

1:2:2:1 비균등 부배열을 이용한 부엽 레벨 개선

정진우^{*.1)} · 김재신¹⁾ · 한덕찬¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제2기술연구본부

Side Lobe Level Improvement Using a 1:2:2:1 Non-Uniformly Excited Sub-Array

Jinwoo Jung^{*,1)} · Jaesin Kim¹⁾ · Duk-Chan Han¹⁾

¹⁾ *The 2st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 19 September 2016 / Revised 4 November 2016 / Accepted 20 January 2017)

ABSTRACT

In this paper, we propose a new array antenna scheme which has an improved side lobe level (SLL) as well as a simplified feeding network and a high gain. The proposed array scheme is based on a non-uniformly excited sub-array. For analysis, we use an array factor of sub-array antenna. In the simulation results, the simulated SLL and gain provide more than 18.43 dB and 26.63 dBi, respectively. For the verification of the proposed design scheme, the prototype antenna with 16×8 radiating elements was designed by the proposed array scheme. The measured SLL and gain are more than 19.85 dB and 25.53 dBi, respectively. This measurement result indicates that the proposed array scheme is reasonable.

Key Words : Antenna(안테나), Array(배열), Sub-Array(부배열), Side Lobe Level(부엽 레벨), High Gain(고이득)

1. 서론

최근 기술 발전에 의해 군사적 목적을 기반으로 유·무인기를 이용한 정보수집 및 실시간 전송 운용개념이 가시화되고 있다. 이에 대응하여 유·무인기에 의해 수집된 정보를 실시간으로 지상국에 전송하기 위한 영상정보용 무선 데이터 구성이 중요시 되고 있다.

유·무인기의 작전가능영역은 정보수집에 있어, 매우

중요한 요소이다. 따라서 유·무인기 탑재안테나는 지상국과의 무선 데이터링크의 통달거리를 증가시키기 위해 고 이득 방사특성을 가져야 한다. 유·무인기의 운용고도가 높다하여도, 통달거리가 증가하게 되면 지상국과 유·무인기 간의 가시선(LOS : Line Of Sight)은 지국곡률의 접선에 가깝게 된다. 이에 따라 안테나의 부엽(Side Lobe)과 지면(혹은 해수면)에 의한 페이딩 영향이 발생하게 되며, 이는 통신품질 저하로 이어진다. 따라서 유·무인기에 탑재되는 안테나는 높은 부엽 레벨(Side Lobe Level, SLL) 특성을 가져야한다. 즉, 정보수집 및 전송을 위한 유·무인기에 탑재되는 안테나

* Corresponding author, E-mail: crazytis@hanmail.net
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

는 고 이득 방사특성과 동시에 높은 부엽 레벨 특성이 요구된다고 볼 수 있다.

상기와 같은 특성을 위해 다양한 배열방법이 연구되어 왔다^[1-6]. 상기 연구에 의한 배열 안테나는 부엽 레벨 특성을 개선할 수 있으나 복잡한 급전선로를 요구한다. 이에 따라 급전부에 의한 손실이 증가하여 배열 안테나 이득이 감소하게 된다. 이는 통신을 위한 통달 거리에 직접적인 영향을 준다. 따라서 간소화된 급전선로를 이용한 부엽레벨 개선방법이 요구된다.

본 논문에서는 상기의 요구 조건을 만족시키기 위해 비균등 부배열(Sub-array) 설계 방법을 분석하였으며, 분석 결과를 바탕으로 16×8 배열 안테나를 설계 및 제작하였다. 상세한 배열설계 분석 및 시험결과는 다음 절에 상세히 기술하였다.

2. 부 배열 안테나 분석

본 논문에서는 방사소자의 배열은 부배열(Sub-array), 부배열의 배열을 주배열(Main-array)이라 명하고, 상기의 부배열과 주배열로 이루어진 안테나를 부배열 안테나(Sub-array Antenna)라 정의한다. 이때, 상기의 부배열들은 동일한 배열특성(방사소자 간 간격, 급전 신호 크기 및 위상)을 갖는다.

Fig. 1은 본 논문에서 정의한 부배열 안테나의 개념도를 보여준다. 상기 정의와 같이 각 부배열의 급전 신호는 i_1, \dots, i_n 이고 방사소자 간 간격은 d_1, \dots, d_n 으로 동일한 배열특성임을 알 수 있다.

배열 안테나의 방사특성은 배열요소(Array Factor, AF)분석을 통해 확인할 수 있다. 일반적인 배열 안테나의 AF는 수식 (1)과 같다.

$$AF = \sum_{n=1}^N i_n e^{j(\beta d_n \sin \phi + \alpha_n)} \quad (1)$$

여기서 i_n 과 α_n 은 급전신호의 크기와 위상 정보이다. β 는 전파상수이고, N 은 방사소자 배열 수이다.

수식 (1)의 일반적인 AF를 Fig. 1의 부배열 개념도에 적용하여 재정리하면 수식 (2)와 같다.

$$AF = \sum_{p=1}^P I_p e^{j(\beta D_p \sin \phi + A_p)} \sum_{n=1}^N i_n e^{j(\beta d_n \sin \phi + \alpha_n)} \quad (2)$$

여기서 P 는 부배열의 배열 수이고, I_p 와 A_p 는 p 번째 급전신호의 크기와 위상 정보, D_p 는 각 부배열의 위치이다. 그리고 N 은 각 방사소자의 배열 수이고, i_n 과 α_n 은 n 번째 급전신호의 크기와 위상 정보, d_n 은 각 방사소자의 위치이다.

수식 (1)과 수식 (2)를 비교 했을 때, 수식 (2)는 수식 (3)과 같이 주배열의 AF와 부배열의 AF의 곱으로 표현됨을 알 수 있다.

$$AF_{sub-array\ antenna} = AF_{main} \times AF_{sub} \quad (3)$$

결과적으로 부배열 안테나의 방사특성 분석은 수식 (3)과 같이 주배열과 부배열의 AF를 개별적으로 분석하고 이의 곱을 통해 비교적 간단히 분석이 가능함을 알 수 있다.

3. SLL 개선을 위한 부 배열 안테나 설계

간단한 급전선로 구조에 의한 급전손실의 최소화와

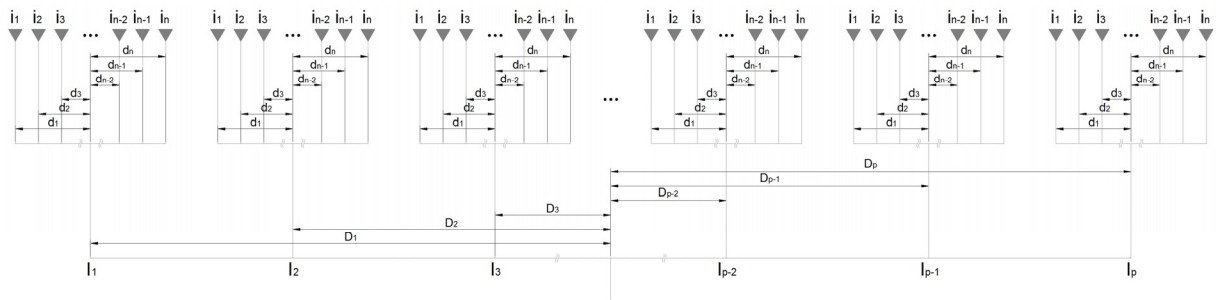


Fig. 1. Concept of the sub-array antenna

부엽레벨 개선을 위해, 본 논문에서는 부배열은 동위상, 균일 급전과 등간격으로 배열되고, 주배열은 동위상 급전과 등간격으로 배열되었다고 가정하였다.

상기 부배열과 주배열의 동위상 급전 가정은 부배열 안테나의 Broadside 방사특성을 얻기 위함이다. 그리고 부배열의 균등급전 및 등간격 배열과 주배열의 등간격 배열 가정은 부배열의 패턴 널(Null)과 주배열의 그레이팅 로브(Grating Lobe)의 위치를 간단하게 산출하기 위함이다. 여기서 주배열의 비균등 급전 가정은 부엽레벨을 효율적으로 개선하기 위함이다.

상기 가정에 의해 수식 (2)와 (3)의 주배열과 부배열의 AF는 수식 (4)와 (5)와 같이 재정의된다.

$$AF_{main} = \sum_{p=1}^P I_p e^{j\beta(p-1)D\sin\phi} \quad (4)$$

$$AF_{sub} = \sum_{n=1}^N i e^{j\beta(n-1)d\sin\phi} \quad (5)$$

부배열과 주배열이 동위상, 등간격 배열임으로, 수식 (2)의 a_n 과 A_p 는 삭제되고, d_n 과 D_p 는 각각 d 와 D 로 변경되었다. 그리고 부배열이 균일급전이므로 i_n 은 i 로 변경되었다.

수식 (5)에서 방사소자 간 간격(d)는 일반적으로 가시영역(Visible Region) 내에 그레이팅 로브를 1개만 포함하는 최대범위로 설정된다. 이에 따른 방사소자 배열 수(N)와 관계된 방사소자 간 간격(d)의 범위는 수식 (6)과 같다.

$$0.5\lambda \leq d \leq \frac{(N-1)}{N}\lambda \quad (6)$$

주배열은 부배열의 배열이라는 정의에 의해, 부배열의 배열간격(D)은 $(N-1)\lambda$ 보다 크게 되어 한 파장 이상이 된다. 따라서 주배열은 가시영역 내에 다수의 그레이팅 로브가 발생하게 된다. 본 논문에서는 상기 주배열의 그레이팅 로브 중 부배열 안테나의 주빔(Main Lobe)를 형성하기 위한 그레이팅 로브는 주 그레이팅 로브(Main Grating Lobe), 이외는 사이드 그레이팅 로브(Side Grating Lobe)로 명하였다.

수식 (3), (4), 그리고 (5)에 의한 부배열 안테나의 주빔에 인접한 부엽은 다음 2가지 조건에 의해 발생한다.

- 조건 1. 부배열의 그레이팅 로브 영역 내에 존재하는 주배열의 사이드 그레이팅 로브
- 조건 2. 부배열의 그레이팅 로브 영역 내에 존재하는 주배열의 부엽

상기 1번 조건은 부배열의 배열간격(D)가 Nd 보다 큰 경우에 발생한다. 사이드 그레이팅 로브에 의해 발생하는 부배열 안테나의 부엽은 부배열 안테나의 주빔에서 이격되어 있으나, 그 크기가 일반적인 배열 안테나의 부엽보다 크게 형성된다.

상기 2번 조건에 의해 발생하는 부배열 안테나의 부엽은 일반적인 배열안테나의 부엽과 동일한 원리로 형성되는 부엽이다.

상기 2가지 조건에 의한 부엽 발생을 확인하기 위해 수식 (6)을 참고하여, 수식 (4)와 (5)의 변수값을 다음과 같이 설정하였다. $N=4$, $P=4$, $d=0.75\lambda$, 그리고 $D=4.5\lambda$. Fig. 2는 상기 변수값에 의한 수식 (4), (5), 그리고 (3)에 의한 부배열 안테나의 AF를 보여준다. Fig. 2의 두 번째 그림은 관심영역의 AF이다.

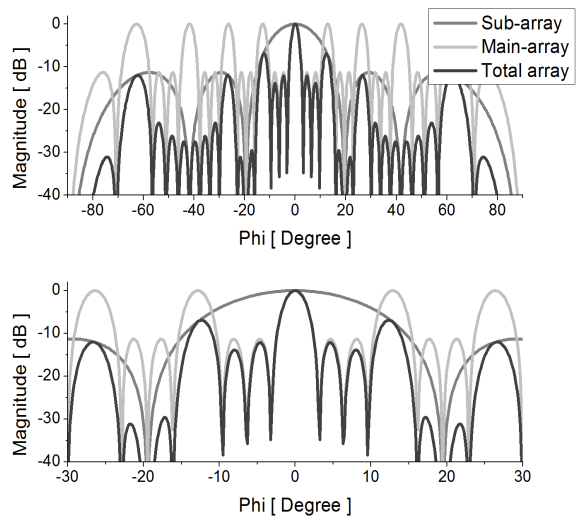


Fig. 2. Side lobes of the sub-array antenna

Fig. 2에서 관찰되는 부배열 안테나의 부엽 중, 첫 번째와 두 번째 부엽은 상기 2번 조건에 의해 발생하는 부엽이고, 세 번째 부엽은 상기 1번 조건에 의해 발생하는 부엽이다.

상기 1번 조건에 의한 부엽은 부배열의 패턴 널 위치와 주배열의 사이드 그레이팅 로브의 위치를 일치

시켜 상쇄할 수 있다.

부배열의 패턴 널 위치는 수식 (5)를 통해 확인할 수 있다. 수식 (5)를 재정리하고 크기 기준으로 정규화하면 수식 (7)과 같이 된다.

$$AF_{sub} = \frac{\sin(0.5N\beta d \sin\phi)}{N\sin(0.5\beta d \sin\phi)} \quad (7)$$

패턴 널은 수식 (7)의 AF가 ‘0’이 되는 지점으로 ϕ 에 관해서 정리하면 수식 (8)과 같다.

$$\phi_{null} = \sin^{-1}\left(\frac{2k\pi}{N\beta d}\right), \quad -\frac{N\beta d}{2\pi} \leq k \leq \frac{N\beta d}{2\pi} \quad (8)$$

여기서 k 는 ‘0’을 제외한 정수이다. ($k = 0$ 이면, 부배열의 그레이팅 로브 위치이다.)

수식 (7)은 균일급전, 등간격 배열에 의해서 유도되는 수식이다. 비균등 급전의 경우, 입력신호의 크기에 따라 널 위치가 변하게 된다. 따라서 널 위치를 간단하게 산출하기 위해 균등 급전, 등간격 부배열을 가정하였다.

본 논문에서 주배열의 경우, 비균등 급전으로 가정하였다. 그러나 수식 (4)의 합 연산을 위한 각 요소는 부배열의 배열간격(D)의 등비로 표현되기 때문에, 수식 (4)의 그레이팅 로브는 I_p 에 관계없이 주기적인 특성을 갖는다. 따라서 주배열의 그레이팅 로브 위치는 수식 (5)와 (7)을 참조하여 수식 (9)와 같이 유도된다.

$$\phi_{grating} = \sin^{-1}\left(\frac{2k\pi}{\beta D}\right), \quad -\frac{\beta D}{2\pi} \leq k \leq \frac{\beta D}{2\pi} \quad (9)$$

여기서 k 는 ‘0’을 제외한 정수이다. ($k = 0$ 이면, 주배열의 주 그레이팅 로브이다.)

수식 (8)과 (9)에서 알수있듯이, $D = Nd$ 이면 부배열의 패턴 널과 주배열의 사이드 그레이팅 로브 위치가 일치함을 알 수 있고, 이를 통해 상기 1번 조건의 부엽 문제를 해소할 수 있다.

상기 2번 조건의 부엽은 Fig. 2에서 알 수 있듯이, 주배열의 부엽 크기를 줄임으로써 해소할 수 있다. 주배열은 비균등 급전임으로 Chebyshev 배열을 통해 주배열의 부엽 크기를 줄일 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2의 배열 구성을 기반으로, 상기 1번 조건 해소를 위해 부배열 간 간격(D)를 $Nd(3\lambda)$ 로 설

정하고, 상기 2번 조건을 해소하기 위해 주배열 급전을 부엽레벨 20 dB 기준 Chebyshev 비균등 급전을 수행했을 때의 결과를 보여준다. 본 논문에서 제안된 방법에 의해, 상기 1, 2번 조건에 의한 부엽 크기를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 부배열 배열 수(P)는 방사소자 배열 수(N)에 따라 달라지나, 전체 방사소자 수 ($P \times N$)와 대비하여 그 수가 적기 때문에 주배열을 Chebyshev 비균등 급전을 하더라도 급전선로의 복잡도는 낮아진다.

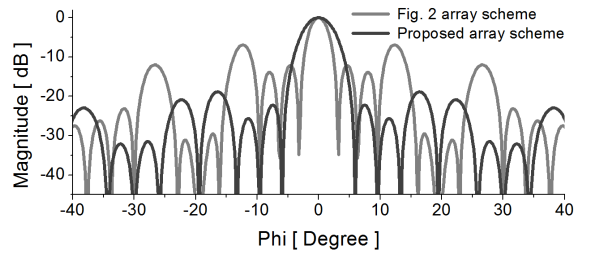


Fig. 3. Sub-array antenna AF with $D = Nd$ and chebyshev non-uniformly excited main-array

Fig. 4는 부배열 안테나의 전체 방사소자 수($P \times N$)가 20일 때, 제안된 방법으로 배열되고, P 가 4($N = 5$), 그리고 5($N = 4$)일 때의 부배열 안테나 AF를 보여준다.

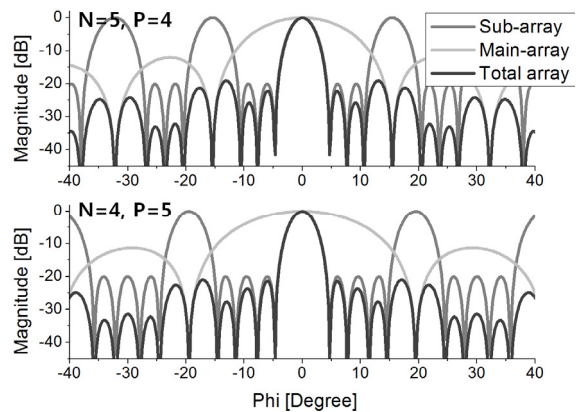


Fig. 4. Sub-array antenna AF with varying ‘P’s

부배열의 배열 수(P)가 증가함에 따라 주배열의 사이드 그레이팅 로브의 빔폭(Beam Width)가 줄어들어 부배열의 패턴널에 의한 상쇄효과가 커져, 상기 1번

조건의 부배열 안테나 부엽이 효율적으로 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 부배열의 배열 수(P)가 증가하고 이득을 위해 2차원 평면 배열을 하면 급전선로의 복잡도는 증가하게 된다. 따라서 부배열의 배열 수(P)를 줄이는 것이 간단한 급전선로 구성을 위해 좋은 방법임을 알 수 있다.

주배열이 등간격 배열인 경우, Chebyshev 비균등 급전을 위해서는 3개 이상의 부배열이 배열되어야 한다. 그리고 부배열의 배열 수(P)가 홀수일 경우, 급전선로가 비대칭이 되어 전력분배를 위해 급전선로가 복잡해진다. 따라서 부배열의 배열 수(P)가 ‘4’개인 경우가 상기 1과 2 조건의 부엽 크기를 줄임과 동시에 간소화된 급전선로를 구성하는 최적의 수임을 알 수 있다.

부배열의 배열 수(P)가 ‘4’이고, 부엽레벨 20 dB 기준 Chebyshev 비균등 급전인 경우, 주배열의 비균등 급전 비는 1:1.7357:1.7357:1이다. 상기 급전크기 비는 부배열 안테나가 2차원 배열인 경우, 더욱 복잡해지고 정교한 설계 및 제작을 요구하게 된다. 따라서 본 논문에서는 1:2:2:1의 급전크기 비를 제안하여 급전선로 설계를 더욱 쉽게 하였다.

Fig. 5는 Chebyshev 배열과 본 논문에서 제안한 급전 신호 크기 비에 따른 부배열 안테나의 AF 차이를 보여준다. 여기서 $N = 4$, $P = 4$, $d = 0.75\lambda$ 이다. 본 논문에서 제안한 1:2:2:1의 급전 신호 크기 비에 따른 부엽레벨이 약 24 dB이기 때문에, 부배열 안테나의 첫 번째와 두 번째 부엽 크기가 감소했음을 알 수 있다. 이를 제외한 부배열 안테나의 AF가 큰 차이가 없음을 고려할 때, 본 논문에서 제안한 급전 신호 크기 비가 설계 및 제작에 용이하여 더 효율적임을 알 수 있다.

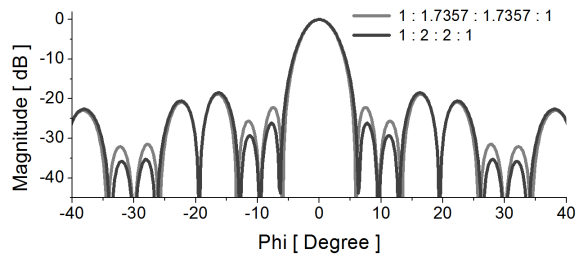


Fig. 5. Sub-array antenna AF with various non-uniformly excited amplitudes

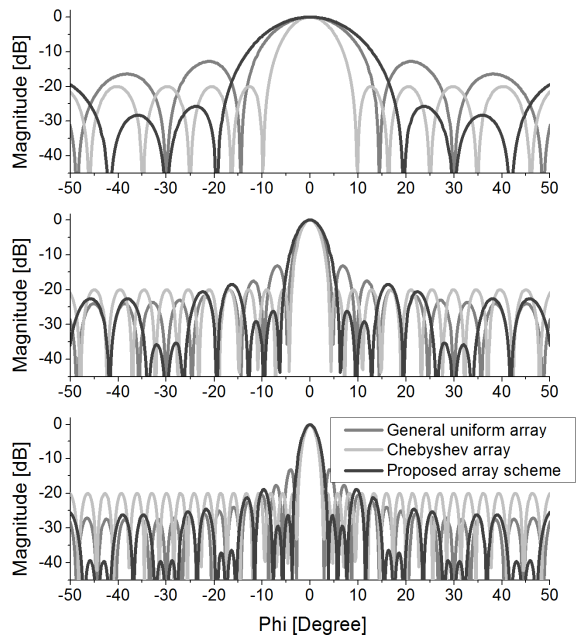


Fig. 6. AF comparison of the proposed array scheme with uniform array and chebyshev array

Table 1. Excited amplitude comparison of the proposed scheme with chebyshev

	급전 방법	정규화된 급전신호 크기 비
8	Cheby.	0.57 0.66 0.87 1.00 1.00 0.87 0.66 0.57
	Proposed	0.50 0.50 1.00 1.00 1.00 1.00 0.50 0.50
16	Cheby.	0.86 0.50 0.62 0.73 0.83 0.91 0.97 1.00 1.00 0.97 0.91 0.83 0.73 0.62 0.50 0.86
	Proposed	0.50 0.50 0.50 0.50 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 0.50 0.50 0.50 0.50
24	Cheby.	1.00 0.38 0.44 0.51 0.57 0.63 0.68 0.73 0.77 0.80 0.82 0.83 0.83 0.82 0.80 0.77 0.73 0.68 0.63 0.57 0.51 0.44 0.38 1.00
	Proposed	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50

결과적으로 방사소자 배열 수(N)은 요구 이득에 맞게 임의로 설정하고, 방사소자의 배열간격(d)은 수식 (6)을 이용하여 설정한 후, 부배열의 배열 수(P)는 4개, 부배열의 배열간격(D)는 Nd , 그리고 주배열의 급전신호 크기 비는 1:2:2:1로 설정했을 때, 부배열 안테나의 급전선로는 간소화 되고 동시에 부엽레벨이 개선할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 전체 방사소자 배열 수($P \times N$)가 8, 16, 그리고 24개 일 때, 일반적인 균일 배열 안테나, 부엽레벨 20 dB 기준 전체 Chebyshev 배열 안테나, 그리고 본 논문에서 제안된 비균등 부배열 안테나의 AF 비교를 보여준다. 일반적인 균일급전 배열 안테나와 비교해서 제안된 비균등 부배열 안테나의 부엽레벨이 효율적으로 개선되었음을 알 수 있다. 전체 Chebyshev 배열 안테나와 비교 했을 때에는, 주배열의 사이드 그레이드 로브에 의한 부배열 안테나의 부엽이 좀 더 큼을 알 수 있으나, Table 1의 급전신호 크기 비를 참조할 때 간소화된 급전선로로 효율적으로 부엽레벨을 개선하였음을 알 수 있다.

4. 실험 안테나 설계 및 시험 결과

본 논문에서는 제안된 부배열 안테나 설계 방법을 검증하기 위해 개구결합 급전 마이크로스트립 패치 배열 안테나(Aperture Coupled Microstrip Patch Array Antenna)를 RT/duroid 5880 기판을 사용하여 설계 및 제작하였다. 목표 이득은 25 dB이 하였다. 이에 따라 실험 안테나의 전체 방사소자 수는 16×8 개인 2차원 (y - z 평면) 배열로 설정하였다.

수식 (4)와 (5)는 1차원 선형배열에 의한 AF이기 때문에 이를 수식 (10)과 (11)처럼 y - z 평면 2차원 배열 형태에 맞게 재 수정하였다. 여기서, y 축과 z 축의 방사소자 간 간격(d_y, d_z)은 0.67λ 와 0.6λ 로 설정하였다.

$$AF_{main} = \sum_{p=1}^P I_p e^{j\beta(p-1)D_y \sin\theta \sin\phi} \sum_{q=1}^Q I_q e^{j\beta(q-1)D_z \cos\theta} \quad (10)$$

$$AF_{sub} = \sum_{n=1}^N i e^{j\beta(n-1)d_y \sin\theta \sin\phi} \sum_{m=1}^M i e^{j\beta(m-1)d_z \cos\theta} \quad (11)$$

본 논문에서 제안된 부배열 안테나 설계 방법에 따르면 수식 (10)과 (11)의 주요 변수 값은 Table 2와 같

다. Fig. 7은 Table 2의 변수 값과 수식 (10)과 (11)에 따른 부배열 안테나의 AF를 보여주고, Fig. 8은 변수 값에 따라 설계된 마이크로스트립 패치 형상과 마이크로스트립 급전 선로를 보여준다. 급전 선로에 의해 분기된 신호는 접지면의 슬롯에 의한 자계 결합으로 방사소자(패치)에 급전된다⁷⁾.

Table 2. Parameters of the prototype antenna

제 원	값
N	4
M	2
P	4
Q	4
I_p	[1 : 2 : 2 : 1]
I_q	[1 : 2 : 2 : 1]
D_y	2.68λ ($4d_y$)
D_z	2.4λ ($4d_z$)

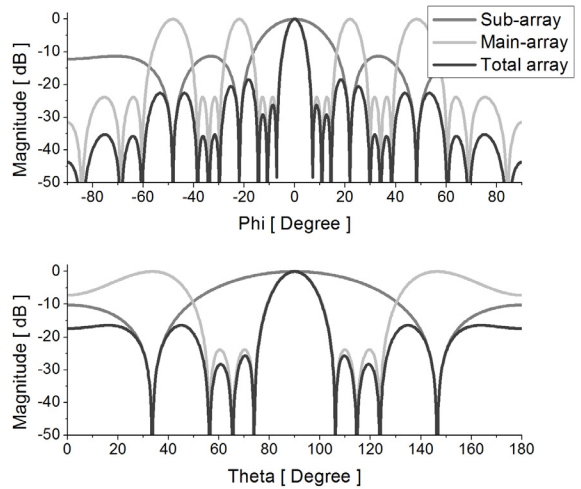
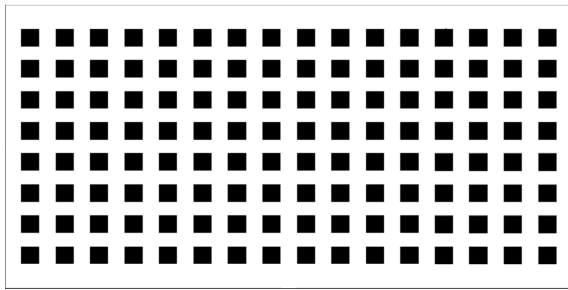
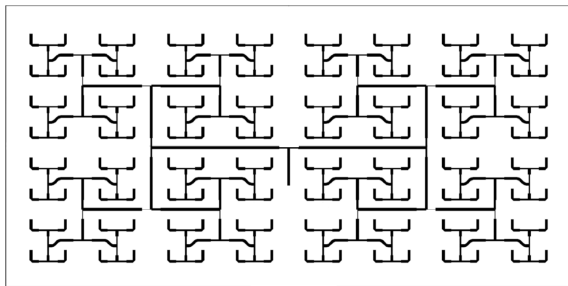


Fig. 7. Prototype antenna AFs

Fig. 9는 실험안테나의 모의실험과 측정 방사패턴을 보여준다. AF는 단일 방사소자의 방사패턴과 방사소자 간 상호 결합력(Mutual Coupling)은 고려되지 않기 때문에, 이를 반영하기 위해 직접 코딩한 Pocklington 적분 방적식 기반 모멘트 법(Method of Moment) 분석을 통해 실험 안테나를 모의실험 하였다⁶⁾.



(a) Radiating elements



(b) Feeding Network

Fig. 8. Geometry of the prototype antenna

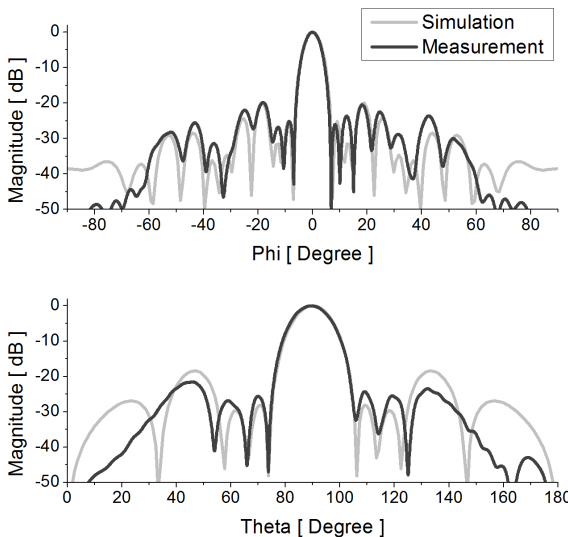


Fig. 9. Simulated and measured normalized radiation patterns of the prototype antenna

모의실험과 측정된 실험안테나의 이득은 각각 26.33 과 25.53 dBi(안테나 개구면 효율 : 55.25 %)이다. 모의 실험에 의한 각 축의 부엽레벨은 20.06과 18.43 dB이

고, 측정에 의한 각 축의 부엽레벨은 19.58과 21.55 dB이다. 실험안테나를 통해 본 논문에서 제안된 비균 등 부배열 안테나 설계 방법이 타당함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 유·무인기를 이용한 정보수집 및 실시간 전송 운용개념에 적합한 장거리 무선 데이터링크를 위한 유·무인기 탑재형 안테나 설계 방법에 관하여 기술하였다. 상기 운용개념에 적합한 안테나는 간소화된 급전선로, 개선된 부엽레벨, 그리고 고 이득 방사 특성을 가져야한다.

본 논문에서는 이를 위해 비균등 부배열 안테나 구조를 제안했으며, 배열요소 분석을 통해 배열 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 부배열의 배열 수를 4개로 설정하고, 부배열의 배열 간격을 (방사소자 배열 수)×(방사소자 간 간격)으로 설정하며, 주배열을 1:2:2:1로 비균등 급전하는 방법이다.

상기 제안된 비균등 부배열 설계 방법을 이용하여 16×8 배열 실험 안테나를 설계 및 제작 하였으며, 측정된 이득과 각 축의 부엽레벨은 각각 25.53 dBi와 19.58, 21.55 dB으로, 제안된 비균등 부배열 안테나 설계 방법이 타당하였음을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 비균등 부배열 안테나 설계 방법은 부엽레벨의 개선과 함께 고 이득 방사특성을 요구하는 다양한 분야에 활용 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] Haupt, Randy L., "Reducing Grating Lobes Due to Subarray Amplitude Tapering," IEEE Trans Antennas and Propagation, 33, (8), pp. 846-850, 1985.
- [2] Cheng-Cheh Yu, "Side-Lobe Reduction of a Symmetric Broadside Array by Spacing Perturbation," Microwave and Optical Technology Letters, 13, (3), pp. 147-149, 1996.
- [3] Wilson Rodrigo Mognon, Wilson Arnaldo Artuzi Jr. and Jose Ricardo Descardec, "Tilt Angle and Side-Lobe Level Control of Microwave Array Antennas," Microwave and Optical Technology Letters, 33, (1),

- pp. 12-14, 2002.
- [4] Ji-Hoon Bae, Kyung-Tae Kim, Joon-Ho Lee, Hyo-Tae Kim and Jae-Ick Choi, "Design of Steerable Non-Uniform Linear Array Geometry for Side-Lobe Reduction," *Microwave and Optical Technology Letters*, 36, (5), pp. 363-367, 2003.
- [5] Paolo Rocca, Randy L. Haupt, Andrea Massa, "Sidelobe Reduction Through Element Phase Control in Uniform Subarrayed Array Antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, pp. 437-440, 2009.
- [6] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, "Antenna Theory and Design," Wiley.
- [7] 박진우, 류지호, "무인 항공기 탐재용 Ku대역 안테나에 관한 연구," Vol. 17, No. 1, pp. 50-56, 2014.