

Radant Lens용 45° 위상 변위 레이어의 등가회로 연구

Study on Equivalent Circuit of 45° Phase Shift Layer for Radant Lens

성 철 민 · 박 동 철

Cheol-Min Seong · Dong-Chul Park

요 약

본 논문에서는 X-대역 Radant lens 4-bit 위상 변위기 설계에 필요한 11.25°, 22.5°, 45° 위상 변위 레이어(layer) 중에서 45° 레이어의 등가회로에 관하여 기술한다. 45° 위상 변위 레이어에 대한 CST사의 MWS(Microwave Studio)와 Agilent사의 ADS(Advanced Design System) 시뮬레이션을 비교 분석하여 등가회로를 추출하고, 등가회로를 통해 얻을 수 있는 이론치와 측정치를 비교한다. 또한, 추출된 등가회로를 활용하여, 4-bit Radant lens의 위상 bit 시뮬레이션 결과도 제시한다.

Abstract

This paper describes the equivalent circuit of 45° layer, one of 11.25°, 22.5°, and 45° phase shift layers, which are needed for X-band Radant lens 4-bit phase shifter. The equivalent circuit is extracted by comparing the CST's MWS results with the Agilent's ADS results for 45° phase shift layer. The simulated result is compared with the measured one. Using the extracted equivalent circuit, the phase bit simulation results of 4-bit Radant lens are also presented.

Key words : Radant Lens, Phase Shifter, Equivalent Circuit

I. 서 론

전자적 빔 조향을 위한 위상 배열 레이다 시스템은 X-대역에서 주로 페라이트 위상 변위기를 사용하기 때문에 매우 고가이며 위상 명령 체계 또한 복잡하여^[1], 이를 보완할 단순한 위상 명령 체계를 갖고 저가로 구현할 수 있는 Radant lens 위상 변위기가 소개되었다^{[2],[3]}.

Radant lens는 평행판 도파관 내에 전파의 진행 방향 수직으로 유전체 위상 변위 레이어를 삽입하여 위상 변위기로 동작시키기 위한 장치이다. 위상 변위 레이어의 한 측면에 다이오드가 연결된 금속 패턴을 구현시켜, 금속 패턴의 폭과 다이오드의 ON/OFF에 따라 위상 변위량의 조절이 가능하다. 이러한

위상 변위 레이어를 전파 진행 방향으로 적절하게 위치시켜 전체적인 위상을 조절함으로써 전파의 1차원 빔 조향을 구현할 수 있다.

Radant lens 4-bit 위상 변위기는 그림 1과 같이 22.5°, 45°, 90°, 180° bit로 구성되며, 각 bit는 여러 개의 11.25°, 22.5°, 45° 위상 변위 레이어의 적절한 조합으로 구성된다^{[4],[5]}.

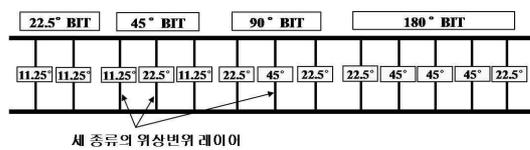


그림 1. Radant lens 4-bit 위상 변위기
Fig. 1. Radant lens 4-bit phase shifter.

「이 연구는 2009년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20100616-079

· 교신저자 : 박동철(e-mail : depark@cnu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 9월 24일

본 연구팀은 지난 수년간 X-대역 Radant lens 위상 변위기 개발 연구를 수행하여 왔다^{[5]-[9]}. 11.25°, 22.5° 위상 변위 레이어를 활용한 22.5°, 45° bit의 경우, 측정치와 이론치가 잘 일치했던 반면에, 45° 위상 변위 레이어를 사용해야 하는 90°, 180° bit에서는 상대적으로 오차가 크게 나타났었다^[8]. 이는 45° 위상 변위 레이어의 설계가 완전하지 않았기 때문이며, 따라서 45° 위상 변위 레이어의 등가회로에 대한 보완 연구가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 45° 위상 변위 레이어의 위상 오차를 줄인 개선된 등가회로를 제시하고, 이 등가회로를 이용한 90° bit의 동작 특성을 확인하고자 한다. 상용 소프트웨어인 CST사의 MWS와 Agilent사의 ADS를 이용한 두 시뮬레이션 결과를 비교하여 등가회로를 추출하였다. 또한, 45° 위상 변위 레이어에 대한 측정결과를 제시함으로써 Radant lens용 위상 변위 레이어의 설계 타당성을 입증하고자 한다.

II. 45° 위상 변위 레이어

2-1 위상 변위 레이어

그림 2는 평행 도파관 내의 Radant lens용 위상 변위 레이어이다. 전자파(TEM)의 진행 방향은 z 방향이고, 전계는 x 방향으로, 자계는 y 방향으로 존재한다. 평행 도파관 내의 위상 변위 레이어는 유전체 위에 다이오드를 포함하는 주기적인 금속 패턴으로 구현된다. x 방향의 금속 패턴은 인덕턴스 값을 제공하며, y 방향의 주름진 금속 패턴은 커패시턴스 값을 제공한다.

그림 2가 y 방향으로 무한 주기 구조를 갖는다면 그림 3처럼 magnetic wall을 갖는 단위 셀로 무한 주기 구조로 해석할 수 있다.

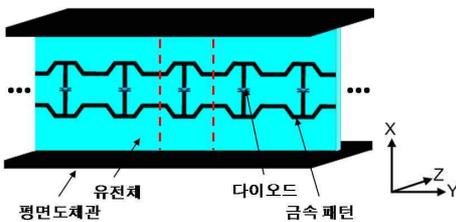


그림 2. 위상 변위 레이어 구조
Fig. 2. Phase shift layer structure.

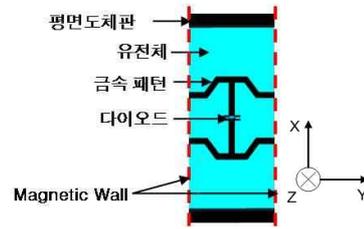


그림 3. 위상 변위 레이어 단위 셀
Fig. 3. Phase shift layer unit cell.

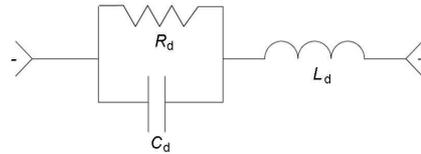


그림 4. PIN 다이오드 모델
Fig. 4. PIN diode model.

그림 4는 PIN 다이오드 모델이다. R_d 는 레이어의 삽입 손실에, C_d 는 레이어의 요구되는 서셉턴스 변화에 영향을 주게 되는데, 우리 목적에 적합한 R_d 와 C_d 값을 갖는 M/A-COM사의 MA4FCP305 PIN 다이오드로 선택하였다^[10]. L_d 는 0.6 nH, R_d 는 2.1 Ω , 그리고 C_d 는 50 fF이다. R_d 는 정 바이어스 상태에서, C_d 는 역 바이어스 상태에서 측정된 값이므로 다이오드가 ON 상태일 때는 L_d 와 R_d 의 직렬 연결로, OFF 상태일 때는 L_d 와 C_d 의 직렬 연결로 모델링하였다.

2-2 위상 변위 레이어의 등가회로

그림 5는 다이오드의 ON/OFF에 따른 위상 변위 레이어의 기존 등가회로를 나타낸 그림이다^[8]. 다이오드가 ON 상태인 경우, 그림 3에서 x 방향의 전계와 평행한 금속 패턴은 L_1 으로 등가화될 수 있다. 또한, 평행판 도파관과 y 방향으로 놓인 금속 패턴 사이의 전계에 의해 생성된 커패시턴스 값은 C_1 으로 등가화할 수 있다. L_1 은 다이오드의 L_d 와 더해져 C_1 과 직렬 공진을 일으켜 위상 변위 레이어가 저지 대역 특성을 갖게 한다. 평행한 두 개의 금속 패턴은 그 사이의 전계에 의하여 C_1 로 등가화되어, 인덕터 (L_1 과 L_d)와 병렬 공진을 일으켜 위상 변위 레이어는 통과 대역 특성을 갖게 된다. 다이오드의 저항 성분인 R_d 는 주로 직렬 공진의 Q 값에 영향을 미치며, R_d 값이 커질수록 Q 값이 작아지며 삽입 손실이 증가한

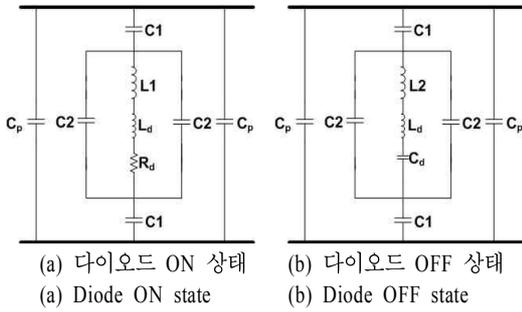


그림 5. 위상 변위 레이어의 기존 등가회로
Fig. 5. Previous equivalent circuit of phase shift layer.

다. C_p 는 평행판 도파관을 구성하는 두 평면 도체의 커패시턴스를 나타낸다.

다이오드가 OFF 상태의 경우, x 방향의 전계와 평행한 금속 패턴은 L_2 로 등가화될 수 있다. 역 바이어스된 다이오드와 L_2 , C_1 은 직렬 공진을 일으키며, 이 때 위상 변위 레이어는 저지 대역 특성을 갖게 된다. C_2 는 다이오드 및 L_2 와 병렬 공진을 일으키며, 이 때 위상 변위 레이어는 통과 대역 특성을 갖게 된다.

11.25°, 22.5° 위상 변위 레이어의 경우, 그림 5의 형태로 추출된 등가회로 모델은 MWS 시뮬레이션과 중심 대역에서 거의 일치함을 보였다^[6]. 하지만 45° 위상 변위 레이어에서는 상대적으로 오차가 컸으며, 특히 다이오드가 OFF 상태일 때 직렬 공진이 일어나는 높은 주파수 부근에서는 많은 차이를 보였다^[9]. 이는 큰 위상 변위량을 구현하기 위해서는 ON/OFF 스위칭될 때 서셉턴스의 변화량이 커야 하는데, 이를 구현하기 위하여 기존에는 금속 패턴의 폭을 넓게 하였다. 따라서 11.25°, 22.5° 레이어의 경우에 비해 45° 레이어의 경우, 금속 패턴의 폭이 넓어지게 되어 기존의 등가회로가 잘 맞지 않게 되기 때문으로 판단된다.

금속 패턴의 폭을 줄이면서 ON/OFF 서셉턴스 변화를 증가시키고자 다이오드가 부착되는 부근에 stub를 추가하였다. Stub를 추가함으로써 금속 패턴의 폭을 기존 0.0253 λ 에서 0.0158 λ 로 줄였으며, 최종 결정된 45° 레이어 구조에서 stub를 추가함으로써 약 3° 위상 변위량을 증가시킬 수 있었다.

45° 위상 변위 레이어의 더 정확한 등가회로를 위하여 그림 6에 보인 바와 같이 다이오드에 병렬로 C_g 를 추가하였다. 다이오드가 부착되는 부분에서 금

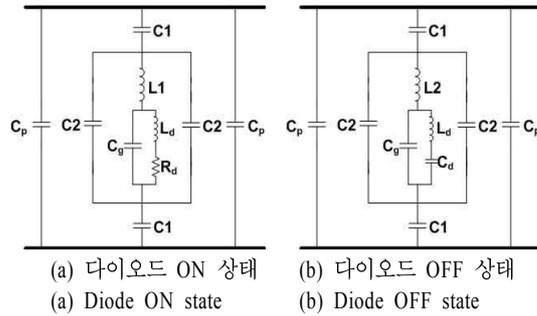


그림 6. 위상 변위 레이어의 개선된 등가회로
Fig. 6. Improved equivalent circuit of phase shift layer.

속 패턴의 폭 및 stub에 의한 커패시턴스를 C_g 로 간주하였다.

III. 시뮬레이션 결과

MWS를 이용하여 그림 7과 표 1에 나타난 파라미터

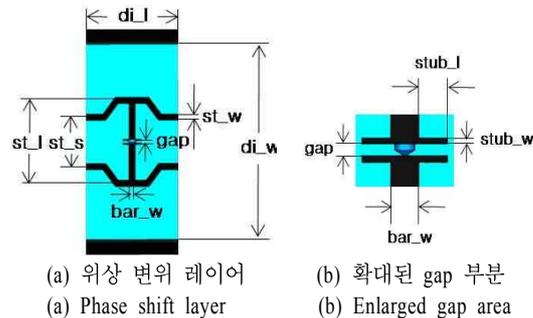


그림 7. 45° 위상 변위 레이어의 주요 파라미터
Fig. 7. Major parameters of a 45° phase shift layer.

표 1. 그림 7 파라미터 값

Table 1. Parameter values for Fig. 7.

파라미터	값(λ)
st_l	0.2120
st_s	0.1266
st_w	0.0158
di_l	0.2373
di_w	0.5
gap	0.0063
bar_w	0.0158
stub_l	0.0158
stub_w	0.0032

표 2. 개선된 등가회로의 파라미터 값

Table 2. Parameter values of the improved equivalent circuit.

파라미터	값
L_1	0.711 nH
L_2	1.780 nH
C_1	0.470 pF
C_2	0.024 pF
C_p	0.002 pF
C_g	0.097 pF

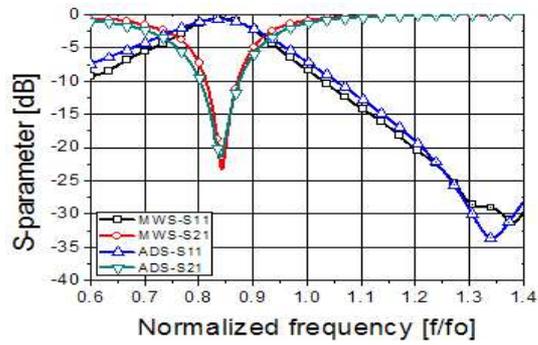
터 값에 따라 시뮬레이션을 수행하고 ADS를 이용하여 등가회로에 대한 시뮬레이션을 수행하여, 두 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그림 8의 ADS 시뮬레이션에는 그림 5의 등가회로를 이용하였고, 그림 9에서는 그림 6의 개선된 등가회로를 이용하였다.

유전체 기판을 나타내는 전송선 위에 등가회로가 놓인다. 그림 6에 보인 개선된 등가회로의 파라미터 값을 표 2에 표기하였다.

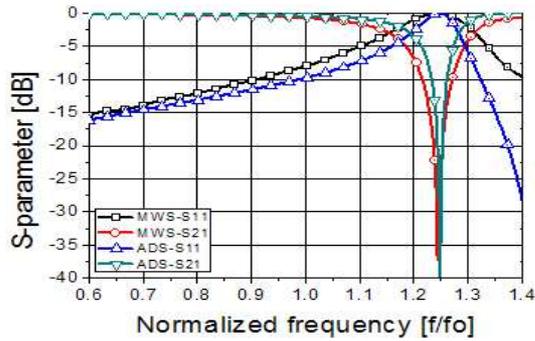
그림 8과 그림 9를 비교해 보면 C_g 는 L 과 같이 직·병렬 공진에 영향을 주지만 L 은 다이오드의 ON, OFF에 상관없이 큰 영향을 주는 반면에 C_g 는 ON되었을 때보다는 OFF 되었을 때 공진 주파수를 크게 이동시켰다. 이는 그림 7(b) stub₁의 길이가 늘어날 때와 같은 효과이며, C_g 를 삽입하는 것이 더 정밀한 등가회로임을 알 수 있다.

그림 9(c)에서 ADS는 45.6°, MWS는 45.98°의 위상차를 주며, 두 그래프가 0.38°의 위상차를 가지며 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 기존 등가회로를 이용한 결과인 그림 8(c)에서는 ADS에서 45.08°를 보여 MWS 결과와 0.9°의 위상차를 가지며 오차가 더 컸음을 알 수 있다. 또한, 기존 등가회로의 경우 중심 주파수에서 위, 아래 주파수로 갈수록 오차는 더 커짐을 확인할 수 있다.

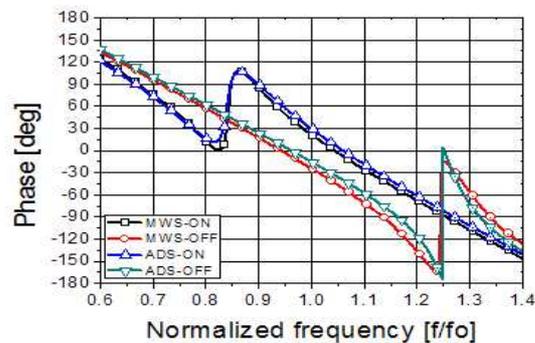
다음으로 개선된 등가회로를 활용하여 90° bit를 설계하였다. 90° bit는 그림 1처럼 22.5° 위상 변위 레이어 2개와 45° 위상 변위 레이어 1개로 구성된다. 평행판 도파관 내에 위상 변위 레이어를 배치하고, 레이어 간의 임피던스 매칭을 위하여 다이오드가 OFF되었을 때를 기준으로 레이어 사이의 간격을 조절하였다.



(a) 다이오드 ON 상태
(a) Diode ON state



(b) 다이오드 OFF 상태
(b) Diode OFF state

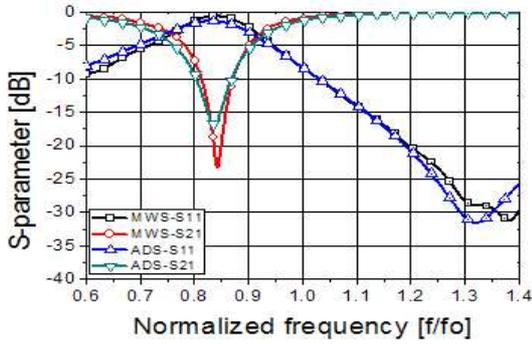


(c) ON/OFF 상태의 위상
(c) Phases of ON/OFF state

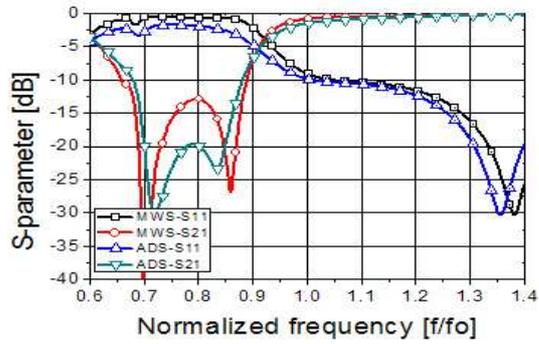
그림 8. 기존 등가회로를 이용한 45° 위상 변위 레이어 시뮬레이션

Fig. 8. Simulation of 45° phase shift layer using previous equivalent circuit.

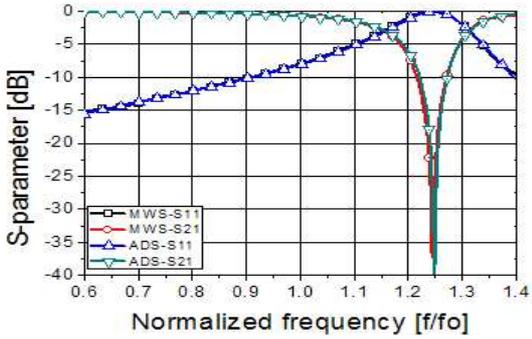
그림 10은 90° bit의 시뮬레이션 결과이다. 그림 10(b)를 보면 2개의 22.5° 위상 변위 레이어와 1개의 45° 위상 변위 레이어 사이의 간격을 조절하여 중심 주파수에서 매칭이 이루어지게 하였으므로 -40 dB 이상의 반사 손실을 보인다. 이때의 위상을 그림



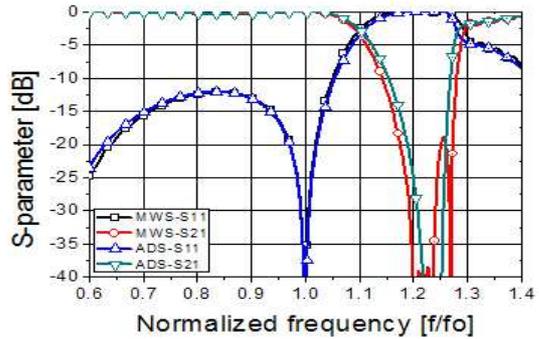
(a) 다이오드 ON 상태
(a) Diode ON state



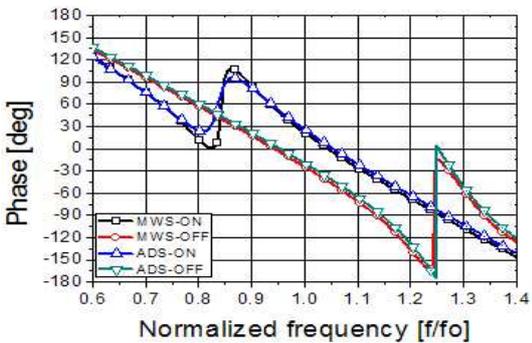
(a) 다이오드 ON 상태
(a) Diode ON state



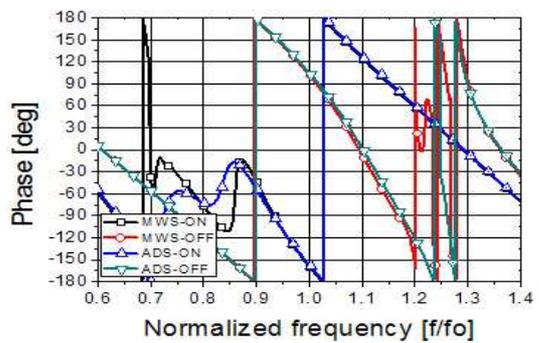
(b) 다이오드 OFF 상태
(b) Diode OFF state



(b) 다이오드 OFF 상태
(b) Diode OFF state



(c) ON/OFF 상태의 위상
(c) Phases of ON/OFF state



(c) ON/OFF 상태의 위상
(c) Phase of ON/OFF state

그림 9. 개선된 등가회로를 이용한 45° 위상 변위 레이어 시뮬레이션

Fig. 9. Simulation of 45° phase shift layer using improved equivalent circuit.

10(c)에 나타내었으며, 두 시뮬레이션 결과가 중심 주파수에서 MWS는 98.9°, ADS는 97.5°로 1.4° 오차를 보여 개선된 등가회로를 활용한 90° bit가 잘 동작함을 알 수 있다.

그림 10. 90° bit 위상 변위기 시뮬레이션

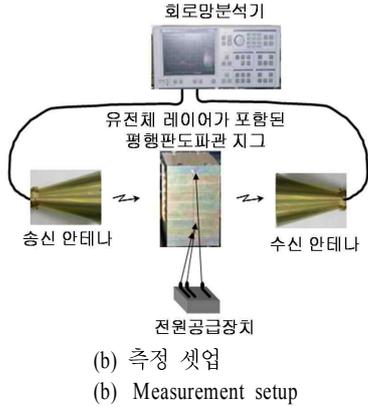
Fig. 10. Simulation of 90° bit phase shifter.

IV. 제작 및 측정

그림 11은 제작된 45° 위상 변위 레이어와 측정 셋업이다. 레이어는 현실적인 조건을 고려하여 무한 주기 대신에 20번의 주기를 갖는 레이어로 제작하였다. 그림 11(a)는 제작된 레이어를 보여주고 있으며,



(a) 제작된 45° 위상 변위 레이어
(a) Fabricated 45° phase shift layer



(b) 측정 셋업
(b) Measurement setup

그림 11. 제작된 45° 위상 변위 레이어와 측정 셋업
Fig. 11. Fabricated 45° phase shift layer and measurement setup.

동전은 100원 짜리 동전 크기이다. 이 레이어를 평행판 도파관 내에 삽입하여 그림 11(b)와 같은 셋업으로 측정하였다. 그림 11(b)의 평행판 도파관 지그(jig)는 7개의 평행판 도파관을 상하 방향으로 적층시킬 수 있는 지그이지만, 본 측정에서는 중앙에 있는 평행판 도파관에 45° 위상 변위 레이어를 삽입하고, 나머지 평행판 도파관의 공간은 흡수체를 채워 결국 하나의 도파관 만이 존재하도록 하였다. 외부 전원 공급 장치로 다이오드를 ON/OFF시켰고, 송·수신 안테나와 벡터 회로망 분석기를 이용해 위상을 측정하였다.

20번의 주기를 갖는 레이어는 MWS 시뮬레이션 결과 53.31°의 위상차를 주어 해석된 무한 주기 구조의 45.98°보다 7.33° 더 큰 위상차를 갖는다. 그림 12는 45° 위상 변위 레이어의 측정된 위상이다. 측정 결과, 중심 주파수에서 54.39°의 위상차를 보여 시뮬레이션 값인 53.31°와 약 1°의 차이를 보였다. 본 측정 셋업의 경우, 안테나와 도파관이 공간적으로 떨어져 배치되어 있어 삽입 손실과 반사 손실의 정밀 측정이 어려워 본 논문에서는 위상 특성만을 고찰하였다.

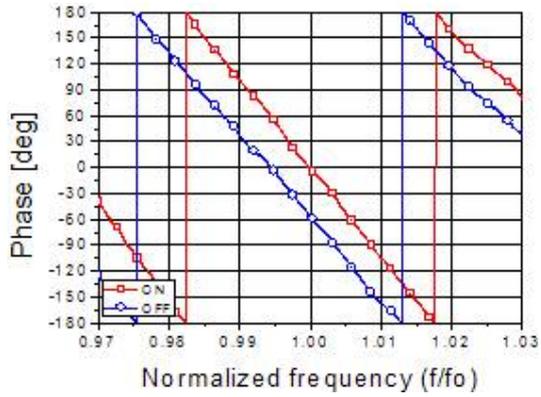


그림 12. 45° 위상 변위 레이어의 측정된 위상
Fig. 12. Measured phase of 45° phase shift layer.

V. 결론

본 논문에서는 Radant lens용 4-bit 위상 변위기에 사용되는 45° 위상 변위 레이어의 등가회로 개선 연구를 수행하였다. 개선된 등가회로가 기존의 등가회로보다 우수한 특성을 보여, 본 연구 결과는 앞으로 Radant lens용 4-bit 위상 변위기의 설계 연구에 중요한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사 의

시뮬레이션 및 자료 조사를 수행해 준 전남두 학생, 또 제작에 수고를 아끼지 않으신 (주)MTG 김동석 사장, 한인회 부장, 이두연 연구원에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- [1] Shiban K. Koul, Bharathi Bhat, *Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters*, Artech House, 1991.
- [2] J. B. L. Rao, G. V. Trunk, and D. P. Patel, "Two low-cost phase arrays", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 12, issue 6, pp. 39-44, 1997.
- [3] J. B. L. Rao, J. B. Evins, S. M. Brockett, M. Parent, J. Valenzi, and D. Wilson, "An affordable scanning array using a radant lens", *Proc. 1999 Antenna Symposium*, Amherst, MA, Sep. 1999.

[4] S. Nayagam, S. Mahapatra, "On the design of high-power multiple-element loaded-line phase shifters", *Int. J. Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 175-186, 1985.

[5] 이기오, 박동철, "RADANT 렌즈를 위한 평행판 도파관 내에서의 4-비트 다이오드 위상 변위기 구현", *한국전자과학회논문지*, 20(9), pp. 906-913, 2009년 9월.

[6] 이기오, 박동철, "평행판 도파관 내에서의 다이오드 위상 변위기 특성에 관한 연구", *한국군사과학기술학회지*, 12(5), pp. 644-651, 2009년 10월.

[7] 조정래, 이기오, 김동석, 류상철, 박동철, "주기적

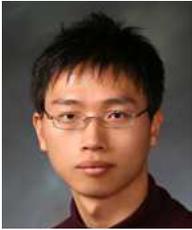
인 금속 스트립 패턴을 갖는 유전체층이 놓인 평행판 도파관 내에서의 전파 특성", *한국전자과학회논문지*, 20(1), pp. 45-51, 2009년 1월.

[8] 박동철 외, "복합배열 안테나 연구", *전파탐지 특화연구센터 송수신장치 연구실 2단계 종결 보고서*, 2009년.

[9] 성철민, 이기오, 류상철, 김동석, 박동철, "Radant lens 위상 변위기 유전체층의 산란 행렬 연구", 2009년 군사과학기술학회 종합학술대회, 2009년 8월.

[10] <http://www.macom.com/DataSheets/MA4FCP300.pdf>

성 철 민



2008년 8월: 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 전파공학 전공 석사과정
 [주 관심분야] 위상 변위기, 안테나

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)
 1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany 방문교수
 1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairman
 1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairman
 2000년~2001년: 한국전자과학회 회장
 2005년~2007년: 대덕 Wireless 포럼 회장
 1976년~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] Microwave and Millimeterwave Passive Components, Antennas, EMI/EMC