

Phương pháp bù dịch tần Doppler dựa trên chuỗi tín hiệu hình sin cho hệ thống OFDM truyền thông tin dưới nước

A Doppler Compensation Method Based on the Sinusoidal Signal in OFDM Underwater Communication System

Đỗ Đình Hưng^{1,2*}, Nguyễn Quốc Khương¹

¹ Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

² Viện Đại học Mở Hà Nội - B101, Nguyễn Hiền, Bách Khoa, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 14-12-2016; chấp nhận đăng: 28-9-2018

Tóm tắt

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một phương pháp dùng để tính toán và bù dịch tần Doppler cho hệ thống thông tin dưới nước sử dụng công nghệ OFDM. Việc tính toán bù dịch tần Doppler trong bài báo được thực hiện qua hai bước. Bước thứ nhất là tính toán thô thông qua việc sử dụng sóng mang gắn vào phần cuối của mỗi khung tín hiệu phát. Ở bước này, dựa trên tín hiệu sóng mang gắn vào có thể tính toán được những sai lệch tần số giữa bên thu và phát do sự chuyển động tương đối giữa bên thu và phát gây ra hiệu ứng Doppler. Do việc tính toán độ dịch tần chưa thật chính xác ở bước đồng bộ thô nên bước cuối cùng trước khi giải mã M-QAM, kỹ thuật quay pha chòm sao tín hiệu được áp dụng nhằm làm tăng chất lượng tín hiệu thu. Các kết quả nghiên cứu và mô phỏng, thực nghiệm cho thấy hệ thống có thể xử lý được việc truyền thông dưới nước ở tốc độ hơn 2m/s.

Từ khóa: OFDM, truyền thông tin dưới nước (UWA), Doppler.

Abstract

In this paper, we propose a method uses to compensate Doppler frequency shift for underwater acoustic communication systems using OFDM technology. The calculation of the Doppler frequency shift compensation in the article is done in two steps. The first step is coarse synchronization through the use of the carrier signal attached to the end of each frame transmitted signal. In this step, based on the carrier signal to calculate the frequency deviation between the transmitter and receiver due to the relative motion between the transmitter and receiver causes Doppler effect. However, the calculation of the frequency shift is not exactly in coarse synchronization, then before decoding M-QAM, technical constellation phase rotation signal is applied to increase the quality of the received signal. The results of research and simulation, experimentation showed that the system can handle the underwater communication at speeds of more than 2m/s.

Keywords: OFDM, UWA, Doppler.

1. Giới thiệu

Thông tin dưới nước đang trở thành một trong những vấn đề được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm hiện nay [1]. Việc truyền tin dưới nước gặp nhiều khó khăn do tốc độ truyền sóng âm rất chậm (1,5km/s) nên với sự chuyển động tương đối chậm giữa bên phát và thu cũng gây ra lượng dịch tần Doppler lớn ảnh hưởng đến tín hiệu OFDM. Có nhiều nghiên cứu về bù dịch tần Doppler cho truyền thông dưới nước sử dụng công nghệ OFDM như [1-4].

Đặc điểm của các phương pháp [1], [3] là việc tính toán độ dịch tần số Doppler thường được thực hiện sau khi đồng bộ. Thực tế trong trường hợp độ

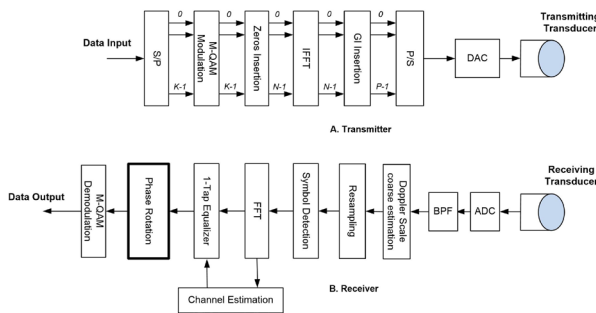
dịch tần Doppler lớn, kèm nhiễu mạnh, tín hiệu thu được sẽ bị méo dạng nghiêm trọng so với tín hiệu phát nên kỹ thuật đồng bộ dựa trên việc so sánh các chuỗi tín hiệu thường không chính xác. Khác với phương pháp [1], để tính độ dịch tần Doppler, tác giả đề xuất gắn thêm một tín hiệu sóng mang hình sin vào cuối của mỗi khung tín hiệu truyền đi. Ưu điểm của việc gắn tín hiệu sin vào cuối khung so với phương pháp [3] là độ dài tín hiệu gắn vào ngắn hơn do đó tiết kiệm được băng thông. Ngoài ra việc xử lý tín hiệu hình sin cũng đơn giản và đem lại độ chính xác cao hơn trong việc tính toán độ lệch tần Doppler. Phương pháp tác giả đề xuất cũng khác với các phương pháp trước đây là việc tính toán độ lệch tần doppler trong phương pháp của chúng tôi được thực hiện trước khi đồng bộ tín hiệu. Do đó không cần đòi hỏi phải xác định chính xác điểm bắt đầu của các khung dữ liệu. Ngoài ra phương pháp đề xuất có khả

* Địa chỉ liên hệ: Tel.: (+84) 989187646
Email: hungdd@hou.edu.vn

năng xác định một cách gần chính xác độ lệch tần số Doppler của tín hiệu thu ngay từ bước đồng bộ thô. Do vậy ở bước cuối cùng chỉ cần sử dụng thuật toán xoay pha tín hiệu nhằm điều chỉnh chính xác chòm sao tín hiệu thu trong trường hợp vẫn chưa điều chỉnh hết độ lệch tần số. Thêm vào đó việc sử dụng sóng hình sin để xác định tần số Doppler cho phép áp dụng được với hệ thống có tốc độ chuyển động tương đối nhanh giữa phát và thu. Việc sử dụng chuỗi tín hiệu sin có độ dài ngắn cho phép tiết kiệm băng thông hơn so với việc gắn thêm các chuỗi tín hiệu mã đầu khung trong [1]. Ví dụ trong thực nghiệm của chúng tôi, có thể thu được tín hiệu ở tốc độ lớn hơn 2m/s và thực tế có thể cao hơn nhưng do điều kiện về trang thiết bị thí nghiệm và điều kiện khách quan nên tác giả chưa thực hiện được. Nội dung bài báo này được chia làm 4 phần. Phần 1 giới thiệu nội dung, phần 2 mô tả sơ đồ khối của hệ thống OFDM và phương pháp bù dịch tần Doppler đề xuất, phần 3 trình bày kết quả thực nghiệm và cuối cùng là phần 4 kết luận.

2. Mô tả hệ thống

Trong môi trường truyền thông tin UWA, thông thường người ta sử dụng một tần số sóng mang thấp khoảng vài chục kHz để tránh sự mất mát suy hao ở tần số cao. Do vậy tín hiệu sẽ được thực hiện điều chế trực tiếp tại băng tần cơ sở (baseband) mà không sử dụng điều chế IQ sau khi chuyển đổi từ số sang tương tự (DAC) giống như thực hiện trong hệ thống truyền thông tin vô tuyến OFDM. Trong phần này, chúng tôi mô tả một kỹ thuật sắp xếp (mapping) các sóng mang con, để tín hiệu truyền sau khi biến đổi IFFT là một tín hiệu thực. Phần ảo của tín hiệu truyền sẽ bị triệt tiêu. Như vậy, chúng ta có thể tránh được việc sử dụng bộ điều chế IQ.



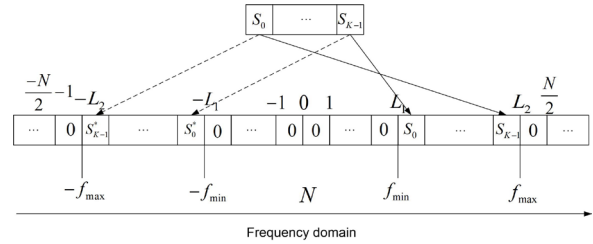
Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống thu phát OFDM

2.1. Hệ thống phát

Sơ đồ của hệ thống phát được cho trên Hình 1.A. Tín hiệu nhị phân đầu vào được chia thành K dòng dữ liệu song song. K chính là số sóng mang dữ liệu của tín hiệu OFDM. Sau đó dòng bit sẽ được đưa đến khối điều chế M-QAM. Đầu ra khối M-QAM là vector tín hiệu: $\vec{S} = [S_0, S_1, \dots, S_{K-1}]$ trong đó:

$K \leq (N - 1) / 2$, với N là tổng số sóng mang của hệ thống OFDM.

Tiếp đó vector tín hiệu \vec{S} được đưa qua khối chèn không (Zeros Insertion) để đặt tín hiệu này lên đúng tần số sóng mang muốn truyền đi. Do việc điều chế M-QAM và biến đổi IFFT tạo ra tín hiệu phức nên trong bài báo chúng tôi sử dụng một kỹ thuật sắp xếp tín hiệu đặc biệt để sau khi biến đổi IFFT thì đầu ra chỉ gồm các giá trị thực. Việc sắp xếp tín hiệu \vec{S} lên các sóng mang trong hệ thống OFDM được thực hiện như Hình 2.



Hình 2. Kỹ thuật sắp xếp dữ liệu lên các sóng mang con cho hệ thống OFDM

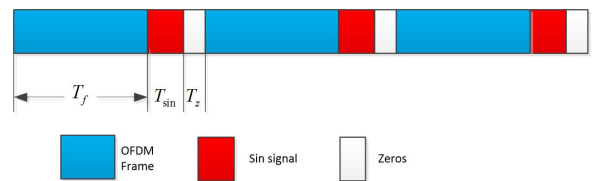
Cụ thể trong bài báo này, tác giả đã thực hiện truyền tín hiệu trong khoảng: $f_{min} = 12\text{kHz}$ đến $f_{max} = 15\text{kHz}$, với tần số lấy mẫu $f_s = 96\text{kHz}$. Việc áp dụng kỹ thuật sắp xếp sóng mang như trên Hình 2 cho phép tín hiệu đầu ra khối IFFT chỉ gồm toàn các giá trị thực:

$$\vec{S}_{N \times 1} = [0, \dots, 0, S_{K-1}^*, \dots, S_0^*, 0, \dots, 0, S_0, \dots, S_{K-1}, 0, \dots, 0] \quad (1)$$

trong đó: $L_1 = f_{min} / (f_s / N)$ và $L_2 = f_{max} / (f_s / N)$ là điểm bắt đầu và kết thúc của sóng mang dữ liệu tại vị trí tương ứng của S_0 và S_{K-1} .

Sau khi sắp xếp các sóng mang, tín hiệu S được biểu diễn trong miền thời gian được đưa đến khối IFFT. Tín hiệu này sẽ được đưa qua khối chèn khoảng bảo vệ (GI Insertion) để chống nhiễu liên ký tự (ISI) rồi qua khối biến đổi song song thành nối tiếp (P/S) và đi vào bộ biến đổi số sang tương tự (DAC) để truyền đi qua transducer phát dưới dạng sóng âm.

Nhằm đảm bảo bên thu có thể xác định được độ dịch tần Doppler sinh ra do có sự chuyển động tương đối giữa bên phát và bên thu, chúng tôi thiết kế khung truyền dẫn tín hiệu có gắn thêm một chuỗi tín hiệu hình sin vào đuôi của mỗi khung truyền như Hình 3.



Hình 3. Khung tín hiệu phát

Việc gắn chuỗi tín hiệu hình sin vào cuối của mỗi khung dữ liệu để đảm bảo nó không gây ra nhiễu ISI tới tín hiệu OFDM. Độ dài của mỗi chuỗi tín hiệu sóng sin tương đương với 3 OFDM symbol. Độ dài chuỗi sin gắn vào như vậy đủ để đảm bảo có thể phát hiện tương đối chính xác độ dịch tần Doppler chứ không được quá dài sẽ gây lãng phí băng thông của hệ thống. Như vậy nếu với độ dài mỗi khung gồm 40 tín hiệu OFDM thì phần tín hiệu sin gắn thêm vào chiếm khoảng 8% dung lượng của hệ thống.

2.2. Hệ thống thu

Sơ đồ khối hệ thống thu được mô tả như Hình 1.B. Đặc điểm của phương pháp chúng tôi đề xuất là sẽ thực hiện tính toán độ lệch tần Doppler dựa trên tần số sóng mang được phát đi, sau đó thực hiện bù dịch tần Doppler thông qua việc lấy mẫu lại tín hiệu trước khi thực hiện giải mã tín hiệu OFDM. Quá trình đồng bộ được thực hiện qua hai bước, đồng bộ thô và đồng bộ tinh bằng thuật toán xoay pha tín hiệu. Ở bước đồng bộ thô, việc tính toán độ lệch tần số doppler sẽ dựa trên chuỗi tín hiệu hình sin được gắn vào cuối mỗi khung truyền. Ở bước này, việc tính toán độ chính xác độ lệch tần số Doppler phụ thuộc vào độ dài chuỗi tín hiệu hình sin. Như đã nói ở trên, nếu độ dài chuỗi tín hiệu sin quá lớn sẽ ảnh hưởng tới băng thông của hệ thống nên trong thực nghiệm chúng tôi sử dụng chuỗi sin có độ dài tương đương với độ dài của 3 tín hiệu OFDM. Do vậy việc tính toán độ lệch tần Doppler chỉ tương đối chính xác ở bước đồng bộ này. Việc điều chỉnh chính xác độ lệch tần sẽ được thực hiện trong bước đồng bộ tinh.

Bước 1. Đồng bộ thô: Trước tiên các khung sẽ được tách ra dựa trên khoảng trống giữa các khung. Bên thu sẽ tính tần số thu được tương ứng với sóng mang dựa trên tín hiệu sin phát đi được gắn vào cuối mỗi khung. Khi đó tần số sóng mang tại máy thu dựa trên chuỗi tín hiệu sin được tính theo công thức:

$$F_r = \frac{Z_c \cdot f_s}{2 \cdot L_s} \tag{2}$$

trong đó: Z_c (Zeros Cross) là số lần cắt không của tín hiệu thu được; L_s là độ dài chuỗi sin.

Độ lệch tần số lấy mẫu cần điều chỉnh được tính như sau:

$$\Delta f = \left[\frac{(F_c - F_r) \cdot f_s}{F_c} \right] \tag{3}$$

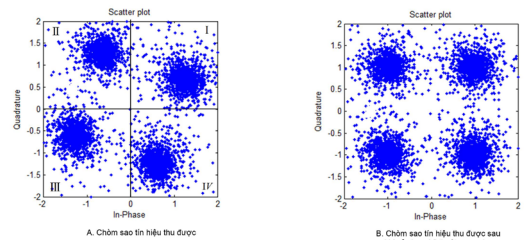
trong đó: F_c là tần số sóng mang bên phát phát đi; [] là phép làm tròn số.

Tuy nhiên để có thể lấy mẫu trở lại tín hiệu thì giá trị này cần phải được làm tròn số. Ở đây chúng tôi sử dụng hàm nội suy và lấy mẫu lại của Matlab. Sai lệch do tính không chính xác tần số Doppler và do quá trình làm tròn số cùng với sai lệch do ảnh hưởng của quá trình truyền gây ra do môi trường và các dao động do sóng mặt nước gây ra sẽ được bù lại trong phần đồng bộ tinh thông qua ước lượng kênh truyền. Tiếp theo đó tín hiệu thu sẽ được tái lấy mẫu lại theo tần số lấy mẫu mới bằng:

$$f_{rs} = f_s + \Delta f \tag{4}$$

Sau khi được lấy mẫu lại tín hiệu thu được: $y_r(n) = \text{Resample}[y(n)]$, tín hiệu $y_r(n)$ sẽ được đưa qua khối tìm đồng bộ để xác định điểm bắt đầu của khung tín hiệu. Các OFDM symbol sẽ được tách ra và loại bỏ khoảng bảo vệ. Symbol tín hiệu thu trong miền thời gian sau khi tách khoảng bảo vệ: $y_r(n) = [y_0, y_1, \dots, y_{2N+1}]$. Khi đó tín hiệu thu được ở trong miền thời gian sẽ được đưa qua biến đổi FFT và ước lượng kênh truyền để khôi phục lại dữ liệu.

Bước 2. Xoay pha tín hiệu: Việc hiệu chỉnh tần số Doppler cần phải làm tròn số để thực hiện tái lấy mẫu lại tín hiệu cộng thêm với cả sai số do tính toán và ảnh hưởng của môi trường nên vẫn còn tồn tại sự khác biệt giữa tần số tín hiệu thu và phát. Điều này sẽ khiến cho chòm sao của tín hiệu thu được bị xoay đi một góc như Hình 4.A

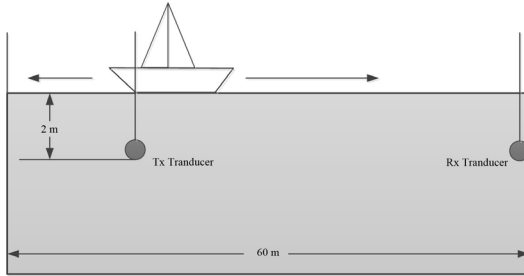


Hình 4. Chòm sao tín hiệu thu được sau giải mã

Để điều chỉnh độ lệch pha này tôi sử dụng một thuật toán xoay pha đơn giản như sau: mặt phẳng chòm sao được chia thành 4 góc phần tư như Hình 4.A. Tại mỗi góc phần tư, ta sẽ tính tổng trung bình góc pha của mỗi tín hiệu thu được nằm trong góc phần tư đó. Đối với tín hiệu nằm trong góc phần tư thứ nhất thì giá trị góc pha sẽ nằm trong khoảng từ $[0 - \pi / 2]$. Tín hiệu nằm trong các góc phần tư còn lại sẽ được cộng lấy trung bình. Sau đó quy chuẩn về góc phần tư thứ nhất bằng cách trừ đi góc pha tương ứng lần lượt là $\pi / 2, \pi, -\pi / 2$ cho các góc phần tư thứ 2, 3 và 4. Cuối cùng ta sẽ tính tổng trung bình góc pha của cả 4 góc phần tư làm góc quay pha. Tín hiệu sau khi quay pha như ở Hình 4.B.

3. Kết quả thực nghiệm

Việc thực nghiệm được thực hiện tại Hồ Tiền Đại học Bách Khoa Hà Nội với khoảng cách tối đa là 60m và độ sâu 2m. Để thực hiện thí nghiệm với hiệu ứng doppler với một Tranducer phát và một Tranducer thu, chúng tôi đã thiết bị thu tín hiệu OFDM ở một điểm cố định trên hồ. Máy phát được đặt trên một chiếc thuyền nhỏ và được kéo bằng dây từ ở hai phía theo góc thẳng với hướng sóng tới của máy thu.



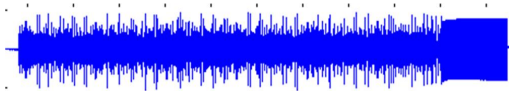
Hình 5. Sơ đồ thực nghiệm hệ thống trên Hồ Tiền

Sau đó, kết quả sẽ được xử lý bằng các phần mềm được phát triển bởi phòng thí nghiệm truyền thông không dây (WICOM) của Đại học Bách Khoa Hà Nội. Các thông số hệ thống OFDM được cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số của hệ thống UWA

Thông số	Giá trị
1 Tranducer phát – 1 Tranducer thu	SISO
Tần số lấy mẫu	96 kHz
Băng thông	12-15kHz
Độ dài FFT (N)	2048
Độ dài khoảng bảo vệ (GI)	1024
Phương pháp điều chế	QPSK
Chiều dài của OFDM symbol (ms)	32
Khoảng cách giữa các sóng mang OFDM (Hz)	46.865
Số OFDM symbol trên một khung (N_S)	40
Chiều dài khung (T_f) (ms)	1280
Độ dài chuỗi sin (ms)	200
Khoảng trống giữa các khung (ms)	200

Tín hiệu phát là các khung truyền liên tiếp cách nhau khoảng 0.2s. Với tốc độ lớn hơn 2m/s độ dịch tần doppler khoảng 16 Hz lớn hơn 34% độ rộng một sóng mang con của tín hiệu OFDM là 46Hz.



Tốc độ chuyển động trong thí nghiệm đạt 2m/s. Chòm sao tín hiệu như Hình 4. Tỷ lệ lỗi symbol: **SER** = **0.115** đạt được khi chưa áp dụng các kỹ thuật sửa lỗi.

4. Kết luận

Phương pháp truyền thông dưới nước sử dụng kỹ thuật OFDM có gắn sóng mang bằng cách gắn thêm một chuỗi tín hiệu hình sin vào cuối của mỗi khung tín hiệu OFDM mà chúng tôi đề xuất có ưu điểm là có khả năng thích nghi được với sự thay đổi tốc độ lớn và liên tục trong khoảng thời gian ngắn. Kết quả thử nghiệm chỉ dừng lại trong khuôn viên của trường đại học nên tốc độ trong thử nghiệm có hạn chế là 2m/s. Nhược điểm của việc sử dụng sóng mang gắn thêm vào cuối của khung dữ liệu là làm giảm băng thông của hệ thống nhưng so với các phương pháp khác thì độ dài tín hiệu được gắn thêm vào cũng không lớn hơn mà nó lại cho phép hệ thống có thể di chuyển với tốc độ nhanh hơn và có thể áp dụng với các khung có chiều dài ngắn hơn.

Đơn vị bảo trợ:

Nghiên cứu này được thực hiện dưới sự hỗ trợ của đề tài **T2016-LN-14** thuộc Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.

Tài liệu tham khảo:

- [1] Tran Minh Hai, Saotome Rie, Suzuki Taisuki, Tomohisa Wada, A Transceiver Architecture for Ultrasonic OFDM with Adaptive Doppler Compensation, International Journal of Information and Electronics Engineering, vol. 4, no. 3, 2014.
- [2] Dinh Hung Do, Quoc Khuong Nguyen, Do Viet Ha, and Nguyen Van Duc, A Time Synchronization Method for OFDM-Based Underwater Acoustic Communication Systems, Inter. Conf. on Advanced Technologies for Communications (ATC), pp. 131-134, 2016.
- [3] Baosheng Li, Student Member, IEEE, Shengli Zhou, Member, IEEE, Milica Stojanovic, Member, IEEE, Lee Freitag, Member, IEEE, and Peter Willett, Fellow, IEEE, Multicarrier Communication over Underwater Acoustic Channels with Nonuniform Doppler Shifts, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 38, no. 4, pp. 614-631, 2013.
- [4] M.Stojanovic, Low complexity OFDM detector for underwater acoustic channels, IEEE Oceans Conf., Sept. 2006.
- [5] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, and P. Willett, Non-uniform Doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels, in OCEANS 2007-Europe. IEEE, 2007, pp.1-6.
- [6] T. Schmidl and D. Cox, Robust frequency and timingsynchronization for OFDM, IEEE Trans. Commun, vol. 45, no.12, 1997:1613-1621

