

잔향 환경에 강인한 능동 소나 펄스의 분해능 특성 연구

A study on the features of resolution of robust active sonar pulses from the reverberation environment

정의철[†]

(Eui Cheol Jeong[†])

국방과학연구소 소나체계단

(Received January 7, 2016; revised January 27, 2016; accepted February 11, 2016)

초 록: 능동 소나 분야에서 잔향 환경에 강인한 펄스 형태에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 잔향 환경에 강인하다고 알려진 PTFM(Pulse Trains of Frequency Modulated waveform), Costas, Geometric Comb 신호에 대해 이론적 특성 분석과 해상에서 실험한 데이터를 바탕으로 각 펄스별 ambiguity function 특성 및 분해능 특성을 비교/분석하였다. 분석 결과 PTFM 펄스는 부펄스에 의한 부엽에 의해 거리 분해능이 매우 낮아졌으며 Costas 펄스는 도플러 부엽에 의해 도플러 탐지 성능이 매우 떨어졌다. Geometric Comb 펄스는 CW(Continuous Waveform)와 비슷한 분해능 특성을 보였으며 도플러 분해능이 가장 우수함을 확인하였다.

핵심용어: 능동 소나, PTFM, Costas, Geometric comb, 거리 분해능, 도플러 분해능

ABSTRACT: Many researches for improving detection performance in the reverberation environment have been conducted in active sonar systems. Especially the type of active pulse makes an impact on the detection performance in the reverberation environment. Thus, this paper describes the detection performance of PTFM (Pulse Trains of Frequency Modulated waveform), Costas, and Geometric Comb pulses which are known for their outstanding performance against the reverberation. Sea trial data of those pulses was analyzed and it was figured out that the range resolution of PTFM pulse was deteriorated by its sub-pulses. Costas pulse showed performance degradations of the doppler resolution by multipath signals. Geometric Comb pulse showed the best doppler resolution.

Keywords: Active sonar, PTFM, Costas, Geometric comb, Range resolution, Doppler resolution

PACS numbers: 43.60.Bf, 43.30.Vh

1. 서 론

일반적으로 소음 제한 환경에서는 고출력 능동 펄스를 송신하면 능동 소나의 탐지 성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 잔향 환경에서는 사용하는 능동 펄스의 에너지를 증가시키면 해수면이나 해저면 등에 반사되어 돌아오는 잔향 에너지도 같이 증가하기 때문에 탐지 성능이 사용하는 능동 펄스의 에너지에 비례하여 증가하지 않는다.^[1] 따라서 잔향 환경에서의 능동 소나 성능을 높이기 위한 노력으로 잔향환

경을 모델링해서 잔향을 제거하거나^[2,3] 잔향 환경에 강인한 능동 펄스 형태^[4,5]에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러므로 잔향 환경에 강인하면서 우리나라 해상에 적합한 능동 송신펄스 설계 및 특성 분석이 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 잔향 환경에 강인하다고 알려진 여러 형태의 펄스 중에 CW(Continuous Waveform)나 FM(Frequency Modulated waveform) 조합으로 구성된 PTFM(Pulse Trains of Frequency Modulated waveforms), Costas, Geometric Comb(Geometric Comb Waveform) 펄스를 중심으로 분석을 수행하였다. 이러한 펄스들은 부펄스 개수에 따라 목적에 맞게 펄스 형태나 분해능 특성을 설계할 수 있는 장점을 가

[†]Corresponding author: Eui Cheol Jeong (jec528@add.re.kr)
P. O. Box 18, Jinhae-gu, Changwon, Gyeongnam 51678, Republic of Korea
(Tel: 82-55-540-6537, Fax: 82-55-542-3737)

지고 있다. 그리고 펄스의 분해능은 잔향 환경에서 잔향 신호와 표적을 분리하는데 결정적인 영향을 미친다.^[5,6] 능동 탐지 시 자기상관처리를 통하여 표적 신호를 탐지하는데 능동 펄스 형태에 따라 자기상관 처리의 도플러 불일치나 거리에 따른 잔향 제거 성능 달라지며 이러한 잔향 제거 특성은 각 펄스의 ambiguity function을 통한 분해능 분석으로 추정할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 PTFM, Costas, Geometric Comb 펄스들에 대해 각 펄스별 이론적인 분해능 특성과 실측 자료와의 분해능 특성을 비교/분석 하였다.

본 논문의 II장에서는 각 펄스별로 부펄스 개수에 따른 이론적인 분해능 특성에 대해서 분석하였고 III장에서는 실험 데이터를 바탕으로 이론적으로 분석한 분해능 결과와 실측값으로 얻은 분해능 결과에 대해서 비교 및 분석하였으며 IV장에서 결론을 맺었다.

II. 능동 펄스별 분해능 분석

능동 펄스별 분해능을 분석하기 위해 ambiguity function^[7,8]을 사용하였다. ambiguity function에 적용되는 wideband approximation의 불확실성 함수의 수식은 다음과 같다.

$$\chi_s(\eta, \tau) = \sqrt{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) s^*[\eta(t-\tau)] dt, \quad (1)$$

여기서 $\eta = (1 + \frac{v}{c}) / (1 - \frac{v}{c})$ 이며 v 는 표적과 능동 음원의 상대속도, c 는 음속, $u(t)$ 는 분석하고자하는 수신신호, $s(t)$ 는 복제신호, τ 는 시간지연이다. 결국 불확실성 함수는 도플러 변이에 따른 정합필터 결과를 2차원 함수로 나타낸다. ambiguity function은 $|\chi_{fs}(\eta, \tau)|^2$ 으로 정의된다.

PTFM^[5]은 LFM(Linear Frequency modulated Waveform)을 시간적으로 연속해서 붙여놓은 형태이며 펄스 길이가 긴 CW처럼 도플러 분해능을 높이는 동시에 LFM과 같이 넓은 대역폭을 가지게 함으로써 잔향제한 환경에서의 표적 탐지 성능을 향상시킨다. PTFM의 수식은 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{i=1}^N s_n(t), 0 \leq t \leq T, \quad (2)$$

$$s_n(t) = A \exp \left[i2\pi \left(f_0 - \frac{B}{2} \right) t + i\pi \frac{B}{T_p} t^2 \right], \quad (n-1)T_p \leq t < nT_p, \quad (3)$$

여기서 N은 부펄스 개수, f_0 는 PTFM의 중심주파수, B는 대역폭, T는 펄스 길이, T_p 는 부펄스 길이를 나타낸다.

Fig. 1은 펄스 길이가 0.4 s, 부펄스 개수가 4개인 PTFM의 ambiguity function을 나타내고 있다. 각 부펄스는 LFM이며 주파수는 2.75 ~ 3.25 kHz이다. PTFM의 반복되는 부펄스열에 의해 ambiguity function의 형태도 도플러축과 시간지연 축으로 일정하게 반복되는 부엽들이 나타난다. 이러한 부엽들 사이의 간격과 크기는 PTFM의 부펄스 개수와 부펄스 길이로 조절할 수 있다.

Fig. 2는 PTFM의 부펄스 개수에 따른 -3 dB contour를 보여주고 있다. -3 dB contour는 ambiguity function의 최대값으로부터 -3 dB가 되는 지점의 횡단면을 보여준다. 거리 분해능을 쉽게 이해할 수 있도록 ambiguity function의 시간지연축으로부터 거리지연을 계산하여 contour의 거리축으로 표시하였다. 시간지연과 거리지연과의 관계는 다음의 식과 같다.

$$\Delta t = \frac{2R}{c}, \quad (4)$$

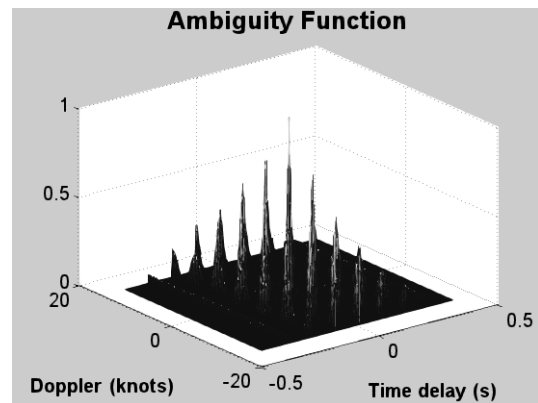


Fig. 1. Ambiguity function of the PTFM.

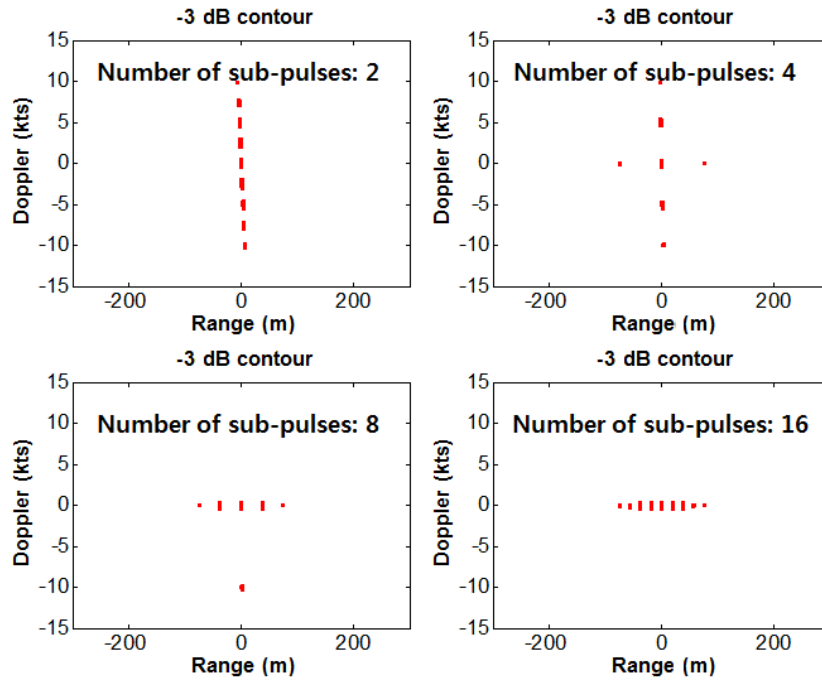


Fig. 2. -3 dB contour of PTFM according to number of sub-pulses.

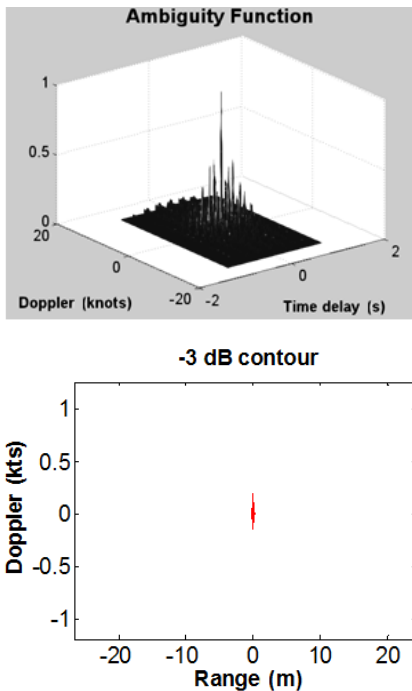


Fig. 3. Ambiguity function and -3 dB contour of PTFM (Pulse length: 1s, Number of sub-pulses: 4, Frequency: 2.5 ~ 3.5 kHz).

여기서 Δt 는 시간지연이고 R은 거리지연 값이다. 이 contour에 맞는 사각 윈도우를 씌우면 윈도우의

거리축 길이로부터 거리 분해능을, 도플러축 길이로부터 도플러 분해능을 구할 수 있다.

Fig. 2에서 부펄스 개수가 2에서 16개로 증가함에 따라 도플러축 부엽 간격이 넓어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2에서 부펄스 개수가 2개일 경우 PTFM의 도플러축 부엽 간격은 2.7kts로서 도플러 분석 범위는 ± 1.35 kts로 제한이 된다. 만약 도플러 분석 범위가 ± 1.35 kts를 넘어갈 경우 2개 이상의 도플러 부엽에 의해 모호성이 생길 수 있다.

부펄스 개수에 따른 PTFM의 또 다른 특성은 부펄스 개수가 적을 때는 LFM과 같이 도플러축으로 길게 늘어진 contour 형태를 나타내지만 부펄스 개수가 많아지면 거리축으로 길게 늘어진 CW의 contour 형태가 된다. 그러나 부펄스 개수를 적절히 조절하면 거리나 도플러축 부엽들이 임계치를 넘어가지 않도록 설계할 수도 있다. Fig. 3은 펄스 길이가 1s, 주파수 2.5 ~ 3.5 kHz, 부펄스 개수가 4인 PTFM의 ambiguity function과 -3 dB contour를 보여주고 있다. PTFM의 부엽들이 임계치 이하로 내려가 -3 dB contour에서는 나타나지 않는다. 따라서 -3 dB에서의 PTFM 분해능은 도플러 0.3 kts, 거리 0.5 m가 된다.

Geometric Comb^[6,9] 펄스는 CW의 조합으로서 수식

은 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A \exp[i2\pi f_n(t + \alpha)],$$

$$0 \leq t \leq T, \tag{5}$$

여기서 $f_n = f_{n-1} + r^{n-2} \Delta f_1$ 이며 Δf_1 은 처음 두 주파수(f_1, f_2) 차이를 나타내고 r 은 f_n 간의 하모닉 관계를 피하기 위해 1보다 약간 큰 값으로 설정한다. N 은 부펄스 개수를 뜻하며 부펄스 개수가 4개, 주파수

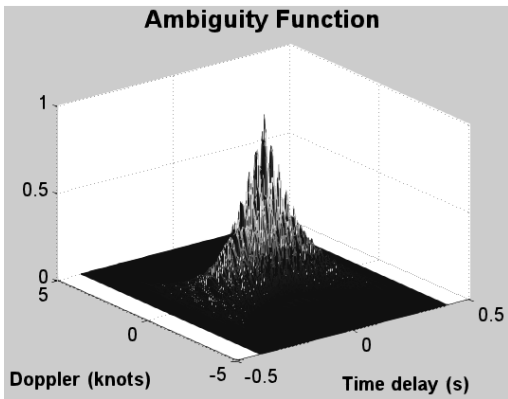


Fig. 4. Ambiguity function of the Geometric Comb pulse.

2.5 ~ 3.5kHz, 펄스 길이가 0.4 s인 Geometric Comb 펄스의 ambiguity function은 Fig. 4와 같고, 부펄스 개수에 따른 -3 dB contour는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 부펄스 개수가 2, 4, 8, 16개로 증가할수록 거리 분해능은 176, 144, 0.5, 0.4 m로 높아지고 도플러 분해능은 0.6, 0.8, 0.9, 0.9 kts로 다소 낮아진다. 따라서 Geometric Comb 펄스의 ambiguity function 형태는 부펄스 개수가 적을 때는 CW의 특성을 나타내다가 부펄스 개수가 증가할수록 도플러 분해능이 다소 낮아지지만 거리 분해능이 매우 좋아지므로 거리와 도플러 특성이 모두 좋은 압정 형태(Thumbtack ambiguity function)^[10]가 된다.

Costas^[10] 펄스는 LFM의 주파수간 간섭 문제를 최소화 하여 압정 형태의 ambiguity function 특성이 나타나도록 설계할 수 있는 장점을 가지고 있다. Costas 펄스의 수식은 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t - nT_p), (n-1)T_p \leq t < nT_p$$

$$s_n(t) = A \exp(i2\pi f_n t) \tag{6}$$

Costas 펄스는 여러개의 독립적인 CW를 시간적으

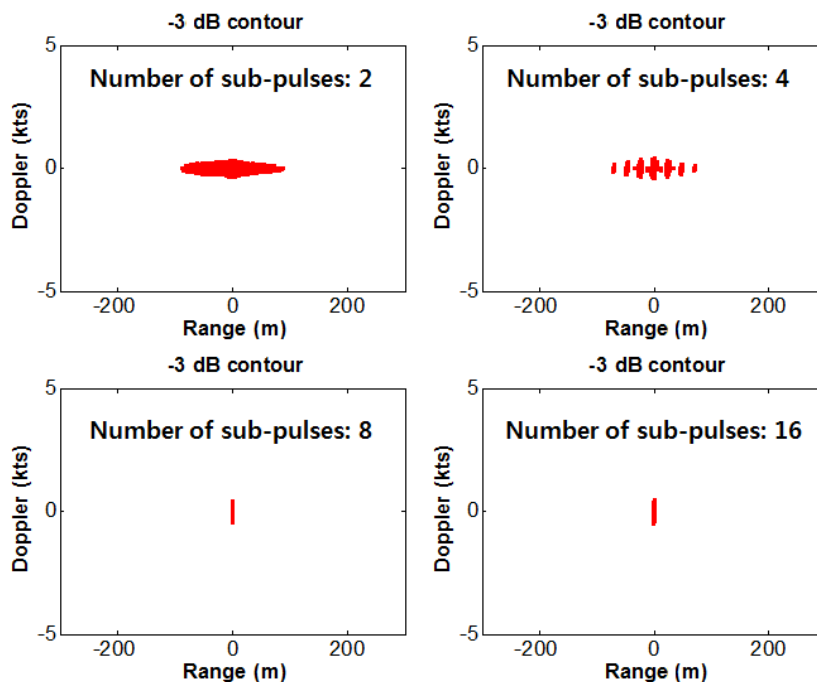


Fig. 5. -3 dB contour of Geometric Comb pulse according to number of sub-pulses.

로 연속해서 사용함으로써 넓은 대역폭을 갖는다. 이와 같은 펄스는 시간 영역에서의 압축효과를 가져옴과 동시에 주파수 분리에 따른 부펄스간의 상관도를 낮춤으로써 CW와 LFM의 장점을 동시에 취할 수 있다.

Fig. 6에 펄스 길이가 0.4 s, 주파수가 2.5 ~ 3.5 kHz 인 Costas 펄스의 ambiguity function이 나타나있으며 부펄스 개수에 따른 Costas 펄스의 -3 dB contour가 Fig. 7에 도시되어있다. 부펄스 개수가 2, 5, 8, 20개로 증가함에 따라 거리 분해능은 86, 23, 15, 0.5 m로 높아지고 도플러 분해능은 1.6, 1.6, 1.6, 0.8 kts로 부펄스

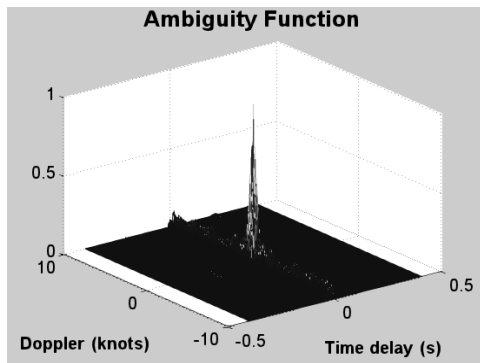


Fig. 6. Ambiguity function of the Costas pulse.

개수에 따른 영향이 거의 없다.

III. 해상실험 자료 분석

각 펄스별 이론적 분석 결과와 비교를 위하여 해상 실험을 수행하였으며 Fig. 8은 해상실험 수행 해역과 시험선 이동 경로, 부이 위치를 보여주고 있다.

해상실험 수행 해역은 포항 외해이며 분석구간 중심은 1000 m 정도다. 시험선이 Fig. 7의 파란선을 따라 이동하면서 CW, LFM, PTFM, Comx Comb, Costas 펄스를 일정 주기로 송신하고 부이에서 송신 신호를 획득하였다. 송신신호 분석 구간은 부이와 시험선의 거리가 4~7km의 구간으로 펄스별 차이가 있으나 비교적 SNR이 높아 거리 및 도플러 해상도 결과에 좋은 환경이다.

부이에서 수신한 신호를 분석한 결과 직접파가 가장 먼저 들어오고 그 뒤에 해수면 반사파, 해저면 반사파가 수신되었다. 직접파와 해수면 반사파는 대략 47 m, 직접파와 해저면 반사파는 285 m ~ 310 m의 거리차로 수신되었다. Fig. 9는 수신된 LFM 펄스의 스펙트로그램이고 크게 직접파, 해수면 반사파, 해저면 반사파 및 해저면 반사파 뒤에 긴 꼬리를 갖는 다

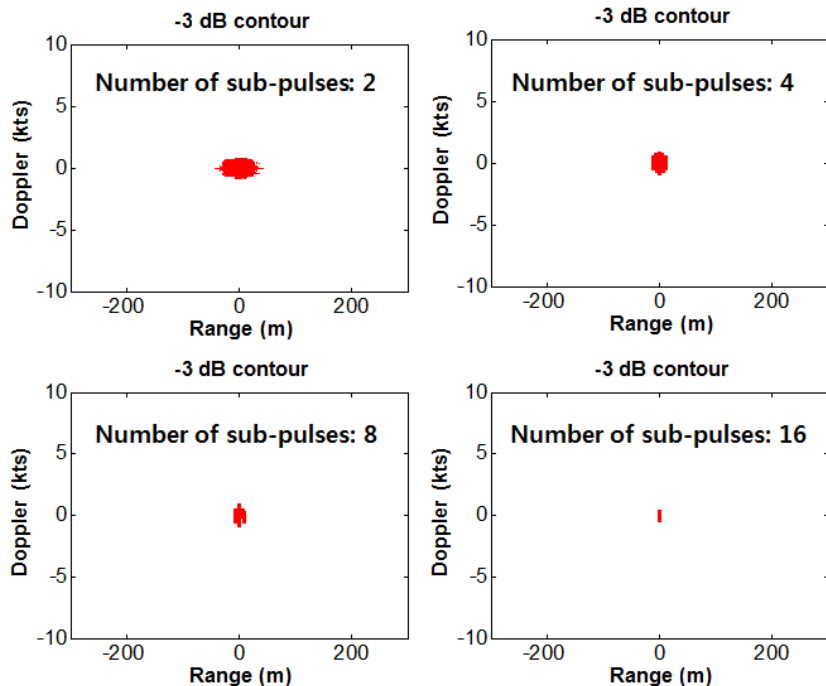


Fig. 7. -3 dB contour of Costas pulse according to number of sub-pulses.

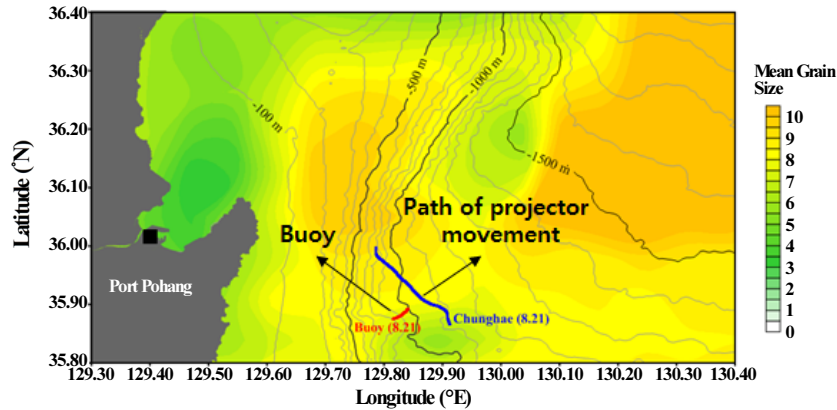


Fig. 8. The map of experiment sea area.

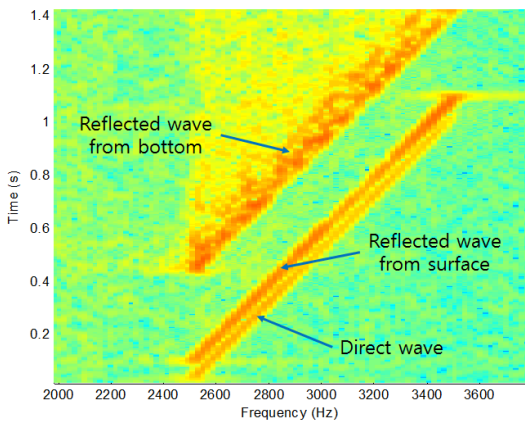


Fig. 9. Received LFM pulse.

Table. 1. Parameters of active pulses used in this experiment.

	Frequency (kHz)	pulse length (s)	Number of sub-pulse
CW	3	1	-
LFM	2.5~3.5	1	-
PTFM	2.5~3.5	1	4
Geometric Comb	1.5~4	1	6
COSTAS	1.5~4	1	10

중경로 신호가 확인되며 그 외에도 작은 다중경로 신호들을 확인하였다. 여러 다중경로 신호들 중 주로 해저면 반사파가 가장 강하게 수신되었다.

본 논문에서는 다중경로환경에 의한 펄스의 분해능을 예측하기 위해 Fig. 9와 같이 직접파, 해수면 반사파, 해저면 반사파가 모두 포함되도록 신호를 잘라서 ambiguity function 분석을 수행 했으며 대부분

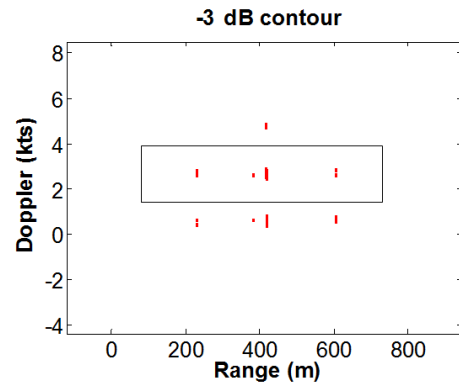


Fig. 10. -3 dB contour of a PTFM.

해저면 반사파와 그 뒤에 긴 꼬리를 갖는 다중경로 신호에 의한 탐지 결과만이 -3 dB contour 상에 나타났다.

각 펄스별 송신 파라미터는 Table 1과 같다. PTFM은 거리축과 도플러축으로 반복되는 부엽 패턴이 -3 dB contour의 임계치를 넘지 않도록 설계를 하여 도플러와 거리 분해능을 높였으며 Geometric Comb 펄스는 낮은 부펄스 개수를 사용하여 CW와 같이 도플러 분해능이 매우 높은 형태로 설계를 하였다. Costas 펄스는 부펄스 개수 10개를 사용하여 도플러 및 거리 분해능을 동시에 만족하는 압정 형태로 송신하였다.

Fig. 10은 부이에서 수신된 여러 PTFM 중 하나의 펄스를 선택하여 -3 dB contour 결과를 보여주고 있다. PTFM은 부펄스에 의한 부엽 패턴들이 -3 dB 임계치를 넘지 않도록 설계 되었지만 실제로는 다중경로 환경에 의해 거리와 도플러축 부엽들이 -3 dB 임계

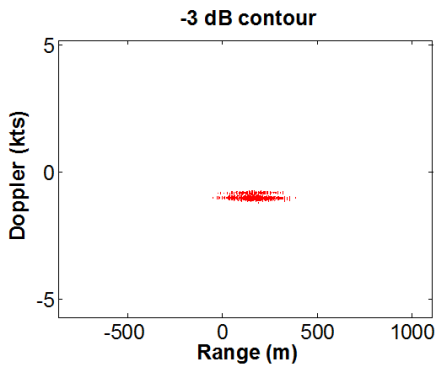


Fig. 11. -3 dB contour of a Geometric Comb pulse.

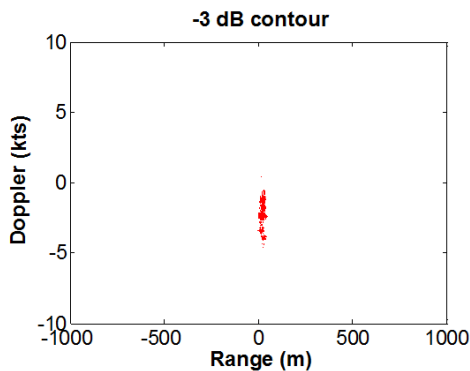


Fig. 12. -3 dB contour of a COSTAS pulse.

Table. 2. Measurement values and theoretical values of resolution of each pulse type.

	Measurement values		Theoretical values	
	Range resolution (m)	Doppler resolution (kts)	Range resolution (m)	Doppler resolution (kts)
CW	233 ~ 579	0.4 ~ 0.5	438	0.4
LFM	7 ~ 83	5.2 ~ 135	7.5	4.1
PTFM	189 ~ 375	0.4 ~ 0.5	0.5	0.3
Geometric Comb	424 ~ 482	0.3 ~ 0.4	300	0.2
Costas	46 ~ 50	3.6 ~ 5.8	32.5	0.4

치를 넘어가면서 Fig. 10의 contour에 일정간격으로 반복되는 부엽들이 나타나고 있다. 도플러축으로 생기는 부엽 패턴들을 제거하기 위해 도플러 분석 범위를 Fig. 10의 사각 원도우내로 제한을 하면 거리 분해능은 375 m, 도플러 분해능은 0.5 kts가 된다. 결론적으로 PTFM은 다중경로 환경에 의해 거리나 도플러축 부엽들이 커질 수 있으나 도플러 분석 범위를 제한하면 도플러 분해능에는 큰 영향이 없다.

Fig. 11은 수신된 Geometric Comb 펄스의 -3 dB contour를 나타내고 있다. Geometric Comb 펄스의 -3 dB contour는 처음에 디자인한 CW 형태를 유지하고 있으며 거리 분해능은 453 m, 도플러 분해능은 0.4 kts이다.

Fig. 12는 수신된 Costas 펄스의 -3 dB contour이며 압정 형태로 디자인을 했으나 다중경로 환경에 의해 도플러축 부엽이 커지면서 -3 dB 임계치를 넘어가도 플러 분해능이 매우 낮아졌다.

Table 2는 각 펄스별로 이론적 분석 결과와 실제 환경에서 획득한 10개 데이터에 대한 거리 및 도플러 분해능의 분포값을 보여주고 있다. 이론값은 이상적인 능동 펄스의 자기 상관 분석을 통해 획득한 분해능이다. PTFM은 거리축 부엽 패턴이 다중경로 환경에 의해 1개 또는 두 개가 영향을 받는 경우에 따라 거리 분해능 특성이 많이 달라지며 넓은 분포를 보이고 있다. 반면 도플러 분해능 분포는 0.4 ~ 0.5 kts로 CW와 유사하다. 따라서 PTFM은 거리축 부엽에 의해 거리 분해능이 많이 떨어지기 때문에 거리 분해능에 손실이 발생하더라도 더 많은 부엽 개수를 사용하여 도플러축 부엽 간격을 넓힘으로써 도플러 탐지 범위를 증가시키고 표적 도플러를 이용하여 표적을 탐지하는 방안이 필요하다. Geometric Comb 펄스는 낮은 부엽 개수로 인해 CW와 유사한 분해능 특성을 보여주고 있으며 도플러 분해능이 가장 높다. 향후 도플러 및 거리 분해능이 동시에 높은 압정 형태로 설계하여 표적의 도플러와 거리 탐지 성능 확보가 가능한지 실제 환경의 데이터를 바탕으로 분석해볼 필요가 있다. Costas 펄스는 다중경로 수신 신호에 의해서 도플러 분해능이 급격히 낮아졌으며 거리 분해능도 다소 떨어진 결과를 보여주고 있다. 부엽 개수를 10개 밖에 사용하지 못한 실험 여건이었으나 향후 더 많은 부엽 개수를 사용하면 분해능이 더 좋아질 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 잔향환경에 강인하면서 우리나라 해상에 적합한 펄스 설계를 위해서 PTFM, Geometric Comb, Costas 펄스에 대한 이론적 분해능 분석 결과와 동해상의 실험데이터 분석을 통해 획득한 실측값

을 비교 분석하였다. PTFM은 부펄스에 의한 거리축 부엽이 넓게 분포되면서 거리 분해능이 이론값에 비해 매우 낮아졌으나 도플러 분해능은 잔향에 거의 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. Geometric Comb 펄스는 적은 부펄스 개수에 의해 매우 높은 도플러 분해능을 보였으며 Costas 펄스는 도플러 분해능이 다중경로 신호에 의해 매우 떨어지는 결과를 보여주었다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 각 펄스별 탐지 성능 방안을 수립 및 해상실험 계획에 반영하여 실제 잔향 환경에서의 탐지 성능을 분석할 계획이다.

저자 약력

▶ 정 의 철 (Eui Cheol Jeong)



2011년 2월: 송실대 전자공학과 학사
 2013년 2월: 송실대 전자공학과 석사
 2013년 9월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원

References

1. A. D. Waite, *Sonar for Practising Engineers Third Edition*, (John Willey & Sons, Ltd, United Kingdom, 2002), pp. 165-168.
2. R. N. Carpenter and S. Kay, "GLRT detection of signals in reverberation," *ICASSP-95*, **5**, 3127-3130 (1995).
3. S. Kay and J. Salisbury, "Improved active sonar detection using autoregressive prewhiteners," *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 1603-1611 (1990).
4. R. Been, S. P. Beerens, S. P. van IJsselmuide, and B. Prunel, "Sonar waveforms for reverberation rejection, Part II: Experimental results," *Proceedings of UDT Pacific*, 2000.
5. Y. Doisy, L. Deruaz, S. P. van IJsselmuide, S. P. Beerens, and R. Been, "Reverberation suppression using wideband Doppler-sensitive pulses," *IEEE J. Ocean. Eng.* **33**, 419-433 (2008).
6. S. P. Pecknold, "Ambiguity and cross-ambiguity properties of some reverberation suppressing waveforms," *DRDC*, 2002.
7. Y. Doisy, L. Deruz, B. Prunel, R. Been, S. P. Beerens, and S. P. van IJsselmuide, "Sonar waveforms for reverberation rejection, Part III: More experimental results," *Proceedings of UDT Europe*, 2000.
8. T. Tsao, M. Slamani, P. Varshney, D. Weiner, H. Schwarzlander, and S. Borek, "Ambiguity function for a bistatic radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **33**, 1041-1051 (1997).
9. H. Cox and H. Lai, "Geometric comb waveforms for reverberation suppression," *ACSSC 28th Conference*, **2**, 1185-1189 (1994).
10. Nadjah, "Phase coded costas signals for ambiguity function improvement and grating lobes suppression," *VTC 78th Conference*, 1-5 (2013).