

스포트 어레이 안테나에서의 전자적 빔주사

梁 圭 植

Electronical beam scanning in slot array antenna

Yang Gyu Sik

Abstract

Radio beam should be scanned in all direction to search the surrounding object. In most radar, mechanical rotating antenna system was adapted for this purpose. But mechanical rotating antenna need the driving portion and have some difficulties to drive the heavy antenna unit in bad weather such as rain, snow, and strong wind. Especially in the moving vehicle, there is more restrictions in space and so on. So electronical scanning antenna was studied and developed to phased array antenna which use a lot of expensive phase shift elements. Because of those high price element, phased array antenna was used in special military purpose only. Accordingly more economic method to scan the radio beam without mechanical movement by using ferrite phase shifter in slot array antenna with simple structure was studied. Also beam scanning was confirmed by experiment with controlling the dc magnetic field around the ferrite rod.

1. 서 론

마이크로파를 이용한 물체의 탐색은 레이더의 개발을 필요하게 하였으며 어느한쪽 방향이 아닌 전방향의 탐색을 위해서는 360° 전방향으로 전파를 방사할 수 있어야 한다.

그 방법으로서는 전파 발사체인 안테나 유니트를 기계적으로 회전시키는 기계적 빔 주사 방법과 안테나 유니트는 고정시켜 두되 방사되는 전파 빔만을 회전시키는 전자적 방식의 빔 주사방법이 있다.

그러나 기계적 빔 주사방식의 경우 다음과 같은 결점이 있어 전자적 방식에 의한 빔 주사를 실현한 전자주사 안테나에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며 현재 일부 군사용 항공기 함정 및 대공용으로 실용화도 되고 있다.

그 결점으로서는

첫째, 빔 주사속도가 느리다.

둘째, 기상(눈, 비, 강풍 등)의 영향을 받는다.

셋째, 이동체에서는 설치공간에 제한을 받으며 물리적인 제약도 있다.

넷째, 기계적인 가동부분의 결함이 전체 시스템의 신뢰도를 떨어뜨리는 등이다.

한편 군사용 전자주사 안테나의 경우는 수많은 별개소자로 구성된 안테나의 방사패턴을 제어하기 위해 고가의 이상기(phase shifter)를 각 소자마다 사용하고 있기 때문에 경제적인 문제 때문에 민간용도로는 거의 실용화 되지 못하고 특별한 군사목적으로만 사용되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 현재 선박 항해 보조용으로 사용되는 슬롯 어레이 안테나(slot array antenna)를 이용하여 기계적인 회전없이 전파 빔을 주사하기 위해 페라이트 이상기를 사용한 이상(phase shifted)신호와 위상 변화를 받지 않은 신호를 합성시켜 방사시키는 실험을 하였으며 실제로 전파 빔이 움직일 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 슬롯 어레이 안테나(Slot array antenna)

몇 개의 방사소자를 규칙적으로 배열하여 일정한 여진조건으로 급전하도록 만들어진 안테나를 Array antenna 혹은 단순히 Array라고 한다. 이는 그 배열 형태에 따라 직선상으로 배열된 Linear array, 평면상으로 배열된 planar array, 원형상으로 배열된 Circular array가 있으나 본 연구에서는 Linear array의 일종인 Slot array antenna를 대상으로 하였다.

또한 배열된 소자의 간격에 따라 등간격 어레이 혹은 부등간격 어레이 등이 있으나 등간격 어레이를 대상으로 하였다.

슬롯 안테나는 구형(Rectangular) 또는 원형(Circular) 도파관에 슬롯을 만들어

이를 통해 전파가 방사되도록 한 구조로서 통상 선박에서 레이더 안테나로 사용되고 있는 스톱트 어레이 안테나는 구형 도파관의 좁은면에 일정한 경사를 갖는 스톱트를 서로 일정한 간격으로 엇갈리게 만들어 “八”자 형태로 만들어진 안테나를 말한다.

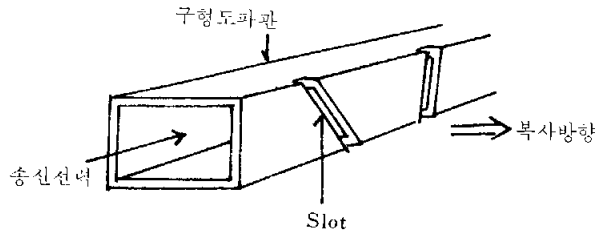
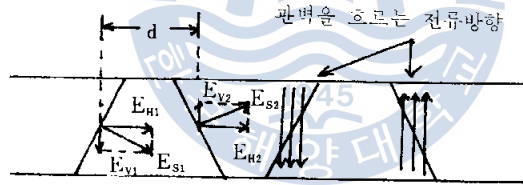


그림 1. Slot안테나의 구조



d = Slot의 간격
 E_{S1}, E_{S2} : 단일 Slot1,2로부터의 복사전계
 E_{H1}, E_{H2} : Slot1,2에서의 복사전계의 수평성분
 E_{V1}, E_{V2} : Slot1,2에서의 복사전계의 수직성분

그림 2. 인접 Slot에서의 복사전계

그림 1과 같이 도파관 벽에 Slot를 만들면 도파관 내벽을 흐르는 전류 분포에 교란을 일으켜 도파관내의 전파와 에너지를 자유공간에 방사할 수 있다.

한편 그림 2에서 보는바와 같이 Slot에서 생긴 전계는 Slot에 직각인 방향으로 E_{S1}, E_{S2} 의 크기로 생기는데 이는 다시 수직인 성분 E_{V1}, E_{V2} 및 수평인 성분 E_{H1}, E_{H2} 로 나누어 생각할 수 있으며 E_{V1} 과 E_{V2} 는 서로 상쇄되고 E_{H1} 과 E_{H2} 는 서로 합쳐져서 수평방향에는 강력한 전파가 만들어지는 원리를 이용하고 있다.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n + P_L = \sum_{r=1}^n KP_r + P_L$$

$$\therefore K = \frac{P - P_L}{\sum P_r} (\eta : \text{Array의 능률})$$

$$\text{또 } \gamma_1 = \frac{\text{제1 slot에서의 방사되는 전력}}{\text{입력전력}} = \frac{KP_1}{P} = \eta \frac{P_1}{\sum P_r}$$

$$\gamma_2 = \frac{\text{제2 slot에서 방사되는 전력}}{\text{제2 Slot에의 입력전력}} = \frac{KP_2}{P - KP_1} = \frac{\gamma_1 (P_2/P_1)}{1 - \gamma_1}$$

마찬가지로 r번째 Slot에 대하여는 다음과 같이된다.

$$\gamma_r = \frac{\gamma_1 (P_r/P_1)}{1 - \gamma_1 \sum_{m=1}^{r-1} (P_m/P_1)} = G_r$$

이와 같이 하여 Slot의 상대 방사전력이 주어지면 위 식으로부터 임의의 Slot의 누설전력 즉 정규화 Conductance G_r 이 구해진다. 그러면 그림 4로부터 Slot의 기울기 θ 도 구할 수 있게 된다. 개구면 전계분포가 일정하다고 가정하고 구해본 각 Slot의 Conductance와 기울기의 일예가 그림 6에 잘 나타나 있다.

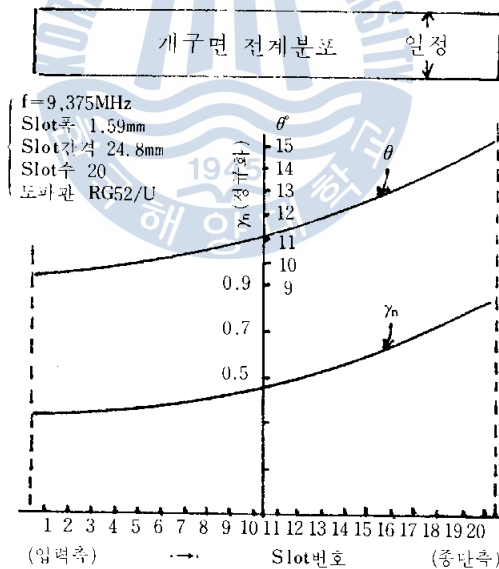


그림 6. 개구면 전계분포가 일정할 때의 각 Slot의 기울기 및 정규화 Conductance

3. 이상기(Phase shifter)

Phase shifting 소자는 크게 3종류로 나누어 볼 수 있다.

- ① 고정 이상기(fixed phase shifter)
- ② 기계적 방식으로 구동되는 가변이상기
- ③ 전자적 방식으로 구동되는 가변이상기

고정 이상기는 전송선의 길이로서 위상을 편이시키는 가장 간단한 방법 중의 하나이다.

따라서 고정 beam을 방사하기 위한 Array안테나에 사용된다. 가변 이상기는 전송선의 전기적인 길이를 변화시키는 것에 기준하여 물리적으로 전송선을 길게 혹은 짧게 하는 방법과 전자적인 방법으로 전송선의 전기적 길이를 변화시키는 방법이 있다.

전자는 Line stretcher, Rotating mechanical phase shifter 등과 도파관 쪽을 기계적으로 가변시켜 위상변화를 얻었던 Eagle scanner 등을 예로 들 수 있다.

이상의 기계적 제어방식의 이상기의 경우 Switching time은 0.1초 내외이지만 안테나 자체를 기계적으로 회전시키는 것보다는 훨씬 빠르게 제어할 수 있다.

한편 전자적 제어방식의 이상기는 Ferrite, Gaseous discharge, Travelling wave tube 및 PIN diode 등에 의해서 가능하다. Ferrite 이상기는 Ferrite를 감싸는 직류자계의 변화로서 출력신호의 위상을 변화시킬 수 있을 뿐 아니라 작은 구조로 삽입손실 1dB정도 실현이 가능하며 Switching time도 수십 m sec정도인 장점을 갖고 있다.

Gaseous discharge 이상기는 자유전자의 수와 가스매질의 유전상수의 변화에 기초하여 위상변화를 얻으며, TWT는 Helix전압의 변화에 의해 신속한 전자제어 위상변화를 얻을 수 있다.

TWT의 장점은 넓은 주파수 대역에 걸쳐 증폭이 가능하고, 저잡음 지수를 얻을 수 있으나 쌍방향 소자는 되지 못하므로 송신과 수신을 위한 별도의 위상지연회로가 필요하다.

또한 Varactor diode의 bias 값을 가변시켜 Reactance를 변화도록 하여 위상의 변화를 얻는 방법도 있다.

이 이상기는 Compact하고 신속하며 효율도 좋으나 취급출력 레벨에 제한을 받고 또한 Phase shift-Bandwidth product에 제한을 받는다.

$$\begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu & jk & 0 \\ jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} \text{이다.}$$

여기에서 $\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{W_0 W_m}{W_0^2 - W^2}\right)$

$k = -\mu_0 \frac{W_0 W_m}{W_0^2 - W^2}$ 이며

b와 h사이에는 비례관계가 성립하지 않는다. 이때 b와 h사이의 관계를 지어주는 투자율 μ 는

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu & -jk & 0 \\ jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix} \text{가 되며 이것을 Ferrite의 텐서(tensor) 투자율이라고 부른다.}$$

결국 RF장계의 원형 분극이 전자회전의(Gyroscope)의 회전과 반대일 때 Ferrite는 μ_0 보다 작은 투자율을 가지며 Ferrite자체의 고유저항에 기인하는 것 외에는 RF에너지를 흡수하지 않으나, 분극이 전자회전의의 회전과 같을 때는 μ_0 보다 큰 투자율을 갖고 RF 파가 전자회전의의 공진주파수에 접근함에 따라 RF에너지를 더 강하게 흡수하게 된다.

한편 위상속도는 투자율의 $\frac{1}{2}$ 승에 반비례 하므로 외부에서의 인가장계에 따라 위상이 앞서거나 지연될 수 있다.

5. 실험 및 고찰

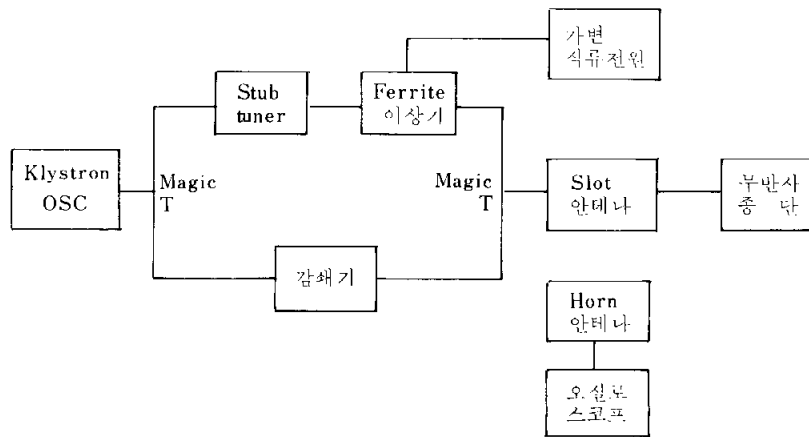


그림 8. 실험장치의 구성도

실험장치의 구성은 그림 8과 같으며 마이크로파 Source는 Klystron을 사용하여 9454 MHz 반송파를 1000Hz구형파로 변조시켰다.

Magic T를 통해 양분된 파는 일부는 일정한 감쇄를 받게하고 일부는 Ferrite이상기를 거쳐 X-band용 도파관(RG 52/u)으로 만든 Slot안테나에서 합성이 되도록 하였다.

사용 전파의 자유공간 파장 $\lambda = 3.17\text{cm}$ 이고 도파관의 차단파장 $\lambda_c = 4.57\text{cm}$, 관내파장 $\lambda_g = 4.40\text{cm}$ 였으며 앞서 Slot array antenna이론에서 살펴본 바 대로 Grating lobe를 피하기 위해 Slot간의 간격은 $\frac{\lambda_g}{2}$ 인 2.20cm보다 작은 1.72cm를 택했다.

Slot의 기울기는 15° 경사로 서로 엇갈린 “八”자 형으로 6개의 Slot를 만들었으며 종단은 무반사 종단시켰다.

Phase shifter는 직경 0.25" 길이 2.5"의 Ferrite rod를 사용하였으며 임피던스 matching을 위해 $\lambda/4$ 부분을 만들었다. Ferrite주위에 유전체로 Spacing을 만들고 코일을 감아 가변직류 전원으로 직류자계를 조절할 수 있도록 하였다.

방사패턴의 측정은 Horn antenna를 사용하였으며 diode검파하여 오실로스코프로 관측하여 그림 9, 10, 11, 12와 같은 방사패턴의 변화를 확인하였다.

인가 자계의 조절에 따라 연속적인 빔의 주사를 실현하지 못한 것은 더욱 연구과제로 남아 있으나 Slot안테나의 구조에서도 주빔의 방향을 바꿀 수 있었음에 의의를 찾고자 한다.

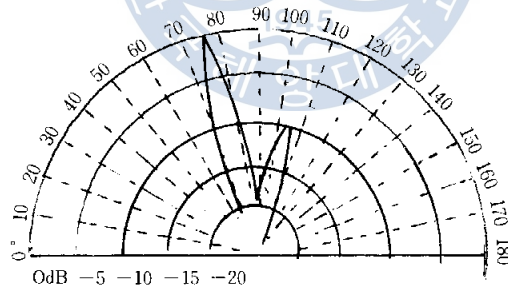


그림 9. Ferrite에 직류 자계를 전혀 인가하지 않은 경우 방사패턴

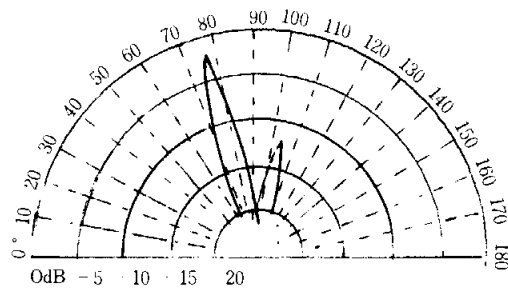


그림 10. Ferrite에 직류 16V전압으로 자계를 가한 경우 방사패턴

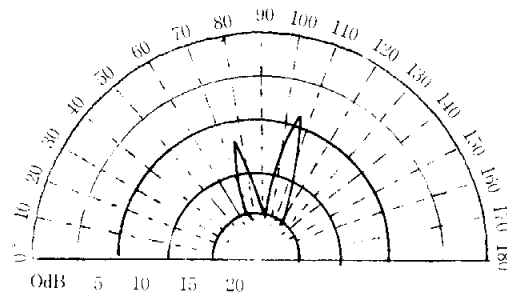


그림11. Ferrite에 직류 21V전압으로 자계를 가한 경우 방사패턴

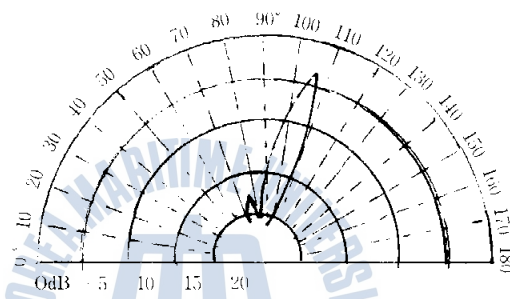


그림12. Ferrite에 직류 23V전압으로 자계를 가한 경우 방사패턴

6. 결 론

Ferrite phase shifter를 사용하여 Slot array antenna에서 주빔의 방향을 바꿀 수 있음이 실험을 통하여 입증되었으며 이는 Array antenna의 각소자에 별개의 phase shifter를 사용한 대부분의 phased array antenna에 비하여 훨씬 경제적으로 전자 주사 안테나를 실현할 수 있음을 암시해 준다.

물론 본 실험에서는 직류가변전원의 전압이 0에서 30V까지 밖에 변화시킬 수 없었으며 또한 수동조작에 의한 실험이었으나 실험에 의해 얻어진 data를 기초로 해당전압의 자동 발생장치를 구성한다면 프로그램에 의해 원하는 방향의 빔 주사를 전자적인 방식으로 실현할 수 있으리라는 결론을 얻었다.

이러한 방식의 안테나 구성으로서 레이더 시스템에서의 전방향 주사뿐만 아니라 통신

의 목적으로 동시 다중 빔의 형성으로 인한 효율 증대도 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. IEEE ; "Special issue on radar" Proc vol 73, No2 pp. 184, 190~194(Feb. 1985).
2. Skolnik, M. I ; "Introduction to radar System", Mcgrawhill p. 294~320(1964).
3. Stevenson, A. F ; "Theory of slots in rectangular waveguides" J. Appl, Phys. vol 19 pp. 24~38, (1948).
4. Hardin R. H, E.J. Downey and Munushian ; "Electronically-variable phase shifter utilizing variable capacitor diodes", Proc. IRE, Vol 48, pp. 944~945(May, 1960).
5. H. E. Thomas, "Hand book of microwave techniques and equipment" Prentice-hall pp. 153~156, (1979).
6. 電子通信學會, "レーダ技術" pp. 136~151(Jan, 1984).
7. R. C. Hansen "Microwave Scanning Antennas" Vol II Academic press, pp. 9~17, (1966).
8. 落合徳臣, "レーダ" 理論と實際" 海文堂 pp. 104~104の6(1970).
9. Chiba. T "On the maximum spacing of the array antenna" Proc, IEEE 53. 9 pp. 1270(sept 1965).

