

회전 위상-주파수 주사 레이더 시스템의 빔 명령을 위한 주파수 결정

正會員 이 민 준*, 박 정 순*, 송 익 호**, 김 광 순*, 장 태 주***

Frequency Determination for Beam Command in Rotating Phase and Frequency Scan Radar systems

Min Joon Lee*, Jeong Soon Park*, Ick Ho Song**, Kwang Soon Kim*,
Tae Joo Chang*** *Regular Members*

요 약

빔을 방위각 방향으로 조종하는데 주파수 주사를, 고도각방향으로 조종하는데 위상변위기를 쓰는 회전 레이더 시스템의 위상과 주파수 명령을 지상좌표계의 각으로 얻는다. 안테나로는 X대역 같은 높은 주파수 대역에서 쓸 수 있고 만들기 쉬운 홈 도파관 안테나를 생각한다. 비선형 특성을 나타내는 주파수를 고도각의 함수로 나타내며, 유도한 주파수 식을 계산시간을 줄일 수 있도록 근사화하여 실시간 다기능 레이더 시스템에 쓸 수 있도록 한다. 방위각 주사 범위가 $\pm 10^\circ$ 를 넘지 않으면 근사 주파수 명령은 실제값과 잘 일치한다는 것을 보인다.

ABSTRACT

The phase and frequency commands of a rotating radar system that utilizes frequency scanning to steer the beam in the azimuth direction and phase shifters in the elevation direction are derived in terms of the angles of the ground based coordinate system. The antenna type considered is slotted arrays that are easy to construct at such high microwave frequency as the X band. The frequency that has non-linear characteristics as a function of the elevation angle is plotted and the derived frequency equation is approximated to be a simple form to reduce the calculation time for real time multi-function radar systems. It is shown that the approximated frequency command is in good agreement with the exact one if the range of azimuth scanning is limited by $\pm 10^\circ$.

* 한국과학기술원 전기 및 전자공학과

** IEEE 선임회원

*** 국방과학연구소 연구원

論文番號: 97422-1124

接受日字: 1997年 11月 24日

I. 회전 전자주사식 레이더시스템에서 좌표계 변환

회전 전자주사식 레이더 시스템은 (Rotating Electronically Scanned Radar System) 방위각 방향으로 회전하면서 고도각방향과 방위각방향을 탐지할 수 있는 위상 배열안테나를 가지고 있다 [1]. 이 시스템은 고정 회전 전자주사식 레이더 시스템의 다기능 운용 기술을 쓴다. 넓은 뜻에서, 빔을 방위각방향으로 조종할 때 주파수 주사를, 고도각방향으로 조종할 때 위상변위기를 쓰는 회전 위상주파수 주사 레이더는 (Rotating Phase and Frequency Scan Radar) 일종의 회전 전자주사식 레이더 시스템이지만, 회전 전자주사식 레이더 시스템과 일반적인 주사탐색 (Track While Scan) 레이더보다 가격대 성능비가 좋다 [2].

이 논문에서는, 회전 위상-주파수 주사 레이더에서 빔을 바라는 위치에 보내는데 필요한 주파수와 위상변이값 같은 빔 조종 명령을 얻는다. 일반적으로, 배열안테나 연직선이 지상좌표계 수직선으로부터 경사각 θ_a 만큼 벗어나기 때문에, 안테나좌표계는 지상좌표계와 일치하지 않는다. 따라서, 알맞게 좌표계를 바꾸어 빔 조종 명령을 얻을 필요가 있다.

그런데, 유도한 주파수식은 너무 복잡해서 동작 주파수를 얻는데 많은 시간이 걸린다. 실시간 다중기능 삼차원 레이더 시스템에서, 빔 명령은 수 밀리초마다 정해지기 때문에, 빔명령 계산시간을 줄일 필요가 있다. 따라서, 이 논문에서는 주파수 식 미분을 유도한 다음, 간단한 꼴로 근사화하여 빔명령을 계산시간을 줄이는 새로운 방법을 제시하였다. 주파수 대역이 중심주파수에서 5% 안에 들면 근사곡선은 정확한 풀이와 거의 같다는 것을 보일 수 있다.

이 논문은 다음과 같이 이루어져 있다. 2절에서는 좌표계의 변환을 통해서 회전전자주사식 레이더 시스템에서의 빔 조종 명령을 얻었으며, 3절에서 이렇게 얻어진 빔조종명령을 회전 위상-주파수 주사 레이더 시스템에 적용하여 주파수 명령을 유도하였으며 근사화 하는것을 보였다.

II. 회전전자주사식 레이더 시스템에서 좌표계 변환

배열안테나의 빔 주사방향은 배열안테나에 고정된

구좌표계에서 나타낼 수 있다 (그림 1). 배열안테나의 y축이 위를 향하고, z축이 지평면을 향하도록 한다면 이 좌표계는 지상좌표계로 쓸 수 있으며, 빔 위치는 지상좌표계 각 θ 와 ϕ 로 나타낼 수 있다. 그러나, 이것이 일반적인 것은 아니다. 일반적으로, 배열안테나 연직선은 수직축으로부터 θ_a 만큼 기울어지며, 배열안테나 평면은 지평선과 평행이 아니다 [3]. 사실, 배열안테나가 배나 비행기에 놓여 있을 때는, y축과 z축 어느 것도 지평선에 있지 않게 된다.

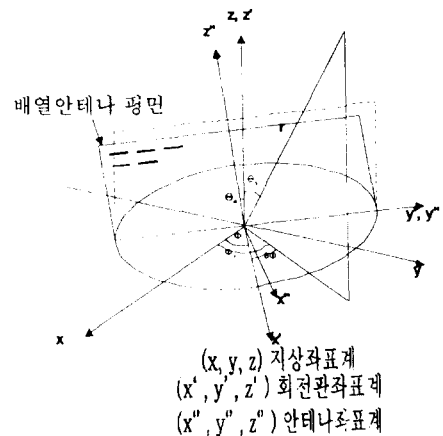


그림 1. 기울어진 평면배열안테나의 좌표계
Fig. 1 The coordinate system of a tilted planar array

배열안테나가 방위각 방향으로 회전하기 때문에 다른 좌표변환도 필요하며, 여기서 얻은 좌표계를 회전좌표계라고 부른다. 이들 좌표계 사이의 관계는 그림 1에서 나타나 있다.

지상좌표계와 회전좌표계에서 좌표를 각각 r 과 r' 라 쓰면 이들은 다음과 같다.

$$r = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, r' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}. \quad (1)$$

그러면, r 과 r' 는 직교 변환으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$r' = Rr, \quad (2)$$

$$r = R^T r', \quad (3)$$

여기서, 회전 행렬 R 은 다음과 같으며,

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

R^T 는 R 의 전치행렬이다. 안테나 좌표계에서 좌표를 r' 로 쓰면, 이는 다음과 같다.

$$r'' = \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix}. \quad (5)$$

그러면, r' 과 r'' 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$r'' = T r', \quad (6)$$

$$r' = T^T r'', \quad (7)$$

여기서, 경사 행렬 T 는 다음과 같다.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & 0 & \sin \theta_a \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_a & 0 & \cos \theta_a \end{bmatrix}. \quad (8)$$

그러면, 지상좌표계와 안테나좌표계사이의 관계는 다음과 같다.

$$r'' = T R r, \quad (9)$$

$$r = R^T T^T r'' \quad (10)$$

지상좌표계에서 보내려고 하는 빔 방향 θ_r 과 ϕ_r 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x = r \sin \theta_r \cos \phi_r, \quad (11)$$

$$y = r \sin \theta_r \sin \phi_r, \quad (12)$$

$$z = r \cos \theta_r, \quad (13)$$

여기서, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 이다. 그러면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$u = \sin \theta_r \cos \phi_r \cos \theta_a \cos \phi + \sin \theta_r \sin \phi_r \cos \theta_a \sin \phi + \sin \theta_a \cos \theta_r, \quad (14)$$

$$v = -\sin \phi \sin \theta_r \cos \phi_r + \cos \phi \sin \theta_r \sin \phi_r, \quad (15)$$

$$w = -\cos \phi \sin \theta_a \sin \theta_r \cos \phi_r - \sin \theta_a \sin \phi \sin \theta_r \sin \phi_r + \cos \theta_a \cos \theta_r, \quad (16)$$

여기서, $u = \frac{x''}{r''}$, $v = \frac{y''}{r''}$, $w = \frac{z''}{r''}$. 지상좌표계에서 이차원 배열 조종을 하는데 필요한 위상변이차는 다음과 같다.

$$\Delta \phi_y = \beta d_y v, \quad (17)$$

$$\Delta \phi_z = \beta d_z w, \quad (18)$$

여기서, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ 이다. 곧, $M \times N$ 배열안테나일 때, 회전 전자주사식 레이더 시스템에서 위상조종 명령은 다음과 같다.

$$\phi_{mn} = m \Delta \phi_y + n \Delta \phi_z \quad (\text{Modulo } 2\pi) \quad (19)$$

여기서, $m = 1, 2, \dots, M$ 이고, $n = 1, 2, \dots, N$ 이다.

III. 회전 위상-주파수 주사 레이더 시스템에서 주파수 빔 명령 유도

그림 2에서 처럼, 빔을 방위각 방향으로 조종하는데 주파수 주사를, 고도각 방향으로 조종하는데 위상 변이기를 쓰는 이차원 위상 배열 안테나를 생각한다. 이때 위상변이가 한 방향에서만 (z 방향) 쓰이기 때문

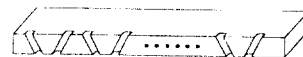
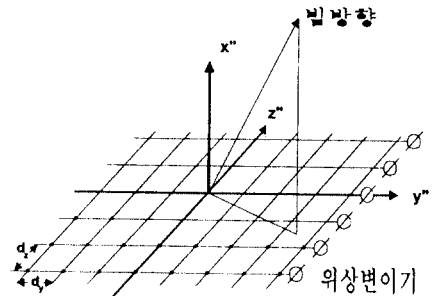


그림 2. 회전 위상-주파수 주사 레이더에서 홈 도파관 배열 안테나

Fig. 2 Waveguide slotted array in the RPFSSR system

에 (18)을 바로 쓸 수 있다. 빔을 방위각 방향으로 조종하려면, 주파수 명령을 다음과 같이 유도한다. 먼저, (15)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$v = -\sin \phi \sin \theta_r \cos \phi_r + \cos \phi \sin \theta_r \sin \phi_r, \quad (20)$$

$$= \sin \theta_r \sin(\phi_r - \phi).$$

그러면,

$$\delta \phi = \sin^{-1} \left(\frac{v}{\sin \theta_r} \right). \quad (21)$$

여기서, $\delta \phi = \phi_r - \phi$ 이고, 그림 1에 보였듯이 $\delta \phi$ 는 지상 좌표계에서 빔편향각이다. 위상 배열안테나에는 많은 종류가 있지만, 쌍극자, 개구 도파관, 홈 도파관을 자주 쓴다 [4]. 높은 주파수 대역에서는 쌍극자 배열안테나 보다 홈 배열안테나를 만들기가 더 쉽다. 이 논문에서는 그림 2에 보인 것처럼 홈 도파관으로 만든 평면 배열안테나를 생각한다. 그러면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\delta \phi = \sin^{-1} \left(\frac{s}{d_y \sin \theta_r} \left(\frac{\lambda}{\lambda_g} - \frac{\lambda}{\lambda_{g_0}} \right) \right). \quad (22)$$

여기서, s 와 d_y 는 각각 인접한 배열요소를 잇는 선의 길이 및 인접한 배열 요소사이의 거리이고, $\lambda_{g_0} =$

$$\frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}}, \quad \lambda_{g_0} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}}, \quad \lambda_c = 2a$$

이며, a 는 도파관 넓은면의 길이이다.

식 (22)를 정리해서 다음을 얻을 수 있다.

$$\left\{ \frac{1}{\lambda_0^2} \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{2a^2} \right) + \frac{1}{\lambda_c^2} \right\} \lambda^2 + \left\{ \frac{2d_y \sin \theta_r \sin \delta \phi}{s \lambda_0} \sqrt{1 - \frac{\lambda_0^2}{2a^2}} \right\} \lambda + \frac{d_y^2 \sin^2 \theta_r \sin^2 \delta \phi}{s^2} - 1 = 0. \quad (23)$$

따라서 주파수식은 다음과 같이 된다.

$$f = \frac{c s d_y \sin \delta \phi \sin \theta_r \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} + c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \frac{d_y^2 \sin^2 \delta \phi \sin^2 \theta_r - 1}{s^2 \lambda_0^2 \lambda_c^2}}{\lambda_0 \{ s^2 - d_y^2 \sin^2 \delta \phi \sin^2 \theta_r \}}. \quad (24)$$

여기서, c 는 빛의 속도이다. 그림 3과 4에, $\frac{s}{d_y}$ 가 1과 5일 때 편향각을 주파수의 함수로 나타냈다. 고도각이 낮을수록, 곡선은 $\theta = 90^\circ$ 일 때의 곡선에서 더 많이 벗어난다. 근사적으로 편향각은 고도각이 크면 주파수의 선형함수로 생각할 수 있고, 고도각이 작으면 비선형 주파수 특성이 나타난다. 그림 4에 보인 것처럼, $\frac{s}{d_y}$ 가 5이면, 고도각에 대한 편향각의 영향은 커지며, 주파수 함수를 선형함수로 생각할 수 있는 영역이 줄어들게 된다.

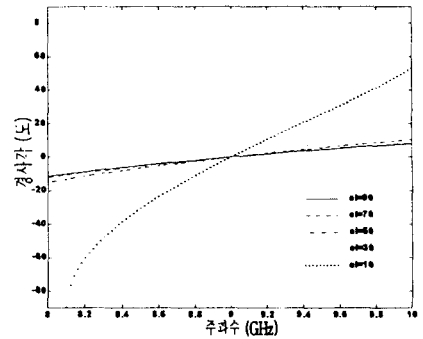


그림 3. $\frac{s}{d_y} = 1$, X대역 홈 도파관에서 TE_{10} 모드, 중심주파수 $f_0 = 9.0GHz$ 일때 편향각

Fig. 3 The squint angle versus the frequency when the wrap-up factor $\frac{s}{d_y} = 1$ for TE_{10} mode in the X-band slotted waveguide with center frequency $f_0 = 9.0GHz$

실시간 다기능 삼차원 레이더 시스템에서 빔은 보통 수 밀리 초마다 운용된다. 이 짧은 시간 동안 실시간 제어 시스템은 위상변이 명령을 계산하고, 주파수를 선택하며, 부시스템과 통신을 하는 것과 같은, 여러 일을 한다. 따라서 식 (24)를 계산해서 동작 주파수를 얻으려면 시간이 충분치 않으며, 더 간단한 꼴로 근사화해야 한다.

식 (22)로부터, 주파수에 대한 편향각 미분은 다음과 같다.

$$\frac{d\delta \phi}{df} = \frac{s}{f \cos \delta \phi d_y \sin \theta_r} \left[\frac{\lambda_g}{\lambda} - \sin \delta \phi \right]. \quad (25)$$

$\delta \phi = 0$ 과 $f = f_0$ 에서 기울기는

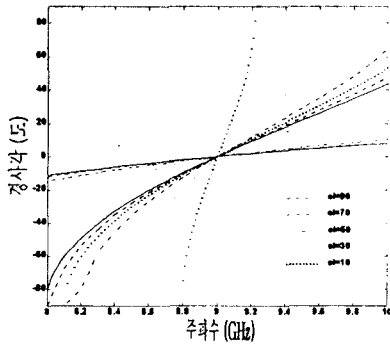


그림 4. $\frac{s}{d_y} = 5$, X대역 홈 도파관에서 TE_{10} 모드, 중심주파수 $f_0 = 9.0GHz$ 일때 편향각

Fig. 4 The squint angle versus the frequency when the wrap-up factor $\frac{s}{d_y} = 5$ for TE_{10} mode in the X-band slotted waveguide with center frequency $f_0 = 9.0GHz$

$$\left. \frac{d\delta\phi}{df} \right|_{\delta\phi=0}^{f=f_0} = \frac{s}{fd_y \sin\theta_r} \frac{\lambda_g}{\lambda} \quad (26)$$

이다. 이제, 주파수식은 다음과 같이 된다.

$$f \approx f_0 + \frac{\delta\phi d_y \sin\theta_r c}{s \cdot \lambda_g} \quad (27)$$

정확한 풀이 (실선) (24)와 근사풀이 (별선) (27)을, $\frac{s}{d_y}$ 가 1과 5일 때, 각각 그림 5와 6에 나타냈다. 그림 6에 나타났듯이 고도각이 40° 이상일 때 근사값은 정확한 값에 가까와 진다는 것을 알 수 있다. 주파수 사용범위가 매우 한정되어 있고 방위각 주사범위를 넓히려면 안테나를 설계할 때 인접한 배열요소를 잇는 선의 길이가 늘어나도록 (곧, $\frac{s}{d_y}$ 값이 크도록) 안테나 급전기를 설계해야 한다. 일반적으로 대공 레이다에서 관심있는 고도각 범위는 $0^\circ \sim 50^\circ$ 이다 (이 논문에서는, 고도각 표기 기준점이 지면이 아닌 z축이다. 따라서 고도각 범위 $0^\circ \sim 50^\circ$ 는 그림 5과 6에서 $40^\circ \sim 90^\circ$ 를 뜻한다). 또한 위상-주파수 레이다 시스템에서는 보통 주파수 사용범위가 중심주파수를 기준으로 5% 이내이다. 고도각의 범위를 $0^\circ \sim 50^\circ$ 로 제한하고 주파수 사용범위가 5% 인 때를 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저, $\frac{s}{d_y}$ 가 1이면, 최대 및 최소 편향각은 각각 $+3.463^\circ$ 및 -3.778° 이며 근사풀이와의 최대 오차는 0.15° 이다. 또한 $\frac{s}{d_y}$ 가 5이면, 최대 및 최소 편향각은 각각 $+17.570^\circ$ 및 -19.236° 이며 근사풀이와의 최대오차는 1.18° 이다. 이 때, 편향각이 $\pm 10^\circ$

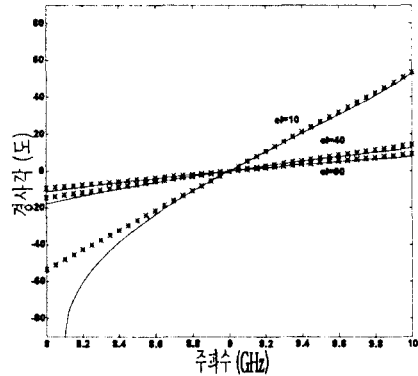


그림 5. $\frac{s}{d_y} = 1$, X대역 홈 도파관에서 TE_{10} 모드, 중심주파수 $f_0 = 9.0GHz$ 일 때 정확한 풀이와 근사풀이

Fig. 5 A comparison between the exact and approximate solutions when the wrap-up factor $\frac{s}{d_y} = 1$ for TE_{10} mode in the X-band slotted waveguide with center frequency $f_0 = 9.0GHz$

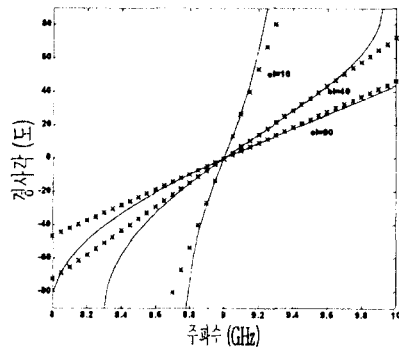


그림 6. $\frac{s}{d_y} = 5$, X대역 홈 도파관에서 TE_{10} 모드, 중심주파수 $f_0 = 9.0GHz$ 일 때 정확한 풀이와 근사풀이

Fig. 6 A comparison between the exact and approximate solutions when the wrap-up factor $\frac{s}{d_y} = 5$ TE_{10} for mode in the X-band slotted waveguide with frequency $f_0 = 9.0GHz$

각은 각각 $+3.463^\circ$ 및 -3.778° 이며 근사풀이와의 최대 오차는 0.15° 이다. 또한 $\frac{s}{d_y}$ 가 5이면, 최대 및 최소 편향각은 각각 $+17.570^\circ$ 및 -19.236° 이며 근사풀이와의 최대오차는 1.18° 이다. 이 때, 편향각이 $\pm 10^\circ$

를 넘지 않으면 근사폴이와의 최대오차는 0.11° 이다. 그 밖의 $\frac{s}{d_y}$ 값에 대해서도 계산해 본 결과 편향각이 ± 20 를 넘지 않으면 근사폴이와의 최대오차는 1.2° 보다 작고, $\pm 10^\circ$ 를 넘지 않으면 0.2° 보다 크지 않음을 알 수 있었다. 일반적으로 레이더에서의 빔폭은 $1^\circ \sim 2^\circ$ 의 값을 갖게 되며 이것이 레이더의 분해능이 된다. 따라서, 방위각 주사 범위를 $\pm 10^\circ$ 로 제한하면, 근사식으로 얻은 식의 오차가 이 분해능을 넘지 않으므로 실용화가 가능함을 알 수 있다. 마지막으로 식 (24)와 식 (27)의 수행시간을 펜티엄200 컴퓨터로 견주어 보았다. 백만번씩 반복하여 얻은 평균값은 각각 0.0823 msec 와 0.0214 msec 이었다.

IV. 결 론

이 논문에서는, 지상좌표계에서 홈 도파관을 쓰는 회전 위상-주파수 주사 레이더의 위상변이 명령과 동작주파수 같은 빔조종 명령을 얻었다. 유도한 회전 위상-주파수 주사 레이더의 주파수 명령은 비선형 특성을 보이고, 이런 성질은 고도각이 낮을 수록 더함을 보였다. 그림 5와 6에 보인 것처럼, 탐지 고도각 범위가 $0^\circ \sim 50^\circ$ 이고 주파수 사용범위가 중심주파수를 기준으로 했을때 5% 보다 작을때, 방위각 주사범위를 $\pm 10^\circ$ 로 제한하면 주파수식 미분에서 얻은 근사주파수 명령을 정확한 식 대신 쓸 수 있다. 일반적으로, 이런 꼴의 레이더는 표적을 다시 확인할 수 있도록 바로 전의 위치에 탐색 빔을 보내는 뒤 (back) 주사능력이 있는데, 보통 방위각 주사범위는 $5^\circ \sim 10^\circ$ 이다. 이 논문에서 제안한 방법을 이와같은 레이더 시스템에 응용할 경우 주사를 하기에 충분한 오차범위를 가지며, 수 밀리초마다 계산되어야 하는 빔명령 계산시간을 75% 정도 줄여 주므로 실제로 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. D. A. Ethington, "Multifunction rotating electronically scanned radar (RESR) for air surveillance," *IEEE Proc.*, vol. 73, pp. 340-354, Feb. 1985.
2. W. Mike, "A new generation air defense radar," *Microwave J.*, vol 27, pp. 162-164, Feb. 1984.

3. W. H. Von Aulock, "Properties of phase array," *Proc. IRE*, vol. 48, pp. 1715-1727, Oct. 1960.
4. G. H. Knittel, "Design of radiating elements for large planar arrays: accomplishments and remaining challenges," *Microwave J.*, vol. 15, pp. 27-34, Sep. 1972.

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

박 정 순(Jeong Soon Park) 정회원
 한국통신학회논문지 제 23권 4호 참조

송 익 호(Ick Ho Song) 정회원
 한국통신학회논문지 제 23권 4호 참조
 e-mail: isong@sejong.kist.ac.kr

김 광 순(Kwang Soon Kim) 정회원
 한국통신학회논문지 제 23권 4호 참조

장 태 주(Tae Joo Chang) 정회원
 1960년 4월 20일생
 1978년 3월~1982년 2월:울산대학교 전자공학과 공학사
 1988년 3월~1990년 2월:한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 1994년 3월~1998년 2월:한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
 1982년 3월~현재:국방과학연구소 연구원