

W-대역 탐색기용 이중편파 모노펄스 카세그레인 안테나 설계

Design of Dual-Polarized Monopulse Cassegrain Antenna for W-Band Millimeter-Wave Seeker

이국주 · 정채현 · 백종균 · 박창현 · 남상욱*

Kook Joo Lee · Chae-Hyun Jung · Jong-Gyun Baek · Chang-Hyun Park · Sangwook Nam*

요 약

본 논문에서는 이중편파 수신이 가능한 W-대역 밀리미터파 탐색기용 모노펄스 카세그레인 안테나를 제안하고, 제작 및 측정을 통하여 안테나의 특성을 검증하였다. 이중편파 모노펄스 카세그레인 안테나는 주/부 반사경, 이중편파 수신 가능한 급전혼 및 모노펄스 비교기로 구성된다. 제안된 급전혼은 모노펄스 신호를 생성하기 위해 2×2 배열의 정사각형 도파관 급전부를 가지며, 이중편파에 수신을 위해 90도 회전대칭 구조로 설계되었다. 측정을 통해 합 채널 및 차 채널에 대해서 수직 및 수평의 이중편파에서 유사한 방사패턴 성능을 확인했다. 중심 주파수에서 합 채널의 이득은 수직편파에서 35.1 dBi, 수평편파에서 35.6 dBi로 편파간 이득차는 0.5 dBi였으며, 부엽준위는 -21.6 dB 이하였다.

Abstract

In this paper, dual-polarized monopulse cassegrain antenna for W-band millimeter-wave seeker was proposed and the performances were verified by the measured results of the fabricated antenna. Dual-polarized monopulse Cassegrain antenna consists of main/sub-reflector, dual-polarized feed horn and monopulse comparator. The proposed feed horn has 2×2 array square waveguide feeding structure to make monopulse signals and it was designed using 90 degree rotational symmetric structure to receive dual-polarized signals. At the sum and difference channel, the measured vertical and horizontal polarization radiation pattern were similar. Measurement gains are 35.1 dBi for v-pol. and 35.6 dBi for h-pol. at the center frequency with 0.5dBi difference between each polarization and the side lobe level is below -21.6 dB.

Key words: Cassegrain Antenna, Monopulse, Dual Polarization, Feed Horn

I. 서 론

최근 밀리미터파 기술의 발전으로 높은 주파수 대역을 사용하여 좁은 안테나 빔폭과 넓은 주파수 대역을 활용해 각도 및 거리 분해능을 향상시킬 수 있는 탐색기에 대한 연구 결과가 해외에서 발표된 바 있다^{[1],[2]}. W 대역 이

상의 높은 주파수 대역에서는 안테나 제작 측면과 파장 대비 증가한 안테나의 크기로 인해 발생하는 도파관의 경로 손실 등의 이유로 도파관 슬롯 배열 안테나보다 카세그레인 형태의 이중 반사판 안테나 사용이 용이하다^[3].

현대전에서 전자 방해 기술의 발전으로 탐색기용 안테나는 신호원의 각도 위치를 정밀하게 추정하기 위해 각

LIG 넥스원(LIG NEX1)

*서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소(Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University)

· Manuscript received February 22, 2016 ; Revised March 4, 2016 ; Accepted March 7, 2016. (ID No. 20160222-020)

· Corresponding Author: Jong-Gyun Baek (e-mail: jonggyun.baek@lignex1.com)

도 분해능을 높이는 모노펄스 기능뿐만 아니라, 재밍 영향을 대응할 수 있는 안테나 개발이 필요로 하고 있다. 이중편파 안테나는 표적에서 반사되는 수직/수평의 이중편파 수신함으로서 표적의 식별 능력과 재밍 대응 능력의 향상이 가능하다^{[4],[5]}.

이중편파의 모노펄스 신호를 생성하는 예로 복사 슬롯 배열 안테나의 슬롯의 방향이 서로 직교하도록 배열하는 방법이 있지만^[6], 도파관 혼 안테나 및 카세그레인 안테나에서 이중편파의 모노펄스 신호를 생성한 연구 결과는 찾아보기 어렵다. 일부 응용에서 2x2 배열의 도파관을 사용해 모노펄스 신호를 생성하는 설계가 소개되었지만, 이와 같은 방식은 단일편파에 국한된다^{[7],[8]}. 위성통신의 위추적용 안테나에서는 원형 도파관 기반의 고차모드 급전혼을 사용한 모노펄스 방식이 사용되지만, 수직편파와 수평편파가 동일한 크기를 가지며, 90도의 위상차를 갖는 원형편파를 사용한다^{[9],[10]}. 표적의 난반사로 인해 탐색기에 수신되는 이중편파 신호는 90도의 위상차를 갖는 원형 편파를 기대하기 어렵기 때문에 서로 독립적인 수직/수평의 이중편파에 대해서 모노펄스 신호를 생성할 수 있는 급전혼 및 카세그레인 안테나 설계가 요구된다.

본 논문에서는 W 대역에서 이중편파의 모노펄스 신호 수신이 가능한 카세그레인 안테나를 제안하였다. 카세그레인의 반사판 설계에 앞서 구형 도파관 기반의 급전혼을 설계했으며, 90도 회전대칭 구조의 2x2 배열 도파관 형태의 4혼 안테나를 통해 이중편파에 대한 동일한 빔 패턴의 모노펄스 합/차 패턴을 얻을 수 있다. 설계된 급전혼을 사용해 최종적으로 카세그레인 안테나를 설계했다.

II. 본 론

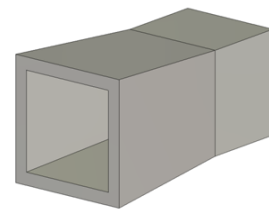
2.1 이중편파 수신용 모노펄스 급전혼 설계

반사판 안테나에서 모노펄스 신호를 생성하기 위한 급전혼은 2x2 배열의 급전 도파관으로 구성된 4혼 형태의 구조가 사용 가능하다^{[7],[8]}. 기존에 사용되는 4혼 구조의 급전혼 안테나는 단일 편파에 대해서만 동작하도록 설계되었지만, 본 논문에서는 수직과 수평의 이중편파 신호를 수신할 수 있도록 급전부의 도파관은 정사각형의 구조를 갖는다. 수신된 이중 편파는 후단부에 편파분리기(OMT: Ortho-Mode Transducer)를 연결하여 수직과 수평의 개별 편파 분리가 가능하다^[4].

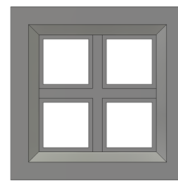
이중편파 수신용 급전혼 설계에서 가장 중요한 부분은 수직과 수평 각 편파에 대해서 동일한 방사패턴 특성을 보유해야 한다는 점이다. 이를 위해 급전혼 설계 시 그림 1과 같이 90도 회전대칭 구조로 설계하였으며 모노펄스 안테나는 급전혼의 2x2 배열 도파관 급전부에 인가되는 전계의 위상에 의해서 합 패턴과 차 패턴의 방사패턴을 형성하게 된다. 그림 2의 (a)는 합 패턴과 방위각 및 고각 차 패턴을 형성하기 위한 급전부의 전계 분포를 나타내고 이와 같은 전계분포는 급전혼 후단부에 모노펄스 비교기를 연결해 얻을 수 있다. 본 논문에서는 측정을 통해 검증된 모노펄스 비교기^[11]를 사용해 급전혼의 2x2 배열 도파관 급전부에 신호를 인가되는 것을 가정해 안테나 설계를 진행했다. 급전혼의 2x2 배열 도파관에 합 패턴과 차 패턴 형성을 위한 전계가 인가된 경우 급전혼의 도파관 내부에서 각 신호가 합성되어 개구면에서는 그림 2의 (b)와 같은 전계 분포를 형성하게 된다.

급전부에 모두 동일한 위상의 신호가 인가될 때에는 합성된 신호에 의한 개구면 전계 분포는 TE10 모드가 되어 합 채널의 방사패턴을 만들게 된다. 반면 2x2 배열의

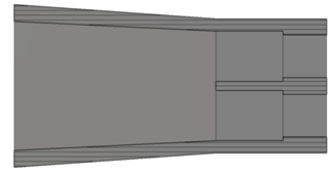
급전부에 모두 동일한 위상의 신호가 인가될 때에는 합성된 신호에 의한 개구면 전계 분포는 TE10 모드가 되어 합 채널의 방사패턴을 만들게 된다. 반면 2x2 배열의



(a) 급전혼 구조
(a) The structure

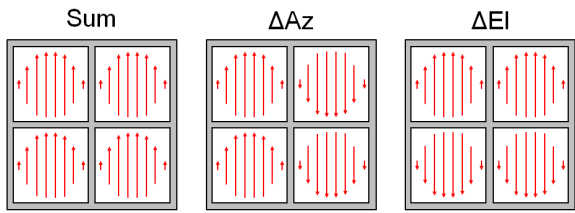


(b) 정면도
(b) Front view

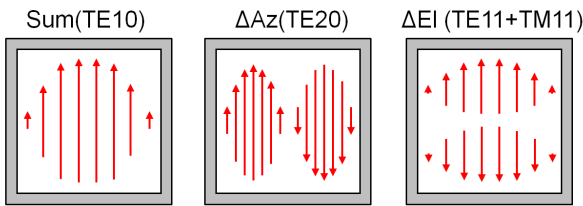


(c) 단면도
(c) Sectional view

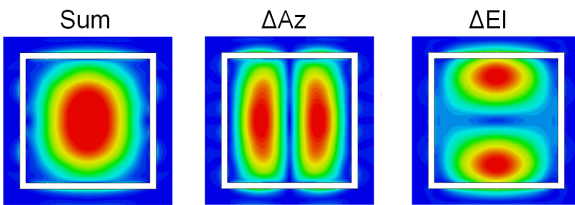
그림 1. 급전혼 구조
Fig. 1. The structure of feed horn.



(a) 급전부에서의 전계분포
(a) Field distribution at feeding waveguide



(b) 개구면에서의 전계분포
(b) Field distribution at aperture

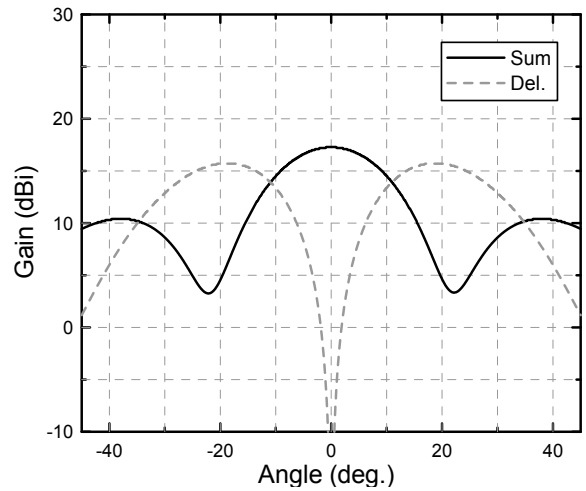


(c) 개구면에서의 전계분포(시뮬레이션)
(c) Field distribution at aperture(simulation)

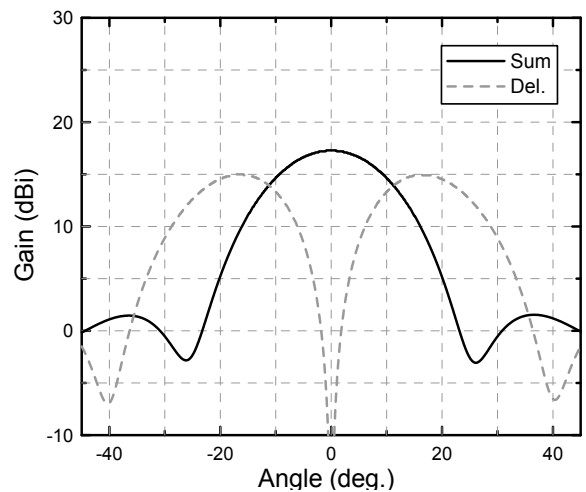
그림 2. 급전혼의 급전도파관 및 개구면의 전계분포
Fig. 2. Field distribution at feeding waveguide and aperture of feed horn.

도파관 급전부에 좌/우 180도 위상차를 갖는 신호가 인가될 경우, 개구면에서는 TE₂₀ 모드의 전계분포가 형성되어 방위각 차 패턴이 형성되며, 상/하 180도 위상차를 갖는 신호가 인가될 경우, 개구면에서 TE₁₁과 TM₁₁ 모드가 합성된 전계분포가 형성되어 고각 차 패턴을 형성하게 된다^[8]. 개구면에서의 전계 분포는 합 패턴과 방위각 및 고각의 차 패턴에 대해서 그림 2의 (c)와 같이 시뮬레이션으로 확인할 수 있다. 그림에서는 수직 편파에 대해서만 전계분포를 나타냈지만, 급전혼의 구조가 수직과 수평에 대해 동일한 90도 회전대칭 구조로 설계되었으므로 수평 편파에 대해서도 동일한 개구면 전계분포를 갖는다.

그림 3은 각각의 모노펄스 신호에 대한 급전혼의 방사 패턴을 보여주고 있다. 90도 회전대칭 구조 특성에 의해 시뮬레이션에서 방위각의 수직편파와 고각의 수평편파 및 고각의 수직편파와 방위각의 수평편파는 동일한 빔 패턴을 갖는다. 설계된 급전혼은 17.3 dBi의 이득 및 수직 편파 합 채널의 10 dB 빔폭이 방위각 18.4도, 고각 17.8도로 유사한 빔폭을 갖도록 설계되었다.



(a) 방위각 수직편파 / 고각 수평편파
(a) Azimuth vertical polarization/Elevation horizontal polarization



(b) 고각 수직편파 / 방위각 수평편파
(b) Elevation vertical polarization/Azimuth horizontal polarization

그림 3. 급전혼의 방사패턴
Fig. 3. Radiation pattern of feed horn.

2-2 이중편파 모노펄스 카세그레인 안테나 설계

설계된 급전혼을 사용해 최종적으로 이중편파 모노펄스 카세그레인 안테나 시스템을 설계 및 제작하였다. 제작된 이중편파 카세그레인 안테나 시스템의 블록도는 그림 4와 같다. 이중 반사판 구조를 갖는 카세그레인 반사판 안테나는 제작의 용이성과 고 이득 특성으로 위성통신 등의 응용에서 주로 사용되고 있다. 카세그레인 이중 반사판은 회전 대칭형 구조를 갖기 때문에, 90도 대칭구조로 설계된 이중편파 수신용 급전혼과 결합 시에도 급전혼의 수직/수평 편파에 대해서 동등한 방사패턴 특성을 갖는 특성을 유지할 수 있다.

급전혼의 후면부에는 별도로 제작된 4개의 급전부와 모노펄스 비교기를 결합하여 모노펄스 안테나 시스템을 구성한다. 급전혼의 2x2 배열 정사각형 도파관에는 각각 4개의 편파분리기가 연결되어 수신된 신호를 수직 편파와 수평 편파로 분리해준다. 편파 분리를 통해 분리된 각 편파의 4분면 신호는 비교기를 통해 합 패턴과 방위각/고각의 차 패턴을 형성한다. 카세그레인 이중 반사판의 구조와 주요 설계 변수는 그림 5에 나타내었다. θ_e 는 급전혼의 10 dB 반치 빔폭을 의미하며, 설계된 급전혼의 반치 빔폭 18°를 사용해 카세그레인 반사판 안테나를 설계하였고, 주 반사판 직경 D_m 은 $37.6\lambda_0$ 의 고정값을 사용했다. 포물면으로 이루어진 주반사판과 쌍곡면으로 구성된 부 반사판에서 각 설계 변수는 다음과 같은 관계식을 갖는다^[12].

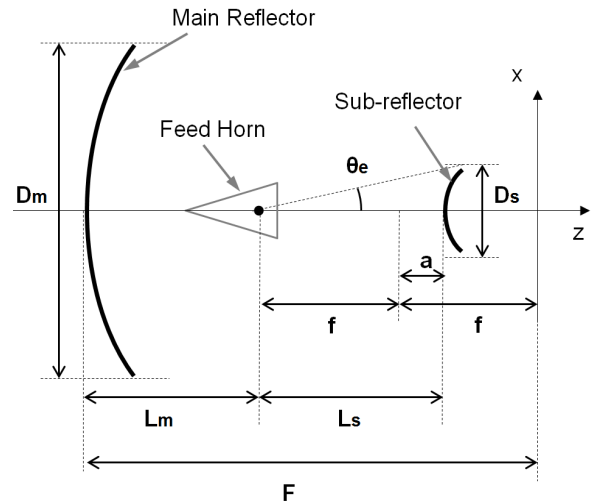


그림 5. 카세그레인 안테나 구조와 변수
Fig. 5. The structure and variable of the Cassegrain antenna.

$$L_s = -\frac{D_m(L_m - F)}{D_m + 4F \tan\left(\frac{\theta_e}{2}\right)} \tag{1}$$

$$f = \frac{1}{2}(F - L_m) \tag{2}$$

$$D_s = \frac{4(L_s - f)}{\frac{1}{\sin(\theta_e)} - \frac{(16F^2 + D_m^2)}{8FD_m}} \tag{3}$$

$$a = \frac{1}{2} \frac{(L_m - F) \left[4F \tan\left(\frac{\theta_e}{2}\right) - D_m \right]}{4F \tan\left(\frac{\theta_e}{2}\right) + D_m} \tag{4}$$

$$e = \frac{f}{a} \tag{5}$$

여기서, F 는 주 반사판 초점 거리, L_s 는 부 반사판 중심점과 급전혼 위상중심과의 거리, $2f$ 는 급전혼 위상중심과 주 반사판 초점의 거리, D_s 는 부 반사판의 직경, e 는 부 반사판 쌍곡면의 편심률을 의미한다. 위의 수식을 통하여 카세그레인 반사판 설계 파라미터 초기값을 구한 후, 세부 튜닝을 진행했다. 주어진 급전혼을 사용해 반사판을 설계할 경우 Spill-over에 의한 부엽 증가를 억제하

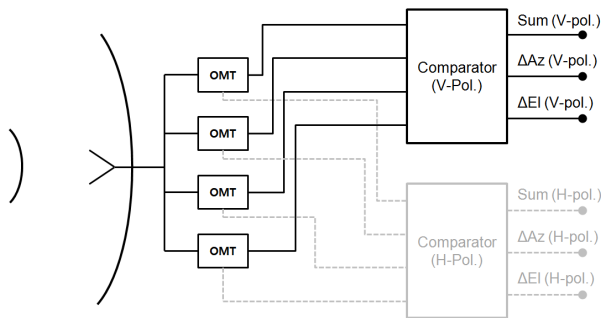


그림 4. 이중편파 카세그레인 안테나 블록도
Fig. 4. Dual-polarized Cassegrain antenna block diagram.

기 위해 L_s 및 F 값이 일반적인 카세그레인보다 작은 값이 사용되었다. 최종 설계된 F/D_m 값인 0.28이고, 상용 편파와 해석 툴인 CST사의 Microwave Studio를 사용해 최종 설계를 진행하였다. 최종설계에는 부 반사판을 고정하기 위한 4개의 금속 지지대를 포함되어 있다.

2.3 측정 결과

그림 6은 제작된 이중편파 모노펄스 카세그레인 안테나를 보여주고 있다. 최종 제작된 안테나는 급전혼 뒷단 편파분리기와 비교기 및 연결 도파관을 합한다. 카세그레인 안테나의 반사계수 측정은 합 채널 및 차 채널에 대한 각각의 반사 특성을 확인하기 위해서 비교기 출력단에서 네트워크 분석기를 사용해 측정했다. 그림 7은 수직편파에 대한 합/차 채널의 반사계수 측정결과를 보여주고 있다. 측정 결과, 운용대역폭 내에서 합 채널의 반사계수가 -13.1 dB 이하임을 확인했으며, 수평편파의 경우 합 채널의 반사계수는 대역폭 내에서 -15.5 dB 이하였다.

제작된 이중편파 모노펄스 카세그레인 안테나의 방사 패턴은 근접전계 측정시설을 사용해 측정되었다. 그림 8은 합 채널에 대한 중심주파수의 방사 패턴 측정 결과와 시뮬레이션 결과이다. 안테나 측정 시 카세그레인 안테나 이외에 별도로 제작된 편파분리기와 비교기를 연결하기 위해 추가적인 연결 도파관이 사용되었다. 방사패턴 측정 결과는 카세그레인 안테나 이외에 편파분리기, 비교기 및

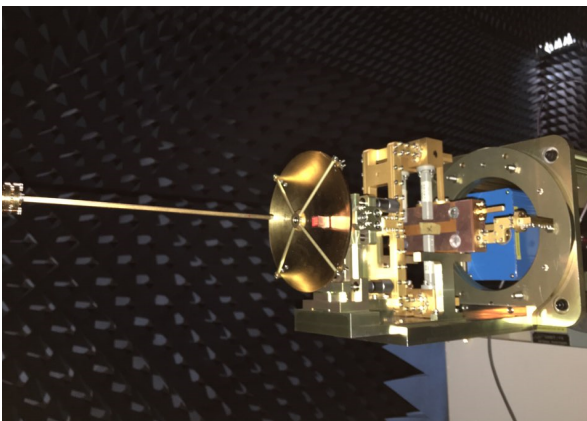


그림 6. 카세그레인 안테나 측정 사진
Fig. 6. The picture of Cassegrain antenna measurement.

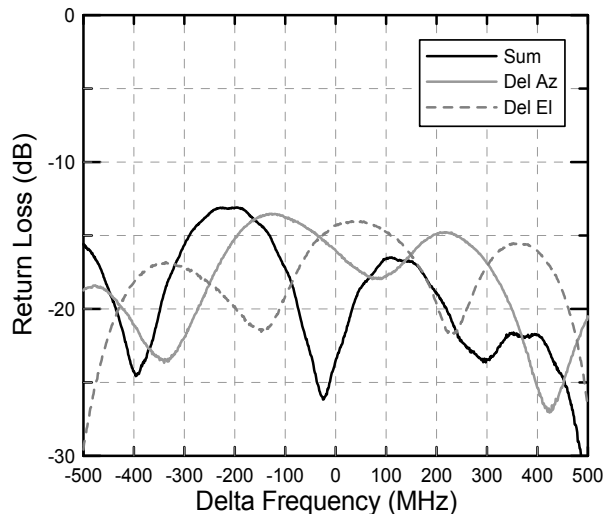


그림 7. 반사계수 측정 결과
Fig. 7. Measured results of return loss.

연결도파관의 삽입손실 측정 결과를 보정한 이득이다. 중심 주파수에서의 방사패턴 시뮬레이션과 측정 결과를 비교해서 나타내면 표 1과 같으며, 측정 결과와 시뮬레이션이 유사함을 알 수 있다. 제작된 카세그레인 안테나는 이중편파 신호 수신을 목적으로 설계되었으며, 측정결과는 방위각과 고각 모두에 대해서 수직 편파와 수평 편파가 유사한 방사패턴 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 이중편파 수신과 함께 본 논문에서 제안하는 카세그레인 안테나의

표 1. 중심주파수 방사패턴 결과

Table 1. Radiation pattern results at center frequency.

		시뮬레이션		측정	
이득(dBi)		V-pol.	36.4	35.1	
		H-pol.	36.4	35.6	
빔폭 (°)	방위각	V-pol.	1.99	1.89	
		H-pol.	1.75	1.69	
	고각	V-pol.	1.75	1.89	
		H-pol.	1.99	1.92	
부엽준위 (dB)	방위각	V-pol.	-24.7	-23.3	
		H-pol.	-21.8	-21.6	
	고각	V-pol.	-21.8	-23.0	
		H-pol.	-24.7	-22.9	

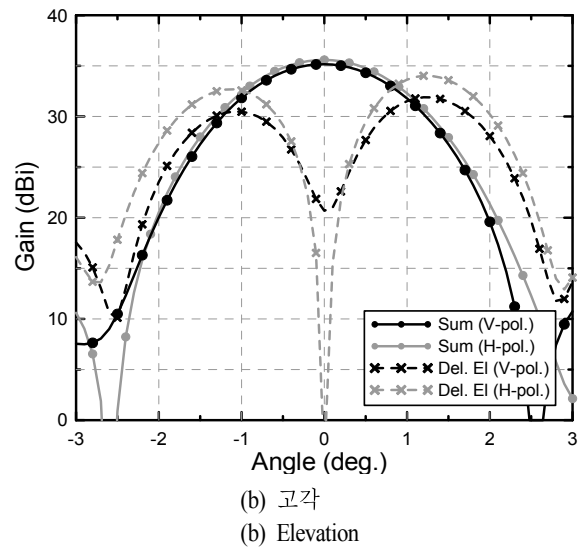
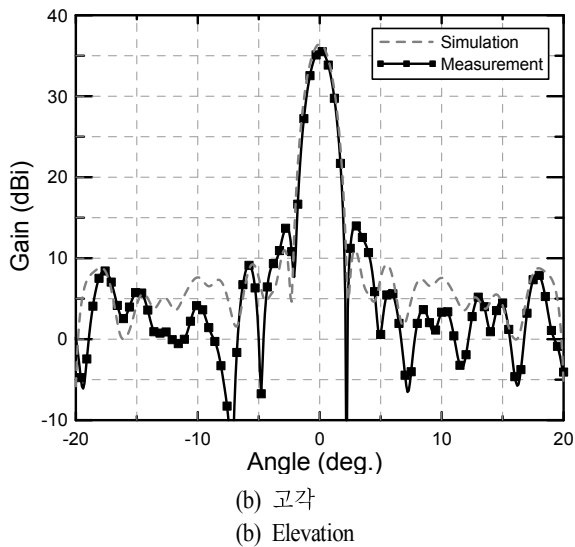
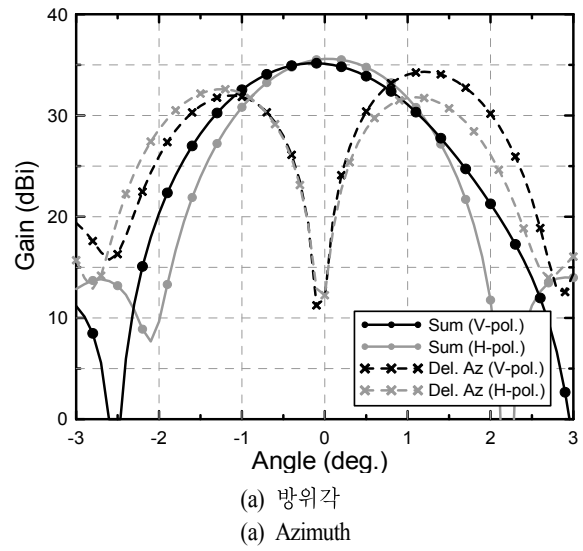
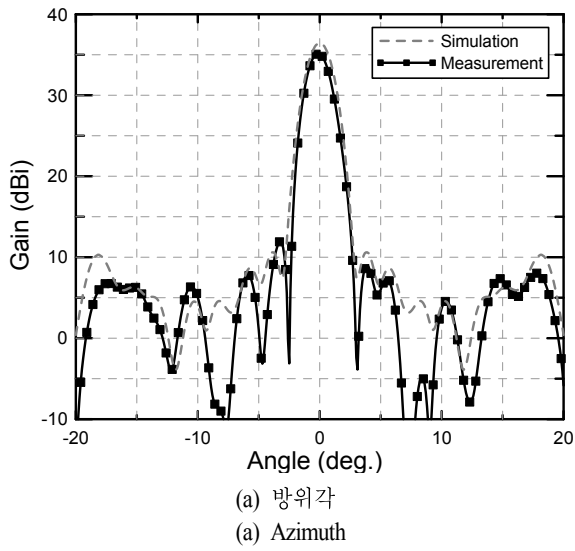


그림 8. 안테나 방사패턴
Fig. 8. Radiation pattern of antenna.

그림 9. 안테나 합/차 방사패턴
Fig. 9. Sum/Del radiation pattern of antenna.

주요 기능은 모노펄스 신호 생성이며, 합 채널 이외에 차 채널에 대한 방사패턴 특성 확인이 필요하다. 방위각과 고각에서 합 채널 및 차 채널에 대한 방사패턴 측정 결과는 그림 9에서 보여주고 있다. 측정 결과는 방위각과 고각 모두에서 수직 편파 및 수평 편파에 대한 차 패턴이 정상적으로 형성됨을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 이중편파 수신이 가능하고, 모노펄스 기능을 구현하기 위해 2×2 배열 정사각형 급전혼을 설계하여 W 대역 밀리미터파 탐색기용 카세그레인 안테나를 설계하였다. 제작된 안테나의 이득은 35.1 dBi, 부엽 준위는 21.6 dB를 확인하였고, 각각의 수직/수평 신호에서 모노펄스 신호를 확인함으로써 제안된 안테나는 제밍 대응 능력이 향상된 탐색기용 안테나로 적용 가능함을 보였다.

III. 결 론

References

[1] <http://brimstonemissile.com/brimstone/>

[2] N. R. Iyer. "Recent advances in anti-tank missile systems and technologies", *SPIE Conference on Photonic Systems and Applications in Defense and Manufacturing*, Singapore, pp. 46-57, Dec. 1999.

[3] N. C. Currie, C. E. Brown, *Principles and Applications of Millimeter-wave Radar*, Artech House, pp. 519-559, 1987.

[4] Q. Xiaolin, J. Ming, and S. Lizhong, "Design of a new dual-polarization antenna on missile", in *Proc. 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, pp. 161-164, Oct. 2003.

[5] J. Kjellgren, S. Nilsson, and A. Sume, "A polarimetric radar target model for tank targets at millimeter wavelengths", in *Proc. 2nd Int. Workshop Radar Polarimetry*, pp. 138-148, Sep. 1992.

[6] S. Park, Y. Okajima, J. Hirokawa, and M. Ando, "A slotted post-wall waveguide array with interdigital structure for 45° linear and dual polarization", *IEEE Trans. Antenna and Propag.*, vol. 53, no. 9, pp. 2865-2871, Sep. 2005.

[7] 김찬홍, 김승각, "X-대역 4혼 삼중 모드 모노펄스 급전기 설계", *한국전자과학회논문지*, 21(5), pp. 528- 536, 2010년 5월.

[8] A. M. El-Tager, H. N. Ahmad, and M. M. Darwish, "Multimode antenna feed system for an X-band monopulse radar", *IEEE Radar Conference*, pp. 1-4, May 2009.

[9] 권건섭, 허종완, 황기민, "Ka 대역 다중모드 모노펄스 추적 시스템을 위한 한 쌍의 슬롯(slot)을 갖는 모드커플러 설계", *한국전자과학회논문지*, 26(2), pp. 158-164, 2015년 2월.

[10] 가득현, 박도현, 송충호, 안성준, 전찬원, 이재문 "Ku 대역 모노펄스 위성추적을 위한 동축구조 도파관 고차모드 커플러 설계", *한국통신학회논문지*, 39(4), pp. 380-386, 2014년 4월.

[11] 김동연, 임영준, 정채현, 박창현, 남상욱, "W-대역 밀리미터파 탐색기용 광대역 모노펄스 비교기 설계", *한국전자과학회논문지*, 27(2), pp. 224-227, 2016년 2월.

[12] C. Granet, "Designing axially symmetric cassegrain or gregorian dual-reflector antennas from combinations of prescribed geometric parameters", *IEEE Antenna and Propag. Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 76-82, Apr. 1998.

이 국 주



2005년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학사)
 2008년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2012년 2월: 고려대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2013년 3월: 고려대학교 전기전자전파공학과 박사후과정

2013년 4월~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

정 채 현



2008년 2월: 충남대학교 전기정보통신공학과 (공학사)
 2010년 2월: 한국과학기술원 전자전기공학과 (공학석사)
 2010년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

백 중 균



2011년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
2013년 8월: 동국대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2013년 4월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

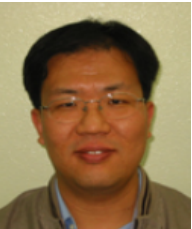
남 상 욱



1981년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1983년: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
1987년: 미국 Austin의 The Texas University 전자공학과 (공학박사)
1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수

[주 관심분야] Antenna and Wave Propagation, EM Field Numerical Analysis, Microwave & Millimeter-Wave Active/Passive Circuit Design 등

박 창 현



1997년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석, RF 탐색기 시스템