

Squinted-Sum 모노펄스 방식을 이용한 다중경로 오차 보정 연구

Study on Multipath Error Correction Using Squinted Sum Monopulse Method

권용욱 · 신동기 · 김성균 · 유우성 · 장헌순

Yong-Wook Kwon · Dong-Gi Shin · Sung-Gyun Kim · Woo-Sung Yoo · Heon-Soon Jang

요 약

현대의 레이더는 표적의 거리와 방위각, 고도를 탐지하는 3차원 레이더 시스템으로 변화하였다. 레이더는 폭이 좁은 안테나 패턴을 활용하고, 전자적인 또는 기계적인 조향으로 표적 정보를 획득한다. 그리고 탐지된 정보를 통해 표적의 고도 정보를 산출한다. 또한, 모노펄스 등 다양한 방법을 적용하여 각도 정확도를 향상한다. 레이더의 각도 정확도는 다중경로 효과와 같은 외부 요인에 의해 영향을 받게 된다. 다중경로 효과는 레이더의 설치 환경, 표적의 비행 고도 등 다양한 요인에 의해 발생한다. 레이더 시스템은 다중경로 효과에 의해 발생하는 탐지 정확도 저하를 개선하기 위해 다양한 방법을 적용하고 있다. Squinted-sum 모노펄스 방식은 다중경로 효과 발생 빈도가 높은 해상 환경에서 레이더의 각도 오차를 줄일 수 있는 방법이다. 레이더는 각도 오차를 산출하는 모노펄스 차 패턴을 탐지 빔의 상측으로 조향된 합 패턴을 활용한다. 탐지 빔의 하방에서 이득이 급격하게 떨어지는 차 패턴을 통하여 하방으로 입사되는 다중경로 수신신호의 영향성을 최소화하는 방식이다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 squinted-sum 모노펄스 방식의 효과를 검증하고, 해상 환경에 설치된 조기경보레이더에 적용하여 그 효과를 확인하였다.

Abstract

An 3D radar system can detect the distance, azimuth, and altitude of targets. The radar acquires target information using an electronic or mechanically steered narrow antenna pattern. It calculates the target altitude using the detected information. In addition, angular accuracy is improved by applying various methods such as monopulse. The radar angular accuracy is affected by external factors such as multipath effects that are caused by various factors such as the radar installation environment and the flight altitude of the target. Radar systems apply various methods to improve the detection accuracy degradation caused by multipath effects. The squinted sum monopulse method can reduce the detection errors of the radar in a marine environment with a high frequency of multipath effects. The radar utilizes a different monopulse pattern that calculates an angular error with a sum pattern steered upwards of the detection beam. This is a method of minimizing the influence of the multipath received signal incident downward through a difference pattern in which the gain falls sharply below the detection beam. In this study, the effect of the squinted sum monopulse method was verified through simulation, and the effect was confirmed by applying it to an early warning radar installed in a sea environment condition.

Key words: Mono-Pulse, Multipath, Squinted Sum Beam, Phased Array

LIG넥스원(LIGNEX1.Co.,Ltd)

· Manuscript received October 8, 2020 ; Revised November 2, 2020 ; Accepted November 18, 2020. (ID No. 20201008-086)

· Corresponding Author: Heon-Soon Jang (e-mail: jangheonsoon@lignex1.com)

I. 서 론

3차원 레이더 시스템은 위상배열안테나를 이용하여 일정 범위 내에서 표적의 상대적 위치, 방위각, 고각 등을 측정할 수 있다. 레이더가 표적의 각도를 측정하는 방식으로는 Sequential Lobbing, Conical Scan, 모노펄스(Monopulse) 방식 등이 있다. 그 중에서 모노펄스 방식은 안테나 중심축을 기준으로 좌/우, 상/하 등으로 분리하고, 2개 또는 그 이상으로 표적신호를 수신한다. 레이더는 수신된 신호를 동 위상으로 합성되어 합 채널로 활용하고, 역 위상으로 합성하여 차 채널로 이용한다. 합 채널은 표적의 탐지, 차 채널은 각도 오차를 산출하기 위해 사용된다. 일반적인 모노펄스 방식의 차 채널은 안테나가 지향하고 있는 방향에서 급격한 널(null)을 나타내며, 널을 중심으로 위상이 180도 반전된 형태로 나타난다. 빔 패턴의 중심에서는 합 채널은 최대 이득, 차 채널이 최소 이득의 특징을 갖는다. 모노펄스를 이용한 각도 오차 측정 방식은 다른 방식에 비하여 정확도가 높고 AM(amplitude modulation) 재밍이나 ECM(electronic counter measure)에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다^{[1][2]}.

해안지역이나 활주로와 같은 평지에 레이더가 설치되는 환경에서 반사표면 아래에 허상의 표적이 있는 것처럼 보이는 다중경로 효과가 빈번하게 발생할 수 있다. 특히, 레이더가 설치된 고도가 낮거나, 표적 비행고도가 낮은 경우, 그리고 표면의 반사계수가 높을수록 그 효과는 더욱 크게 나타난다. 이러한 다중경로 효과는 레이더가 표적의 각도를 산출하기 위한 모노펄스 방법에도 악영향을 끼친다. 일반적인 모노펄스 방식에서 각도 산출을 위해 사용되는 차 패턴은 반사면을 향해 큰 이득을 가지게 된다. 즉, 표적에 의해 반사된 신호보다 표면에서 반사된 다중경로 신호를 더 큰 이득으로 수신할 수 있다.

다중경로 효과를 저감하기 위해서는 반사 표면이 존재하지 않는 곳에 레이더를 설치하거나, 안테나의 빔 패턴을 첨예하게 설계/제작하거나 적절한 각도와 함께 부엽을 줄이는 것이 기본적인 방법이다. 하지만 안테나 패턴은 운용 주파수, 안테나 크기 등 제작 상의 제약을 가진다. 다른 방법으로는 두 개 이상의 안테나를 이격 설치하여 공간적 다이버시티 방식이 있으나, 설치비용과 전력 소모 및 설치장

소에 따른 제약이 있다. 위상배열 안테나의 경우, 빔 형성을 위해 고각에 따라 변위기를 이용하여 빔을 형성하게 되는데, 수신된 신호에서 반사표면으로 인한 다중경로 효과를 신호처리만으로 완벽하기 제거하기 어렵다.

Squinted-sum 모노펄스 방식을 적용하면 기존의 시스템에서 최소한의 하드웨어 변경을 통해 구현이 가능하고, 일반적인 모노펄스 빔 패턴 대신 다중경로 반사 방향에 저 부엽의 빔 패턴을 가지는 빔을 이용하여 저고도 해상 표적에 대한 다중경로 효과를 저감시킬 수 있다^[3].

본 논문에서는 위상배열안테나에서 사용하는 일반적인 모노펄스 빔 패턴과 squinted-sum 모노펄스 방식을 비교하고, 시뮬레이션을 통하여 다중경로 효과 개선효과를 증명한다. II 장에는 다중경로 효과와 모노펄스 방식에 적용되는 안테나의 패턴에 대하여 설명하였으며, III 장에는 squinted-sum 모노펄스 방식의 시뮬레이션 결과와 실 환경의 운용 장비에 적용한 결과를 비교하여 그 유효성을 검증한다. 마지막 결론 순으로 구성되어 있다.

II. 본 론

2.1 다중경로 효과

그림 1은 다중경로 효과 개념도를 나타내고 있다. 그림에서 h_r 은 레이더가 위치한 높이, h_a 와 R 은 각각 표적과 떨어진 거리와 그것이 위치한 높이이다. 그리고 ξ 는 반사표면과 이루는 각도를 의미하고, R_d 는 직접 경로, R_i 는 간접경로를 나타낸다. 두 경로간의 위상 차이를 $\Delta\phi$ 로 아래와 같이 표현할 수 있다.

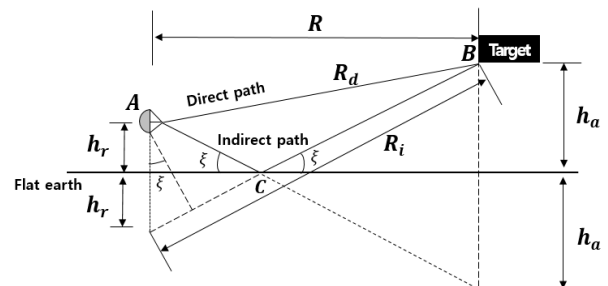


그림 1. 다중경로 효과 개념도

Fig. 1. Geometry of a multipath effect.

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1)$$

where: λ is the radar wavelength

레이다 송신 시, 안테나로부터 방사된 신호는 직접경로(direct path)와 간접경로(indirect path)를 통해 표적에 도달하며, 반대로 수신시에도 동일한 경로를 통하여 입사된다. 간접 경로 신호의 진폭은 직접 경로를 통해 도달하는 신호의 진폭보다 작게 된다. 이는 간접 경로의 방향의 안테나 이득이 직접 경로로 구성된 것보다 작기 때문이며, 지점의 반사표면에서 반사되는 신호가 지구의 반사계수에 따라 진폭과 위상이 변하기 때문이다. 지구 표면에서 반사계수 Γ 는 아래와 같다.

$$\Gamma = \rho e^{j\psi} \quad (2)$$

where: ρ -real part of the reflection coefficient

ψ -Phase shift on reflection

여기서 표면의 반사계수 Γ 는 -1 로 가정하고, 반사되는 파형의 진폭의 변화는 없지만 수평 또는 수직편파를 가지는 파가 낮은 반사표면 각도에서 위상은 180° 만큼 이동된다.

$R \gg h_a$ 일 때, 직접 경로 A-B와 간접 경로 A-C-B 사이의 차이는 아래와 같다.

$$\Delta = 2h_a \sin \Psi_d \quad (3)$$

위의 $\sin(\Psi_d)$ 을 $(h_a + h_t)/R$ 로 다시 표현하면

$$\Delta = \frac{2h_a(h_a + h_t)}{R} \quad (4)$$

위와 같이 표현될 수 있는데 이때 $h_t \gg h_a$ 이면,

$$\Delta \approx \frac{2h_a h_t}{R} \quad (5)$$

위와 같이 표현된다.

표적에서 합성되는 직접 경로와 간접 경로의 전체 위상 차이는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\Psi = \Psi_d + \Psi_r = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_a h_t}{R} + \pi \quad (6)$$

두 신호의 벡터 합은 동일한 크기를 가지지만 위상 차

이는 $[2(1 + \cos \Psi)]^{1/2}$ 이 되고, 표적에서의 직접 및 간접 경로 신호의 전력비는 진폭의 제곱 η^2 으로 표현된다.

$$\eta^2 = 2 \left(1 - \cos \frac{4\pi h_a h_t}{\lambda R} \right) = 4 \sin^2 \frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R} \quad (7)$$

전파의 가역성에 의해 송신과 동일한 경로로 표적으로부터 되돌아오는 에코신호의 전력비는 아래와 같으며, 수신된 에코신호의 전력은 η^4 로 표현된다.

$$\eta^4 = 16 \sin^4 \frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R} \quad (8)$$

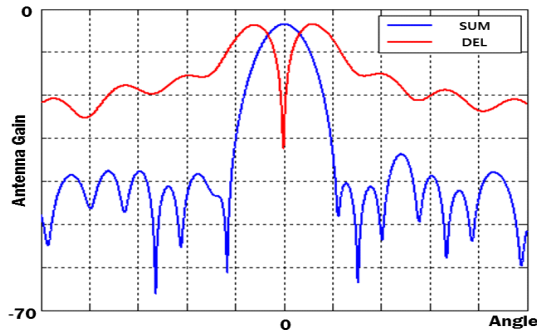
레이다에 입사되는 최종 수신 신호는 표적에 직접 반사된 신호와 함께 표면 반사와 신호가 수신된다. 일반 모노펄스 패턴의 차 채널 패턴(고각 방향)이 다중경로 반사 방향에 위치하고 있으므로 직접 경로 신호와 간접 경로 신호가 함께 중첩되고, 위상차로 인해 신호세기가 저하되거나 상쇄될 수 있다^{[4]~[6]}.

2-2 Squinted-Sum 모노펄스 방식

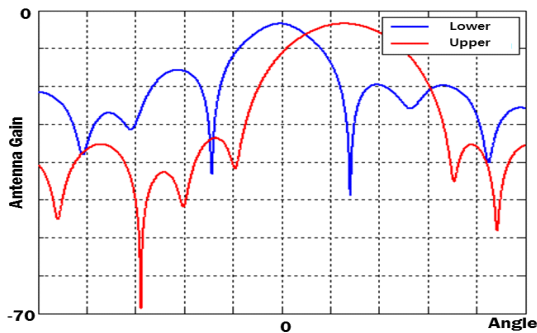
Squinted-sum 모노펄스 방식은 다중경로에 의한 각도 오차를 최소화하기 위한 방법 중 하나로, 일반적인 모노펄스 방식과는 다르게 하방 빔(lower Σ)과 상방 빔(upper Σ) 2개의 빔을 이용한다. 하방 빔은 일반 모노펄스 방식의 합 채널처럼 표적 탐지에 사용되며, 상방 빔은 고각 오차 산출에 사용된다. 그러므로, 상방 빔은 다중경로 반사 신호의 이득이 작도록 저 부엽으로 설계 및 제작된다. 이러한 squinted-sum 모노펄스 방식은 수평선상의 커버리지를 유지하면서 두 빔의 간접 경로 에너지량을 최소화하는 장점이 있다^[1].

2-3 모노펄스 안테나 패턴

모노펄스 방식에서 각도오차를 산출하는 방법으로는 위상 비교, 진폭 비교 등이 있다. 본 논문에서 비교분석한 레이더 시스템은 합 채널과 차 채널의 진폭비를 통해 각도 오차를 산출하고, 위상을 이용하여 부호를 결정하는 진폭 비교 방식을 적용하였으며, 안테나 빔 패턴은 그림 2와 같다.



(a) 일반 모노펄스 안테나 패턴
(a) The antenna pattern of a normal mono-pulse method



(b) Squinted sum beam 모노펄스 안테나 패턴
(b) The antenna pattern of a Squinted sum beam mono-pulse method

그림 2. 모노펄스를 위한 안테나 패턴
Fig. 2. The antenna patterns for a mono-pulse method.

그림 2(a)와 같이 일반 모노펄스의 차 채널 패턴은 합 채널의 중심을 기준으로 상방 및 하방으로 최대 이득을 나타낸다. 이러한 차 패턴은 다중경로 환경에서 간접경로로 입사되는 신호들을 높은 이득으로 수신하기 때문에 각도 오차를 증가시키는 요인이 된다.

다중경로 효과를 저감시키기 위해 그림 2(b)의 Squinted sum beam의 패턴을 활용하여 다중경로에 의한 고각 오차에 대해 시뮬레이션을 통해 개선효과를 예측하고, 실 운용 레이더에 적용하여 그 결과를 검증하였다.

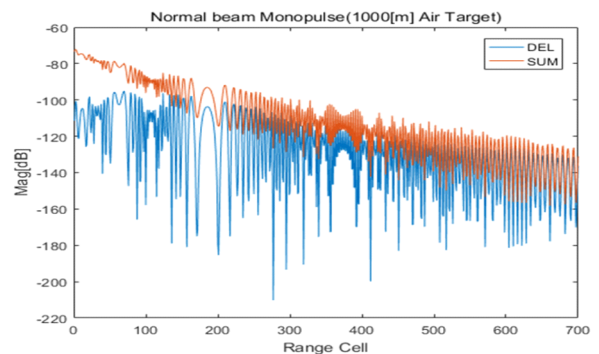
III. 적용 시험 결과

3-1 시뮬레이션

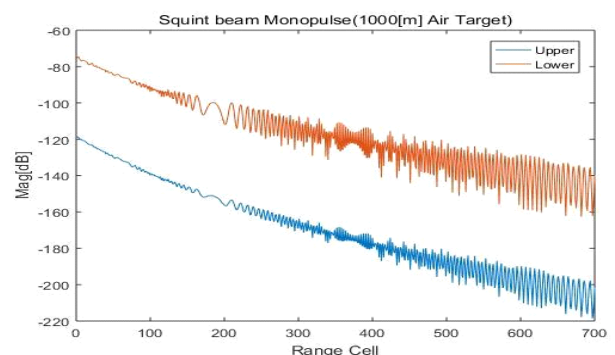
일반 모노펄스와 Squinted sum beam 모노펄스의 다중경로에 의한 각도 오차 영향성을 확인하기 위하여 시뮬

레이션을 통하여 수신안테나의 거리에 따른 수신 진폭을 확인하였다. 시뮬레이션을 위한 시험 환경은 실 운용 레이더가 설치된 환경을 기준으로 하였으며, 표적 모의 비행경로는 해상방향으로 설정하고, 비행 고도는 1 km로 설정하였다.

시뮬레이션 결과, 그림 3과 같이 일반 모노펄스는 합 패턴과 차 패턴의 신호세기의 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있는데, 이것은 차 채널의 하방 빔으로 입사되는 다중경로 신호로 인해 진폭비교에 모호성을 발생시키며, 고각 오차를 일으키는 원인임을 확인할 수 있다. 이에 비해 squinted sum beam 모노펄스의 상방 빔과 하방 빔으로 입사되는 진폭은 일정한 차이를 유지하므로 진폭비교에 적합하며, 고각 오차를 줄일 수 있는 결과를 보였다(그림 4).



(a) 일반 모노펄스의 진폭 변화
(a) The magnitude variation of a normal mono-pulse method



(b) Squinted sum beam의 진폭 변화
(b) The magnitude variation of a squinted sum beam method

그림 3. 안테나 패턴 별 수신 진폭(해상환경 조건)

Fig. 3. The magnitude of received signal for each antenna's patterns(sea environment condition).

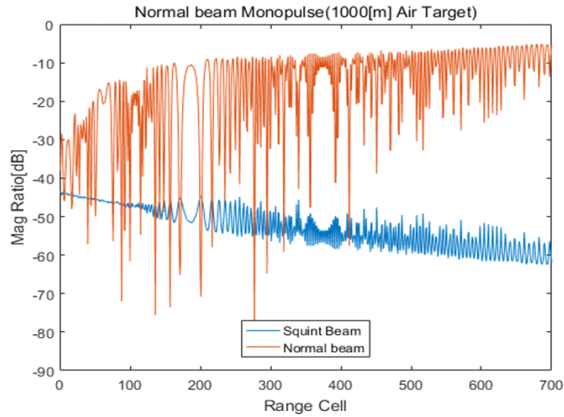


그림 4. 모노펄스 각도 오차 시뮬레이션(해상환경조건)
Fig 4. The simulation result on mono-pulse angle error (sea environment condition).

3-2 조기경보레이다 적용 결과

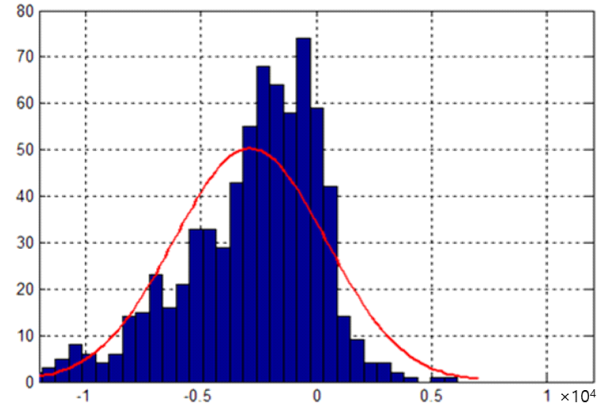
Squinted sum beam의 성능 검증을 실 환경에서 운용 중인 레이다에 적용하였으며, 레이다 제원은 표 1과 같다. 레이다 설치환경은 다중경로의 영향성을 확인하기 적합한 해안에 인접하고, 낮은 고도에 설치되어 있는 사이트를 선정하였다. 검증시험은 기뢰표적 탐지와 시험용 표적기 탐지 시험으로 진행하였다. 고도 정확도는 항공기에 탑재된 IFF(identification friend or foe) 응답기의 고도정보를 활용하였다.

그림 5는 일반 모노펄스와 squinted sum beam 모노펄스를 교차 적용하여 동일기간동안 누적 수집한 기뢰표적의 고도오차 분포도이다.

표 1. 레이다 제원

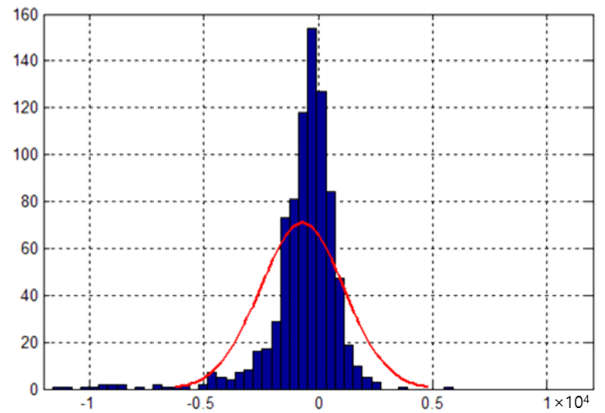
Table 1. Radar specification.

Parameter	Value
Frequency band	S-Band
Transmitted power	○○ kW
Pulse modulation	Linear frequency modulation
Detection range	○○○ km
Antenna	Active phase array
Monopulse	2-Axis(elevation/azimuth)
Receive mode	2 mode
Frequency channel	○○○ Channel, 1.25 MHz Step



(a) 일반 모노펄스의 고도 오차

(a) The flight level error of a normal mono-pulse method



(b) Squinted sum beam의 고도 오차

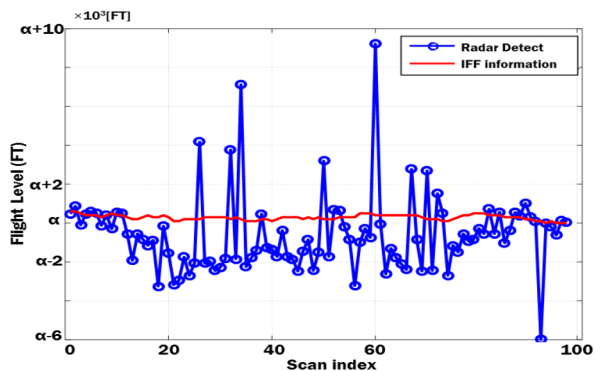
(b) The flight level error of a squinted sum beam method

그림 5. 탐지 고도 오차 분포도

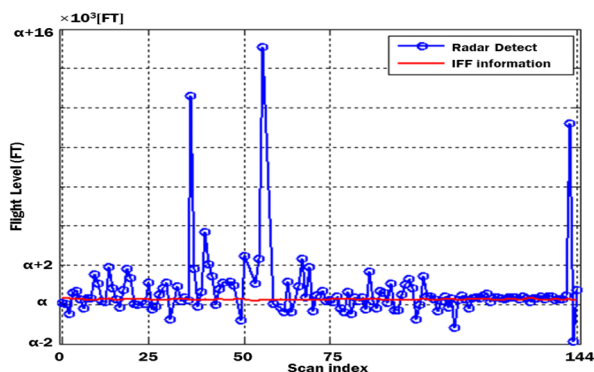
Fig. 5. The distribution chart of detected flight level error.

일반 모노펄스 방식에 비하여 squinted sum beam 모노펄스 방식을 적용한 고도 오차 분포가 항공기 응답기 기준고도와의 오프셋 차이와 산포가 안정적임을 확인할 수 있다.

그림 6은 평균 레이다 단면적(radar cross section) m^2 의 크기의 시험용 표적기에 대한 탐지 시험 결과로 범례에서 탐지 고도 정보에서 일부 큰 고도 오차는 다중경로에 의해 해당 고도를 탐지하는 레이다 빔이 미 탐지하고, 한 단계 높은 고각 탐지 빔에서 표적을 탐지하여 나타나는 현상이다. 해당되는 정보를 제외한 히스토그램에서 안정적인 고도 오차를 확인할 수 있다.



(a) 시험 표적기 탐지 고도 정보(일반 모노펄스)
(a) The detected flight level for a test airplane(normal monopulse)



(b) 시험 표적기 탐지 고도 정보(squinted sum beam)
(b) The detected flight level for a test airplane(squinted sum beam)

그림 6. 시험 표적기 탐지시험 결과

Fig. 6. The result of detection test using a test airplane.

그림 6(a)의 고도탐지 정보는 실제 비행고도 대비 하방으로 탐지된 반면, squinted sum beam 방식이 적용된 그림 6(b)는 실 비행고도를 중앙으로 산포가 형성됨을 확인할 수 있다. 실 비행시험을 통한 정확도 분석 결과, squinted sum beam 방식이 일반 모노펄스 대비 약 600 Ft 수준 개선됨을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다중경로 효과에 의해 나타나는 레이다의 각도 오차를 줄이기 위한 squinted sum beam 방식을 시뮬레이션과 적용 시험을 통해 검증하였다. 그 결과로 다중경로 효과가 빈번히 발생될 수 있는 환경에 설치된 레이다에 대하여 squinted sum beam 모노펄스 방식을 적용하여 고각 오차개선을 통한 탐지 고도 오차 개선효과를 확인 검증하였다. 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라와 같이 다중경로에 취약한 환경에 설치된 장비군에 squinted sum beam 모노펄스 처리방식을 적용하여 탐지정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, New York, NY, McGraw-Hill, 1990.
- [2] S. E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1987.
- [3] Y. W. Kim, J. M. Lee, H. Chae, H. S. Jin, and J. Park, "An analysis on the degradation of elevation angle accuracy due to the multi-path effect using a phased array antenna and the beam pattern optimization to minimize its degradation," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 12, pp. 1036-1043, Dec. 2016.
- [4] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Boca Raton, FL, CRC Press, 2016.
- [5] S. M. Shreman, *Monopulse Principles and Techniques*, Norwood, MA, Artech House, 1984.
- [6] D. K. Barton, S. A. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia*, Boston, MA, Artech House, 1997.

권 용 옥 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0850-4954>



2008년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 12월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 레이더, 능동 위상 배열 시스템 등

유 우 성 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4840-8262>



2003년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 10월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 능동 위상 배열 시스템

신 동 기 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5466-7298>



2018년 2월: 금오공과대학교 전자공학부 (공학사)
2020년 9월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학석사)
2020년 6월~현재: LIG넥스원 연구원
[주 관심분야] 안테나, 레이더, 능동 위상 배열 시스템 등

장 현 순 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7591-6094>



1996년 2월: 강원대학교 전자공학과 (공학사)
2013년 9월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 6월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 레이더, 능동 위상 배열 시스템 등

김 성 균 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9810-7070>



2012년 8월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2012년 7월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 자동제어, 디지털 신호 처리 등