

衛星TV受信用 DBS 안테나의 特性解析 및 設計

梁 斗 榮*

Analysis and Design of the Direct Broadcasting Service Antenna for the Satellite TV Reception.

Doo-Yeong Yang*

Summary

In this paper, characteristics of the direct broadcasting satellite antenna are analyzed and the design procedure is presented. To improve the antenna gain and the efficiency, we insert a slow wave structure on the bottom of the upper waveguide which can suppress the grating lobes.

The circularly slotted array antenna with diameter of 62.5 centimeter which operate on 12 GHz is analyzed and designed from the theoretical results. The radiation pattern of the circularly slotted array antenna has beamwidth of 2.6 degree, gain of 38 dB, high efficiency of 82 percent and good linear polarization characteristics.

序 論

통신위성을 통하여 송출된 방송신호를 지구상에서 직접 수신하기 위해서는 약 37dB의 이득과 70% 이상의 높은 효율 특성을 갖는 방송용 수신안테나를 사용하여야 한다. 현재 사용되고 있는 위성 TV 수신용 안테나는 주로 반사관(reflector) 안테나로써 중량이 무겁고 규모가 커 기계적 구동이 어려울 뿐 아니라 자연재해로 인한 성능저하 및 이동물체에 설치하기가 곤란한 결점을 갖고 있다.

이 논문에서 다루고 있는 원형 슬롯배열 안테나는

도파관슬롯 배열안테나의 일종으로써 반사관 안테나에서 나타나는 단점들을 보완할 수 있을 뿐 아니라 선형편파를 수신할 수 있고 소형화·경량화가 가능하며, 예리한 펜슬빔(pencilbeam)과 고이득, 고효율 특성을 얻을 수 있는 안테나이다(Ando and Goto, 1988). 이 안테나에 대한 해석방법은 반경도 파관 내부의 전계를 해석하여 원통형 도파관 원형 평판상의 슬롯에 유기되는 슬롯전계와 자유공간으로 전파되는 복사전자계식을 유도한다. 안테나의 배열 구조는 2중 반경도파관의 원형 평판상에 슬롯을 내어 원형으로 배열한다. 또한 효율특성을 높이기 위하여 안테나 내부에 지연과구조물을 설치하여 격자부엽을 최대한 줄일 수 있는 최적 설계자료를 찾아낸다.

* 공과대학 통신공학과(Dept. of Communication Engineering, Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

圓形 슬릿 배열 안테나 解析

원형 슬릿배열 안테나는 Fig. 1과 같이 2중 반경도 파관(two-folded radial waveguide) 원형평판상에 슬릿이 원형으로 배열된 구조를 갖고 있다. 이 안테나는 도파관 하단 중심에서 동축선로(coaxial cable)를 사용하여 급전(feeding)한다. 도파관 내부로 급전된 전자계에너지(electromagnetic power)는 외부 반경 방향으로 전파모드를 형성하여 진행하다가 도파관 벽면에 도달하면 다시 내부반경 방향으로 전파모드가 바뀐다. 내부반경 방향으로 에너지가 전파되는 과정에서 에너지의 대부분은 슬릿을 통하여 복사되고 나머지는 흡수체(absorber)에 흡수된다. 슬릿수가 많을 경우 흡수체에 도달되는 전력은 상대적으로 작아진다. 또한 급전점의 벽면과 도파관 외측 벽면에서 반사파의 영향을 줄이기 위하여 지수함수적인 반사판구조를 사용한다. 도파관 상단 원형평판상의 슬릿배열에 대한 기본구조는 선형편파를 발생시킬 수 있도록 한쌍의 슬릿간의 각도를 반경방향에 대하여 $\pi/2$ 되도록 배열한다. 이 슬릿쌍들을 원형으로 연속적으로 배열시켜 배열안테나를 구성한다. 배열간격 S_ρ 와 S_ϕ 는 각각 ρ 방향과 ϕ 방향을 따라 인접한

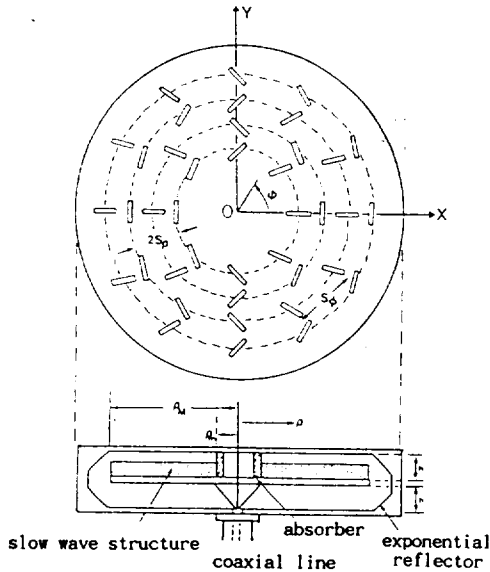


Fig. 1. The structure of the circular slotted array antenna.

슬릿쌍간의 간격을 나타낸다. 2중 반경도파관 원형 평판상에 슬릿을 내었을 때 슬릿에 유기되는 슬릿전계는 도파관 내부에 존재하는 전자계를 해석하여 얻을 수 있다. 반경도파관의 상단두께 d 가 반파장 보다 작을때 반경도파관 내부의 모드는 TM_{0n} 모드만이 존재한다. 따라서 도파관 내부에서 전파되는 기본모드는 TM_{00} 모드이고 이 모드는 반경 방향으로 에너지를 전파시킨다(Harrington, 1961).

$$H_\phi = k_\rho H_1^{(1)}(k_\rho \rho) \tag{1}$$

$$E_z = \frac{k^2}{j\omega\epsilon} H_0^{(1)}(k_\rho \rho) \tag{2}$$

여기서 $H_1^{(1)}$ 은 n 차 1종 Hankel 함수이고 k 는 파수, k_ρ 는 ρ 방향의 전파상수이다.

식(1), 식(2)로부터 상단 원형평판에 유기되는 전류밀도 J 를 구한다. 또한 슬릿에 유기되는 전계 E 는 내부반경 방향으로 흐르는 전류밀도 J 에 의하여 형성된다. 슬릿에 유기되는 등가자류밀도(equivalent magnetic current density)는 등가원리(equivalent principle)와 영상이론(image theory)을 적용하여 계산할 수 있으며 등가자류원에 의하여 복사되는 N 개의 슬릿에 대한 원거리영역의 전계 E_θ 와 E_ϕ 를 구하면 다음과 같다(Yang and Min, 1991).

$$E_\theta = -jk_0 \sum_{n=1}^N Q_n R_n \{ (S_n - T_n) + (U_n - V_n) \} \cdot \{ \sin\phi \cos(\theta_n - \phi_n) + \cos\phi \sin(\theta_n - \phi_n) \} \tag{3}$$

$$E_\phi = jk_0 \sum_{n=1}^N Q_n R_n \{ (S_n - T_n) + (U_n - V_n) \} \cdot \{ -\cos\theta \cos\phi \cos(\theta_n - \phi_n) + \cos\theta \sin\phi \sin(\theta_n - \phi_n) \} \tag{4}$$

여기서

$$Q_n = k_\rho \sqrt{\frac{2}{\pi k (D_\rho - \rho_n)}} \sin\theta_n \frac{e^{-jk_\rho r}}{2\pi r} \cdot e^{j(k_\rho (D_\rho - \rho_n) - (3\pi/4))} \cdot e^{jk_\phi (\rho_n \sin\theta \cos\phi \cos\phi_n + \rho_n \sin\theta \sin\phi \sin\phi_n)}$$

$$R_n = -\frac{e^{jk_\rho L} \sin\{k_\rho W b_n\}}{jk_\rho b_n}$$

$$S_n = \frac{2e^{jk_\rho/2(k_\rho + a_n)L}}{k_0[-k_\rho + a_n]} \cdot \sin\{k_0/2(-k_\rho + a_n)L\}$$

$$T_n = e^{-2jk_p L} \cdot \frac{2e^{-jk_v/2(k_v - a_n)L}}{k_0(-k_v - a_n)} \cdot \sin(k_0/2(-k_v - a_n)L)$$

$$U_n = \frac{2e^{jk_v/2(k_v + a_n)L}}{k_0(-k_v + a_n)} \cdot \sin(k_0/2(k_v + a_n)L)$$

$$V_n = e^{-2jk_p L} \cdot \frac{2e^{jk_v/2(k_v - a_n)L}}{k_0(k_v - a_n)} \cdot \sin(k_0/2(k_v - a_n)L)$$

$$k_v = k_0/k_0$$

$$a_n = \sin\theta \cos(\phi + \theta_n - \phi_n)$$

$$b_n = \sin\theta \cos(\phi + \theta_n - \phi_n)$$

이고 η 는 파동 임피던스, D 는 원형평판의 직경, $2L$ 은 단일슬릿의 장축길이, $2W$ 는 단일슬릿의 폭, A_n 은 n 번째 슬릿이 원점으로부터 떨어진 반경거리, θ_n 은 슬릿의 장축과 ρ 축이 이루는 각도, ϕ_n 은 슬릿이 x 축과 이루는 각도 그리고 k_0 는 자유공간의 전파상수이다. 또한 슬릿 개구면에서의 전계가 x 방향으로 편파 되었을 경우 복사전계의 주편파(co-polarization) 성분인 E_{cp} 와 교차편파(cross polarization) 성분인 E_{xp} 는 다음 식으로부터 구할 수 있다(Milligan, 1985).

$$E_{cp} = E_\theta \cos\phi - E_\phi \sin\phi \quad (5)$$

$$E_{xp} = E_\theta \sin\phi - E_\phi \cos\phi \quad (6)$$

슬릿안테나, 혼안테나 및 반사판 안테나등과 같은 개구면을 갖는 어퍼취안테나는 안테나의 효율로부터 이득이 계산되기 때문에 효율해석은 매우 중요하다. 안테나 빔효율은 빔이 콘형태의 팬슬빔인 경우 안테나의 전자파해석 결과식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\eta_e = \frac{\int_0^{\theta_1} (|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2) r^2 \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} (|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2) r^2 \sin\theta d\theta d\phi} \quad (7)$$

여기서 θ_1 은 반전력 대역폭이다.

또한 지향이득(directive gain)은 기준안테나(reference antenna)의 복사강도(radiation intensity)와 특정방향의 최대 복사강도의 비로 계산한다.

$$D_0 = \frac{4\pi (|E_\theta(0, 0)|^2 + |E_\phi(0, 0)|^2)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2) \sin\theta d\theta d\phi} \quad (8)$$

따라서 안테나의 이득은 식 (7)과 식 (8)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$G = 10 \log_{10} [\eta_e D_0] \quad (9)$$

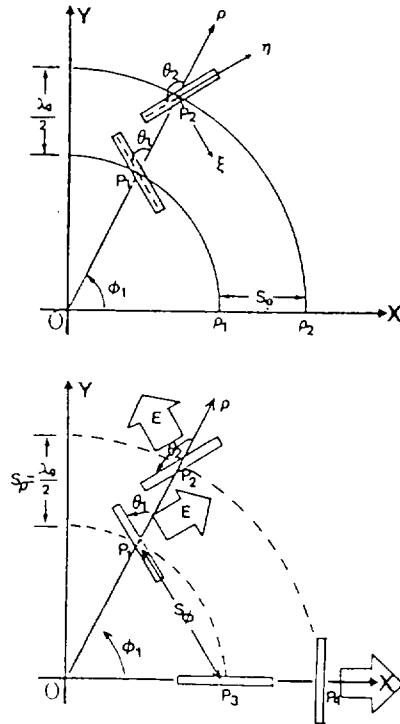


Fig. 2. The structure of circular slotted arrangement.

Fig. 2는 슬릿배열 구조를 설명하기 위한 기본구성도이다. 슬릿배열은 두 단계로 구분할 수 있다. 첫 단계는 기본 슬릿쌍이 선형편파를 발생시킬 수 있도록 슬릿간의 각도를 반경방향에 대하여 $\pi/2$ 가 되도록 배열하는 것이고 두번째 단계는 기본 슬릿쌍을 원을 따라 S_ρ, S_ϕ 간격으로 배열하는 것이다.

Fig. 2에서 슬릿쌍은 ρ 방향으로부터 θ_1, θ_2 각도로 기울어져 있고 θ_2 는 θ_1 보다 위상이 $\pi/2$ 앞선다. 또한 슬릿의 길이는 $2L(=\lambda_g/2)$, 슬릿간의 간격은 δ , 슬릿쌍이 x 축과 이루는 각은 ϕ_1 , 슬릿이 원점으로부터

터 떨어진 거리는 각각 ρ_1 , ρ_2 , 슬릿 #1과 슬릿 #3 사이의 간격은 S_ρ 이다.

Fig. 2의 구조로부터 각 슬릿에 대한 제원은 다음식을 이용하여 찾을 수 있다. (양두영과 이상설, 1991).

$$\rho_{2n} = \rho_{2n-1} + S_\rho \quad (10)$$

$$\rho_{2n} = \rho_{2n+2} \quad (11)$$

$$\rho_{2n+1} = \rho_{2n-1} \quad (12)$$

$$S_{2n-1} = \frac{2\pi\rho_{2n-1}}{S_\rho} = S_{2n} \quad (13)$$

$$\phi_{2n} = \phi_{2n-1} \quad (14)$$

$$\phi_{2n+1} = \phi_{2n-1} + (2\pi/S_{2n-1}) \quad (15)$$

$$\theta_{2n} = \theta_{2n-1} + \pi/2 \quad (16)$$

$$\theta_{2n+1} = \theta_{2n-1} + (\pi/S_{2n-1}) \quad (17)$$

여기서 초기값 ρ_1 , θ_1 , ϕ_1 을 주고 식(10)에서 식(17)까지를 연립하여 반복적으로 계산하면 슬릿에 대한 배열인자를 구할 수 있다. 여기서 S_{2n-1} 은 ρ_{2n-1} 인 원주상에 배열할 수 있는 슬릿수이고 S_ρ 는 슬릿쌍 사이의 간격($\lambda_g/2$)이다.

또한 슬릿을 배열하므로써 나타나는 격자부엽 (grating lobe)을 억제시키기 위하여 상단 도파관 (upper waveguide) 내부에 지연과구조물을 설치한다. 이 구조물을 설치하였을 경우, 도파관 내부에서 전파되는 파의 속도는 상대유전율에 따라 감소하므로 관내파장이 짧아지고 슬릿배열 간격이 줄어든다. 따라서 원형평판상에 더 많은 슬릿쌍들을 배열할 수 있고 공급된 에너지가 슬릿을 통하여 외부로 모두 복사될 수 있다.

이 연구에서는 지연과 구조물의 재료로서 유전체를 사용하였으며 상단 도파관 내부에 삽입된 지연과 구조물은 Fig. 1와 같다. Fig. 1에서 영역1은 유전체로 채워져 있고 영역2는 자유공간이다. k_{z1} 과 k_{z2} 는 각각 z방향의 전파상수이고 h는 상단 도파관의 두께, d는 유전체의 두께이다. 지연과구조물이 있을 때 도파관 내부에서의 파동함수는 TM모드를 이용하여 해석한다. 해석된 전자제식을 이용하여 유전체 경계면 ($z=d$)에서 전계와 자계에 대한 경계조건을 적용하면 지연과 구조물에서의 k_ρ 값을 결정할 수 있는 관계식이 세워진다.

$$\sqrt{\epsilon_r + \left(\frac{k_\rho}{k_0}\right)^2} \tan \left\{ \sqrt{\epsilon_r + \left(\frac{k_\rho}{k_0}\right)^2} d \right\}$$

$$= -\epsilon_r \sqrt{1 - \left(\frac{k_\rho}{k_0}\right)^2} \tan \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{k_\rho}{k_0}\right)^2} (h-d) \right\} \quad (18)$$

여기서 ϵ_r 은 매질1의 상대유전율, h는 상단도파관의 높이, d는 유전체층의 두께이다.

結果 및 考察

Table 1은 원형 슬릿배열 안테나를 해석하기 위한 매개변수 (parameter) 들이다. 안테나 A는 지연과 구조물이 없는 경우이며 안테나 B는 지연과구조물을 설치한 경우에 대한 설계제원이다. 안테나 A와 B에서 슬릿길이와 원형평판상에 대한 제원은 동일한 크기를 사용하여 해석하였다. 안테나에 사용한 지연과 구조물은 비유전율 2.3이고 두께 4mm인 Polystyrene 이다.

Table 1. Design parameters of antenna.

case	f (GHz)	D (mm)	h (mm)	d (mm)	2L (mm)	2W (mm)
Antenna A	12	62.5	7.5	0	12.5	1
Antenna B	12	62.5	7.5	4	9.99	1

case	δ (mm)	ρ_m (mm)	ρ_n (mm)	S_ρ	S_ρ
Antenna A	1	30	6	$0.7\lambda_g$	$0.5\lambda_g$
Antenna B	1	30	6	$0.5\lambda_g$	$0.4\lambda_g$

여기서 D는 원형평판의 직경이고 h는 상단 도파관의 두께, d는 유전체의 두께, 2L은 슬릿의 길이, 2W는 슬릿의 폭, ρ_m 은 슬릿이 최대한 배열될 수 있는 최대반경, ρ_n 은 슬릿배열을 시작한 시점에서의 반경, δ 는 슬릿쌍간의 간격, 2W는 단일슬릿의 폭이다.

Table 2는 식(10)에서 식(17)까지를 반복 적용하여 도출한 슬릿 배열수에 따른 설계자료이다. Table 2에 나타난 슬릿쌍의 수는 100의 배수에 대한 제원만을 선택하여 표시하였다.

지연과구조물을 설치하였을 경우 도파관 내부의 관내파장 λ_g 는 식(18)를 이용하여 계산한 결과 $0.8\lambda_0$ 이었다. 따라서 지연과구조물이 없는 경우보다 슬릿수가 288개 증가하여 복사되는 에너지의 양을 높일 수 있었다.

Table 2. Designed data for the circular arrangement of slots

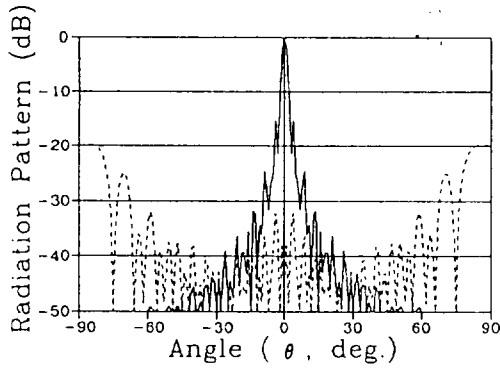
(a) The case of the antenna A

Slot No.	ρ (cm)	θ (rad)	ϕ (rad)
1	6.000	0.0000	0.0000
2	7.250	1.5708	0.0000
99	8.500	1.1170	2.2340
100	9.750	2.6878	2.2340
199	11.000	1.1781	2.3562
200	12.250	2.7489	2.3562
299	13.500	0.6930	6.0060
300	14.750	2.2638	1.3860
399	13.500	3.0030	6.0060
400	14.750	4.5738	6.0060
499	16.000	1.8691	3.7381
500	17.250	3.4398	3.7381
599	18.500	0.6214	1.2428
600	19.750	2.1922	1.2428
699	18.500	2.3476	4.6951
700	19.750	3.9184	4.6951
799	21.000	0.8316	1.6632
800	22.250	2.4024	1.6632
899	21.000	2.3716	4.7432
900	22.250	3.9424	4.7432
999	23.500	0.6950	1.3901
1000	24.750	2.2658	1.3901
1099	23.500	2.0851	4.1703
1100	24.750	3.6559	4.1703
1199	26.000	0.3016	0.6032
1200	27.250	1.8724	0.6032
1299	26.000	1.5582	3.1165
1300	27.250	3.1290	3.1165
1399	26.000	2.8149	5.6297
1400	27.250	4.3857	5.6297
1499	28.500	0.8547	1.7094
1500	29.750	2.4255	1.7094
1599	28.500	2.0097	4.0194
1600	29.750	3.5805	4.0194
1693	28.500	3.0954	6.1908
1694	29.750	4.6662	6.1908

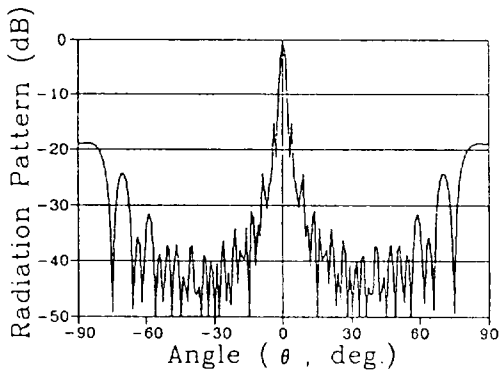
(b) The case of the antenna A

Slot No.	ρ (cm)	θ (rad)	ϕ (rad)
1	6.000	0.0000	0.0000
2	6.999	1.5708	0.0000
99	7.999	1.3026	2.6052
100	8.998	2.8734	2.6052
199	9.997	1.6016	3.2032
200	10.997	3.1724	3.2032
299	11.996	1.3090	2.6180
300	12.996	2.8798	2.6180
399	13.995	0.6830	1.3659
400	14.994	2.2538	1.3659
499	13.995	2.9595	5.9189
500	14.994	4.5303	5.9189
599	15.994	1.8527	3.7055
600	16.993	3.4235	3.7055
699	17.992	0.6500	1.3000
700	18.992	2.2208	1.3000
799	17.992	2.4555	4.9110
800	18.992	4.0263	4.9110
899	19.991	1.1045	2.0289
900	20.990	2.5853	2.0289
999	19.991	2.6507	5.3014
1000	20.990	4.2215	5.3014
1099	21.990	1.0472	2.0944
1100	22.989	2.6180	2.0944
1199	21.990	2.5432	5.0864
1200	22.989	4.1140	5.0864
1299	23.989	0.8195	1.6391
1300	24.988	2.3903	1.6391
1399	23.989	2.1855	4.3709
1400	24.988	3.7563	4.3709
1499	25.987	0.3800	0.7601
1500	26.987	1.9508	0.7601
1599	25.987	1.6468	3.2936
1600	26.987	3.2176	3.2936
1699	25.987	2.9136	5.8271
1700	26.987	4.4844	5.8271
1799	27.986	0.9685	1.9369
1800	28.985	2.5393	1.9369
1899	27.986	2.1495	4.2990
1900	28.985	3.7203	4.2990
1981	27.986	3.1180	6.2359
1982	28.985	4.6888	6.2359

Fig. 3과 Fig. 4는 이상에서 구한 설계자료를 가지고 식 (3)와 식 (4)에 적용하여 원거리 영역에서 계산한 주편파와 교차편파에 대한 복사패턴이다. Fig. 3은 지연과구조물이 없는 안테나 A의 복사패턴 특성을 나타낸다. 실선은 주편파 성분이고 점선은 교차편



(a) y-z plane,

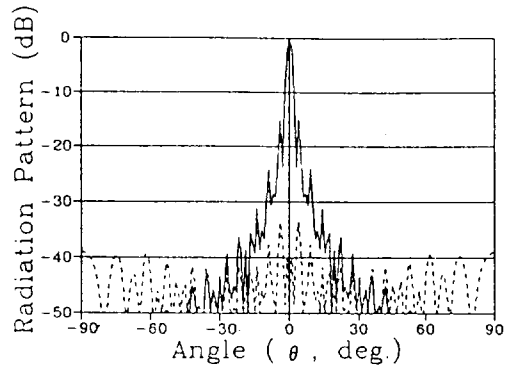


(b) x-z plane

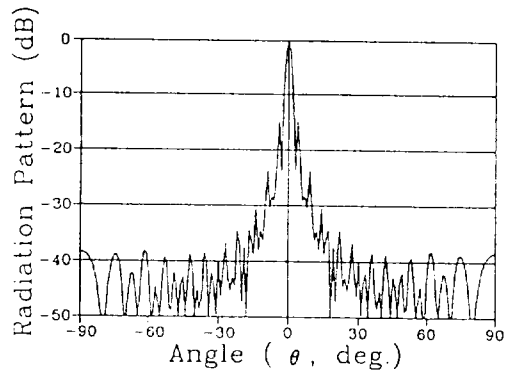
Fig. 3. The radiation pattern of the circular slotted array antenna A without the slow wave structure.

파 성분이다. 그림에서 보면 z축방향으로 에리한 펜슬빔이 브로드사이드 방향으로 복사됨을 알 수 있다. x-z면 패턴인 경우 주편파 성분이 지배적이고 교차편파 성분은 -50dB 이하로 나타났으며 제1부엽의 크기는 -16dB, 격자부엽은 -19dB이다. 또한 y-z면 패턴인 경우 교차편파 성분이 $\theta = \pm 5^\circ$ 부근에서 -33dB, 격자부엽은 x-z면 패턴과 동일하게 나타난다. Fig. 4는 지연과 구조물을 설치한 안테나 B의 복사패턴이다. 실선은 주편파 성분을 나타내고 점선은 교차편파 성분을 나타낸다.

Fig. 4와 Fig. 3를 비교하면 제1 부엽의 크기는 거의 동일하게 나타나지만 격자부엽은 -37dB 이하로 줄일 수 있기 때문에 효율이 73%에서 82%로 개선되었다. 또한 이득은 38dB를 얻을 수 있었으며 브로드사이드 방향으로 2.6° 인 에리한 펜슬빔을 형성하였다.



(a) y-z plane,



(b) x-z plane

Fig. 4. The radiation pattern of the circular slotted array antenna A with the slow wave structure.

摘 要

2중 반경도파관상에 슬랏을 내어 원형으로 배열한 배열안테나의 특성을 해석하고 설계자료를 제시하였다.

반경도파관 내부에 비유전율이 2.3인 유전체를 가지고 지연과구조물을 설치하므로써 82%의 고효율 특성과, 38dB의 이득 및 양호한 선형편파 특성을 얻을 수 있었다. 또한 첫번째 부엽을 -17dB 이하로 줄일 수 있었으며 격자부엽도 -37dB 이하로 억제시킬 수 있었다.

이 연구결과는 선형편파를 수신하는 위성방송 수신안테나 및 이동통신용 안테나 설계에도 유용하게 이용될 것이다.

參 考 文 獻

- Ando, M. and N. Goto, 1988a. A beam-tilted lineary polarized radial line slot antenna, *IEICE Trans.*, J71-B, 10 : 1352-1357.
- Ando, M. and N. Goto, 1988b. A lineary polarized radial line slot antenna, *IEEE*, AP-36, 12 : 1675-1680.
- Harrington, R. F., 1961. *Time Harmonic Electromagnetic Field*, McGraw-Hill.
- Milligan, T. A., 1985. *Modern antenna design*, McGraw-Hill Book Company, Inc. : 1-23.
- 양두영, 이상설, 1991. 나선형 슬롯배열 안테나의 특성 해석 및 설계, 대한 전자공학회논문지, 28 (10) : 799-805.
- Yang, D. Y., Y. K. Min and S. S. Lee, 1991. Analysis of the spiral array antenna slotted on the circular disk, *Proceedings of International Conference on Electronics, Informations and Communications*, 1(2) : 234-238.