http://dx.doi.org/10.7840/kics.2015.40.7.1413

안테나 간격 및 배열에 따른 위상 비교 모노펄스 알고리즘의 성능 분석

심 헌 교◆, 정 민 아*, 김 성 철°

A Performance Analysis of Phase Comparison Monopulse Algorithm for Antenna Spacing and Antenna Array

Heon-Kyo Sim◆, Min-A Jung*, Seong-Cheol Kim°

요 약

모노 펄스 레이더는 단일 송신 신호를 이용해 목표물의 위치를 예측해 내는 레이더이다. 본 논문은 9.41GHz의 X밴드 대역 주파수를 이용하여 해양 환경에서 선박용 레이더에 사용 될 각도 추정 기술로써 위상 비교 모노펄스 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 위상 비교 모노펄스 알고리즘을 이용하여 안테나 간격과 타겟의 위치에 따른 평균 제곱근 오차를 계산해 보았다. 이를 이용하여 선형 배열 안테나를 사용할 때와 비선형 배열 안테나를 사용할 때의 위상 비교 모노펄스 알고리즘 성능을 비교 하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 위상 비교 모노펄스 알고리즘과 MUSIC, BARTLETT 알고리즘의 성능 차이를 분석해 보았다.

Key Words : antenna spacing, non-uniform linear array, phase comparison monpulse, Root-Mean Square Error

ABSTRACT

Monopulse RADAR is the radar which detects the range of the target using a single transmitted signal. In this paper, using 9.41GHz X-band radar, the research for the phase comparison monopulse algorithm used in the marine environment is conducted. In addition, by applying the phase comparison monopulse algorithm, we calculate the RMSE for the various antenna spacings and the positions of the target. Based on that result, we compare the performance of the phase comparison monopulse algorithm in the uniform linear array with that in the non-uniform linear array. Finally, the differences in performance among the MUSIC algorithm, Bartlett method and the proposed phase comparison monopulse algorithm are analyzed.

Ⅰ. 서 론

최근 선박이 대형화 및 고속화됨으로 인하여 선박과 관련된 사고가 증가하고 있다. 선박은 다른 교통수단에 비해 한 번 사고가 발생하면 대형사고로 이어지는 경우가 많고, 유조선, 위험물 운반선 등에서 사고 발생시, 물질적 피해도 막대하기 때문에 선박 안전 문제는 매우 중요한 사안이라고 할 수 있다. 이를 해결

※ 이 연구는 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2009-0093828)과 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT 융합고급인력과정지원사업(IITP-2015-H8601-15-1006)의 연구결과로 수행되었음
◆ First Author : Seoul National University Department of Electrical and Information, simheonkyo@maxwell.snu.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Seoul National University Department of Electical and Information, sckim@maxwell.snu.ac.kr, 종신회원
* Mokpo National University, Department of Computer Engineering, majung@mokpo.ac.kr, 정회원
논문번호 : KICS2015-04-096, Received April 2, 2015; Revised July 9, 2015; Accepted July 9, 2015

하기 위해 해상 교통 관제 시스템, 관제사교육 등 각종 대책이 시행되고 있으나 여전히 해양 안전 관리에는 많은 어려움이 있다. 이와 같은 문제들을 해결하고자 현재 선박용 레이더에 관련한 연구가 많이 진행 중에 있는데, 일반적으로 사용되고 있는 선박용 레이더에는 PULSE 레이더와 FMCW 레이더가 있다.

펄스 레이더의 경우에는 송신과 수신을 동시에 할 수 없기 때문에 분해능이 떨어지며, 송신 펄스가 강하기 때문에 가까운 거리에 있는 물체를 측정하는데 어려움이 있는 단점이 있다. 반면에, FMCW 레이더의 경우에는 송신과 수신이 동시에 이루어지기 때문에 분해능이 좋고, 기존 펄스 레이더에 비해서 수백배 이상 낮은 전력을 사용하기 때문에 배터리의 부하도 적어서 요즘에는 FMCW 레이더에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.[1,2] 이 때, 주로 사용 되어지는 각도 추정 알고리즘에는 MUSIC 알고리즘과 Bartlett 알고리즘 등이 있는데, MUSIC 알고리즘은 도래각 추정 성능이 우수하고, 임의의 배열에도 적용할 수 있다는 장점이 있지만, 타겟이 인접해있는 상황에서의 분해능이 낮고, 고유값 분해를 하는데에 있어서 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 도래각 추정을 위한 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.[3] 모노 펄스 알고리즘은 기존에 사용되고 있는 알고리즘에 비해 정확도는 조금 떨어지지만, 작은 도래각은 잘 추정해내는 장점이 있고, MUSIC 알고리즘이나 Bartlett 알고리즘에 비해 월등히 빠른 계산 속도를 낼 수 있기 때문에, 선박용 레이더에서 사용될 각도 추정 알고리즘으로써 연구되어질 필요가 있다.

모노 펄스는 목표물의 도래각을 추정하여 위치정보를 파악해내는 시스템으로써 레이더, 위성통신 등의 분야에서 위치 추적, 통신신호 추적 등에 널리 사용되고 있다. 모노펄스 시스템은 4개의 수신 안테나를 이용하여 모노펄스 비교기를 통해 방위각 방향과 앙각 방향의 합신호 및 차신호를 이용하여 타겟의 3차원적 위치를 추정하는 시스템이다.[4] 본 논문에서는 해양환경을 적용하여 앙각은 고려하지 않고, 방위각만을 고려하였다. 모노펄스는 크게 진폭 비교 모노 펄스와 위상 비교 모노 펄스로 나뉘는데, 진폭 비교 모노 펄스는 서로 다른 각도로 들어오는 수신 신호들의 세기를 비교하여 타겟의 각도를 추정하는 방식이고, 위상 비교 모노 펄스는 같은 세기로 들어오는 수신 신호들의 각도를 비교하여 타겟의 각도를 추정하는 방식이다.[5] 본 논문에서는 두 가지 모노펄스 알고리즘 중 위상 비교 모노펄스 알고리즘을 사용하여 안테나 간격에 따른 성능 분석을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 좀 더 효율적인 비선형 안테나 배열을 제안하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 위상 비교 모노펄스의 특징 및 각도 추정에 이용되는 식에 관하여 설명하고, 3장에서는 본 논문에서 다룰 3가지의 시뮬레이션에 대해 간단하게 설명한 후에 시뮬레이션 결과를 비교, 분석 하여 보았다. 마지막으로 4장에서는 2, 3장의 내용을 요약하고, 결론 및 앞으로 추가적으로 진행될 연구 방향에 대해 토의해 보도록 한다.

Ⅱ. 위상 비교 모노 펄스

위상 비교 모노 펄스는 모노펄스 종류 중 하나로써, 4개의 안테나를 이용하여 방위각방향 및 앙각방향의 합신호와 차신호를 이용하여 목표물의 위치를 추정하는 방식이다. 진폭 비교 모노 펄스와 타겟의 각도를 추정한다는 점에 있어서는 유사하지만, 같은 위상으로 들어오는 서로 다른 크기의 신호를 비교해 타겟의 각도를 추정하는 진폭 비교 모노 펄스와는 달리 각각의 안테나로 들어오는 신호의 크기는 같고 위상은 다르다는 점에서 차이가 있다. 그림 1은 2개의 안테나를 사용하여 모노 펄스 알고리즘을 적용한 상황을 나타낸 그림이다.

$$
\begin{aligned}
R_1^2 &= R^2 + (\frac{d}{2})^2 - 2\frac{d}{2}Rcos(\frac{\pi}{2}+\theta) \\
&= R^2 + \frac{d^2}{4} + dRsin\theta \\
R_2^2 &= R^2 + (\frac{d}{2})^2 - 2\frac{d}{2}Rcos(\frac{\pi}{2}-\theta) \\
&= R^2 + \frac{d^2}{4} - dRsin\theta
\end{aligned}
\tag{1}
$$

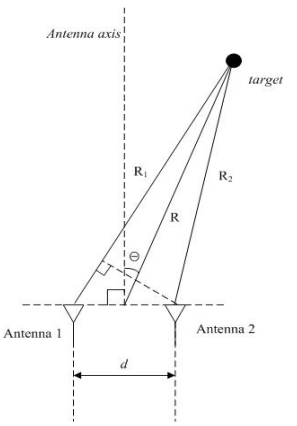

그림 1. 위상 비교 모노펄스 안테나
Fig. 1. phase comparison monopulse antenna

그림 1에서 제 2 코사인 법칙을 이용하여 식(1)과 같은 식을 유도 할 수 있다. 본 논문에서는 안테나로부터 타겟이 100m 만큼 떨어져 있는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 하였는데, 안테나 간격은 cm단위이기 때문에 $d \ll R$ 이라는 가정을 할 수 있다. 앞의 가정에 의해서 $\frac{d^2}{4}$ 항을 무시하고 근사하면 식 (1)은 아래의 식(2)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_1 &\approx R(1+\frac{d}{2R}sin\theta) \\ R_2 &\approx R(1-\frac{d}{2R}sin\theta) \end{aligned} \tag{2}$$

그 다음으로 타겟을 맞고 두 수신 안테나로 들어오는 신호의 위상 차이를 식 (3)과 같이 R_1과 R_2의 경로 차이를 이용하여 구할 수 있다.

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) = \frac{2\pi}{\lambda}dsin\theta \tag{3}$$

여기서 λ는 파장을 의미하고, Φ는 각각의 안테나로 들어오는 신호의 위상 차이를 의미한다. 일반적으로 모노펄스 시스템의 최종적인 출력은 모노펄스 에러 신호라 불리는 합신호와 차신호의 비를 사용한다.[6] 따라서, 식 (4)와 같이 각각의 안테나로 들어오는 신호의 합과 차를 이용하여 계산하게 된다.

$$\begin{aligned} \Sigma &= S_1 + S_2 + n_1 + n_2 \\ \Delta &= S_1 - S_2 + n_1 - n_2 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 S_1과 S_2는 각각 안테나 1, 2로 들어오는 수신 신호의 세기를 의미한다. 또한, n_1과 n_2는 각각 신호 S_1과 S_2가 들어오는 채널에서의 노이즈를 의미한다. 여기서 S_1과 S_2의 관계를 살펴보면, 두 수신 신호의 크기는 같고, 위상만 식(3)에서 구한 위상 차이만큼 다르기 때문에 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_1 = S_2 e^{-j\Phi} \tag{5}$$

위에서 구한 식(5)를 식(4)와 연립하고, 잡음은 신호보다 많이 작다고 가정하여 근사하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = -\frac{S_2(1-e^{-j\Phi}) - n_1 + n_2}{S_2(1+e^{-j\Phi}) + n_1 + n_2} \approx -jtan(\frac{\Phi}{2}) \tag{6}$$

기존에 사용되고 있는 식[7]에서는 식 (7)과 같이 식 (6)에서 양변에 절댓값을 취해서 크기를 이용해 두 신호의 위상 차이를 구한다.

$$|\frac{\Delta}{\Sigma}| = \tan(\frac{\Phi}{2}) \tag{7}$$

$$\Phi = 2\tan^{-1}(|\frac{\Delta}{\Sigma}|) \tag{8}$$

식 (7)을 위상차 Φ에 관하여 정리하면 식 (8)과 같은 결과가 나오는데, 하지만 이렇게 구하게 되면 절댓값으로 인해 위상차 Φ가 양수 값밖에 나오지 않게 되고, 결과적으로 도래각이 양수 일 때 밖에 검출을 해내지 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 식(6)에서처럼 $\frac{\Delta}{\Sigma}$가 순허수가 됨을 가정하여 식 (9)와 같이 정리하여 사용하였다.

$$\Phi = 2\tan^{-1}(-Im(\frac{\Delta}{\Sigma})) \tag{9}$$

최종적으로 식 (3)과 식 (9)를 연립하면 식 (10)과 같이 도래각 θ를 추정할 수 있게 된다.

$$\theta \approx \sin^{-1}(\frac{\lambda}{\pi d}tan^{-1}(-Im(\frac{\Delta}{\Sigma}))) \tag{10}$$

Ⅲ. 모의실험

본 논문에서는 크게 3가지의 모의실험을 진행하였는데, 세 가지 모의실험에서 사용한 변수들의 값은 표 1과 같다.

표 1에서 SNR은 신호 대 잡음 비를 의미하고, R은 안테나의 중심으로부터 목표물까지의 거리이다. f는 각도 추정에 사용한 신호의 중심 주파수를 의미하

표 1. 변수 값
Table 1. parameter value

SNR	R	f	λ
$5dB$	$100m$	$9.41GHz$	$3.19cm$

고, λ는 신호의 파장을 의미한다. 또한, 타겟과 안테나는 정지 상태임을 가정하였다. 기본적으로 모노 펄스 알고리즘은 4개의 안테나를 이용해서 앙각 및 방위각을 측정하는데, 본 논문에서는 해양 환경 상황에 맞춰 앙각을 고려하지 않고 방위각만을 고려하여 모의실험을 진행하였다.

3.1 안테나 간격이 모노 펄스 성능에 미치는 영향

첫 번째로, 안테나 간격에 따른 각도 추정 성능 변화를 알아보기 위해 두 개의 안테나를 사용하여 안테나 간격에 따라서 평균 제곱근 오차가 어떻게 달라지는지를 분석해 보았다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 총 6가지의 안테나 간격(0.5λ, 1λ, 1.5λ, 2λ, 2.5λ, 3λ)에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 각각의 그래프는 서로 다른 안테나 간격을 갖는 상황에서의 그래프이다. 알고리즘의 성능을 평가하는 척도로는 아래 식 (11)과 같은 RMSE값을 사용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}(\theta_i - \hat{\theta}_i)^2} \qquad (11)$$

식 (11)에서 L은 측정 횟수를 의미하고, θ_i와 $\hat{\theta}_i$는 각각 실제 도래각과 추정된 도래각을 의미한다.

모의실험 결과를 살펴보면, 도래각이 약 [－1, 1]도 정도 범위인 작은 각들에서는 2.5λ, 3λ와 같이 안테나 간격이 큰 상황에서 도래각을 좀 더 정확하게 추정하고, [-1, -5], [1, 5] 도 구간에서는 큰 차이가 존재하지는 않지만 약 1λ-2λ에서 가장 도래각을 잘 추정해 냄을 확인 할 수 있다. 또한, 점점 각도가 커지면서 도래각의 절댓값이 ±5도 이상으로 커지게 되면 0.5λ, 1λ와 같이 안테나 간격이 작은 상황에서 도래각을 더 잘 추정해 냄을 알 수 있다. 그 이유를 생각해보면,

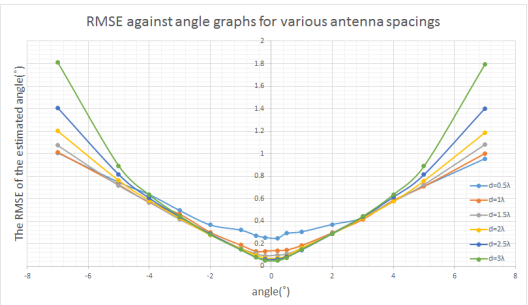

그림 2. 안테나 간격에 따른 각도별 평균 제곱근 오차
Fig. 2. RMSE aginst angle graphs for various antenna spacings

안테나 간격이 멀어질수록 안테나 빔 패턴이 더 가늘어지기 때문에, 안테나 중심 축에 가까운 부분, 즉, 도래각의 절댓값이 0도에 가까운 부분에서 각도 추정을 더 정확하게 하게 되고, 안테나 간격이 좁아지면 안테나 빔 패턴이 두꺼워 지기 때문에, 좀 더 넓은 범위를 잘 추정해 낼 수 있다.

3.2 안테나 배열이 모노 펄스 성능에 미치는 영향

두 번째로 진행한 모의실험은 앞선 모의실험의 결과를 활용하여 진행하였다. 안테나 배열을 조절하여 각도 추정 성능을 개선하기 위해 4개의 안테나를 사용하여 안테나 배열이 선형 배열일 때와 비선형 배열일 때의 성능 차이를 분석 해보았다.

먼저, 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 안테나의 간격을 모두 1λ로 두고 선형 배열 안테나 상황에서 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 3(a)와 같은 안테나 배열을 이용하게 되면 안테나 (1,2), (2,3), (3,4) 조합을 이용했을 경우에는 안테나 간격이 모두 1λ, 안테나 (1,3), (2,4)를 이용하게 되는 경우에는 2λ, 안테나 (1,4)를 이용하게 되는 경우에는 3λ, 이렇게 총 3가지의 안테나 간격을 가지고 타겟의 도래각을 추정할 수 있게 된다. 하지만 이 상황에서는 안테나를 효율적으로 사용 할 수 없기 때문에, 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, 비선형 배열 안테나를 사용하는 것을 고려해 보았다. 비선형 배열 안테나에서는 안테나의 간격을 각각 0.5λ, 1.5λ, 1λ로 두고 시뮬레이션을 하였다.

그림 3(b)와 같은 배열에서는 가장 안테나 간격이 넓은 1.5λ를 가운데에 위치시켰는데, 그 이유는 위와 같이 위치시켜야 4개의 안테나 각각의 조합을 모두 사용 하여 첫 번째 시뮬레이션에서 언급한 6가지 안테나 간격 조합을 만들어 낼 수 있기 때문이다. 예를 들어, 안테나 2와 3의 간격을 1λ로 두고 안테나 1과 2의 간격을 0.5λ로 둔다면 안테나 1과 3의 조합을 사용하였을 때, 두 안테나 사이의 간격이 1.5λ가 되어 안테나 3과 4를 사용하는 경우와 같게 되기 때문에, 효율성이 떨어지게 된다. 따라서 안테나 2와 3의 간격을 1.5λ로 두는 것이 가장 효율적이고, 이 때, 0.5λ (안테나 1,2), 1λ(안테나 3,4), 1.5λ(안테나 2,3), 2λ (안테나2,4), 2.5λ(안테나1,3), 3λ(안테나 1,4) 총 6가지의 안테나 조합을 사용 할 수 있게 된다.

앞에서 언급한 선형배열 안테나와 비선형 배열 안테나일 때의 상황을 비교한 결과는 그림 4에서 볼 수 있다. 그림 4는 도래각이 －20도에서 20도 사이일 때,

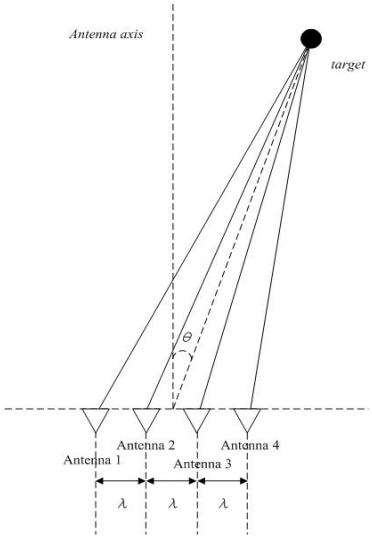

그림 3(a). 선형 배열 위상 비교 모노펄스 안테나
Fig. 3(a). phase comparison monopulse antenna for uniform linear array

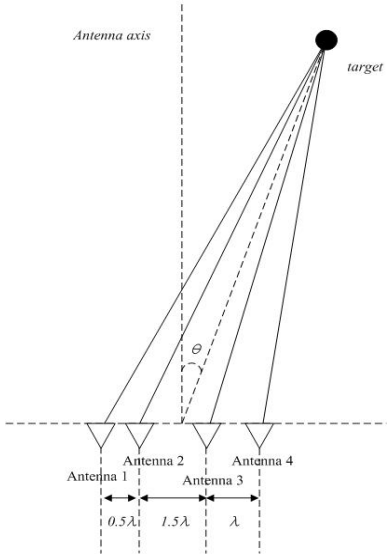

그림 3(b). 비선형 배열 위상 비교 모노펄스 안테나
Fig. 3(b). phase comparison monopulse antenna ffor non-uniform linear array

선형 배열 안테나와 비선형 배열 안테나의 각도 추정 성능을 비교한 그래프이다. 그림 4를 보면, 비선형 안테나 배열과 선형 안테나 배열 모두 도래각이 [- 5, 5] 도 정도로 작을 때는 성능이 비슷하지만 점점 커질수록 비선형 안테나 배열의 성능이 상대적으로 더 좋아짐을 확인할 수 있다. 그 이유를 생각해보면, 앞의 그림 3(a), 3(b)에서와 같이 둘 다 배열 안테나의 총 길이를 3λ로 두었을 때, 도래각이 약 [- 5, 5]도 정도로

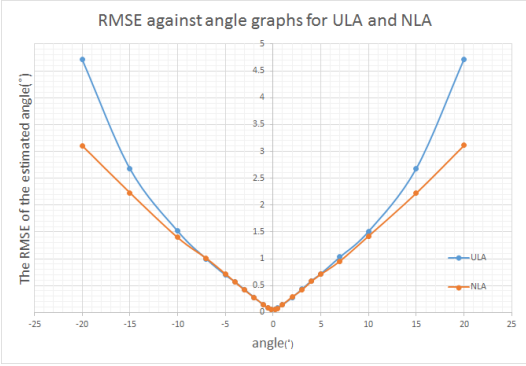

그림 4. 선형 배열 안테나 및 비선형 배열 안테나의 각도별 평균 제곱근 오차
Fig. 4. RMSE against angle graphs for ULA and NLA

작은 경우에는 안테나 간격이 클수록 추정되는 도래각의 오차가 작기 때문에, 위상 비교 모노펄스 알고리즘이 가장 좋은 성능을 내는 상황이 3λ의 안테나 간격을 가진 안테나 1과 4를 사용하는 경우이다. 따라서, 선형 안테나 배열, 비선형 안테나 배열 두 경우에서 모두 비슷한 성능을 내는 반면에, 도래각이 커지면 커질수록 안테나 간격이 작을수록 좋은 성능을 내기 때문에 비선형 배열에서는 안테나 간격이 0.5λ인 부분, 선형 배열에서는 안테나 간격이 1λ인 부분에서 가장 평균 제곱근 오차가 작다. 결과적으로 도래각의 절댓값이 약 5도 보다 커지게 되면 두 안테나 배열의 성능 차이가 발생하게 된다.

3.3 각도 추정 알고리즘들의 성능 비교 분석

마지막으로 진행한 모의실험에서는 두 번째 모의실험에서 제안한 비선형 안테나 배열을 이용한 위상 비교 모노펄스 알고리즘과 MUSIC 알고리즘 및 Bartlett 알고리즘의 성능을 분석하였다. 모노펄스 알고리즘은 두 번째 실험에서 제안한 비선형 안테나 배열을 사용하여 안테나 4개의 간격을 각각 0.5λ, 1.5λ, 1.0λ로 두었고, MUSIC 과 Bartlett 알고리즘은 둘 다 선형 안테나 배열을 이용하여 안테나 4개의 간격을 전부 1.0λ로 두었다.

그림 5는 목표물의 도래각이 -0.5도에서 0.5도 사이일 때의 MUSIC, Bartlett, monopulse 알고리즘의 평균 제곱근 오차를 나타낸 그래프이고, 표 2는 그림 5와 같은 상황에서 MATLAB 시뮬레이션을 이용해 각도 추정에 걸린 시간을 정리한 표이다. 그림 5에서 나타나듯이, 목표물의 도래각이 0도에 가까울수록 모노펄스의 성능이 다른 알고리즘에 비하여 뛰어남을 알 수 있고, 목표물의 도래각이 -0.5도에서 0.5도 사

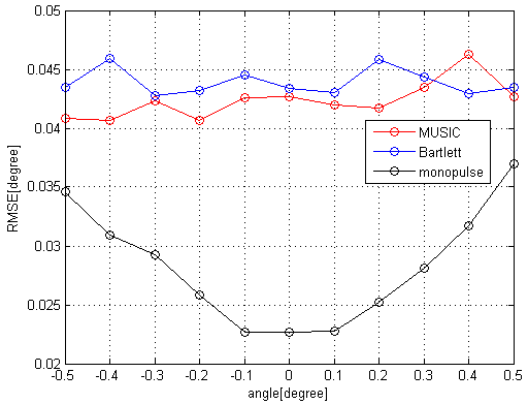

그림 5. MUSIC, Bartlett, monopulse 알고리즘의 각도별 평균 제곱근 오차
Fig. 5. RMSE against angle graphs for MUSIC and Bartlett and monopulse algorithm

표 2. 각도 추정 알고리즘 별 시뮬레이션 시간
Table 2. simulation times for three DOA algorithms

Algorithm	Simulation Time(s)
MUSIC	83.979
Bartlett	63.997
Monopulse	15.716

이인 상황에서는 모노펄스 알고리즘이 다른 각도 추정 알고리즘들에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 표 2에서 알 수 있듯이, 모노펄스 알고리즘이 각도 추정 계산 시간에 있어서 다른 두 알고리즘에 비해 월등히 뛰어남을 확인 할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 안테나 간격과 배열에 따라 위상 비교 모노 펄스 알고리즘의 성능이 어떻게 달라지는지에 관하여 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 타겟의 위치가 정면에 가까울수록 즉, 도래각이 작을수록 안테나 간격이 넓을 때 더 잘 추정해 냄을 알 수 있었고, 도래각이 클수록 안테나 간격이 좁을 때 더 잘 추정해 냄을 알 수 있었다. 이 결과를 활용해서 안테나 배열에 따른 위상 비교 모노펄스 알고리즘의 성능을 분석 해 본 결과, 도래각이 ±5도 보다 큰 상황에서 선형 배열 안테나를 사용할 때 보다 비선형 안테나 배열을 사용했을 때, 좀 더 안테나를 효율적으로 사용하여 각도 추정 성능을 향상 시킬 수 있음을 확인 할 수 있다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 비선형 안테나 배열을 사용한 위상 비교 모노펄스 알고리즘이 [-0.5, 0.5]도 구간의 도래각을 추정함에 있어서는 MUSIC, Bartlett 알고리즘과 비교했을 때, 정확도 및 계산속도 측면에서도 더 개선됨을 확인 할 수 있었다. 본 논문에서는 타겟이 정지 상태에 있고, 1개 밖에 존재하지 않는 상황을 가정하고 이뤄진 연구이기 때문에 상당히 제한적인 측면이 있다. 앞으로 진행될 연구에서는 실제 상황과 좀 더 유사한 상황을 적용하여, 타겟의 이동 속도도 고려하고, 여러 개의 타겟이 존재하는 상황에서의 각도 추정 방법에 대한 연구가 진행될 필요가 있을 것이다.

References

[1] J. Y. Kim, K. T. Chong, and T. Y. Kim, "X-Band FMCW RADAR Signal Processing for small ship," *J. Korea Academia- Industrial Cooperation Soc.*, vol. 10, no. 11, pp. 3121-3129, 2009.

[2] H. B. Lee, J. H. Choi, and S. C. Kim, "A study on the high-resolution based frequency estimation algorithms for automotive radar systems," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 225-226, Pyeongchang, Korea, Jan. 2013.

[3] Y. S. Choi, M. H. Jin, H. H. Choi, S. J. Lee, and C. S. Park, "Design of 2D MUSIC algorithm to reduce computational burden," *J. KICS*, vol. 37C, no. 11, pp. 1077-1083, Nov. 2012.

[4] H. J. Kwon, Y. J. Lee, and J. W. Jung, "A study on 1-channel monopulse receiver," *J. Inst. Electron. Inf. Eng.*, vol. 51, no. 1, pp. 71-76, Jan. 2014.

[5] Donald R. Rhodes, *Introduction to monopulse,* New York, Toronto, London, McGraw-Hill, 1959.

[6] D. K. Kong, "A study on the gain and phase matching between channels in the monopulse receiver," *J. KIMST,* vol. 4, no. 1, pp. 83-92, Jul. 2001.

[7] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, CRC Press, 2000.

심 헌 교 (Heon-kyo Sim)

2014년 2월 : 서울대학교 전기·정보공학부 졸업

2014년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사통합과정

<관심분야> 레이더공학, 통신공학

정 민 아 (Min-A Jeong)

1992년 2월 : 전남대학교 이학사

1994년 2월 : 전남대학교 이학석사

2002년 2월 : 전남대학교 이학박사

2002년 4월~2003년 2월 : 광주과학기술원정보통신공학과 Post-Doc

2003년 4월~2005년 2월 : 전남대학교 전자통신기술연구소 Post-Doc

2011년 9월~2013년 2월 : Cleveland Clinic Research

2005년 3월~현재 : 목포대학교 컴퓨터공학과 부교수

<관심분야> 데이터베이스/데이터마이닝, 생체인식시스템, 무선통신응용분야, 임베디드시스템

김 성 철 (Seong-Cheol Kim)

1984년 2월 : 서울대학교 전기공학과 학사

1987년 2월 서울대학교 전기공학과 석사

1995년 2월 : 미국 폴리테크닉대학교 박사

1995년~1999년 : AT&T Bell lab. Member of Technical Staff

1999년~2003년 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 조교수

2003년~2008년 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 부교수

2008년~현재 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 정교수

<관심분야> Systems Engineering, Channel Modeling, Communication Algorithm, MIMO, Relay, Localization.