가시선 데이터링크용 저피탐 안테나에 관한 연구

박진우^{*,1)} · 유병길¹⁾ · 정은태¹⁾ · 박일현²⁾ · 서종우²⁾ · 정재수²⁾

¹⁾ 한화시스템(주) 통신·전자전팀

²⁾ 국방과학연구소 제2기술연구본부

A Study on Antenna of Low-Probability of Intercept for LOS Datalink System

Jinwoo Park^{*,1)} · Byunggil Yu¹⁾ · Euntae Jung¹⁾ · Ilhyun Park²⁾ · Jongwoo Seo²⁾ · Jaesoo Jung²⁾

¹⁾ Communication-CW Team, Hanwha Systems Co., Ltd., Korea

²⁾ The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 11 March 2021 / Revised 24 May 2021 / Accepted 16 July 2021)

Abstract

In this paper, an array antenna for LOS datalink for mounting UAV(Unmanned Aerial Vehicle) of low-probability of intercept is presented. For low RCS, radome was designed by conformal form, and other components were inserted into the UAV. The antenna of the transmitter and receiver are each composed of 12×12 array antennas, and include a beam steering function by controlling the phase of the unit element for the Uni-directional pattern and the Bi-directional pattern. As a result of the measurement of the manufactured antenna, it was confirmed that all the required specifications were met, and the installing possibility of the UAV platform on low-probability of intercept in the future was confirmed.

Key Words : Array Antenna(배열안테나), Conformal Antenna(컨포멀 안테나), Datalink(데이터링크), Ku-band(Ku 대역)

1. 서론

최근 국내외 무인기에 대한 요구가 증가하고 있으며 이에 따른 기술개발이 급속도로 발전하고 있다. 군용 무인기는 네트워크 중심전(NCW: Network Centric Warfare)에 입각하여 전술 데이터링크 및 대용량 정보 전송용 데이터링크 분야를 시작으로 기술개발이 이루어

어졌으나 기술 성숙도의 증가와 화물수송, 정밀농업, 택배 등 다양한 활용 분야에서 증가하는 수요로 인해 민수분야에서도 많은 연구기관에서 개발하고 있다^[1]. 특히 군용 무인기의 경우 감시정찰 분야에서 시작하여 공격 기능을 보유한 무인기로 발전하고 있으며, 이에 따라 적의 레이더 시스템에 포착되지 않도록 스텔스 기능이 추가되는 저피탐 형태의 무인기로 기술개발이 요구되는 상황이다.^[2] 군용 무인기의 활용방안은 Fig. 1과 같다.

* Corresponding author, E-mail: jw0822.park@hanwha.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

Fig. 1. Use of military UAV

저피탐 형태의 무인기 성능을 확보하기 위해 레이더로부터 입사되는 전자파가 레이더 방향으로 반사되는 값이 최소화하도록 기체 외부에 돌출되는 형태를 제거한 형상으로 개발하여야 하며 저피탐 무인기 형상과 관련된 세부 구성품에 대해서는 해외 선진국에서도 극비리에 개발하고 있다^[3]. 기존 무인기에 사용된 가시선 데이터링크용 안테나는 기계적 구동부를 결합한 안테나를 주로 사용하였으며, 무인기의 용도와 허용되는 크기, 무게 등에 따라 1축 또는 2축 구동기를 결합한 형태를 갖는다. 해외 선진사의 가시선 데이터링크 안테나는 Fig. 2와 같다.

(1) AC-20 CDL antenna(EMS社) (2) CDL antenna(L3Com社)

Fig. 2. Advanced company datalink antenna

본 논문에서는 기구적 구동부 기능을 전자적 방식으로 빔조향이 가능하며 저피탐 무인기 형태에 적합한 컨포멀 형태의 배열안테나에 대한 연구결과를 제시하고자 한다.

2. 가시선 데이터링크용 안테나 설계

가시선 데이터링크용 통신장비의 주파수 대역은 주로 X, Ku 대역을 사용하며 본 논문에서는 한국형 데

이터링크에서 주로 사용하는 주파수 대역인 Ku 대역의 데이터링크 안테나를 설계하였다^[4]. 가시선 데이터링크용 안테나의 설계 규격은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of proposed antenna

항목	설계 규격	비고
주파수	Ku 대역	
이득	6 dBi 이상	Bi-directional 패턴 기준
편파	수직 선형편파	
빔조향	방위각: 0~360° 고각: 0~60°	Uni-directional 패턴 기준
방사패턴	Uni & Bi-directional 패턴	패턴 변환기능
형상	컨포멀 구조	레이돔 적용

방사패턴 설계 규격에서 ‘Uni & Bi-directional 패턴’은 Uni-directional 패턴과 Bi-directional 패턴을 각각 형성하는 것을 의미한다. 본 논문에서의 Uni-directional 패턴은 하나의 빔이 ϕ , θ 방향으로 빔조향 범위 내에서 패턴을 형성하는 것이며, Bi-directional 패턴은 2개의 빔을 ϕ 방향으로 180° 간격으로 고정하여 형성하고 ϕ 방향으로 빔조향 하는 것으로 정의하였다.

설계된 안테나는 저피탐 무인기에 장착할 수 있도록 삽입되는 형상으로 Ku 대역에서 동작하는 안테나는 장착 플랫폼의 내부에 충분히 삽입될 수 있는 크기로 레이돔을 컨포멀 형태로 구성하여 RCS 영향성을 최소화하는 형상으로 Fig. 3과 같다.

Fig. 3. Geometry of conformal antenna installed platform

제안된 안테나의 내부 구성은 레이돔부터 복사부, 방열판, 급전 및 제어부, 전원부, 냉각팬, 하우징 등으로 구성된다. 상세 형상은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. 3D Model of proposed antenna

2.1 배열안테나 설계

전자적으로 빔조향이 가능한 평면 배열안테나의 방사패턴($F(\theta)$)은 배열안테나 단위소자의 방사패턴(EP)과 Array Factor(AF)와의 관계를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\theta) = EP \cdot AF \quad (1)$$

단위소자의 방사패턴(EP)과 Array Factor(AF)에 의해 배열안테나의 합성된 방사패턴을 결정할 수 있다. Array Factor는 단위소자의 간격 및 주파수에 따라 결정되며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$AF = \sum_{l=1}^{M \cdot N} C_l e^{j \left(\frac{2\pi}{\lambda} x_l \sin\theta \cos\phi - \frac{2\pi}{\lambda} y_l \sin\theta \sin\phi \right)} \quad (2)$$

$$C_l = c_l e^{j \left(\frac{2\pi}{\lambda} x_l \sin\theta_0 \cos\phi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} y_l \sin\theta_0 \sin\phi_0 \right)}$$

C_l 은 단위소자의 가중치, x_l 과 y_l 은 단위소자의 위치를 나타내며 θ_0 , ϕ_0 는 방사패턴 빔조향 시 지향각도를 의미한다.

Fig. 5. Antenna design model

제안된 배열안테나의 단위 소자는 마이크로스트립 패치 안테나 구조로 유전율 2.17과 손실탄젠트 0.0009를 갖는 Taconic社의 TLY-5A-0400-1oz 기판을 사용하

여 설계하였다. 배열 안테나의 구조는 안테나의 이득 설계 규격에 따라 12×12 배열로 송신부와 수신부 각각 적용하였으며, 추후 확장성을 고려하여 4×4 배열을 기본구조로 하는 타일을 3×3 배열로 Fig. 5와 같이 설계하였다^[6].

배열소자의 간격은 등간격(Uniform)구조를 적용하였으며, 단위소자의 크기와 간격은 Table 2와 같다.

Table 2. Design parameter

설계 파라미터	송신부	수신부
단위소자 가로 길이(W)	6.0 mm	5.85 mm
단위소자 세로 길이(L)	5.97 mm	5.74 mm
단위소자 간 가로 간격(d_x)	10.6 mm	10.26 mm
단위소자 간 세로 간격(d_y)	10.6 mm	10.26 mm

그레이팅 로브가 발생하는 지점은 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며 d_x , d_y 는 단위소자 간 간격을 의미한다^[7].

$$\begin{aligned} u_p &= u_0 + p\lambda/d_x & p &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ v_q &= v_0 + q\lambda/d_y & q &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

이상적으로 d_x , d_y 가 0.5λ 이하의 경우 그레이팅 로브가 발생하지 않지만 단위소자의 형태, 제작 등을 고려할 경우 0.5λ 간격을 유지하기 어렵다. 설계된 안테나의 단위소자 간 간격은 송신 및 수신 대역의 중심 주파수를 기준으로 약 0.6λ 간격을 유지하도록 설계하였다.

가시선 데이터링크용 저피탐 안테나는 FDD 통신방식을 사용하는 기저대역조립체와 연동하는 것을 고려하였기 때문에 송신, 수신을 동시에 사용한다. 따라서 본 논문에서 제안한 안테나는 송신안테나와 수신안테나를 독립적으로 사용할 수 있도록 설계하였다.

2.2 RF부 설계

전자적 빔조향을 위해 단위소자에 위상을 제어할 수 있도록 송신부와 수신부에 각각 RF칩을 각각 연결하여 구성하였으며 RF칩 내부에는 증폭기, 위상변환기, 감쇠기 그리고 RF칩 제어를 위한 직렬변환기로 구성되어있다. RF칩 내부의 증폭기와 감쇠기는 본 논문에서 단위소자의 가중치를 일정하게 유지하기 위한 용도로 사용하였다. RF칩의 성능은 Table 3과 같다.

Table 3. RF chip specification

파라미터	송신부	수신부
주파수 범위	14.5~15.5 GHz	14.5~15.5 GHz
이득	10 dB	10 dB
OP1dB	15 dBm	-
잡음지수	-	3
위상변환기 해상도	4 bit (22.5°)	4 bit (22.5°)
감쇠기 해상도	5 bit (0.5 dB)	5 bit (0.5 dB)

RF부를 포함하는 배열안테나의 기본 블록도는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6. Block diagram(Tx(1), Rx(2))

배열안테나와 RF칩을 결합하여 1타일 기본모델(4×4 배열)을 구성하고 기본모델을 기반으로 타일 기준 3×3으로 배열하여 결과적으로 12×12 배열안테나로 설계하였으며, 각 타일을 결합하기 위해 전력분배기(송신부)와 결합기(수신부)를 사용하였다. RF칩의 감쇠기는 전력분배기(송신부)와 결합기(수신부)를 사용할 경우 각 단위소자에 동일한 입력값을 인가하기 위해 사용하였다.

제안한 배열안테나의 전자기 해석은 3DS社의 CST STUDIO SUITE를 이용하여 분석하였으며, 설계된 안테나의 주요 규격 중 이득, 빔조향, 방사패턴에 대한 안테나 복사 성능을 확인하기 위해 각 단위소자에 위상을 제어하여 Uni-directional 패턴과 Bi-directional 패턴을 형성하였다. Bi-directional 패턴의 경우 2개의 복사패턴 형성이 필요하기 때문에 배열 안테나의 제어 영역을 2등분하여 복사패턴을 형성할 수 있도록 구성하였으며, 송신부 및 수신부에 각각 적용한 제어 영역은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7. Control region for Bi-directional pattern

송신부 및 수신부 각각 대역별 중심 주파수(f_c)에서 Uni-directional 패턴과 Bi-directional 패턴을 모의시험을 통해 분석하였다. Uni-directional 패턴에서 θ 방향으로 60° 빔조향 시 약 3.5 dB 정도 이득 저하가 발생하였으며, 이는 단위소자의 고각 패턴의 빔폭이 방위각 패턴보다 좁아 ϕ 0° / θ 60° 대비 ϕ 90° / θ 60°일 때보다 90°일 때 이득 저하가 0.5 dB 더 발생하였다. 그레이팅 로브는 θ 60° 빔조향 시 17 dBi 수준으로 발생하였으며 앞서 언급한대로 단위소자간 간격으로 인해 발생하였다. Uni-directional 패턴의 분석 결과는 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

ϕ 0°, 45°, 60° / θ 60° 일 때 송신부 및 수신부의 Bi-directional 패턴 모의시험 결과는 Fig. 10, Fig. 11과 같다.

Fig. 8. Uni-directional pattern(Simulation/Tx)

Fig. 9. Uni-directional pattern(Simulation/Rx)

Fig. 10. Bi-directional pattern(Simulation/Tx)

Fig. 11. Bi-directional pattern(Simulation/Rx)

Bi-directional 패턴에 대한 모의시험 분석 결과 $\phi 0^\circ$ (θ 는 60° 로 고정)에서는 양쪽에 형성된 패턴 이득이 유사하며, $\phi 45^\circ$, 90° 로 빔 형성 시 이득 차이가 약 2.5 dB 정도 발생한다. 단위소자의 복사패턴에 따른 발생하는 이득 차이가 반영된 것을 확인하였다.

Uni-directional 패턴과 Bi-directional 패턴 형성 시 이득 분석결과는 Table 4와 같다. 안테나 개구면을 임의로 2등분한 Bi-directional 패턴의 이득은 안테나 개구면을 전부 사용하는 Uni-directional 패턴 대비 3 dB 정도 낮음을 확인할 수 있었으며, 이는 배열 안테나 개수만큼 이득차이가 발생하는 것과 동일함을 분석을 통해 확인할 수 있었다.

Table 4. Tx/Rx Antenna gain simulation results

방사패턴	송신 이득	수신 이득
Uni-directional 패턴	19.9 dBi 이상	19.7 dBi 이상
Bi-directional 패턴	16.9 dBi 이상	16.9 dBi 이상

무인기를 포함한 항공기 플랫폼에 장착되는 안테나는 외부 환경으로부터 보호하며 전자기 특성을 보장하기 위해 낮은 투과손실을 갖는 레이돔이 필요하다. 본 논문에서 제안한 레이돔은 1 dB 이하의 낮은 투과손실 특성과 경량화를 위해 샌드위치 구조를 적용하였다. 설계된 레이돔 형상은 Fig. 12와 같다.

Fig. 12. Radome model

레이돔의 전파특성을 확인하기 위해 Uni-directional 패턴을 기준으로 $\phi 0^\circ$, $\theta 60^\circ$ 로 빔조향 시 레이돔이 없을 경우 모의시험을 통해 약 23 dBi의 이득을 확인하였다. 안테나와 레이돔 간 이격을 10 mm부터 20 mm까지 변화시킬 때 안테나와 레이돔 간 거리가 가장 가까운 10 mm에서 0.9 dB 이득 열화가 발생하였고 20 mm 일 때 0.3 dB 이득이 열화됨을 확인하였다. Ku 대역에서 낮은 투과손실을 확인하였으며 모의시험 결과는 Fig. 13과 같다.

Fig. 13. Simulated radiation pattern with radome

3. 제작 및 측정결과

모의시험을 통해 확인된 결과를 기반으로 제작된 안테나 형상은 Fig. 14와 같다. 하나의 하우징 내부에 송신부와 수신부의 배열안테나를 배치하였다.

Fig. 14. Fabricated Antenna

탑재 플랫폼 내부로 인입되는 부분을 제외한 레이돔은 탑재 플랫폼 형상과 동일하게 곡면 형상으로 제작하였으며, 저피탐 성능을 확보하기 위해 레이돔 끝 부분은 saw-tooth 형상을 적용하여 제작하였다.

근접전계 측정방식을 적용하여 배열안테나의 성능을 확인하였으며 지향 각도 별 Uni-directional 패턴 및 Bi-directional 패턴 형성에 따른 최대 이득은 Table 5와 같다.

안테나 성능 측정 시 복사소자만 별도로 측정이 어렵기 때문에 전력분배기(송신부), 결합기(수신부), RF 칩, 급전부 및 레이돔 손실 등을 포함한 성능으로 확인하였다.

Table 5. Measurement of Antenna gain

패턴	Phi	Theta	송신부	수신부
Uni-directional 패턴	0°	0°	22.9 dBi	18.2 dBi
	0°	60°	17.5 dBi	14.5 dBi
	90°	60°	14.2 dBi	10.6 dBi
Bi-directional 패턴	0°	60°	15.9 dBi	11.4 dBi
	90°	60°	12.5 dBi	10.0 dBi

Uni-directional 패턴 측정 결과 송신부 및 수신부의 이득 차이는 약 4 dB 정도 발생하였다. 주된 요인은 송신부의 증폭기와 수신부의 저잡음 증폭기의 출력차이 및 송신부 분배기와 수신부 결합기의 손실 차이로 인해 발생한 것으로 분석되었다.

theta 방향의 빔 조향 각도는 60°로 고정하고 phi 방향만 0°로 각각 빔 제어하였을 때 Bi-directional 패턴의 측정결과에서는 송신부와 수신부가 동일하게 4 dB 차이가 발생하였다. phi 90° 방향으로 빔 제어 시 송신부와 수신부 이득 차이는 약 2.5 dB 차이가 발생하였으며, 이는 측정 시 발생한 오차로 분석되었다.

Uni-directional 패턴 결과와 Bi-directional 패턴 결과에서 theta 60° 일 때 phi 0°, 90° 간 이득 차이는 단위 소자의 패턴에 의한 차이와 동일하게 약 3 dB 차이가 발생함을 모의시험 결과와 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.

송신부와 수신부의 Uni-directional 2D 패턴은 Fig. 15 ~ Fig. 17과 같다. 모의시험 결과와 측정 결과를 도시하였으며, 측정 결과는 제작된 안테나 구조 상 배열안테나 복사소자의 성능만 측정하기 어려운 관계로 정규화한 패턴을 통해 분석하였다.

Fig. 15. Uni-directional pattern of simulation and measurement(phi 0°, theta 0°)

Fig. 16. Uni-directional pattern of simulation and measurement(phi 0°, theta 60°)

Fig. 17. Uni-directional pattern of simulation and measurement(phi 90°, theta 60°)

Uni-directional 패턴 결과에서 송신부와 수신부의 빔 제어 방향으로 최대 이득이 형성됨을 확인하였다. 다만 모의시험결과와 패턴과 측정결과 간 패턴차이가 약 8 dB 발생하는 부분이 나타났으며, 이는 모의시험시 반영된 이상적인 위상값과 위상변환기의 분해능에 의한 위상값 차이로 인해 발생한 것으로 분석되었다.

Fig. 18. Bi-directional pattern of simulation and measurement(phi 0°/180°, theta 60°)

Fig. 19. Bi-directional pattern of simulation and measurement(phi 90°/270°, theta 60°)

또한, RF칩이 실장되는 PCB에 제어신호 경로, 전원 신호 경로 및 RF신호 경로가 제한된 면적에 복잡적으로 라우팅하여 제작하였으며, 이에 따라 발생한 간섭 신호로 인해 위상변환기의 제어신호 오차가 발생한 것으로 분석되었다.

Bi-directional 패턴의 모의시험결과와 측정결과를 Fig. 18, Fig. 19와 같다. phi 90°, theta 60° 일 때 양쪽 패턴 차이는 약 3 dB 발생하였으며, 모의시험 분석결과와 마찬가지로 단위소자의 Elevation 패턴의 $\pm 60^\circ$ 지점에서 이득차이가 약 2.5 dB 발생됨에 따라 나타난 것으로 분석되었다. 모의분석결과와 측정결과와의 차이는 Uni-directional 패턴의 결과와 유사하게 위상변환기의 분해능 및 다층 PCB 기반 라우팅에 따른 신호 간섭에 의한 제어신호 오류로 인해 발생한 것으로 분석되었다.

4. 결론

제작 및 측정 결과 주어진 안테나 설계 사양을 충족하였으며 저피탐 무인기 탐재를 위한 saw-tooth 형상의 키포멀 형태의 레이돔으로 설계, 제작하였다. 제안한 배열 안테나의 측정 결과 단위소자에 인가되는 위상을 제어함으로써 Uni-directional 패턴 및 Bi-directional 패턴 형성 및 전자적으로 빔조향이 가능한 것을 확인하였다. 제안된 안테나 구조는 타일 형태를 기본구조로 하여 요구되는 이득 규격에 따라 타일 갯수를 가변적으로 조정하여 규격을 충족할 수 있는 장점이 있다. 하지만 동작주파수가 높아질수록 기본 타일의 크기는 작아지게 되어 RF칩 및 복사소자가 실

장되는 PCB 설계가 복잡해지는 단점이 발생한다. 이러한 부분은 단위소자 당 하나의 RF칩이 적용된 제안된 구조에서 하나의 RF칩으로 여러 개의 단위소자를 제어할 수 있는 다채널 RF칩을 적용하여 PCB 내부의 RF신호 경로, 제어신호 경로 및 전원신호 경로를 상대적으로 단순화하여 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 회로의 간결한 구성을 통해 단위 복사소자 간 간격을 줄일 수 있어 빔조향 시 그레이팅 로브를 억제할 수 있을 것으로 예상된다.

향후 저피탐 무인기 운용 방안에 따른 통신 운용 규격이 명확하고 구체적으로 정의되면 본 논문에서 제안한 위상배열안테나의 세부 설계 규격의 재정의가 필요하며, 통신신호의 변복조 기능을 수행하는 기저대역조립체와 연동을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지원으로 수행되었음.

References

- [1] M. Shin, "Research on Domestic and Overseas Status of the UAV Industry and Demand based Development Plans," Korea Aerospace Industries Association, Research Report, 2016.
- [2] M. Han, "Defense S&T Promotion Policy," Ministry of National Defense. Republic of Korea, 2014.
- [3] M. H. Sohn, J. H. Jung, J. Lee, H. H. Kwag, "Stealth Aircraft Technology and Future Air Warfare," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 81-92, 2019.
- [4] J. Y. Lee. "Rain Attenuation Analysis for Designing UAV Data Link on Ku-Band," Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 40, No. 7, pp. 1248-1256, 2015.
- [5] A. D. Brown, "Electronically Scanned Arrays MATLAB Modeling and Simulation," CRC Press, Taylor & Francis Group. USA, pp. 36-63, 2012.
- [6] J. W. Jung, J. H. Ryu, T. H. Joo, K. C. Kim, I. H. Park, J. W. Seo, "Adaptive Shape Active Phased Array Antenna for Communication Systems," Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 44, No. 4, pp. 39-47, 2017.
- [7] R. J. Mailloux, "Phased Array Antenna Handbook, 2nd ed," Artech House, MA. USA, 2005.