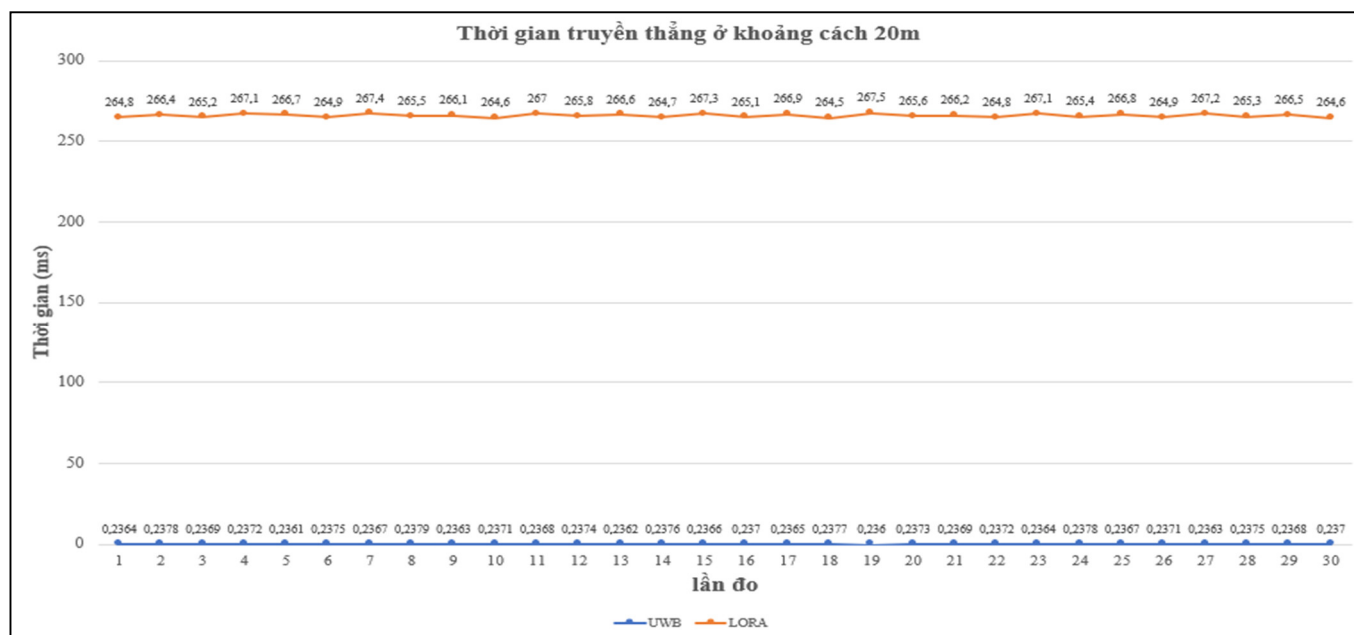
- *Khảo sát hiệu suất truyền trên một mặt phẳng không có vật cản*

Khoảng cách giữa hai thiết bị UWB E32 và hai thiết bị LoRa được thay đổi từ 20m đến 50m. Để đo lường thời gian truyền dữ liệu, nhóm nghiên cứu sử dụng một đồng hồ đo chính xác cao, kết hợp với lập trình kiểm tra thời gian gửi và nhận tín hiệu.

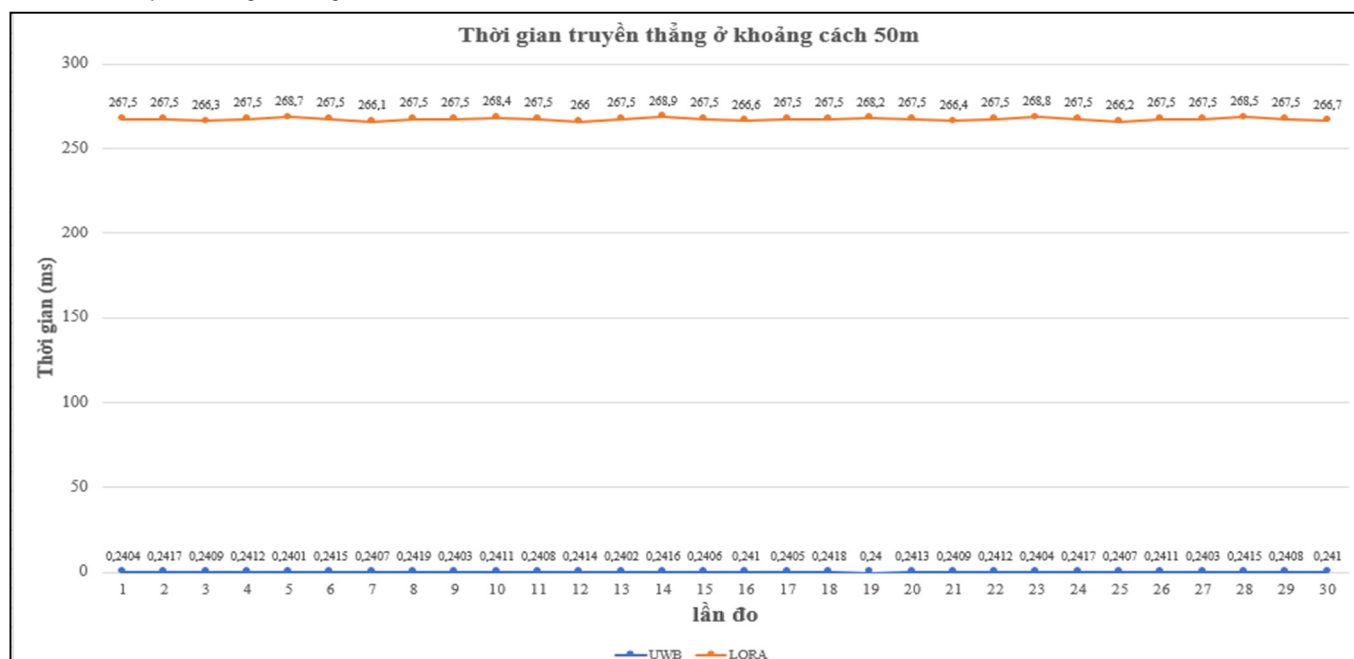
Đối với kịch bản điều khiển từ xa không có vật cản như mô tả ở hình 11, chúng tôi thực hiện truyền dữ liệu ở 2 khoảng cách lần lượt là 20m và 50m, với gói dữ liệu là 50 byte. Kết quả được trình bày ở hình 12 và 13. Thời gian trung bình để giao thức UWB truyền gói dữ liệu 50 bytes ở khoảng cách 20m và 50m lần lượt là $0,23696 \pm 0,0005$ ms và $0,24095 \pm 0,00054$ ms. Đối với giao thức LoRa, thời gian trung bình để truyền 1 gói dữ liệu 50 bytes ở khoảng cách 20m và 50m lần lượt là $265,95 \pm 1,01$ ms và $267,44 \pm 0,77$ ms. Kết quả cho thấy với 30 lần đo, thời gian truyền giữa hai giao thức UWB và LORA chênh lệch khá lớn. Tuy nhiên, khi truyền cùng một giao thức và cùng gói dữ liệu nhưng khoảng cách thay đổi thì thời gian mỗi lần thực nghiệm không có sự thay đổi rõ rệt.



Hình 8. Thực nghiệm đo không vật cản



Hình 9. Kết quả đo thẳng ở khoảng cách 20m



Hình 10. Kết quả đo thẳng ở khoảng cách 50m

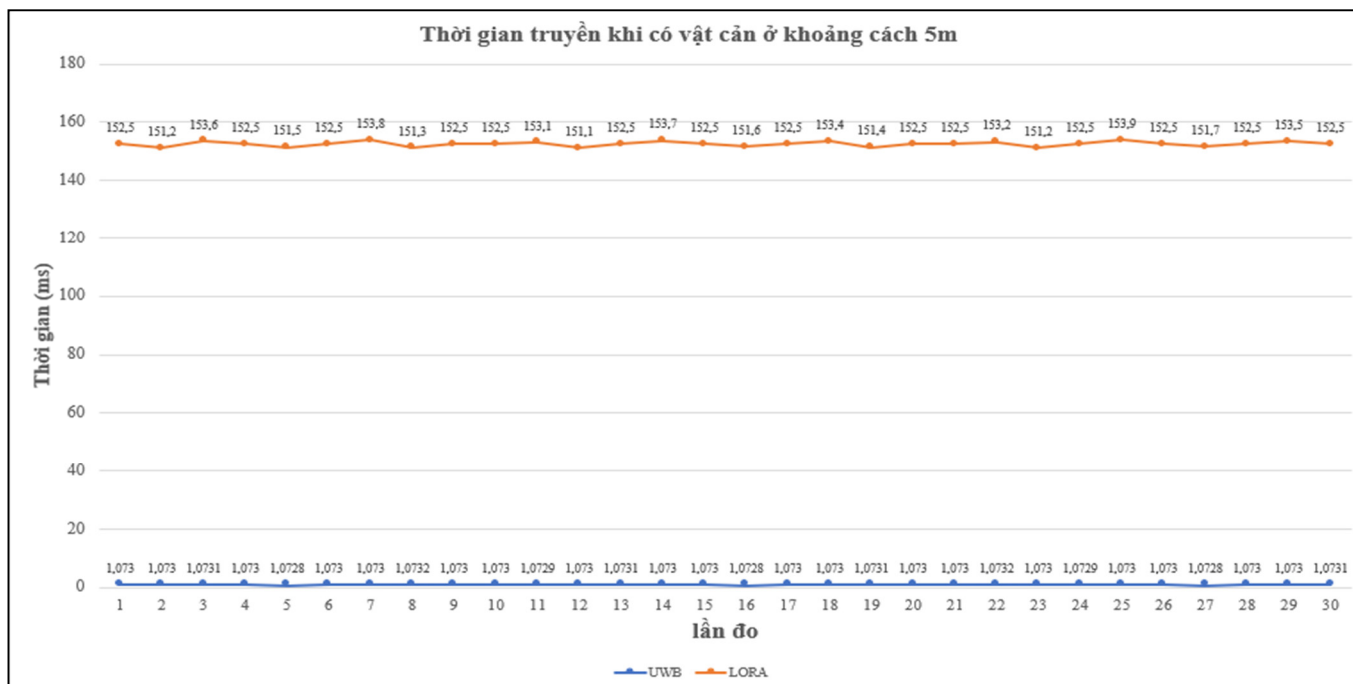
- Khảo sát hiệu suất truyền trên một mặt phẳng có vật cản



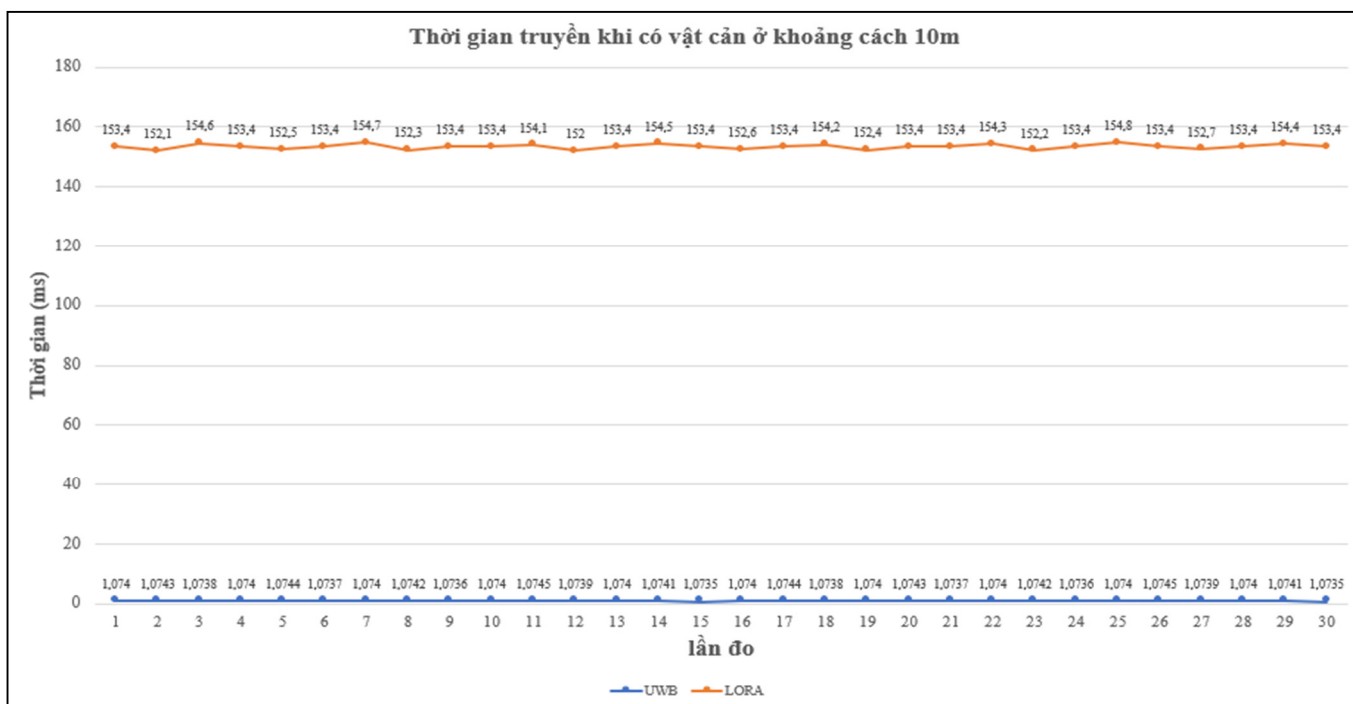
Hình 11. Khu vực khảo sát đo trên mặt phẳng có vật cản

Kịch bản hai được thực hiện ở hai phòng khác nhau, khoảng cách rộng với phạm vi đo khoảng 5m và 10m, gói dữ liệu truyền cố định 4 bytes tương ứng với dạng tín hiệu điều khiển, vị trí đặt thiết bị ở hai phòng trên cùng 1 tầng cách nhau 1 vách tường được mô tả ở hình 11, và thu được kết quả ở hình 12 và 13.

Ở kịch bản thực nghiệm thứ hai, kết quả thu được thời gian truyền trung bình của UWB khi truyền ở 5m và 10m lần lượt là $1,073 \pm 0,0001\text{ms}$ và $1,074 \pm 0,00028\text{ms}$. Còn LoRa có tốc độ truyền ở 5m và 10m lần lượt là $152,47 \pm 0,82\text{ms}$ và $153,40 \pm 0,8\text{ms}$.



Hình 12. Kết quả khảo sát đo trên mặt phẳng có vật cản ở 5m



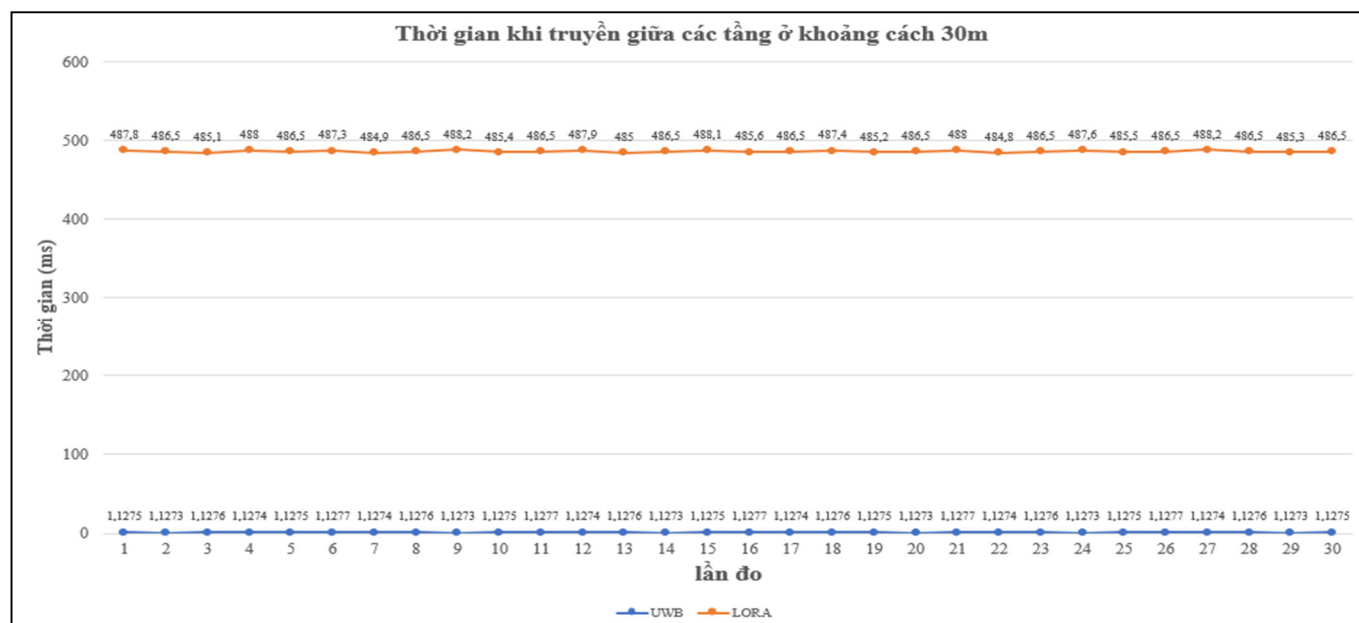
Hình 13. Kết quả khảo sát đo trên mặt phẳng có vật cản ở 10m

- Khảo sát hiệu suất truyền giữa các tầng của tòa nhà

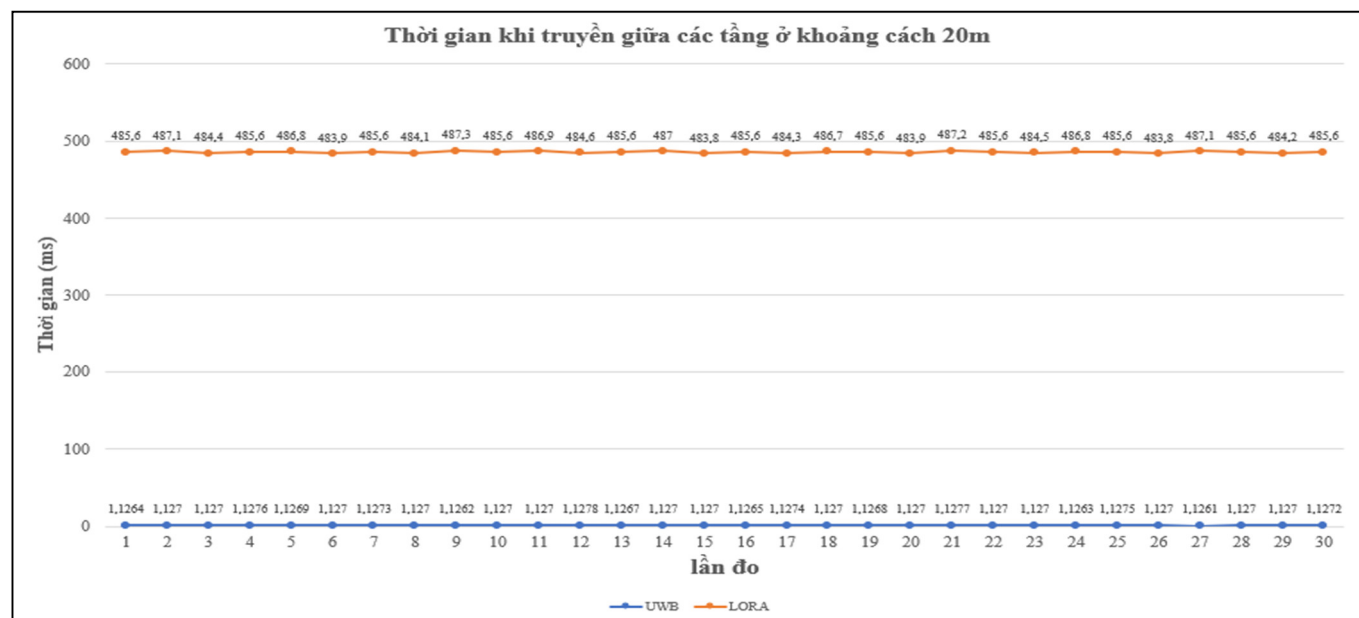
Kịch bản ba được thực hiện đo ở khoảng cách 20m và 30m với độ lớn gói dữ liệu cho một đường truyền là 50 bytes, giữa các tầng của tòa nhà A11 tại Đại học Công nghiệp Hà Nội. Tương tự như các kịch bản trước đó, vị trí đo được mô tả ở hình 14 và kết quả đo được thể hiện qua hình 15 và 16.



Hình 14. Thực nghiệm đo giữa các tầng



Hình 15. Kết quả khảo sát đo giữa các tầng ở khoảng cách 30m



Hình 16. Kết quả khảo sát đo giữa các tầng ở khoảng cách 20m

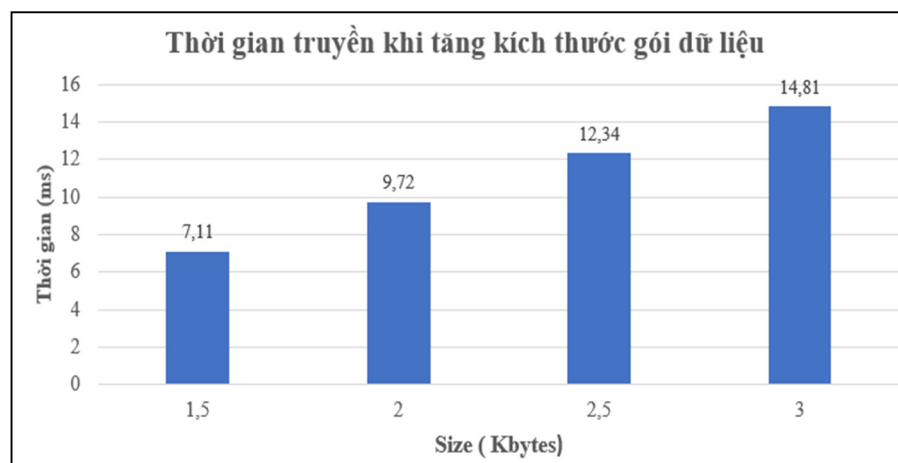
So với kết quả ở những kịch bản đo thẳng, độ trễ tăng rõ rệt. Ở khoảng cách 20m và 30m, thời gian trung bình mỗi đường truyền của UWB lần lượt là $1,12698 \pm 0,00040$ ms và $1,12749 \pm 0,00014$ ms còn LoRa là $485,50 \pm 1,1$ ms và $486,56 \pm 1,1$ ms.

- Khảo sát tốc độ truyền và độ tin cậy khi kích thước dữ liệu gửi đi tăng lên.

Trong thử nghiệm này, nhóm nghiên cứu đánh giá mối quan hệ giữa kích thước gói dữ liệu lớn với tốc độ truyền tín hiệu UWB E32. Khoảng cách thực hiện truyền thông cố định là 50m, không vật cản. Vị trí đo được mô tả trong hình 17.



Hình 17. Thử nghiệm đo thay đổi kích thước gói tin ở khoảng cách 50m



Hình 18. Ảnh hưởng của kích thước dữ liệu đến thời gian truyền

Khảo sát tăng dần kích thước gói dữ liệu, lấy số liệu từ gói kích thước, chia gói dữ liệu thành nhiều gói nhỏ có kích thước 50 byte và gửi từng gói một trong mỗi lần thử nghiệm cho đến khi dữ liệu nhận được hoàn tất hoặc mất tín hiệu. Ta thu được kết quả như hình 18.

Kết quả cho thấy thời gian truyền tăng tuyến tính với kích thước dữ liệu: lần lượt là 7,11ms, 9,72ms, 12,34ms, và 14,81ms. Điều này phản ánh rõ ràng rằng thời gian truyền tỷ lệ thuận với lượng dữ liệu, với tốc độ truyền (data rate) 6,8Mbps.

4.2. Đánh giá kết quả thực nghiệm

Công nghệ UWB thể hiện hiệu suất truyền thông ấn tượng với thời gian trung bình khi truyền một gói dữ liệu 50 bytes trong môi trường không có vật cản là $0,23696 \pm 0,00054\text{ms}$ và trong môi trường có vật cản là $1,12698 \pm 0,00040\text{ms}$ khi có vật cản, tốc độ truyền ấn tượng lên đến 6.8 Mbps, hiệu suất cao hơn so với LoRa. Nhờ sử dụng băng thông rộng, xung thời gian ngắn với độ phân giải cao và cơ chế trải phổ thời gian, công nghệ UWB có khả năng giảm thiểu nhiễu từ những tác nhân bên ngoài.

Nhận xét 4: Qua kết quả thực nghiệm và những số liệu đã thu thập được, phương án chúng tôi đề xuất đã hoạt động đúng như mong đợi và mang lại những đóng góp quan trọng như sau:

- Truyền được dữ liệu cả dữ liệu ảnh vẫn đảm bảo yêu cầu về thời gian và khoảng cách.
- Khẳng định tính đúng đắn khi kết hợp 2 chuẩn theo đề xuất và chia nhỏ gói có thể giúp tăng khoảng cách truyền

Đồng thời, việc điều chỉnh các tham số và tiến hành thử nghiệm nhiều lần trong các môi trường phức tạp là cần thiết nhằm tối ưu hóa hiệu năng của hệ thống UWB kết hợp LoRa trong hệ robot song phương.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá hiệu quả của việc sử dụng công nghệ UWB và LoRa trong truyền thông không dây cho các hệ thống điều khiển từ xa trong môi trường có vật cản. Kết quả thực nghiệm cho thấy UWB có ưu thế về tốc độ và độ trễ thấp, trong khi LoRa phù hợp với truyền xa và dữ liệu dung lượng nhỏ, từ đó cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các hệ robot chủ - tớ hoạt động trong môi trường phức tạp.

Bên cạnh tốc độ truyền và khoảng cách truyền vượt trội, UWB còn sử dụng các tín hiệu dạng xung ngắn với băng thông rộng để đo khoảng cách dựa trên thời gian bay (Time of Flight - ToF), cho phép xác định vị trí với sai số chỉ từ vài cm trong phạm vi 50m, kể cả trong điều kiện môi trường có vật cản [18]. Do đó, phương pháp này không chỉ hỗ trợ truyền dữ liệu mà còn tạo tiền đề tích hợp chức năng định vị chính xác, góp phần duy trì đồng bộ vị trí trong thời gian thực và nâng cao hiệu quả điều khiển bám theo của hệ robot song phương.

Tuy nhiên, phương pháp định vị trong nghiên cứu được xây dựng trên giả thiết các module UWB nằm trên cùng mặt phẳng nhằm đơn giản hóa mô hình tính toán. Trong điều kiện thực tế, khi tồn tại sai lệch độ cao giữa các module, khoảng cách đo được sẽ chịu ảnh hưởng của thành phần không gian ba chiều, dẫn đến sai số trong quá trình xác định tọa độ. Do đó, việc hiệu chỉnh sai số hoặc mở rộng mô hình sang không gian ba chiều là cần thiết để nâng cao độ chính xác của hệ thống trong các ứng dụng thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được hỗ trợ và tài trợ bởi Đại học Công nghiệp Hà Nội theo đề tài mã số 12-2025-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Maruyama T, Mikami H, Noguchi Y, Saito M, Takeda N., "Availability improvement of ITER blanket remote handling system," *Fusion Eng Des*, 136:390-3, 2018.
- [2]. Okafuji Y., Song S., Baba J., Yoshikawa Y., Ishiguro H., "Influence of collaborative customer service by service robots and clerks in bakery stores," *Frontiers in Robotics and AI*, 2023.

[3]. Gueli Alletti S, Rossitto C, Cianci S, Perrone E, Pizzacalla S, Monterossi G, Vizzielli G, Gidaro S, Scambia G., "The senhance™ surgical robotic system ("senhance") for total hysterectomy in obese patients: A pilot study," *J Robot Surg*, 12:229-34, 2018.

[4]. Tamali Abderrahmane, Amardjia Nourredine, Tamali Mohammed, "Experimental analysis for comparison of wireless transmission technologies: Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and LoRa for mobile multi-robot in hostile sites," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 14, 3, 2753~2761, 2024

[5]. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.

[6]. Bhargava B., Sichitiu M. L., "Physical Layer Considerations for Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3), 1521-1536, 2014.

[7]. Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I. & Hoebeke J., "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application," *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 4353-4364, 2018.

[8]. Alfin Junaedy, Hiroyuki Masuta, Kei Sawai, Tatsuo Motoyoshi, Noboru Takagi "LPWAN-Based Real-Time 2D Slam and Object Localization for Teleoperation Robot Control," *Journal of Robotics & Mechatronics*, 33, 6, 1326, 2021.

[9]. Bouguera T., Zidi C., Kammoun A., Chérif F., "Experimental analysis of IoT networks based on LoRa/LoRaWAN under indoor and outdoor environments: Performance and limitations," *Procedia Computer Science*, 184, 625-630, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.079>

[10]. Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J., Watteyne T., "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Access*, 5, 13939-13950, 2017.

[11]. Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J., "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application," *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 4353-4364, 2018.

[12]. Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, William Mark Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things", *Sensors*, 16(9), 1466, 2016.

[13]. Konstantin Mikhaylov, Juha Petaejaevaervi, Toumo Haenninen, "Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology," in *22th European Wireless Conference*, Oulu, Finland, 2016.

[14]. Abdulrahman Alarifi, AbdulMalik Al-Salman, Mansour Alsaleh, Ahmad Alnafessah, Suheer Al-Hadhrani, Mai A. Al-Ammar, Hend S. Al-Khalifa, "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors*, 16(5), 707, 2016.

[15]. FCC, *First Report and Order: Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems*. Report and Order, Washington DC, USA, 2020.

[16]. Goldsmith A., Lee S., "Ultra-Wideband Wireless Communications: Theory and Applications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(6), 2653-2663, 2005.

[17]. Qorvo, *DW1000 Datasheet*.

[18]. Davide Dardari, Andrea Conti, Ulric Ferner, Andrea Giorgetti, Moe Z. Win, "Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments," in *Proceedings of the IEEE*, 97(2), 271-302, 2009.

AUTHORS INFORMATION

**Tong Thi Ly¹, Nguyen Hung Minh¹, Le Thi Lua¹,
Nguyen Ba Kha¹, Ho Minh Trung^{1,2}**

¹Hanoi University of Industry, Vietnam

²Military Institute of Environmental Chemistry, Chemical Corps, Vietnam