

광대역 컨포멀 위상 배열 안테나의 빔형성 열화 보상 알고리즘

Compensation Algorithm of Beamforming Error for Wideband Conformal Array Antenna

윤호준 · 이강인 · 남상욱* · 정용식 · 윤영중**

Ho-Joon Yoon · Kang-In Lee · Sang-Wook Nam* · Young-Seek Chung · Young-Joong Yoon**

요 약

본 논문은 광대역 컨포멀 위상배열 안테나 빔형성 시 발생하는 조향오차를 보상하고, 목적하는 빔형성을 위한 알고리즘을 제안한다. 광대역 빔 조향을 위하여 본 연구에서는 TTD(True Time Delay) 방식을 채택하였으며, 긴 시간의 지연을 위하여 기판 회로상에 구현을 하였다. 빔 조향 오차의 원인은 배열 안테나 소자간의 상호간섭, 지연회로 기판의 분산 특성 및 디지털 제어에 의한 quantization 오차 등이 있다. 본 논문에서 TTD 회로의 분산 및 quantization 오차는 절대적인 지연시간보다 배열소자간의 상대적인 지연시간 차이를 최적화 하는 방향으로 분산 및 quantization 오차의 영향을 최소화 하였다. 제안된 조향오차 보상기법을 2~4 GHz 대역의 컨포멀 위상배열 구조에 적용하여 측정값과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose an algorithm for the wideband beamforming in a conformal phased array antenna by compensating the errors. For the wideband beamforming, we used the True Time Delay(TTD), which was fabricated on the RF circuit board to obtain long delay lines. Beamforming errors in the conformal array antenna are the mutual coupling between the array elements, the dispersive error in the TTD circuit, and the quantization error by the digital control. We apply the compensation algorithm to the conformal phased array antenna of wideband 2~4 GHz, and verify the usefulness by comparing the results with the experiment results.

Key words: Conformal Array, Beamforming, True Time Delay, Error Compensation, Mutual Coupling, Quantization Error

I. 서 론

본 논문은 실제의 컨포멀 위상배열 안테나 시스템을 구성할 때 빔형성 과정에서 생겨날 수 있는 문제 중 가장 주요한 영향을 끼치는 요인인 소자패턴의 열화 현상과

위상을 제어하기 위한 실시간 지연선로(true time delay)의 채널 에러 현상에 대한 보상 알고리즘을 제안한다.

최근 항공기나 고속열차 등과 같은 고속 이동 플랫폼에 위상배열안테나 구조의 장착은 공기역학적인 항력문제로 인하여 플랫폼 내부에 설치한 후 레이돔으로 보호

「이 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비의 지원으로 연구되었음.」

광운대학교 전자공학과(Department of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University)

*서울대학교 전기정보공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)

**연세대학교 전기전자공학부(School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript receive April 4, 2017; Revised May 22, 2017; Accepted May 24, 2017 (ID No. 20170404-030)

· Corresponding Author: Young-Seek Chung (e-mail: yschung@kw.ac.kr)

를 하게 된다. 이러한 고속 이동체의 항력문제를 해결하기 위하여 플랫폼의 외부 형상에 밀착된 형상의 컨포멀 위상배열 안테나가 연구되어 사용되고 있다^{[1]~[4]}. 컨포멀 배열안테나는 이동으로 인한 공기의 저항을 줄이고, 곡면 형상으로 인하여 평면에서 볼 수 없었던 좌우 넓은 각도 범위와, 공간절약, 잠재적으로 자체 RCS 감소 등의 장점을 갖고 있다. 다만, 현재의 컨포멀 배열 안테나 연구는 협대역에 대한 연구가 주로 활발하게 진행 중이다^[5].

이러한 컨포멀 특성으로 인하여 실제 시스템 구성 시에 안테나 소자의 방향에 의한 변동과 선형 특성과는 다른 상호간섭(mutual coupling)^{[6],[7]} 문제 때문에 소자패턴에 열화가 발생하게 된다. 이러한 열화 문제는 실제 시스템에서 능동소자패턴(active element pattern)을 측정한 후 최소자승법(least square method)를 통하여 보상하였다. 최소자승법은 정확 해와 유사한 근사 해를 구하는 방법 중 하나로, 이 방법을 이용하여 목표 빔패턴(desired beam-pattern)^[8]과 컨포멀 배열의 빔패턴의 차이를 최소화하는 가중치를 구한다.

일반적으로 구해진 가중치의 위상을 제어하기 위해 사용되는 위상 천이기(phase shifter)는 협대역(narrow band)에서 주로 사용된다. 하지만 실시간 지연선로를 사용하면 위상배열 안테나를 제어하는데 있어서 광대역(wide band) 특성이 가능하게 된다^[9]. 때문에 본 시스템에서는 광대역 특성을 이용하기 위해서는 2~4 GHz까지의 대역폭 안에서 주파수 간격을 분할하여 그 안에서 delay가 일정하게 유지되도록 한다.

실시간 지연선로를 이용하여 이론적으로 구해진 가중치를 실제 시스템에 적용 하게 될 때 디지털 제어에 의한 양자화(quantization)를 통하여 적용이 된다. 여기서 양자화에 의한 에러가 발생될 뿐만 아니라, 기존의 짧은 실시간 지연선로^{[10],[11]}보다 더욱 긴 지연을 위하여 기판회로상에 구현된 TTD의 bit별 on/off를 위한 RF switch, delay line 설계를 위한 스트립라인 꺾임은 주파수 특성에 대하여 성능열화를 더 크게 하는 요인이 된다. 이러한 문제를 해결하는 방법은 모든 조합에 대해서 TTD 소자에 대해서 특성을 측정하여 LUT(Look Up Table)을 만들어 교정하는 방법이 있다. 하지만 이러한 측정은 많은 시간과 비용을 요구하는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 TTD 소자의 각 bit별 특성을 측정한 뒤 조합을 하여, 원하는 가중치 값과 가장 작은 오차를 갖는 최적의 delay를 찾기 위하여 사용하는 Delay Level Shift(DLS) 알고리즘을 제안한다. DLS 알고리즘은 N개의 소자에 들어가는 각각의 delay값이 절대적인 수치보다는 소자간의 상대적인 delay가 중요하다는 점을 이용한다. 조합되어 구해진 N개의 소자 delay값 모두에 $\Delta\tau$ 만큼 delay를 level shift하여 기존의 조합보다 최적의 가중치를 적용할 수 있도록 하는 방법이다. $\Delta\tau$ 를 찾기 위해 스캐닝 방법을 통하여 구해진 여러함수의 값이 최소로 되게 하는 $\Delta\tau$ 를 찾는다. 최종적으로 가중치를 이용해 구해진 delay와 $\Delta\tau$ 를 이용하여 가장 delay error가 적은 값을 적용하였다.

제안된 오차보상 기법은 2~4 GHz 대역의 컨포멀 위상배열 구조에 적용이 되어 측정값과 비교하여 타당성을 검증하였다.

II. 관련 이론

컨포멀 위상배열 안테나는 임의의 곡면상에 소자들이 그림 1과 같이 배치되고, 식 (1)과 같이 빔 패턴 수식으로 표현 할 수 있다.

$$B(\theta) = \sum_{k=1}^N w_n e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta + y_n \cos \theta)} \quad (1)$$

식 (1)에서 N은 배열 소자의 총 개수, λ 는 주파수에 대한 파장, w_n 은 n번째 배열 소자의 가중치 값, $x_n y_n$ 은 n번째 소자의 x, y좌표이다. 주어진 배열 구조에서 목적에 맞는 빔패턴을 설계하기 위한 최적의 가중치 값을 계산

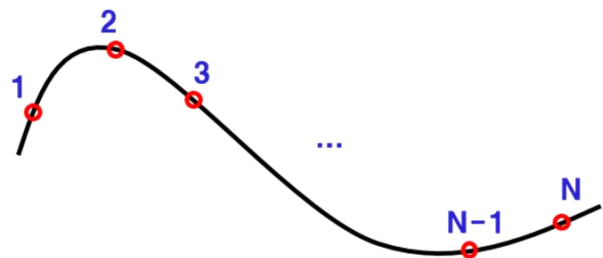


그림 1. 컨포멀 배열 안테나 구조
Fig. 1. Conformal array antenna structure.

하여 효율적인 빔형성을 할 수 있다^{[12],[13]}.

2.1 능동소자패턴 측정을 이용한 상호간섭 보상

대표적인 시스템에서 일어날 수 있는 열화 현상으로 배열 안테나에서 안테나 소자들 간에 전자기적 작용을 상호간섭(mutual coupling) 문제가 있다. 각 소자들이 방사하면서 자기 자신 이외의 다른 소자에 영향을 끼치는 문제가 발생한다. 상호간섭 문제는 배열소자간의 간격이 짧게 되면 더욱 큰 영향을 끼치게 되고, 컨포멀 배열에서는 선형 배열보다 더욱 복잡한 상호간섭 문제가 발생한다. 이것뿐만 아니라 컨포멀 배열에서는 소자의 방향의 문제까지 고려하여 주어야 한다. 이러한 부분을 해결하기 위하여 실제의 배열 안테나의 소자 각각의 능동패턴을 실제 측정하여 식 (1)을 다음과 같이 변경한다.

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N w_n A_{active,n} e^{j\theta_{active,n}} \quad (2)$$

식 (2)에서 N 은 배열의 개수, w_n 은 n 번째 소자에 적용되는 가중치, $A_{active,n}$ 은 n 번째 능동소자패턴의 크기, $\theta_{active,n}$ 은 n 번째 능동소자패턴의 위상 값이다.

이렇게 실험을 통하여 능동소자 패턴을 이용하여 컨포멀 배열 빔 패턴을 구한 후, 가상 배열 모델을 설계하여 마치 컨포멀 배열을 원하는 가상배열처럼 등가시켜 해석한다. 컨포멀 배열을 가상 배열 모델로 등가시키기 위한 가중치를 구하기 위해 LSM(Least Square Method)을 이용한다. LSM은 정확 해와 유사한 근사 해를 구하는 방법 중 하나로, 이 방법을 이용하여 원하는 가상 배열(desired virtual array)과 컨포멀 배열의 빔패턴의 차이를 최소화하는 가중치를 구한다.

$$e = \int_T |D(\theta) - F(\theta)|^2 d\theta \quad (3)$$

식 (3)에서 $D(\theta)$ 는 목표가 되는 가상 빔패턴을 의미하고, $F(\theta)$ 는 1차원 컨포멀 배열 안테나를 실제 측정한 능동 소자 패턴을 의미한다. e 는 목표 빔 패턴 $D(\theta)$ 와 안테나의 능동소자 패턴 $F(\theta)$ 의 오차를 의미한다. 식 (2)에서 $F(\theta)$ 은 추정된 w_n 값이 적용된 빔패턴이므로 e 을 최소로 하는 가중치 w_n 을 구해야 한다. 최소 자승 오차를

만족하는 가중치 $W = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]$ 을 구하기 위해서는 행렬 벡터 공간에 projection을 구함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$W = DC_{active}^H (C_{active} C_{active}^H)^{-1} \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 C_{active} 는 측정한 능동소자패턴을 이용하여 구한 manifold vector이고, (\cdot^H) 은 conjugate transpose를 의미한다. 실험을 통하여 구하여진 능동소자패턴을 이용하여 W 를 LSM을 통하여 구한 후 빔형성을 하게 되면, 소자간에 일어나는 상호간섭 문제를 해결할 뿐만 아니라, 실제의 측정 소자패턴을 이용하여 하였기 때문에 소자의 위치나 방향상의 문제도 해결이 된다.

2.2 DLS를 분산오차 및 Quantization 오차 보상

본 절에서는 실제의 컨포멀 배열 안테나 시스템에서의 위상을 제어하기 위한 부분인 실시간 지연선로에서의 나타나는 quantization 및 회로의 주파수 특성에 의한 흔들림 현상 오차문제와 그것에 대한 보완 알고리즘을 제시한다.

안테나의 상호간섭 문제를 고려하여 LSM을 이용해 가중치 $W = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]$ 를 얻은 후, TTD와 gain 소자에 적용하기 위해 가중치의 크기와 위상 부분으로 나누어 계산한다. 이때 위상 부분을 $\Psi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_n]$ 과 같이 구한다. 이렇게 각각의 소자에 적용되어야 할 위상 부분의 가중치를 구하면, 실시간 지연선로에 맞게 적용하기 위해서는 시간에 관한 식으로 바꿔준다.

$$T_e = [\tau_1 \ \tau_2 \ \cdots \ \tau_n], \tau_n = \frac{\phi_n}{2\pi f} \quad (5)$$

Ψ 을 이용하여 delay를 구한 후, 소자 별로 모두 계산이 되면 식 (5)와 같이 표현이 되고 T_e 는 실제 소자에 들어가야 하는 이상적인 delay 값으로 볼 수 있다. 또한, 식 (5)에서 알 수 있듯이 delay는 주파수에 따라 달라진다. 따라서 delay는 주파수 별로 각각 구해진다.

TTD의 광대역 특성을 이용하기 위해서는 2~4 GHz까지의 대역폭 안에서 주파수 간격 Δf 로 분할하여 그 안에서 delay가 일정하게 유지되도록 한다.

이처럼 실시간 지연선로에서의 문제는 각 소자마다 보내지는 신호의 위상 문제가 생길 수 있는 부분임으로 빔

형성 및 조향에 있어서 중요한 문제이다. 본 시스템에서 사용한 실시간 지연선로는 PCB 공정을 이용한 8 ps의 분해능(resolution)을 갖고 최대 지연 가능시간이 760 ps인 7 bit 실시간 지연선로이다.

따라서 이상적으로는 8 ps 간격으로 delay line이 주파수 별로 일정하게 flat한 형태로 나와야 하지만, 기판회로 상에 구현된 TTD의 bit별 on/off를 위한 RF switch, delay line 설계를 위한 스트립라인 꺾임은 주파수 특성에 대하여 성능열화를 더 크게 하는 요인이 되어 실제 bit를 측정해 보면 그림 2와 같이 fluctuation 현상이 일어난다. 따라서 측정을 하지 않고 일반적인 양자화(quantization)를 적용하면 이상적인 delay line의 값으로 적용하게 되는데, fluctuation 현상이 일어난 부분만큼의 delay error가 발생하여 빔형성에 있어서 문제가 발생한다.

그림 2에서 볼 수 있듯이, 주파수 별로 일정하게 delay가 실제 측정되지 않고 떨림 현상이 생겨 원하는 delay 시간만큼 정확히 적용할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서 원하는 값을 구하기 위해서는 실제 측정된 delay의 bit를 조합하여 가장 가까운 값을 생성한다.

$$\mathbf{T}_c = [Q(\tau_1) \ Q(\tau_2) \ \cdots \ Q(\tau_N)] \quad (6)$$

$Q(\tau_N)$ 은 실제 측정 delay를 이용하여 양자화를 하는 함수이다. 따라서 \mathbf{T}_c 는 실제의 delay 데이터를 이용하여 양자화 되고 난 후의 delay값이다. 하지만 이처럼 조합하여 \mathbf{T}_c 값을 찾아도 떨림 현상으로 인하여 원하는 \mathbf{T}_e 값

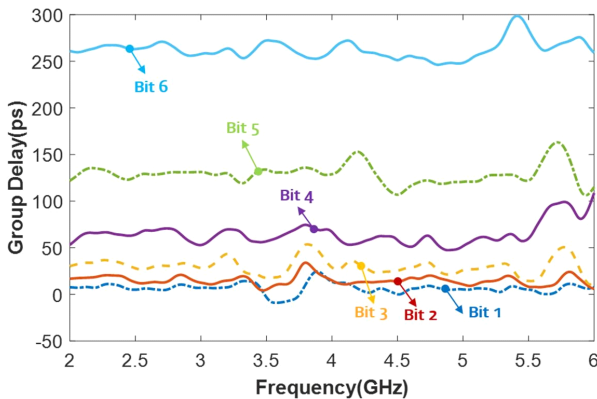


그림 2. 실시간 지연선로의 fluctuation

Fig. 2. True time delay fluctuation.

과 delay 오차가 생기는 값이 구해져 빔패턴 열화 현상이 나타난다. 이러한 delay 오차는 빔의 조향 방향의 열화와 PSLL의 증가가 나타나, 원하는 빔형성에 문제를 발생시킨다.

구해진 대표 bit를 이용하여 각각 소자의 delay값을 구해도 하드웨어적 한계때문에 구해진 가중치를 정확히 적용할 수 없기 때문에, 이러한 부분을 개선하기 위하여 DLS (Delay Level Shift) 알고리즘을 제안한다. 각 소자신호의 위상 차이를 주게 될 때 각각 $[\tau_1 \ \tau_2 \ \cdots \ \tau_n]$ 의 절대적인 delay의 시간의 중요성보다 각 소자신호의 delay 차이가 매우 중요하다는 점을 이용하여 소자마다 동일한 $\Delta\tau$ 만큼을 level shift시켜 \mathbf{T}_e 와 \mathbf{T}_c 의 차이를 최소화 하는 $\Delta\tau$ 를 찾는다. $\Delta\tau$ 를 찾기 위한 error 함수를 식 (7)과 같이 표현한다.

$$\epsilon = \sum_{i=1}^N w_{i.mag} [(\tau_i + \Delta\tau) - Q(\tau_i + \Delta\tau)]^2 \quad (7)$$

식 (7)의 ϵ 는 delay shift를 하고 난 후의 얼마나 error의 크기가 변하는 지에 대한 함수이다. 위 식에서 $w_{i.mag}$ 는 구해진 가중치에서 크기(magnitude) 부분을 의미한다. $w_{i.mag}$ 는 소자 별로 다른 값을 가지고 있고, 적용되는 크기가 큰 소자일수록 더욱 delay error가 주요한 영향을 끼치게 된다. $\Delta\tau$ 를 찾기 위해서는 일정 범위 내에서 $\Delta\tau$ 를 스캐닝을 해보며, ϵ 가 최소를 갖게 하는 값을 구한다. 결과적으로 실제 시스템에 적용되는 시간 delay값은 다음과 같이 식 (8)로 표현된다.

$$\mathbf{T}_{DLS} = [Q(\tau_1) + \Delta\tau \ Q(\tau_2) + \Delta\tau \ \cdots \ Q(\tau_N) + \Delta\tau] \quad (8)$$

앞의 이론을 정리하여 보상 알고리즘의 흐름을 순서도로 표현하면 그림 3과 같다.

III. 실험 결과

본 논문에서 시뮬레이션 및 실험한 컨포멀 배열 안테나 구조는 곡률 3의 원 상에 8개의 소자를 대칭으로 배치하였다. 성능 평가를 위해 각각 case별로 2~4 GHz에서 30°만큼 조향하여 결과를 확인하였다.

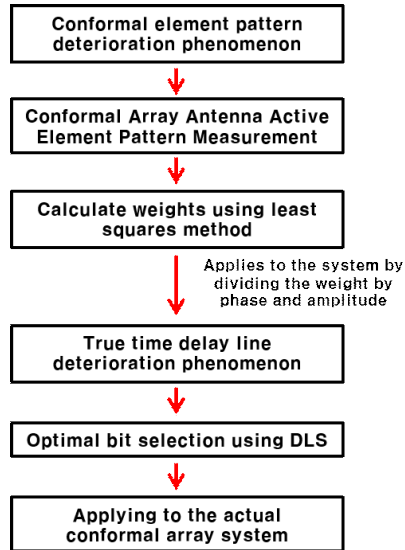


그림 3. 보상 알고리즘 순서도
Fig. 3. Compensation algorithm flowchart.

그림 5와 같이 안테나 소자는 2~5 GHz까지 대역폭을 대체적으로 만족하며, 그림 4에서처럼 소형화를 위해서 팔 끝 연장 구조와 고리 결합 구조를 혼합한 modified spiral patch antenna를 사용했다. 발룬(balun) 구조를 이용한 급전을 하며 기판을 포함한 전체 크기는 37.5×37.5 mm로서 2 GHz 기준으로 0.25 파장의 크기를 가지기 때문에, 2:1 대역에서 30° 빔 조향이 가능한 배열 간격인 2 GHz 기준 0.266 파장보다 작게 설계되었다. 그리고 각 배열 소

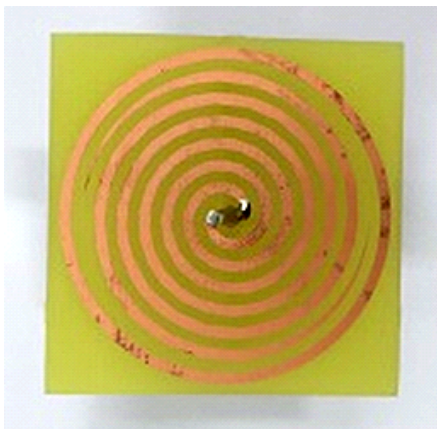


그림 4. 배열 안테나 소자
Fig. 4. Array antenna element.

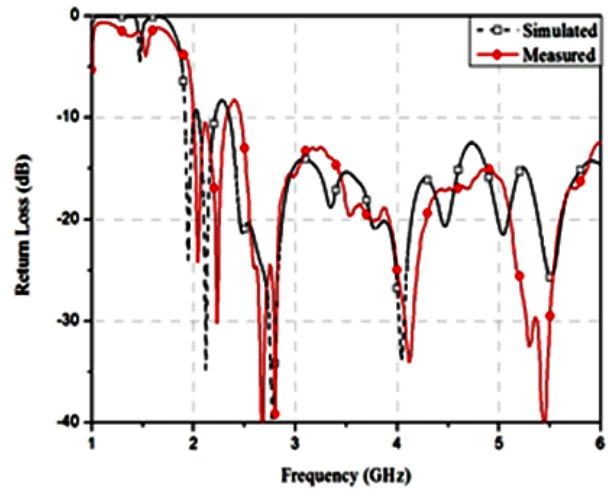


그림 5. 안테나 소자의 측정치와 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation and measurement result of antenna element.

자의 간격이 4 GHz의 half-lambda를 갖도록 하였다. 또한, 본 논문에서는 실시간 지연선로(true time delay)를 이용하여 가중치의 위상을 입력하고, 감쇄기(attenuator)를 이용하여 크기를 입력한다. 입력을 위한 전체 시스템을 제어하기 위하여 delay line과 감쇄기 아래쪽에 디지털 컨트롤 보드를 설치하여 이용하였다.

실제 실험되는 시스템은 그림 6과 같이 원주상에 4 GHz의 간격인 $d=37.5$ mm의 간격으로 안테나들이 배열이 되어 있다.

실험 결과는 모두 30° 를 조향하였을 때이다. 그림 7은 일반적인 양자화만을 적용하여 빔 조향을 하였을 때으로써 빔 조향의 열화 현상이 상당함을 알 수 있다. 그림 8은 모든 delay line의 경우의 수를 고려하여 측정 한 후, LUT Table을 만든 뒤에 가장 가까운 delay값을 탐색하도록 하여 생성한 빔패턴의 결과이다. 이 빔패턴은 이상적인 빔패턴에 가까운 모습을 보여준다. 그림 9는 대표 bit의 delay라인만을 측정 한 뒤에 최적의 delay값을 위하여 bit를 조합한 후 생성한 빔패턴이다. 이 방법으로는 최적의 delay값을 찾는 것에 한계가 있으므로 본 논문에서 제시하는 delay level shift 알고리즘을 통하여 그림 10과 같이 열화 현상이 개선된 모습을 볼 수 있다. 표 1은 각각의 결과에 대한 성능을 비교 분석하기 위하여 주파수 별로 PSL (Peak Side Lobe Level), HPBW(Half Power Beam Width), 최

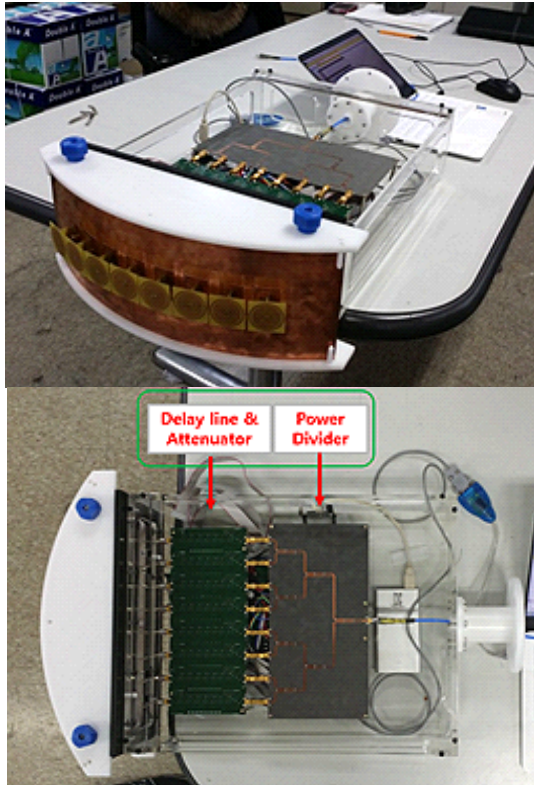


그림 6. 배열 안테나 소자 배치 및 시스템 구성도
Fig. 6. Array antenna element placement and system configuration.

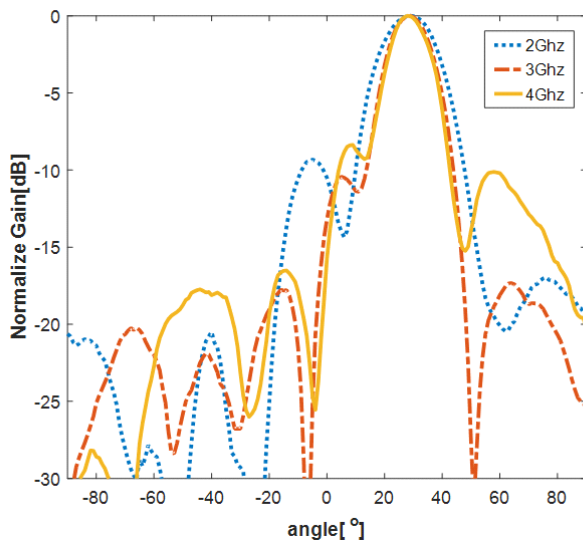


그림 7. 일반적인 양자화를 통한 빔패턴
Fig. 7. Beam pattern by using general quantization.

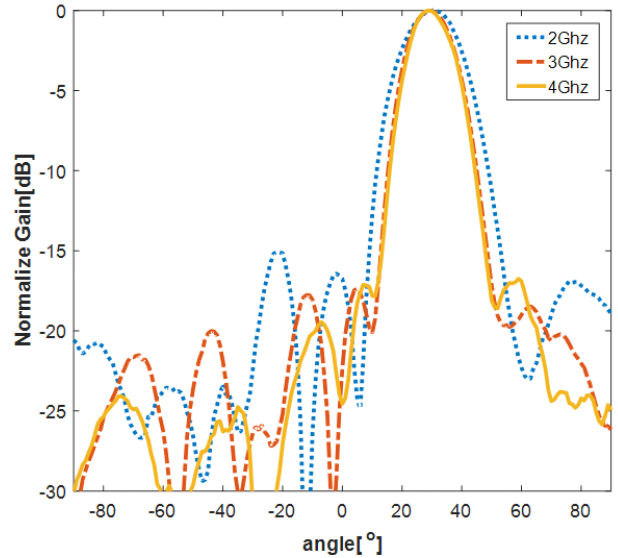


그림 8. LUT(Look Up Table)를 적용한 빔 패턴
Fig. 8. Beam pattern by using LUT.

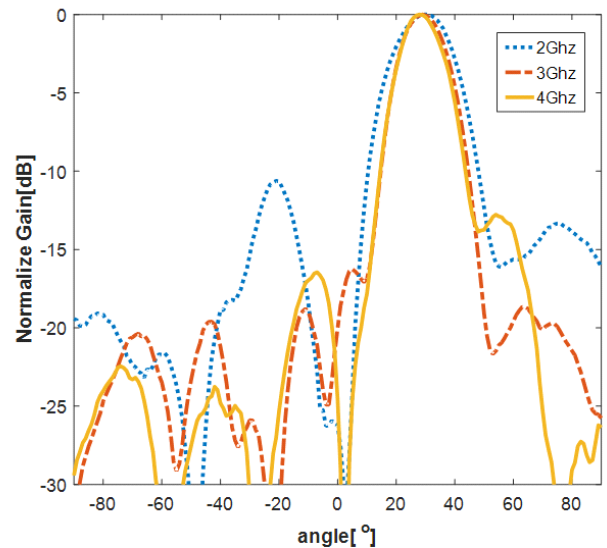


그림 9. 대표 bit의 조합 delay를 적용한 빔 패턴
Fig. 9. Beam pattern by using bit combination.

대치의 각도(peak angle)를 나타낸 것이다.

IV. 결 론

본 논문은 실제 1차원 컨포멀 배열 안테나 시스템에서 발생하는 채널 에러로 인하여 발생하는 빔패턴 열화 현

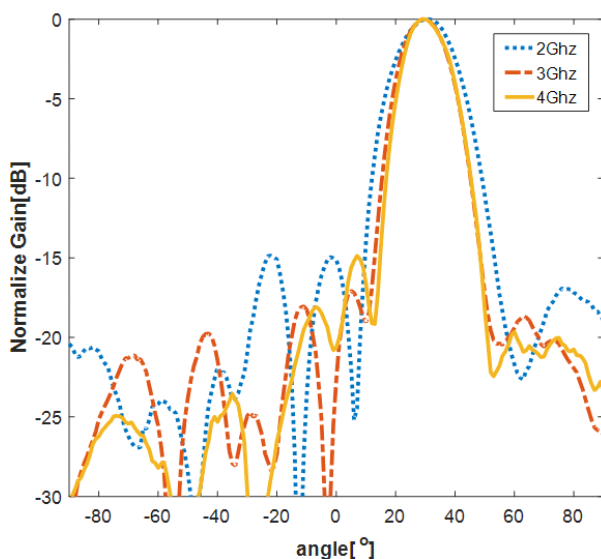


그림 10. DLS(Delay Level Shift)를 적용한 빔 패턴
Fig. 10. Beampattern by using DLS.

표 1. General quantization, LUT, 대표 bit 조합, DLS의 성능 비교

Table 1. General quantization, LUT, representative bit combinations, performance comparison of DLS.

	Frequency	PSLL (dB)	HPBW (°)	Peak angle (°)
General quantization	2 GHz	-9.32	22.49	28.54
	3 GHz	-10.43	17.19	28.86
	4 GHz	-8.35	16	28.21
LUT delay (Ideal)	2 GHz	-15.07	21.96	30.49
	3 GHz	-17.35	17.5	29.21
	4 GHz	-16.73	16.55	28.93
Bit combination	2 GHz	-10.6	22.36	30.44
	3 GHz	-16.25	17.54	29.06
	4 GHz	-12.77	16.26	28.12
DLS(Delay Level Shift)	2 GHz	-14.83	21.75	30.78
	3 GHz	-17.07	17.53	29.32
	4 GHz	-14.87	16.64	29.47

상에 대한 보상 알고리즘을 제시하였다. 안테나에서 발생하는 상호간섭 문제로 인한 빔형성 문제는 실제 능동 소자 패턴을 각각 측정된 뒤에 LSM을 이용하여 원하는 가

상 배열을 통하여 가중치를 구하였다. 이렇게 구해진 가중치는 실시간 지연선로를 이용하여 제어가 정확히 되어야 하지만, 선로의 RF switch 때문에 일어나는 흔들림 현상 때문에 단순한 양자화 방법과 조합 방법으로는 열화 현상을 해결 하는데 한계점이 있다. 본 논문에서 제시한 DSL(Delay Level Shift) 방법을 이용하여 2~4 GHz에서의 빔패턴 열화 현상을 개선하여 목표 빔 패턴과 가까운 상태로 빔형성이 되었고, PSLL 또한 2~4 GHz에서 감소한 모습을 볼 수 있었다.

References

- [1] L. Josefsson, P. Persson, *Conformal Array Antenna Theory and Design*, vol. 29, John Wiley & Sons, 2006.
- [2] A. W. Rudge, *The Handbook of Antenna Design*, vol. 16, IET, 1983.
- [3] Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, vol. 2, Boston: Artech House, 2005.
- [4] R. C. Hansen, et al., "Conformal antenna array design handbook", *NASA STI/Recon Technical Report N*, vol. 82, p. 21483, 1981.
- [5] K. M. Tsui, S. C. Chan, "Pattern synthesis of narrow-band conformal arrays using iterative second-order cone programming", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 6, pp. 1959-1970, 2010.
- [6] R. Karimzadeh, et al. "Conformal array pattern synthesis using the weighted alternating reverse projection method considering mutual coupling and embedded-element pattern effects", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, no. 6, pp. 621-626, 2012.
- [7] Hans, Steyskal, Jeffrey S. Herd, "Mutual coupling compensation in small array antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 12, pp. 1971-1975, 1990.
- [8] Santana, Burintramart, *Methods for Direction of Arrival Estimation using a Single Snapshot of the Data*, Syracuse University, 2009.
- [9] Matt, Longbrake, "True time-delay beamsteering for ra-

dar", *Aerospace and Electronics Conference(NAECON), 2012 IEEE National*, 2012.

- [10] D. Carosi, et al. "Delay control in wide band front-end components for multi-role/multi-domain phased-array systems", *Microwave Symposium Digest (MIT), 2011 IEEE MTT-S International*, 2011.

- [11] M. K. Cho, et al., "CMOS-based bi-directional T/R chipsets for phased array antenna", *Microwave Symposium Digest(MIT), 2012 IEEE MTT-S International*, 2012.

- [12] Régis Guinvarc'H, Serhir, Mohammed, Fabrice Boust, and Nicolas Ribiere-Tharaud, "A wideband omnidirectional conformal array for passive radar", *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2014 IEEE*, 2014.

- [13] Y. M. Madany, "The analysis of wideband conformal microstrip array antenna with cosecant-squared beam shaping", *2006 IEEE Conference on Radar*, 2006.

윤 호 준



2011년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)

2011년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정

[주 관심분야] 능동 위상 배열 시스템, 레이다 신호처리

남 상 욱



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)

1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공학박사)

1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 능동/수동 회로 설계, 안테나 및 전파, 전자파 수치해석 등

이 강 인



2011년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)

2011년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] 능동 위상 배열 시스템, 레이다 신호처리

정 용 식



1989년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

2000년 8월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)

2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통

신공학과 조교수

2006년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] 전자파수치해석 및 EMI/EMC, Radar 신호처리

윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과
(공학사)

1986년 2월: 연세대학교 전기전자공학과
(공학석사)

1991년 2월: Georgia Institute of Technology
(공학박사)

1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위

성 통신기술연구단 교수

1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파