

Ku 밴드 VSAT 反射鏡 안테나의 設計 및 輻射特性 解析

正會員 崔 學 根* 正會員 李 燉 信** 正會員 崔 學 潤***

Design and Analysis of Ku Band VSAT Reflector Antennas

Hak Kuen Choi*, Don Shin Lee**, Hak Yun Choi*** *Regular Members*

要 約

본 논문에서는 Ku 밴드 VSAT 안테나로서 효율 60% 이상, 사이드로브 포락선 $29-25 \log\theta$ 를 만족하는 저 사이드로브 오프셋 파라볼라 반사경 안테나를 설계하고 시작했다. 안테나의 해석을 위해서는 Zernike 다항식을 이용한 새로운 급수전개법을 적용하였다. 시작안테나의 복사패턴 측정치는 이론적 계산치에 근접하는 것으로 나타났으며, 첫번째 사이드로브 레벨을 제외하고 이득, 효율 및 사이드로브 포락선 등은 설계사양을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In this paper, an offset paraboloidal reflector antenna satisfied efficiency of over 60% and sidelobe envelope line of $29-25 \log\theta$ was designed and manufactured for Ku-band VSAT (Very Small Aperture Terminal) antenna. The radiation patterns of experimental antenna were computed by applying the series expansion method using the Zernike polynomials. The measured patterns are in good agreement with the computed results. The Gain, efficiency, and sidelobe envelop line fairly well satisfy the design specifications except first sidelobe level.

I. 서 론

1965년 최초로 정지통신위성이 발사된 이후 위성 통신은 주로 INTELSAT에 의한 국제통신의 수단으로써 이용되어 왔으나, 현재에는 미국, 일본, 캐나다, 프랑스 등 선진국을 중심으로 자국의 독자위성을 보

유하여 위성통신을 국내통신에 적용하므로써 각종 서비스를 실시하고 있는 추세이다. 우리나라도 이에 부응하기 위하여 무궁화호로 이름붙여진 통신·방송 위성을 1996년에 발사하여 각종 서비스를 실시한다는 계획이 세워져 있으며 현재 이 분야의 연구에 박차를 가하고 있다.

위성통신을 국내통신으로 전용하는 경우 위성탑재용 안테나⁽¹⁾ 및 중계기의 고성능화에 따라 고객들은 개구경 2m 이하의 안테나를 고객 가까운 곳에 설치하여 각종 서비스를 제공 받을 수 있게 된다. 그 예로서는 DBS(Direct Broadcasting Satellite) 시스템과

*檀國大學校 電子工學科

Dept. of Elec. Eng., Dankook Univ.

** (株) 하이게인 안테나

HIGH GAIN ANTENNA CO., LTD.

***建國大學校 電子工學科

Dept. of Elec. Eng., Konkuk Univ.

論文番號 : 93-5 (接受1992. 5. 30)

VSAT(Very Small Aperture Terminal) 시스템이 있으며 이 외에도 위성을 이용한 이동체 통신시스템이 있다. 직경 2m 이하의 소형지구국 안테나로서 DBS용 안테나는 수신 전용이기 때문에 사이드로브 특성보다 안테나의 효율에 치중하여 설계되고 있다. 그러나 VSAT 안테나는 송·수신 공용으로 사용되기 때문에 다른 위성시스템에 미치는 간섭을 최소화하기 위하여 광각 저 사이드로브 특성을 갖도록 설계되어야 한다.

Ku 밴드 VSAT 안테나로는 1차복사기와 부반사경 및 이들 지지대에 의한 브로킹이 없어 광각 사이드로브 특성을 얻을 수 있는 오프셋 파라볼라 반사경 안테나(Offset paraboloidal reflector antenna)^(1,6)와 2장의 반사경으로 구성된 오프셋 복 반사경 안테나(Offset dual reflector antenna)^(7,10)가 있다. 이 중에서 오프셋 파라볼라 반사경 안테나는 구조가 간단하고, 사이드로브 레벨이 낮고, 소형의 1차복사기를 사용할 수 있는 특징이 있어 현재 널리 사용되고 있다.

따라서 본 논문에서는 Ku 밴드 VSAT 안테나로서 효율 60% 이상, 사이드로브 포락선 $29.25 \log \theta$ 를 만족하는 저 사이드로브 오프셋 파라볼라 반사경 안테나를 설계하고 시작한다. 또한 설계·제작된 안테나의 복사특성이 VSAT 안테나의 설계사양을 만족하는지를 검토하기 위해 Zernike 다항식을 이용한 새로운 급수전개법을 적용하여 계산하고,^(10,12) 그 결과를 측정치와도 비교·검토한다.

II. 해석방법

1. 복사전계의 급수전개

VSAT 안테나로서 사용되는 오프셋 파라볼라 반사경 안테나를 Zernike 다항식을 적용하여 해석한다.

그림 1은 오프셋 파라볼라 반사경의 좌표계를 나타낸다. 1차복사기로부터 반사경에 유기된 전류밀도를 \mathbf{J} 라고 할 때, 이에 의해 복사되는 전계 \mathbf{E} 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\mathbf{E}(r) = -j\omega\mu \int_s [\mathbf{J}\mathbf{G} + 1/k^2(\mathbf{J} \cdot \nabla)\nabla\mathbf{G}(R)] ds' \quad (1)$$

여기서, s 는 반사경면, R 은 반사경의 한 점으로부터 관측점까지의 거리이다. 식 (1)에서

$$\mathbf{G} = \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R} \quad (2)$$

$$(\mathbf{J} \cdot \nabla)\nabla\mathbf{G}(R) = [-k^2(\mathbf{J} \cdot \hat{\mathbf{R}})\hat{\mathbf{R}} = \frac{3}{R} (jk + \frac{1}{R})(\mathbf{J} \cdot \hat{\mathbf{R}})\hat{\mathbf{R}} - \frac{1}{R} (jk + \frac{1}{R})\mathbf{J}] \mathbf{G}(R)$$

이다. 식 (1)에 far-field 근사, $R \approx r - \mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}}$ 을 대입하고 정리하면 복사전계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(1,10)

$$\mathbf{E}(r) = -jk\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} [\mathbf{I} - \hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{r}}] \cdot \mathbf{T}(\theta, \phi) \quad (3)$$

$$\mathbf{T}(\theta, \phi) = \int_s \mathbf{J} \exp(jk \mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}}) ds' \quad (4)$$

여기서, $k=2\pi/\lambda$, $\eta=120\pi$, $\mathbf{I} = \hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{r}} + \hat{\theta}\hat{\theta} + \hat{\phi}\hat{\phi}$ 이고, \mathbf{r}' 는 반사경의 촛점으로부터 반사경면의 한 점까지의 거리벡터이고, $\hat{\mathbf{r}}$ 은 관측점을 향하는 단위벡터이다.

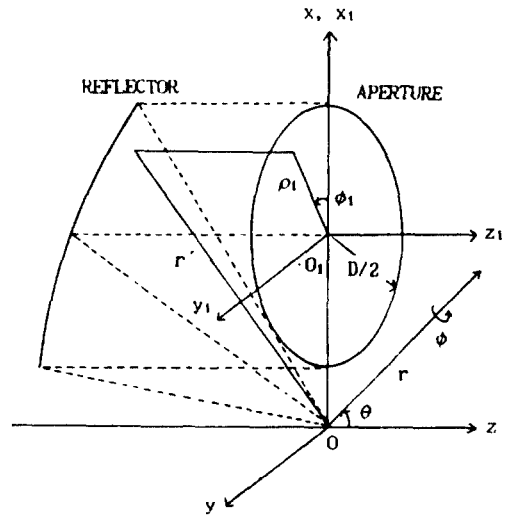


그림 1. 반사경의 좌표계.
Fig. 1. Reflector Coordinate.

식 (4)의 유기전류밀도 \mathbf{J} 는 물리광학 근사에 의하여

$$\mathbf{J} = \begin{cases} 2 \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_s & : \text{반사경면 내부} \\ 0 & : \text{반사경면 외부} \end{cases} \quad (5)$$

으로부터 구할 수 있다.⁽¹⁾ 식 (5)의 $\hat{\mathbf{n}}$ 은 반사경의 법

선 단위벡터이고, \mathbf{H}_s 는 1차복사기의 복사자계로서 복사전계 \mathbf{E}_s 와는 다음의 관계가 있다.

$$\mathbf{H}_s = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{r}}_s \times \mathbf{E}_s \quad (6)$$

식 (6)의 1차복사기의 복사전계 \mathbf{E}_s 는 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{E}_s = A \frac{e^{-jkr_s}}{r_s} [\hat{\theta}_s U_E(\theta_s)(ae^{j\phi} \cos\phi_s + b \sin\phi_s) + \hat{\phi}_s U_H(\theta_s)(-ae^{j\phi} \sin\phi_s + b \cos\phi_s)] \quad (7)$$

단,

$$U_E(\theta_s) = (\cos\theta_s)^{q_E} : E\text{-plane}$$

$$U_H(\theta_s) = (\cos\theta_s)^{q_H} : H\text{-plane}$$

식 (7)에서 A는 복소상수, ($U_E(\theta_s)$, $U_H(\theta_s)$)는 각각 1차복사기의 E면 및 H면의 복사패턴이고, (q_E , q_H)는 반사경 테두리에서 1차복사기 복사패턴의 edge taper 정도를 나타내는 지수이며, (a , b , ϕ)는 1차복사기의 편파를 구분하는 파라메타로서 표 1과 같다.

표 1. 1차복사기의 편파
Table 1. Feed polarizations

편 파	a	b	ϕ
x 편파	1	0	0
y 편파	0	1	0
RHCP	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	90°
LHCP	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	-90°

식 (4)의 $\mathbf{T}(\theta, \phi)$ 는 1차복사기의 좌표계로 표현되어 있으므로 좌표계로 표현되어 있으므로 좌표변환을 이용하여 개구면의 좌표계 (ρ_1 , ϕ_1 , z_1)에서 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{T}(\theta, \phi) = \exp(jkhsin\theta\cos\phi) \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \mathbf{J}_e(\rho_1, \phi_1) \exp(jkz_1\cos\theta) \cdot \exp[jk\rho_1 \sin\theta\cos(\phi - \phi_1)] \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \quad (8)$$

단, $\mathbf{J}_e = \mathbf{J} \sqrt{(1 + (\partial z_1 / \partial x_1)^2 + (\partial z_1 / \partial y_1)^2)}$ 이고, D는 개구면의 직경이며, h는 오프셋 높이이다.

복사패턴은 식 (3)과 식 (8)을 이용하여 계산할 수

있으나 식 (8)의 적분식은 적분변수 (ρ_1, ϕ_1)와 관측점의 좌표 (θ, ϕ)가 함께 포함되어 있으므로 모든 관측점에 대하여 계산되어야 한다. 따라서 계산시간이 오래 걸리고 주 빔 방향으로 부터 멀리 떨어져 있는 사이드로브는 정확하게 계산되지 않는다.^(2,3) 식 (8)의 적분식에서 관측점의 좌표 (θ, ϕ)를 적분기호 밖으로 빼낸다면 한 번의 적분계산으로 그 결과를 모든 관측각에 공히 사용할 수 있으므로 계산시간이 단축될 것이다. 그러므로 복사패턴의 최대 빔 방향을 ($\sin\theta_B \cos\phi_B$, $\sin\theta_B \sin\phi_B$, $\cos\theta_B$)로 가정하고 적분식을 변형하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(1,3)

$$\mathbf{T}(\theta, \phi) = \exp[jk(h\sin\theta\cos\phi + (\frac{h^2}{4f} - f)\cos\theta) + \frac{D^2}{16f}(\cos\theta - \cos\theta_B)] \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} K_e(\rho_1, \phi_1) \exp[jk\Delta] \exp[jk\rho_1 B\cos(\Phi - \phi_1)] \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \quad (9)$$

단,

$$\mathbf{K}_e(\rho_1, \phi_1) = \mathbf{J}_e(\rho_1, \phi_1) \exp[jk\frac{\rho_1^2}{4f} \cos\theta_B] \exp[jk\rho_1(C_U \cos\phi_1 + C_V \sin\phi_1)]$$

$$C_U = \sin\theta_B \cos\phi_B + \frac{h}{2f} \cos\theta_B$$

$$C_V = \sin\theta_B \sin\phi_B$$

$$B = \sqrt{(\sin\theta\sin\phi - C_V)^2 + (\sin\theta\cos\phi + \frac{h}{2f} \cos\theta - C_U)^2}$$

$$\tan\Phi = \frac{\sin\theta\sin\phi - C_V}{\sin\theta\cos\phi + \frac{h}{2f} \cos\theta - C_U}$$

$$\Delta = (\rho_1^2 - (D/2)^2)(\cos\theta - \cos\theta_B) / 4f$$

식 (9)에서 Δ 는 적분변수와 관측각에 모두 관계하지만 매우 작으므로 $\exp(jk\Delta)$ 를 Taylor 급수로 전개하여 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{T}(\theta, \phi) = \frac{D^2}{4} \exp[jk(h\sin\theta\cos\phi + (\frac{h^2}{4f} - f)\cos\theta) + \frac{D^2}{16f}(\cos\theta - \cos\theta_B)] \cdot \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(jk)^p}{p!} [\frac{D^2}{16f}(\cos\theta - \cos\theta_B)]^p \int_0^1 \int_0^{2\pi} K_e \cdot (s^2 - 1)^p$$

$$\cdot \exp[jk(D/2)sB\cos(\Phi-\phi_1)]sdsd\phi_1 \quad (10)$$

여기서 $s = \rho_1/(D/2)$ 이다. 식 (10)은 최대 빔 방향 근처의 관측점에서 급격히 수렴하고 적분식은 Fourier 변환형태를 갖추고 있다.

2. Zernike 다항식의 적용

식 (10)의 적분식은 Fourier 변환 형태를 갖추고 있으므로 수치적분될 수 있으며 주어진 반사경에 대하여 일단 계산이 되면 모든 관측각에 공통으로 사용될 수 있다. 식 (10)의 적분식은 FFT(Fast Fourier Transform)이나 Jacobi-Bessel 급수전개법으로 계산될 수 있으나 여기서는 직교성질을 갖는 Zernike 다항식을 이용하여 계산한다.^(10,12) 식 (10)의 적분식을 급수형태로 변환하기 위해 적분식을 다음 I_p 로 나타낸다.

$$I_p = \int_0^1 \int_0^{2\pi} Q_p \cdot (s, \phi_1) \exp[jk(D/2)sB\cos(\Phi-\phi_1)]sdsd\phi_1 \quad (11)$$

$$Q_p(s, \phi_1) = K_c \cdot (s^2 - 1)^p \quad (12)$$

식 (11)을 급수형태로 변환하기 위해 $Q_p(s, \phi_1)$ 을 2차원 Fourier 급수와 Zernike 다항식을 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_p(s, \phi_1) = \sum_{m=0}^p \sum_{n=-m}^m {}_pB_m^n R_m^n(s) \exp(jn\phi_1) \quad (13)$$

여기서, $R_m^n(s)$ 는 Zernike 다항식으로 다음과 같이 정의된다.^(10,12)

$$R_m^n(s) = \sum_{k=0}^{(m-n)/2} \frac{(-1)^k (m-k)! s^{m-2k}}{[(m+n-2k)/2]! [(m-n-2k)/2]! k!} \quad (14)$$

단, $n \geq 0$ 의 정수일 때 $m \geq n$ 이면서 $(m-n)/2$ 이 양의 정수일 때만 값을 갖고 그 외의 경우는 0이다. 또한 Zernike 다항식은 다음과 같은 성질은 갖는다.

$$R_m^n(1) = 1$$

$$R_m^n(s) = R_m^{-n}(s)$$

$$2(m+1)sR_m^n(s) = (m+n+2)R_{m+1}^{n+1}(s)$$

$$+ (m-n)R_{m-1}^{n-1}(s)$$

식 (13)을 식 (11)에 대입하고, Bessel 함수의 관계식

$$\int_0^{2\pi} \exp[j(z\cos(\Phi-\Phi') + n\Phi')]d\Phi' = 2\pi j^n \exp(jn\Phi) J_n(z)$$

과 Zernike 다항식과 Bessel 함수 곱에 대한 적분식

$$\int_0^1 R_m^n(s) J_n(us) s ds = (-1)^{(m-n)/2} \frac{J_{m+1}(u)}{u}$$

을 이용하여 정리하면

$$I_p = 2\pi \sum_{m=0}^p \sum_{n=-m}^m j^m {}_pB_m^n \exp(jn\Phi) \frac{J_{m+1}(kBD/2)}{kBD/2} \quad (15)$$

가 된다.⁽¹⁰⁾ 단, $J_n(z)$ 는 제1종 n차 Bessel 함수이다.

식 (13)의 계수 ${}_pB_m^n$ 은 Zernike 다항식의 직교성질

$$\int_0^1 R_m^n(x) R_m^n(x) x dx = \frac{\delta_{mm'}}{2(m+1)}$$

을 이용하여 구하면

$${}_pB_m^n = \frac{m+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 Q_p(s, \phi_1) R_m^n(s) \exp(-jn\phi_1) s ds d\phi_1 \quad (16)$$

이 된다.⁽¹⁰⁾ 단, $\delta_{mm'}$ 는 kroneker delta 이다. 식 (15)

를 식 (11)에 대입하여 $T(\theta, \phi)$ 를 나타내면 다음과 같이 된다.

$$T(\theta, \phi) = \frac{\pi D^2}{2} \exp[jk(h\sin\theta\cos\phi + (\frac{h^2}{4f} - f)\cos\theta)] + \frac{D^2}{16f} (\cos\theta - \cos\theta_B) \cdot \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(jk)^p}{p!} \left[\frac{D^2}{16f} (\cos\theta - \cos\theta_B) \right]^p \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-m}^m j^m {}_pB_m^n \exp(jn\Phi) \frac{J_{m+1}(kBD/2)}{kBD/2} \quad (17)$$

식 (16)과 급수전개식 (17)을 이용하면 복사패턴을 빠르게 계산할 수 있다.

III. 시작 안테나의 복사특성

1. 시작안테나의 설계

Ku 밴드 VSAT 안테나의 설계사양은 표 2로 한다.

표 2. 설계사양

Table 2. Design specification.

항목	목표치
주 파 수	Rx : 11.7 - 12.2 GHz Tx : 14.0 - 14.5 GHz
이 득	Rx : 45.0 dBi Tx : 46.5 dBi
사이드로브 포락선	$29 - 25 \log \theta$
사이드로브 레벨	- 25 dB 이하
교차편파 레벨	- 20 dB 이하

VSAT 안테나는 Ku 밴드의 수신주파수 11.7-12.2 GHz, 송신주파수 14.0-14.5 GHz에서 사용하는 것으로 각 주파수밴드의 중심주파수는 각각 11.95 GHz와 14.25 GHz로 한다. 표 2에서 안테나이득은 중심주파수에서의 이득을 나타낸다. 위의 설계사양을 만족하면서 효율 60% 이상을 실현하기 위해서 1차복사기 및 지지대에 의한 브로킹 현상이 없어 광각 저 사이드로브 특성이 가능한 개구면 직경 1.8 m의 오프셋 파라볼라 반사경 안테나를 선택한다. 그림 2는 설계사양에 맞추어 설계된 안테나 외관이다. 반사경의 재료는 FRP(Fiber Reinforced Plastics)계의 복합재

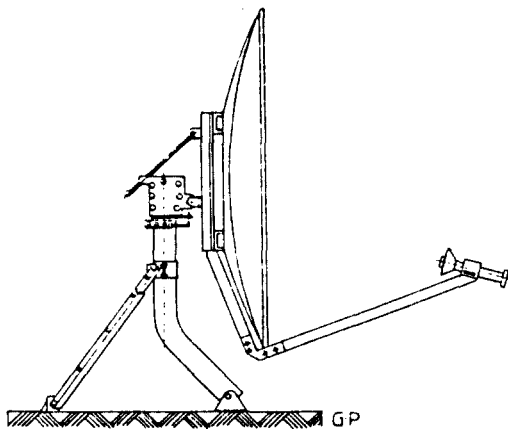


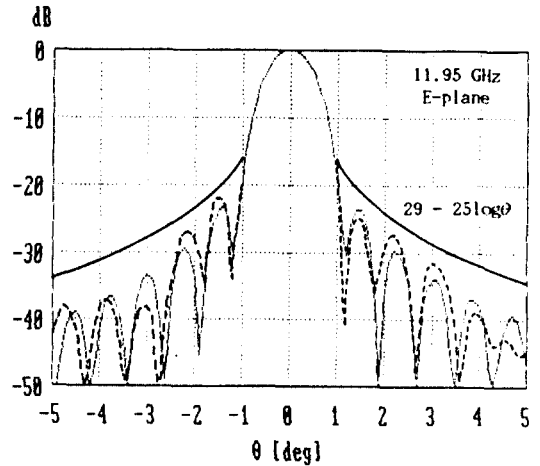
그림 2. 시작안테나
Fig. 2. Experimental antenna

료를 사용했고 1차복사기는 원추 혼을 사용했다.

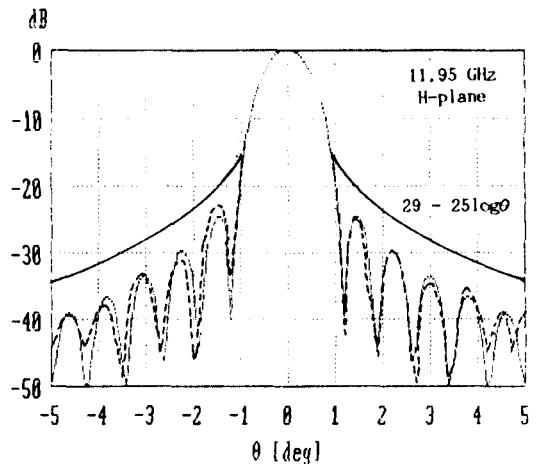
2. 복사특성 계산 및 측정

그림 3과 4는 각각 송·수신 중심주파수 11.95 GHz와 14.25 GHz에서 나타낸 시작 안테나의 복사패턴으로 E면 패턴, H면 패턴 및 교차편파 패턴이다. 복사패턴의 계산은 식 (17)을 사용하였다. 식 (17)에서 전개식은 p, n, m의 무한 갯수 합으로 나타나 있으나 여기서는 p=3, n=3, m=6의 유한 갯수로 한정하고 계산했다.

안테나의 3 dB 빔폭은 수신 주파수 11.95 GHz에서 0.95°이고, 송신주파수 14.25 GHz에서는 0.8°로 나타났다. 사이드로브 레벨은 송·수신 주파수에서



(a)



(b)

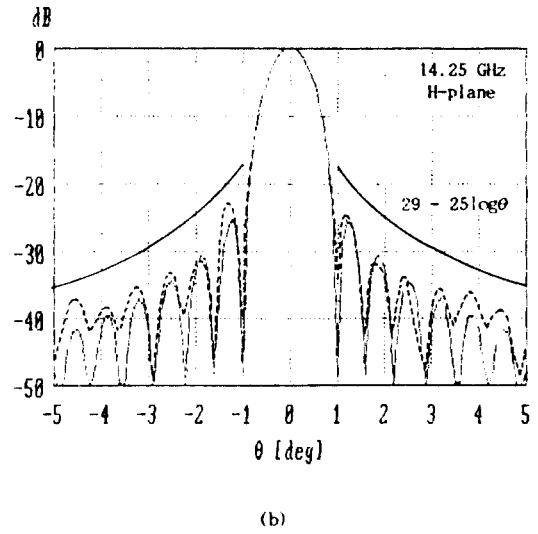
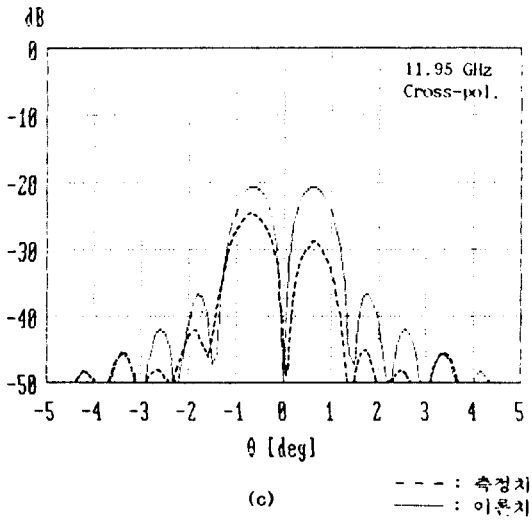


그림 3. 시작안테나의 복사패턴 ($f = 11.95$ GHz).
(a) E면 패턴, (b) H면 패턴, (c) 교차편파 패턴.
Fig. 3. Radiation pattern of experimental antenna.
($f = 11.95$ GHz)
(a) E-plane pattern, (b) H-plane pattern,
(c) Cross-polar pattern.

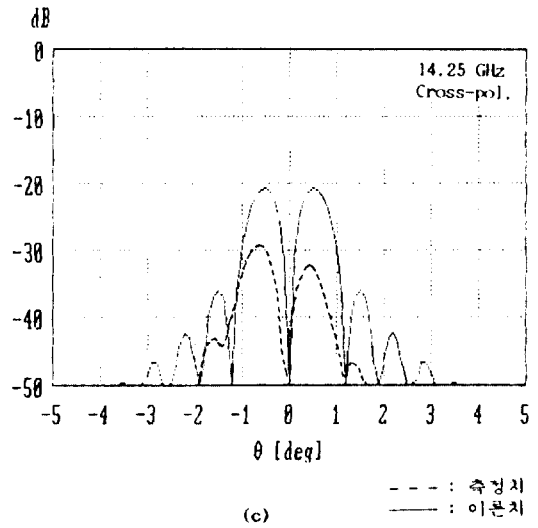
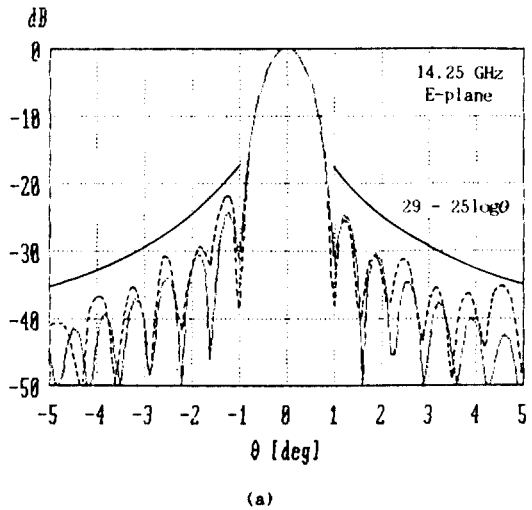


그림 4. 시작안테나의 복사패턴 ($f = 14.25$ GHz).
(a) E면 패턴, (b) H면 패턴, (c) 교차편파 패턴.
Fig. 4. Radiation pattern of experimental antenna.
($f = 14.25$ GHz)
(a) E-plane pattern, (b) H-plane pattern,
(c) Cross-polar pattern.

모두 계산치와 측정치가 약간의 차이를 보이고 있으나, 송·수신 주파수에서 모두 계산치와 측정치가 약간의 차이를 보이고 있으나, 사이드로브 포락선은 측정치 및 계산치 모두 29-25 $\log\theta$ 를 만족하는 것으로 나타났다. 안테나의 이득은 수신주파수 11.95 GHz에서는 45.2 dB, 송신주파수 14.25 GHz에서는 46.5 dB로 측정되었다. 이것은 각각 안테나 효율 65.3% 및 62%에 해당된다. 또한 교차편파 레벨은 11.95 GHz에서 -24.5 dB, 14.25 GHz에서 -29 dB로 측정되었으며, 이것은 계산치와 약간의 차이가 있으나 모두 설계사양을 만족한다.

이상으로부터 복사특성은 대부분 설계사양을 만족하고 있으므로 본 논문의 시작안테나는 VSAT 안테나로서 충분히 사용 가능하다고 할 수 있다.

IV. 결 론

현재 우리나라에서는 미래통신의 핵심인 위성통신을 위하여 이 분야의 연구에 박차를 가하고 있다. 본 논문에서는 이에 능동적으로 대처하기 위하여 Ku 밴드 VSAT 안테나로서 오프셋 파라볼라 반사경 안테나를 설계·제작하고 해석했다. 안테나 해석을 위해서는 Zernike 다항식을 이용한 새로운 급수전개법을 적용하였다.

시작안테나의 복사패턴 측정치는 Zernike 다항식을 이용하여 계산한 이론치에 근접하는 것으로 나타났으나 사이드로브 레벨의 측정치는 최고 -23 dB로서 설계목표치 -25 dB 보다는 다소 높게 나타났다. 안테나이득은 송신주파수에서 46.5 dB, 수신주파수에서 45.2 dB로 측정되었으며 이것은 각각 효율 62%와 66.35%에 해당되는 것으로 설계목표치 60% 보다 다소 높게 나타났다. 사이드로브 포락선은 송신 및 수신주파수에서 모두 29-25 $\log\theta$ 를 만족하는 것으로 나타났고, 교차편파 레벨은 수신주파수에서 -24.5 dB 송신주파수에서 -29 dB로 설계목표치 -20 dB를 만족하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 본 연구의 오프셋 파라볼라 반사경 안테나는 VSAT 안테나로서 사용 가능하다고 할 수 있다.

끝으로 본 논문의 안테나는 (주) 하이게인 안테나에서 제작되었으며 관련된 모든 직원들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 최학근 외 2인, "국내 방송위성을 위한 오프셋 파라볼라 안테나의 설계에 관한 연구," 대한전자공학회 논문지, 제26권, 제2호, pp.66-75, 1989년 2월.
2. Y. Rahmat-Samii and V. Galindo-Israel, "Shaped Reflector Antenna Analysis using the Jacobi-Bessel Series," IEEE Trans., 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., AP-27, pp.294-304, May 1980.
4. A. W. Rudge and N.A. Datia, "Offset Parabolic Reflector Antennas : A Review," Proc. IEEE, Vol.66, pp.1592-1618, Dec., 1978.
5. O. M. Bucci, G. D'elia, G. Franceschetti, R. Pierri, "Efficient Computation of the Far Field of Parabolic Reflectors by Pseudo-Sampling Algorithm," IEEE Trans., AP-31, pp.931-937, Nov. 1983.
6. Y. Rahmat-Samii, "A Comparison between GO/aperture field and Physical Optics Methods for Offset Reflector," IEEE Trans. AP-32, pp.301-306, March 1984.
7. S. A. Skyttemyr, "Cross Polarization in Dual Reflector Antennas - A PO and PTD Analysis," IEEE Trans., AP-34, pp.849-853, June 1986.
8. S. W. Lee, P. Cramer, JR. K. Woo and Y. Rahmat-Samii, "Diffraction by an Arbitrary Subreflector : GTD Solution," IEEE Trans., AP-27, pp.305-316, March 1979.
9. 최학근 외 2인, "경면 수정 오프셋 카세그레인 안테나의 설계 및 복사특성," 대한전자공학회 논문지, 제27권, 제10호, pp.16-23, 1990년 10월.
10. 최학근, "Zernike 다항식을 이용한 오프셋 복 반사경 안테나의 해석," 대한전자공학회 논문지, 제28권, 제9호, 1991년 9월.
11. S. Cornbleet, Microwaves Optics, Academic Press, New York, 1976.
12. J. V. Wang and D. E. Silva, "Wave-front Interpretation with Zernike Polynomials," Applied Optics, vol.19, no.9, May 1980.



崔學根(Hak Kuen Choi) 正會員

1956年 3月 18日生

1979年 2月：高麗大學校 電子工學科 卒業(工學士)

1981年 2月：高麗大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)

1988年 2月：高麗大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學博士)

1991年 3月～現在：檀國大學校 電子工學科 助教授

李燉信(Don Shin Lee)

正會員

1935年 6月 25日生

1963年 2月：漢陽大學校 電子工學科 卒業(工學士)

1967年～現在：(株)하이제인 안테나 代表理事



崔學潤(Hak Yun Choi) 正會員

1962年 4月 21日生

1985年 2月：崇實大學校 電子工學科 卒業(工學士)

1987年 2月：崇實大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)

1990年 8月～1992年 2月：(株)亞南 產業 技術主任

1992年 8월～現在：建國大學校 大學院 電子工學科 博士過程