

네트워크 기반 무인기 제어 통신시스템을 위한 지상국 안테나 패턴 설계

Ground Station Antenna Pattern Design for Network-Based UAV Command and Control Communication Systems

김경호¹ · 김희욱² · 정영호^{3*}

¹한국항공우주산업(KAI) 위성개발실

²한국전자통신연구원 무인이동체시스템연구그룹

³한국항공대학교 항공전자정보공학부

Kyung-Ho Kim¹ · Hee Wook Kim² · Young-Ho Jung^{3*}

¹Satellite Development Team, Korea Aerospace Industries, LTD, Sacheon 52529, Korea

²Unmanned Vehicle System Research Section, ETRI, Daejeon 34129, Korea

³School of Electronics and Information Engineering, Goyang 10540, Korea

[요 약]

네트워크 기반 무인기 제어통신 시스템을 위한 복잡도와 성능을 고려한 지상국 최적 안테나 패턴 설계 방식을 제시하였다. 다수개의 측면 섹터와 한 개의 상향 섹터로 구성되는 지상국 안테나의 섹터 수, 수평/수직 빔폭, 틸팅각도 등 안테나 설계 파라미터의 변화에 따른 수직/수평 각도 별 안테나 이득을 모델링하고, 가상의 3차원 공간 내에서 각 파라미터의 변화가 신호 대 잡음 비(SNR: signal to noise ratio) 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 다양한 파라미터 중 측면 섹터의 틸팅 각도가 성능에 가장 큰 영향을 미치는데, 지상국 간 거리가 길수록, 최고 고도가 높을수록, 측면 섹터 수가 작을수록 틸팅 각도를 낮춰야 함을 확인할 수 있었다. 또한 최저 SNR 최대화 측면에서는 측면 섹터 수직 빔폭을 늘리는 것이 유리하지만 평균 SNR 측면에서는 수직 빔폭을 줄이는 것이 유리함을 확인하였다.

[Abstract]

An optimal ground station (GS) antenna pattern design method for network-based UAV command and control communication systems considering complexity and performance is presented. The GS antenna consists of multiple side sectors and one upward sector. The antenna gain for each vertical/horizontal angle of the GS antenna according to the change of antenna design parameters such as the number of sectors, horizontal and vertical beam-width, and tilt-angle is modeled, and the effect of the parameter changes on the signal-to-noise ratio (SNR) distribution in the virtual three-dimensional space is analyzed. It is observed that the tilt-angle of the side sectors has the greatest effect on the performance, and the longer the distance between GSs, the higher the maximum altitude and the smaller the number of side sectors, the tilt-angle should be lower. In addition, it is observed that the wider vertical beam-width of the side sector is advantageous in maximizing the lowest SNR, but narrow vertical beam-width is advantageous in maximizing the average SNR.

Key word : Antenna design, CNPC, Network-based UAV communication, UAS, UAV communication.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.5.384>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 10 September 2021; Revised 27 September 2021

Accepted (Publication) 20 October 2021 (30 October 2021)

*Corresponding Author ; Young-Ho Jung

Tel: +82-2-300-0415

E-mail: yhjung@kau.ac.kr

1. 서론

현재 회전익을 이용한 드론부터 고정익을 이용한 대형 무인기까지 다양한 형태의 무인기(UAV: unmanned aerial vehicle)가 활용되고 있으나, 군용 무인기를 제외한 대부분의 무인기의 경우 운용상 안전 확보를 위해 특별 비행승인 없이는 주간 가시권 내에서만 운용해야 하는 제약을 갖는다. 무인기의 운영 범위를 비가시권, 유인 항공기가 운행하는 고고도 국가 공역으로 확장하기 위해서는 안전한 운항을 보장하기 위한 신뢰도 높은 무인기 제어통신 수단이 확보되어야 한다 [1]. 무인기 지상 제어용 주파수로 ITU-R에서는 5030 ~ 5091 MHz의 C 대역 주파수를 세계적으로 사용할 수 있도록 결정하였고, 국내에서도 동일 대역을 2015년에 무인항공기 지상제어 전용주파수로 용도지정하였다.

무인기 제어용(C2: command and control) 통신 시스템의 표준화 활동은 항공전자, 항공통신 분야의 규격 개발하는 단체인 RTCA (radio technical commission for aeronautics)의 SC-228에서 활발하게 이루어지고 있다. 1대 또는 다수의 무인기가 단일 지상국(GS: ground station)에 연결되어 P2P (point-to-point) 또는 P2MP (point-to-multipoint) 통신이 이루어지는 상황에 대한 최소 운영 성능 규격(MOPS: minimum operational performance standard)의 1차 버전(RTCA DO-362)이 2016년 개발되었다 [2]. 이후 최근 다수의 지상국과 위성에 네트워크 기반으로 연결되어 핸드오프 절차를 통해 국가 공역 내에서 운항하기 위한 비행 시스템 최소 성능 규격(MASPS: minimum sviation dystem performance standard)인 RTCA DO-377 [3]과 RTCA DO-362의 2단계 버전인 RTCA DO-362A 규격이 완성되었다 [4].

단일 지상국과의 P2P, P2MP 통신을 고려하는 RTCA DO-362A MOPS [4]에서는 운용 영역을 20NM ~ 120NM, 운용 고도를 3000ft ~ 7500ft 까지 고려하고 있고, 99.8% 이상의 통신 링크 확보를 요구하고 있어서, 무인기가 운항할 수 있는 넓은 3차원 공간에서 원하는 신호 대 잡음비 요구 성능을 만족할 수 있는 지상국 안테나 설계가 필요하다. 무인기 지상국 안테나로 다수개의 측면 섹터 안테나와 1개의 수직 빔을 결합한 형태를 많이 사용하는데, 이러한 구조를 활용하여 최대 반경 25NM, 고도 18000ft 범위에서 높은 안테나 이득을 확보하는 지상국 안테나를 설계하는 연구가 있었다 [5]. 더 넓은 통신 범위 확보를 위해서는 위성통신 지상국과 유사하게 좁은 빔폭의 안테나로 무인기 위치에 맞춰 트래킹 하는 시스템이 필요할 수도 있다.

본 논문에서는 [3]에서 고려하는 다수의 지상국이 네트워크로 연결되어 통신 커버리지를 확보하는 무인기 제어 통신 시스템의 지상국을 위한 안테나 패턴 설계를 고려한다. P2P 또는 P2MP 지상국의 경우, 단일 지상국을 이용하여 지원해야 할 무인기의 운용 범위 전체를 커버해야 하는 반면, 네트워크 기반 C2 시스템의 경우 다수의 지상국간 스위칭이 가능하므로, 각 지상국의 커버리지와 안테나 시스템의 복잡도를 적절히 조절하여 설계할 수 있는 자유도가 존재 한다. 본 논문에서는 [5]와

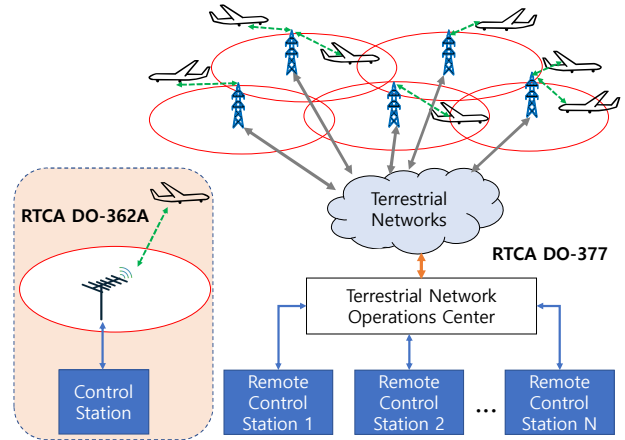


그림 1. 네트워크 기반 무인기 제어 통신망 구조
 Fig. 1. Structure of network-based C2 communication systems

유사하게 복수개의 수평 섹터 안테나와 단일 수직 빔으로 구성된 지상국 안테나 구조를 기반으로 다양한 설계 파라미터를 바꾸어가며, 각 설계 파라미터가 커버리지 변화에 미치는 경향성을 확인하였다. 이를 바탕으로 네트워크 기반 무인기 제어통신 지상국을 설계할 경우 복잡도와 성능을 고려한 안테나 패턴 최적 설계 방안을 제시하였다.

II. 네트워크 기반 무인기 C2 지상국 안테나 패턴 설계

2-1 네트워크 기반 무인기 제어 통신 시스템 개요

그림1은 P2P 기반의 무인기 C2 링크 구성과 네트워크 기반의 무인기 C2 통신망 구조의 차이점을 나타내고 있다. RTCA DO-362A [4] 에서 다루고 있는 단일 지상국 기반 C2 링크 구성에서는 제어국에 연결된 지상국에서 직접 제어 대상 무인기를 P2P 또는 P2MP 형태로 연결한다. 따라서 무인기의 운용 범위에 해당하는 전체 영역에서 요구하는 통신 성능을 확보할 수 있어야 하고, 이를 위해 높은 안테나 이득 확보가 필요하다. 반면 RTCA DO-377 [3]에서 고려하는 네트워크 기반 무인기 C2 통신망의 경우 이동통신 기지국과 유사하게 다수의 지상국이 네트워크로 연결되어 무인기가 갈 수 있는 전체 공역을 커버하므로 전체 커버리지 내의 어느 곳에 무인기가 존재하더라도 원격 제어국의 제어가 가능하다. 따라서 각 지상국의 커버리지가 충분히 넓지 않은 경우 많은 수의 지상국을 설치해야 하고 핸드오프가 빈번하게 발생하는 단점이 있지만, 각 지상국의 복잡도는 낮출 수 있는 설계 자유도가 있는 차이가 있다.

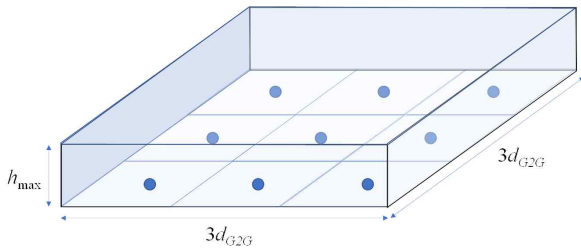


그림 2. 네트워크 기반 무인기 제어 통신용 지상국 안테나 패턴 최적화를 위한 가상 커버리지 공간 및 지상국 배치 환경
 Fig. 2. Virtual coverage space and GS positions for optimization of the antenna pattern of network-based C2 GS

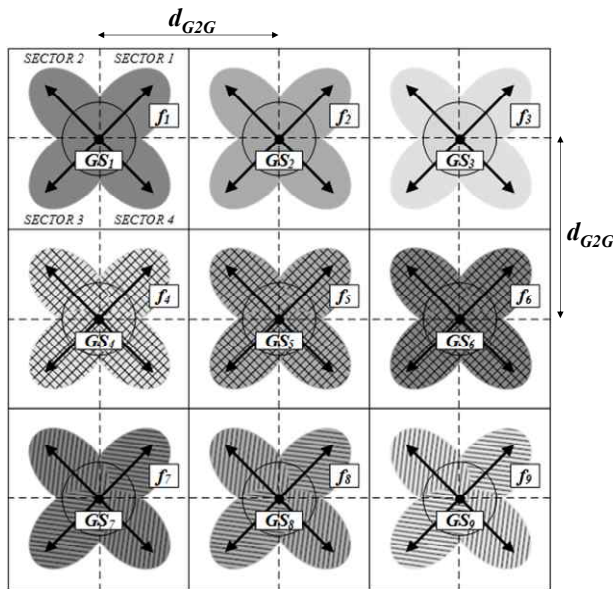


그림 3. 지상국 안테나 패턴 최적 설계를 위한 섹터 안테나 및 주파수 배치 예 (측면 섹터 4개, 상향 섹터 1개)
 Fig. 3. An example of sector antenna arrangement and frequency assignment for optimizing GS antenna pattern (4 side sectors and 1 upward sector)

2-2 안테나 패턴 설계 파라미터 변화에 따른 커버리지 변화 모의 실험 환경

본 논문에서는 네트워크 기반 무인기 C2 통신망을 위한 지상국 안테나 패턴 최적 설계를 각 설계 파라미터의 변화가 커버리지에 어떤 영향을 미치는지 분석하기 위하여 그림 2와 같이 가로, 세로가 각각 $3d_{G2G}$ 이고, 높이가 h_{max} 인 가상의 3차원 공간을 생성하였다. 해당 공간을 9개의 지상국이 커버하는 것을 가정하였고, 각 인접 지상국 사이의 거리는 d_{G2G} , 최고 고도는 h_{max} 이다. 한번의 길이가 d_{G2G} 인 정사각형의 중심에 지상국이 위치한다.

그림 3은 그림 2의 공간을 위쪽 방향에서 바라 보았을 때 9개의 지상국의 위치와 안테나 패턴, 사용 주파수를 나타낸 그

표 1. 지상국 안테나 패턴 설계 파라미터

Table 1. Design parameters for antenna pattern of GS

design parameters	meaning
N_{sector}	number of side sectors
θ_{hit}	vertical tilt angle of sector antennas
BW_h	horizontal 3dB beamwidth of sector antennas
BW_v	vertical 3dB beamwidth of sector antennas
BW_{up}	3dB beamwidth of upward beam

림이다. [2]에서 설계한 지상국 안테나 패턴과 유사하게 1개의 수직 방향 빔과 N_{sect} 개의 섹터 안테나 패턴을 가지고 있다. 그림 3은 $N_{sect} = 4$ 인 경우에 대한 예이다. GS 주변에 원으로 표시된 영역이 수직 방향 빔이고, 그 밖의 색칠된 부분은 섹터 안테나를 의미한다. 각각의 섹터 안테나는 모두 같은 안테나 패턴을 사용한다고 가정하였다. 수직방향 빔은 수평방향 빔폭과 수직방향 빔폭이 동일한 섹터 안테나를 수직방향으로 90도 틸팅한 것으로 생각하면 된다. 각 지상국에서 사용하는 주파수 대역은 서로 다른 주파수 대역 ($f_1 \sim f_9$)을 사용하여 셀간 간섭은 없다고 가정한다.

지상국 안테나의 다양한 설계 파라미터를 변경하며 그림 2의 가상 영역 내에서의 음영지역의 고도별 분포, 신호대 잡음비 (SNR: signal to noise ratio) 분포 등을 분석하여 각 설계 파라미터의 변화가 커버리지 변화에 미치는 영향을 분석한다. 설계 파라미터는 표 1과 같다. 본 논문에서는 d_{G2G} 와 h_{max} 가 다르게 주어진 상황에서 표1의 파라미터를 바꾸어가며 각 설계 파라미터가 커버리지에 미치는 영향을 분석한다.

2-3 안테나 패턴 모델링 방법

안테나 설계 파라미터의 변화에 따른 실제 안테나를 설계하여 각도별 안테나 이득 데이터를 획득하기는 어려우므로, [7], [8]에서 사용한 아래 식과 같이 이동통신 시스템 모의실험을 위해 사용하는 간단한 식 형태로 모델링 하는 방법을 사용한다.

$$G_h(\varphi) \text{ (dBi)} = -\min[12(\varphi/BW_h)^2, FBR_h], \quad (1)$$

$$G_v(\theta) \text{ (dBi)} = \max[-12(\theta-\theta_{hit}/BW_v)^2, SLL_v], \quad (2)$$

여기에서 φ 는 수평 방향 (azimuth) 각도, θ 는 수직 방향 (elevation) 각도, FBR_h 는 dB 단위의 최소 안테나 이득, SLL_v 는 dB 단위의 사이드 로브 레벨이다. 각 섹터 안테나의 빔폭 변화에 따른 최대 안테나 이득은 [9]의 아래 식을 이용하여 근사화하여 모델링 하였다.

$$G_m \approx 10 \cdot \log_{10}[30,000/(BW_h \cdot BW_v)] \quad (3)$$

해당 식을 통해 안테나 이득을 다양한 3dB 빔폭에 따라 자유롭게 변경할 수 있어, 시뮬레이션하기 위한 목적으로는 유용하게 사용될 수 있다. 그림 4에 본 논문에서 사용한 안테나 이득의 예시를 나타내었다. 해당 예시는 이해의 편의상 모든 수직 및 수평 각도에 대해 확장한 이득 값이다.

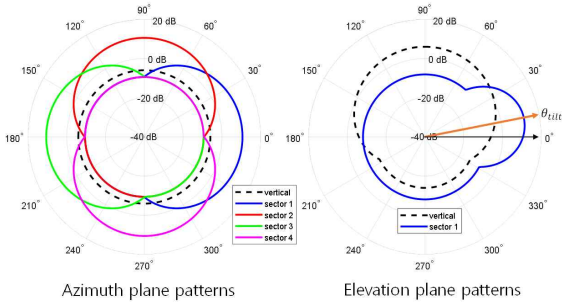


그림 4. 지상국 안테나 패턴 설계 예 ($N_{sect} = 4, \theta_{tilt} = 10^\circ$)
 Fig. 4. An example of GS antenna pattern design ($N_{sect} = 4, \theta_{tilt} = 10^\circ$)

이러한 이득 값을 실제 시뮬레이션에서 사용하기 위해서는 무인기 위치를 수평 각도와 수직 각도로 표현해야 한다. 또한, 수평 각도 이득의 경우 무인기가 셀의 몇 번째 섹터에 위치하는가에 따라 상대적으로 달라지므로 이를 보정하기 위한 추가적인 과정이 요구된다. 본 논문에서는 절대적인 직교 좌표를 구한 뒤 이를 각 셀 내의 상대적인 구 좌표로 변환하는 방식을 사용하였다. 먼저, 모든 셀 내 무인기 및 GS 좌표를 표현할 수 있는 global 직교 축 (x-, y-, z-축)을 설정한다. 그 후, GS와 무인기의 직교 좌표를 변환하여 절대적인 구 좌표를 계산하는데, 이때 수평 각도의 경우 각 셀마다 local 직교 축을 가정하여 해당 x-축을 기준으로 계산한다. 최종적으로 다음 변환 식을 이용하여 상대적인 수평 각도 φ_{rel} 를 구한다.

$$\varphi_{rel} \text{ (deg)} = \varphi_{abs} - (\varphi_{sect}/2) \cdot (2n - 1) \quad (4)$$

여기서 (4)는 local x축 기준 시계 반대 방향으로 섹터를 분할한다는 가정 하에 본 논문에서 계산한 각도 변환식으로서, φ_{abs} 는 좌표계 변환으로 계산된 절대 수평 각도이다. $\varphi_{sect} = 360^\circ / N_{sect}$ 는 도 단위의 섹터 하나의 범위 각도이다. n 은 셀 내 섹터 순서를 나타내는 인덱스로써 1, 2, ..., N_{sect} 까지의 값을 갖는 정수이다. 이렇게 구한 φ_{rel} 를 앞선 안테나 이득 식에 대입하면 모든 UA 위치에 대한 안테나 이득 값을 얻을 수 있다.

III. 무인기 C2 지상국 안테나 패턴 설계 파라미터 변화에 따른 커버리지 변화 분석 결과

3-1 모의 실험 환경

그림 2의 3차원 공간을 동일 간격의 격자점으로 나누어 무인기의 위치를 미리 정하고, 해당 위치에서 각각의 GS 방향으로의 안테나 이득 값을 정확하게 반영하여 SNR을 분석할 수 있는 그림 5와 같은 GUI 기반 SNR 분석 시뮬레이터를 개발하였다. 안테나 패턴 설계 관련 파라미터와 경로감쇠 모형, 송신 전력, 분석 격자점 수 등의 정보를 입력하여 모의실험을 수행하고, SNR 분석 통계결과와 음영지역 위치, 수직 빔에서 서비스하는 영역 등의 결과를 도출한다.

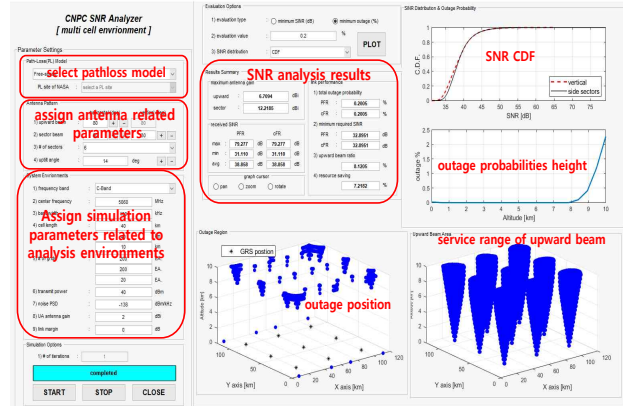


그림 5. 안테나 패턴 변화에 따른 다중셀 SNR 분석 시뮬레이터
 Fig. 5. Multicell SNR analyzer according to antenna pattern design

표 2. 모의실험 파라미터

Table 2. Simulation parameters

Parameters	Values
pathloss model	free space
N_{sect}	3, 4, 6
θ_{tilt}	0 ~ 20° (increment: 2°)
BW_h	60°
BW_v	20°, 30°
BW_{up}	40°~110° (increment: 10°), (80°)
d_{G2G}	30km, 40km, 60km
h_{max}	5km, 10km
carrier frequency	5060 MHz (C-band)
bandwidth	100kHz
transmit power of GS	40dBm
noise power	-138dBm/kHz
antenna gain of UAV	2dBi
outage ratio	0.2%

본 논문에서 안테나 설계 파라미터의 영향을 분석하기 위한 SNR 분석 대상 격자점은 x, y, z 축에서 각각 200, 200, 20으로 정하였고, 따라서 총 800,000 개의 위치에서의 SNR을 분석하여 설계 파라미터 변화에 따른 커버리지의 변화를 관찰하였다. 이를 통하여 각 상황에서의 최적 안테나 패턴 설계를 위한 각 설계 파라미터 값을 찾을 수 있도록 하였다. 본 논문에서 사용된 시뮬레이션 환경 및 변수를 표2에 정리하였다. 주요 파라미터는 [2]-[4]를 참고하여 결정하였다. 여러 종류의 파라미터 변경에 따른 모든 조합을 분석하기는 어려우므로, 특별한 언급이 없으면 각 파라미터 별로 진하게 표시한 값을 기본 값으로 하고, 파라미터의 변화 영향을 관찰하려는 파라미터를 변화시켜가며 모의실험을 진행하였다.

3-2 모의 실험 결과

무인기 C2 링크의 경우 링크 가용성 (link availability)을 99.8% 이상 요구하고 있다 [4]. 표2의 설계 파라미터를 바꾸어 가며 그림2의 공간 내의 모든 모의실험 대상 격자점에 대해 전체 GS와의 SNR을 계산하고, SNR이 가장 높은 GS를 기준으로

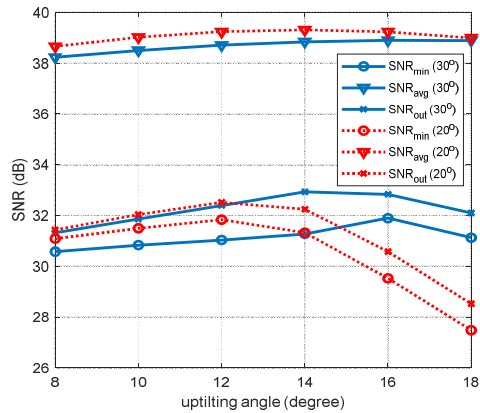


그림 6. 섹터안테나 틸팅 각도에 따른 SNR 변화
 Fig. 6. SNR change according to sector antenna tilt angle

표 3. 다양한 상황별 최적 θ_{tilt} 값

Table 3. Optimum θ_{tilt} values for various environments

h_{max}	d_{G2G}	$N_{sect} = 6$	$N_{sect} = 4$	$N_{sect} = 3$
10km	30km	18°	16°	10°
	40km	14°	16°	8°
	60km	12°	12°	8°
5km	30km	10°	12°	6°
	40km	8°	8°	6°
	60km	6°	6°	4°

해당 격자점의 SNR을 구하였다. 전체 격자점 중 SNR이 가장 나쁜 하위 0.2%에 해당하는 dB 단위의 SNR 기준값을 SNR_{out} 이라고 하고, 전체 격자점의 dB 단위의 SNR 값의 평균을 SNR_{avg} 이라고 할 때 ($SNR_{out} + SNR_{avg}$)를 최대화 하도록 설계 파라미터에 대한 최적 값을 도출하였다. 추가로 전체 영역에서의 SNR 최소값 (SNR_{min})과 최대값 (SNR_{max}), 고도별 음영지역 비율도 분석에 이용하였다.

1) θ_{tilt} (섹터 안테나 틸팅 각도) 변화에 따른 영향 분석

그림6은 $N_{sect}=6, d_{G2G}=40km, h_{max}=10km, BW_{up}=80^\circ$ 인 경우 섹터 안테나 수직방향 빔폭 (BW_v)이 20°, 30° 인 상황 각각에 대해 θ_{tilt} 각도를 변화시켜가며 $SNR_{min}, SNR_{avg}, SNR_{out}$ 값의 변화를 그린 그림이다. $BW_v = 30^\circ$ 인 경우에는 $\theta_{tilt} = 14^\circ$ 일 때 ($SNR_{out} + SNR_{avg}$)값이 최대가 되고, $BW_v = 20^\circ$ 인 경우에는 $\theta_{tilt} = 12^\circ$ 일 때 최대가 된다. 최적 틸팅 각도에서 벗어나더라도 SNR_{avg} 값의 변화는 크지 않지만 SNR_{min} 과 SNR_{out} 값은 성능저하가 상대적으로 크고, 특히 빔폭이 좁은 경우 영향이 더 큰 것을 관찰할 수 있다. 표3에는 $h_{max}, d_{G2G}, N_{sect}$ 값이 다른 다양한 환경에서 최적 θ_{tilt} 를 찾아서 정리하였다 ($BW_v = 30^\circ$). 셀의 크기가 커질수록, 최대 고도가 낮을수록, 섹터 수가 작을수록 최적 θ_{tilt} 값이 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

2) BW_{up} (수직방향 빔 3dB 빔폭) 변화에 따른 영향 분석

그림7은 $N_{sect}=6, d_{G2G}=40km, h_{max}=10km, BW_v=30^\circ$ 인 경우 수직방향 빔의 빔폭(BW_{up})을 40°~110° 사이에서 변화시켜가며

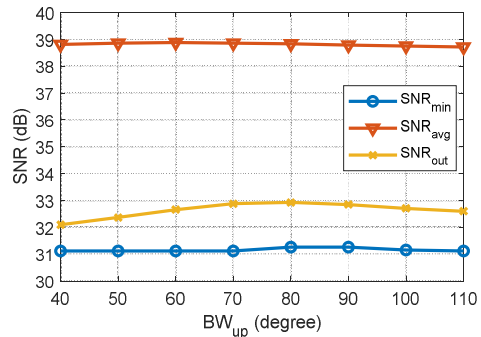


그림 7. BW_{up} 에 따른 SNR 변화 ($N_{sect}=6, d_{G2G}=40km, h_{max}=10km, BW_v=30^\circ$)

Fig. 7. SNR change according to BW_{up} variation ($N_{sect}=6, d_{G2G}=40km, h_{max}=10km, BW_v=30^\circ$)

표 4. N_{sect}, BW_v 변화에 따른 (a) SNR_{out} (dB)와 (b) SNR_{avg} (dB)

Table 4. (a) SNR_{out} and (b) SNR_{avg} in dB scale according to N_{sect}, BW_v values

(a) SNR_{out} (dB)

h_{max}	d_{G2G}	$N_{sect} = 6$		$N_{sect} = 4$		$N_{sect} = 3$	
		$BW_v = 30^\circ$	$BW_v = 20^\circ$	$BW_v = 30^\circ$	$BW_v = 20^\circ$	$BW_v = 30^\circ$	$BW_v = 20^\circ$
10km	30km	34.03	34.00	32.92	32.40	31.08	31.87
	40km	32.93	32.51	30.95	30.91	28.82	30.07
	60km	30.74	30.38	28.91	28.77	25.32	27.06
5km	30km	37.05	36.41	34.91	34.71	31.54	33.03
	40km	35.14	34.75	33.04	32.95	29.05	30.50
	60km	31.85	33.00	29.73	31.23	25.66	27.30

(b) SNR_{avg} (dB)

h_{max}	d_{G2G}	$N_{sect} = 6$		$N_{sect} = 4$		$N_{sect} = 3$	
		$BW_v = 30^\circ$	$BW_v = 20^\circ$	$BW_v = 30^\circ$	$BW_v = 20^\circ$	$BW_v = 30^\circ$	$BW_v = 20^\circ$
10km	30km	40.42	40.61	39.54	39.67	38.14	38.73
	40km	38.83	39.23	38.10	38.32	36.37	37.07
	60km	36.45	37.08	35.63	36.24	34.03	34.65
5km	30km	42.40	43.10	41.65	42.24	39.87	40.65
	40km	40.48	41.43	39.63	40.60	38.01	39.00
	60km	37.54	38.74	36.64	37.89	34.97	36.19

$SNR_{min}, SNR_{avg}, SNR_{out}$ 값의 변화를 그린 그림이다. 80°에서 ($SNR_{out} + SNR_{avg}$) 값이 최대가 되나, 주변 값에서도 큰 편차를 보이지 않음을 알 수 있다. 다양한 환경 변화 상황에서도 70°~90° 범위에서 최적 값을 갖는 것을 확인하였다.

3) N_{sect} (섹터 수), BW_v (섹터안테나 수직 빔폭)의 영향 분석

$h_{max}, d_{G2G}, N_{sect}, BW_v$ 값이 변화하는 각 상황에서 최적 안테나 패턴이 설계된 상황에서 얻을 수 있는 SNR_{out} 과 SNR_{avg} 값을 정리하였다. 표에서 진하게 표시된 것은 $BW_v = 20^\circ$ 와 30° 중 큰 값을 갖는 경우이다. SNR_{out} 측면에서는 30° 가, SNR_{avg} 측면에서는 20° 가 유리한 경우가 많으나, $N_{sect}=3$ 인 경우는 둘 다 20° 가 유리하다. N_{sect} 가 4 또는 3으로 줄어들게 되면 6개 섹터를 사용할 때에 비해 SNR_{out} 은 각각 평균 1.74dB, 3.35dB 나빠지고, SNR_{avg} 는 각각 평균 0.96dB, 2.42dB 나빠지므로 환경별 요구성능을 고려하여 커버리지와 복잡도 사이에서 적절한

한 선택이 필요하다. 예를 들어 요구 SNR 성능이 30dB인 경우 $d_{G2G}=60\text{km}$ 로 하고 섹터 수를 6개로 할 수도 있지만, $d_{G2G}=40\text{km}$ 로 하고 섹터 수를 3개로 줄일 수도 있다.

IV. 결 론

셀 반경, 최대고도 등이 다르게 주어지는 상황에서 네트워크 기반 무인기 C2 지상국 안테나 패턴의 최적 설계를 위하여 수평방향 섹터 수, 수직/수평 빔폭, 틸팅각도 등 다양한 설계 파라미터의 변화가 커버리지에 미치는 영향을 관찰하고, 각 상황별 최적 파라미터 값을 도출하였다. 본 논문에서는 간단한 식 기반의 안테나 패턴을 이용하여 실제 안테나 설계 시에는 오차가 있을 수 있으나, 설계과정에서 다양한 파라미터를 변화시켜 복잡도와 성능의 절충점을 찾는 데 있어서 참고자료로 활용 가능하다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 무인비행체 안전지원기술개발사업(21USTR-B127901-05)의 일부로 수행되었습니다.

References

[1] H. W. Kim, K. S. Kang, and B. S. Lee, "R&D and standardization trends on control and non-payload communication for unmanned aircraft systems," *Electronics*

and *Telecommunications Trends*, Vol. 33, No. 3, pp. 70-77, Jun. 2018.

[2] RTCA: Command and control (C2) data link minimum operational performance standards (MOPS) (terrestrial), RTCA Report DO-362, Sep. 2016.

[3] RTCA: Minimum aviation system performance standards for C2 link systems supporting operations of unmanned Aircraft systems in U.S. airspace, RTCA Report DO-377, Mar. 2019.

[4] RTCA: Command and control (C2) data link minimum operational performance standards (MOPS) (terrestrial), RTCA Report DO-362 Revision A, Dec. 2020.

[5] COBHAM. Unmanned systems and control centre antennas [Internet]. Available: <http://www.cobham.com>.

[6] H. W. Kim, D. Kim, K. Kang, K. Lim, B. Lee and J. Y. Ahn, "Optimum antenna beam pattern design for point-to-multipoint GRS of UAS CNPC," in *Proceedings of 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference*, Kuala Lumpur: Malaysia, pp. 483-486, 2017.

[7] A. Hamza, S. Khalifa, H. Hamza and K. Elsayed, "A survey on inter-cell interference coordination techniques in OFDMA-based cellular networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 4, pp. 1642-1670, Mar. 2013.

[8] G. Fredrik, J. Martin, F. Anders, L. Magus, S. Arne, T. Claes and B. Mats, "Downtilted base station – a simulation model proposal and impact on HSPA and LTE performance," in *Proceedings of the 68th IEEE Vehicular Technology Conference*, Calgary: Canada, pp.1-5, 2008.

[9] B. Constantine, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. New York, NY: WILEY, 2016.



김 경 호 (Kyung-Ho Kim)

2014년 2월 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 (공학사)
 2017년 2월 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
 2017년 ~ 현재 : 한국항공우주산업(KAI) 선임연구원
 ※관심분야 : 위성 통신, 무인기 통신



김 희 욱 (Hee Wook KIM)

2001년 2월 : 고려대학교 (공학사)
 2004년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2004년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 (ETRI) 책임연구원
 ※관심분야 : 이동통신, 무인기 통신, 위성 통신



정 영 호 (Young-Ho Jung)

1998년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2004년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2004년 ~ 2007년 : 삼성종합기술원 전문연구원, 삼성전자 정보통신연구소 책임연구원
 2007년 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
 ※관심분야 : 무인기 통신, 이동통신, 통신 신호처리