유전 알고리즘을 이용한 광대역 부배열 최적화 설계

Optimized Design of Wide-Band Subarray Using a Genetic Algorithm

김 두 수 · 이 동 국 · 김 선 주

Doo-Soo Kim · Dong-Koog Lee · Seon-Joo Kim

요 약

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용한 광대역 부배열 최적화 설계에 대해 기술하였다. 먼저 무한 주기 구조의 삼각 배열을 이용하여 광대역 복사 소자를 설계하였다. 너치 구조의 복사 소자로 정면 빔 조향 시 능동 반사 계수 -10 dB 이하를 만족하는 최대 및 최소 주파수 비가 약 2:1 정도로 광대역 특성을 가지고 있다. 이러한 광대역 배열 소자 1,100여개로 이루어진 안테나 구조의 부배열 최적화를 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 대조군인 규칙 부배열 안테나 구조와 비교해서 최적화(불규칙) 부배열 안테나 구조의 최대 부엽 준위가 4.5~5.5 dB 정도 개선되었음을 확인하였다.

Abstract

This paper specifies on optimized design of wide-band subarray using a Genetic Algorithm. First wide-band radiator was designed at triangle lattice of infinite array structure. It is the radiator of notch type that has a wide-band characteristic of ratio 2:1 between maximum and minimum frequency satisfying active reflection coefficient under -10 dB at boresight. And a Genetic Algorithm was applied to optimize subarray partition of antenna consisting of 1,100 array elements. It was confirmed that an optimized subarray antenna has a 4.5~5.5 dB more improved maximum SLL (Side-Lobe Level) than regular subarray antenna.

Key words : Genetic Algorithm, Subarray, Wide-Band Radiator, Antenna Pattern, SLL(Side-Lobe Level)

I. 서 론

최근 레이더는 탐지, 추적 및 사격 통제 등 다양한 기능들이 동시 수행 가능한 다기능 레이더 형태로 발전해 가고 있으며, 고출력 튜브 타입의 송신기를 이용한 수동 위상 배열에서 반도체형 송수신 모듈을 이용한 능동 위상 배열로 진화해 가고 있다. 현재 능동 위상 배열 레이더는 지상, 해상 및 공중에서 다양한 플랫폼에 탑재되어 운용되고 있다. 능동 위상 배열 레이더는 이러한 탑재 플랫폼에 따라 필요한 여러 기술들을 접목하여 운용하고 있으며, RF(Radio

Frequency) 하드웨어, 신호 처리 및 이를 통합하는 체계 기술의 성숙도에 따라 레이더의 성능이 좌우된다.

능동 위상 배열 레이더는 운용 목적에 따라 수 백 혹은 수 천 개의 배열 소자로 구성된 위상 배열 안테나를 탑재하고 있으며, 개별 배열 소자를 각각 제어 및 신호 처리할 수 있다. 이로 인해 외부의 제밍 상황과 심각한 클러터 환경 속에서 미세 표적 신호까지도 획득할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 고속 및 고용량 데이터 연산, 전송 및 처리 기술 등이 확보되어야 하며, 하드웨어의 복잡도 및 비용 측면에서도

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 26, 2011 ; Revised December 5, 2011 ; Accepted January 4, 2012. (ID No. 20111026-134)

· Corresponding Author : Doo-Soo Kim (e-mail : kim-4977@hanmail.net)

많은 부담을 떠안아야 한다. 따라서 현재 능동 위상 배열 레이더는 다수의 배열 소자들을 묶어 부배열을 형성하여 앞서 언급한 위험 요소들을 일정 수준에서 해소하는 형태로 연구 및 개발되고 있다.

능동 위상 배열 안테나에 적용되는 부배열은 신호 처리 단계에서 다중 빔 및 적응 빔 등의 디지털 빔 형성을 가능하게 하여 빔 형성의 자유도를 높이는 장점이 있다. 일반적으로 규칙(regular) 및 불규칙(irregular) 부배열로 구분하며, 하드웨어 구조 및 안테나 빔 성능 등을 고려하여 선택이 가능하다. 최근에는 안테나 빔 성능을 개선하고자 불규칙 부배열 설계에 초점을 맞추어 연구가 진행되고 있다. 부배열 구조 설계 시에는 성능을 개선하기 위해 최적화 과정이 필요하며, 일반적으로 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 적용하고 있다^{[1],[2]}. 유전 알고리즘은 공학분야 전반에 걸쳐 최적화 결과를 도출해 내기 위해 사용되고 있으며, 단일 혹은 다목적 함수를 설정하여 수행된다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 유전 알고리즘에 기반하여 광대역 부배열을 설계하고자 한다. 최근 위상 배열 안테나의 복사 패턴 합성 및 임피던스 특성을 최적화하기 위해 유전 알고리즘을 일부 적용하였고^{[5],[6]} 부배열 설계와 관련해서는 대부분 수학적 모델의 복사 소자 및 특정 주파수에 국한하여 유전 알고리즘을 적용한 연구가 진행되었다. 반면, 본 논문에서는 위상 배열 안테나에 적용 가능한 광대역 복사 소자를 설계하고 이를 유전 알고리즘을 이용한 부배열 설계 시 적용하여 안테나 빔 성능을 개선하고자 하였다.

II. 광대역 복사 소자 설계

2-1 안테나 배열 구조 및 복사 소자 구조

일반적으로 평면 안테나의 배열 구조는 삼각 및 사각 배열로 구분할 수 있으며, RF(Radio Frequency) 성능, 기구적 복잡도 및 비용 등을 고려하여 배열 구조를 선정한다. 본 논문에서는 빔 조향 영역의 요구도와 비용의 효율성 측면을 우선 고려하여 그림 1과 같이 삼각 배열을 배열 안테나의 기본 구조로 선정하여 복사 소자를 설계하였다.

배열 안테나의 복사 소자는 무한 주기 구조를 가정한 단위 셀(unit cell) 모델을 이용하여 설계되었다.

그림 1. 안테나 배열 구조

Fig. 1. Antenna array structure.

그림 2. 복사 소자 구조

Fig. 2. Radiator structure.

전자파 해석 프로그램인 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용하였으며, Master/Slave 경계면 조건(boundary condition)을 적용하여 최종 설계된 복사 소자 구조는 그림 2와 같다($D_1=6$ mm, $D_2=5.6$ mm, $D_3=1$ mm, $L_1=30$ mm, $L_2=10.7$ mm, $L_3=5.1$ mm, $L_4=6.2$ mm, $W_1=17$ mm, $F_1=9.8$ mm, $F_2=7$ mm, $F_3=2.5$ mm, 유전율=3.5).

광대역 특성을 가지는 너치 타입의 복사 소자로 급전부(feed), 천이부(transition), 테이퍼드 슬롯부(tapered slot) 및 비아(via)로 구성되어 있다. 천이부는 급전부에서 테이퍼드 슬롯부로 전파를 여기시키며, 테이퍼드 슬롯부는 자유 공간으로 전파를 복사하는 역할을 한다. 전반적인 광대역 특성은 천이부 및 테이퍼드 슬롯부를 구성하는 구조의 임피던스 매칭에 의해 이루어진다^[7]. 일반적으로 테이퍼드 슬롯은 지수(exponential) 혹은 1차 선형 함수의 형태로 구성되지만, 본 논문에서는 전체 안테나 구조의 깊이를 고려하

그림 3. 능동 반사 계수(정면 빔 조향 시)
Fig. 3. Active reflection coefficient at bore-sight.

여 계단(step) 형태의 구조로 설계하였다. 또한, 비아는 복사 소자 구조에서 나타나는 공진 특성에 의해 주기적으로 높게 나타나는 능동 반사 계수를 줄이고자 사용되었다^[8].

2-2 복사 소자 설계 결과

그림 3은 설계된 복사 소자의 능동 반사 계수를 나타내고 있다. 능동 반사 계수는 복사 소자의 자기 반사 계수와 인접하고 있는 복사 소자들과의 상호 결합 계수를 합친 것을 의미한다. 능동 반사 계수 -10 dB 이하를 만족하는 최대 및 최소 주파수 비가 약 2:1 정도로 광대역 특성을 보여주고 있다.

그림 4와 5는 설계된 복사 소자의 방위각 및 고각의 복사 패턴을 보여주고 있다. 광대역 특성을 만족하는 주파수 대역 내에서 대표적인 주파수 8 GHz, 10 GHz 및 12 GHz의 복사 패턴을 나타내었다. 방향

그림 4. 능동 배열 소자 복사 패턴(방위각)
Fig. 4. Active element pattern at azimuth direction.

그림 5. 능동 배열 소자 복사 패턴(고각)
Fig. 5. Active element pattern at elevation direction.

별 복사 패턴은 거의 대칭을 이루고 있으며, 주파수가 증가함에 따라 빔 폭이 감소하는 일반적인 안테나 특성을 그대로 보여주고 있다.

그림 6과 7은 방위각 및 고각 방향으로 빔 조향 시 계산된 능동 반사 계수를 보여주고 있다. 방위각 방향으로 30도와 60도 빔 조향 시 10 GHz 근처에서 -5 dB 이상의 값을 나타내고 있으며, 고각 방향으로 60도 빔 조향 시 11 GHz 근처에서 0 dB 이상의 값을 가지고 있다. 후자의 경우는 입력 신호 대비 반사되어 되돌아오는 신호의 양이 더 많다는 의미이다.

이는 복사 소자가 캐비티(cavity) 구조를 가지고 있어 특정 주파수에 대해 공진(resonance)이 발생하기 때문이며, 복사 소자 내에 비아의 위치를 일부 조정하여 능동 반사 계수 특성을 일부 개선할 수 있다^[8].

2장에서는 광대역 복사 소자 설계에 대해서 다루

그림 6. 능동 반사 계수(방위각 빔 조향 시)
Fig. 6. Active reflection coefficient at azimuth beam-steering.

그림 7. 능동 반사 계수(고각 빔 조향 시)

Fig. 7. Active reflection coefficient at elevation beam-steering.

었다. 일부 특정 각도로 빔 조향 시 높은 능동 반사 계수를 보여주고 있지만, 전반적으로 광대역 주파수 대역 내에서 빔 조향 여부에 관계없이 수용 가능한 능동 반사 계수 및 복사 패턴 특성을 가지고 있어 광대역 복사 소자로서 적용 가능성을 확인하였다.

Ⅲ. 유전 알고리즘을 이용한 부배열 최적화 설계

3-1 유전 알고리즘 적용 개요

유전 알고리즘은 적용 대상과 이에 상응하는 목적함수를 설정하여 수행된다. 그림 8은 유전 알고리즘의 적용 대상으로 최적화 구조를 설계하기 위한 안테나 개구면 구조를 나타내고 있으며, 약 1,100개의 배열 소자로 구성되어 있다. 그리고 식 (1)은 유전 알고리즘의 목적함수로 광대역 주파수 영역에 걸쳐 부배열 단계에서 빔 조향 시 설계된 불규칙 부배열 안테나 빔 패턴이 최소 부엽 준위(SLL)를 가지도록 함수를 설정하였다. 규칙 부배열 안테나의 최대 부엽 준위를 기준값으로 설정하였고, 주파수 별(8 GHz/10 GHz/12 GHz) 양 주 평면(k_x, k_y)의 최대 부엽 준위를 입력 변수로 두었다. 여기서 k_x 와 k_y 는 공간 도메인을 나타내며, sine 도메인($-1 \leq k_x, k_y \leq 1$) 혹은 각도(deg) 도메인($-90 \leq k_x, k_y \leq 90$)으로 나타낼 수 있다. 그리고 SLL_{irre} 와 SLL_{re} 는 각각 불규칙 부배열 및 규칙 부배열의 부엽 준위를 나타낸다. 유전 알고리즘을 적용하여 최적화 부배열 설계 시 안테나 모노펄스 빔 성능을 고려하여 안테나 개구면을 4개 사

그림 8. 배열 안테나 개구면

Fig. 8. Array antenna aperture.

분면으로 구분하여 동일하게 형성되도록 제한조건을 주었다. 그리고 설계되는 전체 부배열 개수는 총 16개로 설정하였다.

$$F = \sum_{freq=f_{low}}^{f_{high}} [SLL_{irre}(freq, k_x, k_y) - SLL_{re}(freq, k_x, k_y)] \quad (1)$$

유전 알고리즘은 그림 9와 같은 순서로 구현되었고, 주요 내용은 다음과 같다. 초기 인구(population) 구성 시 16개 부배열로 구성된 안테나가 하나의 염색체(chromosome)를 나타내며, 각 부배열은 임의의 인수를 발생시켜 각 부배열의 위치 중심을 선정하여 생성하였다. 다양한 형태의 부배열들을 구성하고자 임의의 인수 발생기를 적용하였고, 총 300 세트의 안테나 구조로 초기 인구를 구성하였다. 유전 알고리즘에 있어서 차세대(next generation)인 자손을 구성하기 위해서는 현세대(current generation)인 부모로부터 유전자 교배와 돌연변이 과정이 필요하다. 현세대를 구성하고 있는 인구 범위 내에서 2개의 부모 염색체를 임의로 선정하여 2개의 자손 염색체를 생성하였으며, 교배 시 각 안테나 열(column)을 구성하는 총 배열 소자 개수를 고려하여 선정된 배열 소자 개수만큼 상호 교환하였다. 따라서 각 열의 교배되는 배열 소자 개수는 다르게 된다. 이러한 과정들을 통해 생성된 인구 개체는 식 (2), (3)과 같이 안테나 빔 패턴을 계산할 수 있고, 최대 부엽 준위를 확인할

그림 9. 유전 알고리즘 구현 흐름도
Fig. 9. Flow chart of genetic algorithm.

수 있다. 안테나 빔 패턴(AP)은 배열 소자 패턴(f_{ele}), 부배열 패턴($f_{sub,n}$) 및 superarray(f_{super}) 패턴을 합산하여 계산된다. 소자 단위에서는 -30 dB Taylor 분포를 적용하였고, 부배열 단위에서는 균일(uniform)분포를 적용하였다. Superarray 패턴은 식 (4)와 같이 16개 부배열의 위상중심($x_{sub,m}$, $y_{sub,m}$)을 이용하여 계산되었으며, 주 평면에서 각각 3.5° (빔 폭) 빔 조향을 하여 디지털 빔 형성이 되도록 하였다.

$$AP(k_x, k_y) = \sum_{sub,n=1}^{16} AP_1 \cdot f_{sub,n}(k_x, k_y) \quad (2)$$

$$AP_1(k_x, k_y) = f_{ele}(k_x, k_y) \cdot f_{super}(k_x, k_y) \quad (3)$$

$$f_{super} = \sum_{sub,m=1}^{16} e^{jk_0 [x_{sub,m}(k_x - k_{x0}) + y_{sub,m}(k_y - k_{y0})]} \quad (4)$$

$$(k_0 = 2\pi/\lambda, k_{x0} = \sin\theta_0 \cos\phi_0, k_{y0} = \sin\theta_0 \sin\phi_0)$$

안테나 빔 패턴을 이용하여 16개의 부배열로 구성된 각 인구 개체의 최대 부엽 준위를 계산하고 나면, 값(cost, 최대 부엽 준위)의 크기에 따라 우선 순위를 결정한다. 다음 세대를 구성하기 위해서는 인구가 적절한 개체 수를 유지해야 하며, 이를 위해 우선순위가 높은 30개의 개체를 남기도록 설정하였다. 그리고 이러한 과정들로 구성된 세대(generation) 수는 60으로 설정하여 총 세대를 거치고 나면 유전 알고리즘이 종료되도록 설계하였다. 위 식 (2)~(4)에서 보는 것처럼 안테나 빔 패턴은 많은 양의 계산이 필요한 관계로 유전 알고리즘의 수행 속도를 개선하고자 8개의 CPU를 이용하여 병렬 처리 연산을 수행하였다. 직렬 처리 계산에 비해 약 5.6배 정도 연산 속도가 개선되는 것을 확인하였다.

그림 10. 규칙 부배열 구조
Fig. 10. Regular subarray structure.

3-2 대조군(규칙) 부배열 안테나 빔 패턴

그림 10은 규칙 부배열 안테나 구조를 나타내고 있다. 유전 알고리즘 적용 시 식 (1)에서 기술된 것처럼 목적함수에서 규칙 부배열 안테나의 최대 부엽 준위를 기준값으로 설정하였으므로, 이를 위한 대조군이 되는 부배열 안테나 구조가 필요하다. 그림 10에서 보는 것처럼 원형 개구면을 16개 부배열로 분할하였으며, 대각선 방향의 4개 부배열을 제외하면 거의 동일한 개구면 크기를 갖는 부배열로 분할되었다.

그림 11과 12는 규칙 부배열 구조에 대한 주 평면의 안테나 패턴을 보여주고 있다. 2장에서 설계된 광대역 복사 소자의 주파수 대역에서 중심 주파수가 되는 10 GHz에 대해 배열 소자 패턴, 부배열 패턴

그림 11. 규칙 부배열 안테나 패턴(10 GHz)
Fig. 11. Regular subarray antenna pattern(10 GHz).

그림 12. 규칙 부배열 안테나 패턴(10 GHz)

Fig. 12. Regular subarray antenna pattern(10 GHz).

및 superarray 패턴을 나타내었다. 그림 10에서 대표가 될 수 있는 부배열 패턴을 나타내었고, superarray 패턴은 각각 3.5도 빔 조향을 거친 안테나 패턴을 나타내었다. 부배열 개구면이 정사각형 형태의 비슷한 크기를 가지고 있어 양 주 평면에서 그려지는 부배열 및 subarray 패턴이 거의 동일함을 확인할 수 있다. 또한, 부배열 및 subarray 패턴을 통해 약 $-7 \sim -8$ 도 사이에서 최대 부엽 준위가 형성될 수 있음을 예상해 볼 수 있다.

그림 13은 10 GHz에서 규칙 부배열 구조의 2차원 전체 안테나 패턴을 보여주고 있다. 각 주 평면에서 최대 부엽 준위가 형성되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 14와 15는 규칙 부배열 구조의 각 주파수에 대해 양 주 평면의 전체 안테나 패턴을 보여주고 있다. 광대역 주파수 대역 내에서 대표적인 하한, 중심 및 상한 주파수가 될 수 있는 8 GHz, 10 GHz 및 12 GHz를 선정하여 안테나 패턴을 도시하였다. 앞서 부배열 및 superarray 패턴 도식에서 예상한 것처럼 10 GHz는 $-7 \sim -8$ 도 근처에서 최대 부엽 준위가 형성되고 있고, 상한 및 하한 주파수 또한 근처에서 최대 부엽 준위가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 각 주 평면 간 최대 부엽 준위는 거의 동일하며, 주파수에 대해서는 최대 부엽 준위가 상한주파수 -5 dB, 중심 주파수 -7 dB, 하한 주파수 -10 dB 정도 되는 것을 확인할 수 있다.

3.3 최적화(불규칙) 부배열 설계 결과

그림 16은 유전 알고리즘을 적용하여 최종 설계

그림 13. 2차원 규칙 부배열 안테나 패턴(10 GHz)

Fig. 13. 2-dimensional regular subarray antenna pattern (10 GHz).

그림 14. 규칙 부배열 전체 안테나 패턴

Fig. 14. Total antenna pattern of regular subarray.

그림 15. 규칙 부배열 전체 안테나 패턴

Fig. 15. Total antenna pattern of regular subarray.

그림 16. 최적화 부배열 구조
Fig. 16. Optimized subarray structure.

그림 17. 최적화 부배열 및 superarray 안테나 패턴(10 GHz)
Fig. 17. Optimized subarray & superarray antenna pattern(10 GHz).

된 최적화 부배열 구조를 보여주고 있다. 알고리즘 내에서 세대를 거치는 동안 교배 과정을 통해 불규칙 구조의 부배열이 형성되었다. 사분면 내에서 부배열 구조 간 형태는 다르지만 개구면 크기는 크게 상이하지 않은 것을 볼 수 있다. 부배열 번호는 일사 분면 기준으로 중심에 가까이 위치한 부배열이 1번이며, 시계 방향으로 나머지 부배열은 각각 2, 3, 4번이 된다.

그림 17과 18은 10 GHz의 양 주 평면에서 최적화 부배열 구조의 각 부배열 및 superarray 안테나 패턴을 보여주고 있다. 그림 11, 12(규칙 부배열 안테나

그림 18. 최적화 부배열 및 superarray 안테나 패턴(10 GHz)
Fig. 18. Optimized subarray & superarray antenna pattern(10 GHz).

패턴)와 비교해서 최대 부엽 준위가 형성될 수 있는 $-7 \sim -8$ 도에서 superarray 부엽 준위 및 일부 부배열의 부엽 준위가 낮아 전체 안테나 패턴의 최대 부엽 준위가 개선될 수 있음을 예상해 볼 수 있다. 또한, 주 평면 간에는 동일 각도에서 ky 평면의 부배열 부엽 준위가 상대적으로 낮아 ky 평면에 대해서 보다 최적화된 부배열 구조라고 판단할 수 있다.

그림 19는 10 GHz에서 최적화 부배열 구조의 2차원 전체 안테나 패턴을 보여주고 있다. 그림 13과 비교해서 최대 부엽 준위는 개선된 반면, 그 외의 방향에서는 일부 부엽 준위가 높아진 것을 확인할 수 있다.

그림 19. 2차원 최적화 부배열 안테나 패턴(10 GHz)
Fig. 19. 2-dimensional optimized subarray antenna pattern(10 GHz).

그림 20. 최적화 부배열 전체 안테나 패턴
Fig. 20. Total antenna pattern of optimized subarray.

그림 21. 최적화 부배열 전체 안테나 패턴
Fig. 21. Total antenna pattern of optimized subarray.

그림 20과 21은 최적화 부배열 구조의 각 주파수에 대해 양 주 평면의 전체 안테나 패턴을 보여주고 있다. 각 주 평면 간 최대 부엽 준위는 다르며, 주파수에 대해서는 양 주 평면의 평균 최대 부엽 준위가 상한주파수 -9.5 dB, 중심 주파수 -12 dB, 하한 주파수 -15.5 dB 정도 되는 것을 확인할 수 있다. 이로써 유전 알고리즘을 적용한 최적화 부배열 설계 시 목적함수로 설정하였던 최대 부엽 준위가 상한, 중심 및 하한 주파수에서 $4.5 \sim 5.5$ dB 정도 개선되었음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용한 광대역 부배열 최적화 설계에 대해 기술하였다. 먼저 무한 주기 구조의 삼각 배열을 이용하여 광대역 복사 소

자를 설계하였다. 너치 구조의 복사 소자로 정면 빔 조향 시 능동 반사 계수 -10 dB 이하를 만족하는 최대 및 최소 주파수 비가 약 2:1 정도로 광대역 특성을 가지고 있다. 이러한 광대역 배열 소자 1,100여 개로 이루어진 안테나 구조의 부배열 최적화를 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 대조군인 규칙 부배열 안테나 구조와 비교해서 최적화(불규칙) 부배열 안테나 구조의 최대 부엽 준위가 $4.5 \sim 5.5$ dB 정도 개선되었음을 확인하였다.

초기에 언급한 것처럼 최적화 대상인 전체 안테나 구조는 4개의 동일한 사분면으로 분할하는 제한 사항을 두었다. 이로 인해 불규칙 부배열의 종류는 총 4종으로 제한되었고, 최대 부엽 준위가 광대역 주요 주파수 대역에서 $4.5 \sim 5.5$ dB 정도 개선되었다. 이러한 제한사항을 부배열 분할 시 보다 완화한다면 현재보다는 더욱 개선된 안테나 빔 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] D. Ansell, E. J. Hughes, "Use of multi-objective genetic algorithms to optimise the excitation and subarray division of multifunction radar antennas", *Multifunction Radar and Sonar Sensor Management Technique*, IEE, 2001.
- [2] D. Ansell, E. J. Hughes, "Using multi-objective genetic algorithms to optimise the subarray partitions of conformal array antenna", *Antenna and Propagation 12th International Conference*, pp. 151-155, 2003.
- [3] R. L. Haupt, *Genetic Algorithm in Electromagnetics*, Wiley Inter-science, 2007.
- [4] E. Zitzler, L. Thiele, "An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The strength pareto approach", *TIK-Report*, 1998.
- [5] D. W. Boeringer, D. H. Werner, and D. W. Machuga, "A simultaneous parameter adaptation scheme for genetic algorithms with application to phased array synthesis", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 1, Jan. 2005.
- [6] B. Thors, H. Steyskal, and H. Holter, "Broad-band

fragmented aperture phased array element design using genetic algorithm", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 10, Oct. 2005.

- [7] J. Shin, D. H. Schaubert, "A parameter study of stripline-fed vivaldi notch-antenna arrays", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47,

no. 5, May 1999.

- [8] H. Holter, T. Chio, and D. H. Schaubert, "Elimination of impedance anomalies in single- and dual-polarized endfire tapered slot phased arrays", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 1, Jan. 2000.

김 두 수

2001년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 안테나 제어 시스템, 최적화 알고리즘 구현

김 선 주

1986년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계, 항공기 레이더

이 동 국

1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 설계, 위상 배열 안테나 오차보정, 다기능 레이더