

Phương pháp bổ sung pilot được thử nghiệm cho bộ ước lượng kênh trong hệ thống UWA-OFDM

Nguyễn Thị Nga¹, Phan Huy Anh¹, Phạm Thanh Hiệp²

¹ Viện Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Hà Nội, Việt Nam.

² Nhóm nghiên cứu mạnh về Thông tin tiên tiến, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, Hà Nội, Việt Nam.

Tác giả liên hệ: Phạm Thanh Hiệp, phamthanhhiiep@gmail.com

Ngày nhận bài: 26/07/2024, ngày sửa chữa: 18/09/2024, ngày duyệt đăng: 26/10/2024

Định danh DOI: 10.32913/mic-ict-research-vn.v2024.n2.1278

Tóm tắt: Các pilot gốc không đủ để khôi phục đáp ứng xung kênh một cách chính xác trong các hệ thống OFDM dưới nước (UWA-OFDM). Nghiên cứu trước đây, bao gồm phương pháp PE, RPS đã nâng cao chất lượng ước lượng kênh bằng cách bổ sung các pilot tiềm năng. Pilot được bổ sung từ việc lấy các tín hiệu gần đến chòm sao. Tuy nhiên, các phương pháp này thiếu sự đánh giá pilot nên có thể dẫn đến việc ánh xạ không chính xác và các pilot bổ sung không hiệu quả. Để giải quyết vấn đề này, phương pháp bổ sung pilot được thử nghiệm (TPS) được giới thiệu, bao gồm cả việc lựa chọn và đánh giá các ứng viên pilot. TPS được đánh giá với tín hiệu nhận được nằm giữa khoảng cách gần và xa đến chòm sao. Phương pháp đề xuất được so sánh với các phương pháp MMSE, PE và RPS trong các cấu hình khác nhau, như bộ điều chế MPSK và MQAM. Các kết quả chứng tỏ rằng phương pháp TPS vượt trội so với các phương pháp MMSE, PE và RPS về tỷ lệ lỗi bit (BER).

Từ khóa: UWA-OFDM, ước lượng kênh, MMSE, bổ sung pilot được thử nghiệm.

Title: Tried Pilot Supplement Method for Channel Estimation of UWA-OFDM System

Abstract: The original pilots are insufficient to accurately recover the channel impulse response in underwater acoustic OFDM systems (UWA-OFDM). Previous studies, inclusive of the PE, RPS methods, have enhanced channel estimation quality by supplementing them with potential pilots. These supplemental pilots are derived from signals near the constellation points. Nevertheless, these methods lack an evaluation mechanism for the pilots, potentially leading to incorrect mapping and ineffective supplemental pilots. To inscribe the issue, the Tried Pilot Supplement method (TPS) is introduced, which encompasses both the selection and evaluation of pilot candidates. TPS is evaluated by signals received at moderate distances to the constellation points. The proposed method compares the MMSE, PE and RPS methods under different configurations, such as MPSK and MQAM modulation schemes. The results show that the TPS method consistently surpasses the MMSE, PE and RPS methods in terms of bit error rate (BER).

Keywords: UWA-OFDM, channel estimation, MMSE, tried pilot supplement.

I. GIỚI THIỆU

Truyền thông dưới nước (UWA) bị hạn chế bởi băng thông, các hiệu ứng đa đường, suy hao đường truyền và hiệu ứng Doppler [1, 2]. Ghép kênh phân chia tần số trực giao (OFDM) đã trở thành một kỹ thuật phổ biến của hệ thống OFDM dưới nước (UWA-OFDM) để giảm nhiễu và tối ưu băng thông [3, 4]. Một trong những thách thức lớn trong hệ thống UWA-OFDM là ước lượng chính xác thông tin trạng thái kênh (CSI) tại máy thu để khôi phục tín hiệu. Ước lượng kênh dựa trên dữ liệu pilot là một phần quan trọng của hệ thống UWA-OFDM [5].

Các phương pháp ước lượng cơ bản như phương pháp bình phương nhỏ nhất (LS) và phương pháp sai số bình phương trung bình nhỏ nhất (MMSE) được áp dụng để tính đáp ứng xung (CIR) cho hệ thống UWA-OFDM [6]. Tuy nhiên, dữ liệu pilot gốc ban đầu thường không đủ để khôi phục đáp ứng xung cho bộ ước lượng kênh. Khi truyền qua kênh UWA, tín hiệu bị suy giảm đáng kể vì ảnh hưởng của môi trường dưới nước phức tạp.

Gần đây, các nghiên cứu đã đề xuất cải thiện bộ ước lượng kênh của hệ thống OFDM, đặc biệt là hệ thống UWA-OFDM. Phương pháp phổ biến để giải quyết vấn đề này

là phương pháp dữ liệu pilot được bổ sung (DPA) [7–9]. Phương pháp trung bình theo thời gian phổ (STA) [7] sử dụng trung bình cả trong miền thời gian và miền tần số của các symbol OFDM nhận được để ước lượng kênh. Phương pháp STA hoạt động hiệu quả trong vùng tỷ số tín trên tạp (SNR) thấp, nhưng gặp phải lỗi đáng kể khi SNR cao. Phương pháp dữ liệu pilot được xây dựng (CDP) [8] dựa vào tương quan giữa hai symbol liên kề, sử dụng symbol dữ liệu làm pilot bổ sung bằng cách lấy symbol trước để tính toán symbol hiện tại. Phương pháp CDP hoạt động tốt hơn STA ở các giá trị SNR cao, nhưng không hiệu quả khi sử dụng các bộ điều chế bậc cao. Để cải thiện chất lượng phương pháp STA, phương pháp STA từng phần [9] đã được đề xuất cho bộ ước lượng kênh. Phương pháp này hiệu quả hơn các phương pháp LS và STA. Các kỹ thuật DPA đều được đề xuất cho tiêu chuẩn IEEE 802.11p, có cấu trúc dữ liệu khác với UWA-OFDM. Do đó, việc phát triển các phương pháp dựa trên DPA cho UWA-OFDM là vấn đề cần thiết được đặt ra.

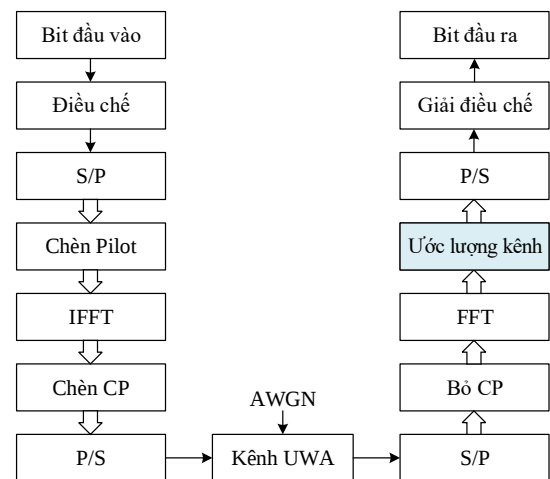
Phương pháp bổ sung pilot (PE) [10] được giới thiệu nhằm bổ sung các pilot tiềm năng cho bộ ước lượng kênh của hệ thống UWA-OFDM bằng cách lấy các tín hiệu nhận được cách điểm chòm sao tín hiệu gần nhất. Các tín hiệu nhận được có khoảng cách Euclid đến chòm sao gần nhất nằm dưới ngưỡng T cố định có thể được trích xuất làm pilot để bổ sung dữ liệu pilot. Phương pháp tìm kiếm pilot thích hợp (SPS) [11] đã xây dựng điều kiện ngưỡng T_s linh hoạt để tìm kiếm pilot "tốt" bổ sung cho bộ ước lượng kênh. Quá trình trích xuất các pilot mới được thực hiện một lần duy nhất, kết quả là có thể chưa trích xuất được pilot tin cậy. Ngoài ra, khoảng cách từ tín hiệu nhận được đến điểm chòm sao tương ứng của nó có thể thay đổi tùy theo phương pháp ánh xạ, tập âm và nhiễu. Do đó, việc chọn ngưỡng cố định và linh hoạt có thể tạo ra rào cản đối với hiệu suất của các hệ thống này. Phương pháp tìm kiếm pilot theo vòng lặp RPS [12] được đề xuất để vượt qua các hạn chế của phương pháp ước lượng PE và SPS trong hệ thống UWA-OFDM. Trong RPS, quá trình trích xuất pilot được tách thành một số lần lặp trong đó các pilot đã trích xuất trước đó có thể được sử dụng để giúp quá trình trích xuất pilot hiện tại. Quá trình này được điều khiển bằng một ngưỡng thích nghi T_a để tìm kiếm các tín hiệu nhận được có khoảng cách đến điểm chòm sao gần nhất dưới ngưỡng T_a được chọn làm pilot tin cậy bổ sung. Tuy nhiên, các phương pháp chọn các tín hiệu nhận được gần chòm sao tương ứng làm pilot vẫn không đảm bảo rằng tất cả các tín hiệu này đã được ánh xạ chính xác. Mặc dù tập trung chủ yếu vào việc tìm kiếm pilot từ các tín hiệu gần chòm sao, những phương pháp này vẫn thiếu sự đánh giá các pilot bổ sung.

Bài báo đề xuất một phương pháp đánh giá các tín hiệu

nhận được trước khi chọn làm pilot đáng tin cậy, được gọi là phương pháp bổ sung pilot được thử nghiệm (TPS), để giải quyết vấn đề của các phương pháp hiện có và nâng cao chất lượng ước lượng kênh trong các hệ thống UWA-OFDM. Ý tưởng chính của TPS là đánh giá các pilot ứng viên trước khi tích hợp chúng vào tập pilot để ước lượng kênh. Cụ thể, TPS thực hiện một ước lượng kênh tạm thời bằng cách thêm các pilot ứng viên vào tập pilot hiện tại. Nếu độ chính xác của ước lượng kênh được cải thiện so với khi chỉ sử dụng tập pilot hiện tại, các pilot ứng viên sẽ được chấp nhận và cập nhật vào tập pilot hiện tại để ước lượng kênh. Để so sánh độ chính xác của ước lượng kênh, sử dụng khoảng cách Euclid trung bình giữa các tín hiệu nhận được và các điểm chòm sao tương ứng. Nếu khoảng cách này giảm sau khi bổ sung pilot ứng viên, thì pilot đó được coi là "tốt" và sẽ được sử dụng cho ước lượng kênh. Nghiên cứu đề xuất lựa chọn các pilot ứng viên từ các tín hiệu nhận được có vị trí nằm giữa khoảng cách gần và xa so với các điểm chòm sao tương ứng để cung cấp thông tin cho bộ ước lượng kênh.

Các phần tiếp theo của bài báo được bố trí như sau: Phần II là hệ thống UWA-OFDM và phần III là các phương pháp ước lượng kênh. Phần IV trình bày phương pháp ước lượng TPS đề xuất. Phần V gồm các kết quả mô phỏng và phân tích. Và Phần VI là phần kết luận.

II. HỆ THỐNG UWA-OFDM



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống UWA-OFDM

Mô hình hệ thống UWA-OFDM được biểu diễn trong Hình 1 [12]. Dòng dữ liệu nhị phân đầu vào được chia thành nhiều dòng dữ liệu song song (S/P) sau khi điều chế. Dữ liệu sau khi được chèn tín hiệu pilot được đưa đến đầu vào của khối biến đổi Fourier ngược IFFT. Khối này sẽ tính toán các mẫu thời gian tương ứng với các kênh trong miền tần số. Tiếp theo, dữ liệu được chèn CP để giảm nhiễu

xuyên ký tự ISI. Sau đó, tín hiệu chuyển thành nối tiếp để truyền qua kênh UWA. Trong quá trình truyền, hệ thống sẽ bị ảnh hưởng bởi nguồn nhiễu như nhiễu Gauss trắng, cộng tính (AWGN).

Tại máy thu, tín hiệu chuyển thành nhiều luồng song song và loại bỏ khoảng bảo vệ. Tín hiệu được chuyển đổi sang miền tần số bằng phép biến đổi FFT. Tín hiệu thu được sẽ khôi phục nhờ bộ ước lượng kênh và sau đó được giải điều chế. Cuối cùng, sẽ nhận được dòng dữ liệu ban đầu.

III. CÁC PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG KÊNH

Ước lượng kênh rất quan trọng đối với phẩm chất của hệ thống thông tin dưới nước [13]. Vì tín hiệu phát thường bị méo dạng khi truyền qua các kênh dưới nước, nên phải ước lượng kênh để khôi phục tín hiệu tại máy thu. Pilot là mẫu tín hiệu được biết trước cả ở phía phát và phía thu, và được phát cùng với tín hiệu có ích để khôi phục kênh truyền. Thực hiện khôi phục hàm truyền kênh bằng cách sử dụng pilot nhận được ở phía thu. Tín hiệu thu được sau khi ước lượng kênh bằng các phương pháp ước lượng cơ bản, như phương pháp LS hoặc phương pháp MMSE [14].

Phương pháp bình phương nhỏ nhất LS [14] là tìm ước lượng kênh theo cách tối thiểu hóa hàm chi phí của symbol thu $\mathbf{Y}$ và symbol phát $\mathbf{X}$, được mô tả dưới đây:

$$\mathbf{H}_{LS} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y}. \quad (1)$$

Phương pháp LS đơn giản nên được sử dụng rộng rãi để ước lượng kênh. Nhưng chúng bỏ qua sự giao thoa của nhiễu, dẫn đến hiệu suất kém.

Phương pháp MMSE [14] được tính dựa trên việc giảm sai số bình phương trung bình của kênh ước lượng và kênh thực tế, kết hợp giữa ma trận trọng số $\mathbf{W}$ và ước lượng kênh LS $\mathbf{H}_{LS}$, ước lượng kênh MMSE được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{H}_{MMSE} = \mathbf{W}\mathbf{H}_{LS} = \mathbf{R}_{HH}(\mathbf{R}_{HH} + \frac{\sigma_z^2}{\sigma_x^2}\mathbf{I})^{-1}\mathbf{H}_{LS}, \quad (2)$$

trong đó, $\mathbf{R}_{HH}$ là ma trận tương quan chéo giữa kênh thực tế và kênh ước lượng tạm thời, $\mathbf{R}_{HH}$ là ma trận tự tương quan của kênh, σ_z^2 và σ_x^2 là phương sai của nhiễu và tín hiệu phát.

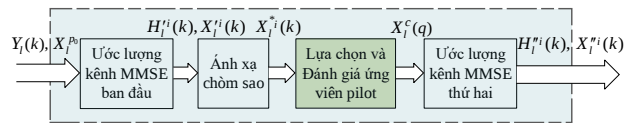
IV. PHƯƠNG PHÁP BỔ SUNG PILOT ĐƯỢC THỬ NGHIỆM

Các phương pháp trước đây như PE, SPS, và RPS như trình bày trong mục I có những hạn chế. Phương pháp PE chọn pilot bổ sung bằng cách chọn tín hiệu gần chòm sao nhất làm pilot dưới ngưỡng cố định. Phương pháp SPS cải thiện bằng ngưỡng linh hoạt nhưng quá trình trích xuất chỉ diễn ra một lần, khó đảm bảo độ tin cậy. Phương pháp RPS khắc phục bằng cách duyệt qua các vòng lặp và sử dụng

ngưỡng thích nghi. Những phương pháp này chủ yếu tập trung vào việc tìm kiếm các tín hiệu gần chòm sao nhất làm pilot bổ sung mà chưa có sự đánh giá các pilot bổ sung. Bài báo giới thiệu một phương pháp đánh giá pilot bổ sung mới, gọi là phương pháp bổ sung pilot được thử nghiệm (TPS), nhằm khắc phục những hạn chế của các phương pháp hiện tại và cải thiện chất lượng bộ ước lượng kênh trong các hệ thống UWA-OFDM.

Mục tiêu của phương pháp này là giới thiệu một phương pháp mới để đánh giá các ứng viên pilot trước khi tích hợp chúng vào để ước lượng kênh. Nói cách khác, thực hiện một ước lượng kênh tạm thời trên bộ pilot hiện tại cộng với pilot ứng viên. Nếu hiệu suất của ước lượng kênh cải thiện so với bộ pilot hiện tại, pilot ứng viên sẽ được chọn và cập nhật vào bộ pilot hiện tại. Cụ thể, độ tin cậy của các ứng viên pilot được đánh giá bằng cách đánh giá từng tín hiệu nhận được và chòm sao tương ứng của nó. Khoảng cách Euclid trung bình giữa tín hiệu nhận được và điểm chòm sao tương ứng được sử dụng để đánh giá hiệu suất ước lượng kênh. Nếu khoảng cách này giảm sau khi thêm pilot ứng viên, pilot ứng viên sẽ được chọn làm pilot bổ sung. Nghiên cứu đề xuất tìm kiếm các pilot ứng viên từ những tín hiệu thu nằm giữa khoảng cách gần và xa đến các điểm chòm sao tương ứng, nhằm cung cấp thông tin cho quá trình ước lượng kênh.

Phương pháp ước lượng TPS bao gồm bốn bước: Bước 1 là Ước lượng kênh MMSE Ban đầu, bước 2 là Ánh xạ Chòm sao, bước 3 là Lựa chọn và Đánh giá ứng viên pilot, bước 4 là Ước lượng kênh MMSE thứ hai, được biểu diễn trong Hình 2. Trong đó, các Bước 1, 2, 4 tương tự với phương pháp RPS, trong khi bước thứ ba (Lựa chọn và Đánh giá ứng viên pilot) là quan trọng nhất, thực hiện quá trình trích xuất và đánh giá pilot. Mục tiêu chính là kiểm tra và đánh giá từng tín hiệu thu được ánh xạ tới điểm chòm sao như là pilot bổ sung tin cậy.



Hình 2. Phương pháp ước lượng TPS

Việc lựa chọn và đánh giá một ứng viên pilot được mô tả trong thuật toán 1, bước 3 của phương pháp TPS bao gồm ba nhiệm vụ chính:

- ★ Lựa chọn các ứng viên pilot.
- ★ Đánh giá ứng viên pilot với bộ ước lượng kênh tạm thời CE_t .
- ★ Cập nhật ứng viên pilot vào tập pilot nếu độ chính xác của CE_t tăng.

Trong đó $mdis$ và $mdis_t$ lần lượt là khoảng cách Euclid trung bình giữa các symbol thứ l tại sóng mang con thứ k $X_l^i(k)$ và điểm ánh xạ chòm sao tương ứng $X_l^{*i}(k)$; $X_l^c(q)$, $X_l^{P_t}$, X_l^P tương ứng là pilot ứng viên, tập pilot khi có thêm pilot ứng viên và tập pilot khi không có pilot ứng viên.

Thuật toán 1: Đánh giá pilot ứng viên

```

1 Đầu vào:  $X_l^c(q)$ ,  $mdis_t$ ,  $mdis$ , ước lượng kênh tạm thời  $CE_t$ 
2 If  $mdis_t < \delta.mdis$  then
3    $X_l^{P_t} = X_l^P \cup X_l^c(q)$ 
4 else
5    $X_l^{P_t} = X_l^P$ 
6 end
7 Đầu ra:  $X_l^P = X_l^P \cup X_l^c(q)$ 

```

Để trích xuất các ứng viên pilot, các tín hiệu thu được đánh giá với các tín hiệu nằm giữa khoảng cách gần và xa với các điểm chòm sao tương ứng. Lý do lựa chọn tín hiệu nằm giữa khoảng cách gần và xa chòm sao vì nếu chọn tín hiệu nằm gần chòm sao cho năng lượng thấp còn tín hiệu xa chòm sao sẽ bị ảnh hưởng nhiều bởi nhiễu. Cụ thể của phương pháp TPS được trình bày dưới đây.

Phương pháp TPS, sử dụng các tín hiệu giữa khoảng cách gần và xa đến các điểm chòm sao để thu thập thêm thông tin cho ước lượng kênh nhằm cải thiện độ chính xác với cùng số lượng pilot gốc. TPS kiểm tra pilot một lần duy nhất trên toàn bộ pilot mà không lặp lại sau khi có bộ pilot mới. Nhưng các tín hiệu này thường có xác suất thấp nhận các điểm chòm sao gần nhất là ánh xạ đúng. Nên quá trình đánh giá các ứng viên pilot cần thực hiện qua tất cả M điểm chòm sao.

Đặt D là các khoảng cách Euclid giữa các tín hiệu nhận được và điểm chòm sao ánh xạ. Gọi q và q_{min} lần lượt là điểm chòm sao thứ q và điểm chòm sao cải thiện nhất về chất lượng ước lượng kênh so với M chòm sao, trong đó q và q_{min} đều thuộc khoảng $[1, M]$. Bước 3 tính toán các khoảng cách Euclid D giữa tất cả các tín hiệu nhận được và các chòm sao ánh xạ của chúng, và tính $mdis$. Các tín hiệu nhận được $X_l^i(k)$ được sắp xếp theo thứ tự giảm dần của D , và các tín hiệu $X_l^i(k)$ được khảo sát để tìm kiếm pilot. Đối với mỗi tín hiệu thu được khảo sát $X_l^i(k)$, các quy trình lựa chọn và đánh giá ứng viên pilot $X_l^c(q)$ được mô tả như sau:

- ★ Lựa chọn các ứng viên pilot: Các tín hiệu lần lượt được chọn làm ứng viên pilot để đánh giá.
- ★ Đánh giá ứng viên pilot: Đối với mỗi ứng viên pilot $X_l^c(q)$, CE_t được sử dụng để tính khoảng cách từ $X_l^c(q)$ tới tất cả các chòm sao. Nếu độ chính xác của CE_t cải thiện so với CE ($mdis_t < \delta.mdis$), chỉ số q

của ứng viên pilot được ghi lại. Quy trình này được áp dụng trên M chòm sao để tìm ra $mdis_t$ nhỏ nhất nhằm cải thiện độ chính xác của CE_t . $X_l^c(q_{min})$ được coi là pilot mới được chọn từ symbol thứ l của sóng mang con thứ k $X_l^i(k)$.

- ★ Cập nhật ứng viên pilot vào tập pilot: Pilot mới $X_l^c(q_{min})$ được cập nhật vào tập pilot X_l^P .

V. MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH

1. Cài đặt tham số

Các thí nghiệm đã được thiết lập trong Bảng I để mô tả hệ thống và môi trường dưới nước. Bài báo áp dụng mô hình tia Bellhop [15–17] để mô phỏng môi trường dưới nước. Cách tiếp cận này giúp mô phỏng môi trường sát với thực tế, cải thiện độ tin cậy của các thí nghiệm. Bảng I thể hiện các tham số mô phỏng của hệ thống UWA-OFDM với khoảng cách giữa các pilot $ps = 8$, số đáp ứng xung $N_{cir} = 32$.

Tham số mô phỏng kênh Bellhop: Khoảng cách giữa máy phát và máy thu là 1000 m, độ sâu mực nước là 100 m, độ sâu máy phát là 20 m và độ sâu máy thu là 50 m và tốc độ sóng âm là 1500 m/s.

Bảng I
THAM SỐ MÔ PHỎNG CỦA HỆ THỐNG UWA-OFDM

STT	Tham số hệ thống	Giá trị
1	Số sóng mang con	256
2	Số FFT	256
3	Sơ đồ điều chế	MPSK, MQAM
4	Độ dài CP	64
5	Mô hình kênh	Bellhop
6	Tạp âm	AWGN

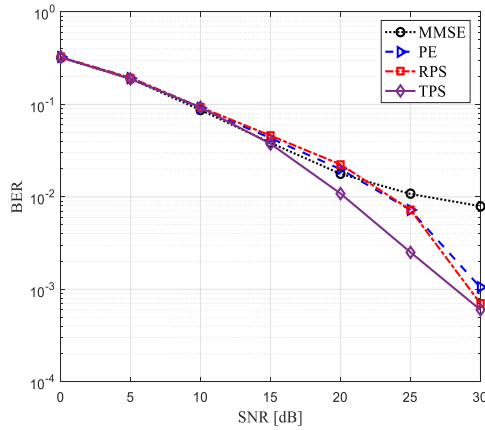
2. Mô phỏng và phân tích kết quả

Phương pháp TPS được so sánh với các phương pháp MMSE và RPS trên tiêu chí BER. Mô phỏng được thực hiện trên nhiều cấu hình khác nhau, bao gồm các phương pháp điều chế như MPSK và MQAM. Ngoài ra, số lượng pilot trong các phương pháp ước lượng cũng được xem xét và đánh giá.

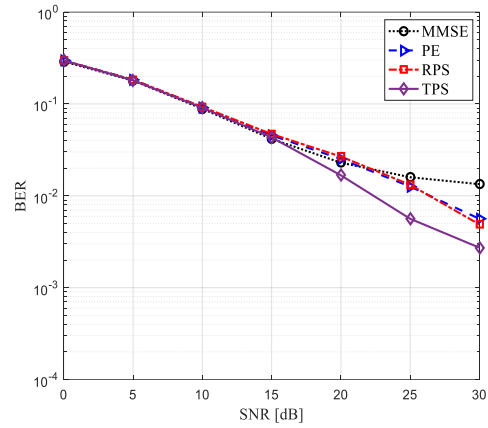
a) Phẩm chất BER của hệ thống với các bộ điều chế

Hiệu suất của các phương pháp TPS được so sánh với các phương pháp MMSE và RPS với phẩm chất BER, với khoảng cách giữa các pilot $ps = 8$ và số đáp ứng xung $N_{cir} = 32$, áp dụng cho hai phương pháp điều chế: MPSK ($M = 8, 16$) và MQAM ($M = 16, 32$).

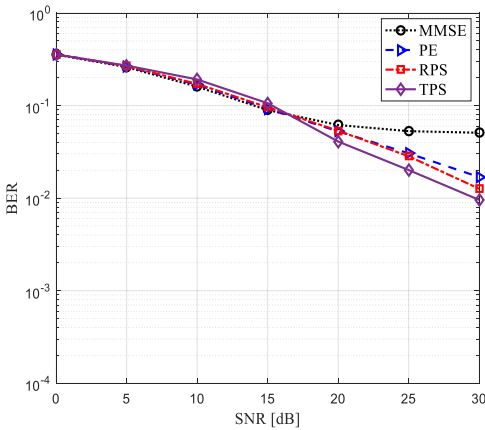
Đầu tiên, Hình 3 và Hình 4 biểu diễn phẩm chất BER hệ thống với MPSK của phương pháp TPS và phương pháp MMSE, RPS. Kết quả cho thấy rằng phương pháp ước lượng TPS cho hiệu suất tốt hơn các phương pháp trước. Ví dụ tại



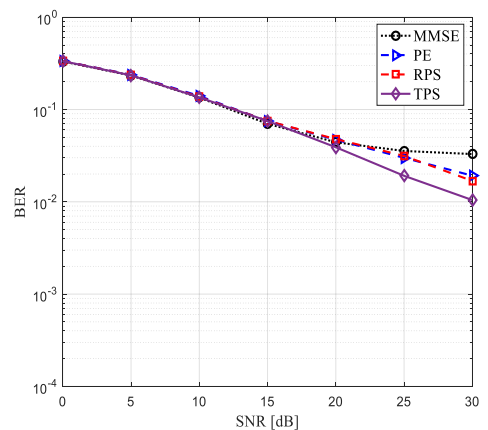
Hình 3. Phẩm chất BER của hệ thống với bộ điều chế 8PSK



Hình 5. Phẩm chất BER của hệ thống với bộ điều chế 16QAM



Hình 4. Phẩm chất BER của hệ thống với bộ điều chế 16PSK



Hình 6. Phẩm chất BER của hệ thống với bộ điều chế 32QAM

SNR bằng 25 dB, Hình 3 biểu diễn phẩm chất BER của hệ thống với bộ điều chế 8PSK của phương pháp TPS, RPS, PE và MMSE lần lượt là $2,4 \cdot 10^{-3}$, $7 \cdot 10^{-3}$, $7 \cdot 10^{-3}$ và 10^{-2} . Tương tự, Hình 4 phẩm chất BER của các phương pháp với bộ điều chế 16PSK tương ứng là $2 \cdot 10^{-2}$, $2,7 \cdot 10^{-2}$, $3 \cdot 10^{-2}$ và $5 \cdot 10^{-2}$. Phẩm chất BER của các phương pháp PE, RPS và TPS được cải thiện khi SNR ở mức trung bình và cao, nhờ việc bổ sung pilot cho bộ ước lượng kênh hoạt động hiệu quả trong khoảng SNR này. Cụ thể, tại mức SNR thấp, các tín hiệu thu được bị ảnh hưởng bởi nhiễu và tạp âm môi trường, dẫn đến việc tìm kiếm pilot bổ sung từ các tín hiệu thu có thể bị ảnh hưởng bởi nhiễu sang các điểm chòm sao lân cận. Khi SNR tăng đến mức trung bình và cao, nhiễu và tạp âm giảm đi đáng kể, nên việc bổ sung pilot từ các tín hiệu nhận được đến các chòm sao tương ứng chính xác hơn, từ đó nâng cao phẩm chất BER của hệ thống.

Thứ hai, Hình 5 và Hình 6 thể hiện các phương pháp TPS được so sánh với các phương pháp hiện có như MMSE, PE và RPS của hệ thống MQAM về phẩm chất BER. Kết quả mô phỏng chứng minh rằng phương pháp TPS làm việc

hiệu quả hơn các phương pháp trước RPS, PE và MMSE. Cụ thể tại giá trị SNR là 25 dB, Hình 5 với hệ thống 16QAM của phương pháp TPS, RPS, PE và MMSE lần lượt là $6 \cdot 10^{-3}$, $1,3 \cdot 10^{-2}$, $1,3 \cdot 10^{-2}$ và $1,6 \cdot 10^{-2}$. Hình 6 với hệ thống 32QAM cũng có xu hướng tương tự như Hình 5, phương pháp TPS có hiệu suất vượt trội hơn các phương pháp MMSE, PE và RPS. Ví dụ tại giá trị SNR = 25 dB, hệ thống 32QAM của các phương pháp TPS, RPS, PE và MMSE là $2 \cdot 10^{-2}$, $3 \cdot 10^{-2}$, $3 \cdot 10^{-2}$ và $3,5 \cdot 10^{-2}$. Đường cong BER của hai phương pháp PE và RPS có sự tương đồng vì cả hai đều sử dụng phương pháp lựa chọn pilot từ các tín hiệu gần chòm sao. Mặc dù RPS có cải tiến thêm với ngưỡng thích nghi và quá trình lặp, nhưng ở mức SNR thấp, hiệu suất ước lượng kênh của cả hai phương pháp vẫn tương đương, dẫn đến đường BER có xu hướng gần giống nhau. Sự khác biệt này thể hiện rõ ràng hơn ở các mức SNR cao, khi RPS có thể cải thiện chất lượng ước lượng kênh tốt hơn. Phương pháp TPS vượt trội hơn khi SNR trung bình và cao do phương pháp đánh giá và lựa chọn pilot bổ sung từ các tín hiệu thu nằm giữa khoảng cách gần và xa đến

các điểm chòm sao. Ở mức SNR thấp, do tín hiệu bị ảnh hưởng mạnh bởi nhiễu, khả năng lựa chọn pilot chính xác của TPS bị hạn chế, dẫn đến hiệu suất chưa cải thiện. Tuy nhiên, khi SNR tăng cao, các tín hiệu thu trở nên rõ ràng hơn và ít chịu ảnh hưởng bởi nhiễu, cho phép TPS bổ sung pilot một cách chính xác hơn, cải thiện đáng kể chất lượng ước lượng kênh.

Mô phỏng chứng minh hiệu quả của việc sử dụng các phương pháp TPS trong các hệ thống UWA-OFDM. Cụ thể, phương pháp TPS tương ứng với tín hiệu nằm giữa khoảng cách gần và xa điểm chòm sao cho hiệu suất tốt nhất trong các phương pháp bổ sung pilot cho bộ ước lượng kênh.

b) Số lượng pilot trong các phương pháp ước lượng

Bảng II
SỐ LƯỢNG PILOT TRUNG BÌNH CỦA BỘ ĐIỀU CHẾ 8PSK TRONG CÁC PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG

STT	Phương pháp	Giá trị SNR (dB)		
		15	20	30
1	MMSE	12,5	12,5	12,5
2	PE	37,4	53,4	69,5
3	RPS	41,7	70,8	88,5
4	TPS	20,5	21,7	24,1

Số lượng pilot trung bình bao gồm cả pilot gốc và pilot bổ sung được dùng trong các phương pháp ước lượng TPS, RPS, PE và MMSE, các giá trị được tính tại các mức SNR là 15 dB, 20 dB và 30 dB cho hai sơ đồ điều chế 8PSK và 16QAM được minh họa trong Bảng II và Bảng III. Trong cả hai hệ thống điều chế, phương pháp TPS thể hiện ưu việt hơn so với các phương pháp khác bằng cách yêu cầu một bộ pilot nhỏ hơn so với PE và RPS. Cụ thể, tại giá trị SNR là 15 dB, 20 dB và 30 dB với hệ thống 8PSK trong Bảng II, số lượng pilot trung bình lần lượt của phương pháp TPS là 20,5; 21,7 và 24,1. Phương pháp PE và RPS yêu cầu số lượng pilot tăng mạnh theo SNR, còn phương pháp TPS vẫn duy trì sự gia tăng số lượng pilot ở mức tối thiểu. Điều này cho thấy TPS không chỉ sử dụng ít pilot bổ sung hơn mà còn mang lại chất lượng ước lượng tốt hơn so với các phương pháp khác như PE và RPS, đặc biệt khi SNR tăng cao.

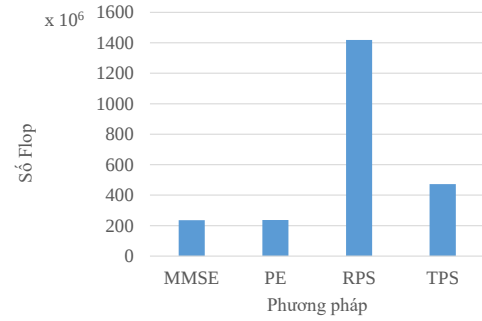
Tương tự, đối với 16QAM trong Bảng III xu hướng cũng tương tự như 8PSK trong Bảng II. Phương pháp TPS duy trì sự ổn định trong việc sử dụng pilot, chỉ tăng nhẹ số lượng pilot. Ngược lại, PE và RPS có sự gia tăng đáng kể về số lượng pilot bổ sung. Kết quả chứng minh rằng chỉ với lượng pilot ít nhất nhưng phương pháp TPS đạt hiệu suất tốt nhất.

c) Độ phức tạp tính toán

Độ phức tạp tính toán của các phương pháp được đánh giá thông qua số phép toán dấu phẩy động (flop) trên một sóng mang con. Giả sử rằng một flop được tính là phép

Bảng III
SỐ LƯỢNG PILOT TRUNG BÌNH CỦA BỘ ĐIỀU CHẾ 16QAM TRONG CÁC PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG

STT	Phương pháp	Giá trị SNR (dB)		
		15	20	30
1	MMSE	12,5	12,5	12,5
2	PE	29,2	37,8	52,9
3	RPS	34,5	50,9	83,7
4	TPS	20,1	21,1	25,0



Hình 7. Độ phức tạp tính toán của các phương pháp ước lượng

cộng, trừ hoặc nhân thực. Một phép cộng phức, một phép nhân phức được tính lần lượt là 2 và 6 flop [18]. Dựa trên các giả định này, độ phức tạp của phương pháp MMSE, PE, RPS và TPS được tính trong các biểu thức dưới đây. Lưu ý, N là số sóng mang con, N_s là số symbol dữ liệu, L là số vòng lặp, M là số bậc điều chế.

$$C_{MMSE} = 8N^3 + 6N^2N_s + 6N^2 + 2N. \quad (3)$$

$$C_{PE} = 8N^3 + 6N^2N_s + 6N^2 + 24NN_s + 2N. \quad (4)$$

$$C_{RPS} = 8(L+1)N^3 + 6(L+1)N^2N_s + 24LNN_s + 6(L+1)N^2 + 2(L+1)N. \quad (5)$$

$$C_{TPS} = 16N^3 + 12N^2N_s + 12N^2 + 4N + 17NN_s + NN_s \log N + MNN_s. \quad (6)$$

Từ các biểu thức, với $N = 256$, $N_s = 256$, $L = 5$, $M = 8$, ta có thể thấy độ phức tạp tính toán được biểu diễn trong Hình 7 của phương pháp TPS phức tạp hơn so với phương pháp MMSE và PE. Phương pháp RPS có độ phức tạp cao hơn TPS do phụ thuộc vào số vòng lặp L . Mặc dù vậy, bậc độ phức tạp tính toán của các phương pháp này đều là $O(N^3)$. Phương pháp TPS có thể cải thiện chất lượng nhưng phải đánh đổi bằng độ phức tạp tính toán cao hơn so với phương pháp truyền thống MMSE.

VI. KẾT LUẬN

Phương pháp TPS được giới thiệu để nâng cao phẩm chất bộ ước lượng kênh của hệ thống UWA-OFDM. Phương

pháp TPS thể hiện những cải tiến vượt trội so với phương pháp MMSE và RPS. Phương pháp này được so sánh với các ước lượng kênh MMSE và RPS trong các cấu hình khác nhau, bao gồm các bộ điều chế khác nhau như MPSK và MQAM. Kết quả thử nghiệm cho thấy rằng phương pháp TPS tốt hơn so với phương pháp MMSE, PE và RPS. Đề xuất thể hiện tính hiệu quả của TPS trong việc cải thiện độ tin cậy và độ chính xác của ước lượng kênh trong môi trường dưới nước đầy thách thức. Hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai sẽ là tối ưu cách bố trí pilot tại máy để nâng cao độ chính xác của ước lượng kênh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Diamant and L. Lampe, "Low Probability of Detection for Underwater Acoustic Communication: A Review," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19099–19112, 2018.
- [2] X. Lurton and D. Jackson, *An Introduction to Underwater Acoustics*. 2nd ed. Springer, 2010.
- [3] G. Qiao, Z. Babar, L. Ma, S. Liu, and J. Wu, "MIMO-OFDM underwater acoustic communication systems - a review," *Physical Communication*, vol. 23, pp. 56–64, 2017.
- [4] S. Zhoun and Z. Wang, *OFDM for Underwater Acoustic Communications*. John Wiley & Sons, 2014.
- [5] Y. Liu, Z. Tan, H. Hu, L. J. Cimini, and G. Y. Li, "Channel Estimation for OFDM," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 1891–1908, 2014.
- [6] A. B. Singh and V. K. Gupta, "Performance Evaluation of MMSE and LS Channel Estimation in OFDM System," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 15, pp. 39–43, 2014.
- [7] J. A. Fernandez, K. Borries, L. Cheng, B. V. K. Vijaya Kumar, D. D. Stancil, and F. Bai, "Performance of the 802.11p Physical Layer in Vehicle-to-Vehicle Environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 3–14, 2012.
- [8] Z. Zhao, X. Cheng, M. Wen, B. Jiao, and C. Wang, "Channel Estimation Schemes for IEEE 802.11p Standard," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 38–49, 2013.
- [9] W. Pamungkas and J. Hendry, "An improved spectral temporal average method for mitigating Doppler effects in V2V communications," *International Journal of Vehicle Information and Communication Systems*, vol. 6, pp. 317–335, 2021.
- [10] T. N. Nguyen, H. A. Phan, V. L. Cao, T. H. Nguyen, and P. T. Hiep, "Pilot Enrichment Methods for Improving Quality of Received Signal in Underwater Acoustic OFDM Systems," in *2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2022, pp. 401–406.
- [11] N. T. Nga, P. H. Anh, C. V. Loi, and P. T. Hiep, "Suitable Pilot Search Method for Channel Estimation in Underwater Acoustic OFDM Systems," *Journal of Military Science and Technology*, vol. 89, pp. 52–59, 2023.
- [12] T. N. Nguyen, A. Huy Phan, V. L. Cao, and P. T. Hiep, "Reliable Pilot Search Method for Enhancing BER Performance in Underwater Acoustic OFDM Systems with MMSE Estimator," *Int. J. Wireless Inf. Networks*, vol. 31, p. 84–95, 2024.
- [13] M. Khan, B. Das, and B. Pati, "Channel Estimation Strategies for Underwater Acoustic (UWA) Communication: An Overview," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 357, pp. 7229–7265, 2020.
- [14] C. Y. Soo, K. Jaekwon, Y. W. Young, and K. C. Gu, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Wiley-IEEE Press, Aug. 2010.
- [15] M. B. Porter and H. P. Buckner, "Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 82, no. 4, pp. 1349–1359, 1987.
- [16] M. B. Porter, "The BELLHOP manual and user's guide: Preliminary draft," *Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep.*, vol. 260, pp. 1–57, 2011.
- [17] L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*. 3rd ed. Springer, 2003.
- [18] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations - 4th Edition*. Johns Hopkins University Press, 2013.



Email: ngadtvt@gmail.com

Nguyễn Thị Nga tốt nghiệp Đại học ngành Điện, Điện tử năm 2008 và Thạc sĩ ngành Kỹ thuật Điện tử tại Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn năm 2012. Hiện nay là nghiên cứu viên và nghiên cứu sinh tại Viện Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự. Lĩnh vực nghiên cứu là xử lý tín hiệu cho truyền thông, hệ thống thủy âm và sonar.



Email: huyanhfanvdt@gmail.com

Phan Huy Anh tốt nghiệp Đại học tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên Hà Nội năm 2003, tốt nghiệp Thạc sĩ tại Đại học Melbourne, Australia năm 2007 và nhận bằng Tiến sĩ tại Đại học New South Wales, Sydney, Australia năm 2014. Hiện nay là trưởng phòng nghiên cứu tại Viện Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự. Lĩnh vực nghiên cứu là xử lý tín hiệu cho truyền thông, các vấn đề tối ưu hóa trong vô tuyến nhận thức, mạng chuyển tiếp không dây, MIMO và UAV.



Email: phamthanhhiep@gmail.com

Phạm Thanh Hiệp tốt nghiệp Kỹ sư Truyền thông tại Học viện Phòng vệ Nhật Bản năm 2005; nhận bằng thạc sĩ và tiến sĩ tại Đại học Quốc gia Yokohama, Nhật Bản năm 2009 và 2012. Từng là cộng tác viên nghiên cứu tại Đại học Quốc gia Yokohama, Yokohama, Nhật Bản từ năm 2012 đến năm 2015. Hiện nay là giảng viên tại Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, Việt Nam. Lĩnh vực nghiên cứu là truyền thông không dây, MIMO và UAV.