

W-대역 밀리미터파 탐색기용 광대역 모노펄스 비교기 설계

A Design of Wideband Monopulse Comparator for W-Band mm-Wave Seeker Applications

김동연 · 임영준* · 정채현** · 박창현** · 남상욱*

Dong-Yeon Kim · Youngjoon Lim* · Chae-Hyun Jung** · Chang-Hyun Park** · Sangwook Nam*

요 약

본 논문은 도파관 구조를 이용한 W-대역 밀리미터파 탐색기용 광대역 모노펄스 비교기 설계를 제안한다. 제안하는 구조의 핵심 아이디어는 90° 하이브리드에 자기보상 위상천이기를 결합하여 광대역 180° 하이브리드를 구현하는 것이다. 일반적인 위상천이기는 협대역 특성을 가지므로 다수의 위상천이기가 사용될 경우, 안테나를 포함한 전체 시스템의 운용 대역폭을 제한하는 단점이 있다. 제안하는 비교기는 광대역 특성을 가지는 자기보상 위상천이기를 사용하므로 이러한 문제를 완화시킬 수 있다. 설계된 비교기는 도파관 구조를 이용하여 손실 특성이 우수하다. 또한, 포트간 크기 및 위상 응답에서 광대역 특성을 보인다.

Abstract

This paper proposes a design of W-band mm-wave wideband monopulse comparator using waveguide structure for applications. The main idea of proposed design is to combine a self-compensating phase shifter on 90° hybrid for wideband 180° hybrid. Using multiple conventional phase shifters, because of their narrow-band characteristics, tends to restrict working bandwidth of system including antennas. Proposed comparator could relieve the problem since it applies the self-compensating phase shifter. The comparator has waveguide structure so it shows excellent characteristic in loss. It also show wideband characteristic in amplitude and phase response between ports.

Key words: Monopulse Comparator, Wide-Band Waveguide Phase Shifter, Slot Array Antenna

I. 서 론

모노펄스 비교기는 모노펄스 탐색기를 구성하는 중요한 부품 중 하나이다. 일반적으로 모노펄스 탐색기는 안테나로부터 4개의 신호를 비교기 입력으로 받아 합페턴

(Σ)과 차페턴(ΔEL , ΔAZ)을 해석하여 표적의 위치를 추적하며, 이 때 모노펄스 비교기의 크기와 위상 응답이 얼마나 정확한지에 따라 표적위치의 정확도가 결정된다^[1]. 모노펄스 비교기는 4개의 180° 하이브리드를 연결하여 구성하는데, 대표적인 180° 하이브리드에는 MAGIC-T, Rat-

「이 논문은 LIG 넥스원과 2015년도 두뇌한국21플러스사업에 의하여 공동으로 지원되었음.」

삼성전자 무선사업부 안테나 개발그룹(Antenna Research Group, Samsung Electronics)

*서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소(Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University)

**LIG 넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received November 26, 2015 ; Revised January 5, 2016 ; Accepted January 26, 2016. (ID No. 20151126-095)

· Corresponding Author: Dong-Yeon Kim (e-mail: dongyeonkim0818@gmail.com)

race 등이 있으며, 90° 하이브리드와 90° 위상천이기를 결합하여 구성할 수도 있다. 하지만 모노펄스 비교기에 다수의 위상천이기를 포함할 경우, 위상천이기의 협대역 특성으로 인해 탐색기 전체의 운용 대역폭이 극히 제한될 수 있다는 문제점이 있다.

최근 자기보상 위상천이기(self-compensating phase shifter)라 불리는 광대역 위상천이기에 대한 연구가 발표되었다. 자기보상 위상천이기는 도파관의 길이만을 조절하는 지연선로와 도파관의 폭만을 조절하는 위상천이기가 결합된 형태로 위상 지연의 주파수에 대한 미분 부호가 반대임을 이용하여 광대역 특성을 얻는다^{[2],[3]}.

이에 본 논문에서는 90° 하이브리드에 자기보상 위상천이기를 결합해 180° 광대역 하이브리드를 만들고, 이를 적용한 도파관 형태의 밀리미터파 광대역 모노펄스 비교기 설계를 제안한다. 비교기는 기존에 제안된 도파관 형태의 슬롯 배열 안테나에 적용하는 것을 목표로 한다^[4]. 제안된 모노펄스 비교기는 다수의 위상천이기가 사용되었음에도 불구하고 넓은 대역폭을 가지며, 도파관의 폭과 길이만을 조절해서 설계가 가능하므로 밀리미터파 영역의 W-대역에서 설계할 때 높은 재현성을 가질 수 있다.

II. 모노펄스 비교기 구조

제안하는 광대역 모노펄스 비교기는 그림 1과 같이 총 4개의 90° 하이브리드와 8개의 90° 위상천이기로 구성되며, 3개의 입력 포트(Σ , ΔEL , ΔAZ)와 4개의 출력포트(Ant1~Ant4)를 가진다. 비교기는 W-band에서 사용될 수 있도록 약 64 GHz의 차단주파수를 가지는 도파관으로 설계되었고, 그 크기는 그림 1의 왼쪽 상단과 같다. 측정을 위해 각 포트는 WR-10 규격의 도파관으로 설계하였고, 따라서 Transition을 필요로 한다. 비교기에서 한 개의 90° 하이브리드는 두 개의 위상천이기와 결합되어 180° 하이브리드 블록을 형성한다. 비교기는 후면에서 급전하는 도파관 슬롯 배열안테나에 결합하는 것을 목표로 하며, 추후에 각 사분면의 후방에서 급전할 수 있도록 하이브리드들은 서로 수직하게 배치한다.

2-1 자기보상 위상천이기

도파관 구조에서 위상지연 $\Phi(f)$ 는 식 (1)과 같다.

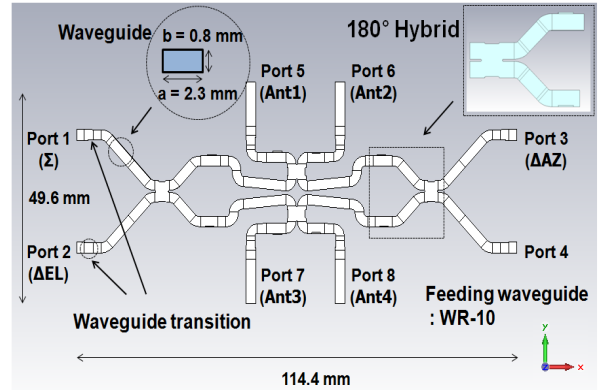


그림 1. 제안된 모노펄스 비교기
Fig. 1. Design of proposed monopulse comparator.

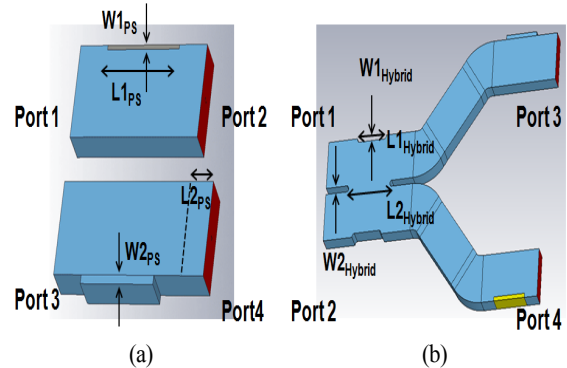


그림 2. 자기보상 위상천이기(a)와 180°하이브리드(b)
Fig. 2. Self-compensating phase shifter(a) and 180° hybrid(b).

$$\Phi(f) = \beta(f)L \tag{1}$$

이 때 $\beta(f)$ 는 도파관의 주파수에 따른 위상 상수이며, L 은 도파관의 물리적 길이이다. 위상 지연은 도파관의 분산특성으로 인해 주파수의 함수가 된다. 도파관에서의 위상지연은 도파관의 길이를 조절하거나 폭을 조절하여 정할 수 있는데, 각각의 방법으로 만든 위상천이기는 위상 지연의 주파수에 대한 미분값이 서로 반대 부호를 갖게 된다. 이러한 특성을 결합하면 광대역에서 주파수 변화에 둔감한 위상천이기를 설계할 수 있으며, 이를 자기보상 위상천이기에라 한다^[2]. 앞서 설명한 자기보상 위상천이기의 구조는 그림 2의 (a)와 같고, 설계 파라미터는 표 1과 같다. 그림 3은 주파수에 대한 위상차를 시뮬레이션한 결과이다. 지연선로만을 이용할 경우, 90도 기준 $\pm 10^\circ$ 오차

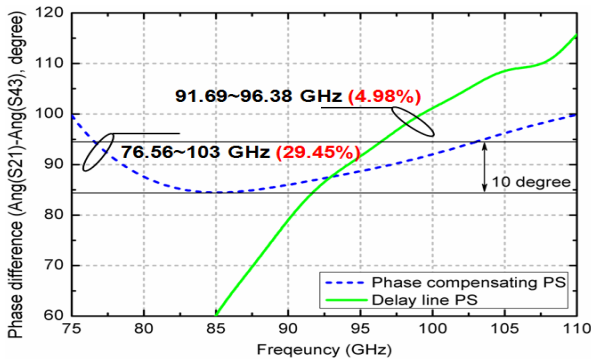


그림 3. 자기보상 위상천이기(PS) 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation result of self-compensating phase shifter (PS).

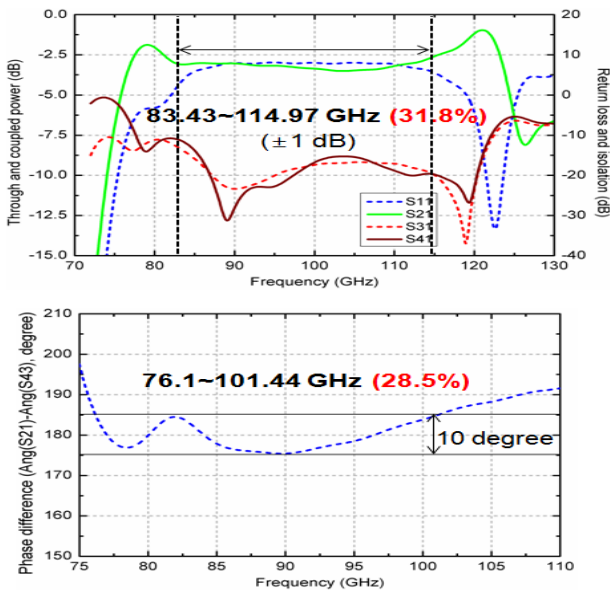


그림 4. 180° 하이브리드 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation result of 180° hybrid.

이내에 91.69~96.38 GHz(4.98 %)의 협대역 특성을 보이는 반면, 자기보상 위상천이기는 76.56~103 GHz(29.45 %)의 광대역 특성을 갖는 것을 볼 수 있다.

2-2 180° 하이브리드

광대역으로 설계된 90° 하이브리드에 자기보상 위상천이기를 결합하여 그림 2의 (b)와 같이 180° 하이브리드를 구성하였다. 설계 파라미터는 표 1과 같다. 그림 4는 180°

표 1. 자기보상 위상천이기와 180°하이브리드의 설계 파라미터(단위: mm)

Table 1. Design parameters of self-compensating phase shifter and 180° Hybrid.

W1 _{PS}	0.2	W1 _{Hybrid}	0.18
W2 _{PS}	0.2	W2 _{Hybrid}	0.3
L1 _{PS}	2.4	L1 _{Hybrid}	2.36
L2 _{PS}	0.66	L2 _{Hybrid}	3.6

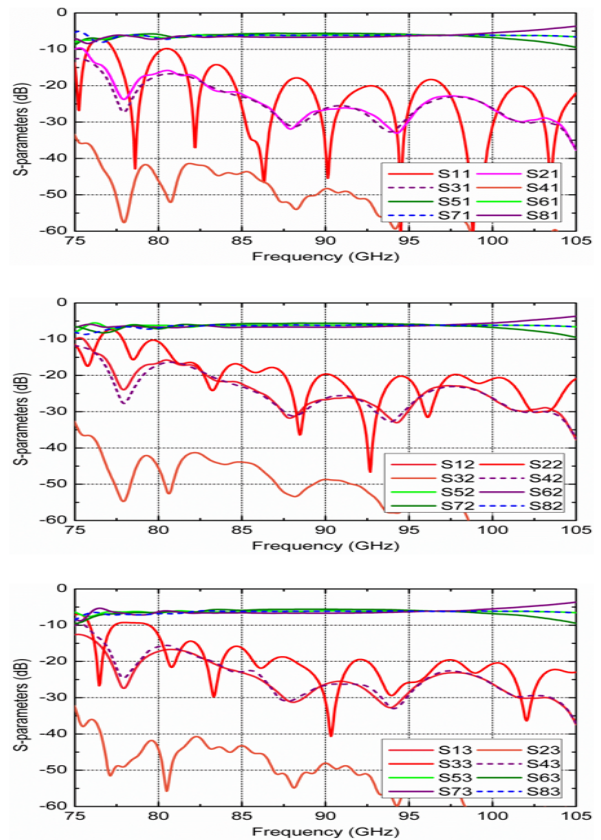


그림 5. 모노펄스 비교기 S 파라미터 시뮬레이션 결과
Fig. 5. S-parameter simulation result of monopulse comparator.

하이브리드의 시뮬레이션 결과를 크기와 위상 응답에 대해 보여준다. 광대역 특성을 갖는 자기보상 위상천이기를 적용한 결과, 설계된 하이브리드 또한, 포트간 전달 특성이 ±1 dB 크기 차이를 기준으로 83.43~114.97 GHz(31.8 %), ±5° 위상차이를 기준으로 76.1~101.44 GHz(28.5 %)의 광대역 특성을 보인다.

2-3 모노펄스 비교기

모노펄스 비교기는 앞서 설계된 광대역 180° 하이브리드 네 개를 결합하여 그림 1과 같이 설계하였다. 총 여덟 개의 포트가 구성되며, 그 중 네 개는 안테나부에 연결되고, 세 개는 합차 패턴을 위한 입력 포트가 되며, 나머지는 사용하지 않고 50옴으로 종단시킨다. 모노펄스 비교기는 W-대역 운용을 목표로 설계되었으며, 그림 5와 6은 합패턴(Σ)과 차패턴(ΔEL , ΔAZ)을 위한 세 개의 포트에서의 전달특성을 보여준다. 세 포트 모두 목표대역 내에서 크기와 위상에서 광대역 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 설계된 모노펄스 비교기의 주요 블록인 180° 하이브리드에는 그림 2의 자기보상 위상천이기가 결합되어 있기 때문에 전파가 진행하는 두 경로의 물리

적 길이가 다르게 된다. 따라서 하이브리드들을 연결하는 도파관의 위치 및 길이를 조절하고 최적화하여 그림 1과 같이 인접한 입출력 포트들 같은 면에 위치시켰다. 설계된 모노펄스 비교기는 W-대역 밀리미터파 광대역 모노펄스 탐색기에 이용이 가능하다.

III. 결 론

도파관 구조를 이용하여 W-band 밀리미터파 탐색기용 광대역 모노펄스 비교기를 설계하였다. 시스템의 운용 대역폭을 극히 제한할 수 있는 기존의 위상천이기 대신 광대역 특성을 갖는 자기보상 위상천이기를 90° 하이브리드를 결합하여 비교기의 핵심 부품인 180° 하이브리드를 구성하였고, 그 결과 모노펄스 비교기의 운용 대역폭을 획기적으로 넓힐 수 있었다. 설계된 비교기는 도파관 구조의 슬롯 배열안테나와 결합되어 고효율 밀리미터파 모노펄스 탐색기 설계에 응용될 수 있으며, 전주도금 방식을 이용하여 제작할 경우 단일 공정으로 방사부와 급전부를 높은 재현성과 정밀도를 가지고 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Donald R. Rhodes, *Introduction to Monopulse*, McGraw Hill, pp. 20-41, 1959.
- [2] Yu Jian Cheng, Wei Hong, and Ke Wu, "Broadband self-compensating phase shifter combining delay line and equal-length unequal-width phaser", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 58, no. 1, pp. 203-210, Jan. 2010.
- [3] Yu Jian Cheng, Wei Hong, and Ke Wu, "94 GHz substrate integrated monopulse antenna array", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 1, pp. 121-129, Apr. 2012.
- [4] Dong-yeon Kim, Youngjoon Lim, Hee-sung Yoon, and Sangwook Nam, "High-efficiency W-band electroforming slot array antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 4, pp. 1854-1857, Apr. 2015.

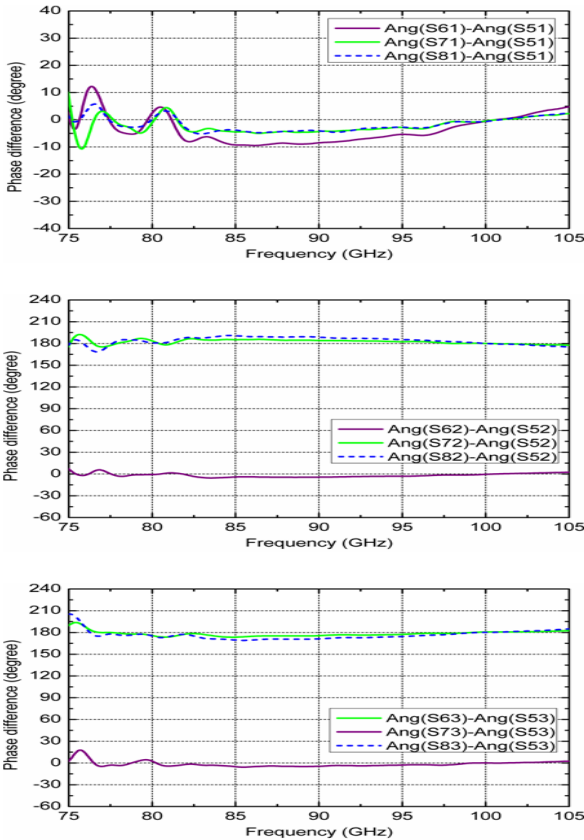


그림 6. 모노펄스 비교기 위상차 결과
Fig. 6. Phase difference simulation result of monopulse comparator.