

# 잔향환경에 강인한 Generalized Sinusoidal Frequency Modulated 펄스 생성 기법<sup>+</sup>

(Design of the Robust Generalized Sinusoidal Frequency Modulated Pulse in Reverberation Environments)

김 근 환<sup>1)</sup>, 윤 경 식<sup>2)</sup>, 이 동 화<sup>3)</sup>, 조 점 군<sup>4)</sup>, 홍 정 표<sup>5)</sup>, 이 균 경<sup>6)\*</sup>  
(Guenhwan Kim, Kyungsik Yoon, Donghwa Lee, Chomgun Cho, Jungpyo Hong, and Kyunkyung Lee)

**요 약** 본 논문에서는 잔향 환경에 강인한 GSFM(Generalized sinusoidal frequency modulated) 펄스를 설계하는 기법을 제안하였다. GSFM 펄스는 SFM(Sinusoidal frequency modulated) 펄스의 일반화한 형태로써 거리와 도플러 분해능이 모두 우수한 압정형태의 모호성 함수를 가지는 장점이 있다. 하지만 일반화를 하는 과정에서 주기성이 사라지기 때문에, 빗살형태의 스펙트럼을 가지는 SFM 펄스에 비해 잔향환경에서 탐지 성능이 저하된다. 본 논문에서는 GSFM 펄스의 파라미터  $\rho$ 를 적절히 변화시켜 SFM 펄스의 잔향 제거 성능과 GSFM 펄스의 거리 분해능 성능 간에 트레이드오프(Trade-off)관계를 분석하고, 비교적 높은 성능을 동시에 만족할 수 있는  $\rho$  값을 제안하였다. 제안한 GSFM 펄스의 성능을 검증하기 위해 잔향환경을 모의하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 제안한 GSFM 펄스가 저속의 도플러 표적을 탐지하면서 우수한 거리 분해능을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

**핵심주제어:** 능동소나, 펄스설계, 잔향제거, GSFM 펄스

**Abstract** In this paper, we propose a method to design a generalized sinusoidal frequency modulated(GSFM) pulse that is robust to reverberation environment. GSFM pulses are a generalized form of SFM(Sinusoidal frequency modulated) pulses, which have the advantage of having a thumbtack ambiguity function with excellent range and Doppler resolution. However, the periodicity disappears during the generalization process, therefore, the detection performance is reduced in reverberation environment compared to SFM pulse with comb spectrum. In this paper,

\* Corresponding Author: kkleee@ee.knu.ac.kr

+ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD170009DD).

Manuscript received August 29, 2019 / accepted October 02, 2019

1) 경북대학교 전자공학부, 제1저자  
2) 김천대학교, IT융복합공학과, 공동저자  
3) 대구대학교, 정보통신공학부, 공동저자  
4) 국방과학연구소, 해양기술연구원, 공동저자  
5) 국방과학연구소, 해양기술연구원, 공동저자  
6) 경북대학교, 전자공학부, 교신저자

## 1. 서 론

수중의 표적을 탐지, 추적, 식별하기 위한 소나 시스템은 크게 수동소나와 능동소나로 구분된다. 수동소나는 표적이 방사하는 소음을 이용하는 소나 시스템으로 소음 준위가 크게 낮아진 현대의 잠수함을 탐지하기 어려운 것에 반해, 능동소나는 신호를 직접 송신하고 표적으로부터 반사된 반사파(Echo)를 분석함으로써 정보를 획득

the trade-off relationship between the reverberation suppression performance of the SFM pulse and the range resolution performance of the GSFM pulse is analyzed by appropriately changing the parameter  $\rho$  of the GSFM pulse. In order to verify the performance of the proposed GSFM pulse, the simulation was performed and it was confirmed that the proposed GSFM pulse has excellent distance resolution while detecting the slow Doppler target.

**Keywords:** Active sonar, Pulse design, Reverberation reduction, GSFM pulse

특하기 때문에 현재 활발히 연구되고 있다

(Collins and Atkins, 1998; Jong et al., 2000; Lee and Oh, 2000; Abraham and Peter, 2002; Peters, 2017). 그러나 능동소나는 표적의 반사파 외에도 해저면과 해수면 등에서 반사되는 잔향으로 인해 탐지성능이 저하되는 문제점이 발생한다. 잔향은 표적의 반사파와 유사한 특성을 가지는 유색잡음(Colored noise)이며, 능동소나에서 표적을 탐지하기 위해 사용하는 정합필터의 성능을 저하시킨다. 따라서 잔향을 제거하여 탐지성능을 향상시키는 것이 능동소나 연구에서 핵심적인 연구주제 중 하나이다. 잔향 제거 기법으로는 크게 수신된 신호를 백색화하는 기법(Steven and Salisbury, 1990; Kim, 2006; Choi, et al., 2008)과 송신신호의 파형을 성형(Shaping)하여 잔향에 강인한 펄스를 설계하는 기법이 있다(Pecknold, 2002; Doisy et al., 2008; Pecknold et al., 2009; Hague and Buck, 2017). 본 논문은 그중에서 잔향에 강인한 펄스를 설계하는 기법에 대해서 논의한다.

Doisy et al. (2008)은 잔향의 환경을 자함의 속도와 수신기의 조향방위에 따라 A, B, 그리고 C 영역으로 구분하였다. 이 중에서 A 영역은 표적이 거의 정지해있어 잔향과 반사파의 스펙트럼이 거의 일치하는 영역으로 실질적인 탐지가 어렵다. C 영역은 표적이 빠른 속력으로 이동하여 표적의 도플러가 잔향과 확실히 구분되는 영역이며, 단순히 송신펄스의 에너지를 높이는 것으로 탐지성능을 높일 수 있다. 따라서 능동소나 연구에서는 표적이 저속의 도플러를 가지는 B 영역에서의 잔향제거에 관심을 가지게 된다.

일반적으로 사용되는 송신펄스로는 협대역 신호인 CW 펄스와 광대역 신호인 LFM 펄스가 있다. 협대역 신호인 CW 펄스는 표적의 도플러

가 발생할 경우 도플러 필터(Doppler filter)를 이용하여 표적을 탐지할 수 있으며, 광대역 신호인 LFM 펄스는 표적의 속도가 상대적으로 느린 A 영역에서 잔향의 준위가 낮은 것으로 알려져 있다. 그러나 B 영역에서는 기존의 펄스를 사용하는 것보다 협대역과 광대역 신호의 장점을 동시에 사용하는 빗살(Comb) 스펙트럼 형태의 펄스가 우수하다고 알려져 있다(Pecknold, 2002; Doisy et al., 2008).

시간에 따른 주파수의 변화가 사인형태를 가지는 SFM(Sinusoidal frequency modulated) 펄스는 주기적인 특성으로 인해 빗살 스펙트럼을 가지며, 따라서 B 영역에서 우수한 잔향제거 성능을 가진다. 그러나 빗살 스펙트럼으로 인한 Blind speed 문제가 발생하고, 거리 분해능이 나쁜 단점이 존재한다(Pecknold, 2002). 이러한 문제점을 해결하기 위해 Hague and Buck(2017)은 SFM 펄스의 시간-주파수 특성을 일반화한 GSFM(Generalized sinusoidal frequency modulated) 펄스를 제안하였다. GSFM 펄스는 압정(Thumbtack) 형태의 모호성 함수(Ambiguity function: AF)를 가지기 때문에 거리와 도플러 분해능이 모두 우수하지만, 주기성이 사라지기 때문에 광대역 신호의 특성을 가지게 된다. 따라서 B 영역에서의 잔향제거 성능이 저하되는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 GSFM 펄스의 파라미터를 적절히 조절할 경우 SFM 펄스와 유사한 특성을 가지는 것에 착안하여, 잔향에 강인하면서도 동시에 거리, 도플러 분해능이 우수한 GSFM 펄스를 설계하는 방법을 제안한다. 이는 GSFM 펄스를 제안한 Hague and Buck(2017)의 논문에서 간략하게 언급한 바가 있으나 그들은 설계된 펄스가 양쪽의 성능을 모두 유지하지 못하는 열등한 펄스가 생성된다고 생각하였으며, 미묘

한 파라미터의 변화로 급격한 특성 변화가 일어나기 때문에 차라리 한쪽의 특성을 제대로 사용하는 것이 좋다는 결론을 내렸다.

그러나 본 논문에서는 이러한 현상을 보다 자세히 분석하였으며, GSFM 펄스의 파라미터를 적절히 설정할 경우 근거리에서 잔향을 효과적으로 제거하여 탐지성능을 높이면서 거리 분해능을 향상시켜 근거리에서 표적 위치추정의 모호성을 최소화하는 펄스를 설계할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 제안한 펄스를 검증하기 위해 잔향 환경을 모의한 시뮬레이션 수행하였으며, 실제 해상에서 활용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론에 이어 2장에서는 자함의 속도와 조향방위에 따라 나타나는 잔향의 영역을 설명하고, 3장에서는 GSFM 펄스의 파라미터를 조절하여 잔향에 강한 펄스를 생성하는 방법을 제안한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 제안한 펄스의 성능을 검증하고, 5장의 결론으로 마무리 짓는다.

## 2. 자함의 속도와 조향방위에 따른 잔향

Doisy et al.(2008)은 자함의 속도와 수신기의 조향방위에 따라 잔향의 영역을 A, B, C 영역으로 구분하였다. 송신된 펄스가 중심 주파수  $f_c$ 의

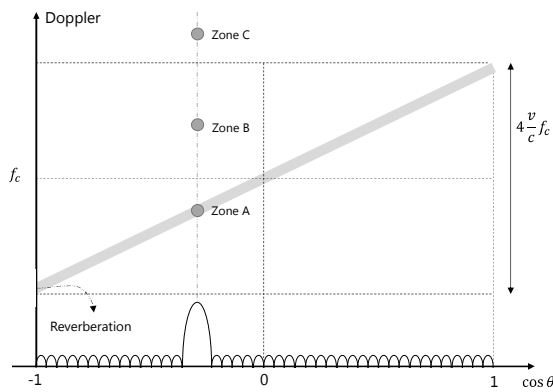


Fig. 1 Reverberation Zone in Doppler-Bearing Plane

협대역 신호라고 가정하고, 자함의 속도가  $v$ , 수중에서의 음속이  $c$ 라고 할 때, 조향방위  $\theta$ 에 따른 잔향의 도플러  $f_D$ 는 식 (1)과 같이 나타난다.

$$f_D = f_c \left( 1 + \frac{2v}{c} \cos \theta \right) \quad (1)$$

이때 수신기의 조향방향과 빔패턴, 도플러의 관계는 Fig. 1과 같이 나타나게 된다. Fig. 1에서 대각선의 진한 회색막대로 표시된 영역은 잔향 스펙트럼의 주엽(Mainlobe)을 의미한다. 잔향 환경은 표적의 도플러에 따라 A, B, C 영역으로 구분할 수 있다. A 영역은 매우 낮은 도플러의 표적을 의미하며 표적의 도플러가 잔향의 스펙트럼 주엽과 일치하는 영역이다. B 영역은 낮은 도플러의 표적을 의미하며 표적의 도플러가 잔향의 스펙트럼 부엽에 위치한다. C 영역은 높은 도플러를 가지는 표적을 의미하며 표적의 도플러가 잔향의 스펙트럼을 완전히 벗어난 영역이다. 이 중에서 A 영역은 표적의 도플러가 잔향의 스펙트럼에 위치하기 때문에 실질적으로 표적탐지가 어렵고, C 영역은 잔향의 스펙트럼과 무관하기 때문에 잔향에 의한 영향을 받지 않는다. 따라서 실제 잔향제거 기법은 B 영역에서의 잔향제거를 주 관심으로 가지게 된다. 기존의 HMS(Hull mounted sonar)의 빔패턴이 넓은 주엽을 가지는 반면 최신의 배열 센서는 큰 어퍼처(Aperture)를 이용하여 빔패턴의 주엽이 좁기 때문에 상대적으로 A 영역이 작아졌다. 따라서 B 영역에서의 잔향제거가 더욱 중요한 문제로 부각되고 있다.

B 영역에서의 잔향 준위는 크게 2가지에 의해 영향을 받는다. 첫 번째로는 레플리카와 다른 방향에서 빔패턴의 부엽(Sidelobe)을 통해 들어오는 잔향 성분이 겹치는 경우이다. 이 경우에는 창함수 등을 사용하여 빔패턴의 부엽 낮게 하는 것이 관건이며, 본 논문에서 다루는 관심사가 아니다. 두 번째로는 빔패턴의 주엽으로 잔향의 부엽이 수신되는 경우이며, 잔향의 성분이 펄스의 레플리카(Replica)와 정합(Matching)되면서 탐지성능이 저하된다. 이때 잔향의 도플러는 표적과 약간의 차이가 있기 때문에 모호성

함수의 도플러 부엽이 낮을수록 잔향의 영향이 줄어들게 된다. 따라서 잔향에 강인한 펄스를 얻기 위해서는 모호성 함수의 도플러 부엽의 크기가 낮은 펄스를 설계해야하며 일반적으로 여러 개의 톤(Tonal) 성분이 스펙트럼에 존재하는 빗살 스펙트럼의 신호가 우수하다고 알려져 있다(Pecknold, 2002; Doisy, et al., 2008).

### 3. 잔향에 강인한 GSFM 펄스 생성

#### 3.1 신호 모델 및 성능 평가 지표

능동소나 시스템에서 송신하는 펄스 신호  $s(t)$ 는 식 (2)-(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = e^{j\varphi_s(t)} e^{j2\pi f_c t}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

$$f_s(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi_s(t)}{\partial t} + f_c \quad (3)$$

여기서  $\varphi_s(t)$ 는 펄스의 위상 변조 함수,  $f_c$ 는 중심주파수,  $T$ 는 펄스의 길이를 의미한다.  $f_s(t)$ 는 펄스의 순시 주파수 함수로 위상 변조 함수  $\varphi_s(t)$ 를 미분한 값이며, 시간에 따라 변화하는 주파수의 값을 나타낸다.

모호성 함수는 송신한 펄스를 수신하고 정합 필터를 수행하였을 때의 응답을 의미하며, 펄스의 성능을 평가하는 지표로 사용된다. 모호성 함수는 식 (4)와 같이 정의된다(Pecknold, 2002).

$$|\chi(\tau, \eta)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(\eta(t-\tau)) dt \right|^2 \quad (4)$$

여기서  $\eta$ 는 도플러 스케일 인자로 상대 속도가  $v$ , 음파의 전달속도가  $c$ 일 때,  $\eta = \frac{1+v/c}{1-v/c}$ 으로 정의되며,  $\tau$ 는 시간지연을 의미한다. 일반적으로 펄스의 거리, 도플러 분해능은 모호성 함수의 첨두치에서  $-3\text{dB}$ 에 해당하는 모호성 선도(Ambiguity diagram)로 정의할 수 있다.

Q-Function은 모호성 함수의 시간 축을 따라 적

분한 결과로 식 (5)와 같이 정의되며, 설계된 펄스의 잔향 준위를 가늠할 수 있는 척도로 사용된다.

$$Q(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} |\chi(\tau, \eta)|^2 d\tau \quad (5)$$

#### 3.2 SFM 펄스, GSFM 펄스

SFM 펄스는 펄스의 순시 주파수가 사인과 형태를 가지는 펄스를 의미하며 위상 변조함수와 순시 주파수 함수가 각각 식 (6)과 (7)로 표현된다.

$$\varphi_{SFM}(t) = \beta \sin(2\pi f_m t) \quad (6)$$

$$f_{SFM}(t) = \beta f_m \cos(2\pi f_m t) \quad (7)$$

여기서  $\beta$ 는  $\beta = B/2f_m$ 으로 주어지는 변조 지수,  $B$ 는 펄스의 대역폭,  $f_m$ 은 변조 주파수를 의미한다. Fig. 2에  $f_c = 3\text{kHz}$ ,  $B = 1\text{kHz}$ ,  $T = 1\text{s}$ ,  $f_m = 20\text{Hz}$ 인 SFM 펄스의 스펙트로그램, 주파수 스펙트럼, 모호성 함수, 그리고 Q-Function을 나타내었다. SFM 펄스는 Fig. 2의 (a)와 같이 순시 주파수 함수가 주기성을 가지기 때문에 Fig. 2의 (b)와 같이 빗살 형태의 스펙트럼을 가지며, 따라서 잔향에 강인한 특성을 가진다. 그러나 Fig. 2 (c)의 모호성 함수와 Fig. 2 (d)의 Q-Function에서 알 수 있듯이 도플러 축으로 매우 큰 부엽이 나타난다. 이는 Blind Speed 문제로 알려져 있으며, 변조 주파수  $f_m$ 에 따라 결정된다(Pecknold, 2002; Doisy et al., 2008).

GSFM 펄스는 SFM 펄스를 일반화한 펄스로 위상 변조 함수와 순시 주파수 함수가 각각 식 (8)과 (9)로 표현된다.

$$\varphi_{GSFM}(t) = \frac{\beta}{t^{(\rho-1)}} \sin\left(\frac{2\pi\alpha t^\rho}{\rho}\right) \quad (8)$$

$$f_{GSFM}(t) = \beta\alpha \left[ \cos\left(\frac{2\pi\alpha t^\rho}{\rho}\right) - \left(\frac{\rho-1}{\rho}\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi\alpha t^\rho}{\rho}\right) \right] \quad (9)$$

여기서  $\beta$ 는  $\beta = B/2\alpha$ 로 정의되는 변조 지수,  $\alpha$ 는 주파수 변조 지수로 GSFM 펄스의 순시 주파수 함수에 포함되는 주기를 결정한다. 주기의 개

수  $C$ 는  $C = \alpha T^\rho / \rho$ 의 관계로 정의되며, 이때  $\rho$ 는 GSFM 펄스의 순시주파수 함수의 형태를 결정하는 무차원의 변수다.  $\rho=1$ 인 경우 순시 주파수 함수가 사인 형태로 정의되어 SFM 펄스와 동일한 펄스가 되고  $\rho$ 가 커질수록 펄스의 앞부분의 순시 주파수 형태가 늘어나고 뒷부분은 좁아지는 비 주기적인 형태로 변하여 압정 형태의 특성이 나타나게 된다(Hague and Buck, 2017).

Fig. 3에  $f_c = 3\text{kHz}$ ,  $B = 1\text{kHz}$ ,  $T = 1\text{s}$ ,  $\rho = 1.1$ ,  $C = 20$ 인 GSFM 펄스의 스펙트로그램, 주파수 스펙트럼, 모호성 함수, 그리고 Q-Function을 나타내었다. Fig. 3 (a)에서 GSFM 펄스의 순시 주파수 함수는 SFM 펄스와 달리 비 주기적인 형태를 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3 (c)과 같이 압정형태의 모호성 함수를 가지는 장점이 생긴다. 그러나 주기성이 사라지기 때문에 Fig. 3 (b)와 같이 주파수 스펙트럼이 광대역 스펙트럼의 형태를 가지게 되며 B 영역에서의 잔향 제거 성능이 저하된다. Fig. 3 (d)의 Q-Function에서 이를 확인할 수 있다. Fig. 3 (d)에서 GSFM 펄스는 기존의 LFM 펄스와 유사한 잔향 성능을 보이며, A 영역에서는 오히려 낮은 성능을 보인다.

### 3.3 제안하는 잔향에 강인한 GSFM 펄스

앞에서 언급했듯이 GSFM 펄스는  $\rho=1$ 인 경우에 SFM 펄스와 동일하다. 따라서  $\rho$ 를 1에 가깝게 설정하면서 GSFM 펄스의 특성을 최대한 유지하는  $\rho$ 를 찾아낸다면 잔향에 강인하면서 동시에 거리, 도플러 분해능 또한 우수한 능동펄스를 설계할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 즉 파라미터를 적절히 변경하여 잔향제거 성능과 분해능 사이의 적절한 트레이드오프(Tradeoff)를 찾는 것이 본 논문의 목적이다.

펄스의 특성은 중심주파수와 대역폭, 펄스 길이에 따라 다른 성능을 나타내지만 이는 현재 관심사가 아니다. 따라서 본 논문에서는 이 값을 고정하여  $f_c = 3\text{kHz}$ ,  $B = 1\text{kHz}$ ,  $T = 1\text{s}$ 의 GSFM 펄스를 설계하는 것을 목표로 하였다. 또한 Blind Speed는  $10\text{m/s}$ 로 설정하였으며 이는 SFM 펄스에서 변조 주파수  $f_m$ 이 약  $40\text{Hz}$ 일 때를 의미한다. 따라서 동일한 의미를 가지도록 만들기 위해

GSFM 펄스의  $C$ 를 40으로 맞춰주었다. GSFM 펄스의 파라미터  $\rho$ 의 값은 1에서 1.1까지 0.001의 간격으로 변화시켜 얻어지는 결과를 분석하였다.

Fig. 4에  $\rho$ 가 1.000, 1.007, 1.010, 1.100일 때 GSFM 펄스의 모호성 선도를 나타내었으며, Fig. 5에  $\rho$ 가 1.000, 1.007, 1.010, 1.020일 때 Q-Function을 나타내었다. 기존의 펄스와 비교를 위해  $f_c = 3\text{kHz}$ ,  $T = 1\text{s}$  CW 펄스와  $f_c = 3\text{kHz}$ ,  $B = 1\text{kHz}$ ,  $T = 1\text{s}$ 의 LFM 펄스의 Q-Function도 함께 나타내었다. 정량적인 비교를 위해 Table 1에 거리, 거리 해상도의 값과 도플러가  $4\text{m/s}$ 인 경우의 Q-Function의 값을 정리하였다.

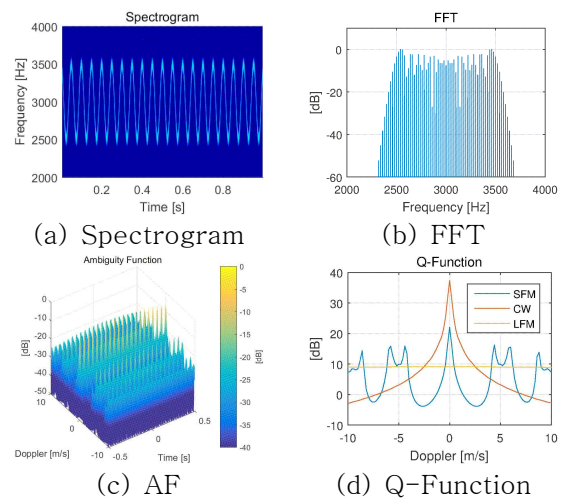


Fig. 2 SFM Pulse

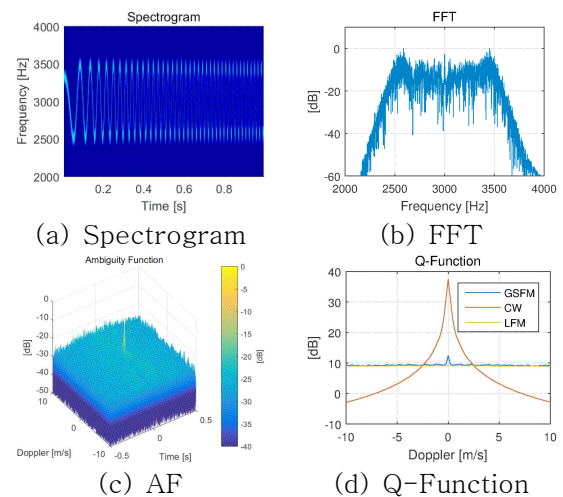


Fig. 3 GSFM Pulse

먼저  $\rho$ 에 따른 잔향 제거 성능을 분석하였다. 표와 그림에서  $\rho$ 가 1에서부터 점차 증가할수록 잔향 제거 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 특히  $\rho$ 가 1.015보다 커질 경우 CW 펄스보다 성능이 저하된다. 따라서 B 영역에서 CW 펄스의 잔향 제거 성능을 감안할 경우  $\rho$ 가 1.000에서 1.010 사이의 값을 가지는 경우 잔향 제거 성능이 우수하다고 판정하였다.

다음으로  $\rho$ 에 따른 거리 분해능을 분석하였다.  $\rho$ 가 1.000일 경우 CW 펄스와 비슷한 성능을 가지지만 증가함에 따라서 점차 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있으며  $\rho$ 가 1.020보다 커지면 점차 성능이 고착화된다. 일반적인 잠수함의 크기가 약 50m 정도인 것을 감안할 때 150m 정도의 거리 분해능을 가질 경우 잠수함의 위치를 특정하기에는 무리가 없을 것으로 판단하였다. 이는  $\rho$ 가 1.007에서 1.010사이의 값을 가지는 경우이며 SFM 펄스에 비해서 5.5배에서 11배의 우수한 거리 분해능을 가진다. 따라서 이 두 가지 분석을 조합한 결과  $\rho$ 가 1.007에서 1.010 사이의 값을 가지도록 GSFM 펄스를 설계하는 것이 우수한 거리, 도플러 분해능을 가지면서도 잔향 제거 성능이 우수한 펄스를 설계할 수 있다고 결론 내렸다.

Table 1 Q Value and Range Resolution of GSFM (Q Function Value of CW Pulse at 4m/s = 5.099 dB)

Parameter $\rho$	Q Function Value at $\pm 4\text{m/s}$	Range Resolution
1.000	-6.3804 dB	825 m
1.001	-6.2878 dB	750 m
1.003	-5.6967 dB	375 m
1.005	-4.5250 dB	225 m
1.007	-2.7595 dB	150 m
1.010	0.5304 dB	75 m
1.015	4.3001 dB	75 m
1.020	5.9929 dB	1 m
1.025	7.0798 dB	1 m
1.050	8.7752 dB	1 m
1.100	9.1895 dB	1 m

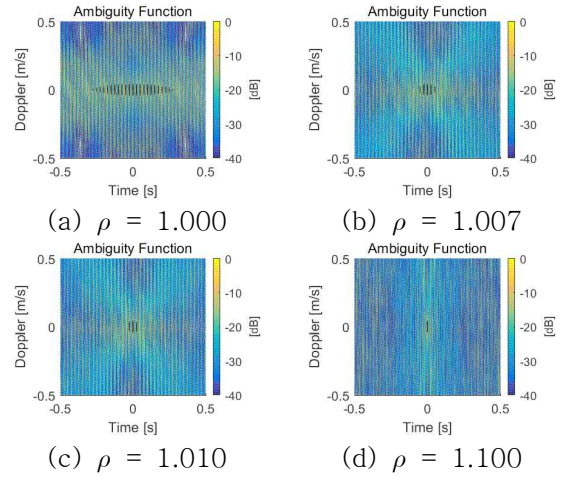


Fig. 4 3-dB Contour of GSFM Pulse

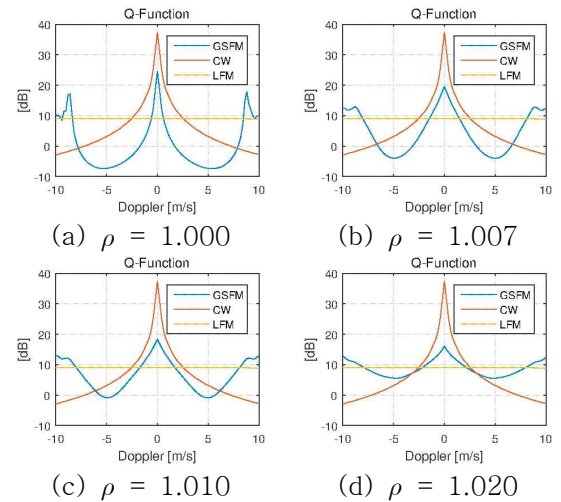


Fig. 5 Q Function of GSFM Pulse

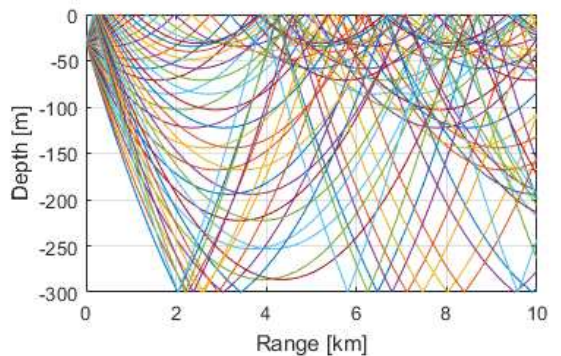


Fig. 6 Ray-Tracing Result

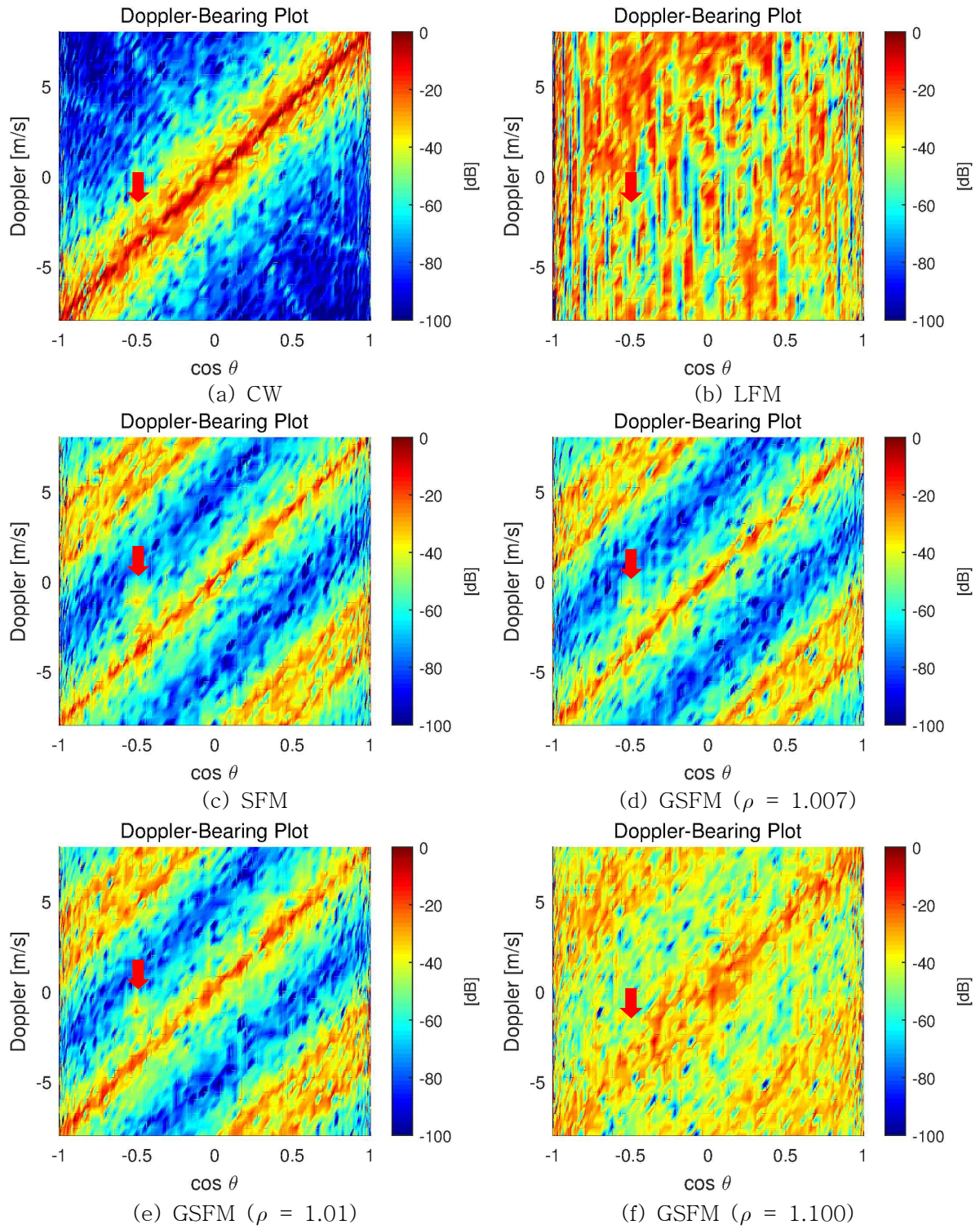


Fig. 7 Doppler-Bearing Display of Matched Filter Results

#### 4. 시뮬레이션

제안하는 잔향에 강인한 GSFM 펄스의 성능을 검증하기 위해 모의 잔향신호와 표적신호를 생성하였다. 모의 잔향신호는 Fig. 6과 같이 Ray-Tracing 기법(Urick, 1967)을 이용하여 여러 개의 다중경로의 합으로 표현하였으며, 방위별로 자함의 속도가 8m/s일 때의 도플러를 고려하여 생성하였다. 표적의 신호는 방위  $120^\circ$  ( $\cos\theta = 0.5$ )에서 0.7m/s의 방사 방향 속도(Radial velocity)를 가지도록 설정하다. 따라서 표적의 신호는 B 영역인 잔향의 부엽에 위치하게 된다. 펄스는 CW 펄스, LFM 펄스, SFM 펄스, GSFM 펄스를 사용하였고  $f_c = 3\text{kHz}$ ,  $B = 1\text{kHz}$ ,  $T = 1\text{s}$ 이다. 이때 SFM 펄스의  $f_m$ 은 40Hz이고 GSFM 펄스의  $C$ 는 40으로 설정하였다. GSFM 펄스는  $\rho$ 에 따른 성능을 분석하기 위해서 1.007, 1.010, 1.100의 3가지 펄스를 사용하였다.

Fig. 7에 정합필터의 결과를 도플러-방위에 대해서 나타내었으며 화살표는 표적의 위치를 나타내고 있다. Fig. 7의 (b)와 (f)에서와 같이 광대역 스펙트럼의 특성을 가지는 LFM 펄스와  $\rho$ 가 1.100인 GSFM 펄스는 B 영역에서의 잔향 제거 성능이 나쁘기 때문에 표적을 탐지할 수 없었다. 또한 Fig. 7 (a)에서 CW 펄스는 도플러 부엽을 충분히 감쇄하지 못하였기 때문에 B영역에 위치하는 낮은 도플러의 표적과 잔향의 준위가 비슷하여 구분하기 어렵다. 반면 Fig. 7의 (c), (d), (e)에서 SFM 펄스와  $\rho$ 의 값이 1.007, 1.010인 GSFM 펄스는 B 영역에서 우수한 잔향 제거 성능을 가지기 때문에 표적을 탐지할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4와 Table 1에서 확인할 수 있듯이  $\rho$ 가 1.007, 1.010인 GSFM 펄스는 우수한 거리 분해능을 가진다. 따라서  $\rho$ 가 1.007, 1.010인 GSFM 펄스는 잔향 환경에서 표적을 탐지하는 것과 동시에 우수한 거리 분해능을 가지기 때문에 단순히 SFM 펄스를 사용하는 것보다 탐지 이후의 추적, 식별과 같은 신호처리 과정에서 큰 이점을 가질 것으로 기대할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문은 잔향에 강인하면서도 거리, 방위 분해능이 뛰어난 능동펄스를 설계하는 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 GSFM 펄스의 파라미터  $\rho$ 가 1일 때는 SFM 펄스의 특성을 가지고 값을 높여갈수록 GSFM 펄스의 특성이 나타나는 것을 이용하여 분해능과 잔향 환경에서의 탐지 성능을 트레이드오프하는 적절한 파라미터  $\rho$ 를 찾는 방식이다. 모호성 함수와 Q-Function을 이용하여 분석한 결과 중심주파수 3kHz, 대역폭 1kHz, 길이 1s의 GSFM 펄스를 설계할 때  $\rho$ 가 1.007에서 1.01 사이의 값을 사용할 경우 SFM의 잔향제거 성능과 GSFM의 거리 분해능 사이의 적절한 트레이드오프를 이뤄낼 수 있었다. 설계된 GSFM 펄스는 CW 펄스에 비해 우수한 잔향제거 성능을 가지면서 SFM 펄스에 비해 5.5배에서 11배의 우수한 거리 분해능을 얻을 수 있었다. 또한 잔향 환경을 모의한 시뮬레이션을 통해 설계된 GSFM 펄스가 잔향 환경에서 우수한 탐지 성능을 보이는 것을 확인하였다.

#### References

- Abraham, D. A. and Peter K. W. (2002). Active Sonar Detection in Shallow Water using the Page Test, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 27(1), 35-46.
- Choi, B. W., Bae, E. H., Kim, J. S. and Lee, K. K., (2008). Improved Prewhitening Method for Linear Frequency Modulation Reverberation using Dechirping Transformation, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3), EL21-EL25, <https://doi.org/10.1121/1.2838249>
- Collins, T. and P. Atkins. (1998). Doppler-sensitive Active Sonar Pulse Designs for Reverberation Processing, *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 145(6), 347-353.
- Doisy, Y., Deruaz, L., Van Ijsselmuide, S. P.,



Beerens, S. P. and Been, R. (2008). Reverberation Suppression using Wideband Doppler-sensitive Pulses, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(4), 419-433.

Hague, D. A. and Buck, J. R. (2017). The Generalized Sinusoidal Frequency-Modulated Waveform for Active Sonar, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(1), 109-123.

Jong J.-H., Kang S.-W., Cho Y.-C., Choi B.-J., Yoon J.-O. and Oh J.-H. (2000), A Study on the Development of the Active Radar Reflector with Enhanced Function, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 5(3), 38-43.

Steven, K. and Salisbury, J. (1990). Improved Active Sonar Detection using Autoregressive Prewhiters, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(4), 1603-1611.

Kim, J. G. (2006). Whitening Method for Performance Improvement of the Matched Filter in the Non-white Noise Environment, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 11(3), 15-19.

Lee, C.-W. and Oh, S.-B. (2000). A Data Processing System on the Transportable Meteorological Radar, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 5(3), 44-50.

Pecknold, S. (2002). Ambiguity and Cross-ambiguity Properties of Some Reverberation Suppressing Waveforms, *Defence Research and Development Canada*, DRDC Atlantic TM, 129, 2002.

Pecknold, S. P., Renaud, W. M., Mcgaughey, D. R., Theriault, J. A. and Marsden, R. F. (2009). Improved Active Sonar Performance using Costas Waveforms, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(4), 559-574.

Peters, D. J. (2017). A Bayesian Method for Localization by Multistatic Active Sonar, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(1), 135-142.

Urick, R. J. (1967). *Principles of Underwater*

*Sound for Engineers*, McGraw-Hill Book Company.



**김 근 환 (Geunhwan Kim)**

- 정회원
- 경북대학교 전자공학부 학사
- 경북대학교 전자공학부 석사
- (현재) 경북대학교 전자공학부 박사과정
- 관심분야: 소나 신호처리, 배열 신호처리, 탐지이론



**윤 경 식 (Kyungsik Yoon)**

- 정회원
- 경북대학교 전자공학과 학사
- 경북대학교 전자공학과 석사
- 경북대학교 전자공학과 박사
- (현재) 김천대학교 IT융복합공학과 교수
- 관심분야: 소나 신호처리, 배열 신호처리, 탐지이론



**이 동 화 (Donghwa Lee)**

- 정회원
- 경북대학교 전자공학과 학사
- 경북대학교 전자공학과 석사
- (현재) 대구대학교 정보통신공학부 교수
- 관심분야: 지능형로봇시스템, 인공지능, 소나 신호처리



**조 점 군 (Chomgun Cho)**

- 정회원
- 연세대학교 전자공학 학사
- 연세대학교 전기전자공학 석사
- 샌디에고 주립대학교 응용해양과학 박사
- (현재) 국방과학연구소 해양기술연구원 소나체계개발단 선임연구원
- 관심분야: 거리추정기법, 적응빔형성, 연속송수신 소나신호처리 기법



**홍 정 표 (Jungpyo Hong)**

- 정회원
- 카이스트 정보통신공학 학사
- 카이스트 전기및전자공학 박사
- (현재) 국방과학연구소 해양  
기술연구원 소나체계개발단  
선임연구원

- 관심분야: 배열신호처리, 잡음제거, 연속송수신 소나신호처리 기법



**이 균 경 (Kyunkyung Lee)**

- 정회원
- 서강대학교 전자공학과 학사
- 텍사스 주립대 전자공학과 석사
- 텍사스 주립대 전자공학과 박사
- (현재) 경북대학교 전자공학

부 교수

- 관심분야: 소나 신호처리, 배열 신호처리, 탐지이론