



Implementation of Beamforming Butler Matrix(4×4) Based on Planar Structure for LTE Mobile Communications

Dong-Hak Lee¹, Doo-Yeong Yang²

¹Department of Research and Development, Innertron Incorporation

²Department of Telecommunication Engineering, Jeju National University

ABSTRACT

In order to design a beamforming Butler matrix operating in the LTE band of 2.5-2.68GHz, the Butler matrix with a broadband structure was designed by constructing a hybrid coupler and crossover, which are components of Butler matrix, with a multistage branch line structure. The structure and components of the Butler matrix consist of four 3dB hybrid couplers, two crossovers, two -45° phase shifters and two equiphase controllers. Among these components, the 3dB hybrid coupler and crossover are designed to have broadband characteristics with a branch line structure in the microstrip substrate. The -45° phase shifter and equiphase controller adjust the length of the line to obtain the proper phase, respectively. The designed Butler matrix showed good return loss characteristics of 23.9-34.18dB and relatively small phase error of 5.41° in the operating band. And also, when the output signal of the Butler matrix was applied to the microstrip patch array antenna, the effect of the signal amplitude and phase error on beamforming pattern and beam steering direction were studied. As a result, when the Butler matrix has a phase error of about 5.41°, the direction of the formed beam pattern does not largely change by an error of 1°, and the beam can be properly steered in a desired direction.

© 2017 KKITS All rights reserved

KEYWORDS : Beamforming butler matrix, Hybrid coupler, Crossover, Phase shifter, Equiphase controller, Multistage branch line structure, Broadband characteristics, Microstrip, Beam steering

ARTICLE INFO: Received 22 June 2017, Revised 16 August 2017, Accepted 16 August 2017.

*Corresponding author is with the Department of Telecommunication Engineering, College of Engineering, Jeju National University, 102 Jejudaehakno, Jeju-si,

Jeju-do, 63243, KOREA.

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

1. 서론

고속이동 상황에서도 다양한 서비스를 지속적으로 제공해야 하는 이동통신 신호처리 분야에서는 최근 들어 무선가입자가 급격하게 증가함으로써 더욱 효율적인 송수신 시스템을 개발해야 할 필요성이 대두되고 있다. 이러한 욕구를 충족시키기 위한 방법들 중의 하나가 스마트 안테나를 사용하는 방법이다. 스마트 안테나는 전자파 복사 방향을 트래킹 상황이나 통신신호 환경에 따라 조절함으로써 다중경로 간섭과 동일 주파수 채널 간섭영향을 효과적으로 감소시켜 무선 네트워크의 수용용량을 확장시키는 역할을 한다. 이러한 스마트 안테나의 장점을 극대화시키기 위해서는 구성 요소 중에 하나인 빔 성형 네트워크의 효율적인 설계가 매우 중요하다.

빔성형 네트워크(Beamforming Network)에는 크게 두 가지 방법인 로트만 렌즈(Rotman Lens)[1]와 버틀러 매트릭스(Butler Matrix)가 있다[2]. 이 중에 버틀러 매트릭스는 주로 마이크로스트립 선로를 기반으로 구현되기 때문에 쉽게 제작이 가능하며, 내부 회로를 어떻게 설계하느냐에 따라 출력 포트의 급전 크기와 인접한 출력 포트 간의 위상차가 결정되기 때문에 배열안테나의 빔을 성형하는데 손쉬운 장점을 갖는다. 하지만 기존의 버틀러 매트릭스는 구성요소인 3dB 하이브리드 커플러와 크로스오버의 좁은 동작대역으로 인해 대역폭의 제한을 받는다[3-7]. 특히, 많은 다중입력과 출력을 포함하는 M-MIMO(Massive Multiple Input and Multiple Output) 시스템에서 사용되는 버틀러 매트릭스는 주어진 대역에서 출력신호의 크기와 위상오차가 크게 나타나 전자파 빔을 조향하는데 있어서 커다란 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 근래에는 회로의 크기를 줄이는 다양한 버틀러 매트릭스 구조체 개선과 광대역 동작

특성을 갖는 빔성형 네트워크를 설계하는데 연구의 초점이 맞추어지고 있다[8-15].

본 논문에서는 2.5-2.68GHz의 전용 주파수 대역을 갖는 4세대 이동통신대역인 LTE(Long Term Evolution) 대역에서 동작하는 광대역 버틀러 매트릭스를 설계하기 위해 버틀러 매트릭스의 내부 회로인 기존의 3dB 하이브리드 커플러와 크로스오버를 브랜치 선로 구조를 이용하여 다단으로 구성한다. 더불어 대역폭 200MHz의 광대역 주파수 동작 범위 내에서 위상오차를 5° 이내로 줄일 수 있도록 45° 위상 천이기와 등위상 조절기를 최적화함으로써 광대역 특성을 얻는다. 그리고 버틀러 매트릭스의 광대역 설계 결과로부터 얻어진 출력신호의 크기와 위상오차가 빔 패턴과 빔 조향 방향에 미치는 영향에 대하여 분석한다.

2. 빔 성형 네트워크

빔 성형 네트워크는 기본적으로 배열 안테나의 복사패턴에 영향을 주는 요소들을 조정하여 빔 패턴을 원하는 방향으로 성형시키기 위한 시스템이다. 이러한 빔 성형 시스템을 통하여, 배열 안테나의 복사패턴을 결정하는 데 영향을 주는 요소는 다음 5가지가 있다. 첫째는 선형, 직사각형, 원형, 구형 등과 같이 배열 안테나 소자의 기하학적 배치 형태이다. 안테나의 배치된 형태에 따라 신호의 위치와 방향을 구분하기가 쉬워진다. 둘째는 배열 소자인 단일 안테나의 소자 간의 간격이다. 배열 소자간의 간격은 공간으로 복사되는 전자파를 모으거나 분산시킬 수 있다. 셋째는 배열 소자인 각각의 안테나에 공급되는 급전 신호의 크기이다. 이 급전 신호의 크기가 모든 배열 소자에 균일하게 공급되면 주엽과 부엽의 비가 감소하고 지향성과 이득이 감소한다. 그래서 이항다항식 분포, 체비셰프 다항식 그리고 테일러 선소법과 같은 비균일

전류분포 식을 적용하여 부엽을 줄이고 이득과 지향성을 향상시킨다. 넷째는 배열 소자에 공급하는 신호의 위상차이다. 신호의 위상차는 공간으로 복사된 전자파의 빔의 방향을 결정한다. 따라서 위상차를 조절함으로써 빔조향 방향을 전자적으로 조절할 수 있다. 다섯째는 배열 안테나를 구성하는 단일 안테나 소자의 패턴이다. 단일 안테나의 패턴은 빔의 방향을 결정하는 기본 인자로서 앞에서 언급한 배열인자들과 결합하여 빔 조향 특성을 결정한다.

빔 성형 시스템 중 하나인 버틀러 매트릭스는 위의 요소들 중에 마지막 요소를 제외한 나머지를 조정할 수 있다. 버틀러 매트릭스의 기하학 구조를 어떻게 설계하느냐, 출력 포트 간 간격을 어떻게 조정하느냐에 따라 배열의 형태와 안테나 간에 간격을 결정할 수 있으며, 버틀러 매트릭스의 내부 구성에 따라서 각 안테나로 공급되는 급전신호의 크기와 위상차가 결정되게 된다. 따라서 각 요소들을 어떻게 설계할 것인가에 대한 부분은 배열안테나의 빔 패턴을 성형하는데 중요한 요소가 된다 [15,16].

기존의 버틀러 매트릭스는 내부를 구성하는 회로 요소들이 협대역의 동작 특성을 갖기 때문에 주로 20MHz의 좁은 대역폭을 갖는 FDD(frequency division duplex) 방식의 협대역 이동통신시스템에서 활용되어왔으나, 오늘날에는 고속 이동상황에서도 LTE 기술에 적합한 대용량의 데이터를 전송할 수 있도록 200MHz의 대역폭을 갖는 광대역 버틀러 매트릭스를 설계하여야 한다. 하지만, 광대역 특성을 갖는 버틀러 매트릭스는 주로 중심 주파수에서는 이론적으로 잘 맞는 결과를 가져오지만, 중심주파수를 벗어날수록 각 출력 포트에 공급되는 급전신호의 크기와 인접한 출력 포트 간 위상차에 대한 오차가 크게 발생하게 되어 빔 패턴에 영향을 주게 된다. 일반적으로 이동통신 기지국은 한셀 당

3섹터로 나누어 이동통신 가입자들에게 서비스를 제공하고 있고, 한 섹터당 서비스 영역은 120°를 관할할 수 있도록 빔성형 시스템을 구성한다. 그러므로 4×4 구조의 빔성형 시스템에서는 120°의 섹터영역을 서비스하기 위하여 반전력 빔폭이 30°를 갖는 4개의 성형 빔을 겹치지 않게 서로 다른 방향으로 만들 수 있도록 설계하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 내부 회로 요소들을 다단으로 구성하여 광대역 특성을 갖도록 구성하며, 중심 주파수를 벗어날수록 증가하는 인접한 출력 포트 간 위상 오차를 줄이기 위한 방법들을 고안한다.

3. 버틀러 매트릭스 설계

다중 빔 패턴을 성형시키는 버틀러 매트릭스는 N개의 입력과 N개의 출력을 가지며, 일반적으로는 N=4, 8, 16 의 값으로 설계된다. 이론적인 버틀러 매트릭스의 특성으로 입력 포트들 간에는 서로 격리되며 하나의 입력 포트에 인가된 신호는 각 출력포트에서 1/N 만큼의 크기로 신호 에너지가 나누어지고 인접한 출력포트들 사이에는 일정한 위상차를 갖게 된다. 버틀러 매트릭스는 이러한 특성 때문에 다중 빔 성형 네트워크에 사용되고 있다.

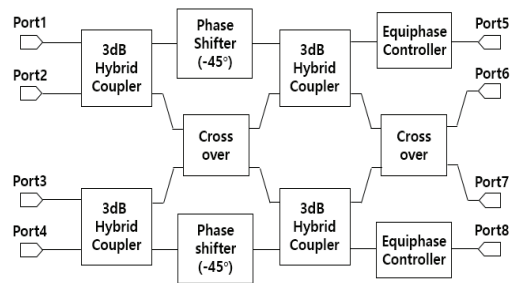


그림 1. 4x4 버틀러 매트릭스의 구조
Figure 1. Structure of 4x4 Butler matrix

<그림 1>은 4x4 버틀러 매트릭스의 구조와 구성

요소들을 나타낸 것으로 3dB 하이브리드 커플러 4개, 크로스오버 2개, -45도 위상기와 등위상 조절기로 구성된다. 이들 구성요소 중 3dB 하이브리드 커플러와 크로스오버는 마이크로스트립에서 브랜치 선로 구조로 설계하며, -45도 위상 천이기와 등위상 조절기의 경우는 선로의 길이를 조정하여 구성함으로써 버틀러 매트릭스의 특성을 최적화한다. 설계에 사용된 기판은 Taconic TLX-9으로 유전율 $\epsilon = 2.5$, 손실 탄젠트 $\delta = 0.0019$, 기판의 높이 $h = 1.57\text{mm}$, 동판의 두께 $t = 35\mu\text{m}$ 를 사용하며, 상용 툴인 HFSS(High Frequency Simulation Software)의 시뮬레이션 결과와 실제 제작을 통해 측정된 결과 값을 확인하고 비교한다.

3.1 하이브리드 커플러 설계

마이크로파 회로에서 잘 알려져 있는 3dB 하이브리드 커플러는 마이크로스트립 선로에서 2단 브랜치 선로 구조로 설계된다. 하지만 $\lambda/4$ 길이의 필수조건 때문에 3dB 하이브리드 커플러의 대역폭은 10~20% 이내로 버틀러 매트릭스의 구성 요소로 사용할 경우 원하는 동작 범위 내에서 빔 스위칭 효과를 얻을 수 없다. 따라서 보다 넓은 대역에서 동작하기 위해서는 브랜치 선로를 다단으로 구성하여야 한다. 본 논문에서는 2.5-2.68GHz 대역에서 동작하는 버틀러 매트릭스를 구현하기 위해 3dB 하이브리드 커플러를 3단 브랜치 선로 구조로 설계하였으며, 그 구조는 <그림 2>에 나타내었다.

3단 브랜치 선로 구조의 경우, 각 단의 어드미턴스는 다음 조건을 만족하면 3dB 하이브리드 커플러로 동작하게 된다.

$$a = \sqrt{2} - 1 \tag{1}$$

$$b = c = \sqrt{2} \tag{2}$$

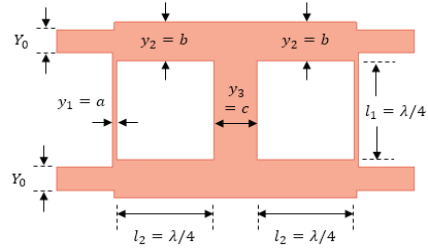


그림 2. 광대역 특성을 갖는 3dB 하이브리드 커플러
Figure 2. Hybrid coupler with broadband

여기서 a, b, c 는 Y_0 로 정규화된 각 선로의 어드미턴스 값이며, $Y_0 = 1/Z_0$, $Z_0 = 50\Omega$ 이다. 식 1과 2의 조건에 의해 3dB 하이브리드 커플러로 동작하기 위한 각 단의 정규화된 어드미턴스 값을 임피던스 설계 값으로 변환하여 나타내면 a 는 120.71 Ω 이고 b 와 c 는 35.35 Ω 이 된다. 이러한 이론적 수치를 기반으로 HFSS에서 최적화된 결과에 따른 각 단의 파라미터들을 <표 1>에 나타내었다.

표 1. 광대역 특성을 갖는 하이브리드 커플러의 설계 파라미터

Table 1. Design parameters of hybrid coupler with broadband

Hybrid Coupler Parameters					
Par.	Optimized Results		Par.	Optimized Results	
Y_0	0.02 \cup	4.49 mm	c	1.390 \cup	7.1 mm
a	0.419 \cup	0.76 mm	l_1	19 mm	
b	1.404 \cup	7.2 mm	l_2	18.1 mm	

3.2 크로스오버 설계

버틀러 매트릭스에서 크로스오버는 구조상 필연적으로 필요한 구성 요소이다. 동일평면 브랜치 선로 구조를 이용하여 크로스오버를 구현하기 위해서는 3단 이상의 브랜치 선로를 홀수 단으로 구성하여야 하며, 이때 브랜치 선로는 0dB 커플러가 된

다. 기본 3단으로 구성되는 크로스오버는 좁은 대역폭을 갖기 때문에 3dB 하이브리드 커플러와 마찬가지로 단을 늘려서 대역폭을 넓혀야 한다. 본 논문에서는 2.6GHz의 LTE 주파수 대역에서 200MHz의 대역폭을 갖도록 회로의 크기를 고려하여 브랜치 선로를 5단으로 구성하였으며, 이에 따른 크로스오버의 형태는 <그림 3>에 나타내었다.

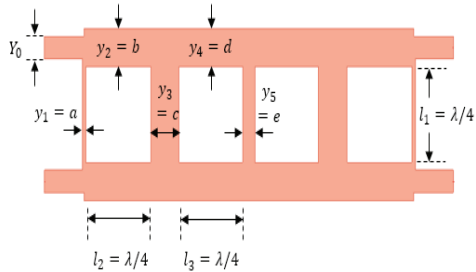


그림 3. 광대역 특성을 갖는 크로스오버
Figure 3. Crossover with broadband

5단으로 구성할 경우 각 단의 어드미턴스 조건은 다음과 같다.

$$a = \frac{(1 \pm \sqrt{1-e})(1-e)}{(2-e) \pm 2\sqrt{1-e}} \quad (3)$$

$$b = [c(1 \pm \sqrt{1-e})]^{1/2} \quad (4)$$

여기서 a, b, c, d, e 는 Y_0 로 정규화된 각 선로의 어드미턴스 값이며, 어드미턴스가 실수값을 가지기 위해서는 e 가 1보다 작아야한다. 식 3과 4의 조건에 의해 0dB 크로스오버로 동작하기 위한 각 단의 정규화된 어드미턴스 값을 임피던스 설계 값으로 변환하여 나타내면 a 는 170.14Ω 이고 b 와 d 는 35.35Ω , c 는 35.3Ω , e 는 60.38Ω 이 된다. 이러한 이론적 수치를 기반으로 HFSS 시뮬레이션 과정을 통하여 최적화된 각 단의 파라미터 값들은

<표 2>에 나타내었다. 이 조건을 만족할 때, 5단 브랜치 회로는 크로스오버의 특성을 갖는다.

3.3 위상천이기 설계

입력포트에 인가된 신호에 따라 인접한 출력포트 간에 일정한 위상 차이를 갖도록 구성하기 위해서는 위상 천이기의 정확한 설계가 필요하다.

표 2. 광대역 특성을 갖는 크로스오버의 설계 파라미터
Table 2. Design parameters of the crossover with broadband property

Hybrid Coupler Parameters					
Par.	Optimized Results		Par.	Optimized Results	
a	0.476 \cup	1.09 mm	e	0.832 \cup	3.34 mm
b	1.414 \cup	7.37 mm	l_1	17.87 mm	
c	1.418 \cup	7.41 mm	l_2	18.05 mm	
d	1.414 \cup	7.37 mm	l_3	16.56 mm	

위상 천이기는 마이크로스트립 선로를 사용하여 구현하며, 4x4 버틀러 매트릭스에서는 -45° 로 설계된다. 마이크로스트립에서 선로 길이에 따른 위상은 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (6)$$

여기서 L 은 위상 천이기 설계를 위한 선로의 길이이며, λ 는 선로의 파장, λ_0 는 자유공간에서의 파장, ϵ_{eff} 는 마이크로스트립 선로의 유효유전율을 나타낸다. 위상 천이기는 크로스오버의 위상지연을

포함하도록 해야 하며, 크로스오버를 지나는 신호와의 위상차가 -45° 가 되도록 설계한다.

3.4 버틀러 매트릭스 구조 설계

앞에서 설계된 3dB 하이브리드 커플러와 크로스오버, 위상 조절기, 등위상 조절기를 조합하여 <그림 1>로부터 <그림 4>와 같이 버틀러 매트릭스를 구성한다. 이 그림은 상용툴인 HFSS에서 버틀러 매트릭스를 구성한 마이크로스트립 선로구조를 나타낸 것이다.

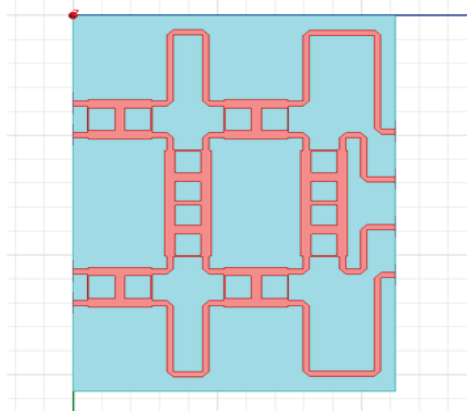


그림 4. 평면구조의 버틀러 매트릭스
Figure 4. Butler matrix of planar structure

그림에 구성된 버틀러 매트릭스의 특성을 개선하고, 출력 포트의 위상오차를 줄이기 위해서는 우선적으로 하이브리드 커플러와 크로스오버를 광대역 특성을 갖도록 설계하여 동작주파수 대역 내에서 일정한 위상차를 갖도록 해야 한다. 그리고 -45° 위상천이기의 선로의 길이를 조절하여 그림1에서 포트 6과 포트7의 위상을 최대한으로 같도록 해야 한다. 또한 포트 5와 포트 8은 등위상조정기(Equiphase Controller)의 선로 길이를 적절히 조절하여 버틀러 구조에서 원하는 위상이 되도록 조정

해야 한다. 이러한 조정 과정을 거쳐 설계된 버틀러 매트릭스는 각 출력포트에서 신호의 크기가 1/4로 분배되고, 인접한 포트간의 위상차는 -45° 가 된다.

버틀러 매트릭스의 빔성형 특성을 분석하기 위한 출력포트의 간격은 배열안테나의 최적화된 빔 패턴을 형성하도록 자유공간에서 반파장의 길이로 설정한다. 그리고 위상오차에 따른 빔 패턴의 영향을 확인하기 위해서, 설계된 버틀러 매트릭스의 출력포트를 일반적으로 잘 알려진 마이크로스트립 패치안테나에 연결하여 빔성형 네트워크로부터 공간으로 복사된 빔조향 특성을 확인한다.

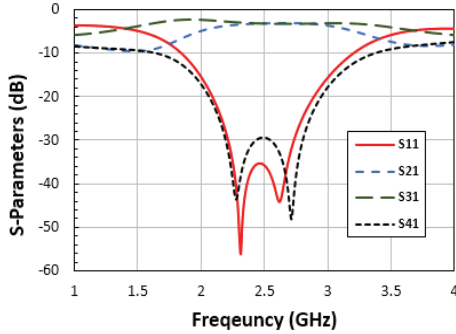
4. 시뮬레이션 결과

이 절에 나타낸 시뮬레이션 결과들은 앞에서 언급한 설계이론을 토대로 상용툴인 HFSS를 사용하여 버틀러 매트릭스의 각 요소들과 이들을 혼합하여 구성된 버틀러 매트릭스의 주파수 응답 그리고 반사 및 삽입손실을 나타낸 것이다.

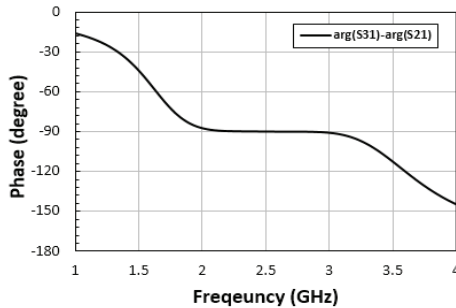
<그림 5(a)>는 표 1의 설계 제원을 적용하여 시뮬레이션한 하이브리드 커플러의 산란특성이다. 포트 1과 포트 4는 2.2-2.8GHz에서 -20dB 이하로 격리특성을 가지며, 포트 2와 포트 3으로는 각각 전력이 반으로 나뉘진 -3dB 로 분배되어 전달된다. <그림 5(b)>는 포트2와 포트3 간의 위상차 값을 나타낸 것으로 2.5-2.68GHz에서 90° 의 위상 차이를 갖는다.

<그림 6>은 포트 1에 신호를 인가했을 때 각 포트로 전달된 크로스오버의 주파수 응답을 나타낸 것이다. 크로스오버의 특성상 입력포트인 포트 1에 신호를 인가하였을 때, 대각선상에 놓이는 포트 3으로 모든 신호가 전달되고 나머지 포트는 격리되는 특성을 갖는다. 위 결과에서 크로스오버는 2.5-2.68GHz에서 포트 3을 제외한 각 포트가 -20dB 이하의 특성을 가지며, 포트3에 대부분의 신호가

전달되는 것을 알 수 있다. 그리고 또 다른 입력 포트에 인가된 신호도 크로스오버의 대칭적 구조로 인하여 대각선상의 포트로는 거의 0dB의 신호 전달 특성을 가지며, 두 출력포트 간에는 0°의 위상차를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 5. 하이브리드 커플러에 대한 산란 특성 (a) 크기, (b) 두 출력포트간의 위상차

Figure 5. Scattering characteristics for the hybrid coupler (a) amplitude, (b) phase difference between two output ports

〈그림 7〉은 하이브리드 커플러와 크로스오버를 조합하여 버틀러 매트릭스를 구성한 〈그림 4〉의 시뮬레이션 결과이다. 버틀러 매트릭스의 특성상 하나의 입력포트에 신호를 인가하였을 때, 각각의 출력포트에 전달되는 에너지는 균등하게 나뉘지고 위상차는 안테나의 지향성 조건에 적절하게 조절할 수 있어야 한다. 위 결과에서 버틀러 매트릭스

는 2.5-2.68GHz에서 각각의 출력포트에 -6dB의 전력을 나누어 전달하고, 반사전력은 -20dB 이하의 특성을 가진다.

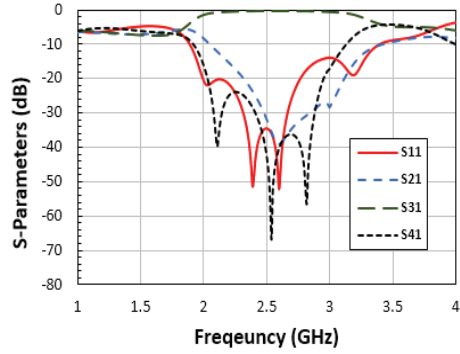


그림 6. 크로스오버에 대한 산란특성

Figure 6. Scattering characteristics for the crossover

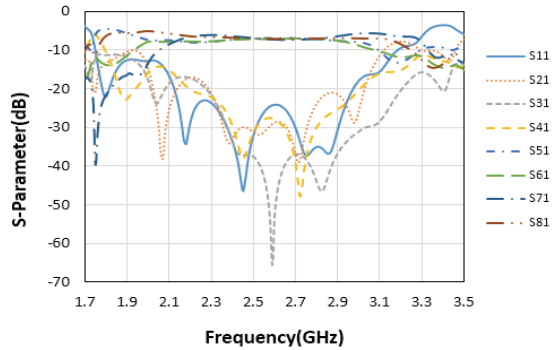


그림 7. 버틀러 매트릭스의 산란특성

Figure 7. Scattering characteristics for Butler matrix

5. 최적화 설계 및 측정

〈그림 4〉의 버틀러 매트릭스 구조는 마이크로스트립 배열안테나와 연결하기 용이하도록 반파장이 격된 배열소자의 급전 구조에 맞추고, 매트릭스 크기를 줄일 수 있도록 설계하였다. 최적화 설계된 버틀러 매트릭스와 실제 제작된 모델은 〈그림 8〉에 나타내었다.

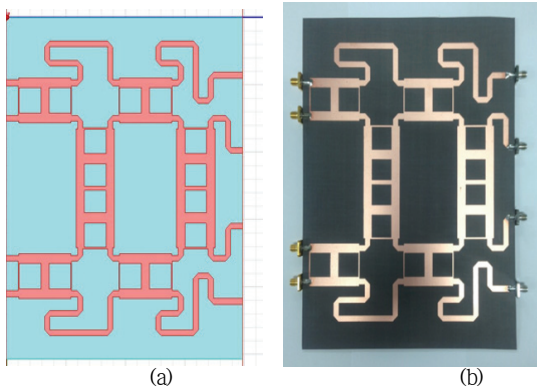


그림 8. 광대역 4x4 버틀러 매트릭스 (a) 레이아웃 패턴, (b) 제작 패턴

Figure 8. Broadband 4x4 Butler matrix (a) layout pattern, (b) fabricated pattern

<그림 9(a)>는 LTE 주파수 대역에서 설계된 버틀러 매트릭스의 주파수 특성으로서 실선으로 표현된 값들은 시뮬레이션 결과를, 점선으로 표현된 값들은 측정에 의해 얻어진 결과 값을 나타낸다. 여기서 수직으로 놓인 검은색 점선은 LTE 대역을 표시한다. 측정치의 경우, LTE 대역인 2.5-2.68GHz에서 설계된 버틀러 매트릭스의 삽입손실 특성을 나타내는 S51, S61, S71, S81은 최대 -7.1dB에서 -7.63dB로 포트 간에는 최대 0.52dB 정도의 오차를 가지며, 반사손실 특성을 나타내는 S11은 2.5GHz에서 최대 -23.9dB로 좋은 격리 특성을 보인다. <그림 9(b)>는 입력 포트1에 신호가 인가되었을 때, 인접한 출력 포트 간 위상차를 보여준다. 이론적으로는 -45°의 위상차를 가져야 하지만, 광대역 특성을 갖는 버틀러 매트릭스는 중심주파수를 벗어날수록 위상 오차가 조금씩 커지게 된다. 측정결과 위상오차는 2.5GHz에서 3.31°, 2.68GHz에서 5.41°의 최대 위상오차가 발생한다. 최근에 발표된 광대역 버틀러 매트릭스에 대한 [5]의 모의 시뮬레이션 결과는 15dB의 반사손실과 7.65±0.65dB의 삽입손실 기준에서 42.8%의 넓은 비대역폭을 갖지만, 각 포트에 전달되는 대역내의 삽입손실은 1.3dB의 비교적 큰 편차와 7°의 위상오차를 가진다. 또한

[11]은 10dB 반사손실과 8±0.5dB의 삽입손실 기준에서 6.5%의 협소한 비대역폭과 13°의 위상오차를 나타낸다. 이들에 대한 결과는 버틀러 매트릭스의 구조가 다층 마이크로스트립 전송선 구조체로 본 논문과는 모양과 형태에 있어서 다르다. 일반적인 평면 기반의 마이크로스트립 선로로 구현된 이동통신용 버틀러 매트릭스인 경우에는 실제 대역폭은 20MHz로 매우 협소하고 위상오차도 10° 이상을 갖는다. 그러나 논문에 구현된 평면구조 기반의 버틀러 매트릭스는 23.9dB 이하의 반사손실과 7.3±0.26dB의 삽입손실 기준에서 200MHz의 대역폭과 5.41°의 위상오차를 가지고 120도 섹터 내에서 4개의 빔을 성형할 수 있도록 LTE 이동통신시스템에 특화되었다.

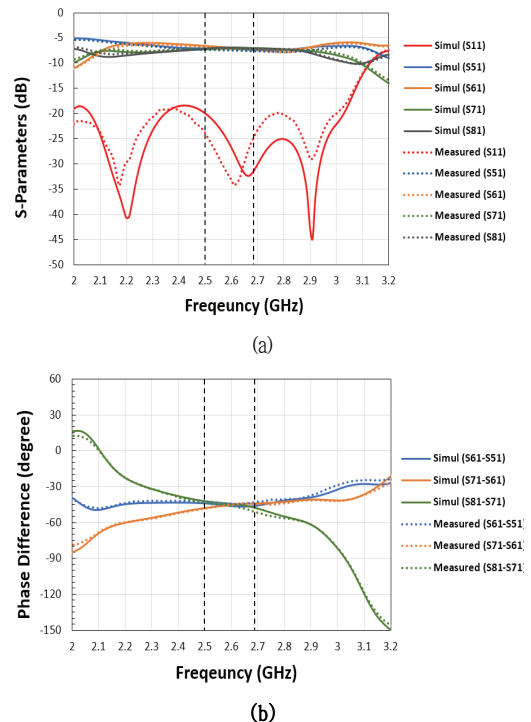
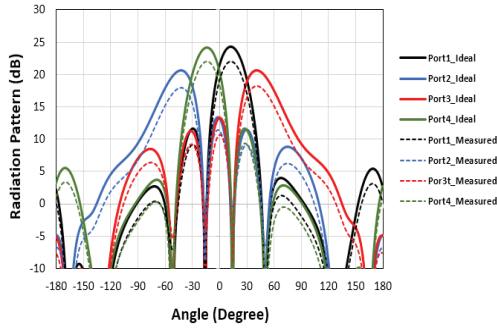
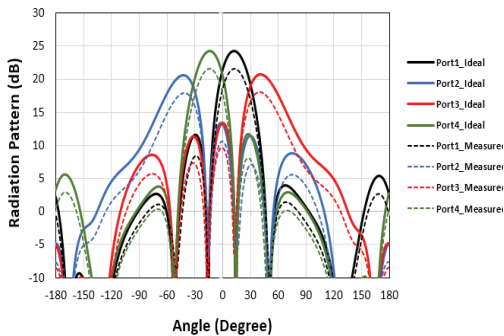


그림 9. 광대역 버틀러 매트릭스의 측정 결과 (a) 크기, (b) 출력포트간의 위상차

Figure 9. Measured results for the Butler matrix (a) amplitude, (b) phase difference between output ports



(a)



(b)

그림 10. 광대역 버틀러 매트릭스에 의해 급전된 빔성형 패턴 (a) 2.5GHz, (b) 2.68GHz

Figure 10. Beamforming pattern feeding by Butler matrix (a) 2.5GHz, (b) 2.68GHz

<그림 10>은 버틀러 매트릭스의 이상적인 특성 (실선)과 논문에서 설계한 버틀러 매트릭스의 특성 (점선)에 따른 복사패턴을 구한 결과이며, 위상오차 값이 큰 2.5GHz와 2.68GHz에서 복사패턴을 비교한 그림이다. 2.5GHz의 경우는 이득의 크기가 최대방향에서 약 2.3dB 정도의 차이를 보였으며, 빔의 방향에는 변화가 없었다. 2.68GHz의 경우는 이득의 크기가 약 2.6dB 정도 차이를 보였고, 빔의 방향은 최대 방향에서 약 1° 만큼의 오차를 보였다. 그리고 그림에 나타난 버틀러 매트릭스의 빔 성형 각은 -60°에서 60°까지로 120°의 섹터영역을 서비스할 수 있도록 주빔 방향이 -43°, -13°, 13°, 43°의 각도에서 형성되고 있으며, 각각의 주빔은 반

전력 빔폭이 30°를 갖는 4개의 성형 빔을 서로 다른 방향으로 조향하고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 버틀러 매트릭스의 구성요소 중 3dB 하이브리드 커플러와 크로스오버를 각각 3단 브랜치 구조와 5단 브랜치 구조로 설계하여 광대역 특성을 얻었으며, 등위상 조절기를 이용하여 인접한 출력포트 간 발생하는 위상오차를 최소화 하였다. 설계된 버틀러 매트릭스는 직접 제작하였으며, 성능파악을 위하여 시뮬레이션 결과와 측정결과를 서로 비교하였다. 버틀러 매트릭스의 동작대역 내에서 반사손실 특성은 최대 23.9dB, 삽입손실 특성은 7.1dB에서 7.63dB로 0.52dB 정도의 오차를 보였으며, 위상 오차는 최대 5.41°의 오차가 발생하였다. 그리고 설계된 버틀러 매트릭스를 마이크로스트립 배열안테나와 연결하여 빔 패턴을 구하고 이상적인 결과와 비교하여 성능을 분석하였다. 비교 분석한 결과, 버틀러 매트릭스가 최대 5.41° 정도의 위상오차를 가질 때, 성형되는 빔 패턴의 방향은 1° 이내로 크게 변하지 않아 원하는 방향으로 빔을 적절히 조향할 수 있음을 파악하였다.

References

- [1] W. Rotman, and R. Turner, *Wide-angle microwave lens for line source applications*, IEEE Transactions on Antenna Propagation, Vol. AP-11, pp. 623-632, 1963.
- [2] J. Butler, and R. Lowe, *Beamforming matrix simplifies design of electrically scanned antennas*, Electronics Design 9, pp. 170-173, 1961.
- [3] M. M. Alam, *Microstrip antenna array with four port butler matrix for switched beam based station*

- application, Proceeding of 12th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2009), pp. 531-536, 2009.
- [4] H. Nachouane, A. Najid, A. Tribak, and F. Riouch, *Broadband 4×4 butler matrix using wideband 90° hybrid couplers and crossovers for beamforming networks*, in Proc. 2014 Int. Conf. Multimedia Computing and Systems (ICMCS), pp. 1444-1448, Apr. 2014.
- [5] A. Alaqeel, S. Almorqi, O. Haraz, M. Ashraf, S. Alshebeili, and A. R. Sebak, *Broadband 4×4 butler matrix for K- and Ka-bands*, in Proc. 2015 IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation & USNC/URSI Nat. Radio Science Meeting, pp. 230-231, Jul. 2015.
- [6] 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.
- [7] Q. P. Chen, S. L. Lai, and S. Y. Zheng, *Compact Butler matrix based on patch element for X band applications*, 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 1-3, 2015.
- [8] A. Talbi, M. L. Seddiki, and F. Ghanem, *A compact 4×4 butler matrix for UWB applications*, in Proc. 2013 IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symposium(APSURSI), pp. 1010-1011, Jul. 2013.
- [9] 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.
- [10] 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. 2006.
- [11] M. Nedil, M. A. E. Cafsi, T. A. Denidni, and A. Gharsallah, *Novel UWB CB-CPW butler matrix for wireless applications*, in Proceeding 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium(APSURSI), pp. 1800-1801, Jul. 2014.
- [12] C. J. Chen, and T. H. Chu, *Design of a 60-GHz substrate integrated waveguide butler matrix – A systematic approach*, IEEE Trans. Microwave Theory and Technology, Vol. 58, No. 7, pp. 1724-1733, Jul. 2010.
- [13] 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.
- [14] T. Djerafi, and K. Wu, *A low-cost wideband 77-GHz planar butler matrix in SIW technology*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 60, No. 10, pp. 4949-4954, Oct. 2012.
- [15] D. H. Lee, S. D. Seo, H. R. Cho, and D. Y. Yang, *Design of beamforming butler switch for LTE MIMO(4×4) system*, 2016 Convergence Contents Spring Conference (KOCON), Vol. 14, No. 1, I-A, pp. 13-14, 2016.
- [16] D. H. Lee, S. D. Seo, H. R. Cho, and D. Y. Yang, *Analysis of beamforming effect by phase error of butler switch*, 2016 Summer Conference (KIEES), Vol. 4, No. 1, C-16, 2016.

평면구조 기반의 LTE 이동통신용 빔성형 버틀러 매트릭스(4×4) 구현

이동학¹, 양두영²

¹(주)이너트론 R&D 연구소

²제주대학교 통신공학과

요 약

LTE 대역인 2.5-2.68GHz에서 동작하는 빔성형 버틀러 매트릭스를 설계하기 위해 버틀러 매트릭스의 구성요소인 하이브리드 커플러와 크로스오버를 다단 브랜치 선로의 구조로 구성하여 광대역 특성을 갖는 평면 구조의 버틀러 매트릭스를 설계하였다. 버틀러 매트릭스의 구조와 구성 요소들은 3dB 하이브리드 커플러 4개, 크로스오버 2개, 각각 2개의 -45도 위상기와 등위상 조절기로 구성된다. 이들 구성요소 중 3dB 하이브리드 커플러와 크로스오버는 마이크로스트립 기판 내에서 브랜치 선로 구조를 가지고 광대역 특성을 갖도록 설계하였으며, -45도 위상 천이기와 등위상 조절기는 선로의 길이를 조정하여 적절한 위상을 얻을 수 있도록 최적화하였다. 설계된 버틀러 매트릭스는 동작대역에서 23.9dB ~ 34.18dB의 좋은 반사손실 특성과 비교적 작은 5.41°의 위상오차를 보였다. 그리고 버틀러 매트릭스의 출력신호를 마이크로스트립 패치배열 안테나에 인가하여 신호의 크기와 위상오차가 빔성형 패턴과 빔조향 방향에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과, 버틀러 매트릭스가 최대 5.41° 정도의 위상오차를 가질 때에 성형되는 빔 패턴의 방향은 1°오차로 크게 변하지 않아 원하는 방향으로 빔을 적절히 조향할 수 있다.



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

감사의 글

본 논문은 2017학년도 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 a 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