Corrugated 정사각형 도파관 구조를 이용한 85~115 GHz 90도 위상천이기 개발

Development of a 85~115 GHz 90-Deg Phase Shifter Using Corrugated Square Waveguide

정문희 · 제도흥 · 한석태 · 김승래

Moon-Hee Chung · Do-Heung Je · Seog-Tae Han · Seung-Rae Kim

요 약

86 GHz 대역 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 이중원형 편파 관측에 사용되는 90도 위상천이기를 Corrugated 정사각형 도파관 구조를 이용하여 개발하였다. 이 90도 위상천이기는 정사각형 도파관 내부에 Corrugation 구조를 만들어 정사각형 도파관을 통과한 수직, 수평 편파의 위상차이가 85~115 GHz 대역에서 90 ± 3.3 도 이내가 되도록 설계하였고, 제작 후 측정 결과는 위 주파수 대역에서 반사 손실과 삽입 손실이 각각 17 dB, 0.25 dB 이하이고 Axial ratio는 0.6 dB 이하이다.

Abstract

A 90-deg phase shifter using corrugated square waveguide structure for 86 GHz band VLBI(Very Long Baseline Interferometry) dual-circular polarization observation has been developed. The 90-deg phase shifter was designed to have two corrugated walls inside the square waveguide so that the vertically and horizontally polarized waves at the output port have phase differences of 90 ± 3.3 deg across 85~115 GHz. Measurements show that the return and insertion losses for the both polarizations are better than 17 dB and 0.25 dB, respectively. The axial ratio is estimated to be less than 0.6 dB within the required frequency band.

Key words : Dual-Circular Polarizer, Corrugated Waveguide, Phase Shifter, VLBI Receiver

I. 서 론

VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 관측은 천체로부터 발생하는 원형 편파 신호를 수신하여 천체의 물리량을 측정한다. 이 전파 신호의 세기는 극히 미약하기 때문에 매우 낮은 잡음 온도를 갖기 위하여 전파수신기를 극저온 냉각하게 된다. 밀리미터파 수신기에 사용되는 원형편파기는 Septum 편파기나 90도 위상천이기와 OMT(Orthomode Transducer)를 결

합한 방식을 사용할 수 있다. Septum 편파기는 제작 방식이 단순하여 위성통신이나 저주파 VLBI용 전파수신기에 많이 사용되고 있으나, 협대역 특성으로 인하여 광대역 이중원형 편파(Dual-Circular Polarization) 관측이 필요할 경우, 90도 위상천이기와 OMT 결합 방식의 원형편파기를 채용한다. 일반적으로 OMT는 광대역에서 동작하므로 광대역 원형편파기의 제작에서 90도 위상천이기의 개발이 중요하다. 도파관을 사용한 가장 단순한 방식의 90도 위상천이

한국천문연구원(Korea Astronomy and Space Science Institute)

· Manuscript received October 22, 2013 ; Revised November 28, 2013 ; Accepted November 29, 2013. (ID No. 20131022-098)

· Corresponding Author : Moon-Hee Chung (e-mail : mhchung@kasi.re.kr)

기는 원형도파관 내부에 유전체를 삽입하는 방식을 이용하는 것이다^[1]. 그러나 이 방식은 협대역이라는 단점을 갖고 있고 밀리미터파 대역 VLBI 관측용 전파수신기는 대부분 극저온 냉각을 하므로 유전체 변형을 예상할 수 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위하여 금속 재질을 사용하고 광대역 특성을 갖는 90도 위상천이기 개발이 오래전부터 진행되어 왔다. 특히 Lier, Srikanth 등은 비교적 낮은 주파수 대역(<30 GHz)에서 도파관 내부 4면에 Corrugation을 형성하여 광대역 90도 위상천이기를 개발하였다^{[2],[3]}. 이러한 방식을 밀리미터파 대역에 적용할 수 있지만 Corrugation 치수가 파장에 반비례하는 점을 고려할 때 제작상의 어려움이 예상된다. 한편, Arndt는 도파관 내부 2면에 2가지 깊이를 갖는 Corrugation을 이용한 광대역 90도 위상천이기의 설계방식을 제안하였다^[4]. 이러한 방식은 균일한 깊이를 갖는 Corrugation 방식에 비하여 2가지 Corrugation 깊이 변화를 이용하여 Lier, Srikanth의 방식과 비교할 때 제작 복잡성을 줄이면서 광대역 특성을 갖는 90도 위상천이기를 제작할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서 위와 같은 설계방식을 적용하여 86 GHz 대역 VLBI 전파수신기의 이중원형 편파기에 적용할 수 있는 90도 위상천이기를 개발하였다.

II. Corrugated 도파관 구조를 갖는 90도 위상천이기

도파관 구조를 이용하는 90도 위상천이기의 기본 원리는 다음과 같다. 도파관 내부의 경계조건을 변경하여 수직, 수평 편파의 전파 상수(propagation constant)에 차이를 만들어 서로 직교인 두 편파가 도파관을 통과했을 때 90도 위상차를 갖도록 제작하는 것이다. 도파관 내부 2면에 2가지 깊이의 Corrugation 구조를 갖는 경우 해석적인 방법이 존재하지 않으므로 수치해석적인 방법이나 상용 3차원 전자장 소프트웨어를 사용할 수 있다. 그림 1과 같은 구조로 CST MWS(Microwave Studio)를 이용하여 90도 위상천이기를 설계하였다. 이 위상천이기의 위상차이는 편파 성분의 전파 상수 차이와 편파 성분이 통과하는 도파관 길이에 의해서 결정되므로 모든 동작 주파수대역에서 90도 위상차를 만족할 수 없다. 따라서 원형

그림 1. 설계된 90도 위상천이기의 내부 모습
Fig. 1. Internal view of the designed 90-deg phase shifter.

그림 2. 90도 위상천이기의 설계 치수($a_1=2.931$, $a_2=2.84$, $s=2.54$, $L_1=0.75$, $L_2=0.35$, $L_3=0.248$, $w_1=0.251$, $w_2=0.291$, $p_1=0.14$, $d_1=0.216$, $d_2=0.156$, $d_3=0.116$, $d_4=0.044$, 단위: mm)

Fig. 2. Dimensions of the 90-deg phase shifter(Dimensions are in millimeters).

편파기의 편파분리도를 나타내는 Axial ratio가 0.5 dB 이내가 되도록 직교 편파간에 90 ± 3.3 도 위상차이를 갖는 위상천이기를 설계한다(이때 두 직교 편파의 진폭차를 0으로 가정)^{[2],[5]}. 수신기의 내부회로 변경 없이 본 논문에서 개발된 90도 위상천이기를 사용하기 위하여 86 GHz 대역 VLBI 전파수신기에 이미 설치된 유전체를 이용한 90도 위상천이기와 외곽 치수가 동일해야 한다. 따라서 90도 위상천이기의 총 길이는 12.7 mm로 고정시키고 설계하였다. 이 90도 위상천이기는 수신기 Feed-horn과 OMT 사이에 위치한다.

그림 2는 CST MWS 시뮬레이션을 통하여 설계된 90도 위상천이기의 치수를 나타낸다. 90도 위상천이

기의 입, 출력 포트는 지름 2.931 mm인 원형도파관으로 구성된다. Corrugated 정사각형 도파관의 임피던스 정합을 위하여 지름 2.84 mm, 길이 0.35 mm인 원형 도파관과 한변의 길이 2.54 mm, 길이 0.248 mm인 정사각형 도파관을 양쪽 포트사이에 삽입하였다. Corrugation의 깊이는 그림 2의 d_3 , d_4 와 같이 입, 출력포트쪽으로 갈수록 선형적으로 감소시켰다.

III. 제작 및 측정 결과

밀리미터파 대역 Corrugated 도파관을 제작하는 경우 일반적으로 Electro-forming기법을 사용한다. 이 방식은 알루미늄 Mandrel을 가공해서 전기도금을 통하여 Mandrel 외부에 구리 재질의 형상을 만든 후, 화학처리로 내부의 알루미늄 Mandrel을 제거하면 도파관 내부에 Corrugation을 형성할 수 있다. 이 과정이 끝나면 금도금을 하여 부식을 막고 전기도전성을 향상시킨다. 그림 3은 이러한 과정을 통해서 제작된 90도 위상천이기를 보여준다. 본 논문의 90도 위상천이기는 영국 Thomas Keating사에서 제작되었으며 이 90도 위상천이기의 양쪽 포트는 UG387 Flange로 구성된다. 측정을 위하여 가이드핀은 제거하였다. 측정에 사용한 원형도파관-to-WR10 어댑터는 미국 Quinstar사에서 주문제작하였다.

그림 4와 같이 VNA(Vector Network Analyzer)를 사용하여 90도 위상천이기의 성능을 측정하였다. 서로 직교하는 편파의 위상차이를 측정하기 위하여 90도 위상천이기와 입출력 포트에 연결된 원형도파관을 90도 회전시키면서 S -parameter를 측정한다. 제작

그림 3. 원형도파관-to-WR10 어댑터(왼쪽)와 제작된 90도 위상천이기(오른쪽)

Fig. 3. Circular-to-WR10 waveguide transition(left) and fabricated 90-deg phase shifter(right).

그림 4. 90도 위상천이기 측정장치(W-band)

Fig. 4. Measurement setup for the 90-deg phase shifter(W-band).

그림 5. 위상 차이의 측정과 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Measured and simulated phase difference of the 90-deg phase shifter.

한 90도 위상천이기의 동작 주파수(85~115 GHz)는 W-band를 벗어나므로 110~115 GHz 대역은 D-band VNA를 사용하여 측정하였다. 그림 5는 90도 위상천이기의 수직(TE₁₀ 모드), 수평(TE₀₁ 모드) 편파 위상차이의 측정과 시뮬레이션 결과를 보여준다. 측정된 위상차이는 86도와 93.5도 사이에 있다. 설계한 위상차이는 90 ± 3.3 도이다. 일반적으로 밀리미터파 대역 VNA의 위상 측정 오차를 고려할 때 측정된 위상차이는 전반적으로 시뮬레이션과 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

그림 6의 측정된 반사 손실은 원형도파관 어댑터를 포함한 값이며 어댑터의 반사 손실은 일반적으로 20 dB이하이므로 어댑터의 영향은 반사 손실의 측정에 크지 않을 것이다. 그림 7에 나타난 90도 위상

그림 6. 반사 손실의 측정과 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Measured and simulated return losses of the 90-deg phase shifter.

그림 7. 삽입 손실의 측정과 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Measured and simulated insertion losses of the 90-deg phase shifter.

천이기의 삽입 손실은 back-to-back으로 측정한 원형 도파관 어댑터의 삽입 손실을 차감한 값이다. 그림 7에서 측정된 삽입 손실이 0 dB 근처인 구간은 어댑터의 삽입 손실을 차감하는 과정에서 VNA의 측정 오차가 포함된 것이다.

IV. 결 론

VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 이중원형 편파(Dual-Circular Polarization) 관측용 85~115 GHz 대역 90도 위상천이기를 개발하였다. 2가지 깊이를

갖는 Corrugation 구조를 사용하여 광대역 90도 위상 천이기를 구현하였으며 측정으로부터 위 대역에서 반사 손실 17 dB 이하, 삽입 손실 0.25 dB 이하의 특성을 보인다. 직교하는 편파 신호 사이의 위상차이와 진폭 차이로부터 계산한 Axial ratio는 85~115 GHz에서 0.6 dB 이하이다^[5]. 비록 Axial ratio의 설계 사양인 0.5 dB보다 0.1 dB 정도 높지만 이 차이는 Corrugated 도파관의 제작공차와 위상 측정 오차에서 발생할 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 논문에서 개발한 90도 위상천이기의 D-band 측정에 많은 도움을 주신 한국표준과학연구원 기반 표준본부 전자파센터의 강진섭 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] S. -W. Wang, C. -H. Chien, C. -L. Wang, and R. -B. Wu, "A circular polarizer designed with a dielectric septum loading", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 7, pp. 1719-1723, 2004.
- [2] S. Srikanth, "A wide-band corrugated rectangular waveguide phase shifter for cryogenically cooled receivers", *IEEE Microwave & Guided Wave Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 150-152, 1997.
- [3] E. Lier, T. Chung-Pettersen, "A novel type of waveguide polarizer with large cross-polar bandwidth", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, no. 11, pp. 1531-1534, 1988.
- [4] F. Arndt, U. Tucholke, and T. Wriedt, "Broadband dual-depth E-plane corrugated square waveguide polarizer", *Electron. Lett.*, vol. 20, pp. 458-459, 1984.
- [5] H. Schrank, S. Parekh, "Simple formulae for circular-polarization axial-ratio calculation", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, pp. 30-32, Feb. 1991.