

합/차/부엽 억제 채널을 갖는 모노펄스 보조 감시 레이더(용) 안테나

Monopulse Secondary Surveillance Radar Antenna with Sum/Difference/SLS Channels

최종환 · 채희덕 · 박종국 · 나형기

Jong-Hwan Choi · Hee-Duck Chae · Jongkuk Park · Hyung-Gi Na

요 약

본 논문에서는 레이더 표적의 피아 식별을 위해 일반적으로 사용되는 모노펄스 보조 감시 레이더용 안테나의 개발 방안 및 결과를 제시하였다. 개발된 안테나는 수동 선형 배열 안테나로서 횡급전기와 다수의 배열 소자로 구성된다. 횡급전기는 포트별로 전력 및 위상비가 최적화된 합, 차 및 부엽 억제 채널을 제공하며, 19개의 배열 소자와 1개의 후방 배열 소자와 연결되어 방위각 방향으로 빔 패턴을 형성한다. 합 채널 빔 패턴의 방위각 최대 부엽 수준은 -20 dBc 이하이며, 부엽 억제 채널 빔 패턴은 합 채널 빔 패턴의 주 빔 이외의 전 영역에서 부엽을 없도록 한다. 그리고 차 채널 빔 패턴은 방위각 방향의 탐지 정확도를 높이기 위한 모노펄스 기능에 사용된다. 한편, 배열 소자는 고각 방향으로 성형 빔(shaped-beam)을 형성하여 지면으로부터의 강한 클러터 영향 및 다중경로 효과를 억제할 수 있도록 하였다. 개발된 안테나는 산관계수 측정 및 원진계 빔 패턴 시험을 통해 주어진 개발 규격을 모두 잘 만족하는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, development of the monopulse secondary surveillance radar antenna which can be used for IFF system is presented. This antenna that is passive linear array is comprised of the row-feeder and several array-elements. The row-feeder provides sum, different and SLS(Sidelobe Suppression) channels which are optimized the distribution of the power and phase ratio. The azimuthal sidelobe level of the sum channel beam pattern is -20 dBc or less. The SLS channel covers the sidelobe of the sum-channel in the whole azimuth angle range. And the difference channel is used to perform the mono-pulse function, improves the detection accuracy in the azimuth direction. Meanwhile, the array-element makes shaped beam in the elevation angle, in order to eliminate the clutter and multipath effects from the ground. Performance of the antenna developed is verified by the measurement of S-parameters and far-field beam pattern, and satisfies all of the development specifications well.

Key words : Passive Array Antenna, SSR Antenna, IFF Antenna, Side-lobe Suppression

I. 서 론

일반적으로 표적의 피아 식별을 위한 보조 감시 모노펄스 레이더(MSSR: Monopulse Secondary Sur-

「본 과제는 방위사업청의 지원으로 수행되었음.」

(주)LIG 넥스원(LIG Nex1)

· 논문 번호 : 20110516-041

· 교신저자 : 박종국(e-mail : jongkuk.park@lignex1.com)

· 수정완료일자 : 2011년 6월 20일

veillance Radar)는 방위각 방향으로 모노펄스 기능을 위한 합/차 채널과 합 채널의 부엽을 차단하기 위한 부엽 억제(SLS: Side-Lobe Suppression) 채널을 형성하며, 고각 방향으로서는 지면 클러터 영향 및 다중경로 효과를 방지하며 요구되는 탐지 영역에 최적화된 shaped beam을 형성할 수 있는 LVA(Large Vertical Array) 방식의 안테나를 많이 사용한다.^[1]

하지만 국내 배열 안테나 설계/제작 기술의 비약적인 발전과 최고 기술 수준에도 불구하고, 최근까지 국내에서 사용되고 있는 모노펄스 보조 감시 레이더용 안테나(MSSRA)는 대부분 도입에 의존하고 있는 실정이었다. 본 논문에서는 이와 같이 특정 목적의 주 레이더(primary surveillance radar)와 함께 운용되며, 피아 식별을 위해 사용되는 보조 감시 레이더용 안테나를 국내 개발하여 주어진 개발 규격을 잘 만족시켰음을 보이고자 한다.

II. 본 론

2-1 MSSRA 개발 규격

주어진 MSSRA의 주요 개발 규격은 아래의 표 1과 같다.

합 채널 빔 패턴은 MSSR의 표적 탐지를 위한 주

표 1. MSSRA 개발 규격
Table 1. Development specifications of MSSRA.

항목		개발 규격
안테나 이득		20 dBi 이상
방위각	합 채널 빔 패턴	최대 부엽 수준 -20 dBc 이하
	차 채널 빔 패턴	합 패턴과의 교차점 -3.7±0.5 dBc
		영점 깊이
부엽 억제 채널 빔 패턴	부엽 억제 패턴 조건	합 패턴의 부엽이 -30 dB 이상인 영역에서 합 패턴의 부엽보다 높은 수준의 빔 패턴
고각	최대 고각 빔 위치	8°±3°
	반 전력 빔 폭	25.5°±3°
	최대 부엽 수준	-15 dBc 이하
	45° 위치에서의 빔 수준	-25 dBc 이상

채널로서, 최대 탐지 거리를 확보하기 위한 20 dBi 이상의 안테나 이득을 가져야 한다. 그리고 클러터 등에 의한 오탐지를 최소화하기 위해서 방위각 부엽은 -20 dBc 이하로 형성되도록 한다. 차 채널 빔 패턴은 방위각 방향의 모노펄스 기능에 사용된다. 이때 각도 정확도를 위해 -30 dBc 이하의 영점 깊이(null depth)를 갖도록 한다^[2]. 그리고 부엽 억제 채널 빔 패턴은 방위각 방향의 전 영역에서 합 패턴의 부엽보다 높은 수준으로 형성되도록 한다.

한편, 고각 방향으로서는 지면 방향의 빔 감쇄 효과를 높이기 위해 주 빔 아래 방향으로 -15 dBc 이하의 부엽 수준을 가지고, 최대 고각 빔 위치가 수평면을 기준으로 8°±3° 범위 내에 위치해야 한다. 또한, 고각 방향 탐지 영역 확보를 위해 고각 45° 위치에서의 빔 수준이 -25 dBc 이상이 되는 성형 빔(shaped-beam)을 형성해야 한다^{[3],[4]}.

2-2 MSSRA 구성

표 1에서 주어진 개발 규격을 만족시키기 위한 MSSRA는 그림 1과 같이 배열 소자(array element), 후방 배열 소자(back-fill antenna), 횡급전기(row feeder)로 구성되어 있다.

19개의 배열 소자는 MSSRA의 전방 방향의 빔을 방사하는 기능을 하며, 각각의 배열 소자는 최적의 고각 빔 패턴을 형성한다. 후방 배열 소자는 배열 소자와 동일한 구조를 가지며, 안테나의 후방 방향에 빔을 방사하며, 주로 부엽 억제 채널로 사용되어 합 채널의 후엽을 차단하는 역할을 한다. 이와 같은 19개의 배열 소자와 1개의 후방 배열 소자의 개별 빔

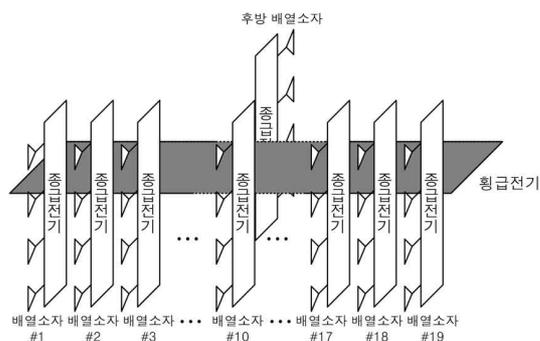


그림 1. MSSRA 구성도
Fig. 1. MSSRA diagram.

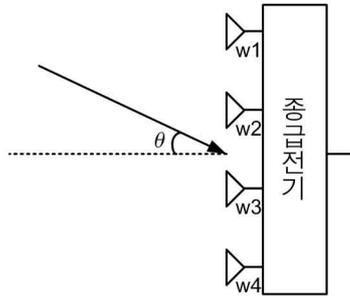


그림 2. 배열 소자 구성도
Fig. 2. Array element diagram.

패턴을 횡급전기를 통해 합성하여 3채널의 빔 패턴을 형성할 수 있다.

2-3 배열 소자(Array Element)

MSSRA의 배열 소자는 그림 2와 같이 4개의 복사 소자와 종급전기로 구성되어 있다.

그림 2의 배열 소자와 같은 수동 선배열 안테나의 빔 패턴은 아래의 파라미터 등에 의해 결정될 수 있다.

- 복사 소자 개별 빔 패턴
- 복사 소자간 거리
- 종급전기 포트별 전력 크기 분포
- 종급전기 포트별 상대 위상 분포

복사 소자는 자유공간으로 빔을 방사하는 역할을 하며, 다이폴 구조로 설계되어 선형 수직 편파의 빔 패턴을 형성한다. 이때 복사 소자 간의 거리는 Grating 로브가 발생하지 않도록 약 0.6 λ로 결정하였다.

종급전기는 복사 소자의 개별 빔 패턴을 특정한 전력 크기 및 위상비로 합성하여 배열 소자의 최종 고각 빔 패턴을 결정한다^[5]. 이러한 종급전기의 분포를 최적화 하는 데는 유전 알고리즘을 사용하였다^[6]. 종급전기의 포트별 전력 크기와 위상을 최적화 변수로 두고, 이에 따라 배열 계수에 의해 계산된 빔 패턴과 빔 패턴 조건과의 차를 비용 함수(cost function)로 설정하여 최적화 과정을 수행하였다. 빔 패턴 조건은 그림 3과 같이 고각 -20° 이하에서는 -18 dB 이하이고, 고각 0°~16° 영역에서 -3 dB 이상의 수준이며, 고각 8°~40° 영역에서는 코시컨트 곡선을 갖도록 설정하였다.

이 방법에 따라 최적화된 종급전기 포트별 가중

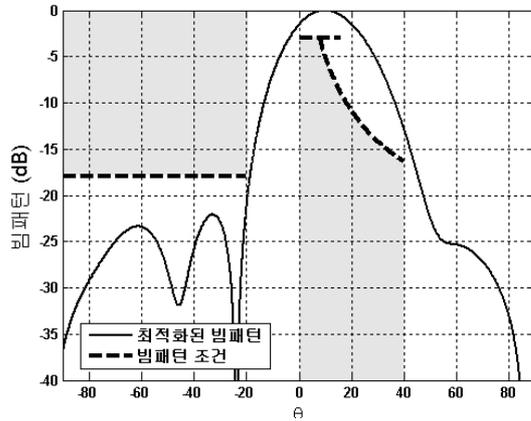


그림 3. 빔 패턴 조건
Fig. 3. Beam-pattern conditions.

표 2. 종급전기 포트별 가중치
Table 2. Weight of column feeder by ports.

가중치	전력 크기비	위상(°)
w ₁	0.2820	0.0000
w ₂	0.7690	16.0029
w ₃	1.0000	47.2641
w ₄	0.7125	98.2550

치는 표 2에 나타나 있으며, 이 값으로 계산된 빔 패턴은 그림 3에서와 같이 빔 패턴 조건을 만족함을 확인할 수 있다.

위의 결과를 바탕으로 종급전기를 설계한 후, 복사 소자를 포함한 모델을 시뮬레이션(CST MWS)하여 빔 패턴을 예측하였다. 이 결과가 최적화된 빔 패턴과 유사함을 확인하고, 최종적으로 배열 소자 1조를 제작하였다. 제작된 배열 소자의 빔 패턴은 원전계 시험으로 검증하였다. 그림 4에는 최적화된 빔 패턴(ideal), 3D 시뮬레이션 빔 패턴(CST MWS), 원전계 측정 빔 패턴(measured)이 나타나 있다.

2-4 횡급전기(Row Feeder)

MSSRA의 방위각 빔 패턴은 횡급전기 각 채널의 포트별 크기 및 위상 분포에 의해 결정된다. 횡급전기는 후방 배열 소자를 포함한 20개 배열 소자의 개별 빔 패턴을 합, 차 및 부엽 억제 채널의 포트별 크기/위상 분포로 합성하여, 3채널의 빔 패턴을 형성한다.^[7]

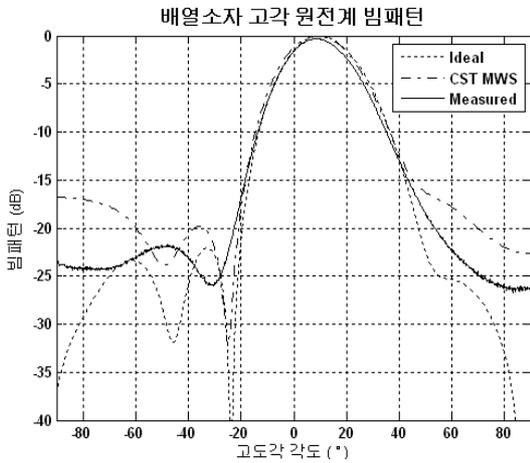


그림 4. 배열 소자 고각 빔 패턴
Fig. 4. Elevation beam-pattern of array element.

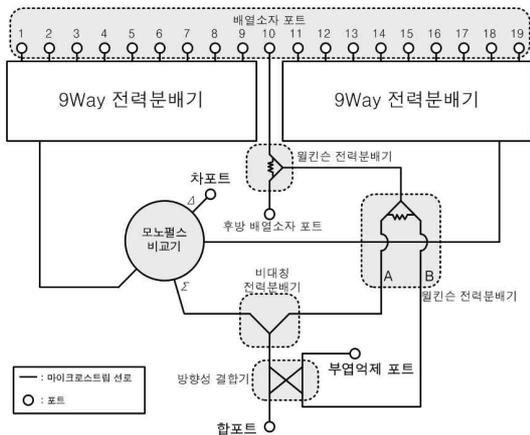


그림 5. 횡급전기 구성도
Fig. 5. Row feeder diagram.

횡급전기는 마이크로스트립 선로로 설계하였으며, 회로의 구성도는 그림 5에 나타나 있다.

19개의 배열 소자와 후방을 덮을 수 있는 후방 배열 소자를 그림 4와 같이 구성한다. 중앙의 배열 소자(10번)는 후방 배열 소자와 합성하여 전방향성의 빔 패턴을 형성할 수 있게 두고, 이 신호를 2개로 분기하여 한 쪽(A)은 합 채널 빔 패턴으로 쓰고, 나머지를 한 쪽(B)은 부엽 억제 채널 빔 패턴을 형성하는 데 사용한다. 중앙의 배열 소자를 제외한 좌측과 우측의 배열 소자들은 각각 9 way 전력 분배기를 활용하여 합성한 후 모노필스 비교기를 활용하여 합/차 채널을 형성한다. 모노필스 비교기를 거친 합신호

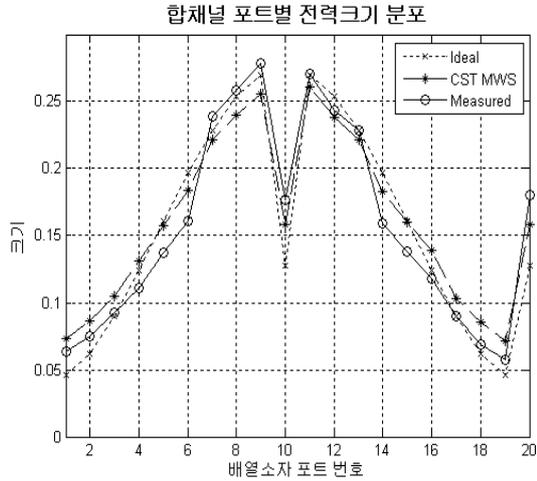
는 전방향 안테나에서 분기된 신호(A)와 합성하여 최종 합 채널을 형성한다. 최종 합 채널과 전방향 안테나 패턴을 방향성 결합기(directional coupler)를 이용하여 최적화된 부엽 억제 빔 패턴을 형성하도록 한다. 이때 합 채널 출력과 전방향 안테나 패턴을 합성할 때, 전체 위상 지연이 180도 차이가 나게 맞추어 주어야 한다.

위와 같은 구성으로 횡급전기를 설계하여 3D EM Simulation Tool을 통해 검증한 후에, 이 결과를 반영하여 횡급전기를 제작하였다. 횡급전기의 시험은 회로망 분석기로 각 채널의 포트별로 투과 계수를 측정하였다. 각각의 채널별 결과를 그림 6~8에 나타내었다. 그래프에서 Ideal은 설계 목표값이고, CST MWS는 3D 시뮬레이션 결과이며, Measured는 회로망 분석기로 측정된 값을 의미한다.

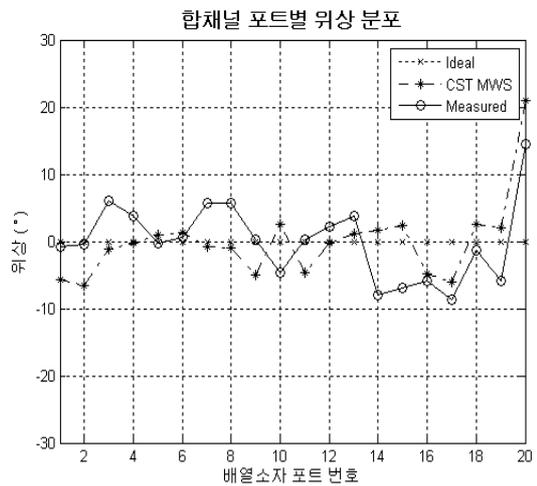
합 채널의 투과 계수 측정 결과는 그림 6과 같다. 여기서 포트 번호 1~19번에는 그림 5에 나타나 있는 MSSRA 전방의 배열 소자가 연결될 것이며, 포트 번호 20번은 후방 배열 소자가 연결될 포트이다. 그림 6(a)는 합 채널의 포트별 전력 분포이다. 일반적으로 선배열 안테나에서는 저부엽 빔을 형성하기 위하여 테일러 분포 등을 사용하는데, MSSRA의 합 채널 전력 분포 역시 10번 포트를 제외하고는 테일러 분포와 유사하게 설계되었다^[8]. 10번과 20번 포트는 부엽 억제 채널에서 주로 사용되기 때문에 동일한 전력 크기를 가지도록 설계되었는데, 합 채널 급전시에 후방 배열 소자로 방사되는 후엽을 억제하면서 -20 dB 이하의 부엽 수준을 가질 수 있도록 적당한 수준으로 설정하였다. 그리고 위상 분포는 그림 6(b)와 같이 포트별로 최대한 동위상에 가깝도록 설계되어 최적화된 빔을 형성할 수 있게 하였다.

차 채널에 대한 시험 결과는 그림 7에 나타나 있다. 차 채널에서 10번과 20번 포트는 격리되어 있기 때문에 사용되지 않는다. 나머지 포트들의 전력 크기는 합 채널과 유사한 분포를 가지며, 위상의 분포는 그림 7(b)에서 나와 있는 것과 같이 포트 10번을 중심으로 좌/우가 180도 위상차를 보이며, 반전되게 하여 차 패턴이 형성될 수 있게 하였다.

부엽 억제 채널의 분포는 그림 8과 같다. 전력 분포의 경우, 10번과 20번 포트를 제외하고는 다른 채널에 비해 낮은 수준의 테일러 분포를 따라 가고 있



(a) 포트별 전력 크기 분포
(a) Distribution of magnitude by ports

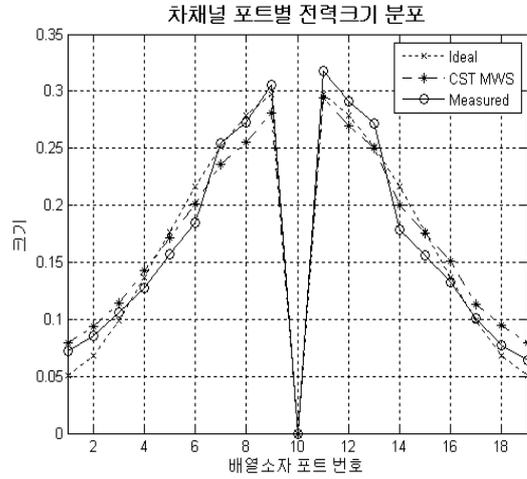


(b) 포트별 위상 분포
(b) Distribution of phase by ports

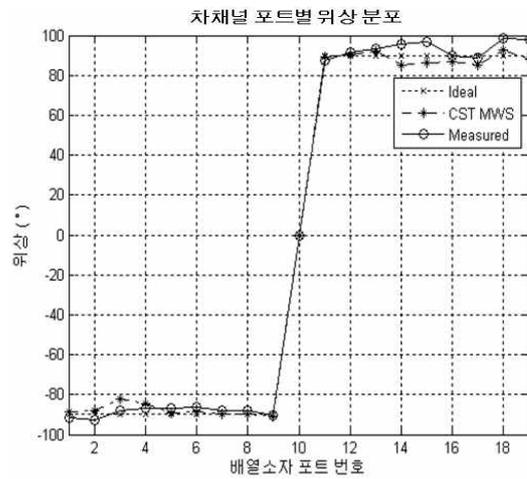
그림 6. 횡급전기 합 채널 시험 결과
Fig. 6. The results of sum channel.

으며, 10, 20번 포트는 주변의 포트들에 비해서 매우 높은 수준의 전력 크기를 갖게 한다. 특히 이 포트들의 위상 분포는 주변의 포트들과 180도 위상차를 나게 만들어 합 채널의 주 빔 부근에서는 낮은 수준을 가지며, 주 빔 이외의 영역에서는 부엽보다 높은 빔 패턴을 형성할 수 있다.

이와 같이 각 채널의 포트별로 측정된 전력/위상 분포와 2-3에서 측정된 배열 소자의 빔 패턴을 아래의 식 (1)에 나타나 있는 배열 계수(array factor) 식으



(a) 포트별 전력 크기 분포
(a) Distribution of magnitude by ports



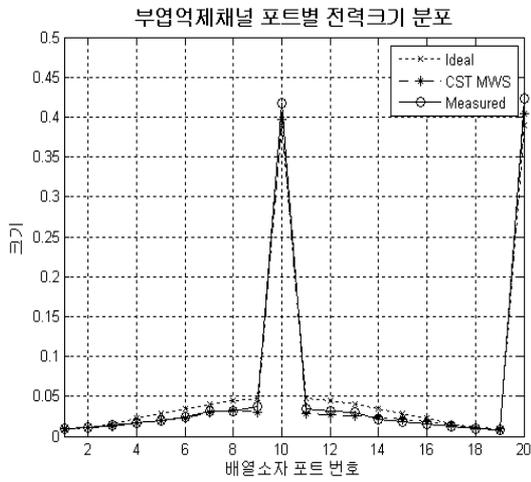
(b) 포트별 위상 분포
(b) Distribution of phase by ports

그림 7. 횡급전기 차 채널 시험 결과
Fig. 7. The results of difference channel.

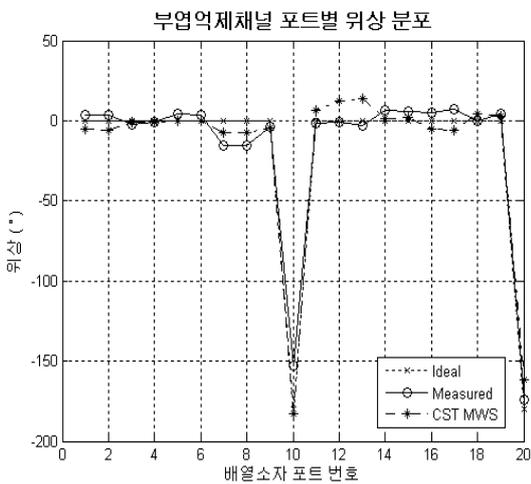
로 합성하면 원전계 빔 패턴 $F_{(\theta, \phi)}^{ch}$ 을 예측해 볼 수 있다.

$$F_{(\theta, \phi)}^{ch} = \sum_{n=1}^{19} (A_n^{ch} e^{-jk_0 X_{p,n} \sin(\phi)} f_{(\theta, \phi)}) + A_{20}^{ch} e^{-jk_0 Z_p \cos(\phi)} f_{(\theta, \phi+180^\circ)} \quad (1)$$

여기서 A_n^{ch} 는 각 채널의 포트별로 급전되는 amplitude이고, $X_{p,n}$ 는 10번 배열 소자에 대한 1~19번 배열 소자의 상대적인 거리, Z_p 는 10번 배열 소자와 후방 배열 소자의 거리를 의미한다. 또한, $f_{(\theta, \phi)}$ 는 배열



(a) 포트별 전력 크기 분포
(a) Distribution of magnitude by ports



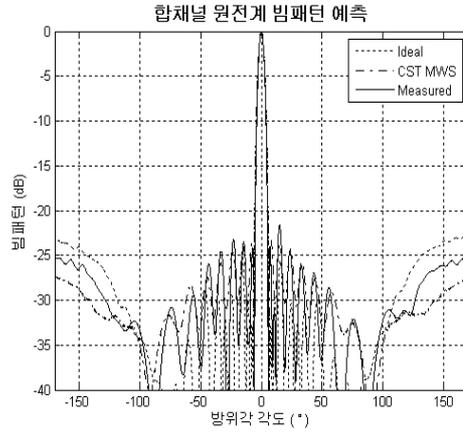
(b) 포트별 위상 분포
(b) Distribution of phase by ports

그림 8. 횡급전기 부엽 억제 채널 시험 결과
Fig. 8. The results of SLS channel of row feeder.

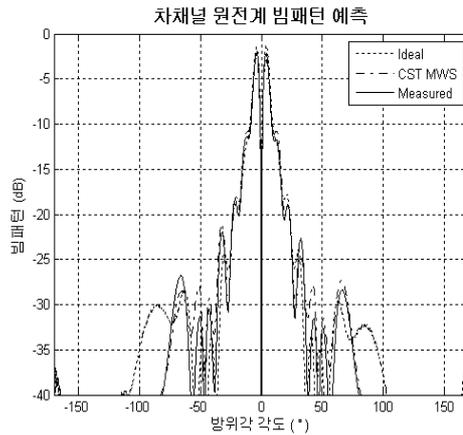
소자의 개별 빔 패턴이다. 위 식에 따라 얻어진 채널별 빔 패턴을 그림 9에 보였다. 그래프의 결과에서 알 수 있듯이 횡급전기의 측정값을 통해 예측되는 채널별 빔 패턴은 설계 분포로 사용된 이상적인 분포로 계산한 결과와 매우 유사한 경향성을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

2-5 MSSRA 시험 결과

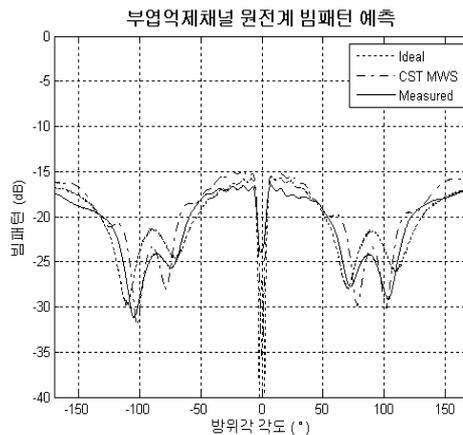
표 3의 과정으로 각 구성품에 대한 검증을 마친 후에 최종적으로 MSSRA를 제작/조립하였다. 제작



(a) 합 채널
(a) Sum channel

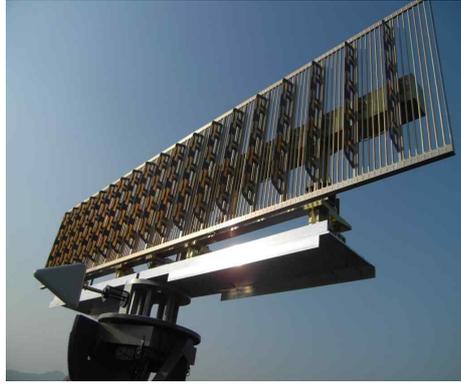


(b) 차 채널
(b) Difference channel

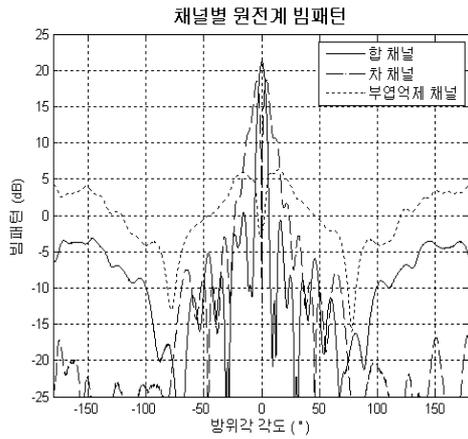


(c) 부엽 억제 채널
(c) SLS channel

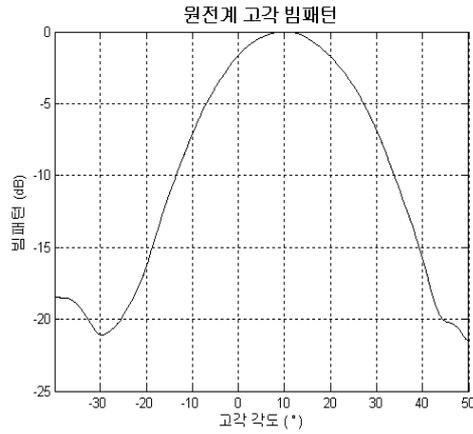
그림 9. 방위각 원전계 빔 패턴 예측
Fig. 9. Expected azimuth far-field pattern.



(a) 원전계 빔 패턴 측정
(a) Far-field pattern measurement



(b) 방위각 원전계 빔 패턴 측정 결과
(b) Measured azimuth far-field pattern



(c) 고각 원전계 빔 패턴 측정 결과
(c) Measured elevation far-field pattern

그림 10. 원전계 빔 패턴 측정 결과
Fig. 10. Measured far-field pattern.

표 3. MSSRA 시험 결과

Table 3. The results of MSSRA measurement.

항목		개발 규격	측정 결과	비고	
방위각	합 패턴	최대 20 dBi 이상	21.2 dBi	만족	
	차 패턴	최대 부엽 수준	-20 dBc 이하	-20.82 dBc	만족
		합 패턴과의 교차점	-3.7±0.5 dBc	-3.23, 3.88 dBc	만족
	부엽 억제 패턴	영점 깊이	-30 dBc 이하	-33.31 dBc	만족
	부엽 억제 패턴 조건	합 패턴의 부엽이 -30 dB 이상인 영역에서 합 패턴의 부엽보다 높은 수준의 빔 패턴	5.8 dB 이상	만족	
고각	최대 고각 빔 위치	8°±3°	10.6°	만족	
	반 전력 빔 폭	25.5°±3°	26.68°	만족	
	최대 부엽 수준	-15 dBc 이하	-18.49 dBc	만족	
	45° 위치에서의 빔 수준	-25 dBc 이상	-20.12 dBc	만족	

된 MSSRA의 성능은 그림 10(a)와 같이 원전계 측정 시설에서 빔 패턴 시험을 통해 검증하였다.

측정된 빔 패턴을 그림 10(b), 10(c)에 나타내었다. 방위각 방향으로는 합 채널 빔 패턴의 부엽 수준은 방위각 방향 전 영역에서 -20 dBc 이하를 유지하며, 차 채널 빔 패턴의 영점 깊이는 -30 dBc 이하로 깊게 형성되어 있다. 또한, 부엽 억제 패턴은 모든 영역에서 합 패턴의 부엽보다 높은 수준을 유지하면서도 주 빔 영역 안에서는 아주 낮은 수준으로 최적화된 것을 확인할 수 있다. 고각 방향의 빔 패턴 시험 결과는 그림 10(c)에 그려진 그래프에 나타나 있다. 안테나가 수평을 바라보고 있을 때 최대 고각 빔이 약 10.6° 에 위치하고 있으며, 지면 방향에서는 큰 기울기로 빔 패턴이 감쇄하여 지면 클러터의 영향을 최소화 한다.

주어진 개발 규격과 이에 대한 측정값은 표 3에서와 같이 모든 항목을 잘 만족함을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 최근 MSSR의 운용에 적합한 안테나의 개발 결과를 기술하였다. 이와 같은 방식의 안테나는 향후에 개발되는 레이더들의 보조 감시 레이더용 안테나로서 일부 수정을 거치면 쉽게 적용이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 외국의 안테나에 근접한 성능을 갖는 안테나를 국산화하여 개발에 성공

했다는 점에서 의의가 크다.

참 고 문 헌

- [1] M. C. Stevens, *Secondary Surveillance Radar*, Artech House, 1988.
- [2] Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, 1993.
- [3] Constantine A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons Inc., 2008.
- [4] F. Ares, "Array pattern synthesis", *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, pp. 5-9, Oct. 1985.
- [5] R. S. Elliott, "Synthesis of shaped line-source antenna beams using pure real distributions", *Electronics Letters*, pp. 280-281, Feb. 1994.
- [6] Randy L. Haupt, *Genetic Algorithms in Electromagnetics*, John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [7] C. G. Pewsey, "An encapsulated dipole shaped beam array for air traffic control", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 3, pp. 1418-1419, 1992.
- [8] A. Villeneuve, "Taylor patterns for discrete arrays", *IEEE Transactions on*, vol. AP-10, pp. 1089-1093, 1984.

최 종 환



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
 2008년 2월~현재: LIG 넥스원 연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 초고주파 수동 회로 설계

채 희 덕



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2007년 3월~현재: LIG 넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

박 중 국



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2001년 11월~현재: LIG 넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 위성 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

나 형 기



1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
1996년 1월~현재: LIG 넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 안테나 및 능동위상 배열 레이더