

위상비교모노펄스를 이용한 근접한 두 표적 분리에 관한 연구

Two Unresolved Target Angle Estimation in Phase Comparison Monopulse Radar

이 승 필 · 조 병 래* · 김 영 수**

Seung-Phil Lee · Byung-Lae Cho* · Young-Soo Kim**

요 약

본 논문에서는 위상비교모노펄스에서 근접한 두 표적의 위치를 추정하는 방법을 제시하였다. 제안한 방법은 Sherman의 기법을 근간으로 하기 때문에 기존 다른 기법들과 달리 단일표적상황에서도 사용할 수 있으며, 오직 단일 펄스만을 사용하여 근접한 두 표적의 위치를 추정하기 때문에 기존 Sherman이 제시한 기법의 단점도 개선할 수 있었다. 제안한 방법의 각도 추정 정확도는 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

Abstract

This paper improves Sherman's two-pulse method for angle estimation of two unresolved targets in phase comparison monopulse radar. The proposed method provides the angle information with only a single-pulse measurement instead of two pulses. The proposed method can estimate a single-target angle by single-target indicator, in contrast with previous techniques. The accuracy of angle estimation for proposed method is demonstrated by simulations.

Key words: Sherman's Method, Multi-Target Extraction, Direction-of-Arrival, Angle-of-Arrival

I. 서 론

모노펄스는 단일 표적으로부터 오는 신호를 다중 안테나로 수신하여 크기(크기비교모노펄스) 또는 위상(위상비교모노펄스)을 비교해 표적의 위치를 추정해내는 방법이다. 이는 매우 간단할 뿐만 아니라, 적정 SNR을 만족한다면 최적의 추정 값을 도출해 낼 수 있기 때문에 널리 사용되어져 왔다. 하지만 두 개 또는 그 이상의 표적이 동일한 분해능 셀(빔 폭, 거리, 도플러)에 존재할 경우, 다중

표적의 반사 신호가 벡터-합으로 수신되기 때문에 기존 방식으로는 두 표적의 각도를 추정할 수 없다^[1].

이러한 모노펄스의 한계를 개선하기 위해 많은 연구들이 진행되어져 왔다. 이들은 크게 통계적 기법과 결정적 기법으로 나뉘어진다. 통계적 기법은 표적의 통계적 특성을 얻기 위해 다중펄스를 필요로 하고, 특정 표적 모델에 제한을 가짐은 물론 각도 추정이전에 표적 모델에 대한 정보를 획득해야 한다^{[7]~[10]}. 하지만 결정적 기법은 오직 단일 또는 두 개의 펄스를 필요로 하기 때문에, 통계적 기

「이 연구는 국방과학연구소 UD1200650D 프로그램 연구비의 지원으로 연구되었음.」

국방기술품질원(Defense Agency for Technology and Quality)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**포항공과대학교 전기전자공학부(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received March 23, 2016 ; Revised June 21, 2016 ; Accepted June 22, 2016. (ID No. 20160323-031)

· Corresponding Author: Seung-Phil Lee (e-mail: best2569@naver.com)

법이 가지는 표적모델에 대한 제한에서 벗어날 수 있다.

결정적 기법의 초기 연구는 Sherman에 의해 진행되었다^{[1]~[3]}. Sherman은 모노펄스 레이더를 사용해 근접한 두 표적을 분리하는 기법을 제시하였는데, 이 기법은 두 개의 펄스로부터 생성하는 복소 합, 차 신호를 사용하였다. 이 기법은 비록 두 표적의 각도를 결과로 가지는 알고리즘이지만, 특정 파라미터를 지시자로 이용하여 단일 표적 상황에서도 표적의 각도를 추정할 수 있게 하였다. 하지만 이 방법은 두 개의 문제점을 가지고 있는데, 첫째는 이 기법에서 사용하는 두 펄스 사이의 간격이 적절히 유지되어 합 신호에서 두 표적의 상대적인 크기 비는 일정해야 하고, 상대적 위상차는 변해야 한다는 것이다. 둘째로 해를 구하기 위해 도해법^[3]을 사용하거나, 수학적 툴(Mathcad)^[1]을 사용하였다.

Sherman의 두 번째 단점을 극복하기 위해 2차 방정식을 사용하여 해를 구하는 기법을 제시하였다^{[4][5]}. 두 기법 모두 2차 방정식을 사용해 해를 구하지만, 참고문헌 [5]는 기존 Sherman의 기법을 근간으로 하기 때문에 단일표적에서도 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 단일 펄스만을 사용하고 닫힌 형태의 해를 제시하여 Sherman의 두 가지 단점을 모두 해결한 기법도 제시되었으나, 이 또한, 단일 표적 상황에서는 사용할 수 없다는 단점을 가진다^[6].

본 논문에서는 단일표적상황에서 사용가능하면서 Sherman의 첫 번째 단점을 해결하는 기법을 제시한다. 이 기법은 위상비교모노펄스에서 단일 펄스만을 사용하기 때문에 표적 모델에 대한 제한이 전혀 없다. 또한, 이 기법은 Sherman의 기법을 근간으로 하기 때문에 참고문헌 [5]와 같이 사용하여 Sherman의 두 가지 단점을 모두 해결할 수 있다.

II장에서는 기존 Sherman의 기법^{[1]~[3]}에 대해 설명하고, III장에서는 위상비교모노펄스에서 단일펄스를 사용하여 근접한 두 표적을 분리하는 기법을 제시한다. IV장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제시한 기법의 추정 정확도를 보이고, V장에서 결론을 내린다.

II. Sherman의 기법

Sherman은 모노펄스 레이더를 사용하여 근접한 두 표적(범 폭, 거리, 도플러) 또는 단일 표적에 대한 위치를 추

정하는 기법을 제시하였다. 중첩의 법칙을 사용하여 두 표적 a, b 에 대한 복소 지시 각도 θ 를 수식으로 나타내면,

$$D_a = k\theta_a S_a, D_b = k\theta_b S_b$$

$$\theta_i = \frac{1}{k} \frac{D_i}{S_i} = \frac{1}{k} \frac{D_{a,i} + D_{b,i}}{S_{a,i} + S_{b,i}} = \frac{\theta_a + p_i e^{j\phi_i} \theta_b}{1 + p_i e^{j\phi_i}}, \quad (1)$$

와 같다. 여기서 D_a, D_b 와 S_a, S_b 는 각각 두 표적 a, b 의 차 신호와 합 신호를, θ_a 와 θ_b 는 특정 좌표계에서 두 표적 a, b 의 각도를, p_i 와 ϕ_i 는 합 신호에서 두 표적의 상대적 크기 비와 위상 차를, k 는 시스템 구성에 연관된 비례 상수를, 그리고 i 는 i 번째 펄스를 뜻한다. 두 표적 상황에서 θ_i 는 복소 값을 가지고, 식 (1)과 Sherman의 조건 ($p_1 = p_2, \phi_1 \neq \phi_2$)을 만족하는 두 펄스를 사용해 크기 비교 모노펄스에서 아래와 같이 5개의 식을 얻을 수 있다.

$$Real(\theta_1) = x_1 = \frac{\theta_a + p \cos \phi_1 (\theta_a + \theta_b) + p^2 \theta_b}{1 + 2p \cos \phi_1 + p^2}$$

$$Imag(\theta_1) = y_1 = (\theta_b - \theta_a) \frac{p \sin \phi_1}{1 + 2p \cos \phi_1 + p^2}$$

$$Real(\theta_2) = x_2 = \frac{\theta_a + p \cos \phi_2 (\theta_a + \theta_b) + p^2 \theta_b}{1 + 2p \cos \phi_2 + p^2}$$

$$Imag(\theta_2) = y_2 = (\theta_a - \theta_b) \frac{p \sin \phi_2}{1 + 2p \cos \phi_2 + p^2}$$

$$S = \frac{|S_2|^2}{|S_1|^2} = \frac{1 + 2p \cos \phi_2 + p^2}{1 + 2p \cos \phi_1 + p^2} \quad (2)$$

여기서, $Real()$ 과 $Imag()$ 는 각각 실수와 허수 값을 뜻한다. Sherman은 또한 Sherman의 조건을 만족하는 두 펄스는 항상 복소 각도 평면에서 하나의 원을 그린다는 사실을 이용하여 아래의 식을 제시하였다.

$$\theta_a = x_{cen} - pv, \theta_b = x_{cen} - v/p$$

$$x_{cen} = \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}{2(x_2 - x_1)},$$

$$v = \sqrt{(x_1 - x_{cen})^2 + y_1^2}, \quad (3)$$

여기서 x_{cen} 과 v 는 원의 중심과 반지름을 뜻한다. 두 표적의 각도(θ_a, θ_b)를 추정하기 위해 식 (3)에서 p 의 값이 필요하고, 이는 식 (2)로부터 얻을 수 있다. 식 (2)를 풀기

위해 Sherman은 도해법^[3], 수학적 툴^[1]을 사용하였고, 최근 참고문헌 [5]에서 이차 방정식을 제시하였다.

단일 표적의 경우, p 는 항상 0 또는 ∞ 의 값을 가지고 이는 알고리즘의 결과 값으로 나오는 두 해 중 하나를 제거하는 단일 표적 지시자로 사용될 수 있다.

III. 단일 펄스 기법

본 논문에서는 기존 Sherman의 기법과 달리 위상비교 모노펄스에서 단일펄스만을 사용하여 근접한 두 표적의 위치를 추정하는 기법을 제시한다.

앞서 설명했듯이, Sherman의 기법으로부터 두 표적의 위치를 추정하기 위해 두 개의 차/합 신호로부터 x_1, x_2, y_1, y_2 와 Sherman의 조건($p_1 = p_2, \phi_1 \neq \phi_2$)을 만족하는 두 합신호 S_1, S_2 가 필요하다. 등방성 이득을 가지는 2x2 위상비교모노펄스레이다(그림 1)에서 수신되는 신호는 아래와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} A &= z_a e^{-j(\psi_a + \beta_a)} + z_b e^{-j(\psi_b + \beta_b)} \\ B &= z_a e^{-j(\psi_a + \alpha_a + \beta_a)} + z_b e^{-j(\psi_b + \alpha_b + \beta_b)} \\ C &= z_a e^{-j(\psi_a)} + z_b e^{-j(\psi_b)} \\ D &= z_a e^{-j(\psi_a + \alpha_a)} + z_b e^{-j(\psi_b + \alpha_b)}, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 z_a 와 z_b 는 두 표적 a, b 의 크기, ψ_a 와 ψ_b 는 두 표적의 위상, $\alpha = (2\pi\Delta x \cos\theta_{el} \sin\theta_{az})/\lambda$ 와 $\beta = (2\pi\Delta y \sin\theta_{el})/\lambda$ 는 표적의 각도와 안테나 구성에 연관되는 수

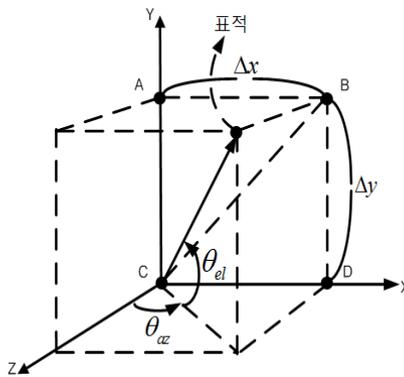


그림 1. 위상비교모노펄스 레이다의 구성
Fig. 1. The configuration of phase comparison monopulse radar.

신 위상을 나타내고, $\Delta x, \Delta y$ 는 안테나 간 거리, λ 는 파장, 그리고 θ_{az}, θ_{el} 은 방위각-고각 좌표계에서의 표적 각도를 나타낸다.

기존 모노펄스에서 합 신호($A+B+C+D$)의 3 dB 빔 폭 내에 존재하는 단일 표적의 특정 방향의 각도 정보를 얻기 위해, 직교되는 다른 방향으로 합을 취한 신호들의 차 신호가 사용된다. 즉, 방위각 방향으로 표적의 각도를 추정하기 위해서는 $(A+C)-(B+D)$ 가, 고각 방향으로 표적의 각도를 추정하기 위해서는 $(A+B)-(C+D)$ 가 필요하다. 크기비교모노펄스에서는 합 신호의 3 dB 빔 폭 내에 존재하는 표적에 대한 신호를 수신하기 위해 이러한 방식이 적합하다(그림 2a). 하지만 위상비교모노펄스에서는 모든 수신 빔이 같은 영역에 형성되기 때문에 위와 같이 기존의 방식을 사용하지 않아도 된다(그림 2b). 따라서, 기존에 생성했던 하나의 합, 차 신호를 둘로 나눌 수 있게 된다. 예를 들어, 방위각 방향으로 보면 A 와 B 신호를 이용해 하나의 합($A+B$), 차($A-B$) 신호를 만들 수 있고, C 와 D 신호를 이용해 또 다른 합($C+D$), 차($C-D$) 신호를 만들 수 있다. 이를 Sherman의 기법에 적용하면, 두 합 신호 S_{1-az} 와 S_{2-az} 를 단일 펄스만으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{1-az} &= A + B = 2z_a \cos(\alpha_a/2) e^{-j(\psi_a + \beta_a + \alpha_a/2)} \\ &\quad + 2z_b \cos(\alpha_b/2) e^{-j(\psi_b + \beta_b + \alpha_b/2)} \\ S_{2-az} &= C + D = 2z_a \cos(\alpha_a/2) e^{-j(\psi_a + \alpha_a/2)} \\ &\quad + 2z_b \cos(\alpha_b/2) e^{-j(\psi_b + \alpha_b/2)} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (1)과 식 (5)로부터 나누어진 두 합 신호가 Sherman의 조건을 만족한다는 것을 알 수 있다. 즉, $p_1 = p_2 = (z_b \cos(\alpha_b/2)) / (z_a \cos(\alpha_a/2))$ 이고, $\phi_2 - \phi_1 = [(\psi_a + \alpha_a/2) - (\psi_b + \alpha_b/2)] - [(\psi_a + \beta_a + \alpha_a/2) - (\psi_b + \beta_b + \alpha_b/2)] = \beta_b - \beta_a$ 로 $\phi_1 \neq \phi_2$ 이다. 방위각 방향과 같이 고각방향으로도 같은 방법으로 나누어진 두 합 신호가 Sherman의 조건을 만족한다는 것을 증명할 수 있다. 따라서, Sherman의 기법을 이용해 근접한 두 표적의 위치 정보를 얻기 위해 두 펄스가 아닌 단일 펄스를 둘로 나누어서 얻은 신호를 사용할 수 있다. 이를 방위각 방향을 예로 들면 식 (2)의 5개의 추정치를 다음과 같이 단일 펄스로 얻을 수 있다.

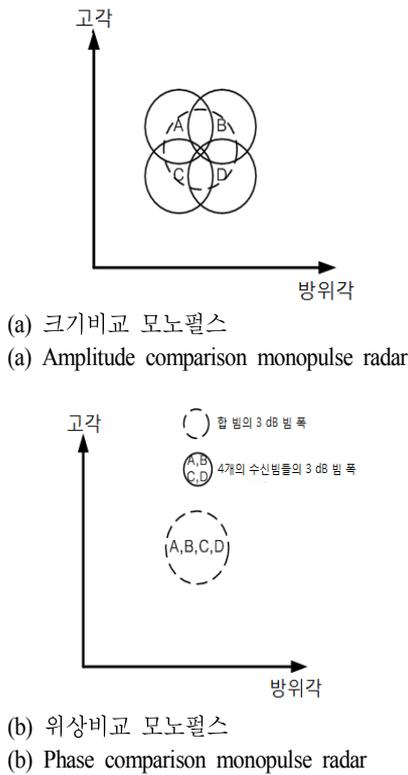


그림 2. 모노펄스 타입에 따른 빔 패턴 영역
Fig. 2. 3 dB beamwidth coverage of the received beams.

$$\begin{aligned}
 x_{1-az} &= \text{Imag}\left(\frac{1}{k} \frac{A-B}{A+B}\right), y_{1-az} = \text{Real}\left(\frac{1}{k} \frac{A-B}{A+B}\right), \\
 x_{2-az} &= \text{Imag}\left(\frac{1}{k} \frac{C-D}{C+D}\right), y_{2-az} = \text{Real}\left(\frac{1}{k} \frac{C-D}{C+D}\right), \\
 S_{az} &= \frac{|S_{2-az}|^2}{|S_{1-az}|^2} = \frac{|C+D|^2}{|A+B|^2},
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

고각 방향으로도 같은 방법으로 5개의 측정치를 획득할 수 있다. 위상비교모노펄스에서 식 (6)이 식 (2)로 표현되는 정확한 증명과정은 참고문헌 [3](pp. 80-81)에 나와 있다. 여기서는 위상비교모노펄스를 사용할 때 기존 하나의 모노펄스 합, 차 신호가 Sherman의 조건을 만족하는 두 개의 합, 차 신호로 분리될 수 있다는 것을 증명하였다. 식 (6)의 측정치를 이용해 참고문헌 [1]~[3], [5]와 같은 방법으로 p 의 값을 구할 수 있고, 이는 곧 식 (3)에 의해 표적의 위치정보를 얻을 수 있다는 것을 뜻한다. 단일 표적의 경우에도, p 는 참고문헌 [1]~[3], [5]와 같이 단일 표

적 지시자 역할을 수행한다.

만약 두 표적이 같은 고각방향에 위치하면, $A+B$ 와 $C+D$ 사이의 위상차는 0이 되므로 Sherman의 위상조건을 만족하지 못하게 된다. 또한, 두 표적이 같은 방위각 방향에 위치할 때에도 유사한 원리로 설명이 된다. 이러한 제한점은 참고문헌 [6]에서 제시된 것처럼 단일 펄스를 이용해 두 근접한 표적을 분리할 때의 근본적 제한점이 된다.

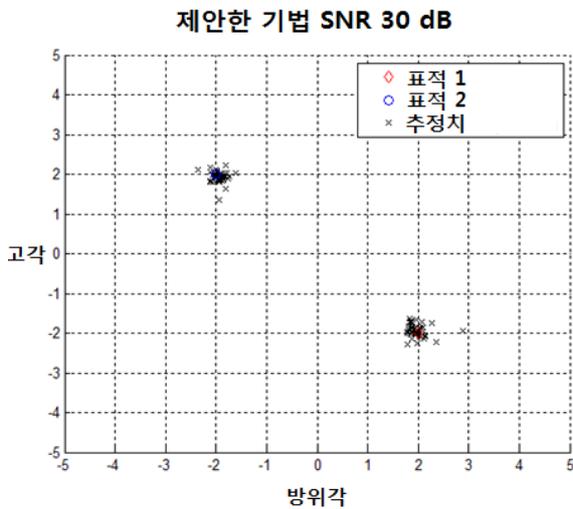
제시한 기법의 식 (5)에서 p 는 코사인 값에 의해 정확하게 합 신호에서 두 표적의 상대적 크기 비를 나타내지 않는다. 하지만 실제 응용 관점에서, 위치를 추정하고자 하는 표적은 빔 중심 근처에 있고, 안테나 간 거리는 파장에 비해 매우 크지 않기 때문에 코사인 값은 거의 1에 가까우므로 p 값은 물리적으로 Sherman 기법에서 말하는 크기 비를 뜻한다고 볼 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

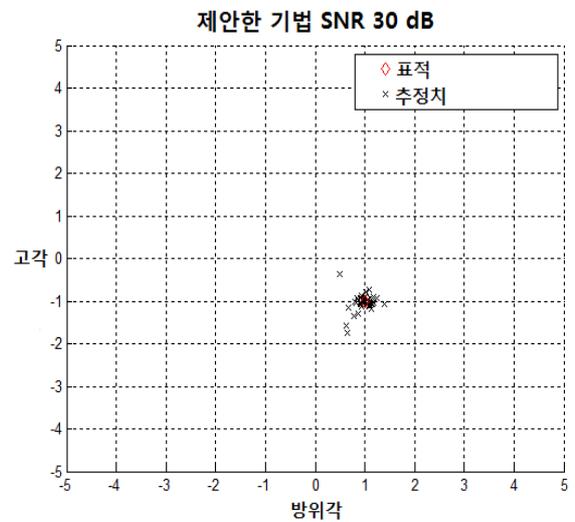
본 장에서는 빔 폭 4°를 가지는 위상비교모노펄스레이다를 사용했을 때 제안한 기법의 단일 또는 근접한 두 표적의 각도 추정 정확도를 SNR에 따라 시뮬레이션하였고, 두 표적은 서로 다른 크기와 각각 균일 분포를 가지는 위상을 가정하였다. 20 dB와 30 dB의 SNR에서 $(-2°, 2°)$, $(2°, -2°)$ 에 위치하는 두 표적에 대한 추정 결과를 그림 3에 보였다. 30 dB일 경우, 매우 정확하게 두 표적의 위치를 추정할 수 있었고, 20 dB일 경우 두 표적을 구분할 정도의 추정정확도를 보였다. $(1°, -1°)$ 에 위치한 단일 표적의 경우, 그림 4에서 보듯이 제안한 기법에서는 단일 표적 지시자를 사용해 정확하게 위치를 추정하였지만, 참고문헌 [4], [6]에서 제시한 기법은 항상 허수해가 존재하기 때문에 정확하게 추정하지 못하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 위상비교모노펄스 레이다의 기존 하나의 합, 차 신호가 Sherman의 조건을 만족하는 두 개의 합, 차 신호로 나누어진다는 사실에 입각하여 단일 펄스만을 사용하여 근접한 두 표적의 위치를 추정하는 기법을 제

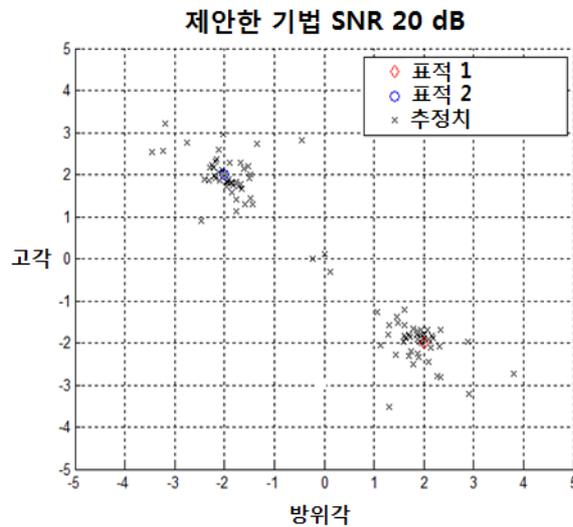


(a) (2, -2), (-2, 2), SNR 30 dB



(a) (1, -1), 제안한 기법, SNR 30 dB

(a) (1, -1), proposed method, SNR 30 dB

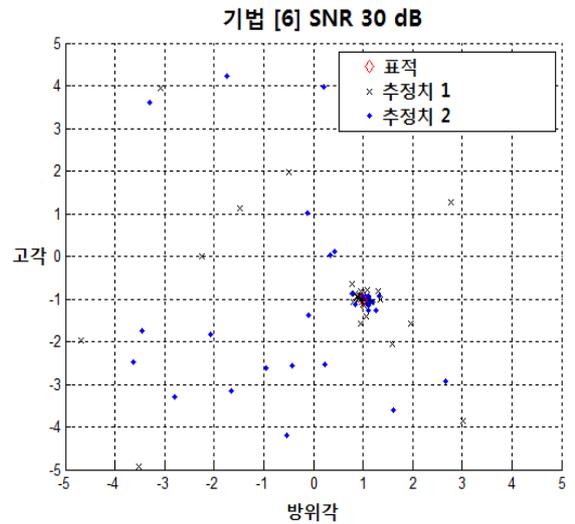


(b) (2, -2), (-2, 2), SNR 20 dB

그림 3. 근접한 두 표적의 각도 추정 정확도(50회)

Fig. 3. Accuracy of angle estimation for two unresolved targets(50 times).

시하였다. 제안한 기법은 Sherman의 기법을 근간으로 하기 때문에 다른 기법들^{[4],[6]}과 달리 단일 표적상황에서도 각도를 추정할 수 있음을 보였다. 또한, 제안한 기법과 참고문헌 [5]의 기법을 위상비교모노펄스레이다에서 동시에 사용하면, 기존 Sherman이 가지고 있던 두 문제점을 동시에 해결할 수 있다.



(b) (1, -1), 참고문헌 [6] 기법, SNR 30 dB

(b) (1, -1), Ref. [6] method, SNR 30 dB

그림 4. 단일 표적 추정 결과 (a) 제안한 기법, (b) 참고문헌 [6] 기법

Fig. 4. Accuracy of angle estimation for single target. (a) proposed method (b) Ref. [6] method.

References

[1] S. M. Sherman, D. K. Barton, *Monopulse Principles and Techniques*, 2nd ed. Boston: Artech House, pp. 187-223,

- 2011.
- [2] S. M. Sherman, "Complex indicated angles applied to unresolved radar targets and multipath", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-7, no. 1, Jan. 1971.
- [3] S. M. Sherman, "Complex indicated angles in monopulse radar", Ph.D. dissertation, University of Pennsylvania, Philadelphia, Dec. 1965.
- [4] Z. Lu, M. Gao, H. Jiang, and J. Yan, "Closed-form solutions for directions of two steady targets with two pulses in monopulse radar", *IEEE Radar Conference*, pp. 74-78, 2012.
- [5] S. P. Lee, B. L. Cho, S. M. Lee, J. E. Kim, and Y. S. Kim, "Unambiguous angle estimation of unresolved targets in monopulse radar", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, pp. 1170-1177, Apr. 2015.
- [6] Y. Zheng, S. M. Tseng, and K. B. Yu, "Closed-form four-channel monopulse two-target resolution", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, pp. 1083-1089, Jul. 2003.
- [7] W. D. Blair, G. A. Watson, T. Kirubarajan, and Y. Bar-Shalom, "Monopulse DOA estimation of two unresolved rayleigh targets", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 31, no. 2, Apr. 1998.
- [8] Z. Wang, A. Sinha, P. Willett, and Y. Bar-Shalom, "Angle estimation for two unresolved targets with monopulse radar", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 3, Jul. 2004.
- [9] P. Willett, W. D. Blair, and X. Zhang, "The multitarget monopulse CRLB for matched filter samples", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 8, Aug. 2007.
- [10] A. Sinha, T. Kirubarajan, and Y. Bar-Shalom, "Maximum likelihood angle extractor for two closely spaced targets", *IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 2, Jan. 2002.

이 승 필



2011년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2015년 9월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2015년 9월~현재: 국방기술품질원 연구원
 [주 관심분야] 레이더, SAR

김 영 수



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1980년 2월: Univ. of Kansas (공학석사)
 1984년 2월: Univ. of Kansas (공학박사)
 1987년 2월~현재: 포항공과대학교 전기전자공학부 교수
 [주 관심분야] Radar, SAR, EMI/EMC, RFID, Spectrum Engineering

조 병 래



1999년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2005년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 공학박사 및 박사 후 과정
 2006년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] AESA Radar, SAR