

A SOLUTION OF WIDEBAND HOPPING FOR ACTIVE UNDERWATER NAVIGATION SYSTEMS

Dinh Thi Thuy Duong

Academy of Military Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 29/4/2022	Active underwater navigation systems have mostly used single pulse modulation signals of the sine, cosine, hyperbolic, or linear frequency modulation in recent years. These systems using the signals are limited factors such as range resolution, low azimuth; bad anti-interference ability; the maximum detection distance is not large and it is not possible to ensure the secrecy of the transmitted signal structure. This paper presents a new broadband signal solution using Costas code to improve detection and resolution capabilities for active underwater navigation systems. The research proposes a model of frequency hopping hydroacoustic signal according to the Costas rule and signals combining Costas frequency hopping with linear frequency modulation, applied on the active sonar model of ultra-short baseline USBL. Simulation results show that the discriminant ability of the navigation system depends only on the bandwidth of the signal, gain of the signal to noise ratio at the output of the combined filter is 17 dB with the Costas N=8 and 23.8 dB with Costas N=16. This result allows the design of longer signal chains to improve activity range of the sonar system while ensuring high resolution at range.
Revised: 30/5/2022	
Published: 31/5/2022	
KEYWORDS	
Stepped Frequency	
PhaseCoded Stepped Frequency	
High Range Resolution	
Costas	
Hydroacoustic signal	

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP NHẢY TẦN BĂNG RỘNG CHO HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ DƯỚI NƯỚC CHỦ ĐỘNG

Dinh Thị Thùy Dương

Viện Khoa học Công nghệ Quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 29/4/2022	Các hệ thống định vị thủy âm chủ động hiện nay hầu hết sử dụng các tín hiệu điều chế xung đơn dạng Sin, Cosin hoặc điều tần tuyến tính hoặc Hypebol. Các hệ thống định vị thủy âm chủ động sử dụng các tín hiệu này có những hạn chế: khả năng phân giải cự li, phương vị thấp; khả năng chống nhiễu kém; cự li phát hiện cực đại không lớn và không có khả năng đảm bảo bí mật cấu trúc tín hiệu phát đi. Bài báo công bố giải pháp tín hiệu nhảy tần băng rộng mới sử dụng mã Costas nhằm nâng cao khả năng phát hiện, khả năng phân giải cho các hệ thống định vị thủy âm chủ động. Nghiên cứu đề xuất cấu trúc tín hiệu thủy âm nhảy tần theo quy luật Costas và tín hiệu kết hợp giữa nhảy tần Costas với điều tần tuyến tính, ứng dụng trên mô hình sonar chủ động kiểu đường cơ sở cực ngắn USBL (Ultra-short Baseline). Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng phân biệt của hệ thống định vị chỉ phụ thuộc vào băng thông của tín hiệu, độ lợi tỷ số tín/tạp ở đầu ra bộ lọc phối hợp đạt được 17 dB với Costas N=8 và 23,8 dB với Costas N=16. Điều này cho phép thiết kế các chuỗi tín hiệu có độ dài lớn hơn để nâng cao cự li làm việc của hệ thống sonar mà vẫn đảm bảo khả năng phân giải cao về cự li.
Ngày hoàn thiện: 30/5/2022	
Ngày đăng: 31/5/2022	
TỪ KHÓA	
Nhảy tần	
Nhảy tần băng rộng	
Phân giải cao	
Costas	
Tín hiệu thủy âm	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5927>

Email: duongmta@gmail.com

<http://jst.tnu.edu.vn>

449

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Do tầm quan trọng của lĩnh vực định vị thủy âm quân sự, những nghiên cứu lý thuyết về các dạng sóng mới đã được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu xây dựng để nâng cao chất lượng cho các hệ thống này. Các nghiên cứu về sonar chủ động hướng tới một số vấn đề chính dưới đây.

Mở rộng được vùng quan sát, đây là tham số phụ thuộc và công suất trung bình của tín hiệu phát đi, hay độ rộng xung phát [1], [2]. Các giải pháp nâng cao công suất đỉnh của xung phát bị giới hạn bởi khả năng của bộ khuếch đại công suất và công suất chịu đựng của hệ cảm biến. Khi mở rộng độ rộng xung phát thì dẫn tới giảm khả năng phân biệt cự ly và sự can nhiễu đa đường xuất hiện trong xung.

Nâng cao khả năng phân giải về cự ly là giải pháp nâng cao khả năng phân biệt về cự ly thực hiện bằng giảm độ rộng xung phát sẽ làm giảm cự li quan sát của sonar. Hầu hết người ta sử dụng giải pháp mở rộng phổ của tín hiệu hay sử dụng các tín hiệu dải rộng [3], [4].

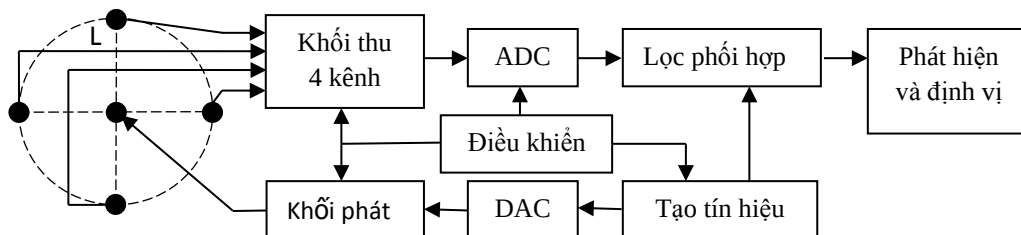
Nâng cao khả năng phân biệt về phương vị là giải pháp nâng cao khả năng phân biệt về phương vị được thực hiện thông qua kết quả xử lý beaming tín hiệu. Hai kỹ thuật beaming là tạo dạng búp sóng phát và định dạng búp sóng thu. Một tín hiệu có búp sóng chính nhọn, và các búp sóng phụ thấp ở cả phía phát, phía thu cho phép khả năng phân biệt về phương vị hiệu quả thông qua phân tích tương quan thời gian trong một mô hình định hướng sóng tới TOA (Time of Arrival) [3]-[6].

Nâng cao khả năng chống nhiễu, hệ thống chống nhiễu tốt khi hệ thống đó có thể tạo ra được tín hiệu băng rộng ở phía phát. Khả năng chống nhiễu đa đường (fading) còn phụ thuộc vào vấn đề thu và xử lý tín hiệu của phía thu.

Giải pháp sử dụng các tín hiệu nhảy tần, dải rộng cho phép đạt được đồng thời những vấn đề đặt ra ở trên. Các kỹ thuật điều chế tần số theo quy luật tuyến tính hay hypebol cũng cho phép mở rộng phổ của xung phát. Tuy nhiên, do các búp sóng phụ của hàm tương quan của các tín hiệu này khá lớn [7] dẫn đến việc tăng khả năng báo động nhầm đối với các mục tiêu có dấu vết nhỏ.

2. Mô hình hệ thống nghiên cứu

Nghiên cứu thực hiện trên mô hình sonar chủ động đơn giản như trên hình 1 [8], [9]. Trong đó, sử dụng hệ thống cảm biến thu phát dạng trụ tròn gồm 1 cảm biến phát vô hướng và 4 cảm biến thu theo mô hình USBL.



Hình 1. Mô hình hệ thống thực nghiệm sonar chủ động kiểu USBL

Trong mô hình hệ thống USBL trên, dải tần số lựa chọn từ 28 kHz đến 36 kHz. Bộ tạo tín hiệu sẽ tạo ra các cấu trúc tín hiệu Costas, LFM Costas, sau đó qua bộ biến đổi số - tương tự DAC để chuyển từ tín hiệu số về tín hiệu tương tự, sau đó đưa tới khối phát để phát đi qua cảm biến phát. Bộ tạo tín hiệu cũng thực hiện lưu giữ mẫu số liệu của tín hiệu phát đi, đưa đến bộ lọc phối hợp. Đầu ra bộ lọc phối hợp là kết quả tính toán tương quan giữa tín hiệu thu được từ 4 kênh thu qua ADC (tần số lấy mẫu 200 kHz) với tín hiệu gốc ban đầu, tín hiệu này được đưa tới bộ phát hiện và định vị sử dụng kỹ thuật TOA, TOF (Time of Fly) trên cơ sở độ lệch thời gian sóng tới giữa các cảm biến thu và khoảng cách giữa các cảm biến đã biết trước.

3. Giải pháp tín hiệu nhảy tần băng rộng

3.1. Tín hiệu nhảy tần Costas

Đường bao phức của tín hiệu Costas có chuỗi nhảy tần [1]:

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_M\} \quad (1)$$

có thể được miêu tả bởi công thức:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{NT_c}} \sum_{m=1}^M u_m[t - (m-1)T_c] \quad (2)$$

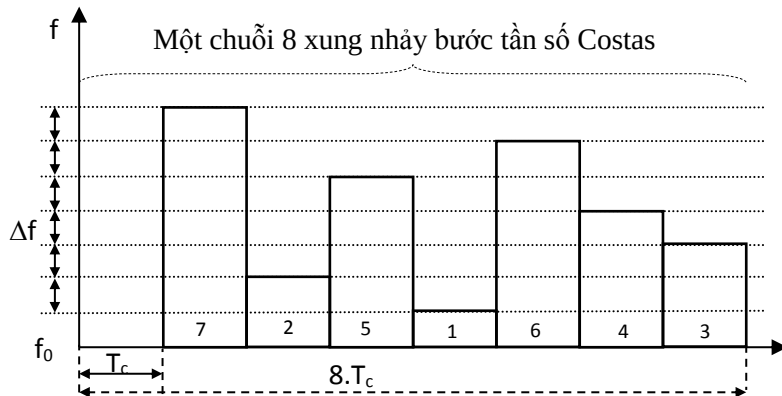
trong đó:

$$u_m(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_m t} & 0 \leq t \leq T_c \\ 0 & t \notin [0, T_c] \end{cases} \quad (3)$$

và

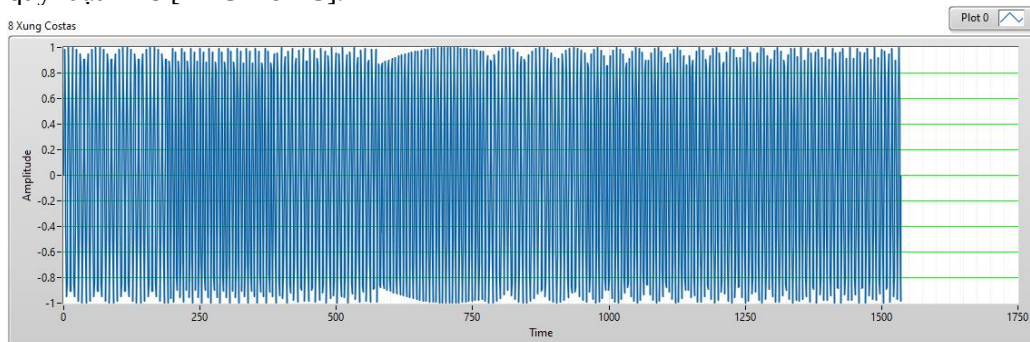
$$f_m = \frac{a_m}{T_c} \quad (4)$$

Công thức (4) chỉ ra rằng giãn cách tần số bằng nghịch đảo của thời gian tồn tại ở mỗi tần số. Điều này đảm bảo tính trực giao của tín hiệu để phổ của tín hiệu xung con ở mức 3 dB không chồng lấn lên nhau.



Hình 2. Chuỗi tám xung tín hiệu nhảy bước tần số Costas $N = 8$ [7 2 5 1 6 4 3]

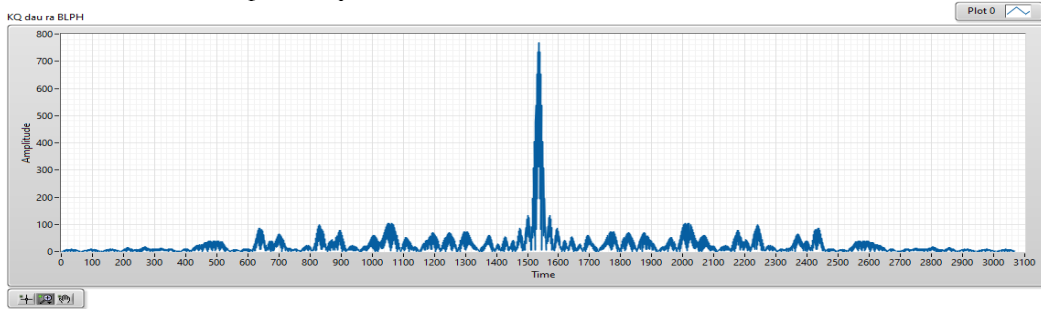
Hình 2 mô tả đặc trưng tần số của tín hiệu Costas theo thời gian với chuỗi 8 xung, nhảy tần theo quy luật $N=8$ [7 2 5 1 6 4 3].



Hình 3. Dạng sóng của tín hiệu Costas $N = 8$ [7 2 5 1 6 4 3]

Độ rộng của một xung con trong chuỗi sẽ là: $T_c = 1/\Delta f = 1$ ms. Với $\Delta f = 1$ kHz, thỏa mãn tính chất $T_c \Delta f = 1$ để đảm bảo tính trực giao tần số giữa các xung con trong chuỗi. Bảng thông toàn

bộ của tín hiệu sẽ là: $B = 7\Delta f = 7 \text{ kHz}$. Dạng sóng của tín hiệu được tạo ra bởi hệ thống trên hình 3. Tín hiệu đầu ra bộ lọc phối hợp được cho trên hình 4.



Hình 4. Kết quả đầu ra bộ lọc phối hợp

3.2. Tín hiệu kết hợp giữa nhảy tần Costas và LFM (LFMCostas)

Đường bao phức của tín hiệu LFMCostas có phương trình biểu diễn như sau [1]:

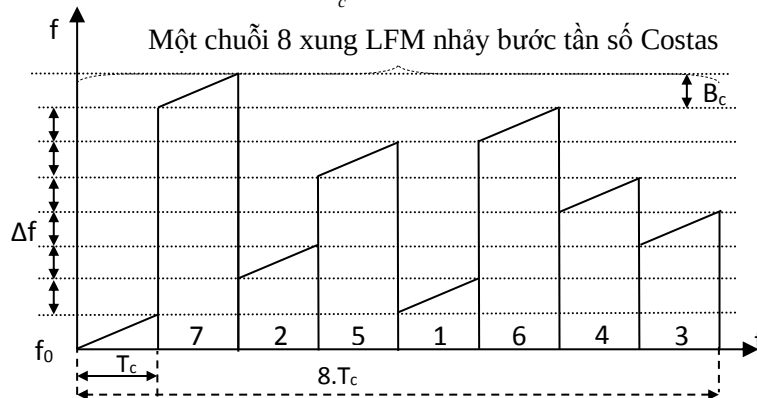
$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{NT_c}} \sum_{m=1}^M u_m[t - (m-1)T_c] \quad (5)$$

trong đó:

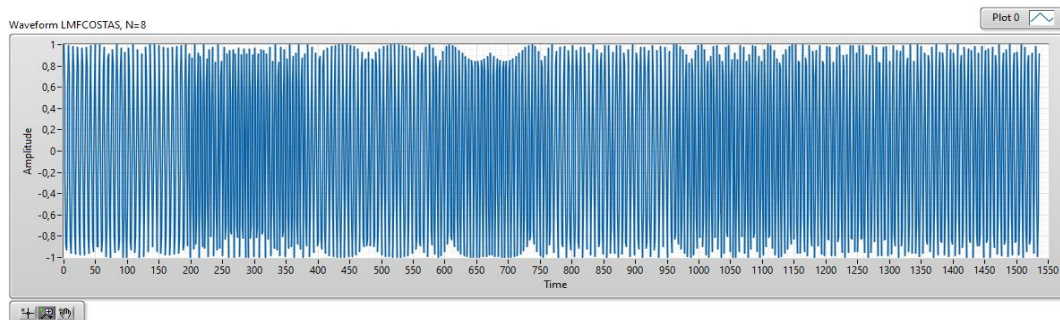
$$u_m(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_m t} & 0 \leq t \leq T_c \\ 0 & t \notin [0, T_c] \end{cases} \quad (6)$$

và

$$f_m = \frac{a_m}{T_c} = a_m B_c = a_m \Delta f \quad (7)$$



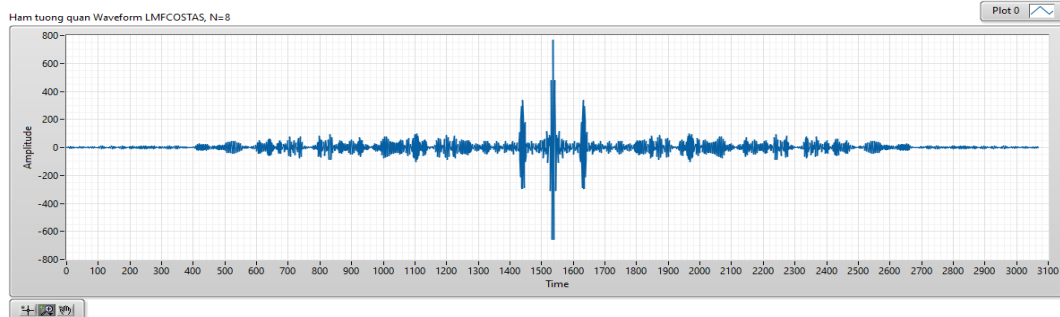
Hình 5. Chuỗi 8 xung tín hiệu LFM nhảy bước tần số Costas $N = 8$ [7 2 5 1 6 4 3]



Hình 6. Dạng tín hiệu LFMCostas với $N=8$ [7 2 5 1 6 4 3]

Hình 5 mô tả đặc trưng tần số của tín hiệu LFMCostas theo thời gian với chuỗi 8 xung, nhảy tần theo quy luật $N=8$ [7 2 5 1 6 4 3].

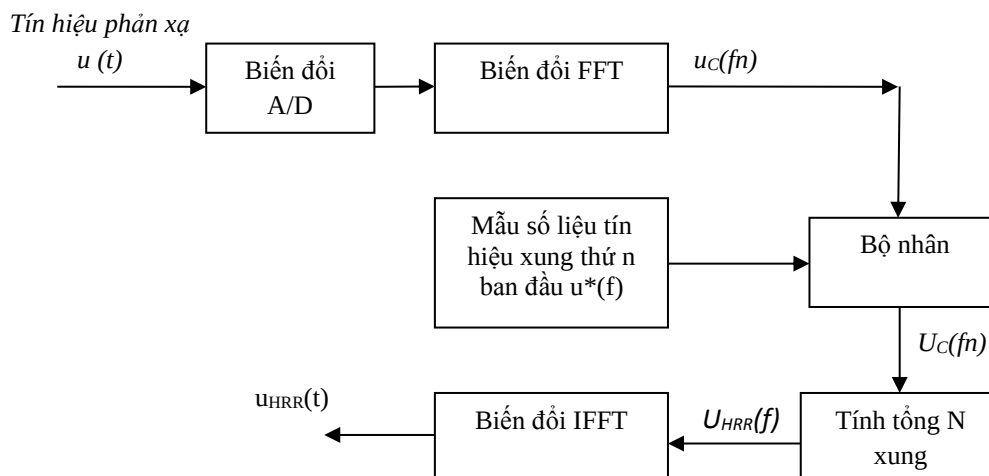
Tín hiệu nhảy bước tần số Costas các xung điều tần tuyến tính (LFMCostas) có dạng như trên hình 6. Hàm tương quan của nó có dạng như trên hình 7.



Hình 7. Hàm tương quan của tín hiệu LFMCostas với $N=8$ [7 2 5 1 6 4 3]

3.3. Mô hình xử lý lọc phối hợp

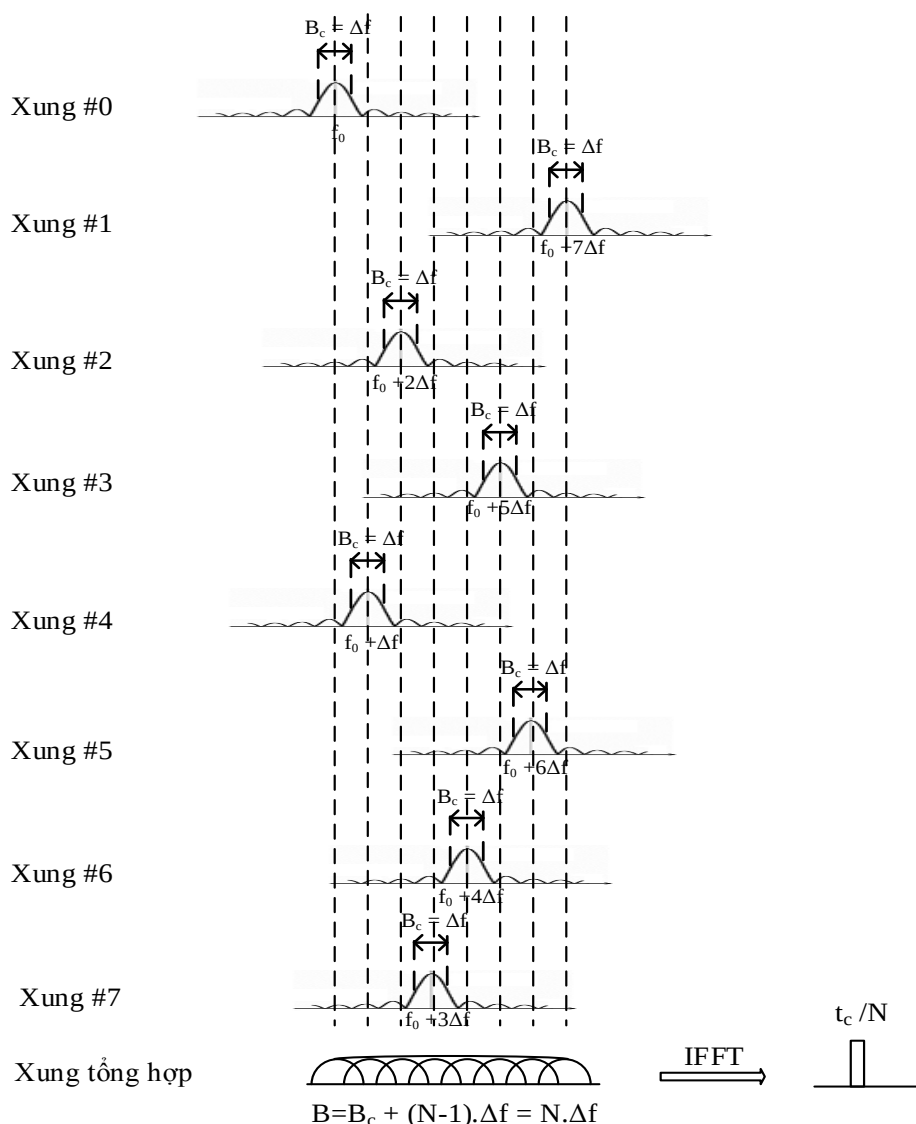
Sơ đồ khối của mô hình xử lý tín hiệu thu được trong miền tần số được mô tả trên hình 8. Bộ lọc phối hợp thực chất là bộ tính toán tương quan trong miền thời gian bởi các phép tính tích chập. Trong các hệ xử lý số, việc tính tích chập trong miền thời gian tương đương với việc tính tích trong miền tần số. Đầu ra của Bộ lọc phối hợp là các tín hiệu đã được nén lại về mặt thời gian, do tín hiệu đầu vào là tín hiệu dải rộng. Quá trình này trong kỹ thuật xử lý tín hiệu dải rộng cũng được gọi là quá trình xử lý phân giải cao (HRR – High Resolution Ranging).



Hình 8. Sơ đồ khối của mô hình xử lý HRR tín hiệu

Dạng sóng nhảy bước tần số Costas N xung qua các khâu xử lý được mô tả như trên hình 8. Bộ tính tổng N xung được thực hiện trong miền tần số với N xung nhảy bước tần số, thực chất đây là bộ cộng tích lũy với số vòng lặp $n = N$, kết thúc vòng lặp, kết quả đầu ra sẽ được chọn và khởi tạo lại bộ lấy tổng về 0.

Nếu lựa chọn phổ của một xung con LFMCostas $B_c = \Delta f$, thì phổ của tín hiệu sau khi xử lý HRR $u_{HRR}(t)$ sẽ là $B = N \cdot \Delta f$. Với tín hiệu Costas, phổ tín hiệu đầu ra sẽ là $B = (N-1) \cdot \Delta f$. Như vậy, từ chuỗi xung ban đầu, sau khi xử lý HRR, chúng ta nhận được xung $u_{HRR}(t)$ có độ rộng được nén lại theo tỷ số bằng $1/N$ xung T_c với tín hiệu LFMCostas và $1/(N-1)$ xung T_c với tín hiệu Costas. Điều này làm nâng cao khả năng phân biệt cự li và độ chính xác phát hiện và định vị. Quá trình xử lý nén xung trong miền tần số được mô tả trên hình 9, đối với tín hiệu Costas, các xung con T_c có $B_c = 0$. Với tín hiệu LFMCostas, các xung con T_c có $B_c = \Delta f$.



Hình 9. Quá trình nén xung trong miền tần số

4. Đánh giá kết quả và thảo luận

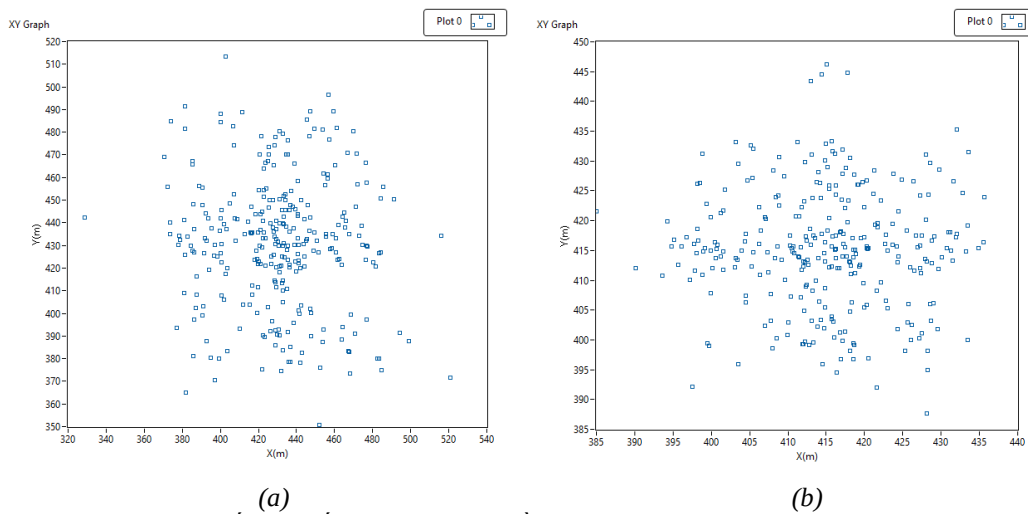
4.1. Cải thiện độ chính xác của các phép đo cự ly, góc hướng

Độ chính xác của phép đo được đặc trưng bởi độ lệch trung bình bình phương của phép đo thực hiện trong N lần đo:

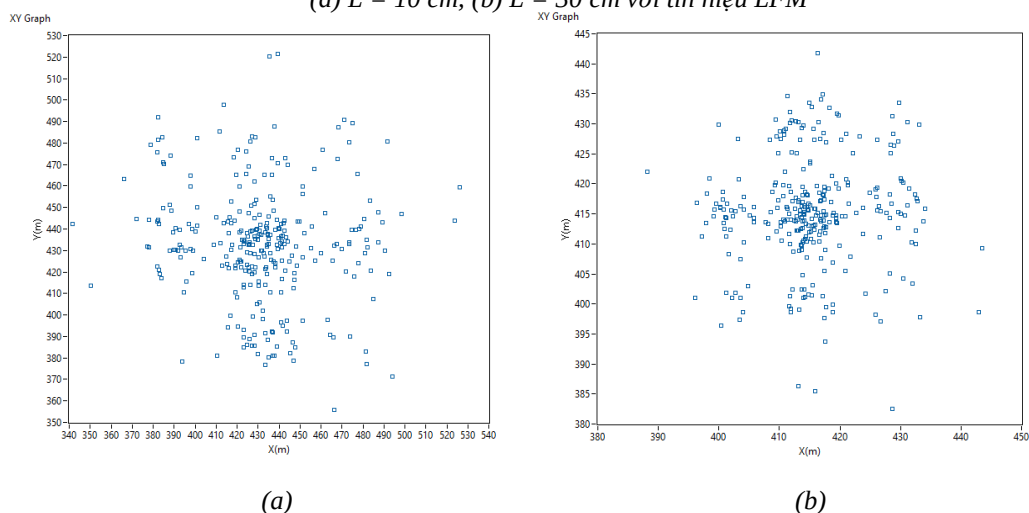
$$\sigma_{dx}' = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2 / N} \quad (8)$$

Trong đó, x_i là giá trị đo được, x_0 là giá trị trung bình của mục tiêu đối chiếu tới trục x trong mặt phẳng ngang, N là số lần thống kê.

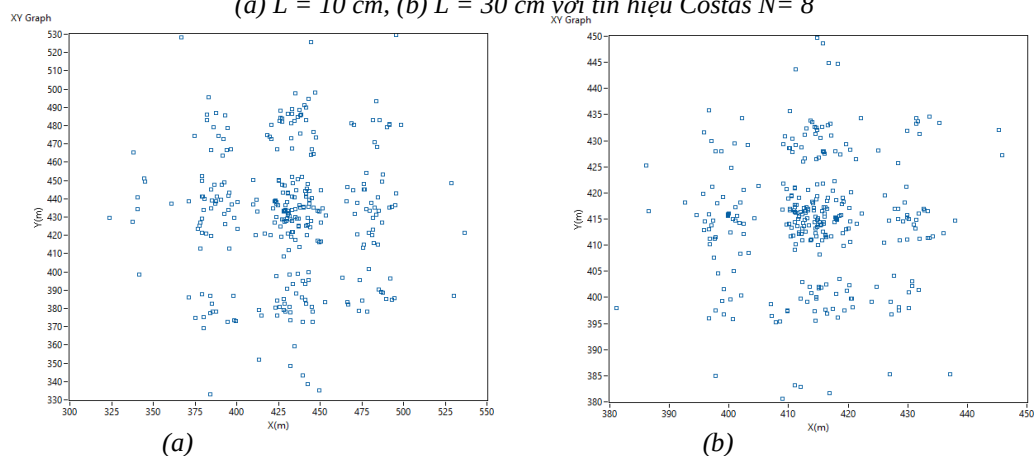
Một trong các phương pháp để đánh giá thống kê độ lệch chuẩn của các mẫu đo rời rạc là phương pháp Monte Carlo [10]. Hệ thống mô phỏng được thực hiện trên hệ USBL với 4 hydrophone. Tín hiệu mô phỏng so sánh độ lệch trung bình bình phương của các phép đo cự li đối với các tín hiệu LFM và Costas $N = 8$, với 300 lần đo và tỷ số tín/tạp đầu vào máy thu 7,6 dB.



Hình 10. Thống kê kết quả đo với 300 lần đo, sử dụng USBL 4 Hydrophone với:
(a) $L = 10$ cm, (b) $L = 30$ cm với tín hiệu LFM



Hình 11. Thống kê kết quả đo với 300 lần đo, sử dụng USBL 4 Hydrophone với:
(a) $L = 10$ cm, (b) $L = 30$ cm với tín hiệu Costas $N=8$



Hình 12. Thống kê kết quả đo với 300 lần đo, sử dụng USBL 4 Hydrophone với:
(a) $L = 10$ cm, (b) $L = 30$ cm với tín hiệu LFM Costas

Kết quả mô phỏng được cho trên hình 10 đến hình 12, với x, y là tọa độ của mục tiêu trong mặt phẳng ngang và mặt phẳng đứng và L là đường kính của trụ được bao 4 Hydrophone. Kết quả cho thấy, tín hiệu Costas có phân bố kết quả đo tập trung quanh điểm đo (400 m) tốt hơn các tín hiệu LFM và LFMCostas. Tính toán định lượng độ lệch chuẩn của 300 lần đo đối với các cấu trúc tín hiệu khác nhau được cho trên Bảng 1. Kết quả cho thấy, tín hiệu Costas khi sử dụng với hệ USBL có đường kính 40 cm đạt được phân bố chuẩn 6,63m trên mặt phẳng ngang và 6,62 m trong mặt phẳng thẳng đứng. Trong khi đó tín hiệu LFM tương ứng chỉ đạt được độ lệch chuẩn 7,54 m và 7,62 m.

Bảng 1. Độ lệch chuẩn của USBL khi sử dụng tín hiệu khác nhau

	L (cm)	10	15	20	25	30	40
<i>Costas</i> $N=8$	σ_{Lx}' (m)	26,35	17,51	14,24	11,53	8,78	6,63
	σ_{Ly}' (m)	26,54	18,30	13,67	11,21	9,03	6,62
<i>LFMCostas</i> $N=8$	σ_{Lx}' (m)	36,15	21,83	17,29	13,04	10,50	7,73
	σ_{Ly}' (m)	35,84	22,52	18,83	14,24	11,65	7,98
<i>LFM</i>	σ_{Lx}' (m)	30,93	20,30	15,86	12,85	10,23	7,54
	σ_{Ly}' (m)	30,58	19,97	16,40	12,72	9,98	7,62

Từ kết quả mô phỏng cho thấy, với cùng kích thước mảng L , tín hiệu Costas cho phép kết quả đo của hệ thống USBL có độ lệch chuẩn nhỏ hơn so với tín hiệu LFM và LFMCostas. Điều này đạt được là do hệ số nén của tín hiệu Costas lớn hơn và búp sóng sau nén nhọn hơn so với tín hiệu LFM và tín hiệu LFMCostas. Với tín hiệu LFMCostas, mặc dù có hệ số nén cao, nhưng do tác động của búp bên nên dẫn tới độ lệch chuẩn của các phép đo lớn hơn.

4.2. So sánh hiệu quả của tín hiệu Costas so với LFMCostas trên một số tham số

Xem xét kết quả nghiên cứu hai cấu trúc tín hiệu Costas và LFMCostas, cho thấy:

Ở cùng độ dài chuỗi xung N , tín hiệu LFMCostas cho phép cải thiện tốt hơn về hệ số nén và độ rộng xung tín hiệu đầu ra bộ lọc phối hợp. Do tín hiệu LFMCostas có băng thông lớn hơn. Giá trị so sánh như trong Bảng 2.

Bảng 2. So sánh tín hiệu Costas và LFMCostas

STT	Tham số	Costas	LFMCostas
I	Với số xung $N=8$		
1.1	Hệ số nén K (lần) (tương đương dB)	56 (17 dB)	64 (18 dB)
1.2	Độ rộng xung tín hiệu ra BLPH (ms)	0,142	0,125
1.3	Bán kính vùng mù (m)	6	6
II	Với số xung $N=16$		
2.1	Hệ số nén K (tương đương dB)	240 (23,8 dB)	256 (24 dB)
2.2	Độ rộng xung tín hiệu ra BLPH (ms)	0,133	0,125
2.3	Bán kính vùng mù (m)	24	24

Với độ dài chuỗi $N=8$, việc tín hiệu LFMCostas cải thiện hệ số nén 2,1 dB so với tín hiệu Costas, tương đương với việc cải thiện công suất phát gấp 1,6 lần. Nếu hai hệ thống có cùng công suất phát, hệ thống sử dụng tín hiệu LFMCostas cho phép cải thiện thêm 16% cự ly phát hiện cực đại.

So sánh kết quả hàm tương quan trên hình 4 (tín hiệu Costas) và hình 7 (tín hiệu LFMCostas), hàm tương quan của tín hiệu LFMCostas có búp phụ khá lớn nằm cách đỉnh trung tâm 0,5 ms tương đương 0,75 m. Đặc điểm này do tính chất của tín hiệu LFM. Trong điều kiện làm việc thực tế, dễ gây ra hiện tượng báo động nhầm do hiểu nhầm búp phụ là tín hiệu. Đây chính là nhược điểm của tín hiệu LFMCostas. Việc khắc phục hiện tượng này có thể được thực hiện trong việc thiết kế bộ phát hiện CFAR.

5. Kết luận

Việc nghiên cứu ứng dụng các cấu trúc tín hiệu khác nhau trên một mô hình hệ thống định vị thủy âm chủ động đơn giản kiểu USBL thu được hai vấn đề sau.

Độ rộng xung đầu ra bộ lọc phối hợp chỉ phụ thuộc vào băng thông của tín hiệu mà không phụ thuộc vào độ rộng chuỗi xung phát. Độ rộng xung đầu ra bộ lọc phối hợp quyết định độ chính xác của phép đo cự ly, phương vị và độ phân giải trong các hệ thống định vị chủ động dưới nước. Do đó, khi thiết kế tín hiệu băng rộng, cần tận dụng tối đa băng thông làm việc của các đầu thu phát. Hiện nay, các đầu thu phát băng rộng có băng thông từ 10 kHz đến 20 kHz, tùy thuộc vào dải tần số làm việc của hệ thống.

Khi tăng độ dài chuỗi Costas từ 8 lên 16, độ rộng phổ của chuỗi xung phát xạ tăng lên 0,5 kHz, dẫn đến độ rộng xung tín hiệu đầu ra bộ lọc phối hợp giảm từ 0,142 ms xuống 0,133 ms, điều này làm tăng khả năng phân biệt theo cự ly lên 3 cm. Độ lợi về tỷ số nén tín hiệu đạt được ở đầu ra bộ lọc phối hợp tăng từ 17 dB lên 23,8 dB, tăng 6,8 dB. Đây là độ lợi có ý nghĩa rất lớn cho phép mở rộng phạm vi làm việc của hệ thống. Trong thiết kế thực tế, cần cứ theo phạm vi hoạt động của hệ thống để lựa chọn độ dài xung phát xạ. Xung độ dài càng dài cho phép truyền được đi xa, tuy nhiên bán kính vùng mù của hệ thống sẽ lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] N. Levanon and E. Mozeson, *Radar signals*. A John Wiley & Son, Inc, 2004.
- [2] K. G. Kebkal, A. I. Mashoshin, and N. V. Morozs “Solutions for Underwater Communication and Positioning Network Development,” *Gyroscopy Navig*, vol. 10, pp. 161-179, 2019.
- [3] D. R. Wehner, *High-Resolution radar*, 2nd [M]. Artech House, 1995.
- [4] Y. Zhang, L. Wang, L. Qin, and C. Zhong, “Wideband and wide beam piezoelectric composite spherical cap transducer for underwater acoustics,” *Ferroelectrics*, vol. 583, no. 1, pp. 295-305, 2021.
- [5] L. Zhou and Y. Zhu, “Hybrid Tightly-coupled SINS/LBL for Underwater Navigation System,” *IEEE Access*, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3051398.
- [6] N. Kong, D. F. Shen, C. Tian, and C. Zhang “A New Low-Cost Acoustic Beamforming Architecture for Real-Time Marine Sensing: Evaluation and Design,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, p. 868, 2021, doi: 10.3390/jmse9080868.
- [7] M. Nömm, *Sonar Signal Design and Evaluation with Emphasis on Diver Detection*, Kiel, 2015.
- [8] L. Qinghua, “An Ultra-Short Baseline Underwater Positioning System with Kalman Filtering,” *Sensors* vol. 21, no.1, pp.143, 2021.
- [9] M. bA. Ainslie, *Principles of Sonar Performance Modeling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [10] C. L. Clark, *LabVIEW Digital Signal Processing: and Digital Communications*, McGraw Hill, 2005.