

위성 Synthetic-Aperture Radar (SAR) 시스템용 도파관 배열 안테나에서 도파관 측벽 슬롯의 수평편파 방사를 위한 격벽 구성 방법

Configuration of Waveguide Septa for Radiation of Horizontal Polarization from Slots on Narrow Side Wall in Waveguide Array Antenna for Satellite Synthetic-Aperture Radar (SAR) Applications

크리스티안 디미트로브 · 이용식 · 송성찬* · 윤성식* · 조승주*

Kristian Dimitrov · Yongshik Lee · Sungchan Song* · Seongsik Yoon* · Seungjoo Jo*

요 약

격벽 구조를 이용해서 도파관 내에서 진행되는 전기장의 진동방향을 바꾸는 방법에 대해서 보고한다. 이중편파 도파관 슬롯 배열 안테나를 설계하는 경우, 교차 편파 분리도를 충분히 확보하기 위해서 편파별로 도파관을 이용하는 방법이 사용된다. 특히 파장이 많이 짧을 경우, 배열 간격을 줄이기 위해서 측벽 슬롯을 활용해야 하는데, TE10모드에서 수평편파의 방사가 어려울 수 있다. 이때 격벽 구조를 이용하여 전기장의 방향을 회전시킴으로써 측벽의 수직 슬롯에서 방사가 가능해진다. 슬롯 배열에 따른 격벽 구조의 구성 방법, 설계와 함께 1×8 크기의 슬롯배열이 9.65 GHz에서 16.1 dBi의 이득과 -15 dB의 입력 반사, 58 dB의 높은 편파 분리도를 나타내는 모의 실험 결과를 제시한다. 마지막으로 크기가 32×224인 배열 안테나에 대해서 20°까지 스캐닝하더라도 그레이팅 로브가 발생하지 않음을 확인하였다.

Abstract

The application of septa to change the oscillating direction of the waveguide fields is demonstrated in this study. For dual-polarization waveguide slot array antennas, two different waveguides are often used to maximize the cross-polarization discrimination level between them. In such arrays, slots may be designed on the narrow sidewall to reduce the element spacing and to suppress the grating lobes. Septums can be used to change the direction of TE10 mode electric fields, so that radiation occurs from the transverse slots on narrow sidewalls. The design and configuration of the septums for a 1×8 slot array on the narrow sidewall of a rectangular waveguide is provided, which shows a simulated gain of 16.2 dBi, reflection of -15 dB, and cross polarization discrimination level of 58 dB.

Key words: Waveguide Slot, Waveguide Array, Dual Polarization, Septum

I. 서 론

위성 SAR(synthetic-aperture radar) 시스템에서 안테나의 성능은 지구 표면의 빔 스폿 크기, 방위각 해상도, 신호

「이 논문은 2020년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*한화시스템 항공·우주연구소(Aerospace R&D Center, Hanwha Systems)

· Manuscript received November 27, 2020 ; Revised December 12, 2020 ; Accepted March 08, 2021. (ID No. 20201127-103)

· Corresponding Author: Yongshik Lee (e-mail: yongshik.lee@yonsei.ac.kr)

대 잡음비(SNR) 등을 결정하는 등 매우 중요한 역할을 한다. 위성 시스템에는 마이크로스트립 배열 안테나, 반사관 안테나와 함께 손실이 낮고 전력 전달 능력이 높은 도파관 슬롯 배열 안테나도 자주 사용된다^[11-13].

수평 편파뿐만 아니라, 수직 편파, 나아가서 원형 편파 방사도 비교적 쉽게 구현이 가능한 도파관 배열 안테나는 일반적으로 도파관의 광벽에 위치한 슬롯을 활용하는데, 수직 편파는 방향이 도파관과 평행(longitudinal)한 슬롯을, 수평 편파는 방향이 도파관과 수직(transverse)한 슬롯을 사용한다.

배열 안테나를 설계하는 데 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나가 배열 간격이다. 이는 이득, 부엽 레벨, 그레이팅 로브 등이 배열 간격에 따라 결정되기 때문이다. 문제는 주파수가 높아질수록 배열 간격이 더 좁아져야 하는데, 도파관 광벽에 슬롯을 위치시킬 경우 이를 좁히는 데 한계가 있다. 특히 이중 편파 안테나의 경우 두 편파 안테나 사이의 격리도를 확보하기 위해서 하나의 도파관에 두 편파 안테나를 설계하는 것보다 서로 다른 도파관에 설계하는 경우가 더 일반적인데^[4], 이런 경우 늘어난 도파관 수에 따라 배열 간격은 더욱 늘어날 수밖에 없다.

이때 표준 도파관이 아니라 높이 또는 폭을 줄인 비표준 도파관(reduced height/width waveguide), 유전체로 채워진 도파관, 또는 릿지 도파관(ridged waveguide)을 사용하거나^[5] 도파관의 광벽이 아닌 측벽에 슬롯을 위치시킴으로써 간격을 추가적으로 줄일 수 있다^[6]. 하지만 전자의 경우 손실이 늘어나거나 고차 모드가 발생할 수 있으며, 후자의 경우 교차 편파 문제가 발생하거나 수평 편파의 방사가 불가능할 수 있다.

이러한 문제들을 위해서 도파관 내에 격벽(septum)을 활용하는 방안들이 제시된 바 있다^[7-9]. 본 논문에서는 도파관 슬롯 배열 안테나를 구성할 때 측벽에 위치한 직교 슬롯으로부터 수평 편파를 방사시킬 수 있는 격벽 구조의 설계 방법을 제시한다. 배열 크기가 1×8인 슬롯 안테나를 측벽에 설계하여 9.65 GHz에서 높은 이득과 낮은 반사, 무엇보다 32×224 크기의 배열에 대해서 20°까지 스캔하더라도 그레이팅 로브가 발생하지 않는 모의 실험 결과를 통해 유효성을 입증하였다.

II. 이중 대역 도파관 슬롯 배열 안테나에서 배열 간격 문제

예를 들어 도파관에 X 대역 이중 편파 슬롯 배열 안테나를 설계하는 경우를 가정해 보자. 이때 참고문헌 [10]과 같은 방법을 이용하면 하나의 표준 도파관 WR-90에 두 편파 슬롯을 동시에 구현하는 것이 가능하다. 하지만 이런 경우 두 편파 슬롯 사이의 격리도가 낮아져서 높은 교차 편파도가 필요한 경우에는 적합하지 않을 수 있다.

교차 편파도를 향상시키는 가장 쉬운 해결책은 그림 1과 같이 두 개의 도파관을 이용하여 수평 편파 및 수직 편파 슬롯을 서로 다른 도파관에 위치시키는 것이다. 이때 WR-90을 두 개를 광벽 방향으로 배열시킨다면 전체 폭이 45.72 mm가 된다. 이를 기반으로 2차원 배열 안테나를 구성할 때 빔을 스캐닝하는 경우, 그레이팅 로브 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어 9.65 GHz에서 방위각 방향으로 20°까지 스캐닝할 경우, 그레이팅 로브를 억제시키는 최대 배열 간격은 동작 주파수의 자유 공간상 파장 λ_0 을 이용해서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d_{\max} = \frac{\lambda_0}{1 + \sin\theta} = 23.16 \text{ mm} \quad (1)$$

따라서 표준 WR-90 도파관을 광벽 방향으로 배열시킨 슬롯 안테나를 방위각 방향으로 20°까지 스캐닝하는 경우, 슬롯 안테나 간 간격이 45.72 mm가 되어 23.16 mm를 초과하게 되므로 그레이팅 로브 발생을 피할 수 없게 된다.

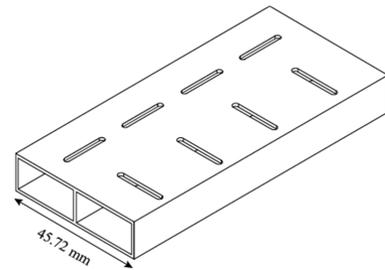


그림 1. 두 개의 도파관과 광벽 수직(transverse)/수평(longitudinal) 슬롯으로 구성된 이중편파 도파관 슬롯 배열 안테나 예시.

Fig. 1. Dual-polarization waveguide slot array based on transverse and longitudinal slots on separate waveguides.

그림 2(a)에 표준 도파관 WR-90을 나란히 배열했을 때를 나타내었다. 이때 그레이팅 로브가 발생하는 것을 억제하기 위한 방법으로 그림 2(b)와 같이 폭을 줄인 비표준 도파관을 사용할 수 있으나, 이 경우 폭을 절반 미만으로 줄여야하기 때문에 고차 모드가 발생할 수 있다. 그림 2(c)와 같이 도파관 내부를 유전체로 채워서 전기적으로 크게 만듦으로써 고차 모드의 차단주파수를 높일 수 있지만, 유전체 손실에 따른 효율 저하가 수반되고 무엇보다 무게가 무거워져서 배열 크기에 따라 위성용으로 적합하지 않을 수 있다. 또 다른 방법으로 그림 2(d)와 같이 릿지(ridged) 도파관을 활용하는 방법이 있다. 이는 도파관 내부에 커패시티브한 릿지를 추가하여 차단 주파수를 낮춤으로써 도파관을 소형화시키는 것이다. 하지만 제작이 복잡해지고 손실이 증가할 수 있다.

배열 간격을 줄이기 위한 마지막 방법으로 그림 2(e)와 같이 도파관을 90° 회전시켜서 법선(broadside) 방향으로 측벽을 노출시켜 슬롯을 위치시키는 방법이 있다. 특히

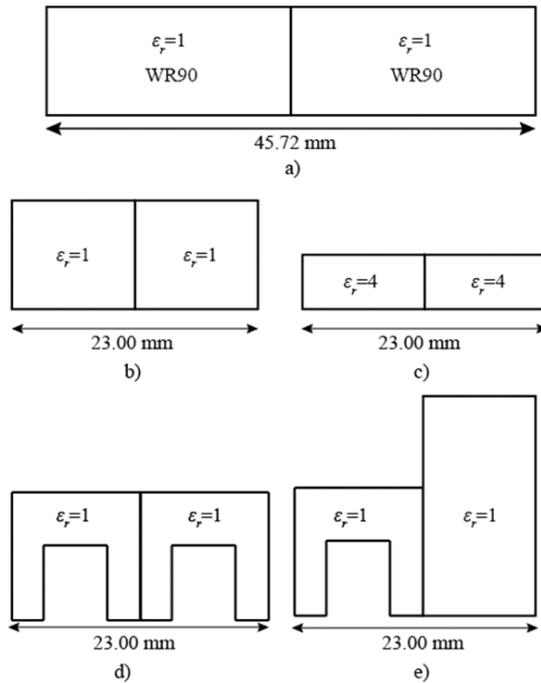


그림 2. 배열 안테나를 줄이기 위한 도파관 소형화/배열 방법
 Fig. 2. Methods of waveguide miniaturization/configuration to reduce array spacing.

측벽의 길이, 즉 도파관 높이는 줄이더라도 도파관의 전파상수에 큰 영향을 주지 않기 때문에 간격을 추가적으로 줄일 수 있다. 또한 두 도파관 중 하나는 릿지 도파관을 사용함으로써 배열 간격을 최소화할 수도 있다. 그렇지만 수평 편파 방사용 슬롯을 설계하는 것이 불가능하다는 문제는 여전히 존재한다.

도파관 슬롯 안테나는 슬롯의 방향과 도파관 내에 슬롯 아래에 있는 전기장의 방향이 직교하는 경우에만 결합이 이루어져서 방사를 하게 된다. 즉 도파관을 90° 회전시킨 경우 그림 3과 같이 도파관 측벽에 위치한 수직(transverse) 슬롯은 도파관 내부 전기장과 평행이 되므로 방사가 이루어지지 않는다. 측벽에 수평(longitudinal) 방향으로 슬롯을 위치시켜야 수평 편파를 방사시킬 수 있지만, 광벽의 수직 슬롯과 마찬가지로 결합도가 너무 강해서 직렬로 배열할 수 있는 슬롯의 수가 지극히 낮다는 단점이 있다. 그림 3과 같이 슬롯을 비스듬하게 설계해서 전기장과 수직인 슬롯 방향 성분이 존재하도록 만들고 동시에 기울어진 정도를 조절해서 결합도를 낮춤으로써 다수의 슬롯을 직렬로 배열할 수는 있지만, 이러한 슬롯에서는 수평뿐만 아니라, 수직 편파도 방사하게 되어 교차 편파도가 매우 좋지 않다^[11].

즉, 도파관 슬롯 배열 안테나에서 빔을 스캐닝하더라도 그레이팅 로브가 억제되도록 요소 안테나 사이의 간격을 줄이기 위해서는 도파관의 측벽을 활용하는 것이 가장 쉬운 방법이지만, 수평 편파의 방사가 어렵거나 불가능하다는 단점은 여전히 존재한다. 물론 그림 1과 같이 x축 방향으로 도파관이 놓인 경우이므로 이를 y축 방향으로 90° 회전시킴으로써 해결이 가능하지만 그럴 경우에는 수직 편파에서 동일한 문제가 발생하게 되므로 근본적인 해결책이 아니다.

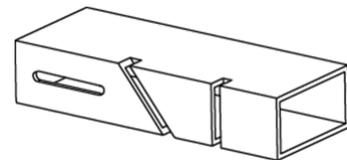


그림 3. 도파관 측벽 슬롯: 수평, 비스듬, 수직 슬롯
 Fig. 3. Waveguide slots on narrow sidewall: longitudinal, inclined and transverse slot.

즉, 격리도 및 교차 편파 관점에서 봤을 때 이중편파 도파관 배열 안테나는 편파 별로 독립된 도파관에 제작하는 것이 좋지만, 그로 인해서 늘어난 배열 간격으로 인해서 스캐닝을 할 경우 그레이팅 로브가 발생할 수 있다. 그레이팅 로브를 억제시키기 위해서 안테나 간 간격을 줄이는 방법은 다양하지만, TE₁₀ 기본 모드로 동작시킬 경우 두 편파 중 하나는 방사가 안 된다는 문제는 여전히 남아 있다.

III. 도파관 격벽을 이용한 편파 변환

도파관 측벽에 슬롯을 위치시킬 경우, 슬롯의 방향과 도파관 내 전기장의 방향이 수직이 아니어서 수평 편파의 방사가 이루어지지 않는 문제는 그림 4와 같이 슬롯 양쪽에 격벽(septum) 쌍을 위치시킴으로써 자기장, 또는 전기장의 방향을 바꾸는 방법으로 해결이 가능하다. 격벽은 일종의 편파기로서, 도파관 내에 전자기파 진행에 방해하여 진동방향을 바꿈으로써 슬롯에 수직인 전자기파를 발생시킬 수 있다⁹⁾.

그림 5(a)에 도파관 측벽에 위치한 슬롯과 도파관 내부 전기장의 방향을 나타내었다. 슬롯의 방향이 전기장의 방향과 같기 때문에 둘 사이의 결합이 발생하지 않아 방사가 이루어지지 않는다. 반면 그림 5(b)와 같이 격벽을 위치시킴으로써 슬롯과 평행한 방향으로 진동하는 도파관 내의 전기장을 수직 방향으로 진동하도록 변환시킬 수 있다. 이 경우 슬롯과 전기장의 결합이 발생하여 수평 편파의 방사가 가능해진다. 슬롯과의 결합 정도는 격벽의 길이, 높이 및 슬롯과 격벽 사이의 거리에 따라 달라진다.

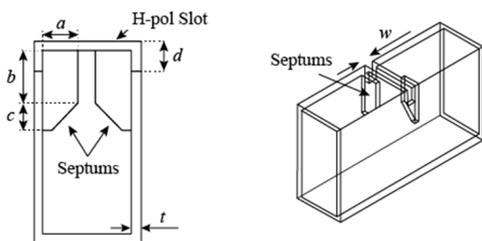
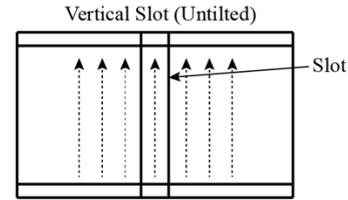
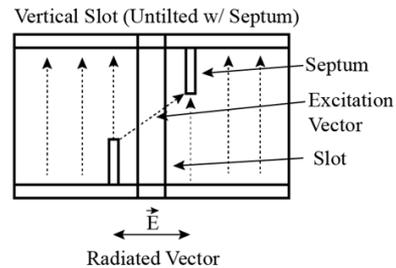


그림 4. 도파관 측벽 수직 슬롯 및 격벽 쌍
Fig. 4. Transverse slot with septums on waveguide narrow wall.



(a) 격벽 쌍이 없는 경우



(b) 격벽 쌍이 있는 경우

그림 5. 격벽 쌍 유무에 따른 도파관 측벽 수직 슬롯으로부터의 방사

Fig. 5. Radiation from transverse slot on narrow sidewall w/wo septums.

또한 수직 방향 슬롯의 방사는 공진에 기반하므로 교차 편파도가 매우 좋다는 장점이 있다.

도파관 격벽 외에 핀을 사용해도 비슷한 효과를 얻을 수 있다⁸⁾. 하지만 비교적 소형인 핀은 별도로 제작해서 내부에 부착을 해야 한다는 단점이 있는 반면, 격벽 구조는 상대적으로 크기도 커서 도파관과 일체형으로 제작이 용이하다는 장점이 있다.

도파관 격벽은 원형, 사각형, 삼각형 등 다양한 형태를 가질 수 있는데, 본 논문에서 사용한 그림 4의 구조처럼 격벽에 입사하는 전자기파의 진동방향을 효과적으로 바꿔주는 비스듬한 면을 활용하는 것이 일반적이다. 또한 격벽 쌍을 슬롯의 양쪽에 대칭으로 배치시킴으로써 슬롯 주변에서 전자기파가 대칭이 되도록 해야 한다. 그림 4에서 격벽의 길이 a 는 슬롯과 도파관 사이의 결합도를 조절하는 기능을 한다. 예를 들어 a 를 늘릴수록 슬롯의 등가 컨덕턴스가 증가되며, 이는 슬롯과 격벽 사이의 거리 w 를 줄임으로써도 같은 효과를 얻을 수 있다. 격벽의 높이, 즉 $b+c$ 를 조절하여 격벽의 반사 위상이 180° 를 만들 경우, 순 분로(purely shunt) 성분으로 등가시키는 것이 가능하

므로 다음 식으로 표현되는 일반적인 분포 배열 정합조건을 활용할 수 있다.

$$\sum_{n=1}^N \frac{Y_n}{G_0} = 1 \quad (2)$$

여기서 N 은 슬롯의 총 개수이며, Y_n/G_n 은 슬롯의 정규화된 어드미턴스이다. 마지막으로 격벽의 아래쪽 길이 c 에 따라 격벽의 비스듬한 변의 규격이 결정되는데, 이를 통하여 전자기파 진동방향의 효과적인 전환과 함께 임피던스 정합도를 조절할 수 있다.

그림 6에 도파관 T자형 분배기를 이용해서 급전한 1×4 크기의 슬롯 배열 안테나에서 측벽에 위치한 수직 슬롯으로부터 수평 편파를 방사하기 위한 격벽의 구성을 나타내었다. 도파관 T자형 분배기를 이용해서 급전할 경우 신호는 양방향으로 동위상 분배되어 진행하므로 그림과 같이 2번과 3번 슬롯을 위한 격벽 쌓은 대칭이 아닌, 같은 방향으로 구성되어야 한다. 또한 배열 간격이 반파장일 경우, 2번 슬롯과 1번 슬롯을 급전하는 전기장 사이에는 180° 위상차가 발생하게 되므로 두 슬롯의 격벽 쌓은 대칭 구조가 되어야 한다. 결국 1번과 2번 슬롯, 3번과 4번 슬롯의 격벽 쌓은 대칭을 이루어야 하고, 2번과 3번 슬롯의 격벽 쌓은 방향이 같아야만 모든 슬롯에서 동위상 방사가 이루어지게 된다.

표 1에 중심주파수 9.65 GHz에서 내측 규격이 20.59×10.00 mm²인 비표준 도파관의 측벽에 위치시킨 수평 편파 방사용 슬롯 및 격벽 쌓의 설계 파라미터를 정리하였다.

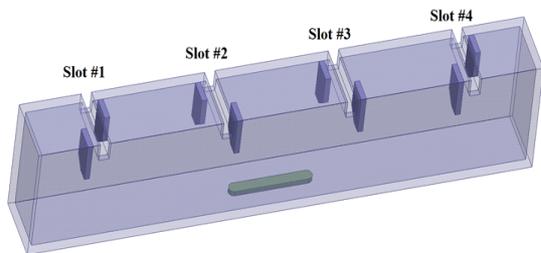


그림 6. 중앙 급전된 1×4 도파관 측벽 수직 슬롯 배열 안테나의 수평 편파 방사를 위한 격벽 구성
Fig. 6. Configuration of septums for center-fed 1×4 slot transverse slot array on narrow sidewall for radiation of horizontal polarization.

표 1. 그림 4의 도파관 및 격벽 설계

Table 1. Dimensions of waveguide and septums in Fig. 4.

Waveguide		20.59×10.00 mm ²	
a	4.60 mm	c	2.00 mm
b	5.50 mm	d	3.50 mm
t	1.00 mm	w	3.00 mm

IV. 모의 실험 결과

그림 7과 같이 그림 6의 배열 안테나 2개를 T 접속 도파관으로 급전하는 총 1×8 크기의 측벽 수직 슬롯 배열 안테나를 설계하였다. 1×4 부배열 안테나는 또 다른 T 접속을 통하여 급전 도파관으로부터 결합되었다. 그림 3과 표 1에서 보듯이 슬롯의 크기가 3×15 mm²인데 비해서 사용된 도파관의 높이, 즉 측벽의 길이가 10 mm이므로 슬롯의 일부는 광벽으로도 이어져 있는 형태이다.

그림 8(a)에 최종 설계한 그림 7 안테나의 반사 특성 모의 실험한 결과를 나타내었다. 설계 안테나의 반사 특성은 10 dB 기준으로 1.55 GHz, 즉 9.65 GHz를 중심으로 16.1%의 상대 대역폭을 나타냄으로써 비교적 광대역 특성을 갖고 있다. 비교를 위해서 동일한 안테나에 격벽만을 제거한 모의 실험 결과도 나타내었다. 결과에서 보듯이 X 대역 전체에서 0 dB에 가까운 반사 특성을 보이는 데, 이는 격벽 없이는 도파관 내 전자기파와 측벽의 수직 슬롯 사이의 결합이 이루어지지 않기 때문이다.

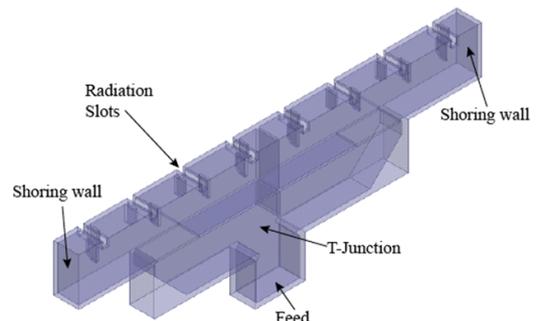


그림 7. 최종 설계된 1×8 도파관 측벽 수직 슬롯 배열 안테나

Fig. 7. Designed 1×8 waveguide narrow sidewall transverse slot array antenna.

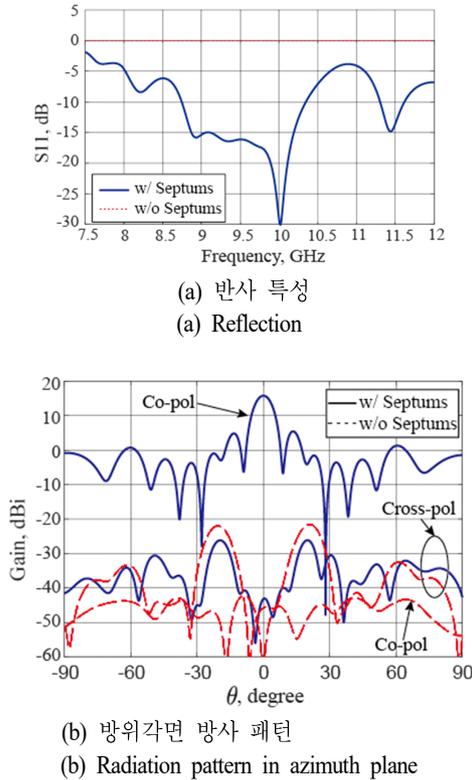


그림 8. 1×8 도파관 측벽 수직 슬롯 배열 안테나 모의 실험 결과
Fig. 8. Simulated results for 1×8 waveguide narrow sidewall transverse slot array antenna.

그림 8(b)에 중심 주파수인 9.65 GHz에서 안테나의 방위각면에서 이득을 모의실험한 결과를 나타내었다. 계산된 이득이 16.2 dBi로 8개의 슬롯이 모두 동위상 방사를 하고 있으며, 교차 편파도 역시 58 dB로 매우 높아 그림 6에서 제시한 격벽의 구성이 적합했음을 나타낸다. 반면에, 그림 8(a)의 반사 특성 결과에서 예상되었듯이 격벽이 없는 경우에는 이득이 -60 dBi로 방사가 전혀 이루어지지 않는데, 이는 도파관 내에서 슬롯 방향과 직교하는 전기장 성분이 없기 때문이다. 반면, 교차 편파 레벨은 격벽의 유무에 상관없이 비슷함을 알 수 있다. 이는 교차 편파의 방사는 방사체의 구조, 즉 여기서는 슬롯의 구조에 의해서만 결정된다는 것을 의미한다. 방위각 ±25°에서 상대적으로 교차 편파가 높아지는 현상은 슬롯의 종횡비 (aspect ratio)가 18 % 정도로 폭이 비교적 넓기 때문이다. 교차 편파도는 슬롯의 폭을 줄임으로써 향상시킬 수 있

는데, 이 때 반사 대역폭이 줄어들 수 있다.

마지막으로 본 연구의 동기인 도파관 슬롯 배열 안테나를 스캐닝할 경우, 그레이팅 로브 문제가 개선되었는지를 확인하였다. 그림 9와 같이 수직 편파는 릿지(ridged) 도파관의 광벽에 위치시킨 수평 슬롯으로부터, 수평 편파는 WR-90 표준 도파관의 측벽에 위치한 수직 슬롯으로부터 방사하는 경우를 가정하였다. 이때 릿지 도파관의 크기를 12×10 mm²로 가정할 경우, 배열 간격이 22.16 mm로 줄어들어 식 (1)의 23.16 mm보다 작아져서 총 32×224 크기의 배열 안테나를 그림 9(a)와 같이 20°까지 스캐닝하더라도 그레이팅 로브가 발생하지 않는다.

동시에 수직 편파는 동일한 크기의 릿지 도파관을, 수평 편파는 WR-90의 광벽에 위치한 수직 슬롯부터 방사하는 경우를 살펴보았다. 앞서 언급했듯이 표준 도파관의 광벽에 위치한 수직 슬롯을 배열하여서 수평 편파를 방사하는 것은 현실적으로 매우 어렵지만 여기서는 그레이팅 로브의 효과를 파악하기 위해 그림 9(a)와 비교할 목적으로 계산해 본 것이다. 릿지 도파관을 활용하더라도 배열 간격이 34.86 mm가 되어서 식 (1)의 23.16보다 크므로

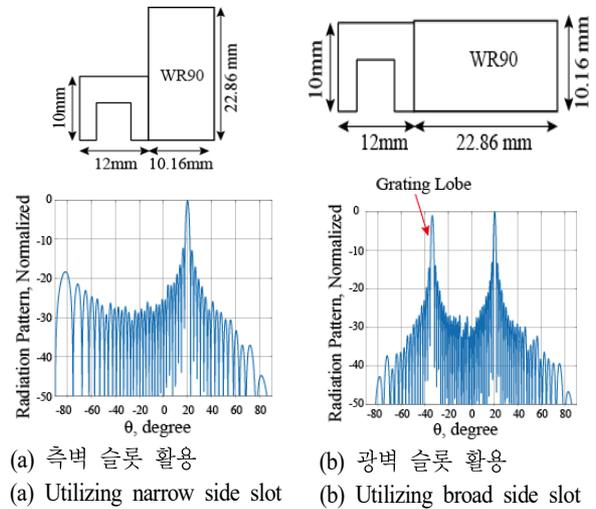


그림 9. 수평편파 슬롯의 위치에 따른 이중편파 도파관 슬롯배열 안테나의 단면 및 9.65 GHz에서 20° 스캐닝시 32×224 배열의 방사 특성 비교
Fig. 9. Comparison of profiles for dual polarization waveguide slot array and its simulated radiation pattern at 9.65 GHz for scanning angle of 20° and array size of 32×224.

그레이팅 로브 문제는 항상 존재할 수밖에 없다. 즉, 광범위에 위치한 수직 슬롯을 활용한 이중 편파 도파관 배열 안테나의 경우, 그레이팅 로브를 억제시킨 수평 편파의 방사는 현실적으로 불가능하다는 것을 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 도파관 배열 안테나에서 격벽 구조를 활용하여 측벽에 위치한 수직 슬롯으로부터 수평 편파를 방사시키는 방안을 제시하였다. 이중 편파 도파관 슬롯 배열 안테나를 설계할 때 편파 분리도를 유지하기 위해서 2개의 도파관을 배열하는 경우가 많은데, 이때 늘어난 도파관 수로 인해서 배열 간격도 늘어날 수밖에 없다. 이로 인한 그레이팅 로브 발생을 억제시키기 위해서 도파관 측벽 슬롯을 활용할 수 있는데, 이때 수평 편파의 방사가 어렵거나 불가능하다는 문제점을 해결할 수 있다. 급전부에 대한 슬롯의 상대적 위치에 따라 동위상 방사를 위한 격벽 구성 방안을 제시하였으며, 모의 실험 결과 1×8 배열에 대해서 16.2 dBi라는 높은 이득으로 그 유효성을 입증하였다. 또한 58 dB의 높은 편파 분리도를 나타내어 격벽을 사용하더라도 편파 분리도를 높이기 위해서 두 개의 도파관을 사용한 취지가 훼손되지 않음 또한 검증하였다. 마지막으로 32×224 배열 크기의 안테나에 대해서 20° 까지 스캐닝하더라도 그레이팅 로브가 발생하지 않는 결과를 통해 그 효용성을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] M. Stangl, R. Werninghaus, and R. Zahn, "The TERRASAR-X active phased array antenna," in *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Boston, MA, Oct. 2003, pp. 70-75.
- [2] B. Pyne, P. R. Akbar, V. Ravindra, H. Saito, J. Hirokawa, and T. Fukami, "Slot-array antenna feeder network for space-borne X-band synthetic aperture radar," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 7, pp. 3463-3474, Jul. 2018.
- [3] R. Jyoti, S. Chakrabarty, S. Kulshrestha, and V. K. Singh, "Multilayer printed active phased array antenna for radar imaging satellite," in *2014 IEEE International Microwave and RF Conference(IMaRC)*, Bangalore, Dec. 2014, pp. 205-208.
- [4] X. Lu, X. Wang, and W. Lu, "A low-profile parallel plate waveguide slot antenna array for dual-polarization application," in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP)*, Paris, Mar. 2017, pp. 970-972.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
- [6] L. Tan, J. Zhang, W. Wang, and J. Xu, "Design of a W-band one-dimensional beam scanning slotted waveguide antenna with narrow beam and low side lobe," in *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium -Spring(PIERS)*, St. Petersburg, May 2017, pp. 3625-3628.
- [7] J. Hirokawa, P. S. Kildal, "Excitation of an untilted narrow-wall slot in a rectangular waveguide by using etched strips on a dielectric plate," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, no. 6, pp. 1032-1037, Jun. 1997.
- [8] S. Hashemi-Yeganeh, R. S. Elliott, "Analysis of untilted edge slots excited by tilted wires," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 11, pp. 1737-1745, Nov. 1990.
- [9] W. Wang, J. Jin, X. L. Liang, and Z. H. Zhang, "Broadband dual polarized waveguide slotted antenna array," in *2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Albuquerque, NM, Jul. 2006, pp. 2237-2240.
- [10] C. S. Arismar, I. F. Da Costa, S. Pinna, S. Melo, F. Laghezza, and F. Scotti, et al., "A novel dual-polarization and dual-band slotted waveguide antenna array for dual-use radars," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Davos, Apr. 2016, pp. 1-4.
- [11] T. A. Milligan, *Modern Antenna Design*, New York, NY, McGraw-Hill, 1985.

Kristian Chavdarov Dimitrov [연세대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5153-9610>



2015년 8월: 불가리아 Technical University of Sofia, Department of Telecommunications Engineering(공학사)
2016년 9월: Raysat Inc., Antenna Test and Measurement Engineer.
2018년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2018년 8월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심 분야] Antenna, Antenna Array, Microwave Devices.

윤 성 식 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5764-5403>



2010년 8월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2013년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)
2018년 3월~현재: 한화시스템 항공·우주

연구소 전문연구원
[주 관심분야] 위성 SAR 시스템, 위성 SAR 안테나

이 용 식 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2623-3569>



1998년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2004년 4월: 미국 University of Michigan (공학박사)
2004년 10월: Purdue University, Post-doctorial Research Associate
2005년 7월: EMAG Technologies, Inc.,

Senior Research Engineering

2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 정교수
[주 관심 분야] 초고주파 회로, Antenna, WPT

조 승 주 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8999-6796>



2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)
2020년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2020년 3월~현재: 한화시스템 항공·우주 연구소 연구원

[주 관심분야] 위성 SAR 시스템, 위성 SAR 안테나

송 성 찬 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0965-2091>



2001년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2002년 11월~현재: 한화시스템 항공·우주연구소 수석연구원

[주 관심분야] 위성 SAR 시스템, 위성 SAR 안테나, 레이더 송수신기