

# 슬로트 배열형 안테나 설계 (Design of a Slotted Array Antenna)

張 根 鎬\* , 金 允 溟\*\*  
(Jang, Guen Ho and Kim, Youn Myung)

### 要 約

최근에 생산되는 X-band 用 레이더 안테나는 거의가 導波管에 슬로트들을 만들어 쓰고 있다. 슬로트들의 거리와 기울어진 각도를 적절히 조절하여 낮은 定在波比와 아주 얇은 부채꼴 빔(fan beam)을 얻는데, 이 論文에서는 그 설계자료를 구하였다. 그 설계치에 따라 실제 제작된 안테나의 성능들을 측정하고 계산치와 비교 검토하였다.

### Abstract

Many of the modern radar antennas operated in the X-band frequencies are made of the slotted waveguides.

Varying the distances between the slots and the skew angles of the each slot, we can synthesize a very sharp fan-beam as well as maintaining low standing wave ratio.

This paper deals with the design data of the above antennas.

We made a slotted array antenna with the data and measured the antenna parameters. And these were compared with the calculated values.

### 1. 序 論

항해에 사용되는 레이더 중 많은 수가 9375 ± 30 MHz 대역에서 동작한다. 이 레이더에 들어가는 導波管안테나에 적절히 배열된 슬로트들을 만들어 원하는 빔폭이나 利得을 얻고있다.<sup>[1]</sup>

이제 水平面의 빔폭이 1.6°, 副葉의 세기가 ± 10° 以內에서는 -23 dB 以下이고 그 外에서는 -30 dB 以下인 안테나를 만들어 보고자 한다. 빔의 極性(polarization)은 電場이 水平面과 平行되도록 한다.

### 2. 導波管의 슬로트에서 유기되는 電磁場

그림 1과 같이 矩形 導波管의 좁은 면에 슬로트가 파여져 있는 경우를 생각하여 본다.<sup>[2]</sup>

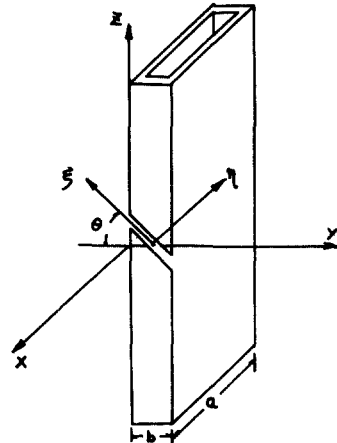


그림 1. 도파관의 좁은 면에 슬로트가 파여져 있는 경우.  
Fig.1. A waveguide slot in narrow wall.

\* 正會員, 금성정밀중앙연구소  
(Central Research Lab., Gold Star Precision Company)

\*\* 正會員, 檀國大學校 工科大學 電子科  
(Dept. of Electronics, Dankook University)  
接受日字: 1980年 4月 10日

우선 슬롯트가 없을 때 이 도파관 内の TE<sub>10</sub> mode의 磁場은 다음과 같이 표시된다.

$$H_z = H_1 \cos \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \dots\dots\dots(1a)$$

$$H_x = \frac{j\alpha\beta H_1}{\pi} \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \dots\dots\dots(1b)$$

$$H_y = 0 \dots\dots\dots(1c)$$

$$\text{단, } \beta = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - (\pi/a)^2}$$

슬롯트를 만들었을 때 도파관 内の 場이 변하지 않았다고 가정하면 슬롯트를 따라 發生되는 磁場 H<sub>ξ</sub>는,

$$\begin{aligned} H_\xi &= H_z \sin \theta - H_y \cos \theta \\ &= H_1 \sin \theta e^{-j\beta \xi} \sin \theta \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

슬롯트에서 유기되는 磁場이 식(2)와 같이 表現되므로 슬롯트에서 도파관外部로 복사되는 電力은 sin<sup>2</sup>θ에 비례하게 된다.

3. 안테나 設計

안테나의 형태는 그림 2와 같이 end-fed slotted array로 한다.

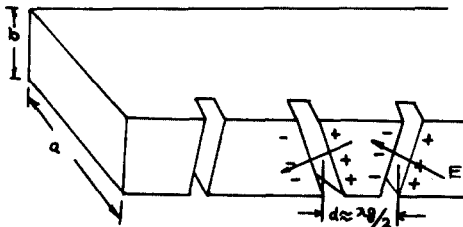


그림 2. 左側 끝에서 給電되는 슬롯트 配列形 안테나  
Fig. 2. End-fed slotted array antenna.

給電을 왼쪽에서 할 때 給전된 電力은 한 슬롯트를 지날 때마다 外部로 복사되고, 복사되지 않은 나머지의 전력은 다음 슬롯트로 給電된다. 슬롯트에서의 磁場은 슬롯트의 方向으로 生成되고 電場은 그 수직방향, 즉 하나의 슬롯트를 가장 가깝게 가로지르는 方向이 된다.

한 슬롯트의 중심에서 다음 슬롯트의 중심까지의 거리를 導波管波長의 약 절반으로 하면 수평방향의 電場은 서로 加算이 되고 수직방향의 電場은 서로

減算이 되어 결국 전체적인 빔의 極性は 水平的으로 된다.

이제 여타히 슬롯트간의 거리와 각 슬롯트의 기울어진 角을 조정하여 안테나의 낮은 定在波比(SWR)와 원하는 빔幅을 얻을 것인가에 대하여 고찰한다.

3.1 슬롯트 사이의 거리

X-band用 도파관 WR-90의 가로길이 a는 22.9 mm이고 세로길이 b는 10.2 mm이다. 레이더의 중심주파수 9375 MHz에서 自由空間에서의 半波長 λ는 32.0 mm이다. 이 도파관에서 TE<sub>10</sub> mode의 차단주파수의 파장 λ<sub>c</sub>는 2a로서 46 mm이고 도파관 파장 λ<sub>g</sub>는 λ/√[1-(λ/λ<sub>c</sub>)<sup>2</sup>]로서 44.5 mm이다.

안테나의 슬롯트를 모두 59개 만들고 그림 3과 같이 그 중 한 가운데의 슬롯트(30번째)에서 방사되는 電場의 세기를 E<sub>0</sub>라 하자. 그 左右의 슬롯트에서 나오는 電場의 세기는 서로 같다고 생각하여 E<sub>m</sub> 등으로 표기할 때, 안테나 중심축에서 각도 ϕ만큼 기울어진 충분히 먼 地點에서의 全 電場의, 相對적인 크기는 [3],

$$\begin{aligned} |E| &= |E_0 + E_1 \exp \left[ j \left( \frac{2\pi d}{\lambda_g} - \pi - \beta' d \sin \phi \right) \right] \\ &+ E_1 \exp \left[ -j \left( \frac{2\pi d}{\lambda_g} - \pi - \beta' d \sin \phi \right) \right] \\ &+ E_2 \exp \left[ j \left( \frac{2\pi \cdot 2d}{\lambda_g} - 2\pi - 2\beta' d \sin \phi \right) \right] \\ &+ E_2 \exp \left[ -j \left( \frac{2\pi \cdot 2d}{\lambda_g} - 2\pi - 2\beta' d \sin \phi \right) \right] \\ &+ \dots\dots \\ &= |E_0 + 2 \sum_{m=1}^{29} E_m \cos m \left( \frac{2\pi d}{\lambda_g} - \pi - \beta' d \sin \phi \right)| \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

여기서 β'은 2π/λ로서 1.96이다. 식(3)의 位相에서 2mπd/λ<sub>g</sub>는 E<sub>0</sub>와 E<sub>m</sub> 사이의 거리 md 때문에 생기는 位相差이고, -mβ'd sin ϕ는 E<sub>0</sub> 및 E<sub>m</sub>의 傳播經路의 差에 의한 것이며, -mπ(또는 +mπ)는 슬롯트들이 서로 엇갈려 파여져 있어 入射波가 한 슬롯트를 지날 때 마다 수평 成分의 電場이 180° 位相변화를 부가시키기 때문이다.

최대의 電力이 指向되는 각도 ϕ<sub>max</sub>는

$$\frac{2\pi d}{\lambda_g} - \pi - \beta' d \sin \phi = 0$$

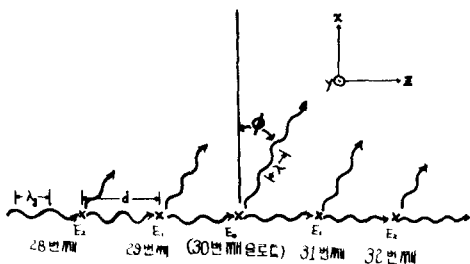


그림 3. 各各의 슬로트에서 복사되는 빔  
Fig. 3. Beam from the each slot.

일 때 이며 따라서,

$$\sin \phi_{max} = \frac{(2 \pi d / \lambda_g) - \pi}{\beta' d} \dots (4)$$

이다.  $d$ 가  $\lambda_g/2$  (22.3 mm)이면  $\phi_{max} = 0^\circ$ 가 되어 안테나의 기계적 수직축과 전기적 수직축이 서로 일치할 것이지만 이때는 각 슬로트에서 給電部로 반사되는 電力이 모두 同位相이 되어 그림 4와 같이 반사가 아주 크게 된다. (VSWR > 5.0) 따라서  $d$ 는  $\lambda_g/2$ 와 비슷한 값으로 하되 그림 4를 보아 안테나의 반사계수가 낮은 값 (-30 dB 이하)이 되는 1.1  $\lambda_g/2$  ( $\approx 24.5$  mm) 이상으로 하고 그 중 실제 제작에 편리한 25.0mm로 결정한다. 이때는  $\phi_{max} = 4.4^\circ$ 가 되어 主葉이 기계적 수직축을 指向하지는 않지만 나중에 레이다의 표적정조준(boresight)을 다시 하기 때문에 아무 문제가 되지 않는다.

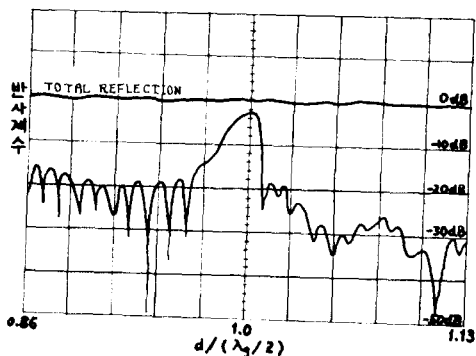


그림 4. 안테나 反射係數. 橫軸은  $d/(\lambda_g/2)$ 이고 縱軸은 反射係數이다. 實察는 入力周波數를 sweep하여 導波管波長을 변화시킨다.

Fig. 4. Reflection coefficient of the antenna. The abscissa axis is  $d/(\lambda_g/2)$  and the ordinate axis is the reflection coefficient.

3.2 슬로트의 기울어진 각도

식(3)을 보면  $E_0$  및  $E_m$ 들은  $E(\phi)$ 의 Fourier 級數 중 零번째 項에서 29번째 항까지의 Coefficient로 볼 수 있다.<sup>[3]</sup>

따라서,

$$|E| = |E_0 + 2 \sum_{m=1}^{29} E_m \cos m \psi| \dots (5a)$$

$$E_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} E(\psi) d\psi \dots (5b)$$

$$E_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} E(\psi) \cos m \psi d\psi \dots (5c)$$

$$\text{단, } \psi = \frac{2\pi d}{\lambda_g} - \pi - \beta' d \sin \phi \dots (5d)$$

복사되는 場이 그림 5의 모양이라고 가정할 때, 식(5d)를 적용하면  $E(\psi)$ 는 그림 6과 같이 된다.

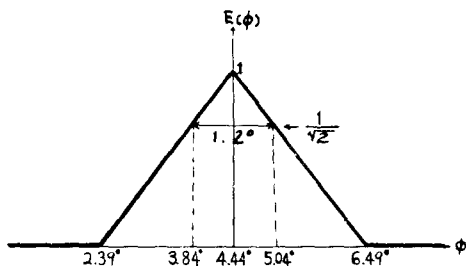


그림 5. 처음에 假想하는 輻射패턴  
Fig. 5. Radiation pattern assumed initially.

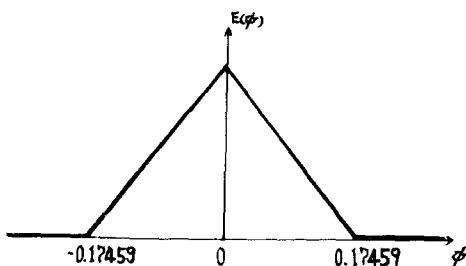


그림 6.  $\phi$ 의 스케일을 식(5d)와 같이 변형할 때 그때의 복사패턴인  $E(\psi)$   
Fig. 6. Radiation pattern  $E(\psi)$ .  $\psi$  and  $\phi$  are related in equation (5d).

$E(\psi)$ 의 각 Fourier Coefficient를 구한 다음 거꾸로 식(5a)에 따라 30項을 전부 합하여 볼 때  $E(\phi)$ 는 그림 7과 같이 된다. (Appendix 1참조)

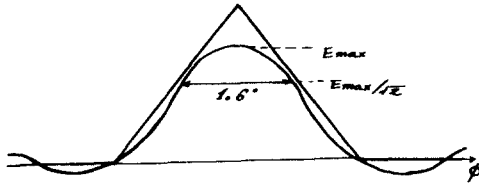


그림 7. 輻射패턴. 直線은 처음에 가정한 것이고 曲線은 Fourier 級數의 總和이다.

Fig. 7. Radiation pattern. The straight lines are the presupposed pattern and the curve is the summation of the Fourier series.

그림 7에서 삼각형은 처음에 가정한 輻射形狀이고 曲線은 Fourier 級數의 總和이다.

슬로트의 갯수가 2개 많아지면 Fourier 級數의 項이 하나 많아지고 合成된 場의 형태는 처음에 가정한 것으로 접근한다.

n 번째 슬로트에서 복사되는 전력 P<sub>n</sub> 은 식(2)에서 알 수 있듯이 sin<sup>2</sup>θ<sub>n</sub>에 비례하고, 또 入射되는 전력에 비례하므로 (Appendix 2 참조),

$$P_1 = h \left( \sum_{n=1}^{59} P_n \right) \sin^2 \theta_1 \dots\dots\dots (6a)$$

$$P_n = h \left( \sum_{n=1}^{59} P_n - \sum_{n=1}^{n-1} P_n \right) \sin^2 \theta_n, n \geq 2 \quad (6b)$$

슬로트의 幅이 넓어지면 h도 커지며, 특별히 幅이 2.0mm 일 경우 h는 산란계수 측정에 의한 실험적인 값으로 1.4가 된다.

한편 식(6)을 식(3)의 표기법으로 바꾸어 쓰면,

$$|E'_1|^2 = 1.4 \left( \sum_{n=1}^{59} |E'_n|^2 \right) \sin^2 \theta_1 \dots\dots\dots (7a)$$

$$|E'_n|^2 = 1.4 \left( \sum_{n=1}^{59} |E'_n|^2 - \sum_{n=1}^{n-1} |E'_n|^2 \right) \sin^2 \theta_n, n \geq 2 \dots\dots\dots (7b)$$

여기서,

$$E'_n = \begin{cases} E_{50-n}, & n \leq 30 \\ E_{n-30}, & n > 30 \end{cases} \text{ 이다.}$$

4. 안테나 設計 Data

그림 5와 같은 빔의 형태를 가상하여 식(5) 및

식(7)로서 n 번째 슬로트의 기울어진 각도 θ<sub>n</sub>을 계산해 보면 (Appendix 3 참조),

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ <sub>n</sub>	0.5	0.6	0.8	1.1	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	3.1

11	12	13	14	15	16	17	18	19
3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.1	7.6

20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
8.2	8.7	9.3	9.8	10.4	11.0	11.5	12.1	12.7	13.3	13.8

31	32	33	34	35	36	37	38	39
14.4	15.0	15.7	16.1	16.7	17.3	17.8	18.4	19.0

40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
19.6	20.3	20.9	21.5	22.2	22.9	23.6	24.4	25.1	26.0	26.8

51	52	53	54	55	56	57	58	59
27.8	28.8	29.9	31.2	32.8	34.8	37.6	42.7	57.6

(θ<sub>n</sub>의 單位는 度임)

또한 E(φ)를 식(3)에 따라 구하여 다음의 계산치를 얻는다.

- 수평 빔幅 : 1.6°
- 첫 副葉 : 1.8° 및 7.1°에서 -37 dB
- φ<sub>max</sub> : 4.4°
- 利得 : 32 dB

계산된 빔의 형태는 그림 8의 實線과 같다.

5. 시험 결과 및 검토

안테나를 제작하여 동작주파수 9375 ± 30 MHz에서 시험할 때, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 수평 빔幅 : 1.4 ~ 1.6°
- 첫 副葉 : -25 dB
- φ<sub>max</sub> : 4.5°
- 利得 : 29 ~ 30 dB
- VS WR : 1.08 ~ 1.10

안테나의 利得은 계산치보다 2 ~ 3 dB 떨어지는데 이것은 안테나의 효율이 50 ~ 60% 임을 의미한다.<sup>[4]</sup>

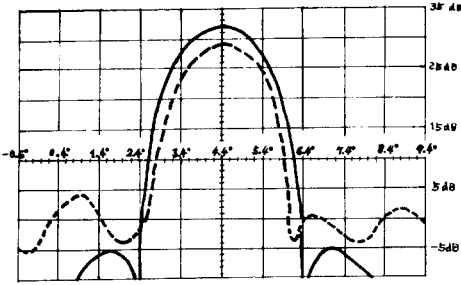


그림 8. 輻射패턴. 굵은 선은 계산된 것이며 점선은 측정된 것이다.

Fig. 8. Radiation pattern. The bold line is the calculated and the dotted line is the measured one.

수평 빔폭 및 主葉指向角  $\theta_{max}$  는 계산치와 측정치가 거의 합치하고 있으나, 副副葉의 레벨은 시험 결과치가 계산치보다 12dB나 높은데, 이것은 안테나의 제작 중에 생긴 기계적 오차에 기인한 것으로 본다.

謝 辭

안테나 解析을 함께 하신 東洋나일론의 崔順達 박사님, 안테나 제작 및 시험을 해 주신 金星精密工業株式會社의 朱師中氏와 金在淳氏 그리고 論文 제

에 도움을 준 檀國大學校 電子科 유성대君과 차준호君에게 깊은 감사를 드리는 바이다.

參 考 文 獻

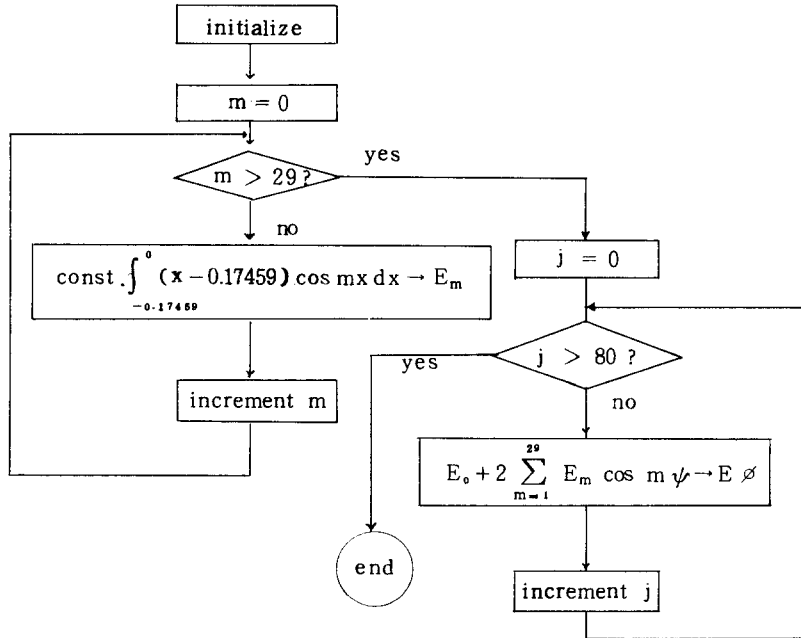
1. 朴麒洙, 朴漢奎, 超高周波工學, 淸文閣, pp. 13-14~13-16, 1980.
2. Wolff, Antenna Analysis, John Wiley and Sons, pp. 169~178, 1967.
3. Jordan and Balmain, Electromagnetic Waves and Radiating Systems, Prentice Hall, pp. 431~432, 1968.
4. Wolff, Antenna Analysis, John Wiley and Sons, p. 13, 1967.

Appendix 1

복사패턴은  $0^\circ$ 에서  $8^\circ$ 까지  $0.1^\circ$ 씩 나누어 계산하기로 한다. 主葉이  $\theta = 4.4^\circ$  이기 때문에  $0^\circ$ 에서  $8^\circ$  사이에 들어가며, 계산을 하여보면 第一次 및 二次副葉도 그 사이에 포함된다.

식(5b) 및 (5c)에서 Fourier 계수를 계산함에 있어서  $E(\psi)$ 가 even function 임에 유의하고 그림 6의 적분구간  $-0.17459$ 에서  $+0.17459$  까지를 전부 20 등분한다.

HP 9825 Programmable Calculator에 의한 프로그램 및 그 flow chart 는 다음과 같다.



Appendix 2

만약 안테나에서 給電된 電力의 반사가 전혀 없다면 각 슬로트에서 복사되는 전력의 總合은 안테나 給電部의 給電電力이 될 것이다. n번째 슬로트에 給電되는 電力은 總電力에서 1번째부터 n-1번째까지의 슬로트에서 복사된 양을 빼낸 電力 즉,

$$\sum_{n=1}^{59} P_n - \sum_{n=1}^{n-1} P_n \text{ 이 된다.}$$

이 電力과 슬로트 경사각의 sine의 제곱에 비례하여 각 슬로트에서 電力이 복사되기 때문에 식(6a) 및 (6b)가 성립한다.

만약 안테나에서 電力이 一部 반사된다면(그림 4 참조), 식(6a) 및 (6b)는,

$$P_1 = h \frac{\sum_{n=1}^{59} P_n}{1 - \alpha} \sin^2 \theta_1$$

$$P_n = h \frac{\sum_{n=1}^{59} P_n - \sum_{n=1}^{n-1} P_n}{1 - \alpha} \sin^2 \theta_n, n \geq 2$$

이 된다.  $\alpha$ 는 반사되는 電力과 입사되는 電力의 비로서 각 슬로트들 사이의 거리 d의 함수이다.

반사되는 電力을 고려하여  $\theta_1$  및  $\theta_n$ 을 구하는 프로그램을 작성한다면 appendix 3의 프로그램中 23번째 line 다음에  $Z/(1-\alpha) \rightarrow Z$ 를 삽입하면 된다.  $\alpha = 0.002$ (0.2%반사)로 하여 계산한 각 슬로트들의 경사각은 本文의  $\theta_n$ 과 비교하여 볼 때, 1번째 부터 48번째 슬로트까지는  $\pm 1^\circ$ 以内로 서로 合致하고 52번째 슬로트에서  $25.3^\circ$ 가 되어 最大의 경사각이 되며 그 다음의 경사각들은 점차 감소하여 59번째는  $11.0^\circ$ 가 된다.

```

0: fxd 6:rad
1: dim E[0:29]
2: .17459+C
3: C/10+G
4: G/2+H
5: C*C+S
6: 1/S+P
7: for M=0 to 29
8: 0+A
9: for I=1 to 10
10: -C+H+(I-1)*
    G*X

```

```

11: X+C+E
12: A+E*cos(M*
    X)*G+A
13: next I
14: A*P*2+E[M]
15: next M
16: for J=0 to
    80
17: J/10*pi/180+U
18: E[0]+F
19: for M=1 to
    29
20: F+2*E[M]*
    cos(M*(.380373-
    4.90874*sin(U)
    )+F
21: next M
22: prt F
23: next J
24: end
*23343

```

Appendix 3

복사패턴을 구하는 프로그램(Appendix 1 참조)과 마찬가지로 그림 6의 적분구간을 모두 20 등분하고  $E(\psi)$ 가 even function 임에 유의한다.

HP 9825 Calculator에 의한 프로그램 및 그 flow chart는 다음과 같다.

```

0: fxd 6:rad
1: dim F[0:59],
  T[59]
2: .17459+C
3: C/10+G
4: G/2+H
5: C*C+S
6: 1/S+P
7: for K=0 to 29
8: 0+A
9: for I=1 to 10
10: -C+H+(I-1)*
    G*X
11: X+C+E
12: A+E*cos(K*
    X)*G+A
13: next I

```

슬로트 배열형 안테나 설계

```

14: A=A*P*P*4+F[
    K+30]
15: next K
16: for J=1 to
    29
17: F[30+J]+F[30
    -J]
18: next J
19: 0+Z
20: for L=1 to
    59
21: prt F[L]
22: Z+F[L]+Z
23: next L
24: spc 5
25: 0+F[0];0+U
26: for N=1 to
    59
27: U+F[N-1]+U
28: r(F[N]/1.4/
    (Z-U))+V
29: 180/π*asn(V)
    +T[N]
30: prt N;T[N];
    spc
31: next N
32: end
*30651
    
```

