



차기 구축함용 피아식별장치의 구성과 원형 위상배열 안테나에 대한 연구

정인하*, 유병길**¹, 박진우**², 조정일**³

Study of the Architecture of Identification of Friend or Foe System for the Next Destroyer and Its Circular Phased Array Antenna

Inha Jung*, Byung-Gil Yu**¹, Jin-Woo Park**², and Jung-Il Cho**³

요 약

본 논문은 차기 구축함용 피아식별장치의 구성과 원형 위상배열 안테나에 대한 연구이다. 제안된 함정용 피아식별장치는 질문기, 응답기, ACU, APU와 안테나로 구성되어 있다. 피아식별 안테나는 수직편파를 갖는 2×64 원형 위상배열 안테나로 설계되었으며, 기존 복수의 안테나를 사용하던 피아식별 안테나와 달리 단일 안테나로 합, 차, 옴니 패턴을 형성할 수 있다. 64개의 중 배열을 모두 사용할 경우 옴니 패턴이 형성되며, 16개의 중 배열을 사용할 경우 합, 차 패턴을 형성할 수 있다. 제안된 피아식별장치는 모노펄스 감시 레이더로써 표적을 식별하기 위하여 합, 차, 옴니 패턴을 통하여 ISLR 펄스와 RSLP 펄스를 송신 할 수 있으며 시스템 요구사항인 모드별 유효범폭을 만족하는 것을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

Abstract

In this paper, IFF(Identification of Friend or Foe) system for the next destroyer and its circular phased array antenna are presented. The ship based IFF system consists of the interrogator, the transponder, the ACU the APU and the antenna. The antenna is comprised of two rows and sixty-four columns of dipole elements, which are have a vertical polarization. It provides a three different types of radiation patterns in single phased array antenna, such as a sum pattern, a difference pattern and a omni pattern, and these patterns are used for the communications of interrogator and transponder. For a sum pattern, all of 64 columns of elements are operated, and the quarter of 64 columns are enabled for a sum and a different pattern. This system as one of monopulse surveillance radar identifies friends and foes with an ISLR pulse and an RSLP pulse via an omni pattern and a difference pattern respectively.

Keywords

identification friend or foe, interrogator, transponder, phased array antenna, ISLS, RSLP

* 한화시스템 전술통신팀 연구원(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7346-8454>

** 한화시스템 전술통신팀 연구원

- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0001-8858-0393>

- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0003-0571-497X>

- ORCID³: <http://orcid.org/0000-0001-9539-111X>

• Received: Sep. 10, 2019, Revised: Oct. 17, 2019, Accepted: Oct. 20, 2019

• Corresponding Author: Inha Jung

The Tactical Communications Team, Hanwha Systems Co., Ltd, Korea

Tel.: +82-31-8091-7320, Email: inha.jung@hanwha.com

1. 서 론

기존의 함정용 피아식별장치는 응답기를 위한 옴니 안테나와 질문기를 위한 기계적 회전방식을 이용하는 지향성 안테나를 분리하여 사용하였다[1]. 따라서 2개 이상의 안테나를 설치하기 위하여 안테나간의 상호영향성을 최소화하기 위한 공간이 필요하며 이는 공간효율성의 저하를 야기한다. 또한, 해상에서 염수에 의한 부식으로 안테나 회전 구동체의 신뢰성이 하락하는 문제점이 있었다.

본 논문은 안테나, 질문기(Interrogator), 응답기(Transponder), ACU(Antenna Control Unit), APU(Antenna Position Unit)로 구성되어 있는 피아식별장치(IFF, Identification of Friend or Foe)의 구성과 단일 원형 위상배열 안테나로 질문기와 응답기에서 필요한 합 패턴, 차 패턴, 옴니 패턴을 모두 형성할 수 있는 원형 위상배열 피아식별 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 2×64 원형배열을 적용하여 128개의 배열소자를 이용하여 옴니 패턴을 형성하고, 64개의 중배열 중 16개 중배열을 사용하여 합 패턴과 차 패턴을 구현할 수 있으며 방위각 0° ~ 360°로 전기적 회전이 가능하다.

원형 위상배열 안테나의 사용으로 장비의 설치에 공간적 제약이 많은 함상에서 공간 활용성을 극대화 할 수 있으며 위상배열의 적용으로 기계적으로 회전하는 구동부를 포함하지 않으므로 염수 부식에 대한 신뢰성의 향상을 기대할 수 있다.

II. 본 문

2.1 피아식별장치의 구성

피아식별장치는 일반적으로 질문기, 응답기 합, 차 패턴을 형성하는 기계식 회전이 가능한 지향성 안테나와 옴니 패턴을 형성하는 옴니 안테나로 구성되어 있다.

피아식별장치의 질문기는 응답기로 질문을 송신하고 다양한 모드의 응답들을 수신한다[2]. 모드1은 항공기의 종류를 식별하기 위하여 사용되며, 모드2는 항공기의 고유번호인 TN(Tail Number)를 식별할 때 사용된다.

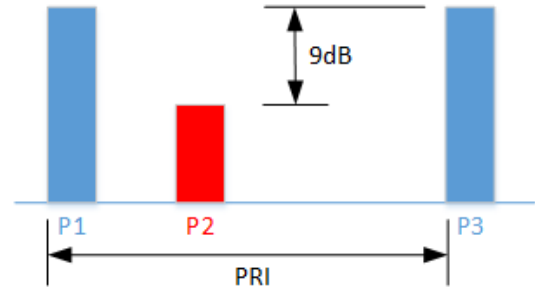


그림 1. 피아식별장치의 질문 펄스
Fig. 1. Interrogation pulses of IFF system

모드3로는 군용 또는 민간 항공기의 신원을 확인할 수 있다. 모드4는 암호화된 응답을 제공하며, 모드 5는 암호화된 보안 데이터의 전송을 지원한다[3].

그림 1은 질문기에서 전송되는 펄스를 나타낸다. P1과 P3는 합 패턴으로 송신되는 메인펄스이며, P2는 옴니 패턴으로 송신되는 ISLS(Interrogation Side Lobe Suppression) 펄스로써 PRI(Pulse Repetition Interval) 사이에 송신된다. 이때 메인펄스인 P1과 ISLS 펄스인 P2 사이의 시간차이에 따라 피아식별 모드가 결정되며 P1펄스는 P2 펄스 대비 9dB 이상 강하게 송신되어야 한다[4]. 또한 부엽에 의한 허위 표적을 방지하기 위하여 차 패턴으로 RSLs(Receiver Side Lobe Suppression) 펄스를 송신한다.

본 논문에서 제안된 피아식별장치는 그림 2에 나타난 바와 같이, 질문기 응답기, ACU APU로 형성한다. 질문기는 메인 펄스, ISLS 펄스, RSLs 펄스를 형성한다. APU는 피아식별장치에서 필요로 하는 메인펄스, ISLS 펄스, RSLs 펄스를 응답기와 질문기로부터 전달받아 합, 차, 옴니 패턴을 모두 형성할 수 있는 단일 피아식별 안테나 송수신한다. ACU는 피아식별 안테나에 인가되는 펄스에 적합하게 안테나가 모드를 변경할 수 있도록 피아식별 안테나를 제어하며 안테나의 제어를 위하여 APU와 제어신호를 공유한다.

2.2 피아식별 안테나의 구성

피아식별을 위한 원형 위상배열의 단위소자는 그림 3과 같이 발룬 일체형 다이폴 안테나가 사용되었다. 발룬 일체형 다이폴은 가볍고 구현이 용이하며 RF 전단부와의 통합이 용이 하다[5][6].

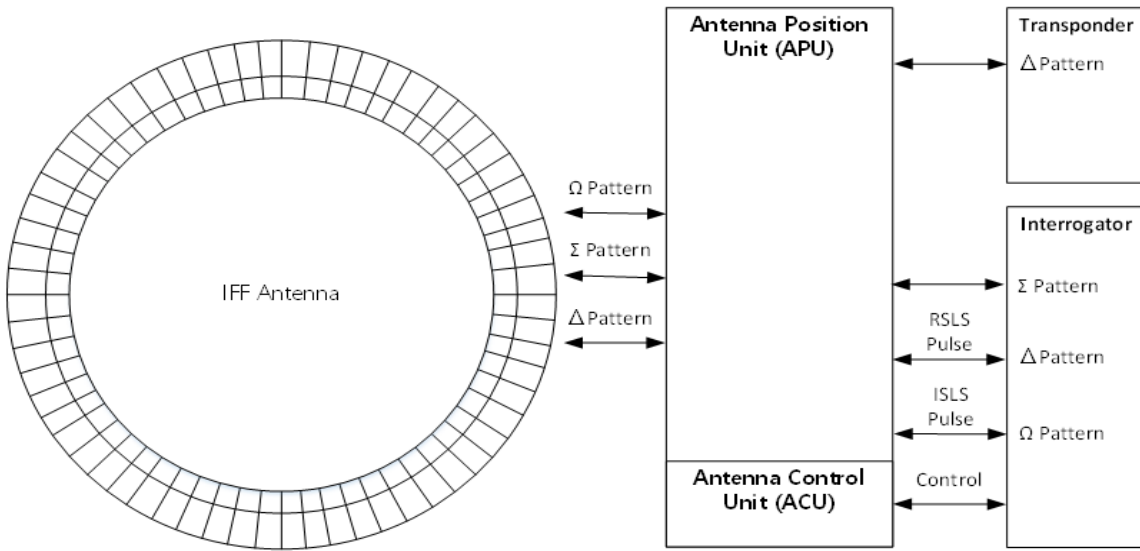


그림 2. 함정용 피아식별장치의 구성
Fig. 2. Architecture of ship based IFF system

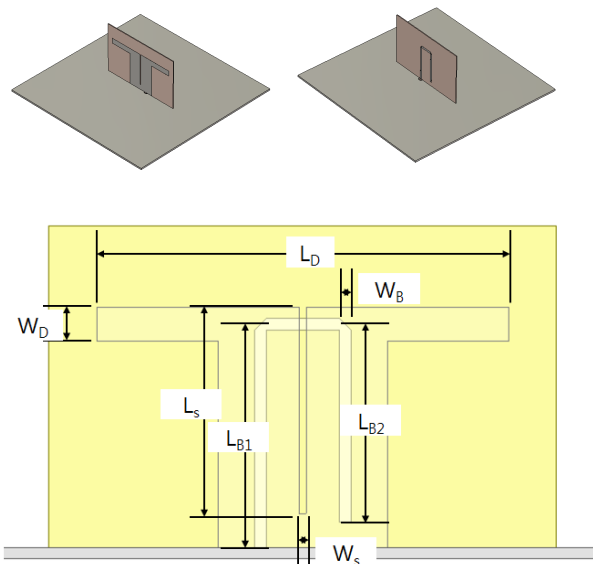


그림 3. 단위소자 형상
Fig. 3. Structure of unit element

표 1. 단위소자 부분별 치수

Table 1. Dimensions of parts of element

Items	Dimension
Dipole Length (LD)	0.429 λ
Dipole Width (WD)	0.353 λ
Slot Length (LS)	0.215 λ
Slot Width (WS)	0.007 λ
Balun Length (LB1)	0.233 λ
Balun Stub Length (LB2)	0.212 λ
Balun Width (WB)	0.012 λ

단위소자에 적용된 유전체는 유전율이 3.5이며 두께가 1.58mm인 Taconic RF-35 인쇄회로기판이 사용되었다. 유전체의 전면에는 다이폴 안테나가 인쇄되어 있으며, 후면에는 일정 길이의 Stub를 갖는 Γ -형상의 일체형 발룬이 인쇄되어있다. 단위소자는 피아식별장치의 운용주파수인 L대역에 매칭되었으며 각 부분별 형상은 그림 3에 도시되어 있으며, 부분별 치수는 표 1과 같다.

피아식별 안테나는 수직편파를 갖도록 배치된 2개의 단위소자로 구성된 종배열과 64개의 종배열로 구성된 2×64 원형 위상배열로 설계되었다. 원형배열에서의 종배열간 간격은 Grating Lobe를 최소화하기 위하여 0.6λ 로 설계되었다. 안테나의 직경은 약 2.45m이며 높이는 약 0.46m이다. 그림 4는 원형 위상배열 피아식별 안테나의 형상을 나타낸다.

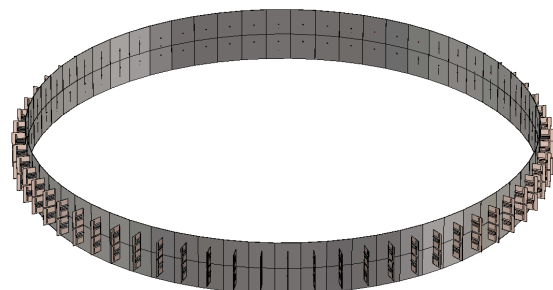


그림 4. 피아식별 안테나
Fig. 4. Structure of IFF antenna

제안된 피아식별 안테나는 피아식별장치에서 요구하는 합, 차, 음니 패턴을 단일 안테나로 형성할 수 있다. 64개의 종배열을 모두 사용하면 음니 패턴이 형성된다. 음니 패턴의 배열 계수(Array Factor)는 아래와 같다[6].

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^{64} I_n e^{j[ka \sin\theta \cos(\phi - \phi_n) + \beta_n]} \quad (1)$$

여기서 I_n 는 각 소자에 인가된 Amplitude이고 β_n 는 각 소자에 인가된 Phase이다. k 는 전파상수, a 는 원형배열의 반지름이며, θ 는 직각좌표계의 고각, ϕ_n 는 n 차 종배열의 방위각을 각각 나타낸다. 여기서 64개의 종배열이 고각 없이 $0^\circ \sim 360^\circ$ 전방위각으로 배열되어 있으므로 $\theta=90^\circ$, $\phi=360^\circ$ 이고, 소자간 간격은 $\Delta\phi=5.625^\circ$ 이다.

합 패턴은 64개 종배열의 1/4인 16개 종배열을 이용하여 빔을 형성한다. 1번 종배열부터 64번 종배열이 각각 $0^\circ \sim 360^\circ$ 로 5.625° 간격으로 배치되어 있을 때 빔지향방향이 0° 일 경우 55번 종배열부터 8번 종배열이 사용된다. 빔 지향방향이 5.625° 가 추가될 때마다 사용되는 종배열은 시프트 된다. 5.625° 내에서는 각소자에 인가되는 위상을 변경하여 미세 빔조향을 할 수 있다. 따라서 안테나의 지향방향을 적용하여 β_n 을 식 (2)와 같이 변경하여 표현할 수 있다.

$$\beta_n = -ka \sin\theta \cos(\phi_0 - \phi_n) \quad (2)$$

여기서 ϕ_0 는 16개 종배열 안테나의 지향방향이다. 또한, 각 빔 지향방향을 위하여 사용되는 16개의 종배열 중 첫 번째 종배열을 m 으로 가정하여 식 (3)과 같이 배열 계수를 표현할 수 있다.

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=m}^{m+15} I_n e^{jka[\sin\theta \cos(\phi - \phi_n) - \sin\theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)]} \quad (3)$$

$$= \sum_{n=m}^{m+15} I_n e^{jka(\cos\psi_n - \cos\psi_{0n})}$$

$$\psi_n = \cos^{-1}[\sin\theta \cos(\phi - \phi_n)] \quad (4)$$

$$\psi_{0n} = \cos^{-1}[\sin\theta \cos(\phi_0 - \phi_n)] \quad (5)$$

차 패턴은 합 패턴의 배열 계수인 식 (3)에서 16개의 종배열 중 1~8번 종배열에는 $-j$, 9번~16번 종배열에는 j 의 역위상 가중치를 적용하여 형성할 수 있다.

2.3 유효 빔폭

피아식별장치는 부엽에 의한 허위표적 감지를 방지하기 위하여 합, 차, 음니 패턴의 교차점에 대한 유효빔폭이 요구된다[8].

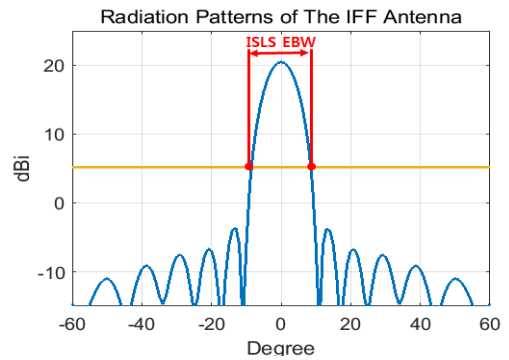
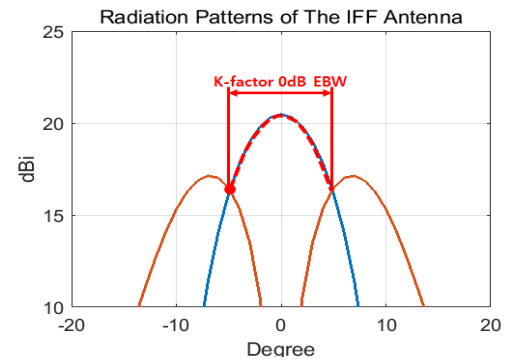
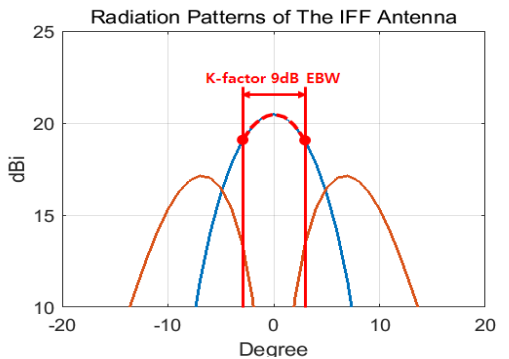


그림 5. ISLS 유효빔폭
Fig. 5. EBW of ISLS



(a) 0dB



(b) 9dB

그림 6. RSLs 유효빔폭, K계수 0dB, 9dB의 경우
Fig. 6. RSLs EBW 0dB, 9dB

ISLS 유효빔폭(EBW: Effective Band Width)은 합 패턴과 옴니 패턴과의 두 개의 교차점이며, 이때 합 패턴과 옴니 패턴의 이득은 9dB 이상 차이가 나야 된다. 그림 5는 ISLS 유효빔폭의 예를 나타낸다.

RSLs 유효빔폭은 허위표적의 진위여부를 결정하기 위한 K계수(K-factor)에 따라 달라지는데, 합 패턴의 크기를 K계수만큼 감소시켜 차 패턴과 교차되는 두 개의 지점이 유효빔폭이 된다. K계수가 커질수록 유효빔폭은 작아지고 표적의 감지정확도는 향상된다. K계수가 0dB일 경우와 9dB일 경우의 유효빔폭의 예는 그림 6과 같다.

III. 시뮬레이션 결과

상기와 같은 구성으로 3D EM 시뮬레이션 도구인 CST MWS를 이용하여 피아식별 안테나의 성능을 검증하였다. 검증은 피아식별장치의 운용주파수인 L대역에서 단위 소자의 성능을 최적화한 후 2×64 원형 위상배열 안테나의 합, 차, 옴니 패턴 및 ISLS, RSLs 유효빔폭을 검증하였다.

표 2는 차기 구축함용 피아식별 안테나의 요구성능이다. 단일 안테나로 합, 차, 옴니 패턴을 형성할 수 있어야 하며, 기존의 복수의 안테나를 사용하여 얻을 수 있었던 성능을 모두 갖추도록 설계되었다.

표 2. 요구 성능
Table 2. Required performance

Items		Target
Sum, Difference, Omni Pattern Capability		Capable
Operating Frequency		1030~1060MHz
Directivity	Sum Pattern	≥20dBi
	Omni Pattern	≥4.5dBi
HPBW	Hor.	7±1°
	Ver.	40±1°
ISLS EPW		12±1°
RSLs EPW		3.5±1°
Return Loss		≤-10dB

3.1 단위소자 시뮬레이션 결과

그림 7은 단일 소자인 발룬일체형 다이폴의 S-파라미터의 시뮬레이션 결과이다.

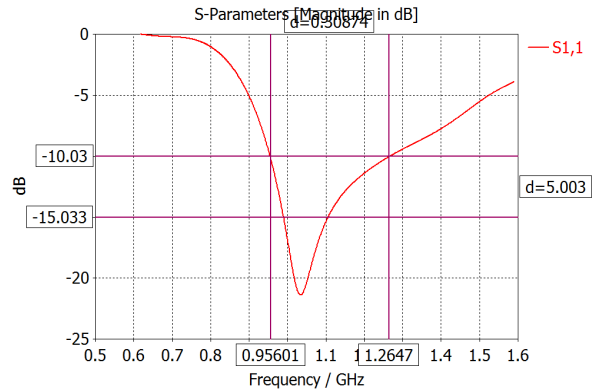


그림 7. 단위소자의 반사손실
Fig. 7. Return loss of unit element

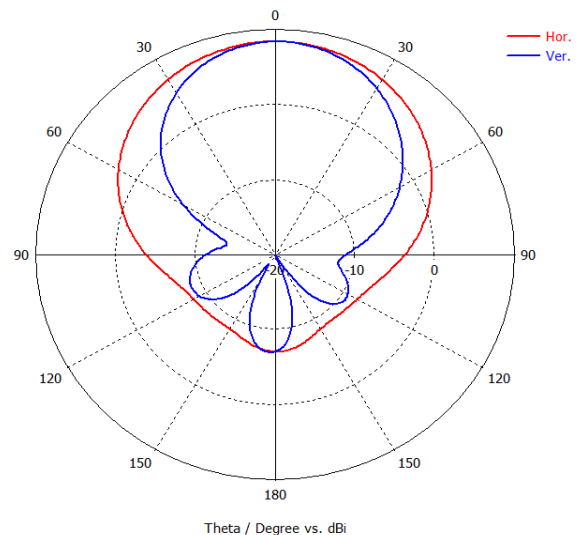


그림 8. 단위소자의 방사 패턴
Fig. 8. Radiation pattern of unit element

피아식별장치의 운용주파수는 중심주파수 1060MHz에서 대역폭 60MHz(5.7%)이다. 제안된 안테나는 반사손실 -10dB 기준 약 28.8%의 대역폭을 보이며 -15dB 기준 약 10.5%의 대역폭을 나타내어 피아식별장치의 운용주파수 전대역에서 -15dB 이상의 반사손실 성능을 만족하였다.

그림 8은 단위소자의 시뮬레이션 결과인 방사 패턴을 나타낸다. 단위소자의 이득은 7.47dBi이며 수평 HPBW는 85.8°, 수직 HPBW는 58.2°이다.

3.2 2×64 원형배열 피아식별 안테나의 시뮬레이션 결과

모델링된 2×64 원형 위상배열 피아식별 안테나를

통하여 합, 차, 옴니 패턴의 형성을 시뮬레이션 하였다. 64개의 종배열에 동일 Amplitude와 in-Phase를 인가하여 합 패턴을 도출하였다. 16개의 종배열에 Amplitude와 Phase 가중치를 인가하여 합 패턴을 도출하고, 역위상 가중치를 인가하여 차 패턴을 도출하여 단일 안테나로 3개의 패턴을 모두 형성할 수 있었다. 그림 9는 합, 차, 옴니 패턴의 시뮬레이션 결과이다.

부엽에 의한 허위표적의 가능성을 최소화하기 위하여 합 패턴에 -25dB의 Taylor Amplitude Taper를 적용하여 부엽을 억압하였고 빔 지향방향에서 필요하지 않은 합, 차 패턴의 교차점을 제거하였다.

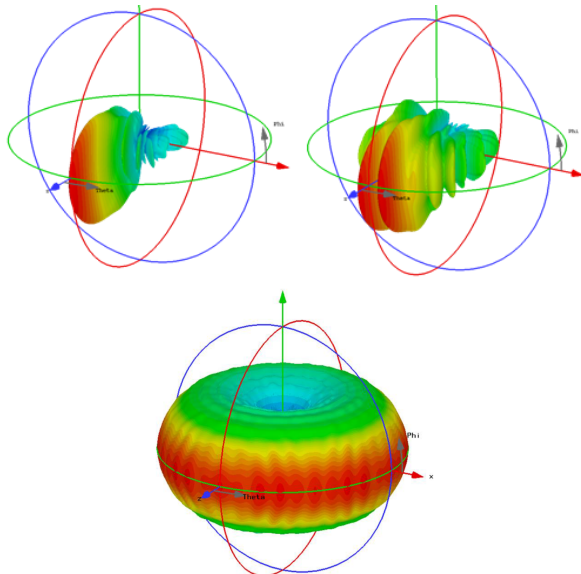


그림 9 단위소자의 3D방사 패턴
Fig. 9. Radiation pattern of unit element

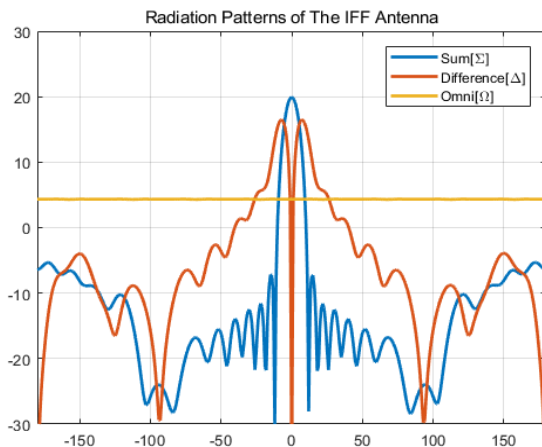


그림 10. 단위소자의 방사 패턴
Fig. 10. Radiation pattern of unit element

그림 10은 시뮬레이션 통하여 얻어진 합, 차 옴니 방사 패턴 결과이다. 합 패턴의 Directivity는 20.79dBi, 빔폭은 수평 7.32°, 수직 40.73°으로 요구 성능을 만족하였다. 옴니 패턴의 Directivity는 5.03dBi, ISLS EBW는 12.58°였으며 차 패턴과의 합 패턴의 교차점인 RSLR EBW는 3.75° (K계수 9dB)로 차기 구축합용 피아식별 안테나로써 요구되는 성능이 모두 충족되는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 차기 구축합을 위한 피아식별장치의 구성을 제안하고 그에 따른 원형 위상배열 안테나를 설계하여 그 성능을 확인하였다. 기존 복수의 안테나를 사용하던 피아식별 안테나를 단일의 위상배열 안테나를 적용하여 합, 차, 옴니 패턴을 모두 형성할 수 있음을 확인하였다. 또한, 합 패턴과 차 패턴의 Directivity는 각각 20.79dBi, 5.03dBi이며, ISLS EBW는 12.58°, RSLR EBW는 3.75° (K계수 9dB)으로써 차기 구축합의 피아식별 체계가 요구하는 안테나의 전기적 성능을 모두 충족하는 것을 EM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

References

- [1] Shen Junhao, Li Hongmei, and Wu Chao, "IFF antenna sharing the reflector with the C-band radar", Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Guangzhou, China, pp. 293-295, Nov. 2010.
- [2] N. K. Shaw and A. A. Simolunas, "System Capability of Air Traffic Control Radar Beacon System", Proceeding of the IEEE, Vol. 58, No. 3, pp. 399-407, Mar. 1970.
- [3] ICAO, Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems. 2004.
- [4] ICAO, Aeronautical Telecommunications, Vol. IV, Jul. 2007.
- [5] Z. W. Zhou, S. W. Yang, and Z. P. Nie, "A novel broadband printed dipole antenna with low

cross-polarization", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 11, pp. 3091-3093, Nov. 2007.

- [6] K. H. Baek, Y. C. Chang, and T. H. Son, "A Design of Broadband Double Polarized Dipole Antenna for the Mobile Communication Base Station", Journal of KIIT, Vol. 17, No. 6, pp. 45-54, Jun. 2019.
- [7] C. A. Balanis, "Antenna theory analysis and design 4th edition", John Wiley & Sons, Inc. Canada, pp. 363-367, 2016.
- [8] N. Uzan, S. Turan, and S. A. Colak, "IFF system simulator design based on DSP", in 2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference(SIU), Zonguldak, Turkey, pp. 1589-1592, May 2016.

박진우 (Jin-Woo Park)



2007년 2월 : 광운대학교
전파공학과(공학석사)
2009년 4월 ~ 현재 : 한화시스템
전문연구원
관심분야 : 안테나 설계

조정일 (Jug-Il Cho)



2011년 2월 : 인하대학교
전자전공학(공학석사)
2011년 4월 ~ 현재 : 한화시스템
전문연구원
관심분야 : Massive MIMO

저자소개

정인하 (Inha Jung)



2012년 10월 : University of
Southampton, UK
무선통신공학(공학석사)
2016년 4월 ~ 현재 : (주)한화시스템
전문연구원
관심분야 : 안테나 설계

유병길 (Byung-Gil Yu)



2010년 2월 : 광운대학교
전파공학과(공학박사)
2010년 4월 ~ 현재 : (주)한화시스템
수석연구원
관심분야 : 안테나 설계