THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2025 April; 36(4), 408～418.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2025.36.4.408
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

# 평면 위상 배열 안테나를 탑재한 드론 편대의 신호 정보 수집 기법

# SIGINT Drone Formation Including Plannar Phased-Array Antenna

임은열 · 진태경 · 심홍석* · 서원기** · 추호성

En-yeal Yim · Taekyung Jin · Hongsuk Shim* · Wongi Seo** · Hosung Choo

## 요 약

본 논문에서는 위상 배열 안테나를 탑재한 신호 수집용 드론 편대 시스템을 제안한다. 제안된 신호 정보 수집(SIGINT) 시스템은 안테나 소자를 다수의 드론 기체에 탑재하여 높은 고도에서 운용되며, 먼 거리까지 전파 가시 거리(LOS)를 확보하여 한반도 지역에 위치한 신호 정보를 수집할 수 있다. 이때, 제안된 신호 정보 수집 시스템은 다양한 대역에서 발생하는 신호를 수집하기 위해, 서로 다른 3개의 대역(Band-1, 2, 3)에서 동작하는 소자들로 구성된 공통개구면 배열 안테나를 탑재한다. 각 대역의 소자들은 64개(16×4), 256개(32×8), 그리고 1,024개(64×16) 소자로 구성되어 드론 한 기에 탑재된다. 이러한 구성에서, 안테나 소자를 탑재한 다수의 드론 기체들은 하나의 편대를 구성하여 운용되며, 시스템의 운용 목적에 따라 드론 기체들의 배열 형상을 변형한다. 제안된 시스템에 탑재되는 3개 대역의 소자들은 −3 dB를 기준으로 38.8 %, 35.3 %, 그리고 28.6 %의 대역폭을 갖는다. 4대의 드론이 추적 모드로 운용되고 0°에서 40°까지 전기적 빔 조향을 하는 경우, 3개 대역에서 전면 방향 AF(array factor)의 최소 크기는 각각 45.8, 57.9, 그리고 69.4 dB로 나타난다.

## Abstract

In this paper, we propose a drone formation system consisting of a phased-array antenna for signal information collection (SIGINT) systems. The proposed SIGINT system operates at high altitudes by mounting antenna elements on drones that can collect signal information on the Korean Peninsula through long-range radio line-of-sight (LOS) communication. To collect the signals generated in various bands, the proposed SIGINT system employs a shared-aperture array antenna operating in three different bands. Bands 1, 2, and 3 consisted of 64(16×4), 256(32×8), and 1,024(64×16) elements, respectively, and were mounted on a drone. In this configuration, drones with antenna elements form a structure that changes according to the operational purpose of the system. The elements of bands 1, 2, and 3 had bandwidths of 38.8 %, 35.3 %, and 28.6 %, respectively, based on −3 dB. When the main beam with four drones was steered from 0°to 40°in the tracking mode, the array factors (AFs) in the bore-sight direction of the three bands were greater than 45.8, 57.9, and 69.4 dB, respectively.

Key words: Phased-Array Antenna, SIGINT System, Drone Formation, Antenna Beamforming

---

「이 논문은 2023년도 넥스윌(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임(202302910001).」

홍익대학교 전자전기공학부(Hongik University School of Electronic and Electrical Engineering)

*한화시스템(Hanwha Systems)

**넥스윌(Nextwill)

· Corresponding Author: hosung choo (e-mail: hschoo@hongik.ac.kr)

· Manuscript received October 12, 2024 ; Revised November 7, 2024 ; Accepted November 29, 2024. (ID No. 20241012-111)



ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Ⅰ. 서 론

최근 군사 및 보안 관련 기술 분야에서는 넓은 지역에서 발생하는 미확인 신호 정보를 효율적으로 수집할 수 있는 기술에 대한 관심이 증대되고 있다[1]. 이러한 신호 정보 수집(SIGINT) 시스템에는 지상에 위치한 신호원을 정밀하게 탐지 및 추적하기 위해 전기적 빔 조향이 가능한 평면형 위상 배열 안테나가 보편적으로 사용된다. 신호 정보 수집 시스템을 지상에서 운용하는 경우, 산이나 건물 등의 지형지물로 인해 전파 가시 거리(line of sight)가 확보되지 못하는 문제가 발생할 수 있다[2]. 이를 해결하기 위해, 무인기(드론)[3], 항공기[4], 그리고 위성[5] 등에 안테나 소자를 탑재하여 높은 고도에서 신호 정보 수집 시스템을 운용하는 방법이 사용되고 있다. 그러나, 무인기 및 항공기 기반 시스템은 탑재 공간과 중량의 제한으로 인해 많은 수의 안테나 소자를 장착할 수 없다는 한계점이 존재한다. 위성 기반 시스템의 경우 운용 비용이 높으며, 장거리 전파 경로와 전리층의 영향으로 인해 전파 감쇠가 크게 발생하는 문제가 있다[6]. 또한, 종래의 신호 정보 수집 시스템은 특정 방향에서만 신호를 탐지 및 추적할 수 있어 다양한 방향의 신호를 동시에 수집하는 데 한계가 있다. 따라서, 탑재체의 탑재 가능 용량과 신호 탐지 방향을 고려하고 편대 구성을 유연하게 조절할 수 있는 다수의 탑재체로 구성된 신호 정보 수집 시스템에 대한 연구가 요구되는 실정이다.

본 논문에서는 위상 배열 안테나를 탑재한 신호 수집용 드론 편대 시스템을 제안한다. 제안된 신호 정보 수집(SIGINT) 시스템은 안테나 소자를 드론에 탑재하여 최대 2 km의 높은 고도에서 운용함을 가정하였으며, 이 고도에서 최대 159.5 km까지 전파 가시 거리를 확보하여 한반도 지역 내 신호 정보를 수집할 수 있다. 또한, 다양한 대역에서 발생하는 신호 정보를 수집하기 위해, 서로 다른 3개의 대역에서 동작하는 소자들로 구성된 광대역 공통 개구면 배열 안테나가 드론의 하부에 탑재된다. 이때, 안테나 소자를 탑재한 드론 기체들은 하나의 편대를 구성하여 운용되며, 시스템의 운용 목적에 따라 드론 기체들의 배열 형상을 유동적으로 변경할 수 있다. 탐지 모드의 경우, 드론 기체들이 원형 또는 사각형 형상으로 배열되어 기존 평면형 위상 배열 안테나 대비 더 넓은 방향에 대해 탐지를 수행한다. 반면에, 추적 모드에서 신호원이 탐지된 방향에 대해 드론 기체들이 수직으로 선형 배열되며, 탐지 모드에 비해 장거리에 존재하는 신호원의 추적을 더 정밀하게 수행한다. 그러나, 제안된 신호 정보 수집 시스템의 구성에서는 드론 기체의 진동, 기류에 의한 드론 위치 변화, 그리고 조작 오차로 인해 드론 간 배열 이격이 발생할 수 있다. 이러한 드론 간 배열 이격은 조향하는 방향의 이득 감소, 조향 각도 오차, 그리고 부엽 레벨의 감소와 같은 전기적 성능 저하를 발생시킨다. 따라서, 제안된 신호 정보 수집 시스템에는 자석과 레일로 구성된 드론 도킹 프레임이 적용된다. 이러한 구성에서 시스템이 추적 모드로 운용되는 경우, 프레임의 자석을 통해 이격된 드론들이 물리적으로 접촉하게 되고, 드론 간 배열 이격으로 발생하는 전기적 성능 저하를 최소화할 수 있다.

## Ⅱ. 신호 정보 수집 시스템의 구성

그림 1은 신호 정보 수집 시스템을 위해 제안된 위상 배열 안테나를 탑재한 드론 편대의 형상을 나타낸다. 제안된 시스템은 높은 고도에서 운용되어 전파 가시 거리를 확보하며, 다양한 대역에서 발생하는 신호원을 탐지하기 위해 3개의 서로 다른 대역 1~2 GHz(Band-1), 2~4 GHz(Band-2), 그리고 4~8 GHz(Band-3)에서 동작하는 광대역 공통개구면 배열 안테나가 사용된다. 이때, 드론 한 기에 탑재되는 안테나의 개구면은 일반적인 상용 드론[7]의 크기를 고려하여 가로 길이 1.2 m, 세로 길이 0.3 m의 크기를 갖는다. 그러나, 일반적인 상용 드론의 탑재 가능

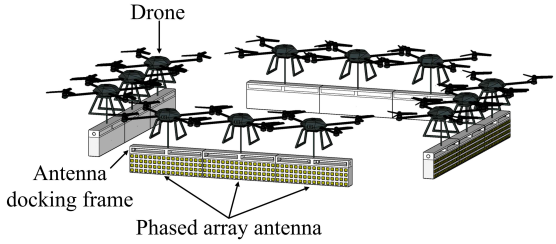
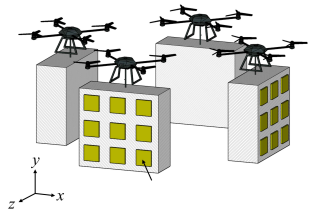


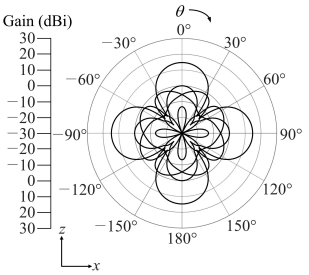

그림 1. 신호 정보 수집용 드론 편대의 형상
Fig. 1. Geometry of the SIGINT drone formation.

한 무게는 10 kg 미만이기 때문에, 하나의 드론에 탑재할 수 있는 배열 소자의 수는 안테나 단위셀의 기판과 커넥터의 무게를 고려하여 1,400개 미만으로 제한된다. 드론의 탑재 가능한 무게를 고려하여, 배열 소자들은 x축과 y축 방향에 대해 각각 0.6 λ, 0.75 λ의 간격으로 반파장보다 넓은 배열 간격을 가지도록 설계되었으며, Band-1, 2, 3 소자들은 각각 64개(16×4), 256개(32×8), 그리고 1,024개(64×16) 소자 수로 구성된다. 제안된 시스템은 elevation 각도보다 azimuth 각도에서 넓은 조향 범위(±40°)를 확보하여 넓은 탐지 범위 (133.4 km)를 갖는다. 또한, 제안된 시스템은 최대 2 km의 높은 고도에서 운용되기 때문에 좁은 빔 조향 각도 (±15°)로도 지상으로부터 고도 535 m까지 위치한 신호원을 탐지할 수 있다. 추가적으로, 제안된 신호 정보 수집 시스템은 자석과 레일로 구성된 드론 도킹 프레임을 갖는다. 이러한 구성에서, 제안된 시스템은 추적 모드로 운용될 때 드론 기체의 진동, 기류, 그리고 조작 오차로 발생하는 전기적 성능 저하를 최소화할 수 있다.

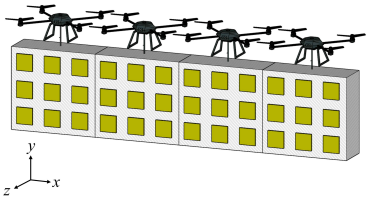
그림 2는 제안된 신호 정보 수집용 드론 편대의 동작 모드에 따른 드론 배열 형상과 방사 패턴을 모식도로 나타낸 것이다. 드론 편대가 탐지 모드로 운용될 때, 드론 기체들은 사각 또는 원형 배열을 형성한다. 이때, 각 기체의 안테나 소자가 서로 다른 방향으로 전기적 빔 조향을 수행하여, 기존 평면형 배열 안테나 구성보다 더 넓은 범위에 대한 탐지를 수행할 수 있다. 특정 방향에서 신호원이 탐지되는 경우, 드론 기체들은 탐지된 방향에 대해 수직하게 선형으로 배열되어 전체 편대를 구성한다. 이러한 구성에서, 모든 드론 기체에 탑재된 안테나 소자들은 신호원이 탐지된 방향에 대해 전기적 빔 조향을 수행하여, 탐지 모드에 비해 장거리에 존재하는 신호원을 정밀하게 추적할 수 있다. 그림 2와 같이, 4대의 드론에 각각 3×3 사각 배열 형상의 소자를 탑재하여 드론 편대를 구성하는 경우, 탐지 모드에서 각 드론 기체에 탑재된 3×3 사각 배열 소자들의 전면 방향 이득은 8 GHz에서 모두 14.7 dBi, 반전력빔폭은 32°로 나타난다. 이때, 추적 모드로 전환되는 경우, 전면 방향 이득은 탐지 모드 대비 5.8 dBi 증가하고, 반전력빔폭은 6° 감소하여 먼 거리에서의 정밀한 추적을 가능하게 한다.



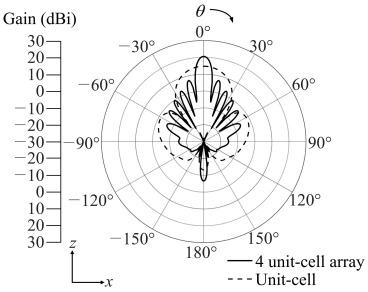

(a) 탐지 모드의 형상
(a) Geometry of the detecting mode




(b) 탐지 모드의 방사 패턴
(b) Radiation pattern of the detecting mode



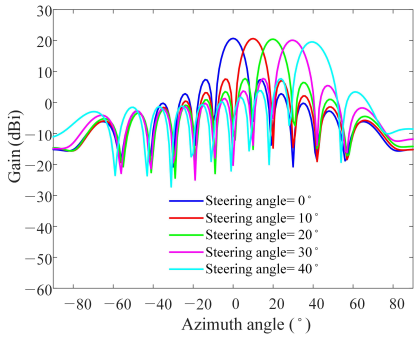

(c) 추적 모드의 형상
(c) Geometry of the tracking mode



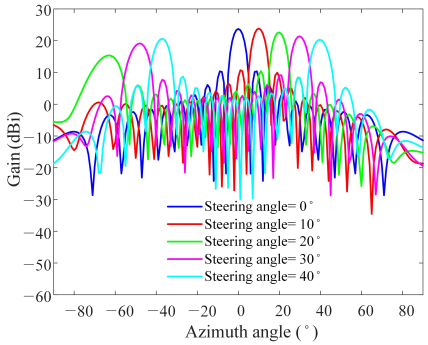

(d) 추적 모드의 방사 패턴
(d) Radiation pattern of the tracking mode

그림 2. 신호 정보 수집용 드론 편대의 동작 모드 및 방사 패턴
Fig. 2. Operating mode and radiation pattern of the proposed SIGINT drone formation.

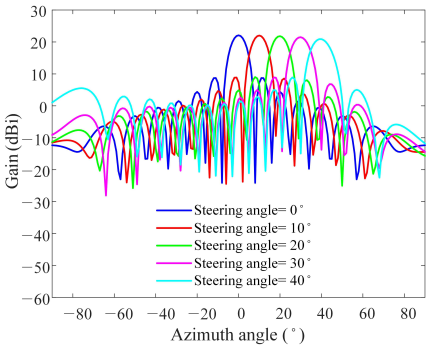
그림 3은 배열 간격에 따른 배열 안테나 소자의 방사 패턴 변화를 보여준다. 공통개구면 배열 안테나 설계에 적용될 배열 간격을 결정하기 위해, 간격에 가장 민감한




(a) 배열 간격이 0.5 λ일 때 성능 변화
(a) Performance variations at array interval of 0.5 λ




(b) 배열 간격이 0.8 λ일 때 성능 변화
(b) Performance variations at array interval of 0.8 λ

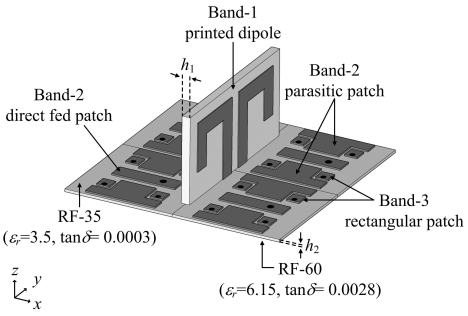



(c) 제안된 배열 구성에서의 성능 변화
(c) Performance variations of the proposed array configuration

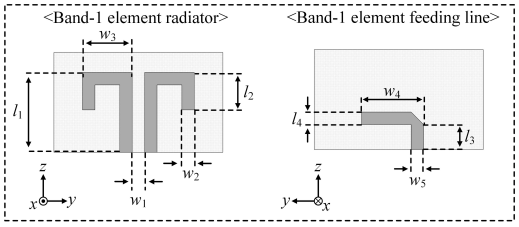
그림 3. 배열 간격에 따른 배열 안테나 성능 변화
Fig. 3. Variations of the array antenna according to the array interval.

band-3(8 GHz)의 배열 간격에 따른 성능을 확인하였다. 제안된 배열 소자는 12×3 배열 구성을 가지며, 그림 3(a)와 같이 0.5 λ의 배열 간격에서 주엽 패턴이 0°에서 40°로 조향되는 경우, 부엽 레벨 값은 13.4 dB에서 10.9 dB로 감소한다. 이때, 주엽이 40°로 조향되었을 때, grating lobe는 −69도에서 나타나며 주엽보다 42 dB 작은 값을 갖는다. 반면에, 그림 3(b)와 같이, 배열 간격 0.8 λ인 경우, 동일한 조향 조건에서 부엽 레벨 값은 13.4 dB에서 2.6 dB로 크게 감소하여, 주엽이 40°로 조향되었을 때 grating lobe는 −48°에서 주엽보다 2 dB 작은 값을 갖는다. 이는 소자 간 배열 간격이 증가하는 경우 배열 소자의 빔 조향 가능 범위가 감소하는 것을 나타낸다. 그러나, 배열 소자의 간격이 감소하는 경우, 동일한 개구면에 탑재 되는 소자의 수가 증가하여 드론의 탑재 가능 무게를 초과하게 된다. 따라서, 제안된 공통개구면 배열 안테나는 x 방향과 y 방향에 대해 각각 0.6 λ와 0.75 λ의 배열 간격을 갖는다. 이러한 구성에서, 주엽이 azimuth 방향으로 0°에서 40° 조향되었을 때, 부엽 레벨 값은 13.4 dB에서 12 dB로 감소하며, 주엽이 40°를 조향했을 때 grating lobe는 −76°에서 주엽보다 15.4 dB 낮은 값을 갖는다.

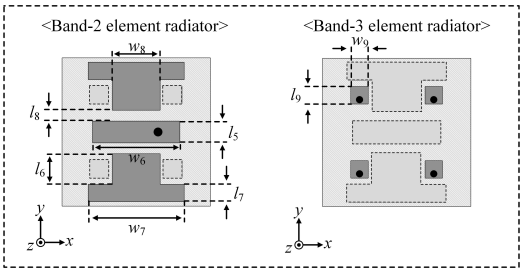
그림 4는 신호 정보 수집용 드론에 탑재되는 공통개구면 배열 안테나의 단위셀 형상을 나타낸다. 제안된 신호 정보 수집 시스템은 다양한 대역에서 발생하는 신호를 수집하기 위해, 3개의 서로 다른 대역(Band-1, 2, 3)에서 동작하는 소자들로 구성된 배열 안테나를 탑재한다. 그러나, 드론 한 기체에 탑재할 수 있는 소자의 크기가 제한적이고, 소자의 탑재 면적에 따라 레이다 반사 면적(radar cross section)이 증가하는 문제가 있다[8],[9]. 따라서, 드론 기체에 탑재되는 Band-1, 2, 3 배열 안테나 소자들은 탑재 면적을 최소화하기 위한 공통개구면 구성을 갖는다[10]. Band-2와 Band-3에서 동작하는 소자들의 경우, 탑재 면적 최소화를 위해 동일한 평면에 배열되며, Band-3 소자는 Band-2 소자와 물리적으로 겹치지 않기 위해 높은 유전율을 갖는 RF-60 ($\epsilon_r$=6.15, tan$\delta$=0.0028) 기판을 적용하여 소자의 크기를 소형화 하였다[11]. 이때, Band-3 소자는 3.2 mm의 두꺼운 유전체 기판에 인쇄되어 작은 방사 면적에서 넓은 대역 특성을 갖는다[12]. 동일한 인쇄면에서, Band-2 소자는 Band-3 소자가 차지하는 영역을 제외한 영




(a) 공통개구면 배열 안테나 단위셀의 등축도
(a) Isometry view of the shared-apreture arrayt antenna unit-cell




(b) Band-1 개별 소자의 측면도
(b) Side view of the Band-1 element




(c) Bnad-2, 3 개별 소자의 전면도
(c) Top view of the Band-2, 3 element

그림 4. 드론 탑재용 공통개구면 배열 안테나의 단위셀 형상
Fig. 4. Geometry of the shared-aperture array antenna for SIGINT drone formation.

역을 최대로 활용하는 상호 보상 형상을 가지며, 한 쌍의 기생 패치와 하나의 급전 패치로 구성된다[13]. 이러한 구성에서, Band-2 소자는 Band-3 소자와 물리적으로 접촉하지 않으면서 넓은 대역 특성을 확보할 수 있다. Band-1 소자의 경우, Band-2, Band-3 소자와의 간섭을 최소화하기 위해, 다른 대역의 소자와 직교적인 구성을 갖는 인쇄형 다이폴 소자가 적용된다[14]. 제안된 공통개구면 안테나의 상세한 설계 파라미터들은 전자기적 시뮬레이터인 CST[15]를 통해 도출하였으며, 상세한 설계 파라미터는 표 1에 기술되어 있다.

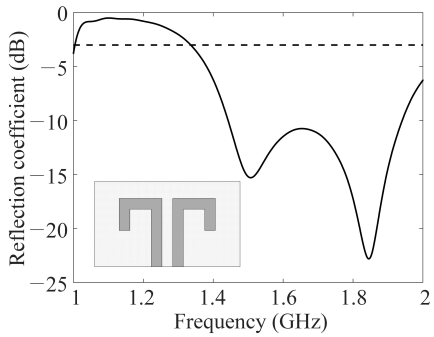
## Ⅲ. 신호 정보 수집 배열 안테나의 성능

그림 5는 시뮬레이션을 통해 확인된 신호 정보 수집 드론 탑재용 공통개구면 배열 안테나 개별 소자들의 반사계수를 나타난다. 그림 5에서 보듯이, 제안된 공통개구면 배열 안테나의 소자들의 대역폭은 반사로 인한 손실이 50% 미만으로 발생하면서 시스템이 운용될 수 있는 대역을 확인하기 위해 −3 dB를 기준으로 확인되었다. 제안된 Band-1 소자는 −3 dB를 기준으로 38.8 %(1.35 GHz~2 GHz)의 대역폭을 나타낸다. Band-2 소자와 Band-3 소자의 대역폭은 −3 dB를 기준으로 각각 35.3 %(2.8 GHz ~ 4 GHz)와 28.6 %(6 GHz~8 GHz)의 대역폭을 갖는다. 이는 제안된 안테나 소자가 서로 물리적으로 겹치지 않으면서 넓은 대역 특성을 확보할 수 있음을 보여준다.

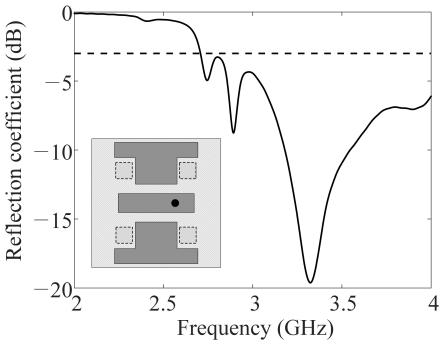
그림 6은 신호 정보 수집용 드론에 탑재되는 공통개구면 배열 안테나의 추적모드 빔 조향 성능을 나타낸다. 드

표 1. 제안된 안테나의 기하학적 설계 파라미터
Table 1. Geometrical parameters of the proposed antenna.

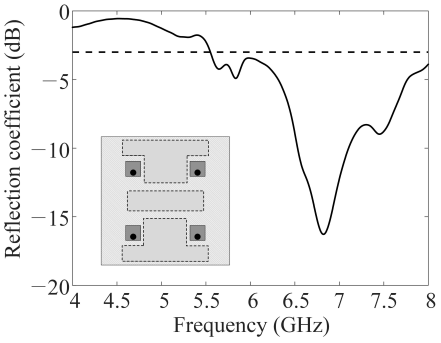
| Parameters | Dimension (mm) |
|---|---|
| $w_1$ | 2.0 |
| $w_2$ | 13.5 |
| $w_3$ | 38.5 |
| $w_4$ | 33.0 |
| $w_5$ | 5.0 |
| $w_6$ | 16.0 |
| $w_7$ | 14.0 |
| $w_8$ | 13.9 |
| $w_9$ | 7.6 |
| $l_1$ | 47.0 |
| $l_2$ | 28.0 |
| $l_3$ | 4.5 |
| $l_4$ | 5.0 |
| $l_5$ | 16.0 |
| $l_6$ | 10.0 |
| $l_7$ | 9.1 |
| $l_8$ | 1.25 |
| $l_9$ | 7.6 |
| $h_1$ | 0.8 |
| $h_2$ | 3.2 |




(a) Band-1 소자의 반사계수 특성
(a) Reflection coefficients of Band-1 elements

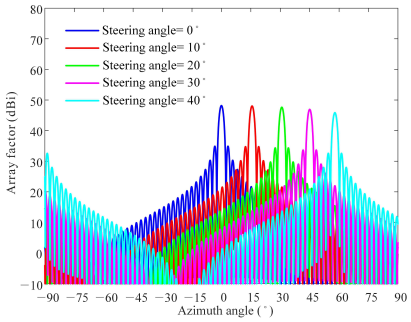



(b) Band-2 소자의 반사계수 특성
(b) Reflection coefficients of Band-2 elements

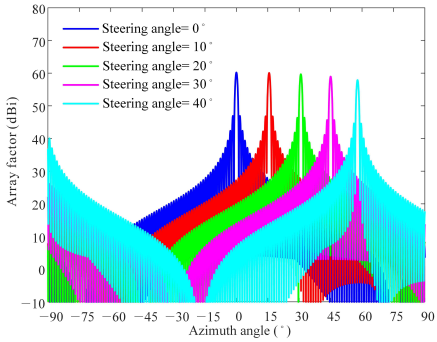



(c) Band-3 소자의 반사계수 특성
(c) Reflection coefficients of Band-3 elements

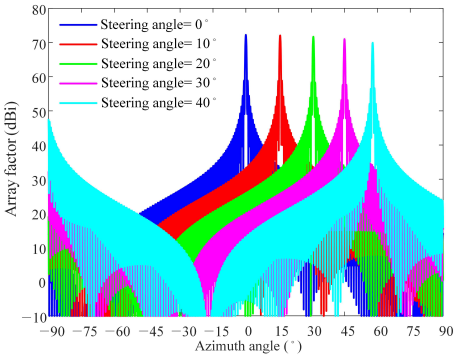
그림 5. 드론 탑재용 공통개구면 배열 안테나의 반사계수
Fig. 5. Reflection coefficient of the proposed shared-aperture antenna.




(a) Band-1 소자의 빔 조향 특성
(a) Beam steering of Band-1 elements




(b) Band-3 소자의 빔 조향 특성
(b) Beam steering of Band-3 elements




(c) Band-3 소자의 빔 조향 특성
(c) Beam steering of Band-3 elements

그림 6. 추적 모드에서 공통개구면 배열 안테나의 빔 조향 성능
Fig. 6. Beam steering performance of the proposed shared-aperture antenna in the tracking mode.

론이 탑재 가능한 안테나 소자의 무게를 고려하여, 제안된 시스템의 드론 한 기체는 가로 1.2 m, 세로 0.3 m의 개구면 면적을 갖는다. 이때, Band-1, 2, 3은 각각 64개(16×4), 256개(32×8), 1,024개(64×16)의 배열 소자가 드론 한 기체에 탑재되어 공통개구면 배열 안테나 구성을 갖는다. 제안된 신호 정보 수집 시스템의 빔 조향 성능을 검

증하기 위해, 4대의 드론 기체가 추적 모드로 운용될 때 각 대역에서 나타나는 AF(array factor)는 식 (1) 및 식 (2)를 사용하여 계산한다[16].

$$AF(\theta,\phi)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}w_{m,n}\cdot e^{j(k_x dx\cdot m+k_y dy\cdot n)} \tag{1}$$

$$w_{m,n}=e^{j(dx\cdot m\cdot\sin(\theta_s)\cos(\phi_s)+dy\cdot n\cdot\sin(\theta_s)\sin(\phi_s))} \tag{2}$$

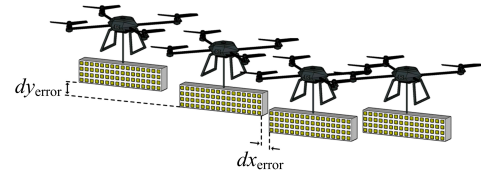
여기서, M, N은 각각 배열 형상에서 azimuth 방향과 elevation 방향에 대한 소자의 수를 의미한다. dx와 dy는 x축과 y축 방향에 대한 소자의 배열 간격을 나타내며, 각각 0.6 λ, 0.75 λ의 간격이 사용된다. 식 (1)에서 보듯이, 배열 소자의 위치에 따라 가중치 벡터($w_{m,n}$)와 배열 소자에 가해지는 위상의 합을 통해 배열 구성에 따라 나타나는 AF를 도출한다. 이때, 전기적 빔 조향을 위해 각 소자마다 주어지는 가중치 벡터는 식 (2)와 같이 각 방향에 대한 배열 간격, azimuth에 대한 조향 각도($\theta_s$), elevation 방향에 대한 조향 각도($\phi_s$)로 결정된다. 4대의 드론 기체가 하나의 편대를 구성하여 추적 모드로 운용되는 경우, Band-1, 2, 3 소자들의 반전력빔폭은 각각 1.3°, 0.6°, 0.3°로 나타난다. Band-1 소자의 주엽이 azimuth 방향에서 0°에서 40°로 조향될 때, 2 GHz에서의 전면 방향 AF는 48.2 dBi에서 45.8 dBi로 감소하고, 부엽 레벨은 13.5 dB에서 13.2 dB로 감소한다. 동일한 전기적 빔 조향 조건에서, 4 GHz에서의 Band-2 소자의 전면 방향 AF는 60.2 dBi에서 57.9 dBi로 감소하며, 부엽 레벨은 13.3 dB에서 13.0 dB로 감소한다. Band-3 소자의 경우, 8 GHz에서의 전면 방향 AF는 72.2 dBi에서 69.4 dBi로 나타나며, 부엽 레벨은 13.4 dB에서 12.8 dB로 나타난다. 이는 제안된 시스템이 반파장보다 넓은 배열 간격에서 azimuth 방향에 대해 ±40°까지 충분히 전기적 빔 조향이 가능하다는 것을 나타낸다.

표 2는 제안된 신호 정보 수집 시스템에 탑재되는 배열 안테나와 기존 연구들에서의 배열 안테나의 성능 비교를 보여준다[17],[18]. 제안된 안테나는 안테나의 탑제 무게와 공통개구면 배열 안테나 구성에서 발생하는 상호 간섭 특성을 고려하여, 기존 연구들에서의 배열 안테나보다 더 넓은 배열 간격을 갖는다. 이러한 구성에서, 제안된 배열 안테나는 넓은 배열 간격으로 인해 발생하는 grating lobe와 부엽 레벨의 감소로 인해 빔 스캐닝 범위는 azimuth 방향에 대해 40°, elevation 방향에 대해 15°로 제한된다. 그러나, 제안된 안테나는 서로 다른 대역에서 동작하는 소자들이 하나의 개구면에 탑재되는 공통개구면 배열 구성을 가지기 때문에, 제한된 탑재 면적에 여러 대역에서 동작하는 다수의 소자들을 제한된 개구면에 탑재할 수 있다. 이는 제안된 안테나가 하나의 개구면으로 다수의 대역에서 넓은 대역 특성을 도출할 수 있음을 나타낸다.

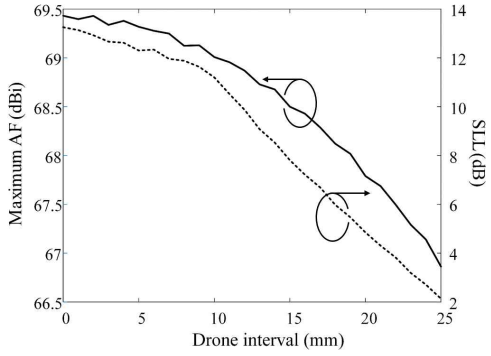
표 2. 제안된 안테나와 기존 연구들에 대한 성능 비교
Table 2. Comparison of the proposed antenna's performances with previous studies.

| | Ref [17] | Ref [18] | Our work |
|---|---|---|---|
| Operating band | S-band | S-band | L-band<br>S-band<br>C-band |
| Bandwidth (%) | S-band:<br>22.2 | S-band:<br>22.1 | L-band: 22<br>S-band: 10.7<br>C-band: 5.2 |
| Number of elements | S-band: 32 | S-band: 8 | L-band: 16<br>S-band: 32<br>C-band: 64 |
| Array interval ($\lambda$) | Azi.: 0.5<br>Ele.: 0.5 | Azi.: 0.52 | Azi.: 0.6<br>Ele.: 0.75 |
| Scanning range (°) | Azi.: 45<br>Ele.: 45 | Azi.: 70<br>Ele.: 70 | Azi.: 40<br>Ele.: 15 |
| Aperture size ($mm^2$) | 215×55 | 400×53 | 1200×300 |
| Height (mm) | 5.624 | 27.5 | 47.0 |

그림 7은 드론 운용과정에서 발생할 수 있는 배열 간격 오차와 이로 인해 발생하는 성능 변화를 나타낸다. 드론 기체에 안테나를 탑재하여 운용하는 경우, 드론의 비행 동작에서 발생하는 진동, 기류, 그리고 드론 조작 오차 등으로 인해 기존의 추적 모드 편대 구성과 다르게 드론 간 배열 간격이 발생할 수 있다. 이때, 각 드론에 탑재된 안테나 소자들이 위상 배열 안테나로 동작하여 전기적 빔 조향을 하는 경우, 부엽의 크기가 증가하고 주엽의 최대 크기가 감소하게 된다. 4대의 드론 기체의 간격이 x축 방향으로 25 mm까지 발생하는 경우, azimuth 방향으로 40°




(a) 드론의 배열 간격 오차 모식도
(a) Drone array interval error diagram

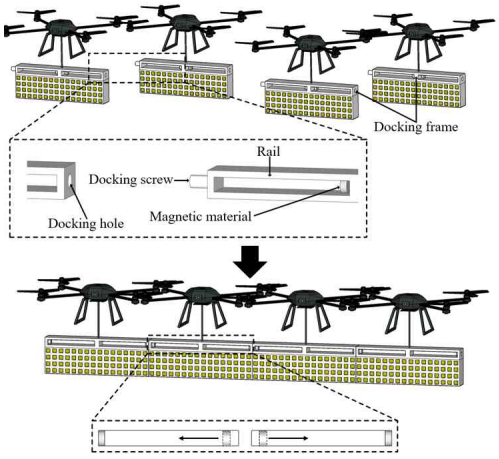



(b) 성능 변화
(b) Performance degradation

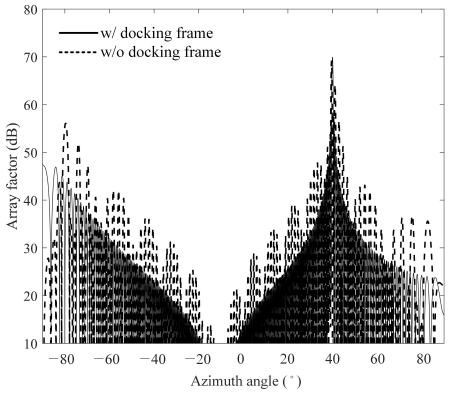
그림 7. 드론의 배열 간격 오차 모식도와 성능 변화
Fig. 7. Drone array interval error diagram and performance degradation.

로 조향했을 때 Band-3 소자에서 나타나는 전면 방향 AF는 69.4 dBi에서 66.8 dBi까지 변화하고, 부엽 레벨은 13.2 dB에서 2.1 dB까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 전기적 성능 저하 없이 시스템을 추적모드로 운용하기 위해, 편대 운용에서 발생하는 드론 간 배열 이격 발생을 방지해야 한다.

그림 8은 드론 배열 간격 오차를 방지하기 위한 드론 도킹 프레임의 형상과 이에 따른 성능 변화를 나타낸다. 드론 배열 간격 오차로 인한 성능 저하를 방지하기 위해, 그림 8(a)에서 보듯이, 제안된 안테나에는 자석과 레일로 구성된 드론 도킹 프레임이 적용될 수 있다. 신호 정보 수집 시스템이 추적 모드로 변경될 때, 제안된 프레임 구조의 자석이 레일을 따라 외곽으로 이동한다. 이때, 자석의 자력으로 인해 도킹 프레임의 원형 돌출부가 인접한 드론 도킹 프레임의 원형 홀과 결합하여 이격된 드론 기체들이 서로 물리적으로 접촉한다. 도킹 프레임의 적용 유무에 따른 성능 변화를 확인하기 위해, 4대의 드론에 x 방향과 y 방향에 각각 250 mm의 간격이 발생하고 aznimuth




(a) 드론 도킹 프레임의 형상
(a) Geometry of the drone docking frame




(b) 배열 소자의 성능 변화
(b) Performance variations of the array element

그림 8. 드론 도킹 프레임의 형상 및 적용 유무에 따른 성능 변화
Fig. 8. Geometry and performance variations of drone docking frame.

방향으로 40° 조향했을 때 band-3 소자에서 나타나는 성능 변화를 확인하였다. 그림 8(b)에서 보듯이, 도킹 프레임이 적용되지 않는 경우, AF는 0.9 dB 정도 감소하고 부엽 레벨은 12.8 dB에서 5 dB로 감소하며 조향 각도는 0.6° 정도 변화한다. 반면에, 도킹 프레임이 적용되는 경우, 배열 소자들은 40°에서 최대 AF 69.4 dB를 가지며 부엽 레벨은 12.8 dB로 나타난다. 이는 제안된 프레임 구조가 적용되는 경우 조향 각도의 오차와 부엽 레벨의 감소 발생

없이 제안된 신호 정보 수집 시스템을 운용할 수 있을 것으로 예상된다.

## Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 위상 배열 안테나를 탑재한 신호 수집용 드론 편대 시스템을 제안하였다. 제안된 신호 정보 수집(SIGINT) 시스템은 안테나 소자를 드론에 탑재하여 최대 2 km의 높은 고도에서 운용을 가정하였으며, 해당 고도에서 최대 159.5 km까지 LOS를 확보하여 한반도 지역에 위치한 신호 정보를 수집할 수 있다. 이때, 제안된 신호 정보 수집 시스템은 다양한 대역에서 발생하는 신호를 수집하기 위해, 3개의 서로 다른 대역에서 동작하는 소자들로 구성된 공통개구면 배열 안테나를 탑재하였다. 이러한 구성에서, 안테나 소자를 탑재한 드론 기체들은 하나의 편대를 구성하여 운용되며, 시스템의 운용 목적에 따라 드론 기체들의 배열 형상을 변형하였다. 제안된 시스템에 탑재되는 각 Band-1, 2, 3 소자들은 −3 dB를 기준으로 38.8%, 35.3%, 그리고 28.6 %의 대역폭을 갖는다. 4대의 드론이 추적 모드로 운용되어 0°에서 40°까지 전기적 빔 조향을 하는 경우, band-1, 2, 3 소자들은 각 대역에서 전면 방향 AF는 최소 45.8, 57.9, 그리고 69.4 dB로 나타났다. 추가적으로, 제안된 안테나에는 자석과 레일로 구성된 드론 도킹 프레임이 적용되어 전기적 성능 저하 없이 제안된 신호 정보 수집 시스템을 운용할 수 있을 것으로 예상된다.

## References


[1] D. Frascà, G. Venturi, M. Ustenko, and A. Zanasi, "Technologies for IMINT and SIGINT," in *Proceedings of the 2023 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security(TechDefense)*, Rome, Nov. 2023, pp. 165-169.

[2] L. de Floriani, P. Marzano, and E. Puppo, "Line-of-sight communication on terrain models," *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 329-342, Feb. 2007.

[3] S. Zarbakhshand A. R. Sebak, "Multifunctional Drone-Based Antenna for Satellite Communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 8, pp. 7223-7227, Aug. 2022

[4] L. Scorrano, F. Trotta, A. Manna, and L. Dinoi, "Dual-polarization DF Array for Airborne SIGINT in VHF / UHF Bands," in *Proceedings of the 2014 44th European Microwave Conference,* Rome, Italy, Oct. 2014, pp. 1912-1915.

[5] P. E. Whittaker, M. S. Hodgart, "Small satellite SIGINT payload," in *Proceedings of the IEEE 2000 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 2000. Engineering Tomorrow(Cat. No. 00CH37093)*, Dayton, OH, Oct. 2000, pp. 625-632.

[6] A. Al-hourani, I. Guvenc, "On modeling satellite-to-ground-path-loss in urban environment," *IEEE Communication Letters*, vol. 25, no. 3, pp. 696-700, Mar. 2020.

[7] Skyfront, "Perimeter 8." Available: https://skyfront.com/perimeter-8

[8] G. C. Tavik, C. L. Hilterbrick, J. B. Evins, J. J. Alter, J. G. Crnkovich, and J. W. de Graaf, et al., "The advanced multifunction RF concept," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, pp. 1009-1020, Mar. 2005.

[9] T. Liu, X. Cao, J. Gao, Q. Zheng, W. Li, and H. Yang, "RCS reduction of waveguide slot antenna with metamaterial absorber," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 3, pp. 1479-1484, Mar. 2013.

[10] C. M. Dikmen, S. Çimen, and G. Çakır, "Planar octagonal-shaped UWB antenna with reduced radar cross section," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 6, pp. 2946-2953, Jun. 2014.

[11] J. S. Colburn, Y. Rahmat-Samii, "Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 12, pp. 1785-1794, Dec. 1999.

[12] J. Dahele, K. Lee, "Effect of substrate thickness on the performance of a circular-disk microstrip antenna," *IE-*

*EE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 2, pp. 358-360, Mar. 1983.

[13] E. Y. Yim, D. Jang, C. H. Lee, and H. Choo, "Design of an S/X-band single-layer shared-aperture array antenna using a mutual complementary configuration," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, p. 4379, Mar. 2023.

[14] S. Wang, H. Kim, D. Kim, and H. Choo, "Multi-band array antenna sharing a common aperture with heterogeneous array elements," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 18, p. 9348, Sep. 2022.

[15] CST Microwave Studio (MWS), "CST Studio Suite," 2024. Available: https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite

[16] A. Balanis, *Antenna: Theory Analysis and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2016.

[17] M. S. Khan, A. Iftikhar, S. A. Naqvi, B. Ijaz, A. Fida, and R. M. Shubair, et al., "Circularly polarized 4×8 stacked patch antenna phased array with enhanced bandwidth for commercial drones," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 3, p. e22081, Dec. 2019.

[18] J. J Peng, S. W. Qu, M. Xia, and S. Yang, "Conformal phased array antenna for unmanned aerial vehicle with ±70° scanning range," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 8, pp. 4580-4587, Aug. 2021.

임 은 열 [홍익대학교/석·박사통합과정]

https://orcid.org/0009-0008-1202-3484

2022년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2023년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] 안테나 소자, 배열 안테나, 레이다 안테나

진 태 경 [홍익대학교/박사과정]

https://orcid.org/0009-0003-8712-5366

2017년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2019년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2019년 7월~2022년 7월: 한화시스템 해양연구소 선임연구원

2023년 2월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 전파환경 분석, 기계 학습, 무선전력전송, 레이다 설계 등

심 홍 석 [한화시스템/수석연구원]

https://orcid.org/0000-0003-1145-1707

2005년 2월: 충북대학교 컴퓨터공학과 (공학사)

2008년 3월: 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)

2007년 12월~현재: 한화시스템 수석연구원

[주 관심분야] 전자기전, RF, 디지털 신호처리, 신호분석 등

서 원 기 [넥스윌/대표이사]

https://orcid.org/0009-0004-4524-070X

1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학 (공학사)

1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학 (공학석사)

2005년 5월~현재: ㈜ 넥스윌 대표이사

[주 관심분야] 광대역 전자전, 레이더, 통신 신호처리 및 시스템

추 호 성 [홍익대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0002-8409-6964

1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)

2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)

2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)

2003년 9월～현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나