

오프셋 반사경 안테나의 빔 스캔 특성 해석

Analysis of Beam Scan Characteristics of Offset Reflector Antennas

최 학 근

Hak-Keun Choi

요 약

오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기가 초점에 위치 하지 않을 경우 개구면 상의 전계분포에 위상왜곡이 생기게 되어 최대 빔 방향이 바뀌고 이득이 감소하며 사이드로브가 증가한다. 이런 스캔특성을 고찰하기 위하여 1차복사기가 초점에서 벗어나 있는 오프셋 반사경 안테나의 복사패턴을 짧은 시간에 정확하게 계산할 수 있도록 Zernike 다항식을 이용하여 해석하고 이로부터 반사경의 구조에 따른 스캔로스에 관한 데이터를 나타냈다. 또한 오프셋 반사경 안테나에서 구조에 따른 BDF를 계산할 수 있도록 이론을 전개하고 계산 결과를 제시하여 빔 편향 특성을 알아볼 수 있게 하였으며 간단한 BDF 근사식도 제시하였다.

Abstract

When the feed of an offset reflector antenna is displaced from the focal point, the phase distortion results in the aperture field distribution, which in turn gives rise to a deviation of maximum beam, a decrease in gain, and an increase in sidelobes. In order to study these scan characteristics, an offset reflector antenna with the defocused feed is analyzed by a series expansion method using the Zernike polynomials, which can be used to calculate radiation pattern fast and exactly. And from the analyzed results, scan loss data in terms of reflector geometry are presented. And also, the BDF (beam deviation factor) expression is derived with offset reflector configuration analytically, and calculated results and simple formula of BDF are presented for determining beam deviation characteristics.

I. 서 론

오프셋 반사경 안테나는 파라볼라 반사경 안테나 및 카세그레인 안테나 등에서 발생하는 1차복사기 또는 부반사경과 이를 지지하는 구조물에 의한 블로킹 현상이 없기 때문에 안테나 이득 및 사이드로브 특성이 우수하다. 뿐만 아니라 초점 근처

에 여러 개의 1차복사기를 배열하여 요구되는 빔 패턴을 성형하거나 멀티 빔을 형성할 수 있어 오늘날 위성통신용 안테나로 널리 쓰이고 있으며 그 성능 또한 지속적으로 연구되고 있다^{[1]-[3]}.

오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기가 반사경의 초점으로부터 벗어나 있으면 복사패턴이 왜곡되어 최대 빔이 편향되고 안테나 이득이 감소하며 사이드로브가 증가한다. 따라서 초점 근처에 1차복

단국대학교 전자공학과(Dept. of Electronics, Engineering Dankook University)

· 논문 번호 : 981017-103

· 수정완료일자 : 1999년 2월 22일.

사기를 배열하여 성형 빔 또는 멀티 빔을 형성하기 위해서는 1차복사기의 위치와 반사경 구조에 따른 최대 빔 방향과 이득 감소 정도를 알 필요가 있다.

1차복사기가 초점에서 벗어난 경우의 빔 편향 특성, 즉 최대 빔 방향과 1차복사기의 변위각(feed displacement angle)으로 주어지는 빔 편향 계수(BDF: Beam Deviation Factor)에 관한 연구로는 회전대칭 파라볼라 반사경에 대하여 Ruze^[4] 및 Lo^[5]의 연구보고가 있고, 오프셋 반사경에 대하여는 최초 P. C. Ingerson^[6]의 연구보고가 있다. P. C. Ingerson은 오프셋 반사경 안테나의 BDF를 1차복사기의 경사각에 대한 명확한 언급 없이 파라볼라 반사경으로 등가화 하여 구한 BDF를 이용하여 나타냈다. 오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기의 최대 빔이 반사경을 거쳐 개구면 중심을 향하도록 1차복사기를 설치하면 반사경의 비대칭구조로 인하여 개구면 중심에서 전계는 최대가 되고 개구면 상하 부분에서는 대칭이 되지 않는다. 또한 1차복사기를 반사경 개구각을 이등분하는 방향으로 설치하면 개구면 중심의 전계는 최대가 되지 않으나 개구면 상하 부분에서는 대칭이 된다. 따라서 오프셋 반사경 안테나의 복사특성은 반사경 초점에 1차복사기를 설치할 때 경사각에 따라서 다소 달라지고 BDF도 달라진다. 이런 현상은 반사경의 초점 거리와 개구면 직경비 F/D 가 작을수록 더욱더 심하게 나타난다. 일반적으로 1차복사기의 경사각은 1차복사기의 최대 빔이 개구면 중심을 향하도록 하는 것이 안테나 전체 특성에 유리하다는 것이 알려져 있다.^[7]

본 논문에서는 오프셋 반사경 안테나의 빔 스캔 특성을 고찰하기 위하여 오프셋 반사경 안테나의 복사전계를 해석하고 그로부터 BDF와 스캔로스를 구하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 1차복사기가 초점에서 벗어나 있는 오프셋 반사경 안테나의 복사패턴을 짧은 시간에 정확하게 계산하기 위하여 Zernike 다항식^{[8]-[11]}을 이용하여 복사

전계식을 급수로 전개한다. 그리고 1차복사기가 초점에서 벗어나 있을 때 안테나의 이득과 초점에 있을 때의 이득의 비인 스캔로스를 반사경의 구조에 따라 계산하여 스캔로스에 관한 데이터를 제시한다. 또한 1차복사기의 최대 빔이 개구면 중심을 향하는 오프셋 반사경 안테나에서 구조에 따른 BDF를 계산할 수 있도록 이론을 전개하고 계산 결과를 제시하여 빔 편향 특성을 알아볼 수 있게 하며 간단한 BDF 근사식도 제시한다.

II. 빔 편향 특성

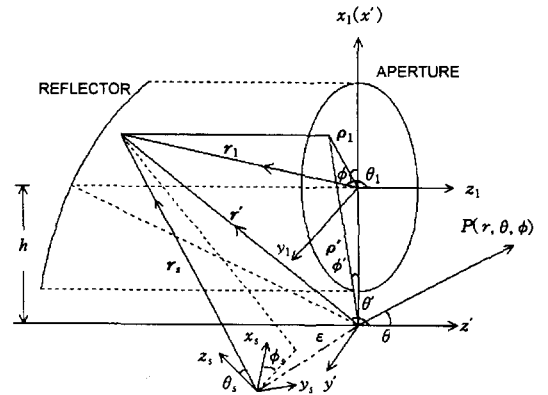


그림 1. 오프셋 반사경 안테나의 좌표계
Fig. 1. Coordinate of offset reflector antennas.

그림 1은 오프셋 반사경 안테나의 좌표계를 나타낸다. 그림 1에서 (r', θ', ϕ') , (ρ', ϕ', z') , (x', y', z') 는 파라볼라 반사경의 좌표계, (r_1, θ_1, ϕ_1) , (ρ_1, ϕ_1, z_1) , (x_1, y_1, z_1) 는 오프셋 파라볼라 반사경의 좌표계, (r_s, θ_s, ϕ_s) 와 (x_s, y_s, z_s) 는 1차복사기의 좌표계를 나타낸다. 오프셋 반사경 안테나에서 초점 근처에 놓여있는 1차복사기에 의하여 반사경 표면에 유기된 표면전류 밀도를 J 라 할 때 복사전계는 다음과 같이 표현할 수 있다^[12].

$$E(r, \theta, \phi) = -jk\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} [\bar{I} - \hat{r}\hat{r}]$$

$$\cdot \mathbf{T}(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$\mathbf{T}(\theta, \phi) = \int_{\Sigma} \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{-jk(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}})} d\Sigma \quad (2)$$

단, $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 는 반사경의 표면전류밀도, k 와 η 는 각각 자유공간의 전파정수와 파동임피던스, Σ 는 반사경의 표면, r_s 는 1차복사기로부터 반사경 표면까지의 거리를 나타낸다. \mathbf{r}' 는 초점으로부터 반사경 표면까지의 위치벡터, $\hat{\mathbf{r}}$ 는 원점에서 관측점 (θ, ϕ) 로 향하는 단위벡터, $\bar{\mathbf{I}}$ 는 단위 다이애드(unit dyad)로 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}' &= r'(\sin \theta' \cos \phi' \hat{\mathbf{x}} + \sin \theta' \sin \phi' \hat{\mathbf{y}} \\ &\quad + \cos \theta' \hat{\mathbf{z}}) \\ \hat{\mathbf{r}} &= \sin \theta \cos \phi \hat{\mathbf{x}} + \sin \theta \sin \phi \hat{\mathbf{y}} + \cos \theta \hat{\mathbf{z}} \\ &= U \hat{\mathbf{x}} + V \hat{\mathbf{y}} + W \hat{\mathbf{z}} \\ \bar{\mathbf{I}} &= \hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{r}} + \hat{\theta}\hat{\theta} + \hat{\phi}\hat{\phi} \end{aligned} \quad (3)$$

그림 1에서 1차복사기의 변위 ε 이 반사경의 초점거리 F 에 대하여 $\varepsilon/F \ll 1$ 인 경우 1차복사기로부터 반사경 표면까지의 거리 r_s 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_s &\cong r' - \hat{\mathbf{r}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \\ &= r' - (\varepsilon_x \sin \theta' \cos \phi' + \varepsilon_y \sin \theta' \sin \phi' \\ &\quad + \varepsilon_z \cos \theta') \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ε_x , ε_y , ε_z 는 1차복사기의 변위 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 의 x , y , z 성분이다. 식 (4)를 오프셋 반사경의 좌표계로 변환하기 위하여 그림 1에서

$$\begin{aligned} r' \sin \theta' \cos \phi' &= \rho_1 \cos \phi_1 + h \\ r' \sin \theta' \sin \phi' &= \rho_1 \sin \phi_1 \\ z' = z_1 &= F \left(-1 + \frac{\rho_1^2}{4F^2} \right) + \frac{h}{2F} \rho_1 \cos \phi_1 \end{aligned}$$

$$+ \frac{h^2}{4F} \quad (5)$$

의 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} r_s &= 2F + z_1 - D(\rho_1, \phi_1) \rho_1 \left(\frac{\varepsilon_x}{F} \cos \phi_1 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\varepsilon_y}{F} \sin \phi_1 \right) - D(\rho_1, \phi_1) \left(\frac{\varepsilon_x}{F} h - 2\varepsilon_z \right) \\ &\quad - \varepsilon_z \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 h 는 오프셋 반사경의 오프셋 높이, F 는 반사경의 초점거리이고

$$D(\rho_1, \phi_1) = \frac{4F^2}{4F^2 + \rho_1^2 + 2h\rho_1 \cos \phi_1 + h^2} \quad (7)$$

이다. 식 (3)과 식 (6)을 이용하여 식 (2)의 적분 기호 내의 위상 항을 오프셋 반사경의 좌표로 변환하면

$$\begin{aligned} r_s - \mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}} &= 2F - \varepsilon_z + \left(\frac{h^2}{4F} - F \right) (1 - \cos \theta) \\ &\quad - h \sin \theta \cos \phi - \rho_1 \sin \theta \cos (\phi - \phi_1) \\ &\quad - D(\rho_1, \phi_1) \rho_1 \left(\frac{\varepsilon_x}{F} \cos \phi_1 + \frac{\varepsilon_y}{F} \sin \phi_1 \right) \\ &\quad - D(\rho_1, \phi_1) \left(\frac{\varepsilon_x}{F} h - 2\varepsilon_z \right) \\ &\quad + \frac{h}{2F} \rho_1 \cos \phi_1 (1 - \cos \theta) + \frac{\rho_1^2}{4F} (1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

된다. 따라서 식 (2)는

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(\theta, \phi) &= \\ &\cdot e^{-jk(2F - \varepsilon_z - h \sin \theta \cos \phi)} e^{-jk \left(\frac{h^2}{4F} - F \right) (1 - \cos \theta)} \int_0^{2\pi} \int_0^a \\ &\cdot \mathbf{J}_e(\rho_1, \phi_1) e^{-jk \frac{\rho_1^2}{4F} (1 - \cos \theta)} e^{-jk \frac{h}{2F} \rho_1 \cos \phi_1 (1 - \cos \theta)} \\ &\cdot e^{jkD \left(\frac{\varepsilon_x}{F} h - 2\varepsilon_z \right)} e^{jkD \rho_1 \left(\frac{\varepsilon_x}{F} \cos \phi_1 + \frac{\varepsilon_y}{F} \sin \phi_1 \right)} \\ &\cdot e^{jk \rho_1 \sin \theta \cos (\phi - \phi_1)} \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \end{aligned} \quad (9)$$

이 된다. 여기서 a 는 개구면의 반경이고, $J_e(\rho_1, \phi_1)$ 는 등가표면전류밀도로

$$J_e(\rho_1, \phi_1) = J J_\Sigma \quad (10-a)$$

$$J_\Sigma = \sqrt{1 + \frac{\rho_1^2}{4F^2} + \frac{h\rho_1}{2F^2} \cos \phi_1 + \frac{h^2}{4F^2}} \quad (10-b)$$

이다. 식 (2)에서 유기전류밀도 J 는 반사경의 미소부분을 평면으로 생각하여 1차복사기로부터 이 평면에 입사하는 자계 $H_s(r_s, \theta_s, \phi_s)$ 를 구하여

$$J = 2 \hat{n} \times H_s \quad (11)$$

로부터 구할 수 있다. 여기서 \hat{n} 은 반사경 표면의 법선 단위벡터로서

$$\hat{n} = \frac{N}{|N|} \quad (12)$$

$$N = -\frac{\rho_1 \cos \phi_1 + h}{2F} \hat{x}_1 - \frac{\rho_1 \sin \phi_1}{2F} \hat{y}_1 + \hat{z}_1 \quad (13)$$

이다. 식 (11)에서 1차복사기의 복사자계 $H_s(r_s, \theta_s, \phi_s)$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$H_s(r_s, \theta_s, \phi_s) = \frac{1}{\eta} \hat{r}_s \times E_s(r_s, \theta_s, \phi_s) \quad (14)$$

$$E_s(r_s, \theta_s, \phi_s) = [E_{s\theta}(\theta_s, \phi_s) \hat{\theta}_s + E_{s\phi}(\theta_s, \phi_s) \hat{\phi}_s] \frac{e^{-jkr_s}}{4\pi r_s} \quad (15)$$

여기서 $E_{s\theta}(\theta_s, \phi_s)$ 와 $E_{s\phi}(\theta_s, \phi_s)$ 는 1차복사기의 패턴함수이고, η 는 자유공간의 파동임피던스이다.

식 (9)에서 적분기호 외부의 지수항은 적분변수

와 무관한 항들로 far-field의 위상을 나타낸다. 적분기호 내의 첫 번째와 두 번째 지수항은 반사경의 구조에 관련된 항이고, 세 번째와 네 번째 지수항은 빔 편향에 관련된 항, 다섯 번째 지수항은 Fourier 핵함수이다. 세 번째 지수항은 그림 2와 같이 1차복사기를 선 OP에 수직한 면 즉,

$$\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} = \frac{h/F}{1 - (h/2F)^2} = \tan \theta_c \quad (16)$$

을 만족하는 위치에 놓을 경우 무시할 수 있다^[3]. 식 (16)에서 θ_c 는 1차복사기가 초점에 위치할 때 1차복사기의 경사각이다. 그러므로 식 (9)에서 네 번째와 다섯 번째 지수항만을 고려하여 적분식의 크기를 다음과 같이 나타낸다.

$$T_1(\theta, \phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^a f(\rho_1, \phi_1) \cdot e^{jk\rho_1[(D(\rho_1, \phi_1)\frac{\epsilon_x}{F} + U)\cos \phi_1 + (D(\rho_1, \phi_1)\frac{\epsilon_z}{F} + V)\sin \phi_1]} \cdot \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \quad (17)$$

식 (17)은 1차복사기의 변위 ϵ 이 매우 작을 때 $V=0$ 인 면 내의 최대 빔 방향 U_m 에서 제곱위상오차가 최소이므로 식 (18)과 같이 표현할 수 있다^[4].

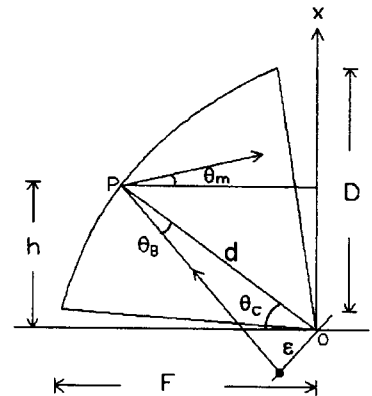


그림 2. 1차복사기의 변위
Fig. 2. Primary feed displacement.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial U} \int_0^{2\pi} \int_0^a f(\rho_1, \phi_1) [k\rho_1(D(\rho_1, \phi_1) \frac{\epsilon_x}{F} + U) \\ \cdot \cos \phi_1]^2 \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \cdot e^{-jkM(\rho_1, \phi_1)(\frac{\epsilon_x}{F}h - 2\epsilon_s)} e^{-jk\frac{\rho_1^2}{4F}(1 - \cos \theta)} \\ \cdot e^{jkB\rho_1 \cos(\theta - \phi_1)} \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \end{aligned}$$

따라서 식 (18)로부터 빔 편향 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} BDF = \frac{\sin \theta_m}{\tan \theta_B} = \\ \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^a f(\rho_1, \phi_1) D(\rho_1, \phi_1) \rho_1^3 \cos^2 \phi_1 \rho_1 d\rho_1 d\phi_1}{\int_0^{2\pi} \int_0^a f(\rho_1, \phi_1) \rho_1^3 \cos^2 \phi_1 \rho_1 d\rho_1 d\phi_1} \end{aligned} \quad (19)$$

단, $\tan \theta_B = \frac{\epsilon}{d} = \frac{\epsilon_x}{h} \tan \theta_c$, θ_B 는 1차복사기의 변위각, θ_m 은 최대 빔 방향이다.

식 (19)에서 1차복사기의 변위가 매우 작은 경우 BDF는 $BDF \approx \theta_m/\theta_B$ 로 생각할 수 있으며 초점에 위치한 1차복사기의 복사패턴을 사용하여 BDF를 구하여도 된다.

III. 복사전계 및 스캔로스

식 (9)의 적분기호 내에 적분변수와 관측점의 변수가 모두 포함되어 있고 1차복사기가 초점으로부터 벗어나 있기 때문에 Fourier 변환 방법으로 계산할 경우 빔이 왜곡되고 계산시간이 많이 걸린다. 그러므로 식 (9)를 모든 관측점에 적용될 수 있는 Fourier 변환 형식으로 변형하여야 한다. 즉 Fourier 변환의 중심을 최대 빔 방향 (θ_m, ϕ_m) 으로 옮기면 복사패턴을 용이하게 계산할 수 있다. 식 (9)의 Fourier 핵함수의 중심을 (θ_m, ϕ_m) 으로 바꾸어 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T(\theta, \phi) = e^{-jk(2F + \epsilon_s)} e^{-jk\left(\frac{h^2}{4F} - F\right)(1 - \cos \theta)} \\ \cdot e^{jkh(\sin \theta \cos \phi + \frac{\epsilon_x}{F})} \int_0^{2\pi} \int_0^a J_e(\rho_1, \phi_1) \\ \cdot e^{-jk\rho_1[(C_U + M(\rho_1, \phi_1)\frac{\epsilon_x}{F})\cos \phi_1 + (C_V + M(\rho_1, \phi_1)\frac{\epsilon_y}{F})\sin \phi_1]} \end{aligned}$$

단,

$$\begin{aligned} M(\rho_1, \phi_1) = 1 - D(\rho_1, \phi_1) \\ = \frac{\rho_1^2 + 2h\rho_1 \cos \phi_1 + h^2}{4F^2 + \rho_1^2 + 2h\rho_1 \cos \phi_1 + h^2} \end{aligned} \quad (21)$$

이고, C_U 와 C_V 는 최대 빔 방향 (θ_m, ϕ_m) 에서 Fourier 핵함수의 B 가 0이 되도록 하기 위한 상수로

$$\begin{aligned} C_U = -\sin \theta_m \cos \phi_m - \frac{\epsilon_x}{F} \\ + \frac{h}{2F}(1 - \cos \theta_m) \end{aligned} \quad (22)$$

$$C_V = -\sin \theta_m \sin \phi_m - \frac{\epsilon_y}{F}$$

B 와 ϕ 는

$$\begin{aligned} B = \\ \sqrt{(C_U + \sin \theta \cos \phi + \frac{\epsilon_x}{F} - \frac{h}{2F}(1 - \cos \theta))^2 \\ + (C_V + \sin \theta \sin \phi + \frac{\epsilon_y}{F})^2} \end{aligned}$$

$$\phi = \tan^{-1}$$

$$\left[\frac{C_V + \sin \theta \sin \phi + \frac{\epsilon_y}{F}}{C_U + \sin \theta \cos \phi + \frac{\epsilon_x}{F} - \frac{h}{2F}(1 - \cos \theta)} \right] \quad (23)$$

이다. 식 (20)의 적분기호 내의 세 번째 항만 관측각에 관계하고 있으므로 이 항이 관측각의 어느 범위에서 일정하게 된다면 이 항의 영향은 무시할 수 있다. 그러므로 최대 빔 방향 근처와 개구면 가장자리에서 크기가 0 인 양 Δ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Delta &= L - L_0 - L_W + L_{W0} \\ &= \frac{1}{4F}(\rho_1^2 - a^2)(\cos \theta_m - \cos \theta) \end{aligned} \quad (24)$$

단,

$$\begin{aligned} L &= \frac{\rho_1^2}{4F}(1 - \cos \theta) \\ L_0 &= \frac{\rho_1^2}{4F}(1 - \cos \theta_m) \\ L_W &= \frac{a^2}{4F}(1 - \cos \theta) \\ L_{W0} &= \frac{a^2}{4F}(1 - \cos \theta_m) \end{aligned} \quad (25)$$

식 (24), (25)를 식 (20)에 대입하면

$$\begin{aligned} T(\theta, \phi) &= e^{-jk(2F + \epsilon_z)} e^{-jk\left(\frac{h^2}{4F} - F\right)(1 - \cos \theta)} \\ &\cdot e^{jkh(\sin \theta \cos \phi + \frac{\epsilon_x}{F})} \cdot e^{-jk(L_W - L_{W0})} \int_0^{2\pi} \int_0^a \\ &\cdot K_e(\rho_1, \phi_1) e^{-jk\Delta} e^{-jkL_0} e^{jkB\rho_1 \cos(\theta - \phi_1)} \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \end{aligned} \quad (26)$$

단,

$$\begin{aligned} K_e(\rho_1, \phi_1) &= J_e(\rho_1, \phi_1) \\ &\cdot e^{-jk\rho_1[(C_V + M(\rho_1, \phi_1)\frac{\epsilon_x}{F})\cos \phi_1 + (C_V + M(\rho_1, \phi_1)\frac{\epsilon_y}{F})\sin \phi_1]} \\ &\cdot e^{-jkM(\rho_1, \phi_1)(\frac{\epsilon_x}{F}h - 2\epsilon_z)} \end{aligned} \quad (27)$$

같이 나타낼 수 있다.

식 (26)에서 관측점의 방향이 최대 빔 방향 (θ_m, ϕ_m) 근처가 되면 $e^{-jk\Delta} \approx 1$ 이 되어 Fourier 변환은 K_e 에 비례하게 된다. 따라서 $e^{-jk\Delta}$ 를 Taylor 급수로 전개하여 정리하면

$$\begin{aligned} T(\theta, \phi) &= e^{-jk(2F + \epsilon_z)} e^{-jk\left(\frac{h^2}{4F} - F\right)(1 - \cos \theta)} \\ &\cdot e^{jkh(\sin \theta \cos \phi + \frac{\epsilon_x}{F})} e^{-jk(L_W - L_{W0})} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{p!} \left(\frac{jk}{4F}\right)^p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\cdot (\cos \theta - \cos \theta_m)^p \int_0^{2\pi} \int_0^a K_e(\rho_1, \phi_1) \\ &\cdot (\rho_1^2 - a^2)^p e^{-jkL_0} e^{jk\rho_1 B \cos(\theta - \phi_1)} \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \end{aligned} \quad (28)$$

이 된다. 식 (28)은 적분식 내에 관측각을 포함하고 있지 않으므로 주어진 반사경에 대하여 일단 적분계산이 되면 모든 관측각에 공통으로 사용될 수 있다.

식 (28)에서 적분 부분을 Zernike 다항식을 사용하여 나타내면 다음과 같이 급수형태로 표현된다^[8].

$$\begin{aligned} T(\theta, \phi) &= 2\pi a^2 e^{-jk(2F + \epsilon_z)} e^{-jk\left(\frac{h^2}{4F} - F\right)(1 - \cos \theta)} \\ &\cdot e^{jkh(\sin \theta \cos \phi + \frac{\epsilon_x}{F})} e^{jk\frac{a^2}{4F}(\cos \theta - \cos \theta_m)} \\ &\cdot \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{p!} \left(\frac{jka^2}{4F}\right)^p (\cos \theta - \cos \theta_m)^p \\ &\cdot \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{\frac{m-n}{2}} {}_p B_m^n j^n e^{jn\phi} \frac{J_{m+1}(kaB)}{kaB} \end{aligned} \quad (29)$$

여기서 $J_{m+1}(kaB)$ 는 $m+1$ 차 Bessel 함수이고, ${}_p B_m^n$ 은

$$\begin{aligned} {}_p B_m^n &= \frac{m+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 Q_p(s_1, \phi_1) \\ &\cdot R_m^n(s_1) e^{-jn\phi_1} s_1 ds_1 d\phi_1 \end{aligned} \quad (30)$$

이다. 식 (30)에서 $Q_p(s_1, \phi_1) = K_e(s_1, \phi_1) e^{-jk\frac{a^2 s_1^2}{4F}(1 - \cos \theta_m)} (s_1^2 - 1)^p$ 이고, $R_m^n(s_1)$ 는 Zernike 다항식이다.

오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기가 초점에서 벗어나 있을 때 복사패턴이 왜곡되고 안테나 이득이 감소한다. 이 때 이득 감소는 스캔로스로서 나타내며 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{SCAN LOSS} &= 20 \log \left| \frac{T(\theta = \theta_m, \phi = \phi_m, \epsilon)}{T(\theta = 0, \phi = 0, \epsilon = 0)} \right| \end{aligned} \quad (31)$$

여기서 $T(\theta = \theta_m, \phi = \phi_m, \epsilon)$ 은 1차복사기가 초점으로부터 벗어나 있을 때의 최대 빔 방향에서의 복사전계이고, $T(\theta = 0, \phi = 0, \epsilon = 0)$ 는 1차복사기가 초점에 있을 때 최대 빔 방향 ($\theta = 0, \phi = 0$)에서의 복사전계이다.

IV. 수치계산 결과

4-1 빔 편향 계수

그림 3은 오프셋 반사경의 기하학적 구조를 나타내며 반사경의 반개구각 θ_E , 오프셋각 θ_0 , 초점거리 F , 개구면의 직경 D 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \frac{\theta_L + \theta_U}{2} \\ \theta_E &= \frac{\theta_U - \theta_L}{2} \\ \tan \theta_L &= \frac{\left(\frac{h-a}{2F}\right)}{1 - \left(\frac{h-a}{2F}\right)^2} \\ \tan \theta_U &= \frac{\left(\frac{h+a}{2F}\right)}{1 - \left(\frac{h+a}{2F}\right)^2} \end{aligned} \quad (32)$$

오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기를 설치할 때 그림 3에서 θ_0 또는 θ_c 방향으로 설치한다. 1차복사기의 경사각을 θ_0 로 할 경우 개구면 끝에서 전계 레벨은 동일하지만 개구면 중심의 전계는 최대가 되지 않는다. 또한 경사각을 θ_c 로 할 경우 개구면 양쪽 끝에서 전계 레벨은 다소 차이가 있으나 개구면 중심에서 최대가 된다. 여기서는 1차복사기의 경사각을 θ_c 로 하여 BDF를 계산한다. BDF는 1차복사기의 패턴보다는 주로 반사경의 구조 F/D (또는 θ_E, θ_c)에 관계한다. 식 (19)를 이용하여 BDF를 구하기 위하여 1차복사기를 y 편파로 가정하여 패턴함수 $E_{s\phi}(\theta_s, \phi_s)$, $E_{s\theta}(\theta_s, \phi_s)$ 를 다음과 같이 나타낸다.

$$E_{s\phi}(\theta_s, \phi_s) = \cos^n \theta_s \sin \phi_s \quad (33)$$

$$E_{s\theta}(\theta_s, \phi_s) = \cos^n \theta_s \cos \phi_s$$

반사경 테두리에서 1차복사기 전계 레벨의 감소를 ET (Edge Taper)라고 하면 n 은 다음 식을 이용하여 구하여 진다.

$$n = \frac{-ET}{20 \log(\cos \theta_E)} \quad (34)$$

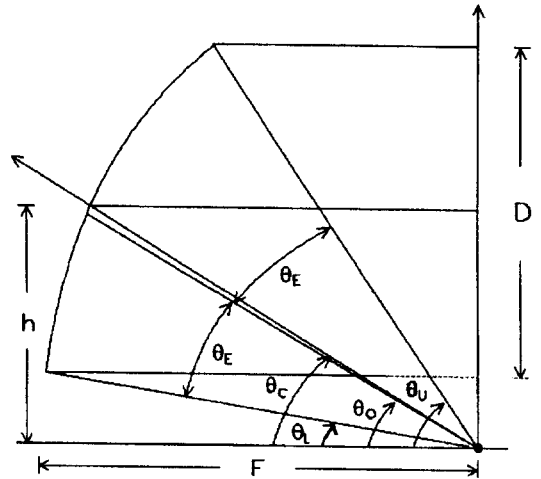


그림 3. 오프셋 반사경 구조

Fig. 3. Offset reflector geometry.

그림 4는 식 (19)를 이용하여 $ET = 10$ dB일 때 θ_E 와 θ_c 의 변화에 따른 BDF를 수치계산한 결과이다. 식 (19)의 이중적분 계산은 가우스 구적법(Gauss quadrature)을 사용하였다.^[11] 그림 4에서 θ_c 를 고정시키고 θ_E 를 증가시키거나, θ_E 를 고정시키고 θ_c 를 증가시키면 BDF가 감소함을 알 수 있다. 즉 오프셋 반사경의 비 대칭성이 증가할수록 BDF는 작아진다. 오프셋 반사경 안테나에서 θ_E 나 θ_c 를 증가시키면 F/D 가 감소한다. 따라서 BDF는 F/D 가 감소함에 따라 감소함을 알 수 있다. 오프셋 반사경의 구조를 나타낼 때 h, F, D 로 나타내는 경우가 일반적이다. 따라서 θ_c 와 F/D

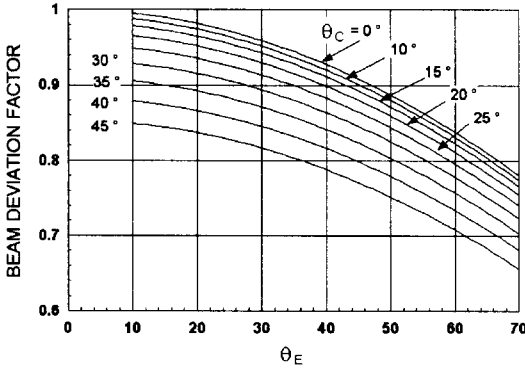


그림 4. θ_c 와 θ_E 의 변화에 따른 BDF

Fig. 4. BDF as functions of θ_c and θ_E .

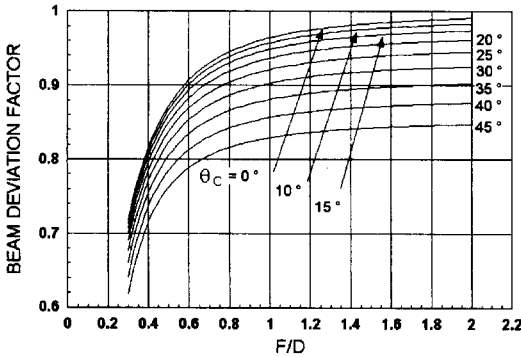


그림 5. θ_c 와 F/D 의 변화에 따른 BDF

Fig. 5. BDF as functions of θ_c and F/D .

변화에 따른 BDF를 그림 5에 나타내었다.

그림 6은 1차복사기의 ET가 10 dB와 20 dB일 때 파라볼라 반사경 안테나의 F/D 에 따른 BDF를 계산한 결과이다. BDF는 1차복사기의 ET에 따라서는 변화가 매우 작고 주로 반사경의 구조인 F/D 에 따라 변화함을 알 수 있다. 반사경 안테나의 일반적인 ET는 안테나의 스피로버효율(spillover efficiency)과 개구면효율(aperture efficiency)의 곱이 최대에 근접하는 10~11 dB 내에서 택하고 있다.

현재 오프셋 반사경 안테나의 BDF(BDF_{offset})는 동일한 개구각을 갖는 파라볼라 안테나의 BDF($BDF_{front\ fed}$)로부터 다음 식을 이용하여 계산하고 있다^[6].

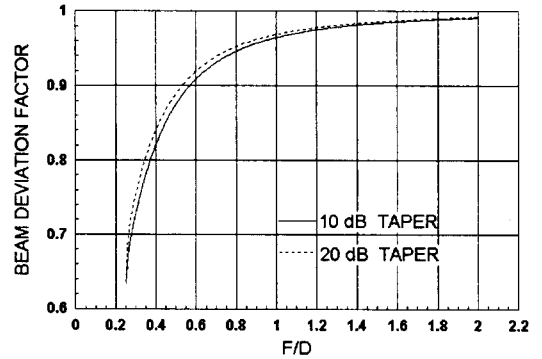


그림 6. F/D 에 따른 파라볼라 반사경의 BDF

Fig. 6. BDF of parabolic reflector as a function of F/D .

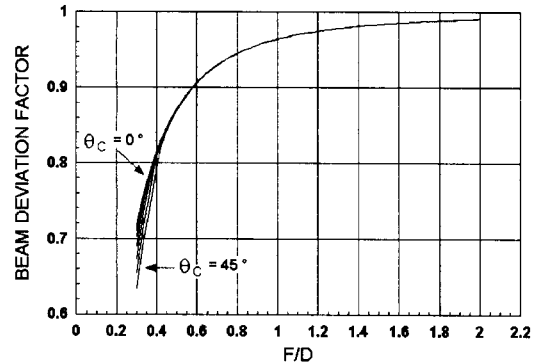


그림 7. BDF/τ

Fig. 7. BDF/τ .

$$BDF_{offset} = BDF_{front\ fed} \cdot \frac{F/D_{offset}}{F/D_{front\ fed}} \quad (35)$$

단, $F/D_{offset} = \frac{\cos \theta_E + \cos \theta_0}{4 \sin \theta_E}$ 이고 $F/D_{front\ fed} = \frac{\cos \theta_E + 1}{4 \sin \theta_E}$ 이다. 식 (35)는 오프셋 반사경 안테나의 개구면 전계가 ϕ 방향에서 대칭이라는 가정 하에 나타낸 것이다. 그러나 오프셋 반사경 안테나는 F/D 가 작을수록 비 대칭성이 증가하여 개구면의 전계가 ϕ 방향에서 대칭이 되지 않는다.

그림 7은 오프셋 반사경 안테나에서 $\tau = \frac{\cos \theta_E + \cos \theta_0}{\cos \theta_E + 1}$ 로 하여 BDF/τ 를 F/D 의 변화

에 따라 나타낸 것이다. 그림 7에서 $\theta_c = 0^\circ$ 일 때 BDF/τ 는 파라볼라 반사경의 BDF와 같다. F/D 가 0.5 이하에서 작을수록 BDF/τ 는 파라볼라 반사경의 BDF와 차이를 보이고 있다. 이는 F/D 가 작을수록 오프셋 반사경의 비 대칭성이 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 파라볼라 반사경 안테나의 곡면은 주로 F/D 가 0.25 이상인 경우가 대부분이다. F/D 가 0.25 이상인 파라볼라 반사경으로부터 오프셋 반사경을 구성하면 F/D 가 0.5 이상이 된다. 그림 7로부터 오프셋 반사경 안테나의 BDF 다음과 같은 근사식으로 나타낸다.

$$BDF = \tau \cdot (1 - 0.035(F/D)^{-1.8}) \quad (36)$$

그림 8은 $D = 100 \lambda$, $h = 52 \lambda$, $F/D = 1$ 및 $F/D = 2$ 오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기의 위치를 그림 2의 1차복사기 평면의 좌우 대칭축 상에서 변화시키면서 계산한 빔 편향각(beam deviation angle)이다. 식 (29)를 이용하여 계산한 복사패턴으로부터 얻어진 결과와 근사식 (36)을 이용하여 계산한 결과를 나타내고 있다. $F/D = 2$ 일 때 두 결과는 거의 일치하고 있으나 $F/D = 1$ 인 경우는 1차복사기의 위치가 초점에서 멀리 떨어질수록 결과의 차이가 커지고 있다. 이런 차이는 식 (19)를 이용하여 BDF를 계산할 때 1차복사기의

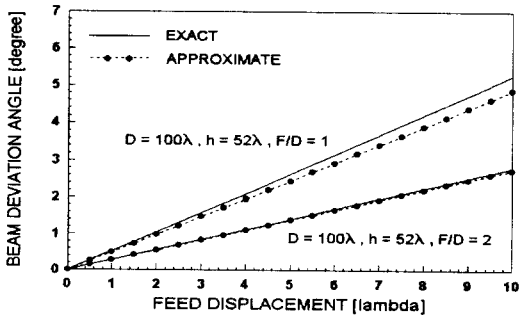


그림 8. 1차복사기 변위에 따른 빔 편향각
Fig. 8. Beam deviation angle as a function of feed displacements.

변위가 매우 작은 경우로 가정하여 BDF를 구하기 때문이다.

4-2 복사패턴 및 스캔로스

오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기가 초점으로 부터 벗어나 있으면 최대 빔이 편향되고 안테나 이득이 감소된다. 이는 안테나 반사경 구조와 1차복사기의 위치에 관계한다.

그림 9는 개구면 직경 $D = 50 \lambda$, 초점거리 $F = 40 \lambda$, 오프셋 높이 $h = 30 \lambda$ 인 오프셋 반사경 안테나에서 $ET = 10$ dB인 1차복사기가 초점에 있을 때의 복사패턴이다. 반사경의 비 대칭성으로 인하여 교차편파가 높게 나타나고, 수직편파에 해당하는 H면 패턴은 좌우 대칭이 되지 않는다.

그림 10은 1차복사기를 $\epsilon = 5\lambda$ ($\epsilon_x = -3.767\lambda$, $\epsilon_y = 0\lambda$, $\epsilon_z = -3.287\lambda$)에 놓았을 때의 최대 빔 방향 $\theta_m = 6.2^\circ$, $\phi_m = 0^\circ$ 을 기준으로 하여 나타낸 E면과 H면 복사패턴이다. 그림 9에 비하여 이득은 1.685 dB 낮다. 그림 10에서 알 수 있듯이 1차복사기가 초점에서 벗어나면 빔이 넓어지고 이득이 감소한다.

그림 11은 $ET = 10$ dB인 1차복사기를 갖는 개구면 직경 $D = 70 \lambda$, 오프셋 높이 $h = 40 \lambda$, 초점거리 $F = 60 \lambda$ 인 오프셋 반사경 안테나에서 1차

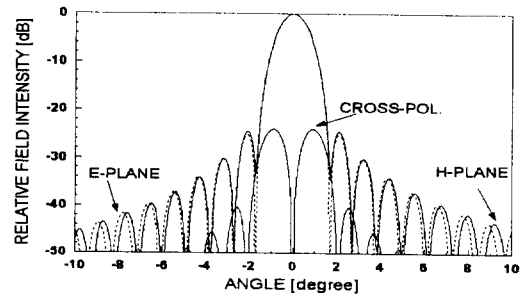


그림 9. 초점에 1차복사기를 갖는 오프셋 반사경 안테나의 복사패턴
Fig. 9. Radiation pattern of offset reflector antenna with focused feed.

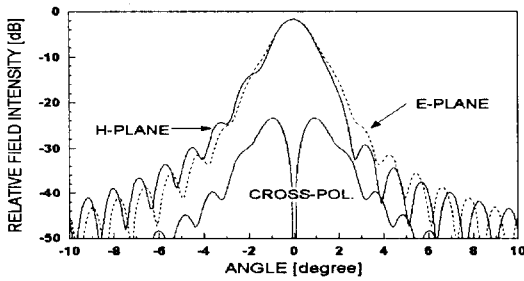


그림 10. 초점에서 벗어난 1차복사기를 갖는 오프셋 반사경 안테나의 복사패턴

Fig. 10. Radiation pattern of offset reflector antenna with defocused feed.

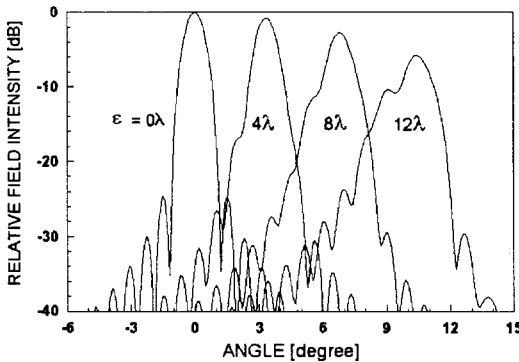


그림 11. 오프셋 안테나의 복사패턴

Fig. 11. Radiation pattern of offset antennas.

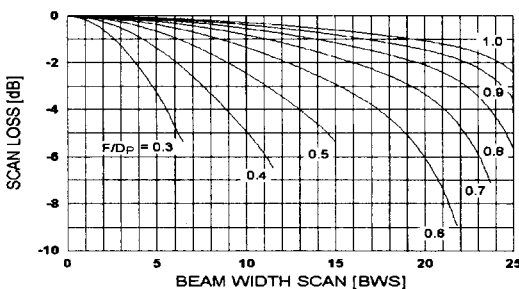


그림 12. BWS에 따른 스캔로스

Fig. 12. Scan loss as a function of BWS.

복사기의 위치를 변화시키면서 계산한 수직 복사 패턴이다. 그림에서 알 수 있듯이 1차복사기의 위치가 초점으로부터 멀어질수록 빔이 편향되고 빔이

넓어짐과 동시에 이득이 감소함을 알 수 있다. 또한 한쪽의 사이드로브는 증가하고 다른 쪽의 사이드로브는 감소하여 빔의 왜곡현상이 커짐을 알 수 있다.

오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기가 초점에서 벗어나 설치되면 최대 빔이 편향되고 이득이 감소한다. 빔 편향에 따른 이득감소를 반사경의 구조에 따라 그림 12에 나타냈다. 그림에서 BWS (Beam Width Scan)는 빔 편향각을 3 dB 빔폭으로 정규화 한 것이며, F/D_p 에서 D_p 는 파라볼라 반사경의 직경으로 오프셋 반사경의 개구면 직경 D 와는 $D_p = 2(h + D/2)$ 의 관계가 있다. 그림 12에서 동일한 BWS에서 스캔로스는 F/D_p 가 작을수록 커지고 F/D_p 가 클수록 작아진다. 따라서 오프셋 반사경 안테나에서 스캔능력을 크게 하려면 가능한 초점거리를 길게 할 필요가 있다.

V. 결론

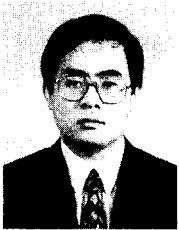
오프셋 반사경 안테나에서 1차복사기가 초점으로부터 벗어나면 안테나의 복사패턴이 왜곡되어 최대 빔이 편향되고 안테나 이득이 줄어든다. 따라서 초점 근처에 1차복사기를 배열하여 성형 빔 또는 멀티 빔을 형성하기 위해서는 1차복사기의 위치와 반사경 구조에 따른 복사패턴 최대 빔 방향 및 이득 감소 정도를 알 필요가 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 1차복사기가 초점에서 벗어나 있는 경우 오프셋 반사경 안테나를 Zernike 다항식을 이용하여 해석하였으며 그로부터 반사경의 구조에 따른 스캔로스를 계산하여 스캔로스에 관한 데이터를 제시했다. 또한 BDF를 계산할 수 있도록 이론을 전개하고 계산 결과 및 간단한 BDF 근사식을 제시하여 빔 편향 특성을 알아볼 수 있게 하였다.

본 논문의 BDF와 스캔로스에 관한 내용은 오프셋 반사경을 이용한 성형빔 또는 멀티빔 안테나의 설계에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 최학근 외 2 인, "국내 방송위성을 위한 오프셋 파라볼라 안테나의 설계에 관한 연구", 대한전자공학회 논문지, 26(2), pp. 66-75, 1989. 2.
- [2] Y. Rahmat-Samii and V. Galindo-Israel, "Shaped reflector antenna analysis using the Jacobi-Bessel series", *IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. AP-28*, pp. 425-435, July 1979.
- [3] R. Mittra, Y. Rahmat-Samii, V. Galindo-Israel and R. Norman, "An efficient technique for the computation of vector secondary pattern of offset paraboloid reflectors", *IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. AP-27*, pp. 294-304, May 1980.
- [4] John Ruze, "Lateral-feed displacement in paraboloid", *IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. AP-13*, pp. 660-665, Sept. 1965.
- [5] Y. T. Lo, "On the beam deviation factor of a parabolic reflector", *IRE Trans. Antenna Propagat., vol. AP-8*, pp. 347-349, May 1960.
- [6] P. E. Ingerson, "Focal region characteristics of offset fed reflector", in *IEEE int. Symp. Program & Digest*, pp. 121-123, June 1974.
- [7] V. Jamnejad-Dailami and Y. Rahmat-Samii, conic-section generated offset reflector "Some important geometrical features of antennas", *IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. AP-28*, pp. 952-957, Nov. 1980.
- [8] 최학근, "Zernike 다항식을 이용한 오프셋 복 반사경 안테나의 해석", 대한전자공학회 논문지, 28(9), 1991. 9.
- [9] S. Cornbleet, *Microwaves Optics*, Academic Press, New York, 1976.
- [10] J. V. Wang and D. E. Silva, "Wave-front interpretation with Zernike polynomials", *Applied Optics*, vol. 19, no. 9, May 1980.
- [11] M. Abramowitz and T. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Function*, New York, Dover, 1970.
- [12] Y. Rahmat-Samii, "A comparison between go/aperture-field and physical-optics methods for offset reflectors", *IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. AP-32*, pp. 301-306, July 1984.

최 학 근



1979년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년 2월: 고려대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1988년 2월: 고려대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1991년~현재: 단국대학교 전자공학

과 부교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파