

위상배열 안테나를 활용한 다중 경로 효과에 의한 고각 정확도 열화 분석 및 열화 최소화를 위한 빔 패턴 최적화

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

김영완 · 이재민 · 채희덕 · 진형석 · 박종국

Young-Wan Kim · JaeMin Lee · Heeduck Chae · Hyung-suk Jin · Jongkuk Park

요 약

본 논문에서는 위상배열 안테나를 활용해 다중 경로 효과에 의한 공항정밀접근레이다의 고각 정확도 열화에 관하여 분석을 수행하였다. 공항의 활주로 주변에 설치되는 정밀접근레이다는 고정 환경인 활주로면의 영향을 지속적으로 받게 된다. 본 논문에서는 활주로면에 의한 다중 경로 효과에 따른 정밀접근레이다 고각 정확도 열화에 관하여, 배열 안테나의 합/차 패턴 분석 및 이를 통한 모노펄스 기울기를 계산하여 분석하였다. 또한, 본 논문에서는 이러한 고각 정확도 열화를 최소화하기 위해 모노펄스용 차 패턴을 고각 정확도 개선에 적합한 형태로 최적화하였다. 최종적으로 최적화된 배열 안테나 차 패턴을 적용한 후 지면 반사 영향성이 고려된 모노펄스 기울기를 계산하여 고각 정확도 개선 정도를 확인하였다.

Abstract

In this paper, an analysis about the elevation angle accuracy degradation of an APAR(Airport Precision Approach Radar) due to the multi-path effect using a phased array antenna was performed. An APAR installed around a runway of airport will be continuously affected in a runway surface of the fixed environment. In this paper, an analysis about the elevation angle accuracy degradation of APAR due to the multi-path effect of runway surface was conducted through a calculation of monopulse slope and sum/difference beam pattern analysis of array antenna. Also, a difference pattern for monopulse to minimize this degradation was optimized in an appropriate configuration to improve a elevation angle accuracy. Finally, a degree of improvement of elevation angle accuracy was confirmed by calculating a monopulse slope including the ground reflection after applying optimized difference patterns of array antenna.

Key words: Multi-Path Effect, Elevation Angle Accuracy, Difference Beam Pattern

I. 서 론

레이다는 다양한 운용 조건에 따라 설치 환경의 영향

을 받으며 동작한다. 일반적으로 지상 고정형 레이다를 운용하는 경우에 저고도 표적은 지면 간섭에 의한 영향을 상대적으로 많이 받게 되며, 특히 공항에 설치되어 항

「본 과제는 방위사업청의 지원으로 수행되었음.」

LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received August 22, 2016 ; Revised September 19, 2016 ; Accepted December 9, 2016. (ID No. 20160822-091)

· Corresponding Author: Jongkuk Park (e-mail: jongkukpark@lignex1.com)

공기를 유도하는 공항정밀근접레이다는 공항 주위의 넓은 활주로에 의한 영향성이 커질 수밖에 없다. 지면 반사에 의한 성능 저하는 다양한 관점에서 발생할 수 있다. 특히 공항정밀근접레이다의 고각 정확도 감소는 항공기의 이착륙 유도 과정에서의 오차를 유발해 항공 사고를 유발할 가능성이 커지게 된다. 이러한 고각 정확도의 감소를 최소화하기 위해 신호처리 관점에서 저고도 표적에서 발생하는 다중 경로 전파 및 레이더 신호 발생 모델링에 대해 기술하고, 반사 상황에서 효과적으로 표적 고도를 추출하기 위한 *nelder-mead simplex multipath reduction(NM-SMR)* 기법을 사용하기도 한다^[1]. 또한 해상 환경에 설치되는 레이더의 경우도 해면 반사에 의한 다중 경로 영향을 받는다^[2]. 해면 반사에 의한 다중 경로 현상은 선박에 고정된 레이더에서 해상레이다로의 직선경로 신호와 수면에 의해 반사된 신호가 합쳐져서 발생하며, 이는 선박과 지상레이다의 거리 및 주파수, 해면 상태 등 다양한 요인에 의해 신호의 크기가 바뀌게 된다. 지면 반사의 경우는 주기적으로 해면 상태가 변하는 해상 환경보다 고정된 지면에 의해 지속적으로 레이더에 영향을 미치게 되며, 반사되는 성분은 반사각 및 지면 반사계수에 의해 신호의 크기와 위상이 바뀌므로 특정 구역에서 신호의 왜곡이 심해질 수 있다. 이렇듯 지면 및 해수면에 의한 다중 경로 효과에 의해 레이더는 원래 예상했던 것보다 다양한 측면에서 열화된 성능을 나타내게 된다. 이를 극복하기 위해 고속 스캔 MTI 펄스 레이더의 경우, 지형 클러스터를 제거하기 위해 신호 처리 파라미터 값(MTI 필터 단수, CFAR의 K-factor 및 offset 값)을 조정하며, 기상레이더의 경우 간단한 위상배열 안테나를 활용하여 급전 계수를 적응적으로 최적화하여 부엽을 최소화시킴으로써 환경 변화에 따른 적응형 클러스터를 제거하기도 한다^{[3][4]}. 하지만, 디지털 빔형성 기법과 달리 위상배열 안테나의 합/차 패턴이 급전기에 종속되어 고정되는 아날로그 빔형성 레이더의 경우 이러한 적응형을 실시간으로 적용하기 힘들며, 급전기를 통해 빔이 형성된 후, 신호처리 기법만으로 지면 반사에 의한 클러스터를 완벽하게 제거하기에는 클러스터 영향성을 최소화하는데 제한이 있을 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 신호 처리 기법을 적용하기 전 급전기를 통한 배열안테나 빔 형성 단계에서 고각 정확

도 관점의 성능 열화 정도를 예측하여 성능 개선을 수행하였다. 이를 위해 레이더에 적용할 배열 안테나 합/차 패턴을 이용한 모노펄스 기율기 시뮬레이션을 비교하고, 지면 반사 영향성을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 모노펄스 기율기를 결정하는 안테나 합/차 패턴 중 정확도 개선에 필요한 모노펄스용 차 패턴의 성능 최적화를 수행하였다. 최종적으로 최적화된 빔 패턴에 지면 반사 현상을 적용한 후 모노펄스 기율기를 계산하여 비교함으로써 신호 처리 이전 배열 안테나의 빔 패턴상에서의 성능 개선 여부를 확인하였으며, 급전기 제작을 통해 실제 최적화된 패턴을 구현하였다.

II. 본 론

2-1 다중 경로 효과 개요

서론에서 언급한 다중 경로 효과가 고려된 전체 신호는 실제 레이더와 표적간의 최단 경로로 수신되는 신호 이외에 지면에 의해 반사된 성분의 중첩으로 정해지게 된다. 다중 경로 효과를 분석하기 위해 기본적으로 지면 반사에 의해 신호의 크기 및 위상이 정량적으로 얼마만큼의 영향을 미치는지에 대한 명확한 수식이 필요하다. 그림 1은 표적에서 반사되어 레이더 안테나로 바로 수신되는 직접 성분(direct component)과 그 표적 신호가 지면에 반사되어 레이더 안테나에 수신되는 반사 성분(reflected component)을 나타낸다.

본 논문에서는 무한한 넓이의 지면위에 고각(수직) 방향으로 적층되어 배열을 구성하는 위상배열 안테나의 고

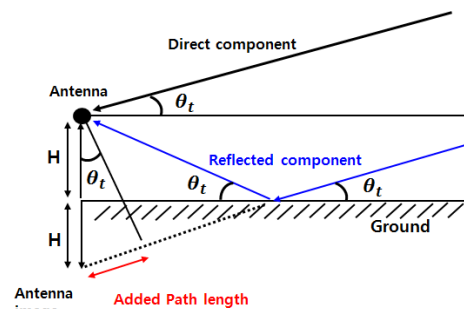


그림 1. 지면 반사 형상
Fig. 1. Ground reflection configuration

각 방향 빔패턴을 모사하여 지면 반사에 의한 빔패턴의 왜곡 현상을 모사하였다. 그림 1의 레이더 배열 안테나는, 실제 원하는 방향 θ_t 에서 들어오는 표적 신호의 직접 성분과 지면 반사에 의해 증가된 경로 차이를 포함한 반사 성분이 중첩된 신호를 수신하게 된다^[5]. 이미지 이론에 근거한 표적 신호의 직접 성분에 비해 증가한 반사 성분의 경로(Added path length : ΔL) 차이는 식 (1)로 표현할 수 있다. 여기서 H 는 지면으로부터 안테나 중심까지의 높이를 나타낸다.

$$\Delta L = 2H\sin\theta_t \quad (1)$$

식 (1)에 규정한 경로차에 의한 위상 변화량 이외에 지면 반사에 의한 안테나의 빔패턴 왜곡 현상을 설명하기 위해서는 지면에 의한 복소 반사량을 수치적으로 고려해야 한다. 본 논문에서 고려한 안테나는 수평편파를 가지므로, 그림 2와 같은 형상으로 지면에 반사되며, 지면에 의한 반사계수는 일반적인 아스팔트 환경을 가정한 지면의 유전율(ϵ_r) 및 도전율(σ)을 이용하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다^[6].

$$\Gamma = \frac{(\epsilon_r - j\chi)\sin\theta_t - \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2\theta_t}}{(\epsilon_r - j\chi)\sin\theta_t + \sqrt{(\epsilon_r - j\chi) - \cos^2\theta_t}}$$

$$\chi = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2)$$

여기서 θ_t 는 입사각/반사각의 크기를 나타내며, 일반적인 지면의 유전율 및 도전율 값은 각각 13, 0.005을 가정하였다. 식 (2)를 통해 입사각에 따른 반사 계수를 예측할 수 있으며, 이 값을 통해 지면 반사에 의한 크기의 변화를 계

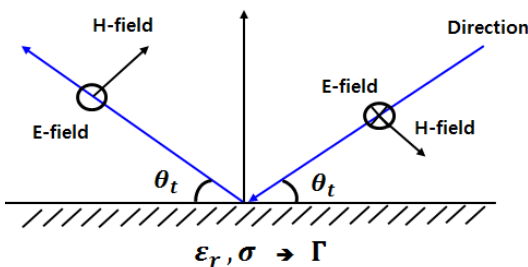


그림 2. 지면 반사 계수
Fig. 2. Ground reflection coefficient.

표 1. 시뮬레이션 빔 파라미터

Table 1. Simulation beam parameter.

배열갯수	128
배열간격	0.7λ
급전계수	Taylor 35 dB
주파수	X

산하고, 그림 1에서 보여진 지연된 경로 만큼의 위상 변화를 적용하면 지면 반사에 의한 성분이 예측될 수 있다. 이때 반사계수는 완전 도체의 반사계수인 -1 에 근접한 값을 가지게 되며, 결국 반사 성분에 의한 수신 신호의 왜곡이 커질 것으로 예상할 수 있다.

앞서 설명한 반사 성분에 의한 패턴 영향을 설명하기 위해 이미지 이론을 통해 확인한 경로 증가분 및 지면의 유전을 및 도전율에 의한 반사계수를 적용한 반사 성분에 의한 복소 패턴 변화를 식 (3)에 나타내었다. 시뮬레이션은 표 1에서 나타낸 파라미터를 이용한 저부엽 빔을 가정하여 분석을 수행하였다. 식 (3)의 P_{dir} 는 지면 반사가 없는 상태에서의 자유공간의 복소 패턴이며, $P_{ref}(\theta) \cdot \Gamma \cdot e^{-jk_0\Delta L}$ 은 지면 반사에 의한 영향과 경로차가 반영된 등가 복소 패턴을 나타낸다. Γ 는 식 (2)에서 정의된 지면 반사 계수를 나타내며, k_0 는 자유 공간 상의 전파 상수이다.

$$P_{total} = P_{dir}(\theta) + P_{ref}(\theta) \cdot \Gamma \cdot e^{-jk_0\Delta L} \quad (3)$$

Γ : 지면반사계수, k_0 : 전파 상수

최종적으로 식 (3)의 P_{total} 은 두 성분을 중첩한 지면 반사에 의해 수신된 왜곡된 빔 패턴을 나타내게 된다.

그림 3은 앞에서 설명한 직접 성분 및 반사 성분을 지면 반사를 고려하여 개념상으로 표현하고 있다. 그림 3의 빔패턴은 표 1의 파라미터를 배열합성 이론에 근거한 matlab 시뮬레이션을 통해 얻은 빔패턴이다. 즉, 공항정밀 근접 레이더에 적용할 배열 안테나의 빔패턴을 시뮬레이션한 패턴이다. 그림 3(a)는 그림 1의 직접 성분을 나타내며, 3(b)는 반사 성분을 나타낸다. (b)는 (a)의 성분 중 지면($\theta_t=0$) 아래 패턴(P_{ref})을 이미지 이론을 적용하여 반전시킨 성분으로 식 (2)를 통해 계산할 수 있는 지

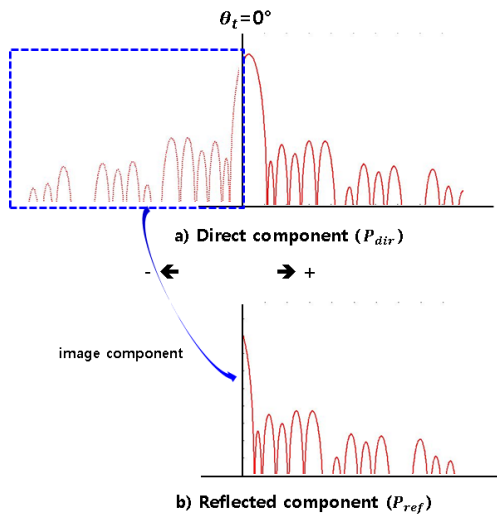


그림 3. Direct/reflected component 시뮬레이션
Fig. 3. Direct/reflected component simulation.

면의 반사계수(Γ)와 지연된 경로차이 만큼의 위상 지연 ($e^{-jk_0\Delta L}$)이 합쳐져 지면 반사에 의한 성분을 모사할 수 있다.

2-2 다중 경로 효과에 따른 패턴 왜곡 시뮬레이션

본 논문에서는 식 (3)을 이용한 matlab 시뮬레이션을 통해 레이다 안테나의 고각 빔조향에 따른 패턴 왜곡 정도를 살펴보았다. 식 (3)의 반사 성분이 합쳐진 패턴은 그림 4와 같이 본래 패턴에서 왜곡을 발생시키게 된다. 부엽 상승뿐 아니라, 주빔 영역에서 반사 성분의 중첩에 의해 패턴이 왜곡되며, 이는 최종적으로 고각 정확도를 결정하는 모노펄스 기울기의 오차를 유발할 것이다. 또한, 빔 조향각이 작아질수록 다시 말해 지면에 빔이 가까울수록 반사된 신호의 크기가 커지게 되고, 패턴의 왜곡 현상이 커짐을 그림 5의 조향된 빔 패턴을 통해 확인할 수 있다.

다음으로는 합 패턴과 함께 모노펄스 기울기를 결정하는 모노펄스용 차 패턴에 대한 왜곡 현상을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 일반적인 배열 안테나의 차 패턴은 magic-T나 ring-hybrid와 같은 모노펄스 비교기를 통하여 구현하게 되는데, 이 경우 차 패턴은 배열 중심에서의 위상 반전으로 인한 진폭의 불연속(discontinuity) 때문에, 빔

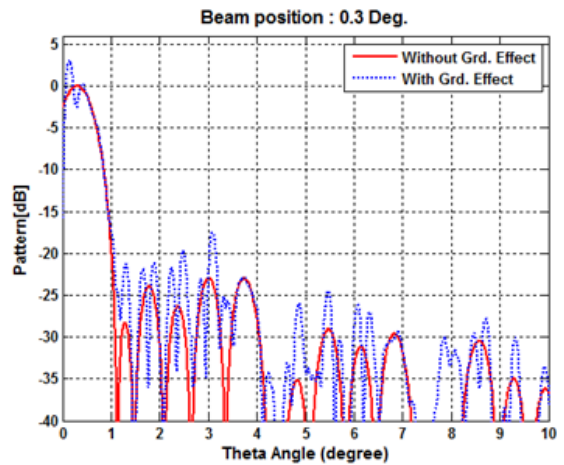


그림 4. 지면 반사에 의한 고각(theta angle) 방향 합 패턴 영향 비교(시뮬레이션)
Fig. 4. Effect comparison of the elevation sum pattern due to the ground reflection(simulation).

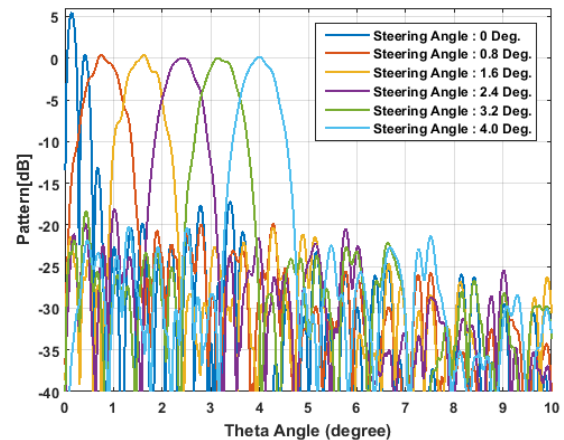


그림 5. 고각(theta angle) 빔 조향각에 따른 패턴 왜곡 분석(시뮬레이션)
Fig. 5. Distortion analysis of pattern due to the elevation beam steering angle(simulation).

폭이 넓고 부엽 수준이 높은 빔이 형성된다. 이러한 경우, 그림 6에서 보는 것처럼 합 패턴이 비교적 왜곡되지 않는 조향각에서도 지면 반사에 의해 고각 차 패턴의 널 위치 및 상하 첨두치의 균형이 크게 왜곡됨을 확인하였다.

그림 7에서는 앞서 시뮬레이션을 통해 확인한 합/차 패턴의 왜곡에 의한 모노펄스 기울기의 열화 정도를 나타내었다. 모노펄스 기울기는 레이다에서 각도 정확도를 높

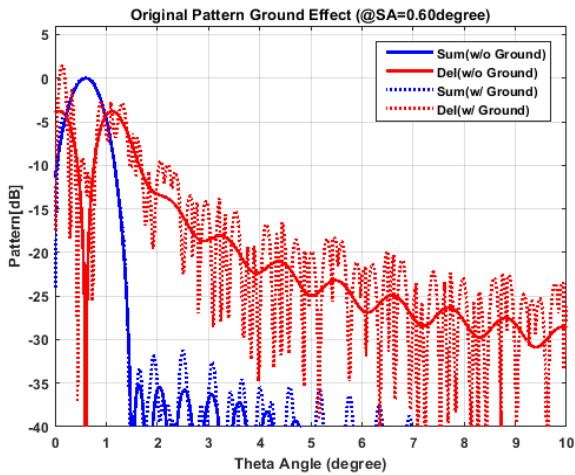


그림 6. 지면 반사에 의한 기존 패턴 영향성(시뮬레이션)
 Fig. 6. Original pattern effect due to the ground reflection (simulation).

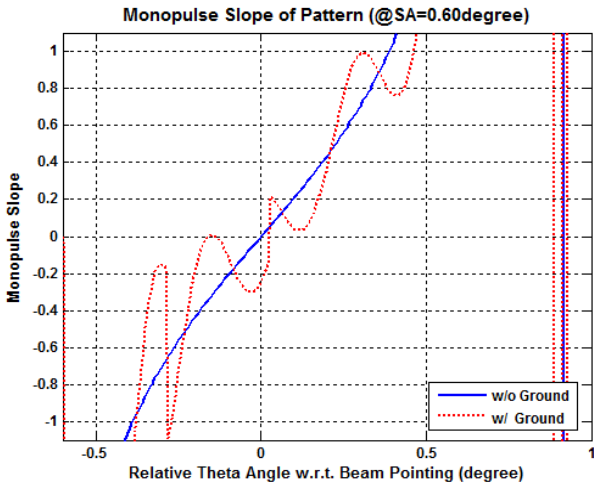


그림 7. 지면 반사에 의한 모노펄스 기울기 영향성(시뮬레이션)
 Fig. 7. Mono-pulse effect due to the ground reflection(simulation).

이기 위해 안테나 각도별 합/차 패턴의 비율로 표현되는 값으로 그림 7에서 보는 바와 같이, 지면 반사를 고려한 모노펄스 기울기는 빔폭 내 각도별로 이상적인 값과 차이가 발생하며, 각도별 차이만큼 고각 정확도에서의 오차를 발생시켜 성능을 열화시킬 것으로 판단된다.

2-3 다중 경로 효과에 의한 패턴 왜곡 개선 시뮬레이션 및 제작 결과

본 논문에서는 이러한 고각 정확도의 성능 열화를 빔 설계 단계에서 개선할 수 있는 방안으로 모노펄스용 차 패턴의 최적화를 수행하였다. 합 패턴은 저부엽을 형성할 수 있는 이상적인 테일러 급전계수를 유지하며, 동시에 차 패턴도 저부엽을 형성할 수 있는 베일리스 분포에 최대한 유사하게 급전계수를 형성할 수 있도록 최적화를 진행하였다⁷⁾. 최적화된 차패턴 급전계수의 결과는 그림 8과 같으며, 전체 128개 배열소자는 8개의 모노펄스 비교기를 통해 합/차 신호로 분기되어 합 패턴의 경우 균등 결합기로 기존 테일러 분포를 그대로 사용하였으며, 차 패턴의 경우 비균등 결합기의 결합비를 조절하여 베일리스 분포와 유사한 급전계수를 추출하여 저부엽을 형성하였다. 본 논문에서는 하나의 급전모듈에서 동시에 저부엽의 합/차 패턴을 구성하였으며, 제한된 공간상에서 최소한의 모노펄스 비교기 및 결합기를 사용하여 원하는 차 패턴의 부엽을 얻을 수 있었다.

그림 8에서 추출한 급전 계수를 적용한 차 패턴 결과를 그림 9에서 나타내었다. 처음 시뮬레이션 한 차 패턴과 비교하여 -25 dB 이하의 부엽을 형성하며, 빔폭도 상대적으로 좁아진 패턴을 확인하였다. 결과적으로 합/차 패턴이 동시에 저부엽 특성을 가지게 됨으로써, 동일한 조향각에서 지면 반사에 의한 모노펄스 기울기의 왜곡을

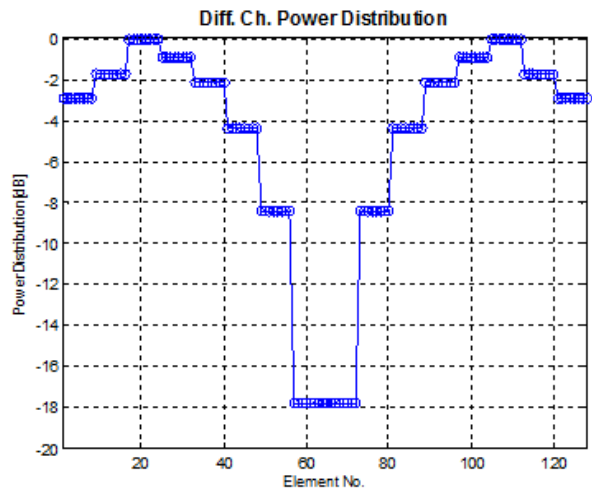


그림 8. 최적화된 차패턴 급전 계수(시뮬레이션)
 Fig. 8. Feeding coefficient of the optimized difference pattern(simulation).

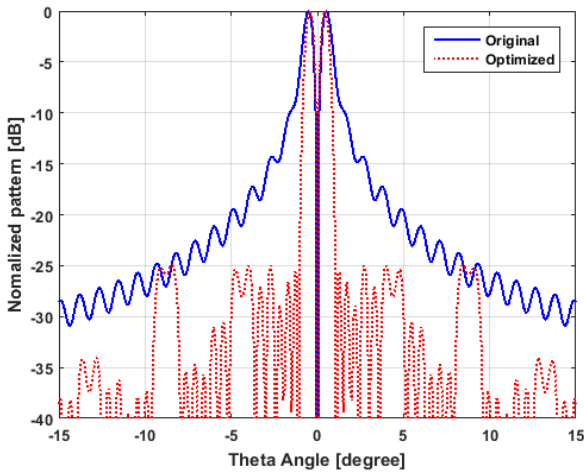


그림 9. 최적화된 차패턴 비교(-15°~15°)(시뮬레이션)
 Fig. 9. Optimized difference pattern comparison(-15°~15°)(simulation).

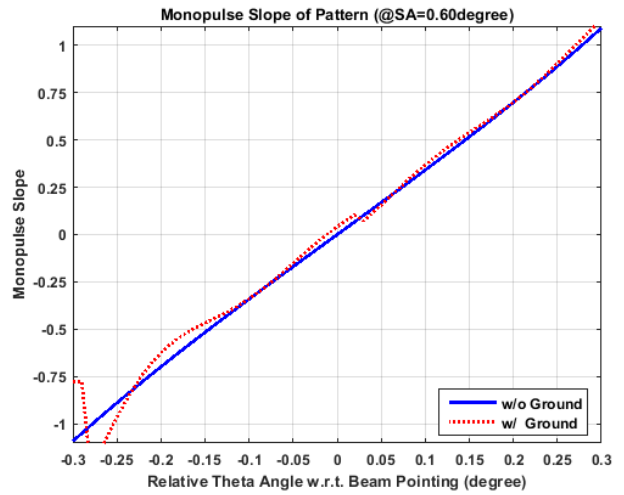


그림 11. 최적화된 차 패턴 적용 후 모노펄스 기울기(시뮬레이션)
 Fig. 11. Mono-pulse slope after applying the optimized difference pattern(simulation).

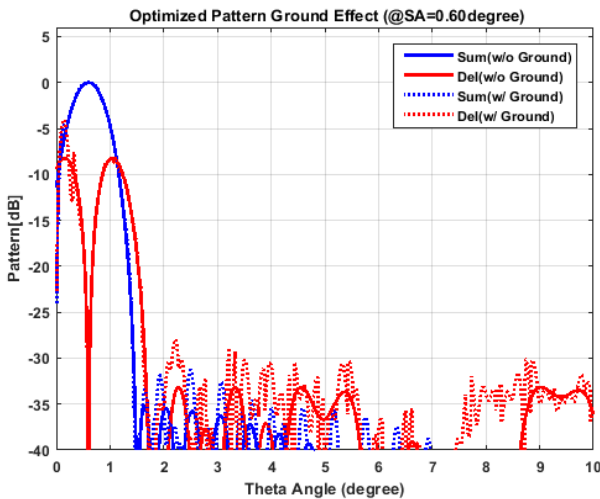


그림 10. 지면 반사에 의한 최적화된 합/차 패턴의 영향성 분석(시뮬레이션)
 Fig. 10. Effect analysis of the optimized sum/difference due to the ground reflection(simulation).

감소시키는 효과를 얻을 수 있다.

이를 확인하기 위해, 그림 10과 11에서 최적화된 차 패턴을 적용한 지면 반사 영향성 분석 결과를 나타내었다. 그림 6, 7의 결과와 비교하여 보면, 모노펄스용 차 패턴의 주빔 및 부엽에서의 왜곡, 즉 반사 성분에 의한 간섭 영향성이 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 고각 정확도를 결정하는 모노펄스 기울기에 대한 빔폭 내 각도별 오차가

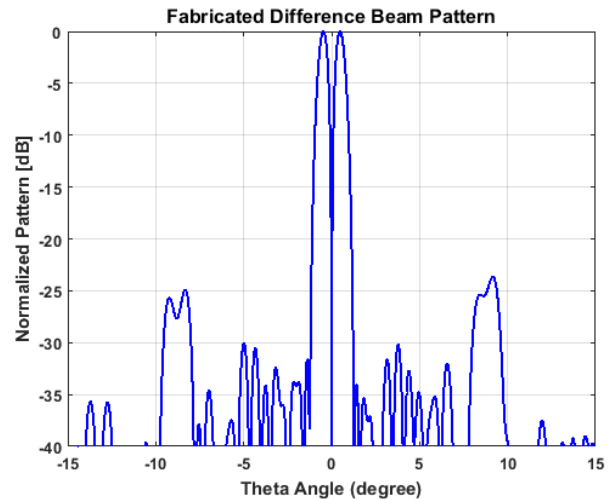


그림 12. 차패턴 측정 결과
 Fig. 12. Measurement result of the difference pattern.

현저히 감소하여, 기존 방안 대비 개선된 결과를 보여준다. 비록 지면 근처의 모든 빔 조향각 별 모노펄스 기울기에서의 성능 개선이 이루어지지는 않았지만, 기존 방안 대비 상대적으로 현저히 작은 조향각까지 고각 정확도를 개선할 수 있었으며, 이러한 성능 개선으로 정밀접근레이다를 통한 항공기 이착륙 유도 시 정확도 및 안정성을 향상시킬 수 있다.

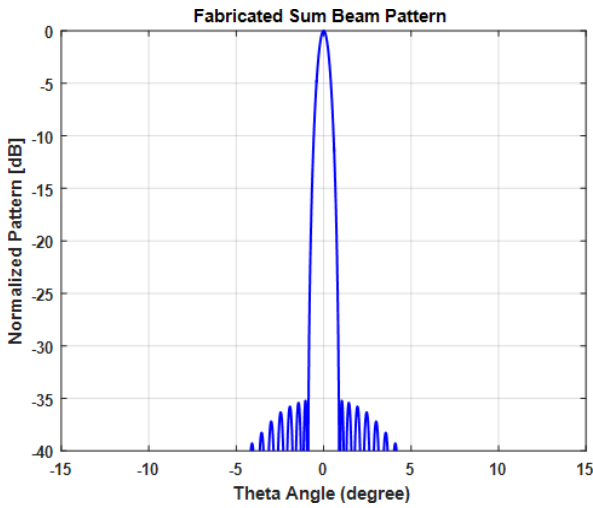


그림 13. 합패턴 측정 결과
Fig. 13. Measurement result of the sum pattern.

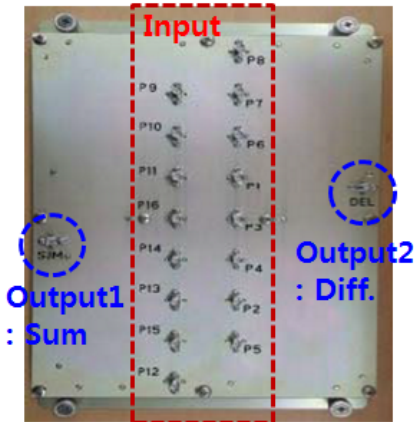


그림 14. 급전 모듈 제작 형상
Fig. 14. Feeding module fabrication configuration.

그림 13은 본 논문에서 고각 정확도의 향상을 위해 최적화를 수행한 모노펄스용 차 패턴의 실제 구현된 결과를 보여준다. 그림 14는 최적화된 차패턴을 구현하기 위한 급전 모듈의 제작형상을 보여준다. 128개의 배열소자는 반도체 송수신기를 거쳐 16개의 균일 결합기를 통해 급전 모듈로 신호가 인가되고, 급전 모듈내에 8개의 모노펄스 비교기 및 비균등 결합기를 구현하여 급전모듈에서 합, 차 2개의 신호가 나오게 된다. 시뮬레이션에서 확인한 것처럼 측정 결과 저부엽의 차 패턴을 형성할 수 있음을 제작을 통해 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 다중 경로 효과에 의한 공항정밀접근레이다의 고각 정확도 성능 열화 현상을 분석하였다. 배열 안테나 합/차 빔 패턴의 모노펄스 기율기를 계산하여 고각 정확도의 성능 열화 현상을 확인하였으며, 이러한 성능 열화를 최소화 시킬 수 있는 모노펄스용 차 패턴의 최적화를 수행하였다. 최적화된 차패턴의 성능 개선은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 기존 방안과 비교하였으며, 최종적으로 제작을 통해 최적화의 유효성을 확인하였다. 본 논문에서 구현한 모노펄스용 차 패턴은 지면 반사에 의한 성능 열화를 안테나 빔 형성 단계에서 최소화 시킬 수 있는 방안으로써 넓은 활주로에서 운용되는 공항정밀접근레이다의 고각 정확도 성능 열화 개선에 효과가 있었다. 이러한 성능 개선으로 정밀접근레이다의 항공기 이착륙 유도 시 정확도 및 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] 정명수, 홍동희, 박동철, "다중 경로 환경 상태에서 다중 빔 탐색 레이더의 표적 고도 추출", 한국전자과학기술논문지, 18(10), 1203-1210, 2007년.
- [2] Yong Yang, De-jun Feng, Xue-song Wang, and Shunping Xiao, "Effect of k distributed sea clutter and multipath on radar detection of low altitude sea surface targets", *IET Journals & Magazines*, pp. 757-766, 2014.
- [3] 김종건, 장현순, "고속 스캔 MTI 펄스 레이더의 지형 클러터 제거 능력 최적화에 관한 연구", 한국전자과학기술논문지 20(10), 1077-1083, p. 7, 2009년.
- [4] 이종길, "위상배열 안테나를 활용한 기상 레이더 시스템에서의 클러터 제거에 관한 연구", 한국전자과학기술논문지 12(7), 1173-1179, p. 7, 2008년.
- [5] Lamont V. Blake, *Radar Range-Performance Analysis*, Artech House, Inc., 1986.
- [6] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [7] E. T. Bayliss, "Design of monopulse antenna difference patterns with low sidelobes", *Alcatel-Lucent Journal*, vol. 47, pp. 623-650, 1968.

김 영 완



2005년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
 2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년 2월~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계

진 형 석



2000년 8월: 광운대학교 전파공학 전공 (공학석사)
 2000년 8월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계/ 능동 위상 배열 레이더 시스템 및 TRM

이 재 민



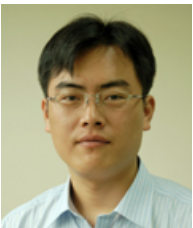
2011년 2월: 경기대학교 전자공학부 (공학사)
 2013년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2013년 2월~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계

박 중 국



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2001년 8월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

채 희 덕



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2007년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석