

LHTL 위상변위기를 이용한 4×4 광대역 위상배열안테나

4×4 Broadband Phased Array Antenna Using LHTL Based Phase Shifter

박 순 우* · 김 흥 준†
(Soonwoo Park · Hongjoon Kim)

Abstract - This paper proposes a 4×4 broadband phased array antenna using a Left-Handed Transmission Line (LHTL) based phase shifter. The phased array is constructed with sixteen quasi-Yagi antenna elements and the phase shifters, as well as four power dividers. A key component of the system, the LHTL based phase shifter is able to control a phase delay of incident waves linearly and continuously. The fabricated phased array antenna operate for a frequency range of 800 MHz (1.6 GHz~2.4 GHz). The beam scanning range of the 4×4 array antenna is $\pm 27^\circ$ horizontally and vertically while the antenna gain is maintained with a variation of ± 1.4 dBi.

Key Words : LHTL, Phase shifter, Phased array, Antenna

1. 서 론

위상 배열 안테나는 다수의 안테나를 평면 또는 공간상에 배열한 후 각 안테나 급전 전류의 위상을 전기적으로 제어함에 따라 합성된 빔의 방향을 제어할 수 있는 안테나이다. 기존의 느린 기계식 빔 편향이 아닌, 전기적으로 빠른 빔 편향을 가능하게 함으로써 항공기나, 미사일 등의 추적 시스템에 널리 이용되고 있다[1][2]. 최근에는 통신 기술에도 적용되어 통신시스템에서 전자기 에너지를 송수신기 쪽으로 집중시킴으로써 효율을 높이는 스마트 안테나 시스템으로도 활용되고 있다[3].

이러한 위상배열 안테나의 핵심은 단연 위상 변위기라 할 수 있다. 최근에는 반도체 기술과 제조공정 기술의 발달로 위상 변위기에 관한 다양한 연구가 선행되어 왔지만 대부분의 위상 변위기는 협대역 특성, 연속적인 위상 변위에 제약, 제한적인 위상변위범위 등과 같은 한계가 있다[4-6].

본 논문에서는 메타물질의 1차원적 형태인 왼손법칙 전송선로(LHTL) 구조의 위상 변위기[7]를 이용하여 광대역 4x4 위상 배열 안테나를 제작, 그 특성을 고찰하였다. 안테나의 경우 광대역한 특성을 가지는 quasi-Yagi 안테나[8]를 선정하였고, 왼손법칙 전송선로 구조의 위상 변위기를 통해 안테나 인가전류의 위상을 조절하였다. 무반향 측정실에서 수직 및 수평방향 빔 편향 각도와 안테나 이득을 측정하고 결과 광대역한 주파수 범위에서 연속적인 빔 편향이 가능함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 왼손법칙 전송선로 구조를 이용한 위상 변위기

버렉터 다이오드는 인가되는 역전압에 의해 공핍층이 변화하며, 이를 통해 다이오드의 커패시턴스가 가변된다. 버렉터 다이오드는 커패시턴스의 변화를 위해 보통 P-N 반도체접합 중 P영역을 강하게 도핑하며, DC전압을 인가할 경우 P영역은 공핍층의 변화가 거의 없게 되고, N영역만 공핍층 폭의 변화가 생기게 된다. 다이오드의 N영역을 NX^m 의 형태로 도핑하면 버렉터 다이오드의 커패시턴스는 인가된 역전압에 대해 다음과 같이 식(1)로 표현될 수 있다.

$$C_d(V) = \frac{C_{d0}}{\left(1 + \frac{V}{V_{bi}}\right)^{\frac{1}{m+2}}} \quad (1)$$

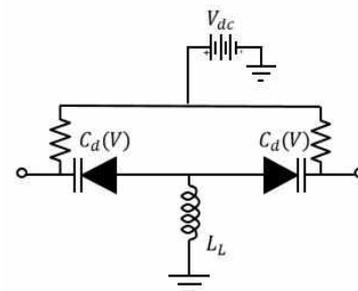


그림 1 합성 LHTL의 단위 구조

Fig. 1 A unit cell structure of synthetic LHTL

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea
E-mail: hongjoon@knu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea

Received : October 7, 2016; Accepted : December 9, 2016

여기서 V 는 다이오드 인가된 역전압, C_{j0} 는 인가된 역전압이 0일 때 다이오드 커패시턴스, V_{bi} 는 다이오드 Built-in voltage, $C_j(V)$ 는 다이오드 커패시턴스, m 은 특정 도핑 프로파일을 가지기 위한 상수이다.

그림 1은 합성 LHTL의 단위 셀 구조를 보여준다. 단위 셀 구조는 두 개의 직렬 버렉터 다이오드와 하나의 병렬 인덕터로 구성되어 있다. 이러한 고역 통과 필터 구조의 단위 셀을 여러 개로 연결할 경우 Bragg 차단 주파수가 생기며 식 (2)로 표현된다.

$$f_{Bragg}^L = \frac{1}{4\pi\sqrt{L_L \cdot C_L(V)}} \quad (2)$$

여기서 L_L 은 병렬 인덕터의 인덕턴스, C_L 은 직렬 버렉터 다이오드의 커패시턴스이다. 이러한 구조에서 특성임피던스 (Z_{0L})와 위상 변위 계수(β_L)는 각각 식 (3)과 식 (4)로 근사될 수 있다.

$$Z_{0L} \approx \sqrt{\frac{L_L}{C_L(V)}} \quad (3)$$

$$\beta_L(V) \approx \frac{-1}{\omega\sqrt{L_L \cdot C_L(V)}} \quad (4)$$

식 (4)과 같이, LHTL의 위상 변위 계수는 음수로 표현된다. 이는 위상의 전파 방향이 전력의 전파 방향과 반대가 되는 1차원 메타 물질의 한 형태임을 의미한다. 버렉터 다이오드의 도핑 프로파일(m)이 -1.5인 하이퍼어브러프트 접합 다이오드를 이용하였을 때, 위상 변위 계수는 식(5)와 같이 인가전압에 대해 선형적임을 알 수 있다.

$$\beta_{LHTL} \approx -\frac{(1 + \frac{V}{V_{bi}})}{\omega\sqrt{LC_{j0}}} \quad (5)$$

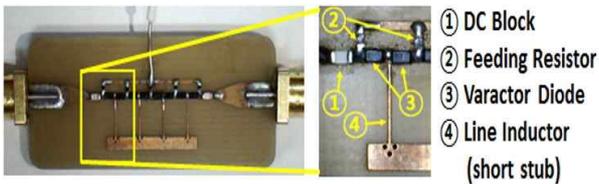


그림 2 제작된 LHTL 위상변위기
Fig. 2 Fabricated LHTL phase shifter

그림 2는 제작된 왼손법칙 전송선로 형태의 위상변위기이다. 버렉터 다이오드는 SKYWORKS사의 smv-1232 079LF이며, m 이 -1.79인 하이퍼-어브러프트 접합 다이오드이다. 병렬 인덕터는 마이크로스트립 형태로 구현하였다.

그림 3은 제작된 위상 변위기의 인가전압에 따른 삽입손실과 위상 변위를 나타낸다. 삽입손실이 5 dB 이하를 유지하는 인가전

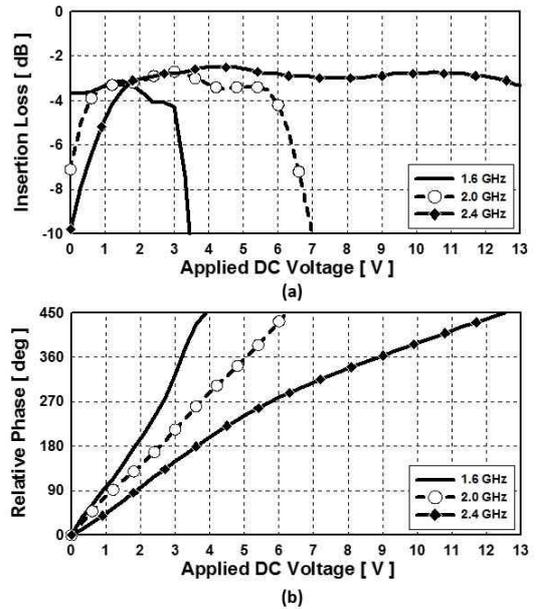


그림 3 제작된 위상 변위기의 인가전압에 따른 삽입손실(a)과 위상변위(b)
Fig. 3 Insertion loss(a) and phase variation(b) of the fabricated phase shifter with respect to a DC bias voltage

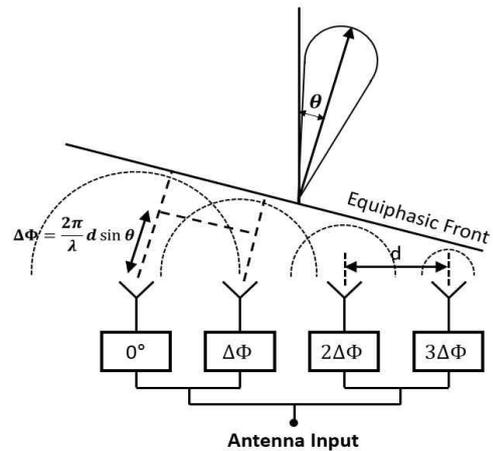


그림 4 위상 배열 안테나의 빔 편향 개념도
Fig. 4 Beam-steering concept of a phased array antenna

압 범위 내에서, 1.6 GHz에서는 0°~363°, 2.0 GHz에서는 0°~472°, 2.4 GHz에서는 0°~455°의 선형적인 위상 변위를 보임을 알 수 있다. 1.6 GHz와 2.4 GHz 사이의 어떠한 주파수에서도 선형적인 360° 이상의 위상변화가 가능하였다.

2.2 4x4 위상 배열 안테나 제작 및 특성 실험 결과

그림 4는 위상 배열 안테나의 비 편향 원리를 설명하기 위한

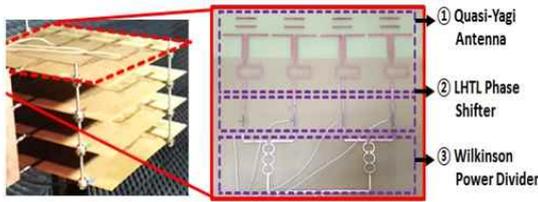


그림 5 제작된 4x4 광대역 위상 배열 안테나
 Fig. 5 Fabricated 4x4 broadband phased array antenna.

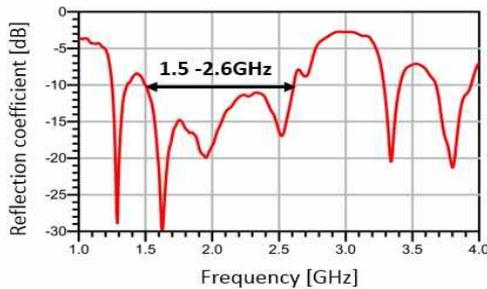


그림 6 사용된 단일 Quasi-Yagi 안테나의 반사계수
 Fig. 6 Reflection coefficient of a single Quasi-Yagi antenna

그림이다. 위상 배열 안테나는 안테나 배열에서 각 안테나의 급전전류 위상을 조절함에 따라 방사되는 빔의 각도를 컨트롤 할 수 있는 안테나를 뜻한다. 여기서 빔 각도와 각 안테나의 급전전류 위상과의 관계는 다음의 식으로 정의된다.

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (6)$$

위 식을 보면, 위상 배열 안테나의 빔 편향을 컨트롤하기 위해서는 위상 변위기의 성능이 아주 중요한데, 위상 변위기의 위상 조절이 아주 정확하게 이루어진다면 빔을 원하는 각도로 정확하게 컨트롤 할 수 있다. 본 논문에서 사용한 위상변위기의 경우 버랙터 다이오드의 인가전압에 따라 원하는 위상을 손쉽게 구할 수 있기 때문에 제안하는 위상 배열 안테나의 경우 원하는 각도로 아주 정확하게 빔 편향이 가능하게 된다.

그림 5는 제작된 위상 배열 안테나이다. 본 논문에서는 광대역이며 지향성이 높은 Quasi-Yagi 안테나에 제작된 위상 변위기를 결합시켜 4x4 배열로 구성해 위상 배열 안테나를 제작하였다. 사용된 단일 Quasi-Yagi 안테나의 반사계수는 그림 6과 같다. 실험은 무반향 측정실에서 진행하였으며 Labview를 이용해 각 위상변위기에 전압을 인가하였다.

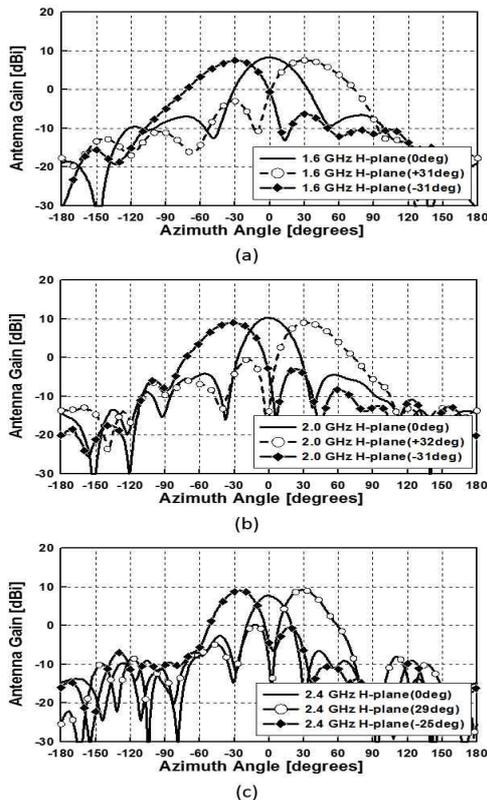


그림 7 위상 배열 안테나의 수평방향 빔 편향 측정결과
 Fig. 7 Horizontal direction beam-steering measurement results of the phased array antenna.

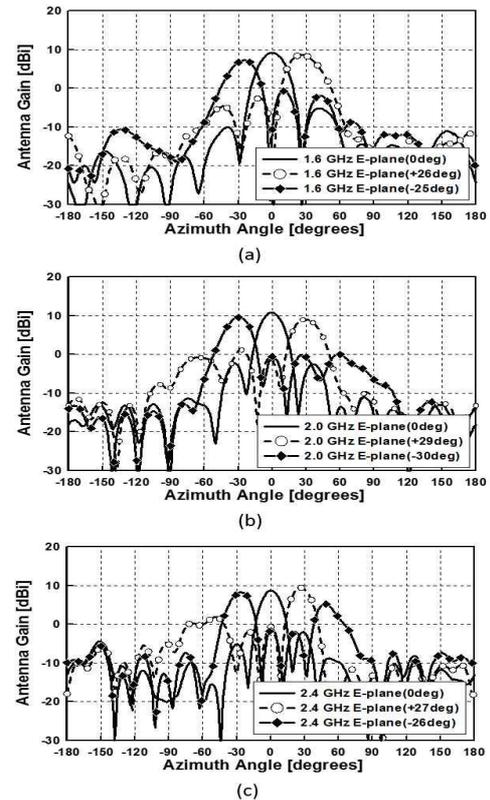


그림 8 위상 배열 안테나의 수직방향 빔 편향 측정결과
 Fig. 8 Vertical direction beam-steering measurement results of the phased array antenna

제작된 LHTL 위상 변위기를 이용한 4×4 광대역 위상 배열 안테나의 빔 편향 범위와 안테나 이득을 측정된 결과, 수평방향의 경우 그림 7에서 볼 수 있듯이 1.6 GHz, 2.0 GHz, 2.4 GHz에서 각각 $-31^{\circ}\sim+31^{\circ}$, $-31^{\circ}\sim+32^{\circ}$, $-25^{\circ}\sim+29^{\circ}$ 의 빔 편향 범위와 7.61 dBi~8.39 dBi, 9.08 dBi~10.36 dBi, 7.82 dBi~9.24 dBi의 안테나 이득을 측정할 수 있었다. 수직방향의 경우 그림 8에서 볼 수 있듯이 1.6 GHz, 2.0 GHz, 2.4 GHz에서 각각 $-25^{\circ}\sim+26^{\circ}$, $-30^{\circ}\sim+29^{\circ}$, $-26^{\circ}\sim+27^{\circ}$ 의 빔 편향 범위와 7.26 dBi~9.23 dBi, 9.06 dBi~10.85 dBi, 8.29 dBi~9.45 dBi의 안테나 이득을 측정할 수 있었다. 즉, 1.6GHz와 2.4GHz내의 어느 주파수에서건 수평, 수직 방향으로 주 빔의 각도를 $\pm 27^{\circ}$ 이상 변환이 가능하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 버랙터 다이오드를 사용한 윈손법칙 전송선로 구조의 위상 변위기를 이용하여 4×4 광대역 위상 배열 안테나를 설계하였다. 성능 측정 결과, 동작 주파수 대역폭이 1.6 GHz - 2.4 GHz로 800MHz의 광대역 특성을 보였고, 안테나의 최대 이득은 10.36 dBi, 빔 편향 범위는 상하좌우 $56^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 임을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 위상 배열 안테나는 간단한 형태로 구현이 가능하고 인가전압에 따른 선형적인 위상 변위가 가능하기 때문에 위상 배열 안테나의 빔을 원하는 방향으로 쉽게 조절할 수 있다. 이러한 특성은 향후 차량용 레이더 및 이미징 시스템, 무선 전력전송 시스템 등에 다양하게 적용이 가능 할것으로 판단된다.

감사의 글

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2015R1D1A1A02061454) and Info-Communication & Broadcasting Technology Research Program through the Ministry of Science, ICT and Future Planning (B0101-16-1375)

References

[1] Wirth, Wulf-Dieter. Radar techniques using array antennas. Vol. 10. IET, 2001.
 [2] M. E. Russell, Future of RF technology and radars, Radar Conference, IEEE, pp. 11-16, Apr. 2007.
 [3] Han, Guodong, et al. "A novel hybrid phased array antenna for satellite communication on-the-move in Ku-band." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 63.4 (2015): 1375-1383.

[4] G. Zomchek and S. Laxpati, S-band phased patch array design for satellite applications, In: IEEE Antennas Propagation Society International Symposium, Vol. 1A, Washington, D.C., 2005, pp. 338 - 341.
 [5] F. Ellinger, H. Jäckel, and W. Bächtold, Varactor-loaded transmission-line phase shifter at c-band using lumped elements, IEEE Trans Microwave Theory Tech 51 (2003), 1135 - 1140.
 [6] R.P. Hsia, W.-M. Zhang, C.W. Domier, and N.C. Luhmann, Jr, A hybrid nonlinear delay line-based broad-band phased antenna array system, IEEE Microwave Guided Wave Lett 8 (1998), 182 - 184.
 [7] H. Kim, A.B. Kozyrev, A. Karbassi, and D.W. van der Weide, Linear Tunable Phase Shifter Using a Left-Handed Transmission Line, IEEE Microwave Wireless Compon Lett 15 (2005), 366 - 368.
 [8] N. Kaneda, W.R. Deal, Y. Qian, R. Waterhouse, and T. Itoh, A broadband planar quasi-Yagi antenna, IEEE Trans Antennas Propag 50 (2002).

저 자 소 개



박 순 우 (Soonwoo Park)

1988년 1월 11일생. 2011년 부산대학교 바이오산업기계공학과 졸업(공학 학사). 2015년 경북대학교 전기공학과 졸업(공학 학사). 2015.2~현재 경북대학교 전기공학과 석사과정 재학 중
 Tel : 053-950-5601
 E-mail : soonwoo@knu.ac.kr



김 흥 준 (Hongjoon Kim)

1972년 10월 4일생. 1997년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 University of Southern California 전기공학과 졸업(공학 석사). 2006.9~2011.2 미국 City University of New York 조교수. 2011.3~현재 경북대학교 전기공학과 부교수
 Tel : 053-950-5601
 Fax : 053-950-6600
 E-mail : hongjoon@knu.ac.kr