



Design and Implementation of Butler Matrix Based on Multilayered MTL

Dong-Hak Lee¹, Doo-Yeong Yang²

¹*Innertron Inc.*

²*Department of Telecommunication Engineering, Jeju National University*

ABSTRACT

The proposed Butler matrix is capable of controlling the beam direction of array antenna as a feeding system of the beamforming network. The beam pattern of array antenna is controlled by the magnitude and phase of feeding signal, and interval between antenna elements. Therefore, the magnitude and phase of feeding signal supplied to array antenna is used for adjusting the beamforming direction. Designing each component such as the directional coupler, phase shifter and crossover is very important because those decides on the performance of Butler matrix. In this paper, we propose the 4×4 Butler matrix combining three-branch line directional couplers with slot-coupled directional couplers to extend the limited narrow bandwidth, and to reduce the size. Therefore, the Butler matrix circuit is constructed in a multilayer technology and designed without using a crossover on the same layer. The multilayered composition is resolved by using the slot-coupled directional coupler. Finally, the Butler matrix was designed and fabricated on double layered microstrip transmission line (MTL) by the proposed configuration. And also, the simulation results and the measured results were compared for performance analysis each other. As a result, the proposed matrix has good performance that the relative bandwidth, maximum return loss, insertion loss and progressive phase shift are 24%, 15.76dB, 6.5 ± 0.8 dB and $\pm 9.5^\circ$ in operating frequency band, respectively.

© 2018 KKITS All rights reserved

KEY WORDS : Butler matrix, Beamforming network, Branch-line direction coupler, Phase shifter, Crossover, Slot-coupled direction coupler, Multilayer technology, Double layered microstrip transmission line

ARTICLE INFO: Received 19 July 2018, Revised 10 August 2018, Accepted 10 August 2018.

*Corresponding author is with the Department of Telecommunication Engineering, Jeju National University,

102 Jejudaehakno, Jeju-si, Jeju-do, 63243, KOREA.
E-mail address: yeongyd@jejunu.ac.kr

1. 서론

다중경로 페이딩의 영향을 줄여 채널용량을 증대시킬 수 있는 MIMO(multiple input and multiple output) 기술과 주파수의 이용 효율을 높이고 다중통신 신호간의 간섭을 줄일 수 있는 스마트 안테나 기술은 고속 이동 환경에서도 다양한 멀티미디어 서비스와 대용량의 데이터를 처리할 수 있다. MIMO 기술과 스마트 안테나 기술에 필요한 빔 형성 네트워크(beamforming network)는 배열 안테나의 빔 방향을 단말기의 이동 방향에 따라 적절하게 조절할 수 있다. 따라서 빔 형성 네트워크는 배열 안테나에 인가되는 급전 신호들의 크기와 위상을 조절하여 다양한 방향으로 빔을 형성할 수 있는 급전 시스템이다[1,2]. 빔 형성 네트워크의 종류의 하나인 버틀러 매트릭스는 신호를 인가하는 입력포트의 위치에 따라 서로 인접한 출력포트들 간에 신호의 크기와 위상차를 계획된 값으로 만들어 배열 안테나에 급전되는 신호의 위상을 다르게 공급하여 빔의 방향을 조정하는 회로로 사용된다[3,4]. 이 매트릭스는 주로 마이크로스트립 선로로 구성되기 때문에 PCB(printed circuit board)로 비교적 구현이 용이하고, 다른 기술들에 비해서 필요한 구성 요소들이 적다는 장점을 가지고 있다[5-7]. 하지만 일반적인 설계에서 기존의 버틀러 매트릭스는 구성 요소인 90° 하이브리드 결합기와 크로스오버가 브랜치 선로 구조로 설계되기 때문에 좁은 동작대역을 가지며 브랜치 선로의 구조상 사분파장($\lambda/4$) 길이의 선로들로 구성되므로 회로의 크기가 커지는 단점이 있다. 따라서 근래에는 버틀러 매트릭스의 구조체를 개선하여 회로의 크기를 줄이는 SIW[8-12], LTCC[13-14], CPW[15-16]와 같은 다양한 방법들을 연구하고 있으며, 특히 매트릭스의 구성요소인 방향성 결합기의 성능을 광대역 주파수에서 동작하도록 개선함으로써 초고

속 멀티미디어 서비스에서도 빔 성형이 가능하도록 설계하는 데에 연구의 초점이 맞추어지고 있다[17-22].

본 논문에서는 앞에서 언급한 단점을 개선하기 위해 버틀러 매트릭스의 구성요소 중 앞단에 배치되는 두 개의 방향성 결합기를 슬롯결합 형태의 방향성 결합기가 아닌 단층기판에서 구성되는 브랜치 선로 구조로 설계한다. 또한, 브랜치 선로 구조가 갖는 단점인 제한적인 대역폭을 개선하기 위해 브랜치 선로를 다단으로 구성한다. 제한한 버틀러 매트릭스의 구조는 3단 브랜치 선로 결합기와 슬롯결합 방향성 결합기의 사용으로 크로스오버 없이 설계가 가능하며, 앞단과 뒷단에 배치되는 방향성 결합기가 선로를 통해서 연결되기 때문에 위에서 언급한 단점들을 보완할 수 있다. 제안한 버틀러 매트릭스는 LTE 주파수 대역에서의 동작을 위해 2.6GHz를 기준으로 설계하며, 설계에 따른 시뮬레이션 결과와 제작된 회로의 측정 결과를 비교하고 분석한다.

2. 다층 MTL 기반 버틀러 매트릭스

2.1 버틀러 매트릭스 구조

다중 빔 패턴을 성형시키는 버틀러 매트릭스는 $M \times N$ 개의 입력과 출력을 가지며 M 과 N 의 값에 따라 버틀러 매트릭스가 조절할 수 있는 빔의 수가 결정되고, 이 값이 클수록 조절할 수 있는 빔의 방향은 늘어나지만 반대로 설계가 복잡해진다. 본 논문에서는 M 과 N 이 4인 4×4 버틀러 매트릭스를 설계한다.

단층 기판 구조에서 설계되는 일반적인 4×4 버틀러 매트릭스의 구조와 구성요소들은 90° 하이브리드 결합기 4개, 크로스오버 2개, -45° 위상 천이기 2개로 구성된다. 일반적인 설계에서 이들 구

성요소 중 90° 하이브리드 결합기와 크로스오버는 마이크로스트립에서 각각 2단과 3단 브랜치 선로 구조의 결합기 형태로 설계되며, -45° 위상 천이기의 경우는 선로의 길이를 조정하여 원하는 위상차를 갖도록 설계한다. 하지만 90° 하이브리드 결합기와 크로스오버를 각각 2단과 3단 브랜치 선로 구조로 설계하게 되면 좁은 동작대역 특성 때문에 버틀러 매트릭스의 동작대역 또한 협대역으로 나타나며, 브랜치 선로 구조상 사분파장의 길이를 갖는 선로로 구성되기 때문에 버틀러 매트릭스의 전체적인 크기 또한 커지게 되는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 버틀러 매트릭스의 전체적인 특성과 크기를 개선하기 위해 기존의 90° 하이브리드 결합기의 협대역 특성을 개선하고 2층 기판 구조에서 슬롯-결합 방법을 이용하여 보다 효율적으로 버틀러 매트릭스를 설계함으로써 회로의 크기와 성능을 개선한다.

선로 결합기를 사용하여 기존의 2단 브랜치 선로 결합기의 제한적인 대역폭을 개선하며, 뒷단에 배치된 결합기의 경우는 슬롯결합 방향성 결합기를 사용하여 크로스오버 구성에 따른 구조적 문제점을 해결하는 동시에 방향성 결합기의 역할을 수행하도록 한다. 그림에서 실선과 점선은 2층 기판 구조에서 윗면과 아랫면에 배치되는 회로를 나타낸 것으로 두 개의 3단 브랜치 선로 결합기는 크로스오버가 없이 선로가 지나갈 수 있도록 각각 윗면과 아랫면에 배치되며, 이로 인하여 뒷단에 위치한 결합기에서 두 개의 입력포트가 각각 윗면과 아랫면에 배치되는 문제점을 슬롯결합 방향성 결합기를 사용함으로써 해결한다. 따라서 본 논문에서 제안한 버틀러 매트릭스는 기존의 버틀러 매트릭스보다 넓은 대역을 가지며 전체적인 회로의 크기 또한 줄일 수 있다.

2.2 3단 브랜치 선로 결합기

일반적인 90° 하이브리드 결합기는 하나의 입력포트로 인가된 신호가 통과포트와 결합포트에 각각 절반씩 나뉘어 전달되고 두 출력포트 간 90° 의 위상차를 갖는 방향성 결합기이다. 90° 하이브리드 결합기는 주로 2단 브랜치 마이크로스트립 선로 구조로 설계된다. 하지만 사분파장 길이의 필수조건 때문에 2단 브랜치 선로 결합기의 비대역폭은 10% 이내이므로 보다 넓은 대역에서 동작하기 위해서는 브랜치 선로를 다단으로 구성하여야 한다. 다단 브랜치 선로 구조의 결합기는 브랜치 선로를 구성하는 각 선로들의 임피던스에 따라 결합포트에 나타나는 신호의 결합계수가 결정되기 때문에 각 선로의 임피던스를 어떻게 설정하느냐가 중요하다. 원하는 결합계수를 얻기 위한 각 선로의 임피던스는 회로에 우수-기수 모드 해석법을 적용하여 구할 수 있다.

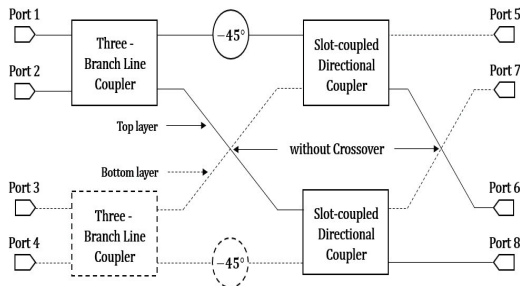


그림 1. 제안된 4×4 버틀러 매트릭스
Figure 1. The proposed 4×4 butler matrix

<그림 1>은 논문에서 고안한 버틀러 매트릭스의 구조이다. 이 버틀러 매트릭스는 다층 기판 구조에서 설계되며, 이 경우 단층 기판 구조에서 필연적으로 사용되는 크로스오버를 구성하지 않아도 설계가 가능하기 때문에 회로의 크기를 줄일 수 있다. 버틀러 회로에 조합 구성되는 방향성 결합기의 경우, 앞단에 배치된 2개의 결합기는 3단 브랜치

<그림 2>의 3단 브랜치 선로 결합기의 경우, 결합포트인 포트 2에 3dB 결합이 이루어지기 위해서는 각 브랜치 선로의 임피던스 설정이 중요하다. 브랜치 선로를 다단으로 설계할 경우에는 단의 수가 많아질수록 가장자리에 위치하는 선로의 임피던스가 커진다. 마이크로스트립 선로에서 선로의 임피던스는 기판의 유전율과 기판의 높이, 그리고 선로의 폭에 의해 결정되는데 일반적으로 임피던스가 클수록 선로의 폭은 좁아진다. 따라서 설계시 제작이 가능한 범위 내에서 선로의 폭이 결정되도록 기판을 선정하는 것이 중요하다. 3단 브랜치 선로 결합기의 가장자리에 위치한 선로의 임피던스는 120.71Ω 이기 때문에 유전율이 높고 기판의 높이가 두꺼운 기판을 사용할수록 선로의 폭을 크게 할 수 있다. 여기서는 슬롯결합 방향성 결합기와와의 조합을 고려하여 120.71Ω 에 해당되는 선로의 폭이 0.1mm 보다 크도록 기판을 선정하여 설계한다.

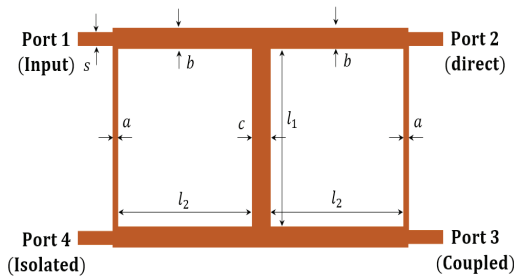


그림 2. 3단 브랜치 선로 결합기
Figure 2. Layout pattern of three-branch line coupler

이 결합기는 우수-기수모드 해석법의 이론적 내용을 기반으로 각 브랜치 선로의 임피던스를 초기 설계 값으로 두어 설계하였으며, 최종적으로 설계 중심주파수 2.6GHz에 맞춰 최적화하였다. 3단 브랜치 선로의 설계 제원은 <표 1>에 나타내었다.

표 1. 3단 브랜치 선로 결합기의 설계 제원
Table 1. Design parameters of three-branch line coupler

Three-branch line coupler			
Para-meters	Optimized results	Para-meters	Optimized results
s	1.127 mm	c	2.061 mm
a	0.143 mm	l_1	18.013 mm
b	2.153 mm	l_2	17.015 mm

2.3 슬롯결합 방향성 결합기

슬롯결합 방향성 결합기는 윗면과 아랫면에 있는 두개의 신호 선로가 접지면의 직사각형 슬롯을 통하여 상호 결합되는 구조로 되어 있으므로 설계에 사용될 기판이 정해지면 선로의 폭(w)과 선로의 길이(l), 슬롯의 폭(w_0)에 따라 결합되는 신호의 양이 결정된다. 따라서 3dB로 결합하기 위해서는 이들을 조정하는 것이 중요하다. 선로의 길이는 결합선로 이론에 의해 최대로 결합되는 사분파장 길이로 설계한다. 또한 이 길이로 인하여 두 출력신호의 위상은 90° 만큼 지연된다. 슬롯의 폭은 적절한 결합을 유도하기 위해 선로의 폭보다 넓게 설정해야 하며, 최적화 결과를 바탕으로 신호선 폭 w 의 약 1.48배가 되도록 하였다. 결합계수는 w/h 가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 w 가 증가함에 따라 포트 2로 결합되는 전력의 양이 커지는 것을 의미한다. 따라서 유전율이 3.5인 결과에서 전압 결합계수가 0.707이 되는 w/h 가 9.1에 맞춰 선로의 폭을 초기설정 함으로써 각각의 출력포트에 나타나는 전력의 양이 절반이 되도록 하였다. 최종적으로 설계된 교차결합 결합기의 구조와 최적화된 설계 제원들은 <그림 3>과 <표 2>에 나타내었다.

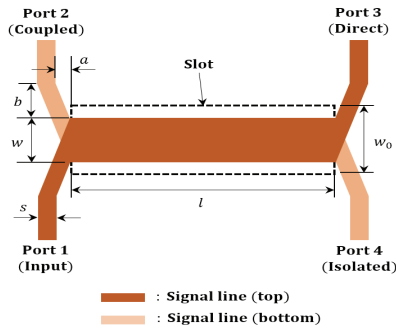


그림 3. 슬롯결합 방향성 결합기

Figure 3. Layout pattern of slot-coupled directional coupler

표 2. 슬롯결합 방향성 결합기의 설계 제한

Table 2. Design parameters of slot-coupled directional coupler

Slot-coupled directional coupler			
Para-meters	Optimized results	Para-meters	Optimized results
s	1.127 mm	w	4.382 mm
a	0.848 mm	w_0	6.522 mm
b	3.316 mm	l	18.673 mm

2.4 4×4 버틀러 매트릭스 구성

앞에서 설계한 3단 브랜치 선로 결합기와 -45° 위상 천이기, 슬롯결합 방향성 결합기를 조합하여 <그림 4>에서 제안한 4×4 버틀러 매트릭스를 설계하였다.

<그림 4>는 설계된 버틀러 매트릭스의 구성을 나타낸 것으로 진한 색의 패턴의 경우는 윗면에 설계된 회로패턴을, 옅은 색의 패턴은 아랫면에 설계된 회로패턴이다. 뒷단에 위치한 슬롯결합 방향성 결합기가 다층 마이크로스트립 선로로 되어 있기 때문에 크로스오버 없이 버틀러 매트릭스를 구성하기 위해서는 앞단에 위치하는 3단 브랜치 선로 결합기를 각각 윗면과 아랫면에 배치하면 된다. 윗면에 배치된 3단 브랜치 선로 결합기의 출력포

트와 아랫면에 배치된 3단 브랜치 선로 결합기의 출력포트가 각각 슬롯결합 방향성 결합기의 입력포트와 격리포트에 연결되며, 연결에 사용되는 두 선로는 -45° 위상 천이기의 역할을 수행하도록 두 선로의 길이를 조정하여 설계한다. 버틀러 매트릭스에서 각 포트의 간격은 커넥터와의 연결을 위해 20mm로 하였다.

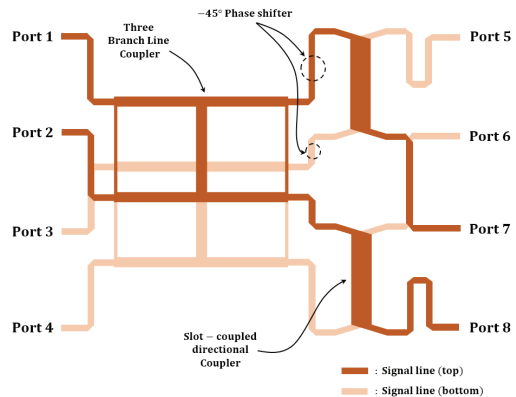


그림 4. 제안된 4×4 버틀러 매트릭스의 레이아웃 패턴

Figure 4. Layout pattern of the proposed 4×4 butler matrix

3. 시뮬레이션 결과

다층 기판 구조의 마이크로스트립 선로에서 3단 브랜치 선로 결합기와 슬롯-결합 방향성 결합기, 그리고 -45° 위상 천이기를 조합하여 4×4 버틀러 매트릭스를 설계하였다. 결과에 따른 대역폭은 각 출력포트에 나타나는 신호의 크기가 서로 0.6dB 오차 이하의 영역을 대역폭으로 설정한다. 그 이유는 배열 안테나로 급전되는 신호의 크기가 빔 성형 패턴에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 범위 내에서 정하였다.

<그림 5(a)>는 입력포트 1에 신호를 인가하였을 때 나타나는 4×4 버틀러 매트릭스의 산란 파라미터와 각 출력포트 간의 위상차에 대한 시뮬레이션

결과이다. 그림 17(a)의 결과에서 버틀러 매트릭스의 대역폭은 2.17~2.79GHz로 약 620MHz의 대역을 가진다. 대역 내에서 반사손실은 22.81dB 보다 작은 값으로 나타났으며, 격리 특성은 $S_{21} \leq -24.25\text{dB}$, $S_{31} \leq -46.91\text{dB}$, $S_{41} \leq -27.90\text{dB}$ 로 나타났다. 삽입손실 특성인 S_{51} , S_{61} , S_{71} , S_{81} 은 6.05~6.75dB로 평균 6.38dB의 값을 보였고 평균적으로 약 0.38dB의 삽입손실을 갖는다. 출력포트 간의 위상차는 입력포트 1에 신호가 인가되었을 때 각 출력포트들 간에는 -45° 의 위상차를 가져야 한다. 시뮬레이션 결과를 보면 설계 중심주파수인 2.6GHz에서 $-45 \pm 1^\circ$ 의 값으로 오차가 가장 작았으며, 중심 주파수를 벗어날수록 위상오차는 크게 나타났다. 2.5GHz에서 $-45 \pm 2.5^\circ$, 2.7GHz에서 $-45 \pm 1.8^\circ$ 로 2.5~2.7GHz에서 $-45 \pm 2.5^\circ$ 의 위상오차를 갖는다.

<그림 5 (b)>는 입력포트 3에 신호를 인가하였을 때 나타나는 4×4 버틀러 매트릭스의 산란 파라미터와 각 출력포트 간 위상차에 대한 시뮬레이션 결과이다. 버틀러 매트릭스의 대역폭은 2.15~2.80GHz로 약 650MHz의 대역을 가진다. 대역 내에서 반사손실 S_{22} 은 24.30dB 보다 작은 값으로 나타났으며, 격리 특성은 $S_{12} \leq -25.58\text{dB}$, $S_{32} \leq -28.34\text{dB}$, $S_{42} \leq -50.18\text{dB}$ 로 나타났다. 삽입손실 특성인 S_{52} , S_{62} , S_{72} , S_{82} 은 6.05~6.73dB로 평균 6.38dB의 값을 나타냈고 평균적으로 약 0.38dB의 삽입손실을 가진다. 출력포트 간의 위상차는 입력포트 3에 신호가 인가되었을 때 각 출력포트들 간에는 135° 의 위상차를 가져야 한다. 시뮬레이션 결과를 보면 설계 중심주파수인 2.6GHz에서 $135 \pm 1^\circ$ 의 값으로 오차가 가장 작았으며, 2.5GHz에서 $135 \pm 2.8^\circ$, 2.7GHz에서 $135 \pm 1.7^\circ$ 로 2.5~2.7GHz 대역에서 $135 \pm 2.8^\circ$ 의 위상오차를 갖는다.

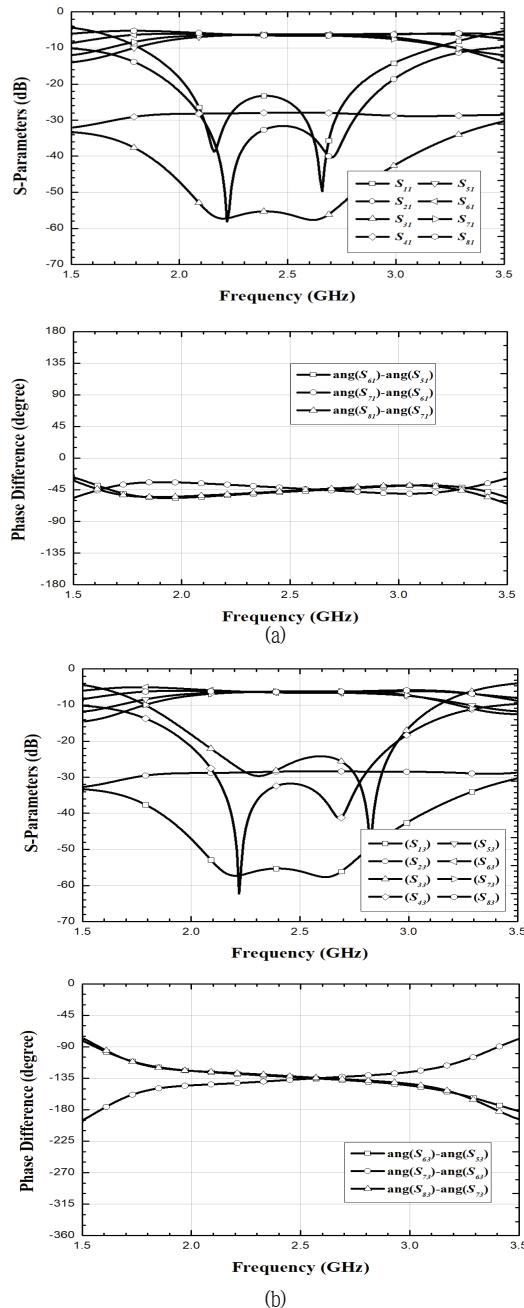


그림 5. 포트 1과 3에 급전 시 버틀러 매트릭스의 시뮬레이션 결과 (a) S-파라미터와 위상차, (b) S-파라미터와 위상차
 Figure 5. Simulation results of the butler matrix when feeding into the port 1 and 3 (a) S-parameter and phase difference, (b) S-parameter and phase difference

입력포트 2과 4에 신호를 인가하였을 때 나타나는 4×4 버틀러 매트릭스의 특성은 대칭구조로 인하여 포트 3와 포트 1에 신호를 인가한 경우와 유사한 특성을 갖는다.

4. 제작 및 측정결과 분석

<그림 6>의 회로는 다층 기판 구조로 구현하기 위해 윗면과 아랫면에 해당하는 회로패턴을 각각 두 개의 Taconic-RF35 기판에 제작하고, 두 개의 기판 중 하나의 접지면을 완전히 부식시킨 다음 두 기판을 서로 접착하여 구현하였다. 접착제를 사용하여 두 기판을 접착했기 때문에 이 과정에서 접지면과 유전체 사이에 0.1mm 정도의 공백이나 접착물이 존재하여 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 약간의 오차가 유발될 수 있다. 또한 두 유전체 사이에 위치한 접지판의 두께가 0.035mm이기 때문에 입력과 출력 단에 커넥터를 연결하는 과정에서 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 5mm 정도의 폭을 갖는 직사각 패치를 입력과 출력포트의 반대편에 배치하여 이를 접지면과 비아홀(via hole)을 통해 연결함으로써 거의 완벽한 접지의 기능을 갖도록 하였다. 하지만 신호선과 비아홀 사이의 간격이 좁으면 결과에 영향을 줄 수 있으므로 주의해야 한다.

<그림 7(a)>는 포트 1에 신호를 인가했을 때 나타나는 전달특성에 대한 버틀러 매트릭스의 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교한 그래프이다. 각 출력포트에 나타나는 전달특성은 두 결과가 비교적 비슷한 곡선을 보이지만 측정 결과의 경우 시뮬레이션 결과에 비해 완만하지 않은 곡선을 그리고 있다. 이는 제작과정에서 생기는 제작오차와 측정 시 발생하는 측정오차가 더해진 결과로서 S_{61} 에서 최대 0.5dB의 오차를 갖는다. 하지만 측정 결과만을 놓고 봤을 때, 설계 주파수 대역인

2.18~2.78GHz 범위에서 각 출력포트에 나타나는 신호들의 차이는 0.6dB 보다 작은 오차를 가지며, 각 신호들의 크기는 평균 -6.5 dB로 시뮬레이션 결과와 비교하여 0.16dB 만큼 높게 나타나므로 빔성형 방향 특성에는 큰 영향을 미치지 않는다.

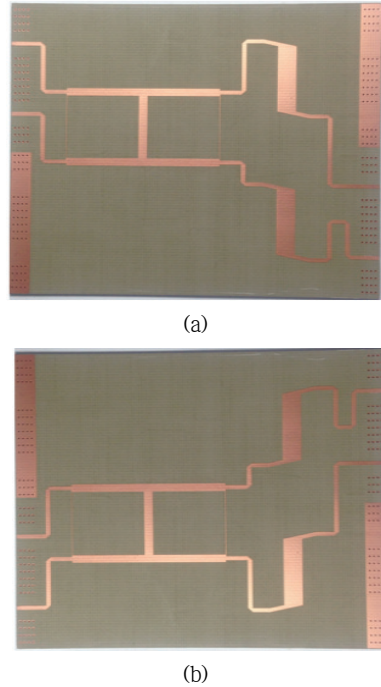


그림 6. 제작된 버틀러 4×4 매트릭스 (a) 상단, (b) 하단
Figure 6. The fabricated 4×4 butler matrix (a) top-view, (b) bottom-view

<그림 7(b)>는 주파수에 따른 각 입력포트에 대한 반사손실을 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션 결과는 2.18~2.78GHz 대역에서 -22.81dB 이하의 성능을 보이고 있지만, 측정 결과의 경우는 -15.76dB 이하의 값으로 시뮬레이션 결과와는 약 7.05dB의 차이를 갖는다. 수치적으로 놓고 봤을 때는 크게 차이나는 것 같지만 아주 작은 값들의 차이로 이는 제작되는 과정에서 또는 측정 과정에서 생기는 오차들로 인해 발생할 수 있는 수치이며, 약 0.03

에 해당하는 크기이기 때문에 큰 문제가 되지 않는다.

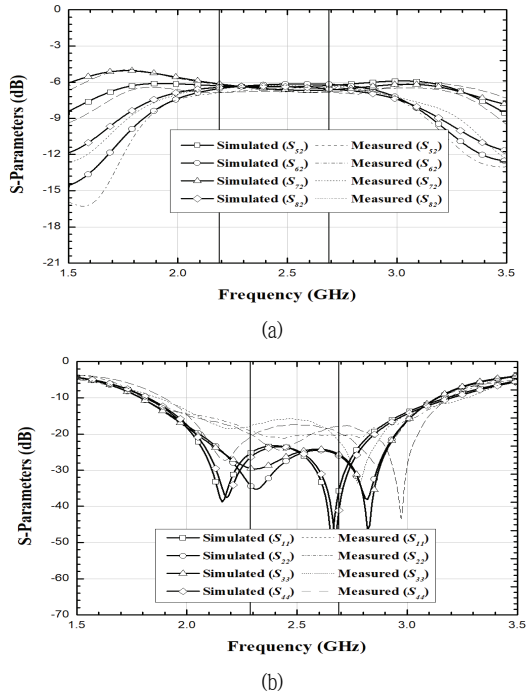


그림 7. S-파라미터의 시뮬레이션과 측정 결과의 비교 (a) 포트 1로 급전 시 삽입손실, (b) 각 포트에 급전 시 반사손실
Figure 7. Comparison between simulation results and measured results of S-parameter (a) insertion loss as feeding in the port 1, (b) return loss as feeding in each port

<그림 8>은 각 입력에 따른 출력포트 간의 위상차에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 포트 6과 포트 7의 측정값의 위상차가 시뮬레이션 결과와 비교했을 때에 다른 포트들 보다 차이가 나고 있다. 이는 각 포트에 나타나는 신호의 위상 결과를 통해서 원인을 찾을 수 있다. 구조상으로 출력포트 앞에 위치한 방향성 결합기에 의해 포트 5와 포트 7, 포트 6과 포트 8은 각각 90°의 위상차를 가져야 한다.

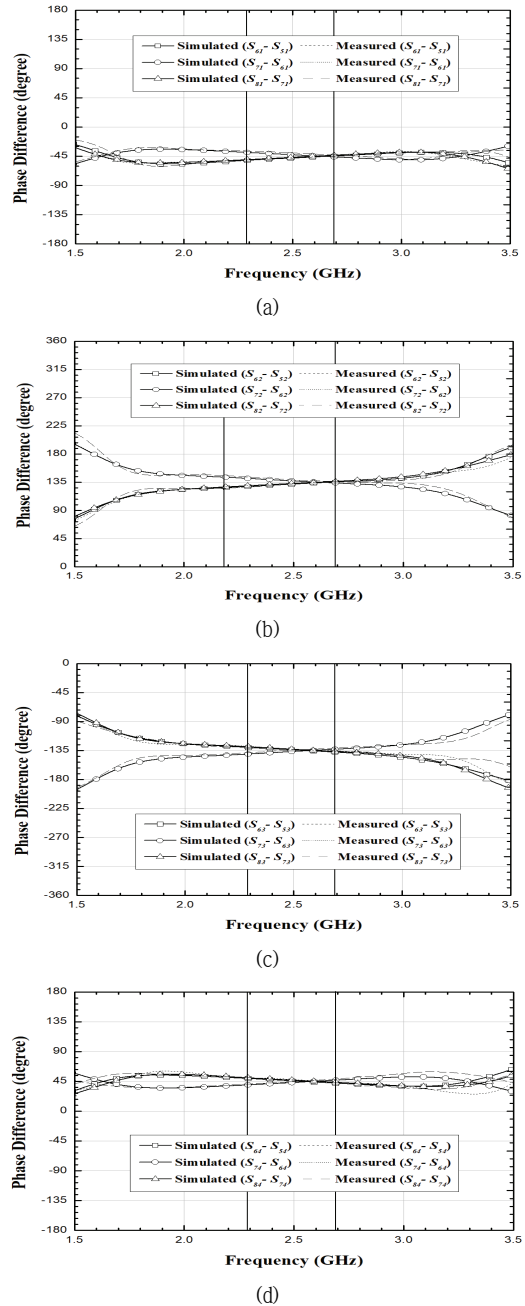


그림 8. 출력포트간의 위상차에 대한 결과 (a) 포트 1로 급전 (b) 포트 2로 급전, (c) 포트 3로 급전, (d) 포트 4로 급전
Figure 8. The results of phase difference between output ports (a) feeding in the port 1, (b) feeding in the port 2, (c) feeding in the port 3, (d) feeding in the port 4

하지만 데이터를 분석한 결과 포트 1과 포트 2의 경우는 약 88°의 위상차를 가졌고 포트 3와 포트 4의 경우는 약 92°의 위상차를 갖는 것을 확인하였다. 따라서 위 결과의 오차는 방향성 결합기에서 발생된 오차로 볼 수 있으며 방향성 결합기의 시뮬레이션 결과와 제작 결과에서 오차가 발생했음을 알 수 있다.

표 3. 2.6GHz에서 버틀러 매트릭스의 출력 특성
Table 3. Output properties of the butler matrix at 2.6GHz

Input signal		Output signal						
		Magnitude [dB]				Phase difference[deg]		
		P5	P6	P7	P8	$\beta_{5,6}$	$\beta_{6,7}$	$\beta_{7,8}$
P1	Theo.	-6	-6	-6	-6	-45	-45	-45
	Simu.	-6.2	-6.3	-6.5	-6.6	-46	-44.3	-44.8
	Meas.	-6.5	-6.8	-6.3	-6.7	-46.2	-41.7	-45.7
P2	Theo.	-6	-6	-6	-6	135	135	135
	Simu.	-6.3	-6.1	-6.7	-6.5	134	135.4	135
	Meas.	-6.9	-6.4	-6.9	-6.3	134.9	137.2	134.8
P3	Theo.	-6	-6	-6	-6	-135	-135	-135
	Simu.	-6.5	-6.7	-6.2	-6.3	-135.8	-134.5	-134.8
	Meas.	-5.8	-7.3	-5.9	-7.3	-134.4	-132.8	-134.5
P4	Theo.	-6	-6	-6	-6	45	45	45
	Simu.	-6.6	-6.5	-6.3	-6.2	44	45.2	45.2
	Meas.	-5.8	-7.3	-5.9	-7.3	45.3	46.7	45.7

출력포트 간의 위상차에 대한 측정 결과는 설계 중심 주파수인 2.6GHz에서 포트 1의 입력의 경우는 -45°를 기준으로 최대 3.25°의 오차를 가지며, 포트 2의 경우는 135°기준으로 최대 2.15°의 오차를 가진다. 포트 3의 경우는 -135°기준으로 최대 2.22°의 오차를, 포트 4의 경우는 45°기준으로 최대 1.65°의 오차를 갖는다. 이는 최대 1°의 오차를 가졌던 시뮬레이션 결과와 비교하면 약 2.25°이내의 오차이다. 설계 중심주파수인 2.6GHz

에서 버틀러 매트릭스의 입력과 출력 특성은 <표 3>에 나타내었으며, 여기서 $\beta_{n,m}$ 은 포트 m 과 포트 n 의 위상차이다.

5. 결론

본 논문에서는 빔 성형 네트워크인 4×4 버틀러 매트릭스를 필수 구성품인 크로스오버 없이 2층 마이크로스트립 기판에 설계함으로써 회로를 단순화하여 전체적인 크기를 줄이고 성능을 개선시켰다. 구성요소 중 전단에 배치되는 두 개의 90° 하이브리드 결합기를 3단 브랜치 선로 결합기로 설계하여 광대역 특성을 얻었으며, 이 결합기를 윗면과 아랫면에 배치함으로써 나타나는 구조적 문제점을 슬롯결합 방향성 결합기를 고안하여 해결하였다. 그리고 이들을 조합한 버틀러 매트릭스를 제안하였으며, 최적화된 설계 값을 기반으로 시작품을 제작하고 성능을 분석하였다. 또한 버틀러 매트릭스의 입력 조건에 따라 나타나는 출력 결과와 빔 성형 관계를 세밀히 파악하기 위한 방안으로써 이론적인 결과와 시뮬레이션 결과, 그리고 측정 결과로 구분하여 각각의 결과들을 비교하고 분석하였다.

References

- [1] J. H. Winter, *Smart antennas for wireless systems*, IEEE Personal Communications, Vol. 1, pp. 23-27, Feb. 1998.
- [2] G. A. Adamidis, *Development of simple smart array systems*, Diploma Thesis, Physics Department, Aristotle University of Thessaloniki, 2002.
- [3] J. Butler, and R. Lowe, *Beamforming matrix simplifies design of electrically scanned antennas*,

- Electronics Design 9, pp. 170-173, 1961.
- [4] I. Sfar, L. Osman, and A. Gharsallah, *Design of a 4×4 Butler matrix for beamforming antenna applications*, Proceedings of 2014 Neduterranean Microwave Symposium (MMS2014), pp. 1-4, Dec. 2014.
- [5] M. M. Alam, *Microstrip antenna array with four port Butler matrix for switched beam base station application*, ICCIT '09 12th International Conference on Computer and Informational Technology, Dec. 2009.
- [6] H. Nachouane, A. Najid, A. Tribak, and F. Riouch, *Broadband 4×4 Butler matrix using wideband 90° hybrid couplers and crossovers for beamforming networks*, 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), pp. 1444-1448, Apr. 2014.
- [7] S. Z. Ibrahim, and M. E. Bialkowski, *Wideband Butler matrix in microstrip-slot technology*, in Proceeding 2009 Asia Pacific Microwave Conference, pp. 2104-2107, Dec. 2009.
- [8] S. Karamzadeh, V. Rafii, M. Kartal, and B. S. Virdee, *Compact and broadband 4×4 SIW Butler matrix with phase and magnitude error reduction*, IEEE Microwave Wireless Components Letters, Vol. 25, No. 12, pp. 772-774, Dec. 2015.
- [9] A. A. M. Ali, N. J. G. Fonseca, F. Coccetti, and H. Aubert, *Design and implementation of two-layer compact wideband Butler matrices in SIW technology for Ku-band applications*, IEEE Transactions on Antennas Propagation, Vol. 59, No. 2, pp. 503-512, Feb. 2011.
- [10] T. Djerafi, and K. Wu, *A Low-cost wideband 77GHz planar Butler matrix in SIW technology*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 60, No. 10, pp. 4949-4954, Oct. 2012.
- [11] S. Karamzadeh, V. Rafii, M. Kartal, and B. S. Virdee, *Compact and broadband 4×4 SIW Butler matrix with phase and magnitude error reduction*, IEEE Microwave Wireless Components Letters, Vol. 25, No. 12, pp. 772-774, Dec. 2015.
- [12] A. Talbi, M. L. Seddiki, and F. Ghanem, *A compact 4×4 Butler matrix for UWB applications*, in Proceeding 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), pp. 1010-1011, Jul. 2013.
- [13] G. Tudosie, H. Barth, and R. Vahldieck, *A compact LTCC Butler matrix realization for phased array applications*, 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp. 441-444, Jun. 2006.
- [14] G. Tudosie, R. Vahldieck, and A. Lu, *A novel modularized folded highly compact LTCC Butler matrix*, 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp. 691-694, Jun. 2008.
- [15] M. Nedil, and T. A. Denidni, *Novel Butler matrix using CPW multilayer technology*, IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, No.1, pp. 499-507, Jan. 2008.
- [16] M. Nedil, M. A. E. Cafsi, T. A. Denidni, and A. Gharsallah, *Novel UWB CB-CPW Butler matrix for wireless applications*, in Proc. 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium(APSURSI), pp. 1800- 1801, Jul. 2014.
- [17] Y. H. Lee, D. H. Lee, and D. Y. Yang, *Analysis of slot-coupled microstrip components for wideband Butler matrix*, International Conference on EElectronics,

- Information, and Communication (ICEIC) 2017, S22, pp. 482-484, 2017.
- [18] D. H. Lee, and D. Y. Yang, *Broadband 4×4 Butler matrix with multilayer slot-coupled microstrip transmission lines*, International Conference on ELectionics, Information, and Communication (ICEIC) 2017, P01, pp. 638-641, 2017.
- [19] D. H. Lee, and D. Y. Yang, *Implementation of beamforming Butler matrix(4×4) based on planar structure for LTE mobile communications*, Journal of Knowledge Information Technology and Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 501-511, 2017.
- [20] D. H. Lee, and D. Y. Yang, *Design and Implementation of slot-coupled microstrip components for wideband Butler matrix*, Journal of Knowledge Information Technology and Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 571-580, 2017.
- [21] D. H. Lee, and D. Y. Yang, *Implementation of slot-coupled broadband Butler matrix based on multiple layed microstrip transmission line*, Journal of Knowledge Information Technology and Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 581-590, 2017.
- [22] D. H. L22, and D. Y. Yang, *Implementation of broadband 4×4 Butler beamforming network based on multilayer microstrip technology*, M. Thesis, Jeju National University, Feb. 2017.

다층 마이크로스트립 전송선 기반 버틀러 매트릭스 설계 및 구현

이동학¹, 양두영²

¹(주)이너트론 R&D 연구소 연구원

²제주대학교 통신공학과 교수

요 약

제안한 버틀러 매트릭스는 빔 성형 네트워크의 급전 시스템으로서 어레이 안테나의 빔 방향을 조정할 수 있다. 배열 안테나의 빔 패턴은 급전 신호의 크기와 위상 및 안테나 요소 사이의 간격에 의해 결정된다. 따라서 어레이 안테나에 공급되는 급전 신호의 크기 및 위상은 빔 형성 방향을 조정하는데 사용된다. 방향성 결합기, 위상천이 및 크로스오버와 같은 각 구성 요소를 설계하는 것은 버틀러 매트릭스의 성능을 결정하기 때문에 매우 중요하다. 본 논문에서는 제한된 협대역을 확장하고 크기를 줄이기 위해 슬롯결합 방향성 결합기를 갖는 3분기선로 방향성 결합기를 결합한 4×4 버틀러 매트릭스를 제안하였다. 따라서 버틀러 매트릭스 회로는 다층 기술로 구성되며 동일한 층에 크로스오버를 사용하지 않고 설계되었다. 다층 구성은 슬롯결합 방향성 결합기를 사용하여 해결한다. 마지막으로 버틀러 매트릭스는 제안된 구성에 따라 이중 마이크로 스트립 전송 라인에서 설계 및 제작되었다. 또한 성능 분석을 위해 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하였다. 결과적으로, 이 매트릭스는 동작 주파수 대역에서 상대 대역폭, 최대 반사 손실, 삽입 손실 및 순차 위상 천이가 각각 24%, 15.76dB, 6.5 ± 0.8 dB 및 $\pm 9.5^\circ$ 인 양호한 성능을 가진다.

감사의 글

본 논문은 2018학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.



Dong Hak Lee received the B.S. and M.S. degrees in telecommunication engineering from Jeju National University, Korea in 2015 and 2017. He is currently an researcher at Department of Research and Development, Innertron Incorporation in Korea. His current research interests include RF

devices, microwave circuits and wireless communication systems.

E-mail address: ldh4453@hanmail.net



Doo Yeong Yang received the B.S. degree in telecommunication engineering from Jeju National University, Korea in 1984, and M.S., Ph.D. degrees in electrical and telecommunication engineering from Hanyang University, Korea in 1989, 1992 respectively. Since 1992, he has been a professor in telecommunication engineering of Jeju National University in Korea. His current research interests include RF devices, microwave circuits and wireless and satellite communication systems.

E-mail address: yeongyd@jejunu.ac.kr