

論文2000-37TC-7-3

능동 위상배열 안테나 채널의 초기위상 천이 보정 방법

(Calibration Method of Channels' Initial Phase Shift in Active Phased Array Antenna)

文榮燦, 朴贊九, 表喆植, 全舜翼

(Young-Chan Moon, Chan-Gu Park, Cheol-Sig Pyo and Soon-Ik Jeon)

요 약

능동 위상배열 안테나는 방사부 및 저잡음증폭기와 위상천이기를 포함하는 능동회로부가 결합된 다수의 채널들로 구성된다. 각각의 채널은 능동회로부의 초기위상 및 이득의 비균일성, 방사소자와 능동회로부의 인터페이스 및 빔성형회로의 편차 등으로 인하여 제각기 다른 양의 초기위상 및 이득값을 갖게 된다. 이는 능동 위상배열 안테나에 내재된 문제점으로서, 설계된 안테나 방사패턴 및 안테나 이득을 실제로 구현하기 위해서는 각각의 채널의 초기위상 및 이득 편차를 보정할 필요가 있다. 본 논문에서는 능동 위상배열 안테나에 대하여 초기위상 및 이득의 편차를 효율적으로 보정하여 안테나 성능을 최대로 향상시키는 새로운 보정 방법을 제시하였다. 실제 이 방법을 수행하여 12개의 상당히 비균일한 채널의 초기위상 천이 및 이득을 보정하여 안테나 이득을 2.0dB 이상 향상시켰다.

Abstract

An active phased array antenna consists of many channels including radiator and active circuitry that contains low noise amplifiers and phase shifters. Each channel has different initial phase shift and gain because of inequality in active circuitry itself, interface between radiator and active circuitry, beam forming network and other antenna configurations. This is an inherent problem in active phased array antenna, therefore each channels' initial phase shifts and gains should be calibrated for obtaining the designed radiation pattern and antenna gain. In this paper, an efficient calibration method for the active phased array antenna is presented. By performing the above method, the antenna gain is increased more than 2.0 dB after calibrating considerably unequal 12 channels' initial phase shifts and gains.

I. 서 론

능동 위상배열 안테나는 방사소자 및 위상천이기를 포함한 능동회로부가 결합된 다수의 채널들로 구성된다. 각각의 채널들은 능동회로부의 초기위상 및 이득의

비균일성, 방사소자와 능동회로부의 인터페이스 및 빔성형회로의 편차 등으로 인하여 각기 다른 양의 초기위상 및 이득값을 갖게 된다. 따라서 채널들의 보정이 이루어지지 않으면, 능동 위상배열 안테나는 설계 결과와 비교하여 안테나 이득 감소, 주빔 틸트 및 부배열 패턴 변화의 현상을 보인다. 이는 능동 위상배열 안테나의 특성상 내재된 문제점이므로, 설계된 안테나 특성을 실제로 얻으려면 각각의 채널의 초기위상 및 이득 편차를 보정할 필요가 있다^[1].

위상배열 안테나에서 불균일한 채널의 효과에 대한

* 正會員, 韓國電子通信研究院 無線放送研究所
(ETRI - Radio & Broadcasting Technology Laboratory)

接受日字:1999年12月10日, 수정완료일:2000年6月29日

연구는 많이 이루어졌다^[1,2]. 그러나 능동 위상배열 안테나의 보정 방법은 제작된 안테나 시스템의 특성에 따라 결정되고 수행되므로, 보정 방법에 대한 연구는 많지 않다. 일반적으로 다수의 채널을 갖는 위상배열 안테나는 시스템 내부에 보정을 위한 장치 및 알고리즘이 포함된다. 이만큼 이상의 채널을 갖는 미국 고공방어 레이더인 THHAD^[3]는 배열의 일부마다 보정용 혼 안테나가 달려있고, 무반향실에서 각 채널의 위상천이 및 이득 편차를 보상한다. 유럽의 전투기 레이더용 AMSAR^[4] 안테나 역시 T/R 모듈의 위상천이 및 이득 편차를 보정하는 루틴이 시스템 내에 포함되어 있다. 근래에는 적응형 빔성형회로의 위상배열 안테나에 대한 연구가 많이 이뤄졌고, 이러한 안테나의 정교한 보정 방법에 대한 연구가 많다^[5,6]. 특히 부배열 레벨을 상당히 낮출 필요가 있는 경우에는 채널의 초기위상 및 이득 편차 보정이 필수적이다^[7,8].

능동 위상배열 안테나에서 개별 채널의 초기위상 천이 및 이득 편차가 전체 안테나의 성능에 주는 영향은 채널의 수가 많아질수록 작다. 그 이유는 많은 수의 채널의 편차들이 확률적으로 서로 상쇄 효과를 갖게 되기 때문이다^[1]. 그러나 본 논문에 적용되는 안테나는 고가의 부품인 위상천이기 수를 줄이기 위하여 12개의 채널로만 구성하였으며, 이로 인하여 개별 채널의 초기 위상 천이 및 이득 편차가 전체 안테나의 성능에 상당한 영향을 미치고 있다. 더구나 일반적으로 능동 위상배열 안테나의 채널에 붙는 가변 감쇄기가 본 논문의 안테나에는 없다. 따라서 채널의 수가 적고, 가변 감쇄기가 없는 본 논문의 능동 위상배열 안테나는 개별 채널에 대한 정밀한 보정을 거쳐야 설계된 안테나 성능을 발휘할 수 있게 된다.

일반적으로 능동 위상배열 안테나의 보정 과정은 상당히 많은 시간과 노력을 필요로 하므로, 능동 위상배열 안테나의 주요 단점 중의 하나로 지적된다. 특히 현대의 능동 위상배열 안테나가 아닌, 다수의 안테나 제작이 요구되는 경우는 안테나 보정 과정을 효율적으로 자동화 할 필요가 있다. 본 논문에서는 12개의 상당히 비균일한 채널을 갖는 능동 위상배열 안테나에 대하여 초기위상 및 이득의 편차를 보정하여 안테나 성능을 최대한 향상시키는 새로운 보정 방법을 제시하였고, 이 보정 방법을 실제 제작된 능동 위상배열 안테나에 적용하여 안테나 이득 개선 및 주빔 틸트 현상을 제거하였다.

II. 본 론

1. 능동 위상배열 안테나 구조

본 논문의 능동 위상배열 안테나의 배열 구조는 그림1과 같이 12개의 방사부배열로 구성되고, 위성을 향하여 의 각도로 기울어진 채 안테나 프레임에 설치된다. 방사부배열은 2×8 배열의 전자기결합으로 급전시킨 마이크로스트립 패치 배열로 구성되고, 이득 패턴은 식(1)과 같다.

$$G_0(u, v) = \left| 8.13(v \sin \theta_0 + \sqrt{1-u^2-v^2} \cos \theta_0) \cdot \prod_{i=1}^4 AF_i \right|^2$$

$$AF_1 = \cos \frac{ka(v \cos \theta_0 - \sqrt{1-u^2-v^2} \sin \theta_0)}{4}, \quad (1)$$

$$AF_2 = \cos \frac{kau}{4}, \quad AF_3 = \cos \frac{kau}{2}, \quad AF_4 = \cos(kau)$$

$$v = \sin \theta \sin \phi, \quad u = \sin \theta \cos \phi$$

여기서 단일 패치 안테나의 방사 패턴은 코사인 일차 패턴으로 등가하였고, a/2는 마이크로스트립 패치 사이의 간격이다. 또한 방사부배열의 안테나 이득 계수 8.13(=18.2dBi)는 실험적으로 얻어진 방사부배열 안테나 이득이다. 방사부배열의 이득 패턴으로부터 전체 안테나 이득 패턴을 계산할 수 있고, 이는 식(2)와 같다.

$$G(u, v, v_0) = G_0(u, v) \frac{\left| \sum_{k=1}^{IV} S^k(u, v, v_0) \exp(j\psi^k) \right|^2}{\sum_{m,n} |A_{mn}|^2} \quad (2)$$

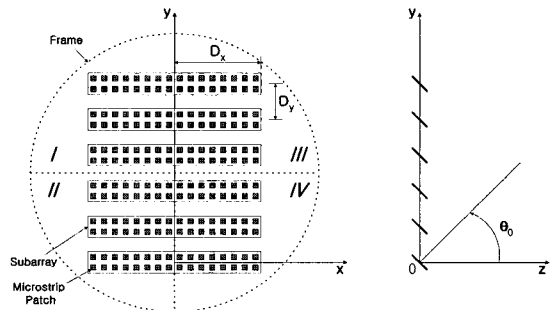


그림 1. 이동체 위성방송 수신용 능동 위상배열 안테나 배열 구조

Fig. 1. Array geometry of active phased array antenna for mobile DBS reception.

$$\begin{aligned}
 S^I(u, v, v_0) &= \sum_{n=1}^{N/2} \left(\sum_{m=1}^{M/2} A_{mn} \exp[-jk(m-1)D_x u] \right) \exp[-jk(n-1)D_y v + j\psi_n] \\
 S^{II}(u, v, v_0) &= \sum_{n=N/2+1}^N \left(\sum_{m=1}^{M/2} A_{mn} \exp[-jk(m-1)D_x u] \right) \exp[-jk(n-1)D_y v + j\psi_n] \\
 S^{III}(u, v, v_0) &= \sum_{n=1}^{N/2} \left(\sum_{m=M/2+1}^M A_{mn} \exp[-jk(m-1)D_x u] \right) \exp[-jk(n-1)D_y v + j\psi_n] \\
 S^{IV}(u, v, v_0) &= \sum_{n=N/2+1}^N \left(\sum_{m=M/2+1}^M A_{mn} \exp[-jk(m-1)D_x u] \right) \exp[-jk(n-1)D_y v + j\psi_n]
 \end{aligned}$$

식(2)에서 M=2, N=6이고, $|A_{mn}|^2$ 은 각각의 방사부 배열로 수신되는 전력값이다. ψ^k 는 안테나 프레임 사분면에 할당된 위상값이고, ψ_n 은 식(3)과 같이 표현되며 ψ_n 는 위상천이기의 최소 위상 변화량이다.

$$\psi_n = E \left[\frac{0.5 + k(n-1)D_y v_0}{\Delta\psi} \right] \cdot \Delta\psi \quad (3)$$

본 논문에서 제안한 초기위상 보정법 기술의 편의를 위하여 시스템 구성을 그림2에 제시하였다. 12개의 방사부배열 각각에 능동회로부가 직접 연결되며, 능동회로부는 저잡음 증폭기, 위상천이기, 증폭기가 직렬로 연결되고 빔조향제어기에 의하여 위상천이기가 제어된다. 3개의 능동회로부 출력은 행결합기에 의하여 결합되고 빔성형회로의 입력으로 동축선로를 통하여 전달된다. 빔성형회로의 4개 입력은 분리/결합의 과정 및 주파수 변환을 거쳐 주빔(Main Beam)과 추적빔(Tracking Beam)의 2개 출력을 만든다. 주빔 출력은 수신기에 입력되어 TV 신호로 사용되고, 추적빔 출력은 추적신호 변환기를 거쳐 위성신호의 세기를 전압으로 변환한 후 위성 추적의 기준으로 사용한다. 위상천이기는 Ratheon사의 MMIC 5bit Phase Shifter를 사용하였고, 실제 Ku 대역에서 측정된 결과 21개 state만을 정상 사용할 수 있었다. 따라서 안테나 시스템에 적용된 실제 최소위상 변화량은 약 17도이다.

실제 제작된 능동 위상배열 안테나는 12개의 채널의 동질성을 유지하기 어렵고, 실험적으로 제작된 안테나 시스템에서 각각의 채널의 초기위상 천이 및 이득 편차는 표1과 같다. 이 안테나는 5번 채널이 전혀 동작하지 않는 상태이고, 나머지 채널들 역시 초기위상 천이 및 이득 편차가 큰, 즉 매우 불균일한 채널 특성을 갖는 능동 위상배열 안테나임을 알 수 있다. 표 1의 값들은 시스템 입력인 방사부배열로부터 시스템 신호 출력까지의 채널 특성을 측정된 결과이다. 이러한 채널 특성을 갖는 안테나에서 식(2)로부터 계산된 안테나의 양

각 및 방위각 방향 이득 패턴은 각각 그림3과 그림4이다. 그림에서 실선의 패턴은 채널의 초기위상 천이가 없고 이득이 균일한 이상적인 경우이고, 점선의 패턴은 표1과 같은 실제의 불균일한 채널을 갖는 안테나의 패턴이다. 점선/실선의 결과를 비교하면, 채널의 불균일성이 약 2dB의 안테나 이득 감소, 약 3도의 주빔 틸트 및 부배열 패턴에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

표 1. 개별 채널의 초기위상 천이 및 이득 편차 측정 결과

Table 1. Measured results of each channels initial phase shift and gain deviation.

| Channel No. | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 | #7 | #8 | #9 | #10 | #11 | #12 |
|----------------|----|------|------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|
| Phase [degree] | 0 | 343 | 257 | 326 | X | 257 | 0 | 0 | 309 | 0 | 326 | 291 |
| Gain[dBc] | 0 | -5.5 | -3.2 | -1.8 | X | -3.3 | -1.8 | -4.5 | -4.7 | -3.8 | -5.8 | -3.3 |

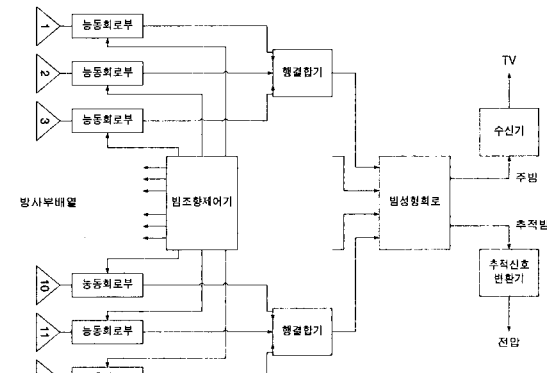


그림 2. 안테나 시스템 구성
Fig. 2. Antenna system configuration.

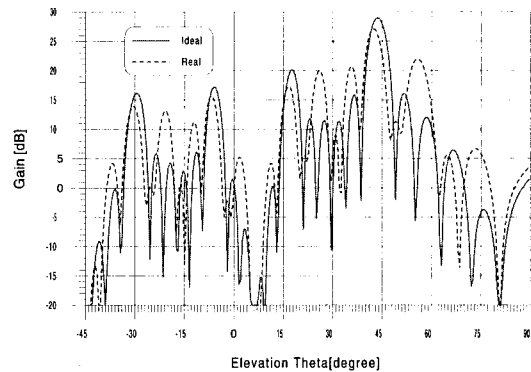


그림 3. 양각 방향 안테나 이득 패턴 계산 결과
Fig. 3. Calculated antenna gain pattern in elevation plane.

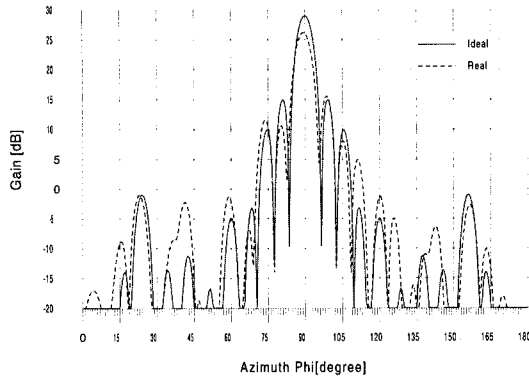


그림 4. 방위각 방향 안테나 이득 패턴 계산 결과
Fig. 4. Calculated antenna gain pattern in azimuth plane.

2. 제안된 능동 위상배열 안테나 보정법

실제 제작된 능동 위상배열 안테나의 12개 채널은 제작기 다른 초기위상 천이 및 이득 편차를 갖는다. 따라서 능동회로부의 위상천이 값을 조절하여 12개 채널의 초기위상 천이 및 이득 편차를 보상에 주어야 한다. 본 논문에서 제안하는 안테나 보정법은 옥외에서 직접 위성을 수신하면서 안테나 시스템 성능이 최대가 되도록 12개 채널의 초기위상 천이 및 이득 편차를 보정한 위상천이기 초기 위상값을 추출하는 것을 기본 개념으로 한다. 초기위상값 추출을 위한 시험 환경은 그림5와 같이 안테나가 위성 신호(본 논문에서는 무궁화 위성 적용)를 직접 수신하도록 설치된다. Angular Positioner는 안테나를 지지하고, 양각 및 방위각 방향을 조정하기 위하여 사용된다. Notebook PC에는 초기위상값 추출을 위한 프로그램이 빔조향제어기와 연동되고, 이 프로그램은 12개의 위상천이기를 직접 제어하며 시스템 출력인 신호세기 전압을 모니터링 한다. 따라서 그림6의 시험 환경으로부터 위상천이기의 모든 가능한 위상값을 변화시키며 신호세기 전압을 최고로 하는, 즉 안테나 성능을 최적으로 할 수 있는 초기 위상값을 추출할 수 있다.

5bit 위상천이기 12개 중 하나를 기준으로 하여 모든 경우의 수를 제어하기 위한 가지수는 이고, 12개의 위상천이기를 제어한 후 출력 전압을 모니터링 하는 데 걸리는 시간은 약 10^{-3} 초이다. 따라서 모든 경우의 수를 제어하기 위해 걸리는 시간은 약 10^{10} 시간으로서 실제 수행하기란 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 절반(6개)의 위상천이기에 대하여 Higher 3bit을 우선 제어

(Coarse Tuning)한 후, Low 3bit을 제어(Fine Tuning)하는 방식을 사용하였다. 이 방식으로 절반의 위상천이기의 초기위상값 추출에는 약 1분이 소요된다. 다시 절반의 위상천이기에 대하여 똑같은 과정을 반복한 후, 두 결과를 종합하여 12개 채널의 초기위상값을 추출하였다. 추출된 결과가 바로 표1의 값이다. 초기위상값 추출에 걸리는 시간은 빔조향제어기에 사용된 프로세서 및 AD Converter 등의 디지털 회로 동작에 의하여 결정되며, 이는 주로 안테나 시스템이 적용되는 이동체의 움직임을 극복하고 위성을 추적하는데 걸리는 시간을 고려하여 결정된다.

그림5의 시험 환경으로부터 추출된 초기위상 값을 보정하여 위상배열 안테나의 빔조향 제어용 위상천이기 데이터 ϕ_i 가 식(4)와 같이 계산된다.

$$\phi_i(\theta) = \phi_o(\theta) + \phi_i^{IPS} \tag{4}$$

여기서 ϕ_i^{IPS} 는 추출된 12개의 초기위상값이고, $\phi_o(\theta)$ 는 안테나 배열 구조로부터 계산되는 안테나 빔 조향 각도 θ 에 따른 위상천이기 데이터로서 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_i^r = \frac{2\pi}{\lambda_0} D_y(i-1)(\sin\theta - \sin\theta_0), \quad i=1,2,3,4,5,6 \tag{5}$$

$$\phi_i^l = \frac{2\pi}{\lambda_0} D_y(i-7)(\sin\theta - \sin\theta_0), \quad i=7,8,9,10,11,12 \tag{6}$$

식(4)에 의하여 본 논문의 안테나는 안테나 성능이 최대가 되도록 12개 채널의 초기위상 천이 및 이득 편차가 보정된 빔조향 제어용 위상천이기 데이터가 구해진다. 실제 표1과 같이 불균일한 채널 특성을 갖는 안테나 시스템 주빔 출력의 보정 전과 후를 비교하였다. 그림6의 결과는 시스템 출력 신호의 신호대잡음비(C/N)이고, 보정 후 안테나의 신호대 잡음비 성능이 약 2.2dB 개선됨을 알 수 있다. 이 결과는 그림3과 그림4의 안테나 이득 계산 결과와 잘 일치한다.

본 논문에서 제안된 보정법에 따라 채널의 불균일성을 최적 초기위상값으로 보정한 후, 안테나 방사패턴을 NSI사의 근접 전자계 측정 시스템을 사용하여 측정하였다. 안테나 방사패턴 측정 환경은 그림7과 같고, 측정 결과는 그림8과 그림9에 제시하였다. 결과에서 보듯이 균일한 채널을 가정한 이론적인 방사패턴 계산 결과와 초기위상값을 보정한 후의 방사패턴 측정 결과가 유사

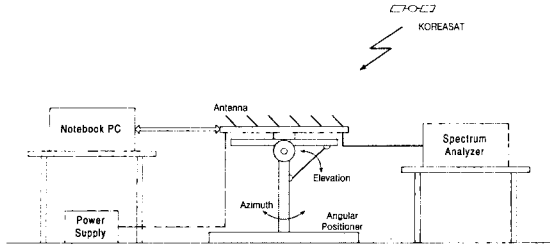


그림 5. 최적의 초기위상값 추출 시험 환경
Fig. 5. Test environment of extracting optimal phase shift.

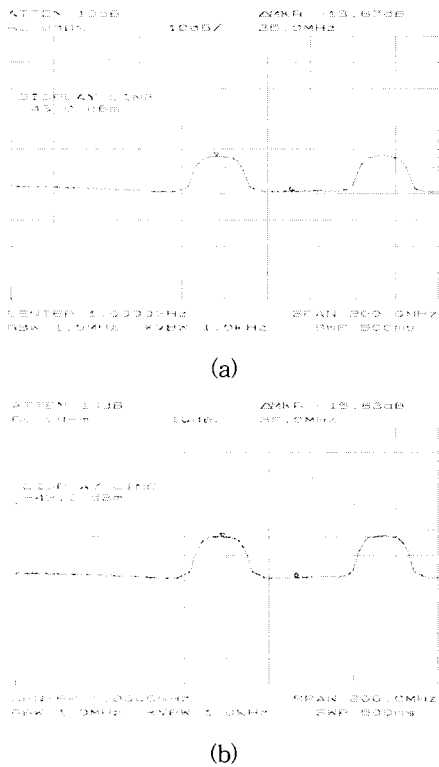


그림 6. 안테나 시스템 성능 비교: (a) 보정 전; (b) 보정 후.
Fig. 6. Comparison of antenna persystem: (a) Before calibration; (b) After calibration.

함을 알 수 있다. 계산 결과와 측정 결과가 완전히 일치하지 않는 가장 큰 이유는 채널의 이득 편차를 위상만으로 보상할 수 없기 때문이다. 왜냐하면 12개 채널의 출력 전력은 Wilkinson Power Combiner로 제작된 행렬합기에 의하여 합성되는데, 이 때 채널의 전력 차이는 저항에 의해 소모되기 때문이다. 따라서 실제 본 안테나에는 가변감쇄기가 포함되어 있지 않으나, 가변 감쇄기가 포함된 시스템에서는 12개 채널의 전력을 동

일하게 함으로써 안테나 이득을 최대화하고, 복사패턴을 설계한 대로 얻을 수 있다.

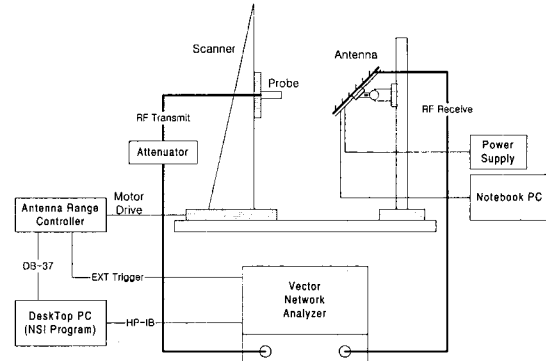


그림 7. 안테나 방사패턴 측정을 위한 근접 전자계 시험 환경
Fig. 7. Near field test environment for antenna pattern measurement.

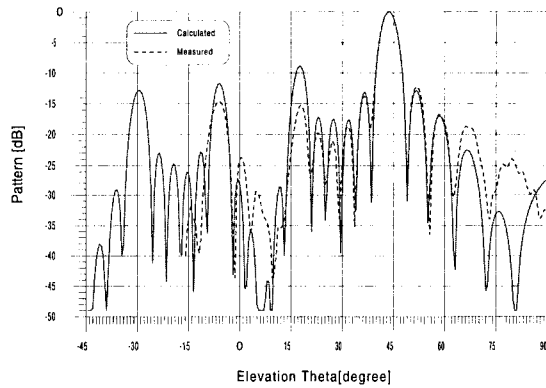


그림 8. 양각 방향 안테나 방사패턴 측정 결과
Fig. 8. Measured radiation pattern in elevation plane.

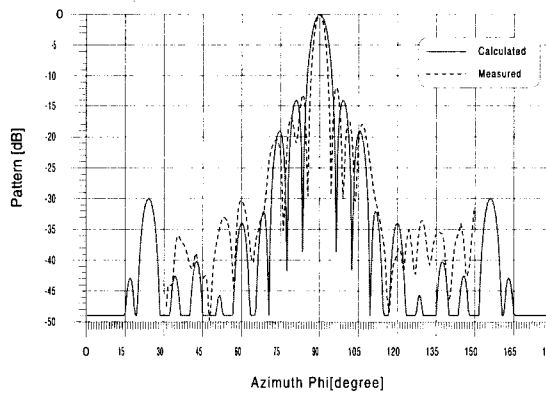


그림 9. 방위각 방향 안테나 방사패턴 측정 결과
Fig. 9. Measured radiation pattern in azimuth plane.

III. 결 론

능동 위상배열 안테나에서 개별 채널의 초기위상 천이 및 이득 편차가 전체 안테나의 성능에 주는 영향은 채널의 수가 많아질수록 작다. 그 이유는 많은 수의 채널의 편차들이 확률적으로 서로 상쇄 효과를 갖게 되기 때문이다. 본 논문에서는 적은 수의 채널을 갖는 능동 위상배열 안테나의 보정 방법을 제시하였고, 실제 제작된 안테나에서 상당히 불균일한 12개의 채널에 대한 보정을 거친 후 2dB 이상의 안테나 이득 개선 효과 및 약 3의도 주빔 틸트 현상을 제거하여 안테나 성능을 향상시켰다.

능동 위상배열 안테나의 보정 과정은 상당히 많은 시간과 노력을 필요로 하므로, 능동 위상배열 안테나의 주요 단점 중의 하나로 지적된다. 특히 현대의 능동 위상배열 안테나가 아닌, 다수의 안테나 제작이 요구되는 경우, 안테나 보정 과정을 효율적으로 자동화 할 필요가 있다. 본 논문에서 제시한 새로운 보정 방법은 매우 효율적이고 실제적이므로 향후 보편화 될 위성통신용 능동 위상배열 안테나의 보정 방법으로서 많은 활용이 기대된다. 또한 본 논문에서 제시한 보정 방법은 위상천이기 뿐만 아니라, 각각의 채널에 가변 감쇄기가 포함될 일반적인 능동 위상배열 안테나의 보정으로 쉽게 확장할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. J. Mailloux, *PHASED ARRAY ANTENNA HANDBOOK*, Artech House, Inc., Norwood, MA, 1994.
- [2] J. M. Howell, "Phased Array Alignment and Calibration Techniques," Proc. Workshop on Testing Phased Arrays and Diagnostics in conjunction with the IEEE Ant. Prop. Int. Symp., San Jose, CA, June 30, 1989.
- [3] E. Brookner, "Phased Arrays: Major Advances and Future Trends into Next Millenium," Proceedings of the XXVIII Moscow Intl. Conf. on Ant. Theory and Tech., Moscow, Russia, pp. 24-42, Sep. 1998.
- [4] M. Uhlmann et al., "Design Characteristics of the AMSAR airborne Phased Array Antenna," Proceedings of the XXVIII Moscow Intl. Conf. on Ant. Theory and Tech., Moscow, Russia, pp. 261-265, Sep. 1998.
- [5] B. P. Ng, M. H. Er and C. Kot, "Array gain/phase calibration techniques for adaptive beamforming and direction finding," IEE Proc.-Radar, Sonar Navig., Vol. 141, No. 1, pp. 25-29, Feb. 1994.
- [6] S. D. Silverstein, "Application of Orthogonal Codes to the Calibration of Active Phased Array Antennas for Communication Satellites," IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 45, No. 1, pp. 206-218, Jan. 1997.
- [7] E. A. Jaska, L. E. Corey and S. Y. Park, "Effects of Random Amplitude and Phase Errors on Monopulse Null Depth in Phased-Array Antennas," Ant. and Prop. Society Intl. Symp. Vol. 2, pp. 836-839, May 1990.

저 자 소 개

文 榮 燦(正會員) 第 35卷 D編 第 2號 參照

朴 贊 九(正會員)

1967년 5월 7일생. 1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1996년 9월~2000년 5월 : 한국전자통신연구원 무선방송연구소 선임연구원. 주관심분야 : 전자파 산란 해석, 위치추적 시스템, 위상배열 안테나 및 기계식 추적안테나

表 喆 植(正會員)

1963년 4월 24일생. 1991년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1991년 1월~현재 : 한국전자통신연구원 능동안테나연구팀 선임연구원. 주관심분야 : 위상배열 안테나, 이동체용 추적안테나 및 PLL 응용회로 설계

全 舜 翼(正會員) 第 36卷 D編 第 2號 參照