



소형화된 4×4 버틀러 매트릭스 설계 및 구현

김지원*, 장유나*, 안달*, 이순흠**

Design and Implementation of Small Sized 4×4 Butler Matrix

Jiwon Kim*, Youna Jang*, Dal Ahn*, and Sunheum Lee**

본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행하였음.

요약

본 논문에서는 다중입출력 안테나의 빔포밍 네트워크로 사용할 수 있는 버틀러 매트릭스를 설계 및 제작하였다. 버틀러 매트릭스를 설계하기 위해 앞서 버틀러 매트릭스에 사용되는 브랜치라인 하이브리드와 크로스오버에 대해 중심주파수 1GHz에서 설계 및 3D 시뮬레이션을 진행하였으며, 사이즈 소형화를 위해 미앤더라인 형태를 사용하였다. 이를 바탕으로 4×4 버틀러 매트릭스를 설계하였고, EM 시뮬레이션을 통해 각각의 입력포트 입력 시 원하는 출력 위상차가 나오는지 확인을 하였다. 버틀러 매트릭스는 중심주파수 1GHz에서 설계 및 제작하였으며, 유전율 4.4의 FR4기판을 이용하였다. 제작된 버틀러 매트릭스의 측정결과 입력대비 각 포트의 출력 위상차가 $\pm 10^\circ$ 이내로 설계한 버틀러 매트릭스와 제작 오차를 제외하고 일치함을 알 수 있다.

Abstract

In this paper, we designed and implemented butler matrix for beamforming network of multiple input multiple output antenna. First, we designed the branch line hybrid and crossover used in the Butler matrix at 1GHz and it is simulated as 3D, and each elements is composed of meander line for miniaturization. Based on this, a 4×4 Butler matrix was designed, and it was confirmed through EM simulation that the desired output phase difference is obtained when input signal is supplied at input port. Butler matrix is designed and is implemented at center frequency 1GHz on the FR-4 substrate with a dielectric constant of 4.4. Measurement results of fabricated butler matrix are within $\pm 10^\circ$ according to the input vs output phase difference of each port, except manufacture error, which shows that the butler matrix is well designed.

Keywords

MIMO antenna, beamforming, butler matrix, meander line

* 순천향대학교 전기통신시스템공학과

- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-1586-7593>

- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-0556-0771>

- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-8481-9344>

** 순천향대학교 정보통신공학과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1626-4276>

· Received: Apr. 04, 2018, Revised: May 16, 2018, Accepted: May 19, 2018

· Corresponding Author: Sunheum Lee

Dept. of Information and communication Engineering, Soonchunhyang University, Asan, Chungnam 31538, Republic of Korea

Tel.: +82-41-530-1346, Email: sunheum@sch.ac.kr

1. 서론

최근 스마트 기기뿐만 아니라, IoT(Internet of Things)와 자율주행자동차 등의 무선 통신에 대한 수요가 급증하고 있으며, 이에 따른 다중경로 페이딩(Multipath Fading), 동일 채널 간섭(Co-chann El Interference) 등의 문제가 제기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 거론 되는 것이 다중입출력(MIMO, Multiple Input Multiple Output) 안테나이다. 특히, MIMO 안테나 빔 형성을 위한 핵심은 빔포밍 네트워크(Beamforming Network)로써, 원하는 크기, 및 방향으로 신호를 송·수신 하는 것을 목표로 한다[1][2].

여러 빔포밍 네트워크 중, 특히 버틀러 매트릭스는 구조적 복잡성이 적고 제품단가의 저비용으로 많이 사용되는 빔포밍 네트워크 중 하나이다. N×N 버틀러 매트릭스는 N개의 입력포트와 N개의출력포트를 가지며 각 입력포트에 인가된 신호가 균등하게 분배되어 N개의 출력포트에 전달된다. 하나의 입력포트에 신호가 인가되어 각각의 출력에 전달된 신호의 위상차는 동일하며, 신호가 인가된 입력포트에 따라 그 값이 달라진다[3][4].

차세대 무선통신 시스템은 신호의 품질 및 전달 속도뿐만 아니라, 휴대를 위한 스마트 기기 등의 소형화, 경량화 또한 주요 이슈가 되고 있다. 이를 위한 방법으로 선로 라인을 구부려서, 미앤더라인(Meander) 형태로, 회로에 적용함으로써, 소형화하는 방법은 회로 설계에 널리 이용되고 있는 방법 중 하나이다[5].

본 논문에서는 정규화 될 수 있는 중심주파수 1GHz 에서 빔포밍 네트워크를 위한, 4×4 버틀러 매트릭스(Butler Matrix)를 설계 및 제작하였다. 제안한 버틀러 매트릭스는 회로의 크기를 소형화 하기 위해, 각 소자 선로에 미앤더라인 형태를 적용하여 설계하였고, 설계한 버틀러 매트릭스는 마이크로스트립기판에 크기를 소형화하여, 제작 하였다. 제작된 버틀러 매트릭스는 미앤더 라인을 적용하지 않은 경우와 비교 시 소자의 소형화됨을 확인 할 수 있었다.

II. 설계이론

2.1 버틀러 매트릭스

4×4 버틀러 매트릭스의 구조는 그림 1과 같이 4개의 3dB 커플러(3dB Coupler)와 2개의 크로스오버(Crossover), 그리고 2개의 45도 선로로 구성된다. 4×4 버틀러 매트릭스는 4개의 3dB 커플러로 인하여 출력포트에서 입력포트 대비 1/4 전력 출력을 갖게 된다. 표 1에 명시된 것 같이 port 1, port 2, port 3, port 4 입력 포트에 대해 출력 포트의 위상차는 각 -45°, 135°, -135°, 45°로 나타나게 된다[6]-[8].

표 1. 4×4 버틀러 매트릭스 입출력 위상 관계
Table 1. Input/output phase relation of 4×4 butler matrix

Input \ Output	Port5	Port6	Port7	Port8	위상차
Port1	135°	90°	45°	0°	-45°
Port2	45°	-180°	-45°	90°	135°
Port3	90°	-45°	-180°	45°	-135°
Port4	0°	45°	90°	135°	45°

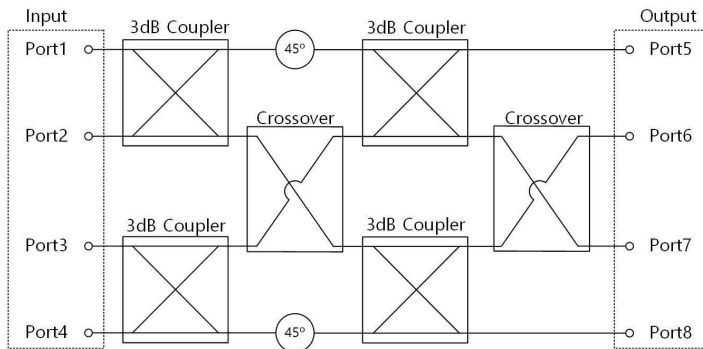


그림 1. 4×4 버틀러 매트릭스의 구조
Fig. 1. Structure of 4×4 butler matrix

2.2 브랜치라인 하이브리드(Branch line hybrid)

버틀러 매트릭스의 4개의 3dB커플러는 브랜치라인 하이브리드로 설계하였다. 브랜치라인 하이브리드는 출력포트 간 90° 위상차가 생기는 3dB 방향성 커플러이다[9].

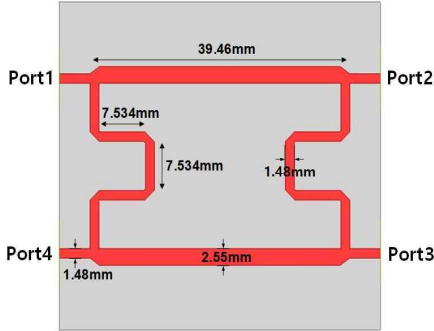


그림 2. 설계한 브랜치라인 하이브리드 구조
Fig. 2. Structure of designed branch line hybrid

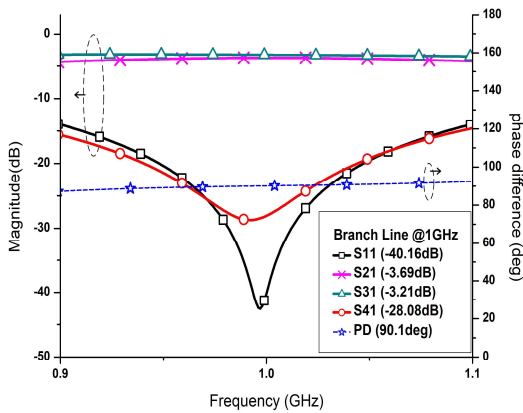


그림 3. 브랜치라인 하이브리드 EM 시뮬레이션 결과
Fig. 3. EM simulation results of branch line hybrid

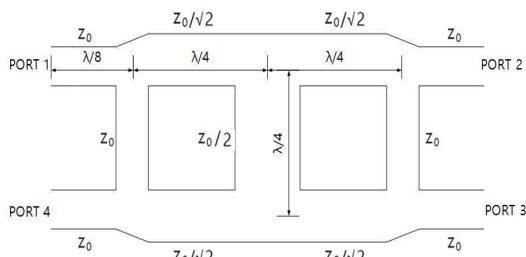


그림 4. 크로스오버 구조
Fig. 4. Crossover structure

그림 2는 설계한 브랜치라인의 구조로, 제작시 크기를 줄이기 위해, 미앤더라인을 이용하여 설계하였고, 그림 3은 ANSYS사의 HFSS 16.2 프로그램을 사용한 시뮬레이션결과이다.

그림 3의 S-파라미터의 특성을 보게 되면, S21과 S31이 각각 -3.69dB, -3.21dB로 두 출력간의 분배가 잘 되었음을 볼 수 있고, S11과 S41이 각각 -40.16dB, -28.08dB로 우수한 특성을 확인 할 수 있다. 출력 단 위상차 역시 90.1도로 90도의 근사치인 것을 확인 할 수 있다.

2.3 크로스오버

설계한 크로스오버의 조건은 입력포트의 대각선 방향으로 0dB 출력을 가지며 나머지 포트들은 격리가 되어야 한다는 것이다[10]. 거기에 더하여 입력 위상이 그대로 출력으로 전달되어야 한다. 이 조건을 만족시키기 위해 그림 4와 같은 크로스오버를 설계하였다.

그림 4의 크로스오버 구조를 보게 되면 브랜치라인 하이브리드 2개를 캐스캐이드 연결하고, 각 포트 라인에 45도 라인을 추가하여 설계한 것이다. S-매트릭스를 구하기 위해 이 구조의 우수-기수모드 해석을 하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix}_{even} = \frac{1}{2} T.L \begin{bmatrix} -1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix} T.L \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix}_{odd} = \frac{1}{2} T.L \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} T.L \quad (2)$$

$$= - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{where } T.L = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{4}) & jZ_0 \sin(\frac{\pi}{4}) \\ jY_0 \sin(\frac{\pi}{4}) & \cos(\frac{\pi}{4}) \end{bmatrix}$$

우수 모드의 경우 추가된 45도 라인에 대한 ABCD 파라미터에 두 개의 직렬연결 된 브랜치라인 하이브리드의 우수 모드 ABCD 파라미터를 곱

한 후 다시 45도 라인에 대한 ABCD 파라미터를 곱하여 크로스오버 회로의 우수 모드에 대한 ABCD 파라미터를 구한다. 이와 비슷한 방법으로 크로스오버 회로의 기수 모드에 대한 ABCD 파라미터도 구할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \quad (3)$$

$$T = \frac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \quad (4)$$

우수-기수 모드의 ABCD 파라미터를 구한 후, ABCD 파라미터를 이용해 반사계수와 투과계수를 식 (3), (4)를 통해 구할 수 있다. 구한 반사계수와 투과계수를 이용하여 각 포트에서 나오는 파의 크기를 식 (5)을 이용하여 구할 수 있으며 이는 각각 S-매트릭스의 1행 및 1열과 같다. 회로가 대칭성을 가지고 있기 때문에 나머지 요소는 전치시켜 (6)와 같은 S-매트릭스를 얻을 수 있다. 식 (6)을 통하여 그림 4의 구조가 입력대비 출력이 0dB이며, 동위상임을 확인 할 수 있다[9].

$$B_1 = (\Gamma_{even} + \Gamma_{odd})/2 = 0 \quad (5)$$

$$B_2 = (T_{even} + T_{odd})/2 = 0$$

$$B_3 = (T_{even} - T_{odd})/2 = 1$$

$$B_4 = (\Gamma_{even} - \Gamma_{odd})/2 = 0$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 5는 설계한 크로스오버의 구조이고, 그림 6은 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 크로스오버 역시 소형화를 위해 미앤더라인 형태로 되어있다.

S-파라미터의 특성을 보게 되면, S31이 -0.86dB로 port1의 입력신호가 port3로 잘 전달됨을 볼 수 있고, S11과 S21 그리고 S41이 각각 -38.18dB, -28.23dB, -34.88dB로 우수한 특성을 확인할 수 있다. 또한 위상도 -0.11°로 입력신호와 큰 차이 없이 잘 전달됨을 확인할 수 있다.

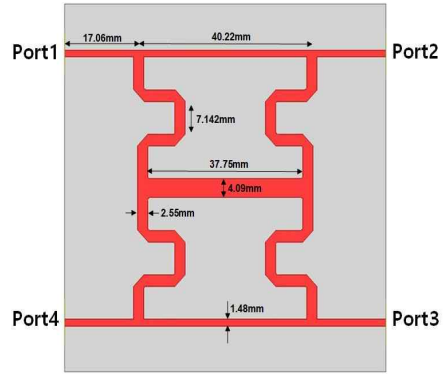


그림 5. 설계한 크로스오버 구조
Fig. 5. Structure of designed crossover

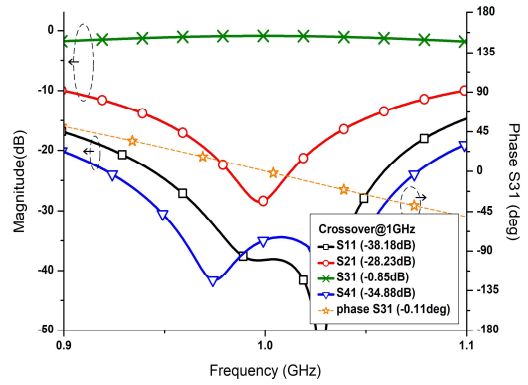


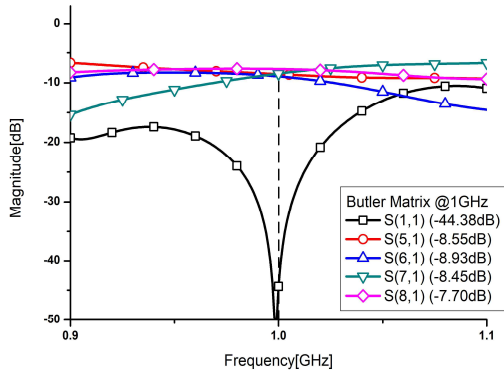
그림 6. 크로스오버 EM 시뮬레이션 결과
Fig. 6. EM simulation result of branch line hybrid

III. 버틀러 매트릭스 설계 및 제작

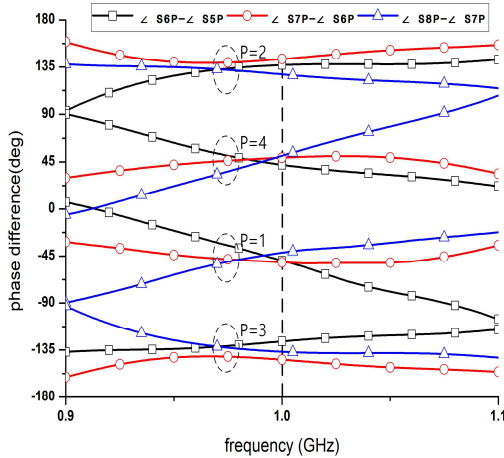
3.1 버틀러 매트릭스 설계

브랜치라인 하이브리드와 크로스오버 시뮬레이션을 바탕으로 하여 중심주파수 1GHz에서 설계 하였으며, 기판은 비유전율 4.4, 두께가 0.7874mm인 FR-4 기판을 사용하였다.

그림 7(a)은 설계한 버틀러 매트릭스의 S-파라미터이다. 1GHz에서 S51, S61, S71, S81이 -7.7~8.9dB가 됨을 확인할 수 있다. 그림 7(b)은 port 1, 2, 3, 4 입력 시 port 5와 6, port 6과 7, port 7과 8의 위상차를 나타낸 그래프이다. port 1입력 시 $-45^{\circ} \pm 5^{\circ}$, port 2 입력 시 $135^{\circ} \pm 8^{\circ}$, port 3 입력 시 $-135^{\circ} \pm 9^{\circ}$, port 4 입력 시 $45^{\circ} \pm 6^{\circ}$ 로 위상차가 발생함을 확인할 수 있다.



(a) 버틀러 매트릭스 S-파라미터
(a) S-parameter of butler matrix



(b) 버틀러 매트릭스 출력단위상차
(b) Output phase difference of butler matrix (P = from 1 to 4)

그림 7. 버틀러 매트릭스 EM 시뮬레이션 결과
Fig. 7. EM simulation result of butler matrix

3.2 버틀러 매트릭스 제작

그림 8은 제작한 버틀러 매트릭스의 회로 사진이다. 회로의 크기는 256.5mm×164mm이다. 구부린 구조로 설계하지 않았을 시, 256.5mm×200mm의 크기를 갖게 된다. 그러므로 크기가 구부러지지 않았을 때보다 크기는 18% 감소하지만, 전체의 특성은 변화가 없다.

버틀러 매트릭스에 크로스오버를 삽입함으로써 발생하는 위상 지연을 보상하기 위해 크로스오버가 들어가는 부분 상, 하에 위상지연 회로를 삽입하고 45도의 위상차 선로를 추가하여 위상변환 회로를 구현 하였다.

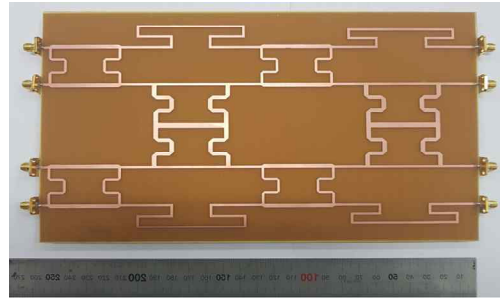
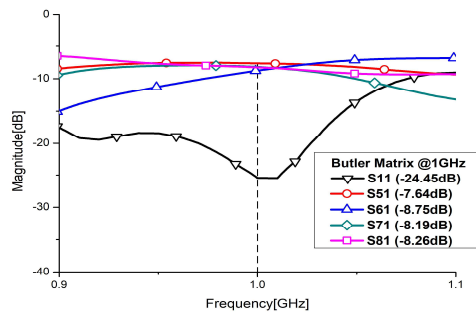
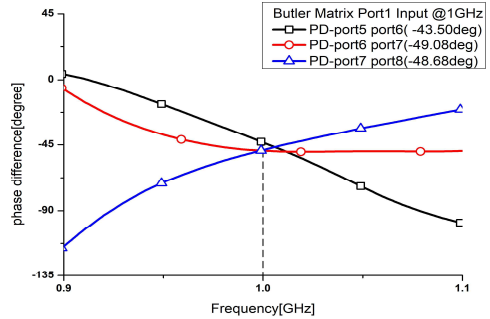


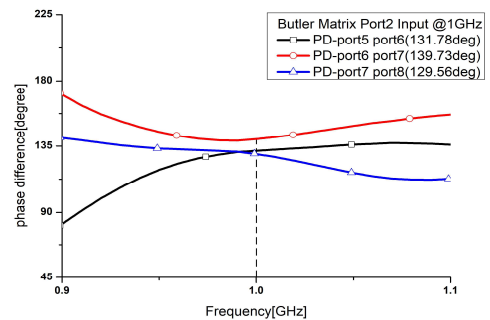
그림 8. 제작한 4×4 버틀러 매트릭스
Fig. 8. Fabricated 4×4 butler matrix



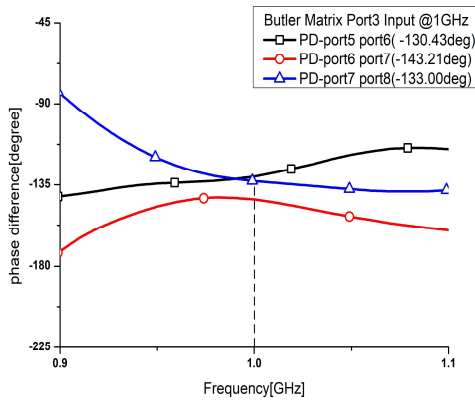
(a) 4×4 버틀러 매트릭스의 측정된 S-파라미터
(a) Measured S-parameter of 4×4 butler matrix



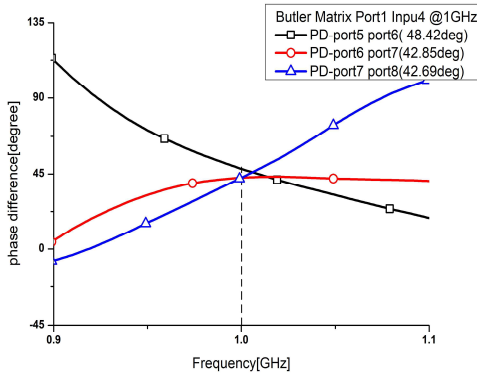
(b) port 1 입력 시 출력 단 위상차
(b) Phase difference of output port at port1 input



(c) port 2 입력 시 출력 단 위상차
(c) Phase difference of output port at port2 input



(d) port 3 입력 시 측정된 출력 단 위상차
(d) Phase difference of output port at port3 input



(e) port 4 입력 시 출력 단 위상차
(e) Phase difference of output port at port4 input
그림 9. 제작한 4×4 버틀러 매트릭스 측정 결과

Fig. 9. Measured result of fabricated 4×4 butler matrix

그림 9(a)~(e)은 제작한 회로들의 측정된 결과이다. 먼저 (a) S-파라미터의 경우 S51, S61, S71, S81이 -7dB~-8dB의 값을 가지고 입력신호가 출력단에 전달됨을 확인 할 수 있다.

(b)~(e)는 각각 port 1, 2, 3, 4 입력 시 port 5와 6, port 6과 7, port 7과 8의 측정된 위상차를 나타낸 그래프이다. port 1입력 시 $-45^{\circ} \pm 4^{\circ}$, port 2 입력 시 $135^{\circ} \pm 6^{\circ}$, port 3 입력 시 $-135^{\circ} \pm 8^{\circ}$, port 4 입력 시 $45^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 로 위상차가 발생함을 확인 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 4×4 버틀러 매트릭스를 중심주파수 1GHz에서 FR4 기판을 사용하여 제작하였다. 이

를 위해 입력포트의 대각선 방향으로 입력대비 0dB, 동위상 출력을 가지는 크로스오버에 대해 이론적으로 해석하였고, 설계한 크로스오버와 브랜치 라인 하이브리드를 버틀러 매트릭스에 적용하여 중심주파수 1GHz에서 크기를 줄이기 위해 구부린 모양을 적용하여 구부리지 않았을 때보다 18% 감소한 크기로, EM 시뮬레이션을 진행하였다.

3D 시뮬레이션을 토대로 4×4 버틀러 매트릭스를 제작 및 측정하였으며, 입력대비 출력이 -7dB~-8dB 값을 가지고 출력단의 위상차가 port 1 입력 시 $-45^{\circ} \pm 4^{\circ}$, port 2 입력 시 $135^{\circ} \pm 6^{\circ}$, port 3 입력 시 $-135^{\circ} \pm 8^{\circ}$, port 4 입력 시 $45^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 의 값을 가지는 것을 확인하였다. 측정결과, 각 포트의 위상차가 중심주파수에서 $\pm 10^{\circ}$ 이내로 설계한 버틀러 매트릭스 구조와 일치함을 알 수 있다.

향후 대역폭의 광대역화를 위해 위상편차 개선 회로 연구가 필요할 것으로 생각되어 진다.

References

- [1] Byonghyo Shim and Byungju Lee, "Evolution of MIMO Technology", The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 38A, No. 8, pp. 712-722, Aug. 2013.
- [2] T. S. Ghouse Basha and G. Aloysius, "Novel Butler Matrix Using CPW Multilayer Technology". Transaction on microwave theory and techniques, IEEE, Vol. 54, No. 1, pp. 499-507, Jan. 2006.
- [3] Krzysztof Wincza and Slawimir Gruszczunski, "Integrated conformal four-beam antenna array with wide angular coverage fed by compact 4×4 Butler Matrix", IEEE Africon 2011, Zambia, pp. 1-4, Sep. 2011.
- [4] Seongchun Park, Seunghyeon Kim, Jihoon Sohn, and Hyunchol Shin, "Design of a 28GHz Switched Beamforming Antenna System Based on 4×4 Butler Matrix", JKIEES, Vol. 26, No. 10, pp. 876-884, Oct. 2015.
- [5] Gyey-Taek Jeong, Joong-Han Yoon, Moon-Kyu Kang, Hwa-Choon Lee, and Kyung-Seop Kwak,

"Design of a Meander Type Microstrip Antenna in the 5GHz Band", J-KICS, Vol. 29, No. 9A, pp. 1083-1090, Jan. 2004.

- [6] Abhinav Shastrakar and Dr. U S Sutar, "Design and Simulation of Microstrip Butler Matrix Elements Operating at 2.4GHz for Wireless Applications", IJSER, Vol. 7, No. 5, pp. 1528-1531, May 2016.
- [7] Tong-Hong Lin, Sen-Kuei Hsu, and Tzong-Lin Wu, "Bandwidth enhancement of 4x4 Butler matrix using broadband forwardwave directional coupler and phase difference compensation", Transaction on microwave theory and techniques, IEEE, Vol. 61, No. 12, pp. 4099-4109, Dec. 2013.
- [8] M. Bona, L. Manholm, J. P. Starski, and B.Sven sson, "Low-Loss Compact Butler Matrix for a Micr ostrip Antenna", Transaction on microwave theory and techniques, IEEE, Vol. 50, No. 9, pp. 2069-2075, Sep. 2002.
- [9] D. M. Pozar, "Microwave Engineering-4/e", John wiley and Sons, Inc, New York, pp. 391-395, Nov. 2011.
- [10] Sanggee Kang, "Design and Implementation of Butler Matrix", J-KICS, Vol. 39A, No. 09, pp. 563-565, Sep. 2014.

저자소개

김 지 원 (Jiwon Kim)



2016년 8월 : 순천향대학교
전기공학과(공학사)
2016년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교
대학원 전기통신시스템공학과
(석사과정)
관심분야 : 초고주파 무선 능동/
수동 회로/부품 설계 분야 등

장 유 나 (Youna Jang)



2009년 8월 : 순천향대학교
정보통신공학과 (공학사)
2014년 2월 : 한양대학교
전자컴퓨터 통신 공학과
(공학석사)
2014년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교
전기통신시스템공학과 (박사과정)

관심분야 : RF 필터 및 마이크로파 수동소자 해석 및

안 달 (Dal Ahn)



1984년 2월 : 서강대학교
전자공학과(공학사)
1986년 2월 : 서강대학교
전자공학과(공학석사)
1990년 8월 : 서강대학교
전자공학과(공학박사)
1990년 8월 ~ 1992년 8월 : 한국

전자통신연구원 선임연구원

1992년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 교수
관심분야 : RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계 등
설계 등

이 순 흠 (Sunheum Lee)



1983년 2월 : 고려대학교
전자공학과(공학사)
1985년 2월 : 고려대학교
전자공학과(공학석사)
1989년 8월 : 고려대학교
전자공학과(공학박사)
1991년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교

정보통신공학과 교수

관심분야 : IOT, 이동통신, 컴퓨터네트워크,
임베디드시스템