論文 98-23-6-2

# 고도각 주사 위상 배열 레이다에서 정확한 최적 기움각 매김

정회원 이 민 준*, 박 정 순*, 송 익 호*, 이 주 식*, 김 석 찬*

# Evaluation of the Exact Optimum Tilt Angles in Elevation Scanned Phase Array Radars

Min Joon Lee*, Jeongsoon Park*, Iickho Song*, Jooshik Lee*, Suk Chan Kim* *Regular Members*

요 약

고도각 주사 위상배열안테나에서 감지기 수는 안테나의 가격과 무게를 낮추는 중요한 요소 가운데 하나이다. 따라서, 배열요소 사이 거리와 관계가 있는 안테나 기움각은 매우 중요한 설계 매개변수이다. 이 논문에서는 몇몇 균일 배열안테나와 비균일 배열안테나에 대한 정확한 최적 기움각을 이론적으로 얻어 본다: 네 가지 균일 선형 배열안테나를 생각하고 비균일 여기 배열안테나로는 체비세프 배열요소를 생각한다.

ABSTRACT

In phased array antennas that scan elevation, the number of radiator rows is one of the important factors to minimizing both cost and weight. Therefore, the antenna tilt angles having relation with element spacing are among the important design parameters. The exact optimum tilt angles for several types of uniformly and nonuniformly excited arrays are obtained theoretically. Four types of uniform linear arrays and Chebyshev array factors as a nonuniformly excited array are considered.

## I. 머리말

레이다 안테나에 쓰는 위상배열안테나를 설계할 때 생각해야할 선택요소가 여러가지 있다. 설계를 최적화하는 가장 중요한 매개변수는 가격과 무게이다. 이 때, 고도각주사 위상배열안테나에서 감지기 수는 가격과 무게를 결정하는 중요한 인자 가운데 하나이다. 그 까닭은 가격과 무게가 감지기 수에 직접 비례하기 때문이다. 따라서, 배열요소 사이 거리와 관계가 있는 안테나 기움각 선택은 레이다 시스템 설계에서 중요한 매개변수이다.

이와 같은 위상배열안테나에서는 여러 제한 조건에서 방향성 최적화를 연구한 결과가 많이 발표되었다 [1]-[4]: 이러한 연구는 주로 넓은 면 (broadside) 배열 안테나에 관한 것이다. 고도각 주사 위상 배열 안테

* 한국과학기술원 전기 및 전자공학과
論文番號:98060-0212
接受日字:1998年 2月 12日

나에 알맞은 최적 기움각은 [5]에서 다루어진 바있다: 그러나, 그 결과를 얻는데 쓰인 계산은 매우 제한된 것이고, 수평 빔에 대한 전체적인 안테나 이득을 너무 단순화해서 여러가지 안테나배열에 적용하기 힘들다.

이 논문에서는, 몇몇 균일, 비균일 배열안테나에서 최적 기움각을 이론적으로 얻는다. 네가지 균일 선형 배열안테나 곧, 등방요소 배열안테나, 짧은 한줄 쌍극자, 병렬 짧은 쌍극자, 십자 쌍극자 현측배열안테나를 생각한다. 비균일 배열안테나일 때는 최적 기움각을 얻을 때 채비셰프 방향성과 삼각 배열 요소를 계산한다.

## II. 수평선에서의 최대방향성

고도각주사 위상배열안테나 시스템은, 일반적으로 수평선 방향으로 가장 멀리 있는 항공기 표적을 찾을 수 있도록, 수평선방향으로 최대 이득을 가지고 그밖의 각에서는 그보다 떨어지는 이득을 갖게 된다. 이와 같은 조건을 만족시키려면 기움각이 0°이어야 한다. 한편, 기움각이 0°이면 기움각이 그보다 클 때보다 배열요소 사이 거리가 불필요하게 줄어 들어 같은 크기 안테나에서 소자 수가 늘어나는 단점이 있다. 실제 안테나 설계에서는 이와같이 안테나 기울임으로 말미암아 일어나는 수평선 방향이득 손실과 안테나 소자 사이 거리에 따른 배열 소자수 늘어남을 고려하여 0°와 20°사이 기움각이 일반적으로 쓰인다.

이 논문에서는, 가장 높은 빔 고도각의 함수로 최적 기움각을 계산할 수 있다는 것을 보인다. 여기서 최적이라는 말은 수평선에서 안테나 방향성이 가장 크게 되는 것을 뜻한다. 이때, 바라는 모든 주사각에 대해 격자 잎 밖에서 안테나가 운용되어야 한다는 제한 조건이 있다.

그림 1에, 위상 배열 안테나 매개변수를 나타냈다. 행과 열 수는 각각 유효 안테나 높이 h와 폭 w를 정해준다. 안테나는 수평선에서 $\theta_t$만큼 기울어져 있고, 가장 높은 각 $\theta_h$까지 빔을 주사한다. 넓은 면 배열안테나에서 평면 배열안테나 법선에 대해 가장 높은 빔과 수평선 빔 위치는 각각 $\theta_m$과 $\theta_t$로 나타낸다.

고정된 가장 높은 빔에서 최적 기움각을 얻으려면, 기움각이 바뀔 때 수평선에서 방향성을 계산해야 한다. 곧, 수평선에서 가장 큰 방향성을 갖는 기움각을 최적 기움각으로 얻을 수 있다. 수평선에서 안테나 주사손실이 $\cos\theta_t$이고 최대허용 행 사이 거리가 정해

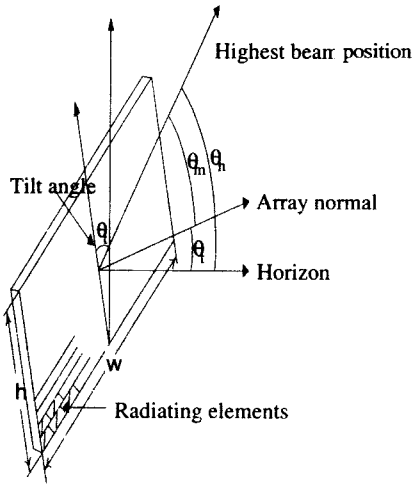


그림 1. 평면 배열안테나

지면, 수평선에서 근사 방향성은 현측 이득과 주사 손실의 곱이다. 모든 다른 매개변수가 고정됐기 때문에, 현측 이득은 방사 행 사이 거리에 비례해서 커진다. 수평선에서 방향성은 다음과 같다 [5].

$$D_{horizon} \approx \cos\frac{\theta_t}{1+\sin\theta_m}. \tag{1}$$

식 (1)을 써서, 근사 최적 기움각을 얻을 수 있다. 그러나, 이 근사화는 여러가지 안테나에 적용하기에는 너무 부정확하다. 이 논문에서는 정확한 안테나 방향성을 써서, 몇가지 균일, 비균일 배열안테나에서 좀 더 정확한 최적 기움각을 얻는다.

### 2.1 균일여기 같은 거리 배열 안테나

배열 요소가 $z$축을 따라 놓여 있다고 가정한다. 그런 배열 안테나의 배열 요소는 다음과 같다 [6].

$$g(\theta)=\left|\frac{\sin N\frac{\gamma}{2}}{N\sin\frac{\gamma}{2}}\right|, \tag{2}$$

여기서, $\gamma=\alpha+2\pi\frac{\lambda}{d}\cos\theta$, $N$은 배열요소 수, $d$는 배열요소사이 거리, $\alpha$는 위상 상수이다. 각 배열요소 방사를 $f(\theta,\phi)$로 나타내면, 배열안테나 전력 $P(\theta,\phi)$는 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$P(\theta,\phi) = |f(\theta,\phi)g(\theta)|^2 \tag{3}$$

배열안테나 방향성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(\theta,\phi) = \frac{P(\theta,\phi)}{\frac{1}{4\pi}\int_{4\pi} P(\theta,\phi)d\Omega}. \tag{4}$$

여기서, $d\Omega$는 입체각 요소이다.

방향성은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$D(\theta,\phi) = \frac{|f(\theta,\phi)g(\theta)|^2}{\frac{a_0}{N} + \frac{2}{N^2}\sum_{n=1}^{N-1} a_n(N-n)(a_1\sin n\beta d + a_2\cos n\beta d)\cos na} \tag{5}$$

여기서, $a_n = \frac{1}{n\beta d}$ 이고, 몇가지 안테나에서 $f(\theta,\phi)$과 $a_0$, $a_1$, $a_2$를 표 1에 나타냈다.

표 1. 균일여기 같은 거리 배열안테나 방향성을 계산하는데 필요한 매개변수

| | $\lvert f(\theta,\phi)\rvert^2$ | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ |
|---|---|---|---|---|
| 등방성 요소 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 동일선상 쌍극자 | $\sin^2\theta$ | $\frac{2}{3}$ | $2a_n^2$ | $-2a_n^2$ |
| 병렬 쌍극자 | $1-\sin^2\theta\cos^2\phi$ | $\frac{2}{3}$ | $1-a_n^2$ | $a_n$ |
| 현측 십자 | $\frac{1}{2}(1+\sin^2\theta\sin^2\phi)$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{1}{2}(1+a_n^2)$ | $-\frac{1}{2}a_n$ |

격자 잎을 없애려면, 배열요소 사이 거리 $\frac{d}{\lambda}$ 는 격자 잎 조건에서 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{\lambda} \le \frac{1}{1+\sin\theta}. \tag{6}$$

$$\theta_m = \begin{cases} \theta_h - \theta_t & \text{if } \theta_t < \frac{\theta_h}{2}, \\ \theta_t & \text{if } \theta_t \ge \frac{\theta_h}{2}. \end{cases} \tag{7}$$

최대 허용 행 사이 거리를 $\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{1+\sin\theta_m}$ 으로 정하고, 안테나가 $\theta_t$만큼 기울었다면, 수평선에서 방향성은 다음과 같다.

$$D^h(\theta_t,\phi_o) = \frac{|f(\theta_t,\phi_o)g(\theta_t)|^2}{\frac{a_0}{N} + \frac{(1+\sin\theta_m)}{\pi N^2}\sum_{n=1}^{N-1}\frac{(N-n)}{n}\left(a_1\sin\left(\frac{2\pi n}{1+\sin\theta_m}\right) + a_2\cos\left(\frac{2\pi n}{1+\sin\theta_m}\right)\right)\cos\left(\frac{2\pi n\cos\theta_t}{1+\sin\theta_m}\right)} \tag{8}$$

그러면 최적 기움각은 다음과 같다.

$$\theta_{t,\ optimum} = \left\{\theta_t;\ \max_{0\le\theta_h\le 90} D^h(\theta_t,\phi_o)\right\} \tag{9}$$

몇 가지 균일 선형 배열안테나에서 이 결과들을 그림 2-5에 나타냈다. $\theta_h$가 주어졌을 때, 기움각을 크게

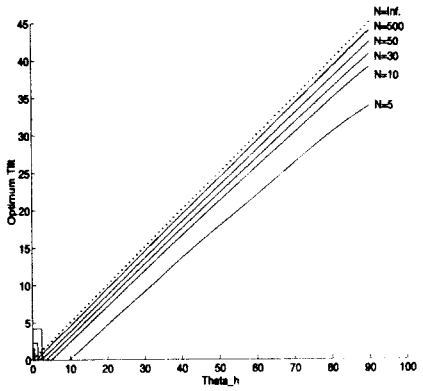


그림 4. 등방성 요소

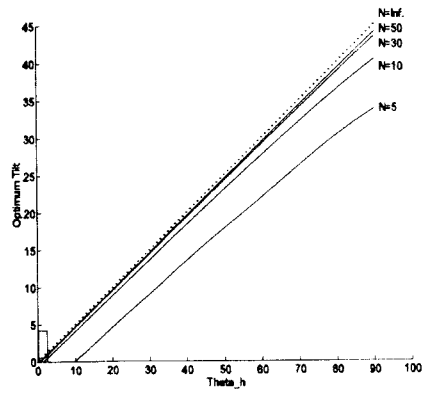


그림 3. 동일선상 쌍극자

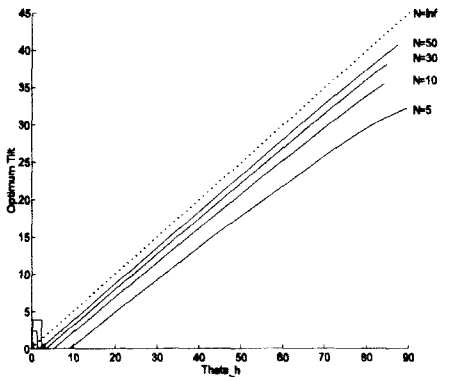


그림 4. 넓은 면 십자

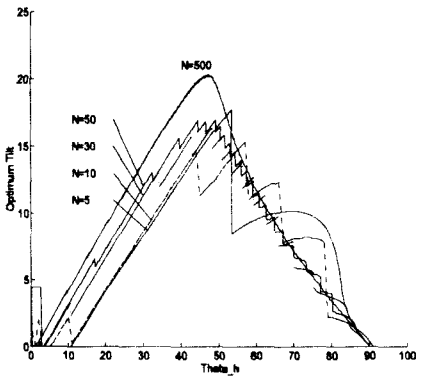


그림 5. 병렬 쌍극자

하면 수평선 방향성이 크게 늘어나거나 (그림 2, 3, 4) 얻을 수 있는 수평선 방향성이 줄어 든다는 걸 알 수 있다 (그림 5). 병렬 쌍극자를 빼고는, $N$이 늘어날수록 최적 기울각이 $\theta_h$와 관계없이 $\frac{\theta_h}{2}$에 가까워 진다는 것을 알 수 있다. 이것은 한계값 ( $\theta_l = \frac{\theta_h}{2}$ ) 이상 기울각을 늘이면 수평선 방향성이 급속히 나빠지기 때문이다.

### 2.2 비균일여기 같은 거리 선형 배열 안테나

비균일여기 배열안테나는 선형 배열안테나의 끝 근처에서 작아지는 진폭 감소기와 관련이 있다. 전류 진폭이 배열안테나 끝에서 더 작아짐에 따라, 부가잎은 작아지고 대역폭은 늘어난다. 먼저, $z$축에서 배열요소 위치를 $z_n$, 배열요소 전류 진폭을 $A_n$으로 쓰자. 배열안테나 위상이 거리를 따라 선형적으로 바뀌면, $\alpha = -\beta z_n \cos\theta_0$이다. 여기서, $\theta_0$는 안테나 방사가 가장 커지는 각도이다. 그러면 배열 인자는 다음과 같고,

$$f(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_n e^{j\alpha_n} e^{j\beta z_n \cos\theta}}{\sum_{n=0}^{N-1} A_n} \tag{10}$$

근사빔 입체각은 다음과 같다.

$$\Omega_A = 2\pi \int^{\pi_0} |f(\theta)|^2 \sin\theta d\theta \tag{11}$$

$$= \frac{2\pi}{(\sum_{k=0}^{N-1} A_k)^2} \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{k=0}^{N-1} A_n A_p e^{j(\alpha_n - \alpha_p)} \int^{\pi_0} e^{j\beta(z_n - z_p)\cos\theta} \sin\theta d\theta$$

식 (11)에서 적분을 계산하고, 그 결과를 $D = \frac{4\pi}{\Omega_A}$에 대입하면 다음을 얻는다.

$$D(\theta) = \frac{(\sum_{k=0}^{N-1} A_k)^2}{\sum_{p=0}^{N-1} A_n A_p e^{j(\alpha_n - \alpha_p)} \frac{\sin[\beta(z_n - z_p)]}{\beta(z_n - z_p)}} \tag{12}$$

여기서, $\alpha_n = -\beta z_n \cos\theta_o$이고, 전류 진폭은 $A_n$이다. 같은 거리 배열 안테나에서는 (12)가 다음과 같다.

$$D(\theta) = \frac{(\sum_{k=0}^{N-1} A_k)^2}{\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{p=0}^{N-1} A_n A_p e^{j(\alpha_n - \alpha_p)} \frac{\sin[(n-p)\beta d]}{(n-p)\beta d}}. \tag{13}$$

최대허용 행사이 거리를 정하고, 안테나가 $\theta_t$만큼 기울어졌다면, 수평선에서 방향성은 다음과 같다.

$$D(\theta_t)_{horizon} = \frac{(\sum_{k=0}^{N-1} A_k)^2}{(1+\sin\theta_m)\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{p=0}^{N-1} \frac{A_n A_p}{2\pi(n-p)} e^{-j\frac{2\pi(n-p)\cos\theta_t}{1+\sin\theta_m}} \sin[2\frac{\pi(n-p)}{1+\sin\theta_m}]} \tag{14}$$

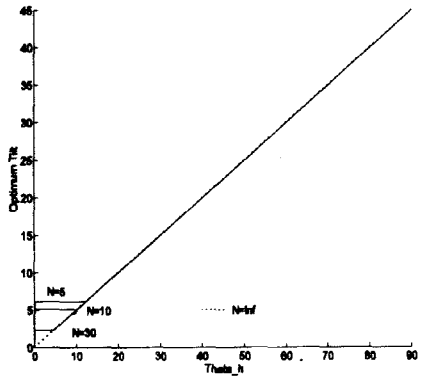


그림 6. 삼각 전류분포

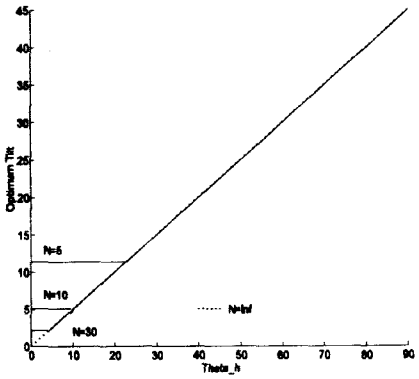


그림 7. 돌프-체비셰프 전류분포 (SLL=-20dB)

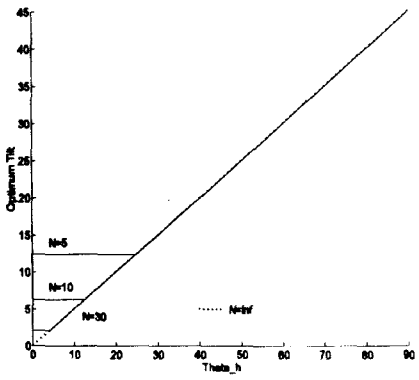


그림 8. 돌프-체비셰프 전류분포 (SLL=-30dB)

그러면 최적기움각은 다음과 같다.

$$\theta_{t,\ optimum} = \{\theta_t : \max_{0 \le \theta_h \le 90} D(\theta_t)_{horizon}\} \qquad (15)$$

삼각분포, 돌프-체비셰프 ( $SLL = -20dB$), 돌프-체비셰프 ( $SLL = -30dB$) 같은 몇가지 전류 분포에 대한 결과들을 그림 6-8에 나타냈다. 여기서, $SLL$은 옆잎 (side lobe) 크기이다. 이들 배열 보기로부터, 최적 기움각은 크기 $N$과 관계없이 정확히 $\frac{\theta_h}{2}$ 이라는 것을 쉽게 알 수 있다.

## IV. 맺음말

이 논문에서는, 몇가지 균일, 비균일 배열안테나에서 최적 기움각을 얻었다. 얻은 결과는 45 °과 70 ° 사이의 고도각 빔 같이 실제로 관심있는 범위에서, 수평선에서 최대 방향성을 갖는 최적 기움각이 20 ° 와 35 °근처에 있다는 것을 보여준다. 균일 배열 안테나일 때, $N$이 충분히 크면 최적 기움각은 거의 $\frac{\theta_h}{2}$ 에 가까워 지고, 비균일 배열안테나일 때는 $N$과 관계없이 거의 $\frac{\theta_h}{2}$ 이 된다. 이들 최적 기움각은 레이다 설계 초기에 레이다 매개변수를 결정하는데 큰 도움이 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Tai, C. T., "The optimum directivity of uniformly spaced broadside arrays of dipoles," *IEEE Trans. Antennas, Propagation*, vol. AP-12, pp. 447-454, July 1964.
2. Bach, H., "Directivity of basic linear arrays," *IEEE Trans. Antennas, Propagation*, vol. AP-18, pp. 107-110, January 1970.
3. Bach, H., "Directivity diagrams for uniform linear arrays," *Microwave Journal*, vol. 15, pp. 41-44, December 1972.
4. McDonald, N. A., "Approximate relationship between directivity and beamwidth for broadside collinear arrays," *IEEE Trans. Antennas, Propagation*,

vol. AP-26, pp. 240-341, March 1978.
5. Solbach, K., "Optimum tilt for elevation-scanned phase array," *IEEE Antennas, Propagation Magazine*, vol. 32, pp. 39-41, April 1990.
6. Collin, R.E. and Zucker, F.J. ed., *Antenna Theory-Part I*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1969.

송 익 호(Iickho Song) 정회원
1960년 2월 20일생
1978년 3월～1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 공학사 (준최우등)
1982년 3월～1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 공학석사
1984년 1월～1985년 8월: 펜실베니아대학교 전기공학과 공학석사
1985년 9월～1987년 5월: 펜실베니아대학교 전기공학과 공학박사
1987년 3월～1988년 2월: 벨 통신연구소 연구원
1988년 3월～1991년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 조교수
1991년 9월～현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수
1995년 1월～현재: 한국통신학회 논문지 편집위원
1996년 1월～현재: 한국음향학회 영문논문지 편집위원
1991년 11월, 1996년 11월: 한국통신학회 학술상 받음
1993년 11월: 한국음향학회 우수연구상 받음
대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 종신회원; IEE 회원; IEEE 선임회원
※주관심분야 : 통계학적 신호처리, 신호검파, 스펙트럼 추정, 이동통신

이 민 준(Min Joon Lee) 정회원
1963년 8월 15일생
1981년 3월～1985년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 3월～1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 3월～현재: 국방과학연구소 연구원
1995년 3월～현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사과정)
※주관심분야 : 레이다 신호처리

박 정 순(Jeongsoon Park) 정회원
1970년 11월 17일생
1992년 3월～1996년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
1996년 3월～현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사과정)
※주관심분야 : 이동통신, 통계학적 신호처리

이 주 식(Jooshik Lee) 정회원
1974년 7월 30일생
1992년 3월～1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1996년 3월～1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년 3월～현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사과정)
※주관심분야 : 배열신호처리, 신경회로망, 이동통신

김 석 찬(Suk Chan Kim) 정회원
1971년 4월 5일생
1989년 3월～1993년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 3월～1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1995년 3월～현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사과정)
※주관심분야 : 이동통신, 신호처리