한국통신학회 1986년도 춘계학술발표회 논문집(1986.5.24)

86343

포물면경 반사기 안테나의 Defocusing에 관한 연구

○
한 석태, 홍 의석, 오 영환,
광운대학전자통신공학과

A Study on the Defocusing of Paraboloid Reflector Antennas

HAN, SEOG TAE HONG, UI SEOK OH, YOUNG HWAN
INSTITUTE OF ELECTRONC COMMUNICATIONS SCI. & ENG, KWANGWOON UNIVERSITY

ABSTRACT

The gain variations of paraboloid reflector antenna with an axially and perpendicularly defocused feed are investigated using the Huygens-Fresnel Principle.

The theoretical calculations and the experimental for the reflector antenna with an axially defocused feed are compared.

Although there were about 3dB differenece between two results in a range from focal point to 2.0 wave-length, we could know that it was properly approached to theoretical results.

However, when the magnitude of defocusing is increased, the differences are also increased because of the influence by a weak received signal and interference of external noises.

In addition, it can be shown that gain variations are acutely decreased more in perpendicular defocusing than in axial defocusing in the paraboloid reflector antenna.

1. 서 론

1965년 INTELSAT 1호를 대서양 상공 정지궤도에 진입시킴으로서 위성 통신 시대가 열리게 되었다.

이에따라 군사용, 상업용, 천체관측용 등의 고이득 포물면경 반사기 안테나의 연구가 활발히 진행되고 있다.

지향성을 첨예하게 하고 이득을 향상시키기 위하여 포물면경 반사기를 이용하게 된다.

따라서 포물면경 반사기 안테나의 해석은 기하 광학 이론(Geometrics of Optic Theory)에 기초가 되므로 포물면경 반사기의 기하학적 초점과 1차 복사기(Feed)를 정확히 일치시키는 것은 매우 중요한 요소이다.

반사기의 기하학적 초점과 1차 복사기가 일치하지 않으면 안테나의 측엽(Side lobe)의 증가와 더불어 이득의 감소를 초래하며 주엽(Main lobe)의 폭이 넓어진다.[1]

안테나 이득의 증대와 측엽을 저감시키기 위하여 반사기 안테나에 이용되는 1차 복사기 자체의 정확한 위상 중심 위치(Phase Center location)를 결정하여야 한다.

P.S. Kildal과 L. Shafai는 이러한 1차 복사기의 최적 위상 중심을 결정하는 방법과 1차 복사기의 위상 중심과 반사기의 초점이 일치하지 않았을 때 안테나의 효율 변화에 대하여 해석하였다.[2][3][4]

Y.H. Ja는 포물면경 반사기 안테나의 초점에서 축 방향으로 1차 복사기를 이동시켰을 때 이에따른 위상 pattern, 즉 위상 중심을 결정하는 방법을 제시하여 안테나의 정확한 위상 중심을 구하는데 기여하였다.[1][2]

V.T. Rusch는 전류 분포 방법(Current Distribution Method)으로 반사기의 초점에서 축 방향과 일치하는 원거리에서의 복사 pattern 및 이득 변화에 관하여 해석하였다.[6]

본 논문에서는 V.T. Rusch의 방법과는 다른 Huygens-Fresnel 원리를 이용하여 포물면경 반사기 안테나의 초점에서 축 방향으로 1차 복사기를 이동시켰을 때 수신 이득의 변화에 대하여 해석하였고 또한 초점에서 수직으로 1차 복사기를 이동시킨 경우 수신 이득 변화에 대하여도 아울러 해석하였다.

2. Huygens-Fresnel 원리

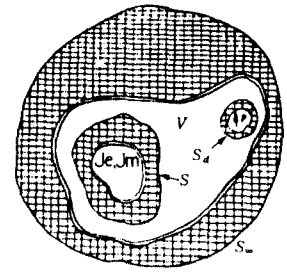


그림 1. 벡터 field의 적분

Huygens-Fresnel 원리는 전파의 전파(propagation) 해석에 가장 기본이 되는 원리로서 주어진 파면(wave front)의 각 점은 구파두(spherical wavelet)를 발생시키는 2차 source로 생각할 수 있으며 임의의 점에서의 field는 이들 파두의 중첩으로 구할 수 있다.[9]

따라서 그림 1에서 무한소 전류원(infinitesimal electric Current element) J_d가 무한소 폐곡면 S_d내의 점 $P(x,y,z)$에 있다면 이 전류원의 전기 쌍극자(electric dipole monent)는

$$P=\frac{1}{j\omega}\int_{V_d} J_d\,dV \tag{1}$$

여기서 V_d는 S_d로 쌓여진 체적이다.

이에 따른 쌍극자의 field 방정식은 아래와 같다.

$$\nabla\times H_d = j\omega\varepsilon_0 E_d + J_d \tag{2}$$

$$\nabla\times E_d = -j\omega\mu_0 H_d \tag{3}$$

또 점 P에서 거리 R만큼 떨어진 점에서의 field는

$$H_d=(j\omega/4\pi)\nabla\times(P\psi)=(j\omega/4\pi)(\nabla\psi\times P) \tag{4}$$

$$E_d=(1/4\pi\varepsilon_0)\nabla\times[\nabla\times(P\psi)] \tag{5}$$

여기서 $\psi=e^{-jkR}/R$이다.

2차 분포원(Second distribution source) J_s, ρ_s와 J_m, ρ_m은 표면 S로 쌓여진 체적 V_s에 존재하며, 이들 2차 분포원에 의하여 발생하는 전계와 자계는 아래와 같다.

$$\nabla\times H = j\omega\varepsilon_0 E + J_s \tag{6}$$

$$\nabla\times E = -j\omega\mu_0 H - J_m \tag{7}$$

식(2), (3)과 식(6), (7)을 조합하면

$$\nabla\cdot(H\times E_d + E\times H_d) = E_d\cdot J_s - H_d\cdot J_m - E\cdot J_d \tag{8}$$

식(8)은 표면 S와 S_d, S_∞의 사이로 쌓여진 체적 V의 적분식으로 표현되며 발산 정리(divergence theorem)을 도입하면

$$\begin{aligned}\int\nabla\cdot(H\times E_d + E\times H_d)\,dV = &-\int_{S_\infty}(H\times E_d + E\times H_d)\cdot n dS\\ &-\int_{S_d}(H\times E_d + E\times H_d)\cdot n dS\\ &-\int_{S}(H\times E_d + E\times H_d)\cdot n dS\end{aligned} \tag{9}$$

여기서 n는 표면에서 체적 V로 향하는 법선 벡터이다.

또 체적 V내에서는 J_d, J_m, J_s가 Zero이고, 체적 V_d에서는 J_s, J_m이 Zero가 된다.

이와같은 조건을 식(8), 식(9)에 적용하여 정리하면

$$\int_{V_d}\nabla\cdot(H\times E_d + E\times H_d)\cdot n dS = j\omega P\cdot E_{(P)} \tag{10}$$

표면 S_∞가 Source로부터 먼 경우 식(10)을 이용하여 식(9)를 정리하면

$$j\omega P\cdot E_{(P)} = \int_S (H\times E_d)\cdot n dS + \int_S (E\times H_d)\cdot n dS \tag{11}$$

식(4)와 식(5)를 식(11)에 대입하면

$$\begin{aligned}E_{(P)} = \frac{1}{4\pi}\int_S [&-j\omega\mu_0(n\times H)\psi + (n\times E)\times\nabla\psi\\ &+(n\cdot E)\nabla\psi]dS\end{aligned} \tag{12}$$

식(12)는 Huygens-Fresnel 원리의 벡터 적분 표현식이며 반사기 표면에 입사파에 의하여 무한소 전류원이 존재한다면 반사기 표면으로부터 외부 임의의 점에서의 field는 무한소 전류원에 의하여 생성되는 field의 합으로 구할 수 있다.

3. 반사기 안테나의 Defocusing에 관한 해석

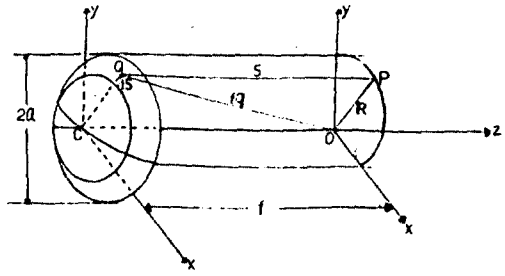


그림 2. Defocusing된 반사기 안테나의 구조

안테나의 편파는 선형편파(linear polarization)이며 1차 복사기는 point source로 가정한다.

교차편파(cross-polarization)는 전체 복사 전력에 비하여 매우 작으므로 무시하고, 반사기 전체에 균일 조사(uniform-illumination)된다고 하면, 전 절에서 해석한 Huygens-Fresnel 원리에 의하여 반사기의 초점에서 임의의 점 P에서 수신되는 전계는

$$E_{(P)} = -j\frac{kE_0}{4\pi f}e^{-jkf}\int_\Omega e^{-jkq\cdot R}\,d\Omega \tag{13}$$

여기서 $d\Omega$는 초점에서 반사기의 면적소 dS와 이루는 입체각이다.

그리고 E_0는 반사기 초점에서의 전계 강도이다.

임의의 점 P를 나타내는 새로운 변수를 도입하면

$$u=\frac{2\pi}{\lambda}(a/f)^2 z,\quad v=\frac{2\pi}{\lambda}\frac{a}{f}\sqrt{x^2+y^2} \tag{14-a}$$

$$kq\cdot R = v\rho(\cos\theta-\varphi)+\frac{1}{2}u\rho^2 \tag{14-b}$$

$$d\Omega = (a/f)^2\rho d\rho d\theta \tag{14-c}$$

식(14)을 식(13)에 대입하면

$$E_{(P)} = -j\frac{kE_0}{4\pi f}e^{-jkf}(a/f)^2 e^{j(\frac{v}{u})^2 u}$$

$$\int_0^{-1}\int_0^{2\pi} e^{-j(v\rho\cos(\theta-\varphi)+\frac{1}{2}u\rho^2)}\rho d\rho d\theta \tag{15}$$

Bessel 함수 적분 표현식에 의하면 식(15)는

$$E_{(P)} = -\frac{jkE_0}{2\pi f}e^{-jkf}(a/f)^2 e^{j(\frac{v}{u})^2 u}$$

$$\int_0^1 J_0(v\rho)e^{-j\frac{1}{2}u\rho^2}\rho d\rho \tag{16}$$

여기서 J_0는 Zero차 제1종 Bessel 함수이다.

식(16)을 적분하기 위하여 Lommel Function을 도입하면[10]

$$U_n(u,v)=\sum_{m=0}^{\infty}(-1)^m\left(\frac{u}{v}\right)^{n+2m}J_{n+2m}(v) \tag{17-a}$$

$$V_n(u,v)=\sum_{m=0}^{\infty}(-1)^m\left(\frac{v}{u}\right)^{n+2m}J_{n+2m}(v) \tag{17-b}$$

위식에서 J_{n+2m}은 n차 제1종 Bessel 함수이며, n, m은 정수이다.

식(16)의 적분항을 실수부와 허수부로 나누어 Bessel 함수의 미분형의 순환관계 및 식(17-a)을 이용하여 정리하면

$$E_t(u,v)=(\frac{2}{u})^2\{U_1^2(u,v)+U_1^2(u,v)\} \qquad (18)$$

이제 초점에서 완전히 수직($u=0$)으로 1차 복사기를 이동시켰을 때 수신되는 전계강도는

$$E_t(0,v)=-j\frac{kE_0}{2\pi f}e^{-jkf}(a/f)^2\{2f_1(v)/v\}^2 \qquad (19)$$

또 반사기의 초점에서 완전히 축 방향($v=0$)으로 1차 복사기를 이동시켰을 때 수신되는 전계강도는 위에서 언급한 방법과 유사하게 행하면 다음과 같다.

$$E_t(u,0)=-j\frac{kE_0}{2\pi f}e^{-jkf}(a/f)^2e^{j(ku/4)^2u}\{\frac{\sin u/4}{u/4}\}^2 \qquad (20)$$

4. 수치 계산

여러가지 규격의 포물면경 반사기가 Defocusing되었을 때 이득의 변화에 대하여 해석하였다.

그림 3.(a)는 전류분포법을 이용하여 포물면경 반사기의 초점에서 축 방향으로 1차 복사기를 이동시켰을 때 반사기의 축 방향과 일치하는 원거리의 임의의 점에서 반사기 규격에 따른 이득의 변화를 고찰하였다.

그림 3.(b)는 본 논문의 방법으로 초점에서 축 방향으로 1차 복사기를 이동시켰을 때 수신 이득의 변화에 관하여 해석하였다.

그림 3.(a), (b)에서 이득이 급격히 변화하는 점은 $d=\frac{m}{2}\{1+(4f/D)\}$이며 m은 정수, d는 축 방향으로의 Defocusing의 크기이고, D는 반사기의 직경이다.

즉 m에 따라 첫번째, 두번째 이득이 급격히 변화하는 점이 나타난다.

전류분포법과 본 논문의 방법과의 결과를 비교해 보면 F/D가 0.3인 경우는 이득이 급격히 변화하는 점이 0.2파장 정도 차이는 있으나, F/D가 0.39, 0.5인 경우는 일치하고 있음을 알 수 있다.

결국 F/D가 작은 경우는 Defocusing에 따른 이득의 변화가 매우 심하고 이득의 변화가 급격한 점이 여러번 나타남을 알 수 있다.

따라서 F/D가 작은 경우는 보다 Defocusing에 유의해야 할 것이다.

그림 4는 V.T. Rusch는 반사기 축을 따라 1차 복사기를 이동시켰을 때 이득의 변화만을 고려했으나, 본 논문에서는 Huygens-Fresnel 원리를 이용하여 각 반사기의 규격에 따른 반사기의 축 방향으로 1차 복사기를 이동시켰을 때 수신되는 이득의 변화 및 수직방향에 대하여도 아울러 해석하였다.

수직 방향으로의 Defocusing이 축 방향보다는 매우 급격한 이득의 변화를 초래하며 F/D가 작을수록 더욱 심함을 알 수 있다.

따라서 축 방향의 Defocusing보다는 수직 방향의 Defocusing에 유의해야 한다.

그림 5는 Y.H. Ja가 제시한 축 방향으로 Defocusing된 경우 위상 pattern을 나타내었다.[11][12]

이상과 같이 수치계산 결과를 비교, 검토한 바 다음 결과를 얻을 수 있었다.

1) 이득의 변화는 위상 pattern과 밀접한 관계가 있었으며 이득이 급격히 감소하는 점과 위상 pattern이 불연속되는 점이 일치함을 알 수 있었다.

2) F/D가 작을수록 미소한 Defocusing 상태가 되어도 이득의 감소를 초래하므로 직경이 큰 천체 망원경, 위성 통신용 지구국 반사기 안테나 등은 매우 정확한 focusing이 요구된다.

3) 초점에서 수직으로 Defocusing이 축 방향으로의 Defocusing보다 매우 급격한 이득의 감소가 나타나므로 수직 방향으로의 Defocusing에 유의해야 한다.

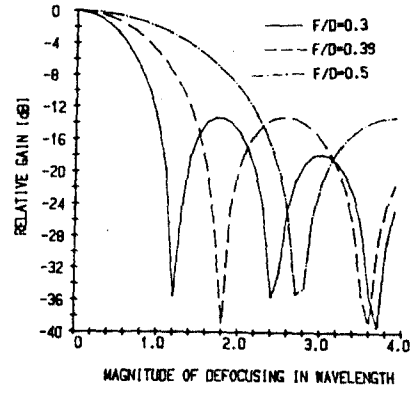


그림 3.(a) 전류 분포법에 의한 축방향 Defocusing의 이득변화

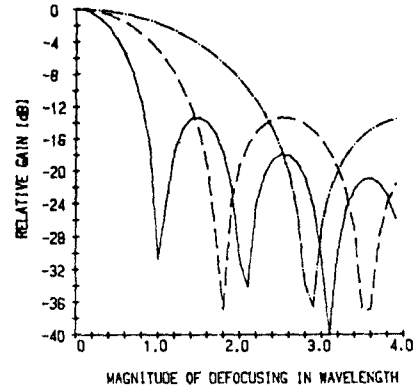
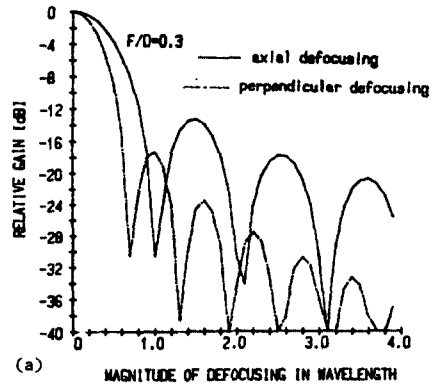
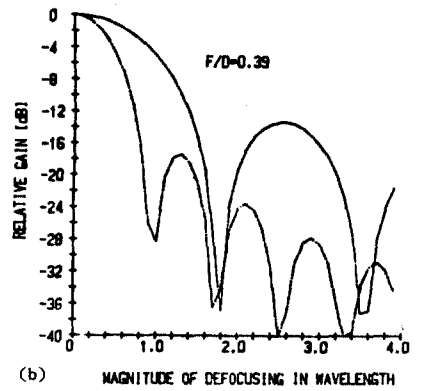


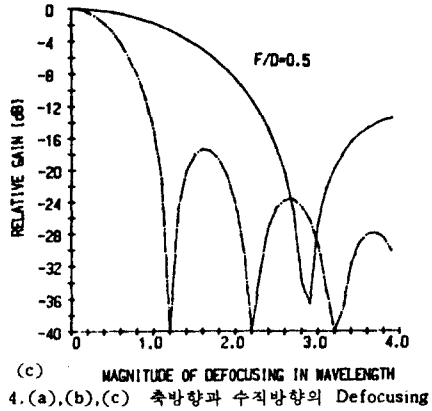
그림 3.(b) Huygens-Fresnel 원리에 의한 축방향 Defocusing의 이득변화



(a)



(b)



(c)

그림 4.(a),(b),(c) 축방향과 수직방향의 Defocusing에 대한 이득변화

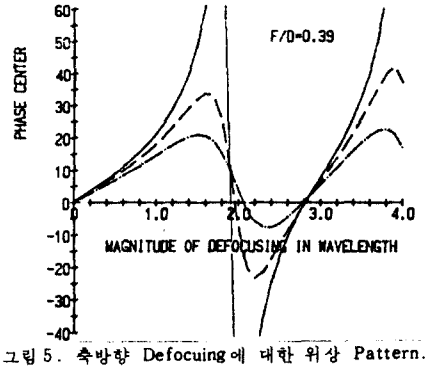


그림 5. 축방향 Defocuing에 대한 위상 Pattern.

5. 실험 및 결과

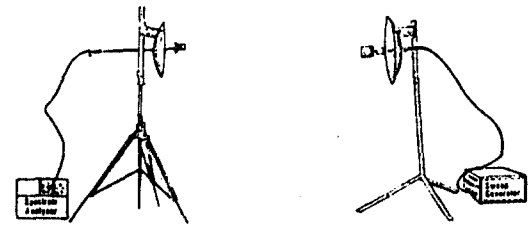


그림 6. 실험장치

안테나의 규격과 1차 복사기 차이로 인한 오차를 줄이기 위하여 송·수신 포물면경 반사기 안테나의 규격이 같은 것을 이용하였고, 1차 복사기(Capped dipole feed)도 같은 종류로 하였다.

그림 6과 같이 송신 안테나는 Sweep Generator를 연결하고 수신 안테나는 Spectrum Analyser를 연결한 후 Sweep Generator의 주파수는 2(GHz)로 고정하였다.

수신측 안테나의 1차 복사기를 연결한 급전 원형도파관을 충분히 길게하여 축 방향으로 4파장까지 1차 복사기를 이동 가능하도록 하였다.

수신 안테나 반사기 초점에서 $\frac{1}{4}$파장씩 축 방향으로 1차 복사기를 이동시키면서 Spectrum Analyser에 나타난 수신 이득의 측정치는 그림 7과 같다.

F/D가 0.39인 본 실험의 반사기 안테나의 실험치와 이론치를 비교해 본 결과 축 방향의 Defocusing에 대한 이득의 변화는 초점으로부터 2.0파장까지는 약 3dB 정도 차이가 있었으며, 이득이 급격히 감소하는 Defocusing된 점은 이론치가 1.78 파장인 반면에 실험치는 1.75파장으로 대체적으로 접근되고 있음을 알았다.

그러나 2.0파장을 지나면 이론치와 실험치의 결과가 보다 많은 차이가 있었으며 이득이 급격히 감소하는 두번째 점은 이론치가 3.6파장인 반면에 실험치는 3.25파장으로 0.45파장 정도 차이가 있었다.

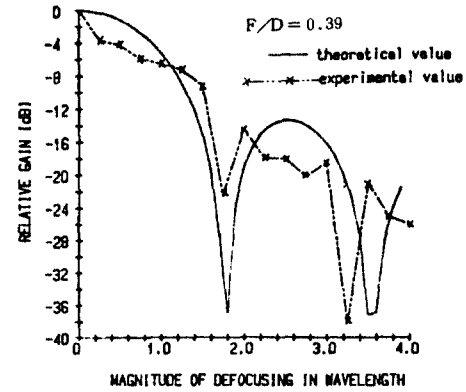


그림 7. 축방향의 Defocusing에 대한 이득변화의 실험치

이론치와 실험치가 완전히 일치를 이루지 못한 원인은 첫째 본 실험을 옥외에서 행하였으므로 외부의 전파 간섭이 가장 큰 원인이며, 둘째 급전 원형 도파관을 길게 하였으므로 이로 인한 손실에 기인된다고 생각된다.

따라서 무반사실(Anti-Echo Chamber)에서 실험한다면 보다 정확한 실험치를 얻을 것으로 기대된다.

6. 결 론

전류분포법과 본 논문의 방법과 비교해 본 결과 본 논문에서 제시한 방법이 타당함이 입증되었고 F/D가 0.39인 경우 이론치와 실험치를 비교, 검토해 본 결과 타당한 결과를 얻었다.

또한 수직과 축 방향으로의 이득의 변화에 대하여 해석한 결과 수직 방향의 Defocusing에 유의해야 하며 반사기의 직경이 큰 경우 작은 경우보다 Defocusing에 따른 이득의 변화가 크므로 보다 정확히 초점을 결정하여야 한다.

1차 복사기의 테이퍼(taper)에 따라 1차 복사기가 Defocusing되었을 때 이득 변화에 대하여도 검토가 필요하다고 본다.

본 논문은 포물면경 반사기 안테나 제작시 정확한 초점을 결정하여 이득을 최대화 하는데 기여하게 될 것이다.

REFERENCE

1. Jasik, "Antenna Engineering Hankbook" Mcgrow-Hill pp.12-1-13, 1984
2. Per-Simon Kildal "Combined E and H-plane Phase Center of Antenna Feeds" IEEE Trans, Antennas Propagat. Vol.AP-31, No.1, pp.199-202, Jan. 1983
3. L. Shafai, "Phase Center Calculations of Reflector Antenna Feeds" IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol.AP-32 No.7, pp.740-742, July. 1984
4. Y.Y. Hu, "A Method of Determining Phase Centers and its Application to Electromagnetic Horns" J. Franklin Inst. pp.31-36, 1961
5. D. Carter, "Phase Center of Microwave Antennas "IRE Trans. Antennas Propatat. pp.597-600, 1956
6. V.T. Rusch, "Radiation From a Paraboloid with an Axially Defocused feed" IEEE Trans. Antennas Propagat Vol. AP-21, pp.104-106, Jan. 1973
7. B.M. Thomas, "Fields in the Image Space of Symmetrical Focusing Reflectors" Proc. IEEE Vol.115, No.10, pp.1419-1430, Oct. 1968
8. S. Silver, "Microwave Antenna Theory and Design" McGRAW-HILL, pp.107-109, 1948
9. M. Born and E. Wolf, "Principle of Optics" Newyork Pergamon, pp.370-372, 1959
10. G.N. Watson, "A Treaties on the Theory of Bessel Functions" Cambridge University Press pp.537-542, 1922
11. Y.H. JA, "Phase Center of Paraboloidal Antennas" Elect. Letters Vol.15, No.24, pp.784-785, 1979
12. Y.H. JA, "Phase Center Location of a Paraboloidal Reflector Antenna with an Axially Defocused Feed" IEEE TRans. Antennas Propagat. Vol.AP-28, No.6, Nov. 1980