

디지털 빔포밍을 이용한 모노펄스 방향 탐지 기법 연구

오 현 수*, 박 철 순°, 장 래 규*

Study on Monopulse Direction Detection Using Digital Beamforming

Hyun-Su Oh*, Cheol-Sun Park°, Lae-Kyu Chang*

요 약

아날로그 빔포밍(Analog Beamforming)은 각 안테나에 연결되어있는 위상 천이기(Phase shifter)와 신호 감쇠기(Attenuator)의 진폭 및 위상 값을 변화시킴으로써 빔의 방향과 패턴을 만드는 방식이다. 이러한 아날로그 빔포밍은 각 소자의 특성과 비싼 가격으로 인해 시스템은 복잡해지고 가격이 상승하는 단점이 있다. 반면, 디지털 빔포밍(Digital Beamforming)은 위상 천이기 및 신호 감쇠기와 같은 RF소자를 사용하지 않고, 기저대역의 디지털 신호처리로 신호의 진폭과 위상 값을 제어함으로써 상대적으로 아날로그 빔포밍에 비해 하드웨어 구성이 단순해진다. 또한 모든 안테나의 신호들을 개별적으로 제어할 수 있어, 다수의 빔을 형성하고 유연한 신호처리를 하는데 유리한 장점이 있다.

본 논문에서는 배열 안테나를 사용하여 디지털화된 I/Q(In-phase Quadrature)신호를 얻고, 표적의 탐지 영역과 빔 개수에 따른 빔 조향 벡터를 계산하기 위한 수식을 제시하였다. 마지막으로 논문에서 제시한 수식을 시뮬레이션 및 실제 시스템에 적용하여 알고리즘의 성능을 분석하였다.

Key Words : Array antenna, Digital Beamforming, Monopulse, DOA estimation, Beam Steering

ABSTRACT

Analog Beamforming is a method of creating the beam direction and pattern by changing the amplitude and phase values using phase shifters and signal attenuators connected to each antenna. Analog Beamforming also has the disadvantage that the system complexity and price increase due to the characteristics and cost of each device. The other hand, Digital Beamforming does not use RF devices such as phase shifters and signal attenuators, but controls the amplitude and phase of the signal by digital signal processing at the baseband level. So, hardware configuration of Digital Beamforming is simpler than that of Analog Beamforming. In addition, since the signals of all the antennas can be controlled individually, there are advantages in forming a plurality of beams and processing of signals. In this paper, we designed a system that detect the target directions by using digital Beamforming and monopulse direction detection algorithm and analyzed the performance of the algorithm by applying it to the real system.

※ 본 연구는 국방과학연구소의 광대역 저피탐 DSSS 신호 합성 수신 장치대 과제 수행결과의 일부입니다.

• First Author : Radarant Company Limited., hyunsu90@radarant.com, 주임연구원, 정희원

° Corresponding Author : Agency for Defense Development, csun1402@add.re.kr, 과제책임자, 정희원

* IMT Company Limited, steeve@imtplus.com, 팀장, 정희원

논문번호 : KICS201911-280-0-SE, Received October 31, 2019; Revised January 31, 2020; Accepted February 20, 2020

I. 서 론

빔포밍(Beamforming) 기술은 안테나로부터 방사된 전파를 특정 방향으로 집중시키는 기술로서, 특정 방향으로 전파의 에너지는 증가하게 되고 다른 방향의 에너지는 감소하게 된다^[1]. 이러한 이유로 빔포밍은 공간적 필터링이라고도 부른다. 빔포밍을 위한 안테나는 카세그레인 안테나, 파라볼릭 안테나와 같이 안테나의 기하학적인 형태를 이용한 방법과 배열 안테나를 사용하는 방법이 있다. 배열 안테나를 사용한 빔포밍은 각각의 안테나에 적절한 진폭과 위상의 값을 조절해주면 특정방향으로 조향된 빔을 만들어 낼 수 있다^[2]. 빔포밍은 신호처리를 하는 주파수 단에 따라 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍으로 나눌 수 있는데, 아날로그 빔포밍은 각 채널의 위상 천이기 및 신호 감쇠기와 같은 RF 단에서 빔포밍이 이루어지며, 디지털 빔포밍은 기저대역에서 아날로그 신호를 ADC(Analog-Digital Converter)를 통해 디지털 데이터로 바꾸어 사용한다. 디지털 빔포밍은 아날로그 빔포밍에 비해 RF단의 복잡도가 줄어들고 각각의 신호를 개별적으로 처리할 수 있는 장점이 있어 통신 분야에서 많은 연구가 진행되어왔다^[3]. 디지털 빔포밍은 안테나 기술과 디지털 기술의 결합체로서 안테나는 시공간 신호를 시간 신호로 변환하는 장치로 볼 수 있고, 매우 다양한 신호처리 기법을 적용할 수 있다^[4]. 특히 레이더 분야에서는 기계적인 안테나의 회전 없이 전기적으로 신속하게 빔을 조향할 수 있는 장점과 목적에 따라서 빔 폭과 부엽의 크기를 조절할 수 있는 장점이 있어 AESA(Active Electronically Scanned Array) 레이더와 같은 최신 레이더에서도 사용된다.

표적의 방위각(DOA, Direction Of Arrival) 정보를 기반으로 표적을 탐지하고 추적하기 위한 기법으로는 모노펄스 방향 탐지(이하 모노펄스), Bartlett, ESORIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance), ML(Maximum Likelihood), MUSIC(MUltiple Signal Classification) 등 다양한 알고리즘이 사용되고 연구되어 왔다^[5]. 모노펄스는 다른 알고리즘에 비해 상대적으로 탐지 각도의 오차가 크지만 연산량이 적어 계산속도가 빠르고 구현이 간편하다는 장점이 있어 많이 사용되는 방법이다. 일반적으로는 4개의 혼 안테나에서 얻은 신호를 바탕으로 합 신호와 차 신호의 비율(모노펄스 비율 커브)을 계산하여 표적의 방위각과 고각을 추정하는 기법이다. 모노펄스는 배열 안테나의 간격, 안테나의 성능, 빔의 간격, 하드웨어의 균일성 등 다양한 원인이 성능에 영

향을 끼치기 때문에 오늘날에도 활발한 연구가 진행되고 있다^[5-6]. 하지만 기존의 연구들은 제한된 탐지 각도에서 오차를 줄이기 위한 연구들이 대부분이며, 넓은 범위를 탐지하기 위한 빔포밍에 대한 연구 자료는 부족한 상황이다.

본 논문에서는 배열 안테나에서 얻은 디지털 I/Q(In-phase Quadrature phase) 신호를 사용하여, 지정한 탐지각도를 커버하는 모노펄스 알고리즘을 적용하여 신호원의 방향을 추정하는 방법을 제안하고, 제시한 방법에 대한 시뮬레이션 및 측정 실험결과를 대대 서술하였다. 표적의 위치는 고각은 고려하지 않고 방위각에 대해서만 다루었으며, 실험에서의 송신 신호는 별도의 안테나를 통해 송신하였으며, 동작 주파수인 3 GHz의 반파장을 등간격으로 하는 12개 안테나로 구성된 선형 배열 안테나(ULA, Uniform Linear Array)를 사용하여 수신하였다.

II. 디지털 빔포밍

2.1 배열 안테나 수신신호 모델링

배열 안테나로 들어온 신호는 그림 1과 같이 하향 변환수신기에 의해 디지털 I/Q 데이터를 얻게 된다.^[7] 이때 각 채널로부터 얻은 값은 그림 2와 같이 배열 안테나와 신호원의 거리와 각도에 의해 결정된다.^[8]

각각의 안테나 사이이 거리가 d 만큼 이격된 배열 안테나에서 신호원이 배열 안테나의 중심으로부터 R 만큼 떨어져 있고 θ 만큼 회전되어 있을 때 각각의 안테나와 신호원의 거리 r 은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r^2 = (x_n \cdot \cos\theta) + (R - x_n \cdot \sin\theta)^2 \quad (1)$$

$$x_n = \left[\frac{-(N-1)}{2}d, \frac{-(N-3)}{2}d, \dots, \frac{(N-1)}{2}d \right] \quad (2)$$

이때, N 은 채널 수, x_n 은 배열 안테나의 중심으로부터 떨어져있는 거리를 나타내며 $d = 0.5\lambda$ 이다. 식

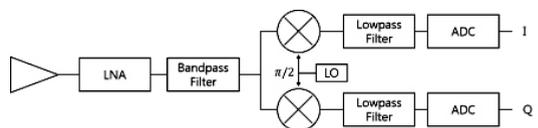


그림 1. 하향 변환 수신기 블록도
Fig. 1. Block diagram of down conversion receiver

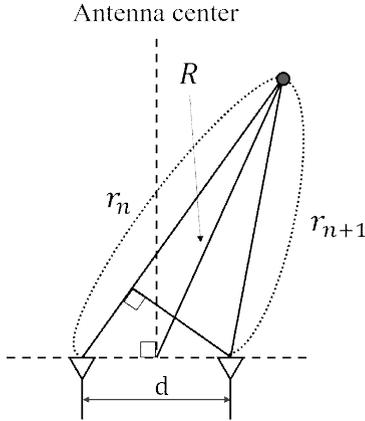


그림 2. 배열 안테나와 신호원의 모습
Fig. 2. Geometry of array antennas and target.

(1)에서 r 은 변수 x_n 과 θ 에 의한 함수임으로 식 (3)와 같이 표현할 수 있고 최종적으로 신호원에서 r 만큼 떨어져있는 채널에서 수신하는 신호는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r(x_n, \theta) = \sqrt{(x_n \cdot \cos\theta)^2 + (R - x_n \cdot \sin\theta)^2} \quad (3)$$

$$s_n(x_n, \theta) = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r(x_n, \theta)} \quad (4)$$

2.2 배열 안테나 조향 벡터

모노펄스 알고리즘으로 표적의 각도를 추정하기 위해서는 수신한 두 빔의 합 신호(Σ)와 차 신호(Δ)의 비를 이용한다. 이때, 두 빔의 빔 폭이 좁을수록 오차는 적어진다^[9].

본 논문에서는 탐지하고자 하는 각도 범위를 커버하기 위한 빔을 M 개를 만들기 위한 조향 벡터 ν_n 을 다음과 같은 방법으로 설계했다.

$$\alpha = \frac{M}{M-1} \frac{2\pi}{\lambda} d(\sin\theta_{end} - \sin\theta_{first}) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{M}{M-1} \left(1 - \frac{\sin\theta_{stop}}{\sin\theta_{first}}\right) \quad (6)$$

$$\nu_n = e^{-j \frac{\alpha}{M} \left(k - \frac{M}{\beta}\right) n} \quad (7)$$

여기서, θ_{first} 와 θ_{end} 는 M 개의 빔 중 첫 번째와

마지막 빔의 위치, $k = 1, 2, \dots, M$ 의 빔 번호, 그리고 $n = 0, 1, \dots, N-1$ 은 채널 번호를 나타낸다. 위와 같은 방법으로 M 개의 빔을 만들었을 때 각 빔의 위치는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_k = \sin^{-1} \left[\frac{\alpha}{M} \left(k - \frac{M}{\beta}\right) \cdot \frac{\lambda}{2\pi d} \right] \quad (8)$$

III. 모노펄스 방향 탐지

모노펄스 알고리즘은 수신 신호의 합 신호(Σ)와 차 신호(Δ)의 비를 계산하여 모노펄스 진폭 비율 곡선을 만들 수 있다.^[10] 이때, 수신 빔 신호는 식 (9)와 같이 식 (4)와 식 (7)의 행렬 곱으로 표현할 수 있다.

$$S_k = \nu_n \cdot s_n(x_n, \theta) \quad (9)$$

또한, 단일 신호원이라 가정했을 때, 합 신호와 차 신호는 인접한 두 빔 사이에서 계산함으로 $M-1$ 개의 모노펄스 진폭 비율 곡선이 생기게 된다. 따라서 합 신호와 차 신호는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma_{k'}(\theta) &= S_{k'} + S_{k'+1} \\ \Delta_{k'}(\theta) &= S_{k'} - S_{k'+1} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 k' 은 $1, 2, \dots, M-1$ 을 의미하며 식 (10)을 사용하여 모노펄스 진폭 비율을 구하면 식 (11)과 같다.

$$E_{k'}(\theta) = \frac{\Sigma_{k'}(\theta)}{\Delta_{k'}(\theta)} \quad (11)$$

최종적으로 모노펄스 진폭 비율 곡선은 식 (11)의 값을 가지게 되고, 진폭 비율 곡선의 시작과 끝점은 식 (8)의 값을 가지게 된다.

IV. 시뮬레이션 및 실험

4.1 디지털 빔 패턴 검증 실험

이번 장에서는 2장과 3장에서 설계한 모노펄스 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 동작 주파수인 3GHz의 반파장 등간격으로 이격한 12개의 1차 균일 선형 배열 안테나를 이용하여 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 실험은 전자파 무반향실에서 진행하

였으며, 송신신호 발생장치와 신호 수신기는 배열 안테나의 중심을 기준으로 약 10m의 거리로 떨어져 있다. 기저대역 변환을 위한 하향변환 수신기는 상용 NI사의 SDR(Software Defined Radio)를 사용하였고, 12개 수신채널의 위상 동기(Phase Coherence)를 맞추기 위해 국부 발진기를 공유하여 사용하였다. 또한 디지털 클럭으로 사용되는 Reference Signal 공유하여 사용하였다.

배열 안테나를 구성에 사용한 안테나는 상용 Log periodic 안테나로 700MHz~4GHz의 주파수 범위에서 약 4dB의 이득을 갖는다(그림 3 참조). 배열 안테나의 이격 간격은 동작 주파수인 3GHz의 반파장(0.5λ)으로 배치하였다. 또한, 측정용 수신기와 시뮬레이션 모두 부엽의 레벨을 낮추기 위해 테일러 윈도우를 적용하였다.

그림 4는 표 1의 설계 파라미터를 바탕으로 탐지 각도 $-45^{\circ} \sim +45^{\circ}$ 에 대응하는 모노펄스 진폭 비율 곡선을 정의하기 위한 9개 방향으로 조향된 빔 패턴의 모습이다. 원점 0° 로 조향된 빔의 경우 3dB 빔 폭은 약 10.8° 을 가지게 되고 원점에서 점점 멀어질 수록 빔 폭이 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 그림 5는 동작 주파수인 3GHz에서 시뮬레이션으로 0° 로 조향한 빔 패턴과 수신 장치에서 측정된 빔 패턴을 비교한 것이다. 측정 결과는 시뮬레이션(이론치)과 유사한 빔폭을 가지고 있으며 특히 빔 패턴의 주엽의 경우 상당 부분

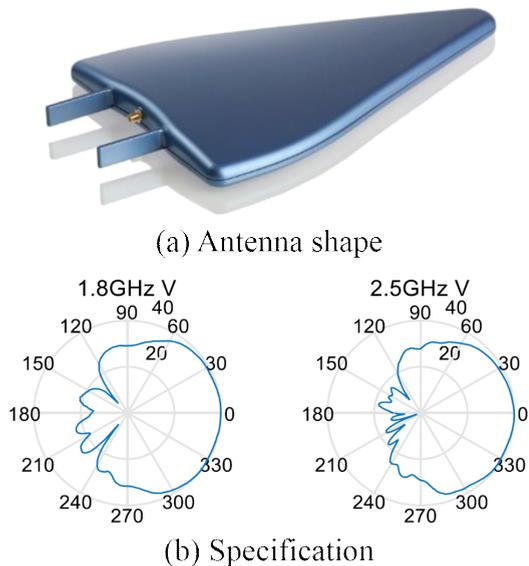


그림 3. Log periodic 안테나(a) 및 사양(b)
Fig. 3. Log periodic Antenna shape(a), specification(b)

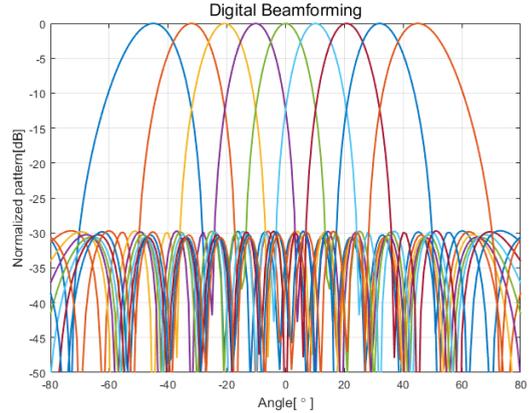


그림 4. 모노펄스를 위한 빔 패턴 생성(이상적인 값)
Fig. 4. Beam patterns generation for monopulse (Ideal value)

표 1. 설계 파라미터 값
Table 1. Parameters value

Channel	Beam	Frequency	Angle
$N=12$	$M=9$	3GHz	$-45^{\circ} \leq \theta \leq 45^{\circ}$

일치하는 모습을 보여준다. 부엽의 경우 측정치가 5~7dB 정도 높은 모습을 보여주었다.

표준적인 디지털 빔포밍 설계방식에서 설계된 주파수의 주빔은 그림 5와 같이 좁게 형성하지만, 주파수가 변경되면 빔폭이 변화하게 되는 특성이 있다^[11]. 즉, 설계된 주파수보다 높은 주파수에서는 주빔의 폭은 좁아지지만 부엽이 커지는 특성이 나타나고, 낮은 주파수에서는 주빔의 폭이 넓어지고 이득이 작아지는 특성을 가지게 된다. 따라서, 광대역에서 효과적인 운

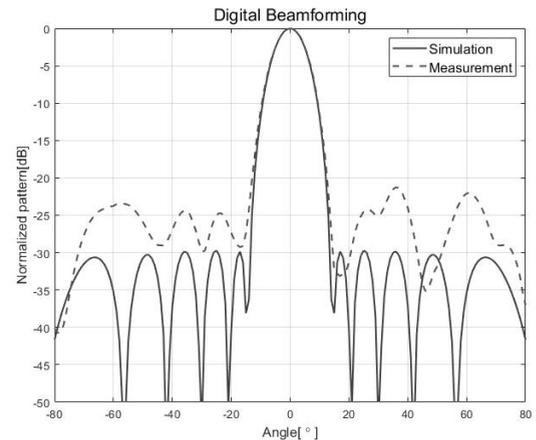


그림 5. 시뮬레이션, 수신 빔 측정값 비교(0° 조향, 3GHz)
Fig. 5. Comparison of Simulations and Measurements

용을 위해서는 균일한 빔폭(Uniform beamwidth) 특성을 갖는 것이 바람직하다. 이러한 균일한 주빔 특성을 만들기 위해 고유치필터(Eigenfilter) 설계 기법 또는 Slepian 함수를 이용한 기법이 시도되었고, 최근 신경망을 이용한 기법이 연구되고 있다^[14].

4.2 모노펄스 방향 탐지 검증 실험

마지막으로 진행한 검증 실험은 앞서 측정한 빔 패턴을 사용하여, 모노펄스 진폭 비율 곡선을 계산한 후 송신원의 위치와 추정된 탐지 각도의 오차를 측정해 보았다.

그림 6의 동작주파수인 3GHz에서 모노펄스 진폭 비율 곡선은 그림 4의 9개의 패턴에서 인접한 패턴의 합 신호와 차 신호의 비를 도식화 한 그림이며, 3절에서 설명한바와 같이 8개의 커브는 각각 인접한 빔의 조향각도의 범위에서 정의되어 있다.

모노펄스 진폭 비율 곡선을 이용하여 각도를 추정하는 방법은 신호원의 위치에 따라 신호가 가장 큰 두 개의 빔을 찾고, 그 두 빔에 의해 정의된 모노펄스 진폭 비율 곡선에서 합 신호와 차 신호의 비(Σ/Δ)값 비교하여 각도를 추정할 수 있다. 만약 신호원이 -40°에 위치했을 경우 그림 4에서 왼쪽에서 1, 2번 빔 사이에 위치하게 되고 이때 합 신호와 차 신호의 비 Σ/Δ 의 값은 약 0.17의 값이 계산된다. 따라서 그림 6의 1번 커브에서 y축의 값이 0.17에 해당하는 x축 신호원의 위치를 얻을 수 있다.

그림 7은 동작주파수인 3GHz에서 표적 신호의 위치를 -45°에서 1°간격으로 45°까지 바꾸면서 추정 값과 표적 위치의 차이를 시뮬레이션(이상적인)한 값을 나타낸다. 오차 값이 변화하는 흐름을 보면 조향한 각도(모노펄스 진폭 비율 곡선의 양끝)에서 오차가 가장

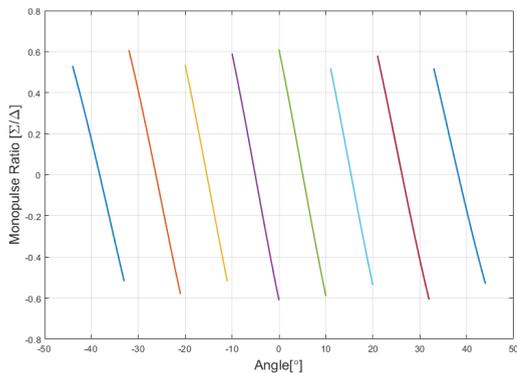


그림 6. 모노펄스 비율 곡선
Fig. 6. Monopulse ratio curve

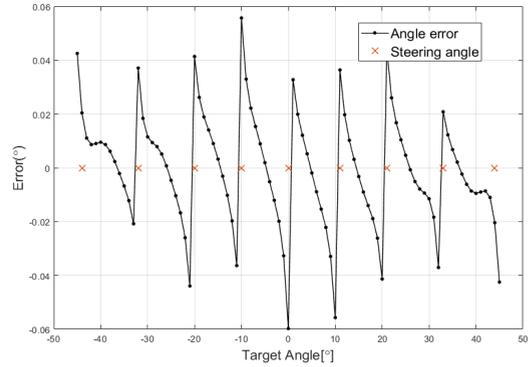


그림 7. 모노펄스 추정각도 오차(시뮬레이션)
Fig. 7. Monopulse angle error(simulation)

크고, 조향한 빔 사이로 양수 값의 오차와 음수 값의 오차가 규칙적으로 반복되는 모습을 볼 수 있다.

그림 8은 앞서 시뮬레이션과 동일한 설계 파라미터로 측정한 결과로 시뮬레이션 결과와 유사하게 조향한 각도에서 오차 값이 크게 나타나는데, 이러한 현상의 원인은 정의된 모노펄스 진폭 비율 곡선의 끝 부분의 위치하면서 곡선의 모호성이 증가되어 나타난 현상으로 확인된다. 배열 안테나의 중심(0°)인 보어사이트(Boresight)에서 멀어질수록 조향한 빔의 이득이 감소함에 따라 오차가 증가하는 모습을 보여준다.

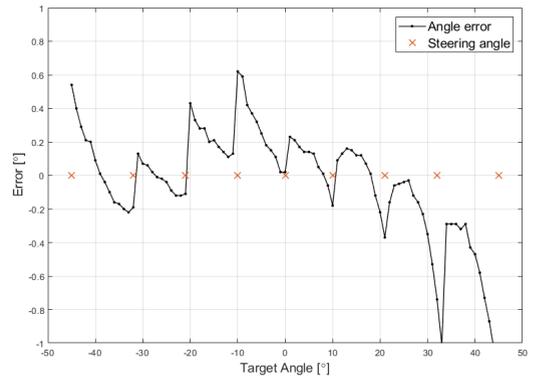


그림 8. 모노펄스 추정각도 오차(측정)
Fig. 8. Monopulse angle error(measurement)

V. 결 론

본 논문에서는 동작 주파수 3GHz의 반파장(0.5λ) 간격의 배열 안테나를 사용하여 디지털 I/Q신호를 획득하였다. 이 신호를 사용하여 설계한 탐지 범위에서 모노펄스 방향 탐지 알고리즘의 성능을 분석하였다.

시뮬레이션 결과와 디지털 신호 수신기에서 얻은 빔패턴은 주엽 부분에서 상당부분 일치하는 모습을 보여주었다. 모노펄스 오차 또한 시뮬레이션의 결과와 유사하게 오차가 증감하는 모습을 확인할 수 있었다. 특히, 빔의 조향각도에서는 오차가 증가하는 모습 또한 공통적으로 관찰되었다. 모노펄스 방향 탐지 알고리즘에서 오차는 정의된 모노펄스 비율 곡선의 모습에 따라 다르게 나타난다. 즉 모노펄스 비율 곡선을 생성하기 위해 빔 개수를 줄이면 탐지 범위가 빔의 주엽에서 벗어나면서 오차는 증가하게 되고, 반대로 빔 개수를 너무 많이 설계하게 되면 오차가 증가하는 빔 조향위치가 많아지고 빔을 증가한 만큼 계산양도 증가하는 단점이 생기게 된다. 그러므로 모노펄스 비율 곡선이 정의하기 위해 필요한 빔의 생성 개수, 위치에 대한 분석과 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

마지막으로 본 논문에서는 1차원의 12개 안테나를 이용한 선형 배열 안테나(ULA)와 1개의 고정된 신호 원만을 고려한 연구이기 때문에 앞으로 진행할 연구에서는 고각을 포함한 2차원 평면 배열 안테나, 안테나의 채널수 변경 및 안테나 간 이격 거리가 비선형의 안테나 배열, 다수의 신호원과 움직이는 상황을 고려한 연구가 추가로 진행되어야 하며, 표적의 방향을 탐지하는 Bartlett, Capon, ESPRIT, MUSIC과 ML 계열의 다른 초분해능 알고리즘과의 비교하는 연구가 필요할 것이다.

References

[1] H. Steyskal and John F. Rose, "Digital beamforming for radar systems," *Microwave J.*, pp. 121-138, Jan. 1989.

[2] R. Mailloux, "*Phased Array Antenna Handbook*," Boston: Artech House, 1994.

[3] L. Godara, "*Smart Antennas. Boca Raton*," CRC Press, 2005.

[4] M. Vavrda, "*Digital Beamforming in wireless communications*," in Brno University of Technology, 2011.

[5] H. K. Sim, M. A. Jung, and S. C. Kim, "A performance analysis of phase comparison monopulse algorithm for antenna spacing and antenna array," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 1413-1419, 2015.

[6] H. K. Sim, S. W. Lee, and S. C. Kim,

"Enhanced DOA estimation method combining monopulse angle estimation and beamspace MUSIC," in *Proc. KICS Conf. 2017*, pp. 538-539, High1 Resort, Jan. 2017.

[7] H. Steyskal, "Digital beamforming antenna: An introduction," *Microwave J.*, pp. 107-114, Jan. 1987.

[8] J. Litva and Titus K. Lo, "*Digital Beamforming in wireless communications*," Artech House, 1996.

[9] S. S. Kim and K. W. Yeom, "Monopulse slope calibration in frequency agile noncoherent monopulse system," *J. Korean Inst. Electromag. Eng. and Sci.*, vol. 18, no. 11, Nov. 2007.

[10] Donald R. Rhodes, "*Introduction to monopulse*," McGraw-Hill, 1959.

[11] Yugo M. Kuno, et al., "A neural network approach to broadband Beamforming," *ICA2019 23rd Int. Congress on Acoustics*, pp. 6961-6968, Sep. 2019.

오 현 수 (Hyun-Su Oh)



2015년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업
 2018년 2월 : 광운대학교 전자융합과 석사
 2018년 8월~현재 : (주)레이단트 주임연구원

<관심분야> 전자공학, 통신공학, 신호처리
 [ORCID:0000-0002-1807-0811]

박 철 순 (Cheol-Sun Park)



1989년 2월 : 경기대학교 전자
계산학과 학사

1991년 2월 : 인하대학교 전자
계산공학과 석사

1997년 5월 : 전자계산조직응용
기술사

2007년 2월 : 충남대학교 정보
통신공학과 박사

1991년 2월~현재 : 국방과학연구소 책임연구원

<관심분야> 신호처리, 통신응용

[ORCID:0000-0002-3678-4041]

장 래 규 (Lae-Kyu Chang)



2001년 2월 : 대전대학교 전자
공학과 졸업

2007년 8월 : 충남대학교 전과
공학과 석사

2014년 8월~현재 : (주)아이엠티
<관심분야> 전자공학, 통신공학
[ORCID:0000-0002-0548-8506]