능동 위상 배열 안테나의 반사 특성을 고려한 안정적 시스템 운용에 관한 연구

A Study on the Stabilized System Operation Considering the Reflection Characteristic of an Active-Phased Array Antenna

김영완 · 채희덕 · 이동국* · 정명득* · 박종국

Young-Wan Kim · Heeduck Chae · Dong-Kook Lee* · Myung-Deok Jeong* · Jongkuk Park

요 약

본 논문에서는 능동 위상 배열 안테나(APAA: Active-Phased Array Antenna)의 능동 반사 계수(ARC: Active Reflection Coefficient) 개선 및 보호 회로 구성을 통한 안정적인 시스템 운용에 관하여 연구하였다. 수동 위상 배열 안테나에서와 달리 APAA는 복사 소자와 송수신 모듈이 결합된 형태로 일반적인 수동 위상 배열 안테나의 반사 계수 특성과 차별된 새로운 ARC의 정의가 적용되어야 한다. ARC는 방사하는 소자로부터의 자기 반사 계수 외에 인접한 방사 소자로부터 유기되는 결합량의 중첩을 고려한 반사 계수이다. 이는 능동 위상 배열 레이더(APAR: Active-Phased Array Radar) 시스템의 특성을 예측하고 분석하는데 중요한 파라미터가 된다. 운용 중 발생하는 높은 ARC는 시스템 성능 열화에 직접적인 원인이 된다. 본 논문에서는 APAR의 안정적인 운용을 위한 방안으로 ARC의 성능을 개선시키는 방안과 보호 회로를 통한 열화 방지 방안에 관하여 분석하였다. 실제 제작한 능동 위상 배열 안테나의 실험 결과를 통해 두 방안의 유효성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, a stabilized system operation through a composition of a protective circuit and an improvement of active reflection coefficient(ARC) is studied. Unlike the passive-phased array antenna, the APAA is a combined form of radiating element and transmitter-reciever module. Therefore, a definition of new ARC that differentiates itself from typical passive-phased array antenna must apply. The ARC is a reflection coefficient considering a superposition of a coupling from nearby radiating elements and self reflection. It is an important parameter that predicts and analyzes characteristics of a APAR system. A high level ARC is a direct source inducing a performance degradation of a system. In this paper, as a method for a stabilized operation of APAR, one method for improving a performance and another for degradation prevention are analyzed. An effectiveness of two methods was validated using experiment results of real-fabricated active-phased array antenna.

Key words : Active-Phased Array Antenna, Active Reflection Coefficient, Mutual Coupling Coefficient

I. 서 론

배열 소자의 위상을 조절하여 빔을 컨트롤할 수 있는 위상 배열 레이더는 군용 및 민수용으로 많이

「본 과제는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음.」

(주)LIG넥스원(LIG Nex1)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20110929-109

· 교신저자 : 박종국(e-mail : snudyong@hanmail.net)

· 심사일자 : 2011년 10월 31일 · 수정완료일자 : 2011년 11월 15일

이용되고 있다. 현재 위상 배열 레이더에 장착되는 위상 배열 안테나는 기존의 수동 위상 배열 안테나에서 능동 위상 배열 안테나로 발전되고 있는 추세이다. 전파의 송신과 수신이 별도로 수행될 뿐 아니라 고출력을 위해 큰 부피를 차지하는 수동 위상 배열 레이더는 송수신기를 각 배열마다 장착하여 소형 병렬 모듈들로 고출력을 내며, 점진적 성능 저하에 강점을 가지는 능동 위상 배열 레이더로 발전되고 있다^[1]. 하지만 능동 위상 배열 레이더의 경우, 송신 빔 형상을 가변하기 위해 크기 및 위상 weighting을 적용하면 각 반도체 송수신기(TRM: Transmit-Receive Module)에 반사되어 돌아오는 신호의 크기가 모듈별로 다르게 되며, 일부 모듈은 상대적으로 큰 신호가 반사되게 된다. 이러한 능동 위상 배열 안테나에서의 반사 신호를 수치화하기 위해 기존의 수동 위상 배열의 반사 계수와 다른 개념의 능동 반사 계수의 정의가 필요하다. 능동 반사 계수는 모든 송신 배열 소자에 신호가 인가된 경우에 인가한 신호 대비 반사되어 돌아오는 신호의 크기로 정의된다. 반사되는 신호는 자기 반사에 의한 성분과 인접 배열 소자에서 발생한 신호가 상호 결합되어 들어오는 성분이 중첩되어 나타난다. 수동 위상 배열의 반사 계수가 자기를 제외한 다른 신호 성분이 없는 경우에 자기 신호에 대한 반사 성분만을 정의하는 반면, 능동 반사 계수는 자기 신호에 의한 반사뿐 아니라 인접 소자와의 상호 결합되는 성분까지 고려하여야 능동 위상 배열의 전력을 제대로 계산할 수 있다. 현재까지 배열 안테나에서 상호 결합 성분을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다^{[2],[3]}. 배열 소자의 간격을 조절하거나 유전체층을 조절하여 상호 결합 성분을 최소화하는 등 기존의 연구와 달리 본 논문은 기생 소자를 이용한 상호 결합 성분 최소화에 대하여 연구하였다. 능동 반사 계수가 크면 반도체 송수신기로 되돌아오는 반사 신호의 크기가 크다는 의미가 되고, 이는 반도체 송수신기의 송수신 채널 소자 고장 및 수명 주기를 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 능동 위상 배열 안테나에서 빔 형상 가변을 위해 배열 소자의 크기 및 위상 weighting을 적용한 경우, 특정 반도체 송수신기의 능동 반사 계수가 급격하게 증가할 수 있다. 따라서 안정적인 레이더 시스템 운용을 위해서는 배열 소자 단독의 최대 능동 반사 계

수를 낮추는 근본적인 해결책 강구와 보호 회로의 적용이 필수적이다.

본 논문에서는 능동 위상 배열 안테나 시스템 운용 중 능동 반사 계수의 증가에 의한 성능 열화를 방지하고, 안정적인 시스템 운용을 위한 능동 반사 계수의 최소화 방안 및 반도체 송수신기의 보호 회로 설계 방안에 대하여 소개하도록 하겠다.

II. 본 론

2-1 능동 반사 계수

능동 반사 계수는 능동 위상 배열 안테나의 송신 시 발생하는 배열 소자간 상호 결합 영향을 고려한 수치로 능동 위상 배열 안테나의 성능을 가늠하는 척도가 된다. 능동 위상 배열 안테나는 주로 배열 소자의 위상을 조절하여 빔을 컨트롤하기 때문에 능동 반사 계수는 배열 소자의 위상 분포에 따라 바뀌게 된다^{[4]~[6]}. 레이더 운용 모드에 따라 빔을 다르게 형성하는 시스템에서는 빔 모드, 주파수, 빔 조향각 등에 따라 배열 소자의 위상 상태가 바뀌므로 능동 반사 계수는 설계 및 시험 평가 단계에서 세심하게 고려되어야 하는 요소이다. 실제 안테나 설계는 주기 구조를 이용하여 집중 빔에 대하여 설계되는 반면, 운용은 빔 모드에 따라 형성 빔을 사용하므로, 빔 모드에 따라 능동 반사 계수는 커질 수밖에 없다. 운용 주파수별 전 채널의 평균 능동 반사 계수 증가는 운용 빔의 이득에 손실을 초래하며, 주파수별 최대 능동 반사 계수의 증가는 반도체 송수신기를 손상시켜 MTBF(Mean Time Between Failure)를 감소시킨다. 일반적인 능동 위상 배열 안테나의 능동 반사 계수 정의는 다음과 같다. 그림 1에서 보는 것처럼 N 번째 반도체 송수신기의 출력 a_N 이 N 번째 안테나를 통해 자기반사되는 성분을 $S_{N,N}$ 이라고 하고, 임의의 M 번째 안테나로부터 상호 결합되는 성분을 $S_{N,M}$ 이라고 한다면 N 번째 포트에 넘어오는 총 반사 성분 b_N 은 다음과 같이 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$b_N = \dots + S_{N,N-1}a_{N-1} + S_{N,N}a_N + S_{N,N+1}a_{N+1} + \dots \quad (1)$$

최종적으로 N 번째 포트에서의 능동 반사 계수는 다음의 식으로 정의될 수 있다.

그림 1. 능동 반사 계수 개념
 Fig. 1. Definition of active-reflection coefficient.

$$\Gamma_N^{active} = \frac{b_N}{a_N} = \sum_M C_{N,M} \quad (2)$$

$$C_{N,M} = S_{N,M} \cdot \frac{a_M}{a_N} \quad (3)$$

동일한 반도체 송수신기의 출력을 가정하면 능동 반사 계수는 식 (4)에서와 같이 빔 모드별 위상 분포 (W_{mode}), 주파수(f) 및 빔 조향각(θ)의 함수가 된다. 식 (4)에서의 D 는 배열 소자 간의 간격을 의미하며, 빔 모드별 위상 분포는 레이더 운용 모드에 적합한 빔을 형성하기 위한 배열 소자별 위상 변이값을 의미한다.

$$\Gamma_N^{active} = W_{mode} \sum_M C_{N,M} \exp \left[j \frac{2\pi f}{c} D(M-N) \sin(\theta) \right] \quad (4)$$

(W_{mode} : 빔 모드별 채널 위상 분포)

식 (4)에서 보듯이 능동 반사 계수는 시스템 운용 중에 계속적으로 변하게 된다. 실제 레이더 운용 중에 능동 반사 계수는 모든 복사 소자 출력 포트에서 $S_{N,M}$ 값을 측정할 수 있는 수학적 계산을 통해 빔 모드, 주파수, 조향각 조향에 따른 능동 반사 계수를 예측할 수 있다.

2-2 보호 회로 구성 방안

그림 2. 기존 송수신 경로 개념도
 Fig. 2. Original transmit-receive path concept.

능동 반사 계수에 의한 시스템 성능 열화를 방지하기 위해 보호 회로를 구성하여 안정적인 시스템 운용 방안을 마련하였다. 능동 위상 레이더의 핵심 부품인 반도체 송수신기의 고장은 시스템의 운용상 성능 열화를 의미하므로 송수신 경로상의 보호 회로를 통한 시스템 안정화에 대한 방안이 필요하다. 그림 2는 능동 위상 배열 레이더의 송수신 경로에 대한 개념을 보여준다.

그림에서와 같이 반도체 송수신기 송신 출력 레벨은 ALC(Auto-Level Control) 단자로 유입되는 신호를 점검하여 조절된다. 하지만 특정 빔 모드, 주파수, 조향각 상태에서 반사전력이 크게 유입되어 출력 신호와 합쳐져 TRM의 소출력 또는 과출력을 유발하고, TRM이 정상 동작하는 것을 방해한다. 이러한 구조적인 문제를 해결하고, 반도체 송수신기를 보호하기 위한 방안은 그림 3과 같다. 그림에서처럼 ALC 단자를 서큐레이터 전단에 위치시켜 특정 위상 상태에서의 반사 전력의 유입을 차단시키고, 일정한 ALC 레벨을 유지하여 반도체 송수신기의 손상을 방지하는 개념이다.

2-3 자기 반사 계수 개선에 의한 능동 반사 계수 개선 방안

그림 3. 개선된 송수신 경로 개념도
 Fig. 3. Improved transmit-receive path concept.

그림 4. 변환 구조 형상 비교

Fig. 4. Comparison of conversion structure form.

보호 회로를 통한 능동 반사 계수에 좀 더 안정화된 송수신 경로를 구성하는 것과 더불어 실제 능동 반사 계수를 개선시키는 방안에 대하여 분석하였다. 식 (1)에서 보는 것처럼, 능동 반사 계수를 줄이기 위해서는 $S_{N,N}$, $S_{N,M}$ 에 대한 개선이 필요하다. 자기 반사 계수의 증가로 능동 반사 계수가 증가하는 사례는 입력단의 조립 공차에 의한 자기 반사 계수 증가 사례를 통하여 확인하였다.

그림 4는 기존 및 변경된 변환 구조 형상을 보여 준다. 스트립 형태의 복사 소자와 급전 구조를 가지는 배열 소자를 동축 케이블로 급전하기 위해 필요한 변환 구조를 기존에는 그림처럼 위, 아래가 분리된 구조로 설계하였다. 분리 구조는 조립성이 편리한 반면, 조립 공차에 의한 입력단의 자기 반사 계수의 증가를 유발하여 능동 반사 계수의 증가를 초래하였다. 그림 5는 분리형과 일체형 구조에 의한 자기 반사 계수 특성 및 능동 반사 계수의 특성을 보여 준다. 총 측정 포트는 7개이며, 7개 포트에 대한 S_{11} 값을 PNA로 측정한 결과이다. 분리형에 대비해 전 포트에서 약 5 dB 이상의 개선 효과를 보였다.

좀 더 구체적인 분석을 위해 시간 도메인 상에서 측정을 하였고, 결과는 그림 6과 같다. 분리형 구조에 비해 일체형 구조의 경우, 시간 도메인 상에서 보는 것처럼 0초 부근 즉, 커넥터 부분에서의 반사성분이 10 dB 이상 개선된 것을 볼 수 있다. 개선된 반사 계수 및 상호 결합 계수를 측정하여 각 주파수마다 빔 조향 범위를 고려하여 계산된 빔 모드 #3의 능동 반사 계수는 다음과 같다. 빔 모드 #3는 형성 빔이며, 주파수별 최대치 및 평균치 모두 개선된 특성을 확인할 수 있다.

계산된 능동 반사 계수를 바탕으로 확인한 전력 손실은 그림과 같이 주파수 별 최대 약 0.7 dB의 개

(a) 분리형 구조

(a) Separated structure

(b) 일체형 구조

(b) Combined structure

그림 5. 자기 반사 계수 비교(주파수 영역)

Fig. 5. Comparison of self-reflection coefficient(frequency domain).

선을 보였다. 계산 결과를 보듯 능동 반사 계수를 최소화시키기 위해서는 자기 반사 계수의 최적화가 필수 조건이며, 이러한 자기 반사 계수를 최소화하기 위해서는 반도체 송수신기 앞단의 배열 소자 또는 복사 소자의 자기 반사가 최소화되도록 설계되어져야 한다.

2.4 상호 결합 계수 개선에 의한 능동 반사 계수 개선 방안

능동 반사 계수를 개선하는 두 번째 방법은 $S_{N,M}$ 즉, 상호 결합 계수를 개선시키는 방법이다. 상호 결합 계수를 조절하는 가장 간단한 방법으로 간격을

(a) 분리형 구조
(a) Separated structure

(b) 일체형 구조
(b) Combined structure

그림 6. 자기 반사 계수 비교(시간 영역)

Fig. 6. Comparison of self-reflection coefficient(time domain).

최적화하거나 전파 흡수체를 이용하는 방안은 이미 많은 연구가 이루어졌다^{[7],[8]}. 하지만 이러한 방법은 안테나 크기가 증가하게 되고, 배열 안테나의 간격을 조절하는 방법은 빔 합성 시 그레이팅 로브가 발생할 수 있으므로 간격 조절 및 흡수체 등의 구조물에 의한 결합 계수 최적화에는 한계가 있다. 거리나 물리적인 배열 안테나의 변형 없이 이러한 결합 계수를 조절하기 위해 본 논문에서는 상호 결합 억제 구조를 적용하였다. 배열되어 있는 복사 소자 앞단에서의 상호 결합을 최소화하기 위해 설계된 구조를 삽입하여 상호 결합을 줄이는 방법이다. 즉, 상호 결합 억제 구조가 없는 경우에 상호 결합과 상호 결합 억

(a) 최대 능동 반사 계수
(a) Maximum active-reflection coefficient

(b) 평균 능동 반사 계수
(b) Average active-reflection coefficient

그림 7. 능동 반사 계수 비교(최대치, 평균치)

Fig. 7. Comparison of active-reflection coefficient(maximum/average value).

제 구조에 의해 인위적으로 발생한 성분을 서로 상쇄시켜 결합 계수를 줄이는 방법이다. 이 방법은 능동 위상 배열 안테나 사이에 구조물이 삽입되어, 크기 변화나 안테나 배열 간격의 변화 없이 상호 결합 성분을 억제시킬 수 있는 장점이 있다.

그림 9는 배열 소자 사이에 상호 결합 억제 구조가 삽입된 형상을 보여준다. 'c'자 구조의 동작 원리는 그림 10에서 보는 것처럼 다이폴 안테나를 급전시키는 다이폴 Arm의 자기 성분을 유입시켜 안테나 소자 간의 결합 성분을 상쇄시키는 원리이다. 그림 10의 'B' 지점은 상호 결합 구조의 개방점 지점이

그림 8. 전력 손실 결과 비교
Fig. 8. Comparison of power-loss result.

그림 11. 상호 결합 계수 비교
Fig. 11. Comparison of mutual-coupling coefficient.

그림 9. 상호 결합 억제 구조 형상
Fig. 9. Form of mutual-coupling suppression structure.

그림 10. 상호 결합 억제 구조 동작 원리
Fig. 10. Operation principle of mutual-coupling suppression structure.

며, $\lambda/4$ 떨어진 'A' 지점은 단락점이 되어 가장 많은 양의 자기 성분이 유기되게 된다. 유기된 성분은 그림 9의 총길이 L_2 를 조절하여 안테나 소자 간의 결합

(a) 최대 능동 반사 계수
(a) Maximum active-reflection coefficient

(b) 평균 능동 반사 계수
(b) Average active-reflection coefficient

그림 12. 능동 반사 계수 비교
Fig. 12. Comparison of active-reflection coefficient.

그림 13. 전력손실 결과 비교

Fig. 13. Comparison of power-loss result.

그림 14. 상호 결합 억제 구조 형상

Fig. 14. Form of mutual-coupling suppression structure.

성분을 상쇄시키는 역할을 한다. 시뮬레이터를 통해 최초 배열 소자가 2개인 상태에서의 상호 결합 억제 구조를 최적화하였으며, 실제 적용될 16개 배열로 확장하여 최종 상호 결합 억제 구조를 최적화하였다. 실제 제작된 상호 결합 억제 구조의 유무에 따른 인접 소자간의 상호 결합 계수는 그림 11과 같이 대역내 약 4 dB 정도 결합량이 감소함을 볼 수 있다. 배열 간격이 멀어지면 상호 결합 계수가 미약하므로 능동 반사 계수에 미치는 영향은 인접한 소자 간의 영향이 가장 크게 된다. 측정된 상호 결합 계수를 적용하여 능동 반사 계수를 계산할 수 있으며, 구조물의 유무에 따라 주파수별 최대치와 평균치의 결과는 그림 12와 같았다. 상호 결합 억제 구조의 사용으로 빔 모드 #3의 능동 반사 계수 평균치 및 최대치 모두 약 2~3 dB의 개선 효과를 보였다. 개선된 능동 반사 계수로 인해 전력 손실은 주파수별 평균 약 0.5 dB의 개선 효과를 보였다.

상호 결합 억제 구조는 Flexible PCB 타입을 예칭 기법으로 제작하였으며, 최종 확정된 상호 결합 억

그림 15. 빔 모드 #3 방사 패턴

Fig. 15. Radiation pattern of beam mode #3.

제 구조의 조립 형상은 그림 14와 같다.

자기 반사 계수 및 상호 결합 계수가 최적화된 최종 능동 위상 배열 안테나의 송신 빔 #3번 방사 패턴은 그림 15와 같다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 능동 위상 배열 안테나의 반사 특성을 고려하여 시스템 보호 회로 및 반사 특성 개선에 대하여 분석하였다. 능동 반사 계수 개념을 적용하여 능동 위상 배열 안테나의 특성을 정의하고, 보호 회로 및 반사 성능 개선을 설명하였다. 배열 소자의 위상을 조절하여 운용 빔을 형성하는 능동 시스템에서 능동 반사 계수 특성에 덜 민감한 운용을 위해 반도체 송수신기에 보호 회로 개념을 적용하였다. 또한 근본적인 능동 반사 계수 문제를 해결하기 위해 배열 소자들의 자기 반사 계수 및 배열 소자간 상호 결합 계수를 최적화하였다. 시뮬레이션 및 측정을 통해 최적화를 수행하였고, 최적화된 결과가 능동 반사 계수에 미치는 영향을 측정을 통해 분석하였다. 분석 결과는 능동배열 레이다 시스템의 안정화를 위한 방안으로 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 전순익, "Ka 대역 위상 배열 안테나 기술", 한국통신학회지, 16(9), pp. 17-27, 1999년 9월.
- [2] H. Wang, D. G Fang, Y. P. Xi, C. Z. Luan, and B.

- Wang, "On the mutual coupling of the finite micro-strip antenna arrays", *Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC 2007. International Symposium*, pp. 10-14, 2007.
- [3] H. Xin, K. Matsugatani, M. Kim, J. Hacker, J. A. Higgins, M. Rosker, and M. Tanaka, "Mutual coupling reduction of low-profile monopole antennas on high-impedance ground plane", *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 16, pp. 849-850, Aug. 2002.
- [4] Constantine A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons Inc., 2008.

- [5] Hubregt J. Visser. *Array and Phased Array Antenna Basics*, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [6] H. J. Orchard, R. S. Elliott, and G. J. Stern, "Optimizing the synthesis of shaped beam antenna patterns", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-23, no. 1, pp. 100-107, Jan. 1975.
- [7] 김군수, 김태영, 김부균, "유한한 기관 크기가 H-평면상에 배열된 두 개의 패치안테나 간의 상호 결합에 미치는 영향", *대한전자공학회 논문지*, 47, 2010년 10월.

김 영 완

2005년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
 2007년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
 2007년 2월~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계

이 동 국

1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년~현재: 경북대학교 전자공학과 박사과정
 2002년~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템 설계/분석, 위상 배열 안테나 설계/분석, 안테나 측정, 전자장 수치 해석, 안테나 신호처리

채 희 덕

1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2007년 3월~현재: LIG넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

정 명 득

2003년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 2001년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
 [주 관심분야] 능동 배열 레이더 시스템

박 종 국

1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)

2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)

2001년 11월~현재: LG넥스원 수

석연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석