

論文2002-39TC-3-6

2-6 GHz 디지털 위상변위기 모듈 (2-6 GHz Digital Phase Shifter Module)

鄭明得*, 蘇俊鎬*, 禹丙日*, 林重洙*, 李相沅**,
朴東撤***

(Myung-Deuk Jeong, Joon Ho So, Byung-Il Woo, Joong-Soo Lim,
Sangwon Lee, and Dong-Chul Park)

요 약

2-6 GHz 디지털 위상변위기 모듈을 설계, 제작하였다. 위상변위기 모듈에 사용된 MMIC 칩은 광대역을 구현하기 위해 Lange 커플러로 구성된 반사형 회로를 이용하여 설계 및 제작하였다. 위상변위기 모듈은 6.1° RMS 위상오차, 13.5 dB 최대 삽입손실과 각각, 8 dB와 10 dB의 입·출력 반사손실 특성을 갖는다. 32개의 위상 상태를 측정하기 위해서 컴퓨터를 사용하여 측정을 자동화 시켰다. 8×8 위상배열용 모듈들간의 RMS 삽입 위상오차는 최대 ±0.5° 이내이고, 모듈들간의 평균 삽입손실 편차는 최대 ±0.5 dB를 넘지 않았다. 제작된 위상변위기 모듈의 크기는 45 × 22.5 × 60 mm³ 이다.

Abstract

2-6 GHz digital phase shifter module has been designed and fabricated. For the broadband operation and performance, MMIC phase shifter chip for phase shifter module was designed and fabricated by using the reflection-type circuits with Lange coupler. The fabricated phase shifter module shows 6.1° RMS phase error, 13.5 dB maximum insertion loss, and 8 dB and 10 dB input and output return losses, respectively. Computer controlled measurement systems are realized in order to get the measured data of 32 phase states. The RMS insertion phase error and the average insertion loss deviation among 8×8 modules for the phased-array system are less than ±0.5° and ±0.5 dB, respectively. The size of fabricated phase shifter module is 45 × 22.5 × 60 mm³.

Key Words : MMIC, Phase shifter module, Reflection-type, Phased-array.

I. 서 론

위상변위기는 마이크로파 시스템에 널리 사용되는

* 正會員, 國防科學研究所

(ADD)

** 正會員, Wavics co., Ltd.

(Wavics co., Ltd.)

*** 正會員, 忠南大學校 電波工學科

(Dept. Radio and Science Engineering, Chungnam Nat'l Univ.)

接受日字:2001年10月25日, 수정완료일:2002年1月16日

소자로서 전자빔 조향과 주파수 천이 등과 같은 기능을 수행하며, 빔 패턴을 생성하고 조향을 위한 시스템에서 필요로 하는 위상 변위를 제공해주는 소자이다. 특히, 위상배열 시스템(phased-array system)에서는 전체 시스템의 성능과 비용을 좌우하는 핵심 부품이다. 이와 같은 응용 분야에서는 위상변위기가 대량으로 소요되기 때문에 그 회로가 간단하고 작아지는 것은 큰 장점이 된다. 그러므로 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits) 기술을 이용한 경우, 신뢰성 (reliability) 뿐 아니라 가격적인 측면에서 매우 유리하다.

1947년에 도파관을 이용한 위상변위기에 관한 논문이 발표된 후^[1], 페라이트를 사용하여 안테나에 이용되

는 전자빔 스캐닝용 위상변위기에 이어 바랙터(Varactor) 다이오드를 이용한 아날로그 위상변위기가 소개되었고 이를 이용한 광대역 위상변위기가 연구되었다. 아날로그 형태의 단점을 보완하기 위하여 빔 조절이 비교적 용이한 디지털 형태의 위상변위기의 개발 필요가 대두되었다. 컴퓨터의 발달로 빔 조절이 비교적 쉬운 디지털 위상변위기가 반도체 기술과 접목되어 PIN diode, GaAs FET를 이용한 반도체 위상변위기의 연구로 이어졌고, 1980년대 후반에 와서 미국을 중심으로 개발되기 시작한 MMIC 프로젝트의 영향으로 위상변위기의 MMIC화가 본격적으로 시작되었다.

반도체를 이용한 위상변위기는 크게 두 가지, 다이오드를 이용한 경우와 MESFET를 이용한 경우로 발전되어져왔다. 다이오드를 이용한 위상변위기는 먼저 다이오드 루프(loop) 형태의 디지털 위상변위기가 처음으로 소개된 후, 다이오드를 이용한 광대역용 변위기가 발표되었으며 1974년에 배열 안테나용 다이오드 위상변위기를 발표하였으며^[2], 다이오드를 이용한 가변선로방식(switched-line type)의 위상변위기와 부하선로방식(loaded-line type)의 다이오드 위상변위기에 관한 연구결과가 발표했다^[3]. 그 후 다이오드를 이용한 MIC 형태의 디지털 위상변위기가 1980년도 후반까지 계속 연구되었다. MESFET를 이용한 위상변위기는 1984년에 GaAs FET를 이용한 위상변위기를 보고하였다^[4]. 그 후 다층기판(multilayer)을 이용한 FET 위상변위기가 연구되었다.

위상변위기는 동작 방식에 따라서 디지털 방식과 아날로그 방식으로 나눌 수 있는데, 아날로그 방식은 위상 변위를 위한 제어 소자의 값들을 연속적으로 변화시켜 원하는 위상 변위를 얻는 반면에, 디지털 방식은 정해진 하나의 위상 변위만을 갖도록 한다. 그러므로 디지털 방식은 각기 다른 위상 변위 갖는 위상 변위 단(section)을 cascade로 연결하여 특정한 위상 변위 값을 얻도록 한다. 특히, 디지털 위상변위기는 다수의 위상 변위 단의 연결이기 때문에 각 단의 위상 변위 값이 정확해야하고, 각 단 간의 상호 영향을 줄이기 위해서 좋은 VSWR 조건을 만족시켜야 한다.

본 논문에서 사용된 위상변위기용 스위칭 소자는 GaAs PIN 다이오드로서, 수직 구조로 되어 있어서 높은 항복 전압을 갖고 또 그 자체가 가지는 높은 선형성 때문에 고 전력을 단속해야 하는 시스템에 적합하다. 또 on 상태에서 낮은 저항을 갖고 off 상태에서 낮은 기생 정전

용량을 갖기 때문에 낮은 손실을 요구하는 시스템에서 PIN 다이오드를 선호하고 있다.

상업적, 또는 군사적 목적으로 오랫동안 사용되어 왔던 위상변위기는 근래에 하이브리드(Hybrid) 형태나 MMIC 형태 모두 제작되어 이용되고 있다. 그런데 최근 들어 인공위성이나 항공기 등에 적용하기 위해서 MMIC 형태로 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다^[5,6]. 본 논문에서는 개발된 MMIC 칩(chip)을 이용하여 8×8 위상배열용 안테나 시스템에 적용하기 위한 위상변위기 모듈을 제작하여 그 성능을 고찰하였다.

II. 본 론

1. MMIC 위상변위기 제작

위상변위기에 사용되는 구조는 가변선로방식, 부하선로방식, 필터 방식(high-pass/low-pass filter type)과, 반사 방식(reflection type) 등이 이용되고 있다^[7]. 이들 구조들은 각기 다른 특징들을 갖고있는데, 광대역의 동작을 위해서는 필터 방식이나 반사 방식을 이용하는 것이 적합하다. 필터 구조를 사용하게 되면 회로의 크기를 작게 만들 수 있는 장점이 있으나, 공정 상에서 발생할 수 있는 소자 값들의 변화가 위상변위기 동작에 크게 영향을 주는 단점이 있어서 매우 안정적인 공정이 필요한데, 이에 비해서 반사 구조는 동작원리상 커플러를 사용하기 때문에 회로의 크기가 커지는 단점이 있으나, 필터 구조에 비해서 입출력 정합이 우수하며, 위상 변위 발생하는 reactive 부하의 값이 절대적 값이 아닌 상대적 값으로 동작하기 때문에, 공정의 변화에 훨씬 안정적으로 동작할 수 있는 장점이 있다.

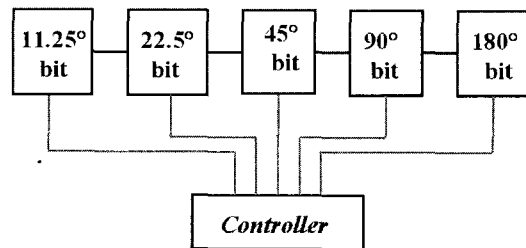


그림 1. 그림 2. 5-bit 위상변위기 구성
Fig. 1. Configuration of 5-bit phase shifter.

그림1은 5-bit 위상변위기 구성으로서 0° ~ 348.75°까지의 11.25° 간격으로 32 위상 상태가 조정된다.

본 논문에서는 광대역에서 동작하는 디지털 위상변

위기를 위해서 Lange 커플러를 사용한 반사 구조를 선택하였으며, PIN 다이오드와 적절한 커패시턴스(capacitance) 값을 이용하여 원하는 위상 변위를 얻을 수 있도록 설계 되어 있다. 국내기술로 개발된 PIN 다이오드를 이용한 제작된 5-bit MMIC 위상변위기의 사진이 그림2에 나타나 있다^[8]. Lange 커플러가 낮은 주파수에서 구현되기 위해서는 그 길이가 길어지게 된다. 따라서 전체 5-bit MMIC 위상변위기의 회로크기를 줄이기 위해서 Lange 커플러를 그림과 같이 구분해서 제작하였다. 전체 회로의 크기는 6.5 X 5.3 mm이다.

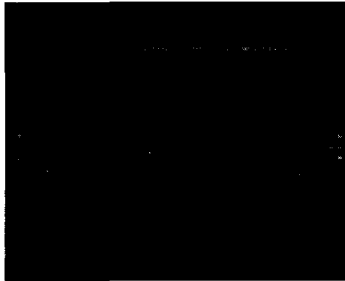


그림 2. MMIC 위상변위기 사진
Fig. 2. Photograph of MMIC phase shifter.

2. 위상변위기 모듈 제작 및 측정

제작된 MMIC 칩을 이용하여 위상배열 시스템에 적용하기 위해서 위상변위기 모듈을 설계 제작하였다. 모듈은 칩 성능을 최대한 유지하거나 개선시키도록 설계하였고 위상배열 안테나를 위한 정합용 단자를 추가하였다.

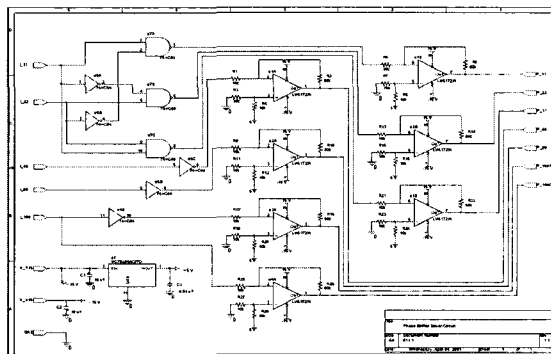


그림 3. 위상변위기 구동회로
Fig. 3. Driver circuit of the phase shifter.

그림 3은 위상변위기의 구동회로로서 5V의 logic level로 조절되는 제어선(control line) 5개와 +15V,

-15V, GND로 구성된 3개의 전원선(bias line)을 합하여 모두 8개로 구성되며, 8-pin D-SUB 콘넥터를 사용하여 32개 위상 상태를 조절하게 된다. 그림 4는 제작된 구동회로 사진이다.

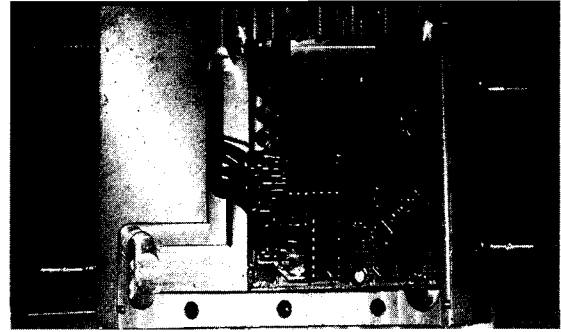


그림 4. 제작된 구동회로 사진
Fig. 4. Photograph of the driver circuit.

그림 5는 제작된 위상변위기 모듈의 RF 부분 회로 사진이므로, 모듈 제작은 광대역에서 MMIC 칩의 성능을 유지하거나 개선시키면서 배열 시스템에 적용 가능하도록 제작하였다.

일반적으로 RF 신호 전달을 위해서 사용되는 콘넥터(connector)는 여러 가지가 있으나, SMA 콘넥터처럼 나사를 돌려서 결합하는 구조는 위상배열구조를 갖는 시스템에 부적합한 경우가 종종 있다. 따라서 시스템 전체 성능은 저하되지 않으면서 조립시 탈·착이 용이하도록 자체 제작한 BMA(Blind Mate Adaptor) 콘넥터를 사용하여 RF 신호를 전달하도록 하였다.

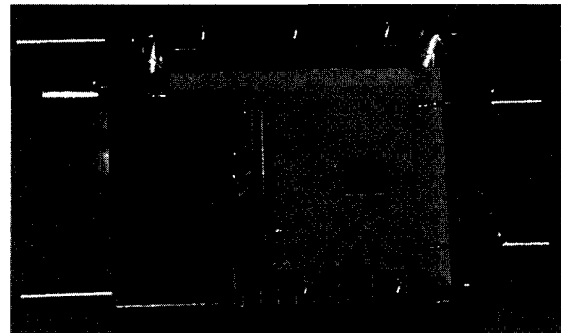


그림 5. 위상변위기 모듈의 RF 부분 사진
Fig. 5. Photograph of RF part of phase shifter module.

2-6GHz 대역에서 32개의 위상상태를 측정하기 위해서는 많은 양의 S-parameter를 측정해야 할뿐만 아니

라 RMS phase error 등을 계산하기 위해서 측정 자동화가 반드시 필요하다. 그림 6은 자동 측정장치 setup block diagram이다. 먼저, 제어판(control board)에 있는 마이크로 프로세서에 32상태(state)를 발생하도록 프로그래밍 한 다음, 컴퓨터에서 RS-232C를 통하여 제어판에 원하는 상태를 발생시킨 후, GPIB를 통하여 Network Analyzer를 제어하여 측정한다. 이 과정을 32번 반복하여 주어진 주파수대역에서 모든 측정 데이터를 얻는다. 그림 7은 제작된 측정장치 사진이다.

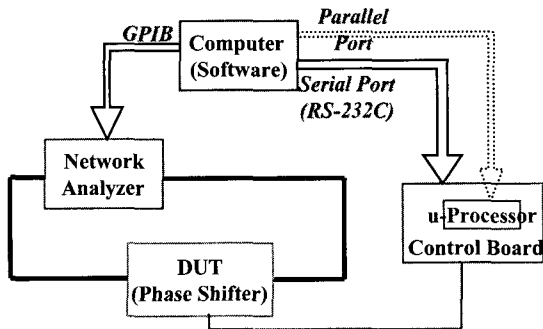


그림 6. 측정 자동화 block diagram
Fig. 6. Block diagram of the measurement set-up.

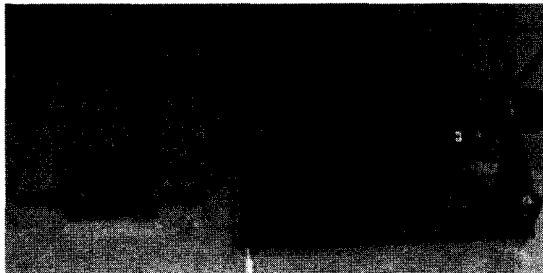
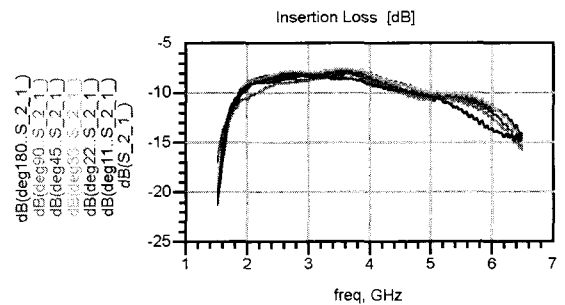


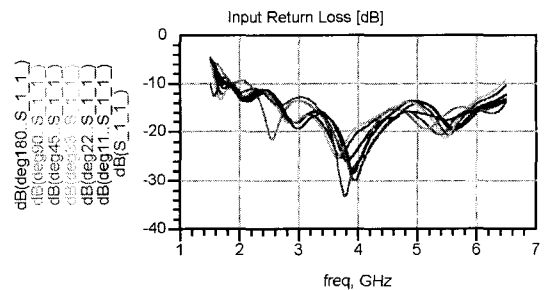
그림 7. 측정 장치 사진
Fig. 7. Photograph of the measurement equipment.

그림 8은 제작된 위상변위기 모듈의 위상 변위, 삽입 손실, 입출력 반사손실에 대한 측정결과를 보여주고 있다. 각 그림은 주요 7개 상태(0° , 11.25° , 22.5° , 33.75° , 45° , 90° , 180°)에 대한 측정결과로서, 주어진 주파수 범위에서 최대 삽입손실은 13.5dB이다. 삽입 손실의 대부분은 Lange 커플러에 의해서 발생되며, 그 중에서도 커플러의 길이가 길기 때문에 발생하는 conductor loss가 많은 부분을 차지하였다. 이 손실을 줄이기 위해서 substrate 두께를 증가시키는 방법이 있으나 칩 크기가 증가되고 via hole 공정이 까다롭게 된다. 그리고 칩 크기를 줄이기 위해 커플러를 접어서 사

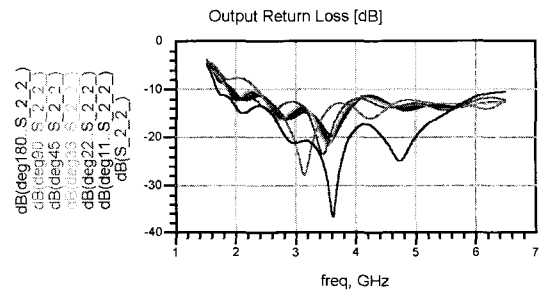
용하는데 이때 커플러의 좌·우 측 길이가 달라지지 않게 하는 layout 하는 것도 손실을 줄이는 한 방법이다. 위상변위기에서 주파수에 따른 삽입손실 차이는 칩 외부(off chip)에 등화기(equalizer) 등을 사용하여 평탄하게 할 수 있으나, 각 상태간의 삽입손실 차이는 위상변위기 자체 특성으로 칩 외부에서 보정 할 수가 없게 되므로 실제 시스템에 사용시 중요하게 취급된다. 각 상태간의 삽입손실 변화는 ± 1.5 dB 이다. 또한 입·출력 반사손실은 각각 8 dB와 10 dB 이상이며, 주요 7개 상태에서 위상 변위에 대한 RMS 최대 오차는 6.1° 로 계산되었다.



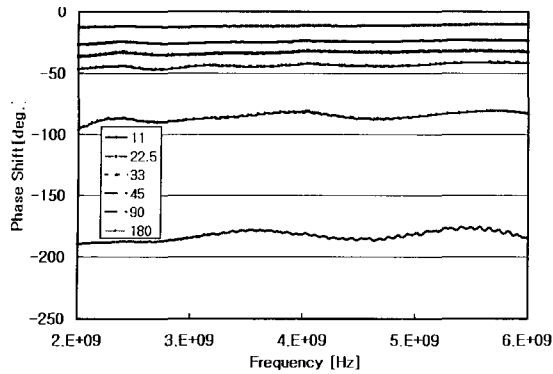
(a) 삽입손실
(a) Insertion loss



(b) 입력 반사손실
(b) Input return loss



(c) 출력 반사손실
(c) Output return loss



(d) 위상 변위
(d) phase shift

그림 8. 위상변위기 모듈의 측정 결과
Fig. 8. Measurement results of the phase shifter module.

그림 9는 32 상태에 대한 위상 특성으로서 디지털 위상변위기에 있어서 가장 중요한 특성이 된다. 그림에서 보는바와 같이 어떠한 상태도 서로 교차되지 않고 뚜렷이 구별됨을 알 수 있다. 위상천이 궤적은 -180° 에서 시작해서 0° 를 지나고 다시 -180° 에서 끝난다. 즉 -180° 가 출발점이자 끝나는 점이므로 가운데 부분에 오차가 큰 것처럼 보인다.

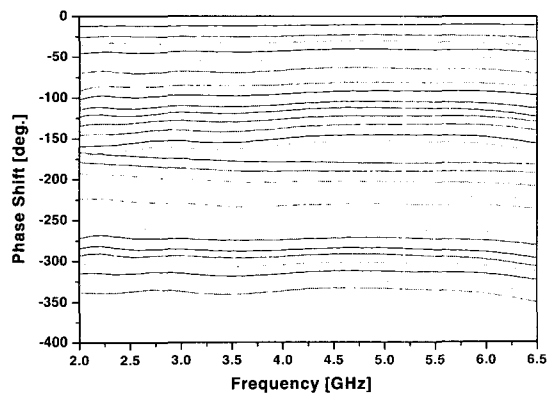


그림 9. 32 상태의 위상 특성
Fig. 9. 32-state phase characteristics.

또한, 위상변위기가 한꺼번에 여러 개의 모듈이 사용되는 위상배열안테나 시스템 같은 응용분야에 적용되기 위해서 반드시 고려해야할 사항 중에 하나가 전체 모듈간의 위상오차와 삽입손실 편차이다. 즉 동작주파수 범위 내에서 각 위상상태에 따른 모듈들간의 삽입손실 및 위상오차의 변화가 작아야 된다는 것이다. 예를 들어 동작주파수 범위에서 삽입손실 값 자체가 조

금 크더라도 그 기울기가 일정하다면 시스템 차원에서 보정(calibration) 할 수가 있으나, 주파수에 따라 삽입손실 값이 불규칙하다면 시스템 차원에서 보정하기가 어려울 뿐 아니라 복사출력이 변하게 되어 시스템 성능이 저하되게 된다. 8x8 array-용으로 제작된 모듈들간의 RMS 삽입 위상오차에 대한 특성이 그림 10처럼 계산되었으며, 그 편차는 동작주파수내에서 최대 $\pm 0.5^\circ$ 를 초과하지 않았다.

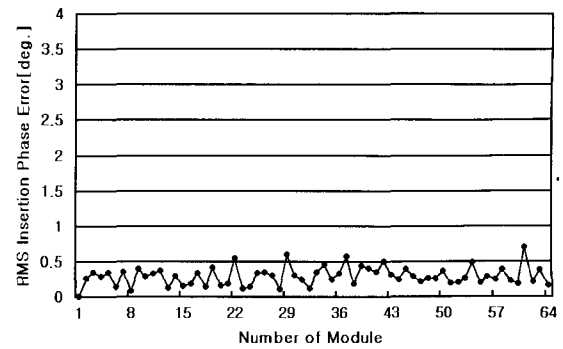


그림 10. 모듈들간의 RMS 삽입 위상오차
Fig. 10. RMS insertion phase error among modules.

그리고 그림 11은 64개 모듈들간의 평균 삽입손실 편차를 계산한 결과이며 최대 ± 0.5 dB를 넘지 않음을 보여주고 있다. 여기서 모듈간의 편차는 동작주파수에 따라 초기위상상태에서만 계산하였으며 기준이 되는 모듈은 임의로 선택하였다.

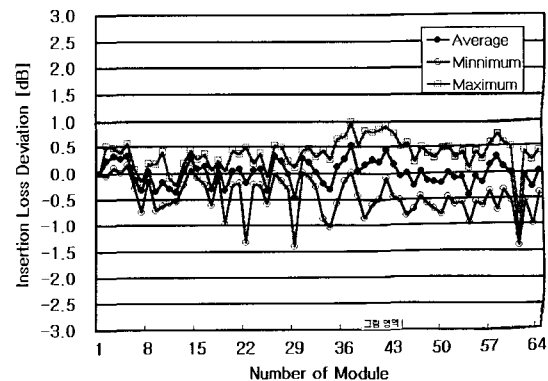


그림 11. 모듈들간의 삽입손실 편차
Fig. 11. Insertion loss deviation among modules.

그림 12는 8x8 위상배열 안테나 시스템의 빔 조향을 위해서 사용된 위상변위기 모듈의 사진이다.

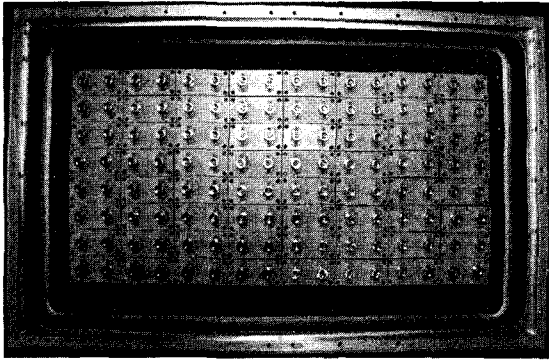


그림 12. 8×8 위상배열시스템 사진
Fig. 12. Photograph of 8×8 phased-array system.

III. 결 론

광대역 5-bit 위상변위기 모듈을 설계, 제작하였다. 모듈에 사용된 MMIC 칩은 PIN 다이오드와 함께 Lange 커플러를 사용한 반사 구조를 기본으로 제작하였다. 제작된 위상변위기는 최대 삽입손실이 13.5 dB이고, 입력 및 출력 반사손실이 각각 8 dB와 10 dB 보다 크며, 위상 변위의 RMS 최대 오차는 6.1°를 나타내었다. 32 상태의 위상특성을 컴퓨터로 제어하여 측정을 자동화 시켰다.

8×8 array용으로 제작된 모듈들간의 RMS 삽입 위상오차는 동작주파수내에서 최대 ±0.5°를 초과하지 않았으며, 모듈들간의 평균 삽입손실 편차는 최대 ±0.5 dB를 넘지 않음을 보여주고 있다. 이것은 MMIC를 이용한 위상변위기 장점이며, 실제 8×8 위상배열안테나에 적용하여 만족한 결과를 얻었다.

제작된 위상변위기는 광대역 동작을 요구하는 전자전 분야 등의 군용 통신시스템이나 상용 통신시스템에 적용 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. G. Fox, "An Adjustable Waveguide Phase Changer," *Proc. IRE*, vol. 35, pp. 658-674, December 1947.
- [2] J. F. White, "Diode Phase Shifters for Array Antennas," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-22, pp. 658-674, June 1974.
- [3] I. J. Bahl and K. C. Gupta, "Design of loaded-line PIN diode phase shifter," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-28, pp. 219-224, Mar. 1980.
- [4] Y. Ayasli, S. Miller, R. Mozzi, L. Hanes, "Wideband S-C Band Monolithic Phase Shifter," *IEEE Microwave and mm-wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, pp. 11-13, May 1984.
- [5] Christopher Moye, et al., "A Compact Broadband, Six-bit MMIC Phasor with Integrated Digital Drivers," *IEEE MTT-S*, pp. 457-460, 1990.
- [6] D.C. Boire, R. Marion, "A High Performance 6-18 GHz Five Bit MMIC Phase Shifters," *IEEE GaAs IC Symposium*, pp. 267-270, 1995.
- [7] Robert V. Garver, "Broad-Band Diode Phase Shifters," *IEEE MTT*, pp. 314-323, may, 1972.
- [8] 정상화, et al., "Design and Fabrication of 5-bit Broadband MMIC Phase Shifter," *한국전자과학회 논문지*, 13권, 2호, 2002.

저 자 소 개



鄭明得(正會員)
1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사). 1991년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사). 1991년 2월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원. 1998년 3월~현재 : 충남대학교 전자공학과 박사과정. <주관심분야 : 초고주파 회로설계, 마이크로파 소자>



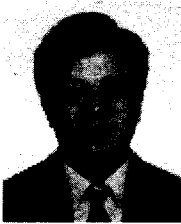
蘇俊鎬(正會員)
1988년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과(공학사). 1990년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과(공학석사). 1990년 2월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원. <주관심분야 : 능동위상배열 안테나 시스템 및 전자파 수치

해석>



禹丙日(正會員)

1985년 2월 : 부산대학교 물리학과 (이학사). 1987년 2월 : 부산대학교 물리학과 (이학석사). 1987년 3월~현재 : 국방과학연구소 연구원. <주관심분야 : 초고주파집적회로 및 전자파해석>



林重洙(正會員)

1955년 5월 10일생. 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사). 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사). 1994년 3월 : Auburn University Electrical Eng.(공학박사). 1980년 8월~현재 : 국방과학연구소, 초고주파기술 팀장 1998년 3월~현재 : 충남대학교 전자공학과 겸임 부교수. <주관심분야 : 레이더 및 전자전 장비 설계, 안테나 및 초고주파장치 설계 및 수치해석>

李相沅(李相沅)

현재 : 서울시립대 전자공학부 박사과정 재학중



朴東撤(正會員)

1974년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과(공학사). 1976년 2월 : 한국과학기술원 전기전자공학과(공학석사). 1984년 12월 : Univ. of California, Santa Barbara(공학박사). 1976년~현재 : 충남대학교 공과대학 전자공학과 교수. 1977년~1978년 : Ruhr University, Bochum, Germany, 방문교수. 1994년~1998년 : IEEE MTT Korea Chapter Chairperson. 1998년~현재 : IEEE EMC Korea Chairperson. 2000년~2001년 : 한국전자과학회회장. <주관심분야 : Microwave and millimeter-wave, passive devices, EMC/EMI topics and antenna>