

이중 변환 믹서 방식 역지향 배열 안테나 시스템의 반사 전자기파 상쇄 응용

Retrodirective Antenna Array Based on Double Conversion Mixer System and Its Application to Cancellation of Electromagnetic Reflections

하 정 제 · 장 성 훈* · 이 용 식

Jungje Ha · Sunghoon Jang* · Yongshik Lee

요 약

본 논문에서는 역지향 배열 안테나 시스템을 제안하고, 이를 기반으로 대응 신호를 발생시켜 전자기파를 능동적으로 상쇄할 수 있는 가능성에 대하여 알아보았다. 제안한 시스템은 전자기파가 입사할 경우 입사 방향에 대한 사전 지식이 없더라도 입사 방향으로 신호를 발생시켜 송신할 수 있다. 이를 레이더 전자기파 상쇄에 응용할 경우, 물체에 반사되어 레이더로 되돌아 가는 반사 신호의 진행 방향과 같은 방향으로 대응 신호를 송신하여 상쇄시킬 수 있다. 이때 상쇄 효과를 최대화하기 위해서는 역지향 배열 안테나 시스템의 입력과 출력 사이의 높은 격리도가 필수적이다. 본 연구에서는 이를 위해 이중 변환 믹서 방식의 시스템을 제안하였다. 주파수가 동일한 믹서의 입출력 신호 사이에 높은 격리도를 확보하여 시스템에서 발생된 신호의 송신 방향과 레이더 신호의 입사 방향 사이의 오차를 최소화시킴으로써 반사 신호 억제 효율을 극대화할 수 있다. 실험적 검증을 위해 이중 변환 믹서 방식 2×2 역지향 배열 안테나 시스템을 설계, 제작하여 사각 금속판과 원통에 대하여 반사파 상쇄 실험을 수행하였다. 최대 29 dB까지 반사파가 감소되는 결과를 얻음으로써 제안된 방법의 유효성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a retrodirective antenna array system is proposed and the possibility of actively cancelling electromagnetic waves based on this system is investigated. When a retrodirective array system receives an electromagnetic wave, it can send waves in the direction of the incoming signal without prior knowledge of the direction. In applications to cancellation of radar signals, the system can generate and send signals to the radar so that it cancels the radar signals that are reflected back to the radar. In such a system, isolation between the input and output ports is a key factor that determines the effectiveness of cancellation. In this work, a dual-conversion mixer system is proposed to maximize the isolation. Since this minimizes the difference between the direction of reflection of radar signals and the transmission of cancellation signals, the effectiveness of cancellation is maximized. Experimental results for a metallic plate and metallic cylinder shows as much as 29-dB reduction in reflection for a 2×2 retrodirective array based on proposed dual-conversion mixer system, which verifies the proposed method of active cancellation.

Key words : Active Cancellation, Radar, Retrodirective Array, Phase Conjugation, Mixer, RCS

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」
연세대학교 전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received September 23, 2013 ; Revised November 5, 2013 ; Accepted December 4, 2013. (ID No. 20130923-084)

· Corresponding Author : Yongshik Lee (e-mail : yongshik.lee@yonsei.ac.kr)

I. 서 론

역지향 배열 안테나 시스템은 배열 안테나에 수신되는 입사 신호의 위상 관계와 복소수 공역인 위상 관계를 갖는 신호를 발생, 송신함으로써 입사 방향에 대한 사전 지식 없이도 입사 방향으로 신호를 재전송시킬 수 있다. 즉, 신호의 입사 방향을 알아내기 위한 복잡한 기저 대역 디지털 신호 처리 알고리즘 없이 초고주파 회로를 기반으로 실시간으로 동작할 수 있기 때문에, 역지향 배열 안테나 시스템은 고속 목표 추적 가능성 외에도 고효율 및 저비용 등과 같은 장점을 갖는다^{[1]-[3]}. 이러한 특성에 기반하여 역지향 배열 안테나는 원격 무선 센서, 트랜스폰더, 비콘 등 식별을 위해서 활용되어 왔다.

Van Atta 배열과 믹서 기반의 위상 공역 회로가 가장 널리 알려진 역지향 배열 안테나 시스템 구성 방법이며, 믹서의 기본 특성을 활용한 위상 공역 회로는 주로 헤테로다인(heterodyne) 믹서를 이용하여 구현된다^{[4]-[6]}. 이러한 헤테로다인 믹서의 출력 신호 중 Lower Sideband 성분이 입력 신호와 주파수는 같되, 위상 공역이 되기 위해서 LO 주파수는 수신 신호, 즉 믹서 입력 RF 주파수의 2배가 되어야 한다. 이는 저비용 고효율로 동작하는 주파수원이 흔하지 않은 초고주파 및 밀리미터파 영역에서 사용하기에 매우 큰 걸림돌로 작용한다. 이를 해결하기 위해서 2단 구조 위상공역 mixer를 활용하거나 부고조파를 mixer를 통해서 낮은 주파수의 LO 신호를 얻을 수 있다^{[7],[8]}. 이러한 mixer를 기초로한 배열 안테나는 입력과 출력 주파수가 다르므로 주파수 오프셋 정도에 따라 방사 방향에 오차가 발생하게 된다.

믹서의 입출력 신호가 동일한 주파수이면 정확한 방향으로 방사할 수 있다. 그런데, 수신 신호의 누설 신호와 송신 신호 간의 격리도가 낮을 경우, 입출력 신호 사이에 정확한 위상 공역 관계가 성립하지 않는 문제점이 발생할 수 있다. 이처럼 헤테로다인 믹서 기반의 역지향 배열 안테나 시스템 전체 성능에 주요하게 영향을 미치는 격리도 문제를 해결하기 위해 브랜치 라인 결합기 및 rat-race 결합기를 활용하여 해결하는 기술이 보고되기도 하였다^{[9],[10]}.

본 논문에서는 기존에 보고된 이중 변환 믹서 구조^{[7],[8],[10],[13]}를 이용한 위상 공역 시스템에서 입출력

격리도에 다른 역지향 특성을 살펴보고, 비교적 낮은 두 LO 주파수를 적절히 활용함으로써 동시에 누설 신호와 송신 신호 간의 높은 격리도를 얻을 수 있도록 하였다. 향상된 격리도에 의해 신호의 입사 방향과 발생된 신호의 송신 방향 사이의 오차를 최소화 할 수 있다. 나아가서 이러한 역지향 특성을 레이다에 응용하여, 방사된 신호와 레이다 신호의 반사파가 서로 상쇄될 수 있는 가능성을 살펴보았다. 본 논문에서 제안된 대응 신호를 발생시켜 레이다 신호를 능동적으로 상쇄시키는 기술은 기존에 널리 알려진 수동형 스텔스 기술과 함께 사용될 경우 단점도 보완되며, 나아가서 매우 높은 레이다 단면적(RCS) 감소 기술로 활용될 수 있다^[11].

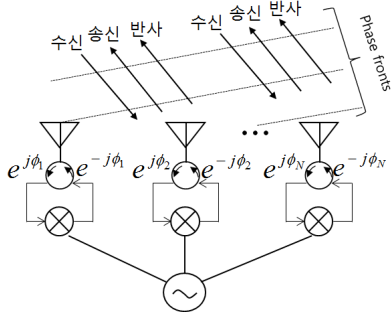
제안된 시스템의 전자기파 반사 억제 특성을 확인하기 위하여 2x2 역지향 배열 안테나 시스템을 설계 및 제작하여, 금속 사각 평판과 원통에 대한 능동 상쇄 실험을 수행하였으며 최대 29 dB까지의 반사파 억제 성능을 확인하였다. 또한, 제안된 시스템의 LO 신호의 주파수를 조절하여 역지향 모드가 아닌 반사 모드로 동작할 때 bi-static 레이다에 대한 능동 상쇄에도 적용 가능성을 실험적으로 확인하였다.

II. 본 론

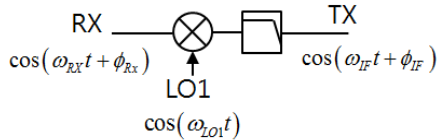
2-1 이중 변환 방식 위상 공역 배열 시스템 설계

그림 1(a)에 역지향 배열 안테나 시스템의 동작 원리를 간단하게 나타내었다. 각 안테나에 수신된 신호는 시스템을 거치면서 위상 관계가 복소 공역 관계로 바뀌게 되어 동일한 배열 안테나를 통해 수신 신호 방향으로 송신되는 역지향 특성을 나타낸다. 이를 레이다 신호에 응용하여 시스템을 목표물에 장착할 경우, 그림 1(a)에서와 같이 목표물로부터 반사되어 레이다 방향으로 되돌아가는 반사 신호와 같은 방향으로 대응 신호를 전송시킴으로써 반사 신호를 상쇄시킬 수 있다. 물론 동일한 진행 방향뿐만 아니라, 동일한 신호의 주파수 및 크기, 그리고 반대 위상의 조건 모두를 만족시켜야 정확한 상쇄가 가능하다.

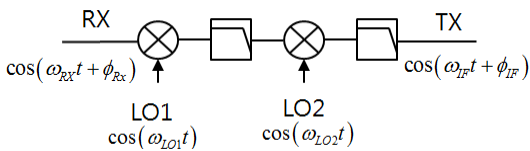
그림 1(b)는 기존 위상 공역 시스템에서 많이 활용된 단일 변환 믹서 시스템의 회로도를 나타내었



(a) 위상 공액의 역지향 특성
(a) Retrodirective characteristics of phase conjugation



(b) 기존 단일 변환 믹서 시스템
(b) Conventional single-conversion system



(c) 제안된 이중 변환 믹서 시스템
(c) Proposed double-conversion system

그림 1. 위상 공액의 역지향 특성 및 단일 배열 시스템 회로도

Fig. 1. Retrodirective characteristics of phase conjugation system and schematics of mixers in a array element.

다. 역지향 특성을 얻기 위해서 단일 변환 믹서 방식에서 필요한 조건, 즉 입력(RF) 신호와 출력(IF) 신호가 위상 공액 관계, 즉 $\phi_{IF} = -\phi_{RX}$ 가 되기 위해서는 LO 주파수가 입력 신호 주파수 ω_{RX} 의 두 배가 되어야 한다. 이처럼 높은 LO 주파수는 경제적이면서 동작이 안정된 주파수원 확보가 어려운 밀리미터파 대역에서 매우 큰 단점이 된다.

또한 단일 변환 믹서 시스템은 낮은 격리도라는 문제를 가지고 있다. 입출력 신호 주파수가 동일할 경우, 일반적인 믹서의 입출력 격리도는 8~15 dB로 비교적 낮다^[7]. 이 경우, 입력 신호가 출력단으로 누설되는 양이 비교적 클 수 있다. 따라서 믹서의 입출력 신호 사이에 정확한 위상 공액 관계 성립이 어려

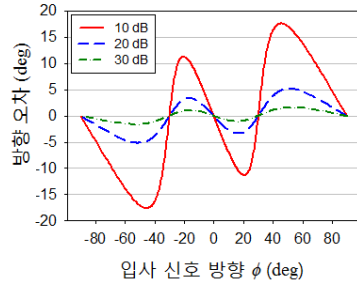


그림 2. Mixer의 입출력 격리도에 따른 위상 공액 시스템의 방향 오차

Fig. 2. Directional errors for various I/O isolations of mixer.

워지고, 따라서 역지향 특성에 큰 오차가 나타난다. 그림 2는 믹서의 입출력 격리도에 따라 본 시스템에서 발생하는 수신 신호와 송신 신호 사이의 이론적인 방향 오차이다. 격리도가 10 dB로 일반적인 상용 믹서 수준인 경우 최대 18°의 방향 오차가 나타나지만, 격리도가 30 dB로 향상될 경우 오차가 전방향에서 +/-1.6°까지 줄어드는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 그림 1(c)와 같이 수퍼헤테로다인 방식의 이중 변환 믹서 시스템을 제안하였다. 이 방식을 이용할 경우, 첫 번째 믹서의 입력 신호와 두 번째 믹서의 출력 신호만이 동일한 주파수를 갖게 되고, 두 믹서 사이의 입출력 신호는 임의의 주파수를 선택할 수 있다. 따라서 단일 변환 믹서 시스템에서 문제가 되었던 격리도 문제가 자연스럽게 해결된다. 또한, 시스템 복잡도는 증가하지만, 위상 공액 특성을 얻기 위한 LO 주파수가 단일 변환 시스템에서와 같이 높지 않으므로 밀리미터파 대역 등 매우 높은 주파수에서 응용하기가 더 적합하다.

나아가서 제안된 시스템은 입력되는 두 LO 주파수 설정에 따라 역반사 모드뿐만 아니라, 반사 모드로 동작할 수 있다. 이를 본 논문에서 역지향 배열 안테나 시스템의 응용으로 제안한 레이더 신호 능동 상쇄에 활용할 경우, 모노스테틱 및 바이스테틱 레이더 모두에 대해 적용 가능하게 된다.

역지향 특성을 갖도록 하기 위해서 이중 변환 믹서 시스템 전체의 입출력 신호 사이에 위상 공액 관계가 성립하여야 한다. 예를 들어 두 LO 신호의 주파수가 $\omega_{LO1} > \omega_{RX} > \omega_{LO2}$ 인 경우, 출력 신호는 다음과 같다.

$$v_{TX} = V_0[\cos(\omega_{LO1}t - \omega_{RX}t + \omega_{LO2}t - \phi_{RX})] = V_0[\cos(\omega_{IF}t + \phi_{IF})] \quad (1)$$

여기서 ϕ_{RX} 는 믹서 입력 RF 신호의 위상이다. 식 (1)과 같이 출력 신호의 위상은 $\phi_{IF} = -\phi_{RX}$ 으로 음의 위상 관계, 즉 입출력 신호 사이에 위상 공액 관계가 성립함을 알 수 있다. 그림 3(a)에 이중 변환 믹서 시스템이 위상 공액 특성을 갖도록 했을 때의 주파수 변환 과정을 나타내었다. 예를 들어 역지향 배열 안테나 시스템을 활용하여 레이더 신호 능동 상쇄 기능을 구현하기 위해서는 레이더 신호 또는 수신 신호, 즉 이중 변환 믹서 시스템의 입력 신호와 출력 신호의 주파수가 같아야 한다. 이를 위해서 두 LO 신호와 입력 신호의 주파수는 식 (2)의 관계를 가져야 한다.

$$\omega_{RX} = \frac{\omega_{LO1} + \omega_{LO2}}{2} \quad (2)$$

식 (2)를 통해 제안된 시스템에서는 단일 변환 시스템과 같이 입력 신호의 주파수보다 두 배 높은 LO

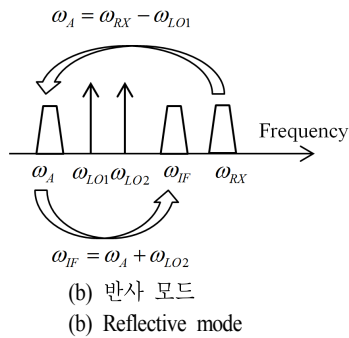
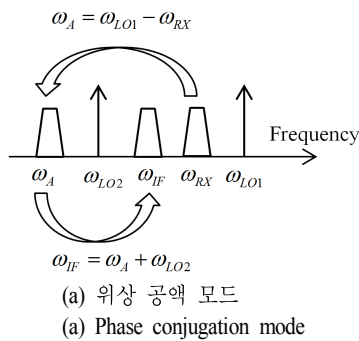


그림 3. 이중 변환 믹서 시스템의 주파수 변환 과정
Fig. 3. Frequency conversion process in dual-conversion mixer system.

주파수를 필요로 하지 않음을 알 수 있다. 더욱이 이는 경제적인 회로 설계 및 보다 안정적인 동작을 가능케 한다.

제안된 이중 변환 믹서 시스템 역시 능동 상쇄 기능을 구현하기 위해서는 입출력 신호 사이에 위상 공액 관계뿐만 아니라, 두 신호가 동일한 주파수이어야 하는 것은 마찬가지이지만, 입력 신호가 두 번의 주파수 변환 과정에서 중간 주파수(ω_A)를 거친 뒤, 다시 원래의 주파수로 변환되어 최종 출력되므로 전체 시스템의 격리도가 매우 높다. 앞서 언급했듯이 이러한 높은 입출력 격리도로 인하여 입출력 신호 사이에 보다 정확한 위상 공액 관계를 얻을 수 있고, 따라서 보다 정확한 역지향 특성을 얻을 수 있다.

또한, 제안된 시스템은 LO 신호의 주파수를 잘 조절하면 위상 공액 모드뿐만 아니라, 스넬의 법칙을 따르는 반사 모드로 동작하게 할 수 있다. 그림 3(b)는 제안된 시스템이 반사 특성을 갖도록 했을 때의 주파수 변환 과정을 나타내었다. 이 반사 모드에서는 스넬의 법칙을 따라 반사하므로 송신 안테나와 수신 안테나의 위치가 다른 바이스테틱 레이더에 대해서 능동 상쇄가 가능하다. 스넬의 법칙에 의한 반사된 신호는 크기가 매우 크므로 이에 대한 능동 상쇄는 매우 중요하다. 제안된 시스템이 반사 모드로 동작하기 위한 두 LO 신호의 주파수의 관계는 $\omega_{RX} > \omega_{LO1}, \omega_{LO2}$ 이고, 이때 최종 출력 신호는 다음과 같다.

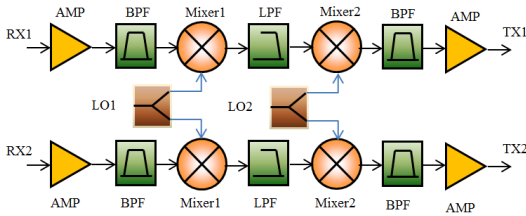
$$v_{TX} = V_0[\cos(\omega_{LO2}t - \omega_{LO1}t + \omega_{RX}t + \phi_{RX})] = V_0[\cos(\omega_{IF}t + \phi_{IF})] \quad (3)$$

이 모드를 능동 상쇄에 활용하기 위해서는 대응 신호의 주파수가 입사 신호와 같아야 하므로, 두 LO 신호 사이에는 다음의 관계가 성립해야 한다.

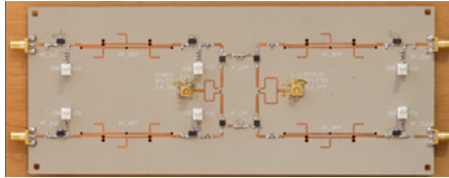
$$\omega_{LO1} = \omega_{LO2} \quad (4)$$

식 (4)와 같이 반사 모드 역시 높은 주파수가 필요 없을 뿐만 아니라, 한 가지 종류의 LO 신호만 사용이 가능하므로 더욱 경제적이며 또한 안정적인 동작도 가능하다.

식 (3)을 통해 출력 신호의 위상이 $\phi_{IF} = \phi_{RX}$ 와 같고 이, 경우 스넬의 법칙을 따르는 반사가 발생한다. 즉, 능동 상쇄 안테나 개구면과 수직인 면이 수신



(a) 시스템 회로도
(a) Schematic of an overall system



(b) 시스템 사진
(b) Photograph of fabricated system

그림 4. 제작된 2×2 역지향 배열 안테나 시스템
Fig. 4. Proposed 2×2 retrodirective array system.

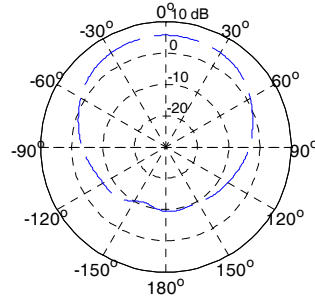
레이더 신호 및 송신 대응 신호와 이루는 각이 같게 되어 바이스테틱 레이더 능동 상쇄에 응용이 가능하다.

이와 같은 이중 변환 믹서 시스템을 기반으로 두 모드에서 동작할 수 있는 2×2 배열 안테나 시스템을 설계 및 제작하였다. 그림 4은 Taconic 社의 RF-35 ($\epsilon_r=3.5, h=0.76$ mm) 기판에 제작한 2×2 배열 안테나 시스템의 사진이다. 주파수 변환을 위한 믹서는 Hitite 社의 HMC175MS8을 이용하였고, HMC311ST89 증폭기를 사용하여 신호를 증폭하였다. 동작 RF 주파수는 2.5 GHz이며, LO1과 LO2 신호의 주파수는 각각 2.8과 2.2 GHz로, 입력 RF 신호와 동일한 2.5 GHz의 주파수를 갖되, 위상이 복소수 공액 관계인 IF 신호를 송신하도록 설계했다. 제작된 시스템의 총 이득은 26 dB, 누설 신호와 출력 신호의 설계상 격리도는 29 dB이며, 이는 HMC175MS8을 단일 변환 방식에 활용했을 때보다 20 dB 이상 향상된 결과이다.

그림 5(a)는 실험에 사용한 마이크로스트립 패치 안테나이다. 평면 형태의 패치 안테나이므로 반사체에 붙여서 적용하기 용이하며, 후방 방사 신호의 크기가 작기 때문에 능동 상쇄 실험에 활용하기에 적합한 안테나이다. 1 mm 두께의 FR-4 기판에 제작하였으며, 안테나 전체 면적은 40×50 mm²이다. 중심 주파수는 2.5 GHz이며, 10-dB 반사 손실 대역폭이 50



(a) 마이크로스트립 패치 안테나 사진
(a) Microstrip patch antenna



(b) H-plane 방사 특성(이득)
(b) Radiation pattern of H-plane(gain)

그림 5. 마이크로스트립 패치 안테나
Fig. 5. Microstrip patch antenna.

MHz이다. 그림 5(b)는 제작한 패치 안테나의 H-plane 방사 특성의 측정(모의 실험) 결과로 최대 이득은 5.8 dBi이다.

대응 신호가 반사파를 완전히 상쇄시키기 위해서는 진행 방향뿐만 아니라 신호의 크기가 같아야 한다. 따라서 전체 시스템 이득이 매우 중요하다. 역지향 배열 안테나 시스템의 안테나 특성과 물체(target)의 반사 특성 RCS(σ)를 알고 있을 경우 Radar range 방정식을 이용하면 필요한 시스템의 전체 이득(G)을 계산할 수 있다¹²⁾.

$$G = \frac{\sigma}{A_r D_r} \tag{5}$$

여기서 A_r 와 D_r 는 배열 원소 안테나의 개구면 크기와 지향도이다. 본 연구에서는 역지향 특성의 반사 신호 상쇄 활용 가능성 타진이 주 목적이었으므로, 다음에 소개될 실험에서는 추가적인 증폭기와 가변 감쇄기를 활용하여 반사 신호의 크기와 상쇄 신호의 크기를 수동으로 맞추어 가며 실험을 진행하였다.

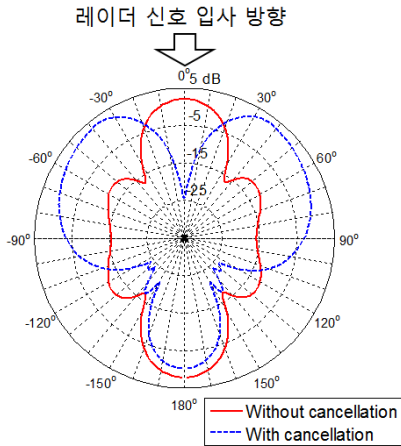


그림 6. $2\lambda \times 2\lambda$ 크기의 정사각형 금속판에 대한 상쇄 전후 RCS 변화 모의실험 결과
 Fig. 6. Simulated RCS results for $2\lambda \times 2\lambda$ metallic plate with/without cancellation.

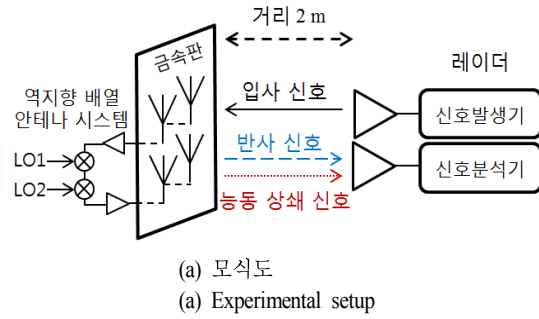
2-2 금속판에 대한 능동 상쇄 실험 결과

실험에 앞서 그림 6과 같이 HFSS를 이용하여 2.5 GHz에서 크기가 $2\lambda \times 2\lambda$ 인 금속 평면의 RCS를 전자기 모의 실험을 하였다. 전자기 모의 실험 결과, 정면 방향의 RCS는 2.1 dBsm이었다. 5 dB 지향도를 갖는 패치 안테나를 가정하여 금속 평면에 반사되는 신호를 상쇄하기 위한 시스템 이득을 식 (5)를 이용하여 계산하면 20.5 dB이다. 이상적인 경우, 이를 활용하여 상쇄 신호를 반사파 방향으로 전송함으로써 레이더 신호가 입사된 방향으로 반사파가 완벽하게 억제되고 있음을 그림 6에서 확인할 수 있다.

이 때 반사 및 대응 신호가 진행되는 방향으로의 RCS는 현저히 감소하였으나, 다른 방향으로서는 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 안테나의 빔폭이 매우 넓기 때문에 발생하는 문제로, 레이더 신호 입사 방향으로의 시스템 이득을 유지하면서 배열 수를 늘릴 경우 다른 방향으로의 RCS를 증가하는 일정 부분 억제시킬 수 있다.

반사 신호 억제를 실험적으로 확인하기 위하여 그림 7과 같이 구성하여 2.5 GHz에서 실험을 진행하였다. 주변 환경의 영향을 최소화하기 위해서 모든 실험은 무반사실 내에서 진행하였다.

대응 신호와 반사파가 서로 상쇄되기 위한 마지막 조건은 서로의 위상이 반대가 되어야 한다. 이를



(a) 모식도
 (a) Experimental setup
 (b) 실제 사진
 (b) Photograph of experimental setup
 그림 7. 금속 평판에 대한 모노스테틱 능동 상쇄 실험 환경
 Fig. 7. Mono-static experimental setup for metallic plate.

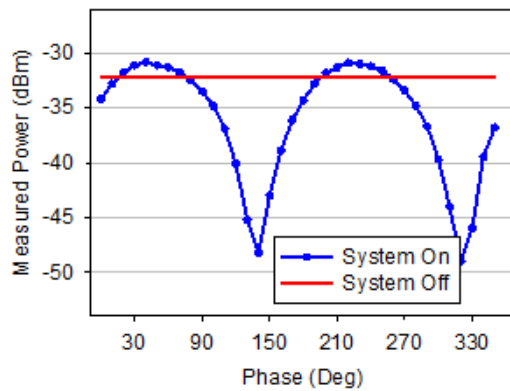


그림 8. 신호 발생기의 위상에 따른 반사파의 크기
 Fig. 8. Magnitude of total reflected waves with respect to phase of signal generator.

위해서 본 실험에서는 레이더 신호 발생기의 위상을 변화시켜가며 총 반사 신호, 즉 금속판으로부터 반사된 레이더 신호와 역지향 시스템에서 전송된 신호 합을 측정하였다.

그림 8의 결과에서 신호 발생기의 위상에 따라 대응 신호가 없을 때보다 최대 15 dB 반사파 억제 효과를 얻은 것을 확인할 수 있다. 하지만 잘못된 위상으로 대응했을 때는 기존 반사파의 크기보다 3 dB

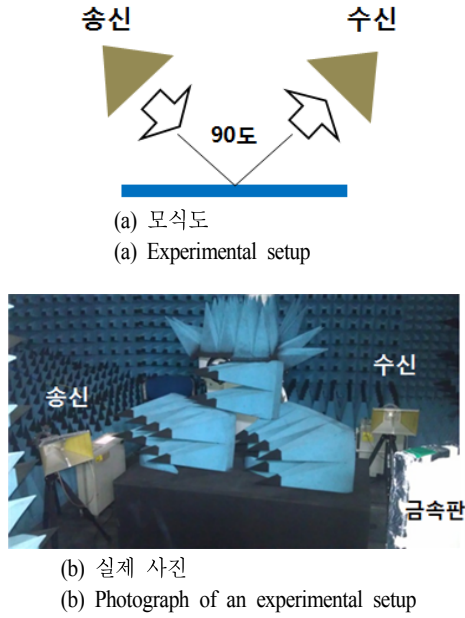


그림 9. 바이스테틱 송수신기에 대한 능동 상쇄 실험 환경
Fig. 9. Experiment setup for bi-static transceiver.

더 커지는 현상도 발생하는 것을 볼 수 있다. 즉, 능동 상쇄 기술은 잘못 적용될 경우, 원하는 반사파 억제에 반대, 즉 오히려 증폭될 수도 있으므로 그 적용은 신중한 접근이 필요하다.

그림 9는 제안된 시스템을 반사 모드로 동작시켰을 때 바이스테틱 송수신기의 반사파에 대한 능동 상쇄 가능성을 확인하기 위한 실험 모식도와 실험 사진이다. 제안된 시스템을 반사 모드로 동작시키기 위해서는 두 LO 신호의 주파수를 2.2 GHz로 설정하였다. 여러 각도에서 적용이 가능하지만 대표적으로 그림 8과 같이 90° 방향에 대해서 적용하여 실험을 수행하였다. 신호 발생기에서 0 dBm 크기의 송신 신호를 입사시켰을 때 반사판에 의해 순수하게 발생하는 반사파의 크기는 -40.7 dBm이 측정되었고, 능동 상쇄 시스템을 적용하였을 때 신호의 크기는 -51.3 dBm 대략 10 dB의 상쇄 효과를 확인할 수 있었다.

2.3 금속 원통에 대한 능동 상쇄 실험 결과

역지향 배열 안테나 시스템은 이론적으로 레이더 신호의 입사 방향에 상관없이 능동 상쇄 기능 구현이 가능하지만, 실제에서는 안테나 패턴에 따라 영

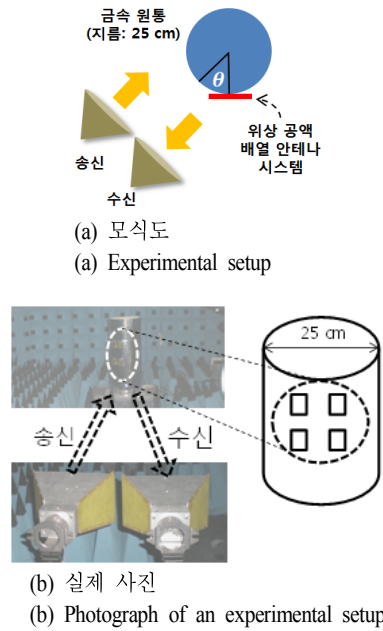


그림 10. 금속 원통에 대한 모노 스테틱 능동 상쇄 실험 환경
Fig. 10. Mono-static experimental setup for metallic cylinder.

향을 받을 수 있다. 이를 실험적으로 검증하기 위해서 그림 10의 실험을 구성하였다. 검증의 편의를 위해서 모든 방향에서 모노스테틱 RCS가 동일한 금속 원통을 실험에 활용하였다. 다양한 입사 방향 θ 에 대해서 실험을 수행하였으며, 그림 11의 결과에서 보듯이 정면 방향의 경우 최대 29 dB까지 반사파가 감소되는 것을 확인할 수 있다.

원통에 대한 실험에서 입사 각도에 따라 상쇄 정도가 다른 이유는 입사 각도에 따라 대응 안테나의

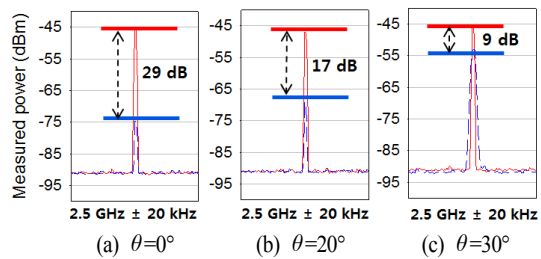


그림 11. 금속 원통에 대한 모노스테틱 능동 상쇄 실험 결과
Fig. 11. Mono-static experimental results for metallic cylinder.

개구면의 크기, 즉 이득이 달라지기 때문이다. 결국 같은 레이더 신호이더라도 시스템에 입사하는 방향에 따라 수신 신호의 크기뿐만 아니라 전송되는 대응 신호의 크기가 달라지기 때문이다. 만약 입사되는 방향에 따라 시스템 이득 변경이 가능할 경우 더 효과적인 상쇄 기능을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 단일 방향 입사에 대해서 반사파 적응을 확인하였다. 하지만 여러 방향에서 동시에 입사하는 경우에는 여러 신호가 혼합되기 때문에 잘못된 방향으로 방사하게 된다. 따라서 간섭 신호를 억제할 수 있는 기술이 필요하다^[3]. 이를 적용하면 임의의 방향으로 여러 입사하는 반사파에 대해서 각각 상쇄가 가능하며 향후 해결할 문제이다.

III. 결 론

본 논문에서는 단일 변환 믹서 시스템과 비교했을 때 동일 주파수의 입출력 신호에 대해 보다 높은 격리도 특성을 갖고, 위상 공액 특성을 위해서 높은 LO 주파수를 필요로 하지 않는 이중 믹서 변환 믹서 시스템을 제안하였다. 이를 바탕으로 2×2 위상 공액 배열 안테나 시스템을 설계, 제작하였으며, 이러한 시스템에 신호가 입사할 경우, 동일한 주파수의 신호가 위상 공액 특성에 따라 발생되어 원래 신호의 입사 방향으로 전송되는 역지향 특성을 얻었다. 이를 활용하여 레이더 환경에서 대응 신호를 발생시켜 반사파를 상쇄시키는 능동 상쇄 기술의 구현 가능성을 실험적으로 확인하였다. 0~30° 방위각 내에서 반사파 감소 효과를 확인하였으며, 최대 29 dB의 반사파 상쇄 결과를 확인하였다. 또한, 다양한 입사 방향에 대해서 상쇄 효과를 얻을 수 있었다. 또한, LO 주파수에 따라 반사 모드로도 동작이 가능하여 바이스태틱 전자기파 레이더에 대한 능동 상쇄 효과 가능성도 실험적으로 확인하였다. 향후 과제로 남아 있다. 하지만 본 시스템이 좀 더 실효성을 갖기 위해서는 RF 신호의 주파수, 크기, 및 위상 등 본 연구에서 알고 있다고 가정된 파라미터의 변화에 대한 능동적인 대처는 앞으로 해결해야 할 숙제로 남아 있다.

References

- [1] R. Y. Miyamoto, T. Itoh, "Retrodirective arrays for wireless communications", *IEEE Microwave Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 71-79, Mar. 2002.
- [2] 복준영, 이승환, 신동진, 유흥균, "고속 철도 환경에서의 디지털 역지향성 안테나 기술 성능 분석", *한국전자과학회논문지*, 23(11), pp. 1264-1271, 2012년 11월.
- [3] C. Y. Pon, "Retrodirective array using the heterodyne technique", *IEEE Trans. Antennas Propagation.*, vol. AP-12, pp. 176-180, Mar. 1964.
- [4] C. W. Pobanz, T. Itoh, "A conformal retrodirective array for radar applications using a heterodyne phased scattering element", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 905-908, May 1995.
- [5] G. Shiroma, R. Miyamoto, and W. Shiroma, "A full-duplex dual-frequency self-steering array using phase detection and phase shifting", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, no. 1, pp. 128-134, Jan. 2006.
- [6] R. Y. Miyamoto, Y. Qian, and T. Itoh, "An active integrated retrodirective transponder for remote information retrieval-on-Demand", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 9, Sep. 2001.
- [7] V. Fusco, N. Buchanan, "Developments in retrodirective array technology", *Microwaves, Antennas & Propagation, IET.*, vol. 7, no. 2, pp. 131-140, Jan. 2013.
- [8] J. -Y. Park, T. Itoh, "A 60-GHz 4th subharmonic phase-conjugated retrodirective array", *34th European Microwave Conf.*, vol. 3, pp. 1277-1282, Oct. 2004.
- [9] 전중창, 정덕수, 이병로, 탁한호, "능동 역지향성 배열 안테나용 공액 위상변위기", *한국전자과학회논문지*, 16(2), pp. 134-138, 2005년 2월.
- [10] T. Brabetz, V. F. Fusco, and S. Karode, "Balanced subharmonic mixers for retrodirective-array applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 3, pp. 465-469, Mar. 2001.
- [11] S. Cadirci, "RF stealth(or low observable) and counter-RF stealth technologies: implications of coun-

ter-RF stealth solutions for Turkish air force", Thesis, Naval Postgraduate School, 2009.

[12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York, pp. 96-98, 1982.

[13] D. S. Goshi, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "A retrodirective array with interference rejection capability", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Jun. 2005.

하 정 제



나 등

2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2011년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로, 안테

이 용 식



2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수
 [주 관심분야] 초고주파 회로, 안테나, 메타물질 등

1998년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
 2004년 4월: 미국 University of Michigan (공학박사)
 2004년 10월: Post-doctorial Research Associate, Purdue University
 2005년 7월: Senior Research Engineering, EMAG Technologies, Inc.

장 성 훈



1996년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년 3월~현재: 국방과학연구소
 [주 관심분야] 레이더 시스템 등