

5G 빔포밍 시스템을 위한 광대역 버틀러 매트릭스 소형화 설계

Design of Miniaturized Broadband Butler Matrix for 5G Beamforming System

정 진 영 · 김 병 성

Jin-yeong Jung · Byung-Sung Kim

요 약

본 논문에서는 5G NR(3 GHz~4.5 GHz)에서 광대역 성능을 가진 4×4 버틀러 매트릭스의 소형화 설계를 제안하였다. 광대역 특성을 위해 기존 커플러 구조를 broad-side 형태로 구현하기 위한 최적의 파라미터를 도출하였고, 소형화를 위해 FR-4 4층 기판구조에서 strip line으로 주요 회로를 구현하였다. 측정 결과, 3 GHz~4.5 GHz 범위에서 평균 구현 손실은 -1.5 dB, 반사 손실은 15 dB 이상으로 측정되었고, 출력포트의 평균 위상차 성능의 경우 이상적인 값 대비 최대 $\pm 3^\circ$ 수준의 오차를 확인하였다. 안테나를 실장 후 측정된 빔 조향 성능의 경우 계산값 대비 $\pm 2.5^\circ$ 미만의 오차를 가지며 $10.29^\circ \pm 1^\circ$, $-32.41^\circ \pm 1.5^\circ$, $32.41^\circ \pm 1.1^\circ$, $-10.29^\circ \pm 2.5^\circ$ 로 측정되었다. 제작된 버틀러 매트릭스의 크기는 $40 \times 38.6 \times 1.2 \text{ mm}^3$ 이며, 동일 주파수를 사용하는 기존 버틀러 매트릭스 대비 30 % 수준의 크기 감소와 2.54배 수준의 대역폭 개선을 이루었다. Ansys HFSS Tool을 활용해 시뮬레이션을 진행하였고 실측과 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 설계된 버틀러 매트릭스는 5G 대역의 광대역 빔포밍 시스템 소형화에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

This paper proposes a compact 4×4 Butler matrix (BM) with broadband characteristics within the 5G NR frequency range (3 GHz ~4.5 GHz). To achieve broadband performance, 3 dB broad-side coupler with optimal parameters was implemented, and the circuit was designed with a strip line based on the FR-4 four-layer structure to reduce the size. The average implementation loss was measured as -1.5 dB, and the reflection coefficient was measured as over 15 dB across the entire frequency range. Phase differences of -45° , 135° , -135° , and 45° were confirmed, with an average phase error of $\pm 3^\circ$. When the antenna was mounted, beam steering angles were measured as $10.29^\circ \pm 1^\circ$, $-32.41^\circ \pm 1.5^\circ$, $32.41^\circ \pm 1.1^\circ$, and $-10.29^\circ \pm 2.5^\circ$. The size of the manufactured compact BM was $40 \times 38.6 \times 1.2 \text{ mm}^3$, and it achieved a size reduction of 30% and a bandwidth improvement of 2.54 times compared with the legacy BM using the same frequency. Ansys HFSS was used to design and simulate the BM, and the results suggested that this wideband compact BM could be used for the miniaturization of 5G beamforming systems.

Key words: Butler Matrix, Phase Shifter, Broad-Side Coupler, 5G, Beamforming

I. 서 론

최근 모바일 데이터 트래픽의 폭발적인 증가와 다양한 스마트 기기 사용으로 인해 더 많은 데이터를 빠르게 송

성균관대학교 DMC공학과(Department of Digital Media Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received May 9, 2023 ; Revised June 1, 2023 ; Accepted August 16, 2023. (ID No. 20230509-029)

· Corresponding Author: Byung-Sung Kim (e-mail: bskimice@skku.edu)

수신하고자 하는 요구가 증가하고 있다. 5G NR(new radio) 통신에서는 데이터를 더욱 효율적으로 전송하기 위한 다양한 기술들이 연구되고, 상용화가 꾸준히 진행되고 있다. 데이터 전송률을 극대화할 수 있는 핵심기술로 제안되는 것이 다중 입출력 방식인 massive MIMO 기술과 위상 변이기를 사용하여 위상을 변화시킴으로써 빔의 형태나 방향을 조절하는 빔포밍 기술이 연구되고 있다^{[1][2]}.

5G NR을 지원하는 기지국 장비의 경우, 최대 유효복사전력(effective isotropic radiated power: EIRP) 출력을 얻기 위하여 32T/64T 등 다수의 안테나 서브 배열(sub-array)들로 구성되지만, 빔 조향 범위(steering range)가 좁아지는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해 아날로그 방식의 빔포밍 시스템이 필요하지만, 기지국 내부 공간적인 문제로 인해 다수의 빔 패턴을 구현하기 위한 회로를 배치할 수 없다는 제약사항이 있다^[3].

본 논문에서는 버틀러 매트릭스를 활용하여 아날로그 방식의 빔포밍 회로를 구현하고, PCB 다층기판 및 broad-side 커플러 구조를 통해 이를 소형화하는 기술을 연구하여 5G NR application에 최적화된 빔포밍 시스템 소형 설계방안을 제안하였다.

II. 빔포밍 시스템 구성도

빔포밍 시스템을 구성하는 방법으로는 N 개의 배열 안테나 구조에 N 개의 위상 천이기를 적용하여 구현하는 방식과, 그림 1과 같이 스위치를 이용해 미리 정해진 위상에 따른 N 개의 빔을 선택할 수 있는 방식으로 나눌 수 있다. 버틀러 매트릭스는 스위치 기반 N 개의 빔 형성을 위한 위상 변위 회로로 사용되며, 그림 2와 같이 3 dB quadrature 커플러, cross-over, 45° 위상 지연 회로와 N 개의 입출력 포트들로 구성된다. 스위치를 통해 어떤 포트에 신호

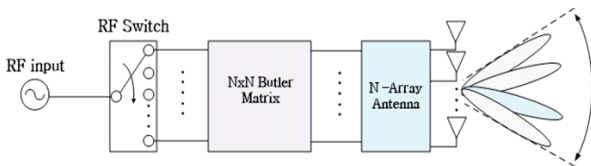


그림 1. 4×4 버틀러 매트릭스 기반 빔포밍 시스템
Fig. 1. Beamforming system based on 4×4 Butler matrix.

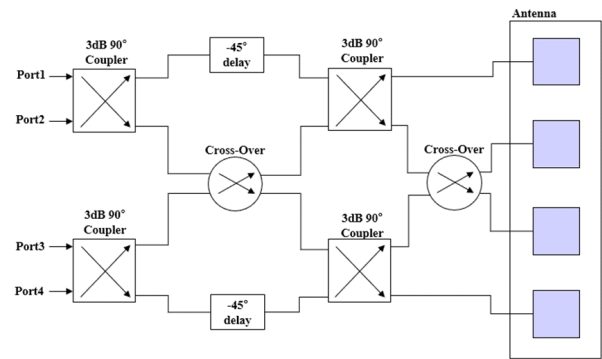


그림 2. 4×4 버틀러 매트릭스 구조
Fig. 2. 4×4 Butler matrix structure.

가 인가되는지에 따라 인접 출력 포트 간 위상차가 달라지며, 이를 이용하여 N 개의 빔을 형성할 수 있다^[4].

III. 광대역 버틀러 매트릭스 소형 설계

4×4 버틀러 매트릭스를 구현하기 위해서는 3 dB quadrature 커플러 4개, cross-over 2개 그리고 45° 위상 지연 회로 2개가 필요하다. 본 논문에서는 개선된 대역폭 성능과 소형화 설계를 동시에 만족하기 위하여 FR-4 4층 기판을 활용하여 설계하였으며, 그림 3은 버틀러 매트릭스 각 구성 요소의 설계에 사용된 PCB stack-up 정보를 나타내었다.

3-1 3 dB Broad-Side 커플러 및 Cross-Over 회로 설계

광대역에서 90° 위상차 성능을 가지는 커플러를 설계하기 위하여 기존 수평으로 커플링되는 방식이 아닌 수직으로 커플링하는 broad-side 형태의 커플러를 적용하였다^[5]. 수직으로 신호의 커플링이 이루어지기 때문에 기판 두께와 선폭 그리고 주변 임피던스 정합에 따라 커플러

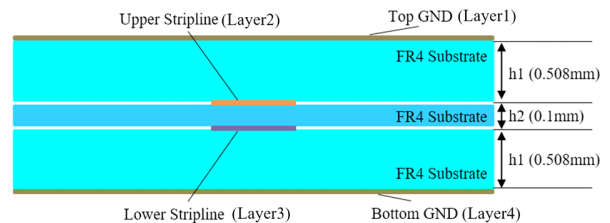


그림 3. 4층 기판 스택 업 상세 정보
Fig. 3. 4 layer stack-up information.

의 성능이 결정된다. 최적화 작업을 통해 Layer 2, Layer 3 간 간격 높이가 0.1 mm이며, Layer 1, Layer 2 그리고 Layer 3, Layer 4 높이가 0.508 mm일 때 출력이 안정적으로 배분됨을 확인하였다. 또한, 90° 위상차를 구현하기 위해 $\lambda_g/4$ 길이만큼의 구간이 필요한데, 주파수가 바뀌면 $\lambda_g/4$ 길이도 바뀌기 때문에 대역폭을 개선하기 어려운 제약사항이 있다. 이를 해결하기 위하여 포트별로 오픈 스테르브 길이와 위치를 조절해 40 % 수준의 대역폭을 가지는 최적의 파라미터를 도출하였다.

결정된 변수들의 값은 그림 4와 같이 $W50=0.475$ mm, $X1=9.8$ mm, $X2(\text{Stub}_L)=0.8$ mm, $Y1(\text{Stub}_L)=1.2$ mm, $Y2=3$ mm이며, stub 길이가 0.8 mm이고 위치는 1.2 mm 지점일 때 3 GHz~4.5 GHz에서 그림 5와 같이 커플러 출력 포트 간 평균 위상차는 $-90.2^\circ \pm 2.5^\circ$ 로 5° 미만 오차 성능을 확인하였다. 투과 손실은 그림 6과 같이 4.3 dB 이하로 확인되었고, 이는 RF Via로 인한 손실 0.5 dB가 포함된 값이다.

Cross-Over의 경우, micro-strip line 기반의 커플러 2개가 결합된 형태가 아닌 Layer 2, Layer 3에 배선된 strip line 신호가 서로 교차하도록 구현하였고, strip line의 경우 동일 기판 높이 기준으로 micro-strip line 대비 선폭을 50 % 수준으로 줄일 수 있기 때문에 기존 구조보다 소형화된 설계가 가능하였다.

3-2 4×4 버틀러 매트릭스 구현

설계된 3 dB broad-side 커플러와 cross-over 그리고 45° degree 위상 지연 회로를 활용하여 4×4 버틀러 매트릭스

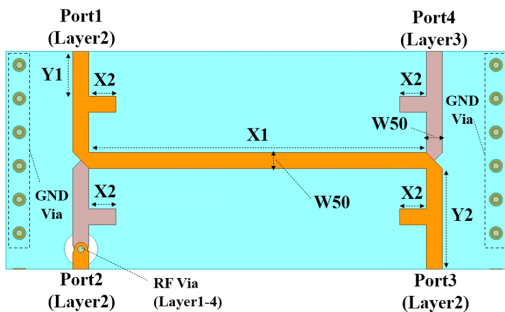
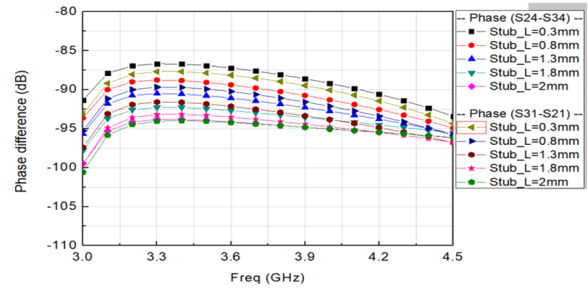
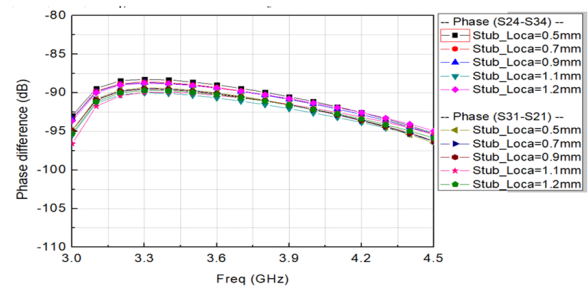


그림 4. 3 dB 브로드 사이드 커플러 레이아웃
Fig. 4. 3 dB broad-side coupler layout design.



(a) 스테르브 길이 변경 시
(a) Stub length sweep



(b) 스테르브 위치 변경 시
(b) Stub location sweep

그림 5. 파라미터에 따른 커플러 위상차 성능
Fig. 5. Phase difference with parameter sweep.

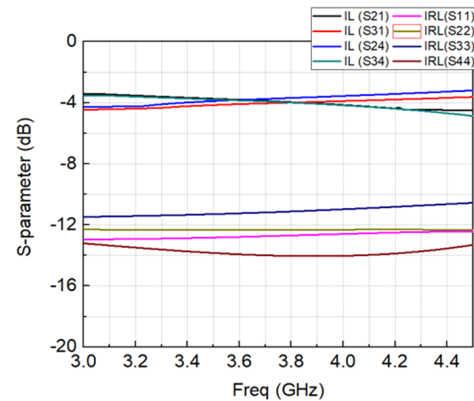


그림 6. 커플러 S-파라미터 측정 결과
Fig. 6. Measurement of broad-side coupler S-parameter.

를 제작하였다. 성능 측정을 위한 포트별 SMA 커넥터 실장을 위해서 버틀러 매트릭스 종단 포트를 모두 Layer 1에 Layer 2를 reference GND로 가지는 0.97 mm 선폭의 micro-strip line으로 SMA 커넥터까지 연결하였다. Layer 1

과 연결되는 RF via 주변은 임피던스 변화를 최소화하기 위하여 tapered 형태로 구현하였다. Broad-side 커플러들 간의 거리는 10 mm로 SMA 커넥터가 실장되기 위한 최소한의 공간으로 배치하였고, 2nd stage의 커플러와 포트 5, 포트 8 사이에 위상 보상을 위한 지연 회로를 추가하여 발생하는 위상 오차를 개선하였다.

또한 다층기판 PCB에서 회로를 설계하였기 때문에 각 층별 GND plane들 간에 충분한 연결이 중요하다. 본 논문에서는 주요 RF line 주변에 1 mm 간격으로 GND via를 배치하였다. 최종적으로 제작된 버틀러 매트릭스의 설계 데이터와 제품 외관은 그림 7과 같다. 버틀러 매트릭스의

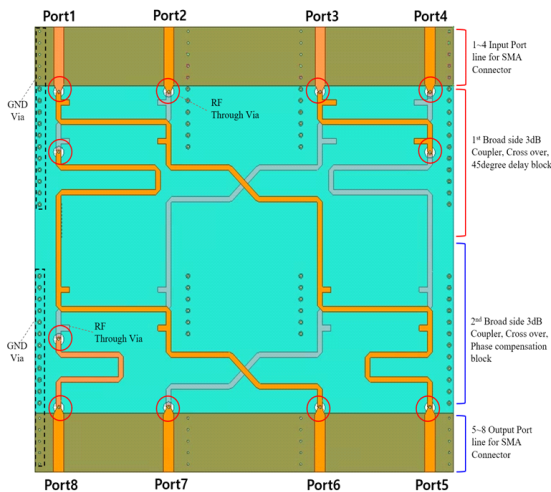
크기는 가로 $40 \times 28.4 \times 1.2$ mm³로 측정되었고, SMA 커넥터까지 포함한 길이는 $40 \times 38.6 \times 1.2$ mm³이다.

IV. 측정 결과

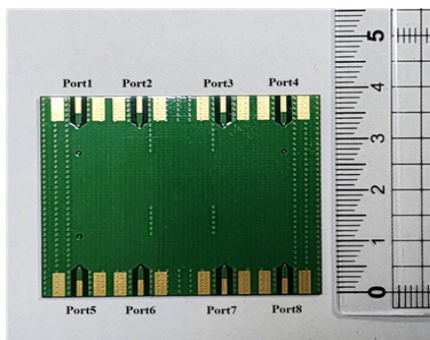
제작된 4×4 버틀러 매트릭스에 SMA 커넥터를 실장 후 Anritsu社 Network Analyzer 장비를 활용하여 calibration이 완료된 상태에서, S-parameter를 측정하였다. 측정 시 사용하지 않는 포트는 모두 50 Ω termination 처리된 상태에서 결과값을 확인하였다.

4.1 반사 손실 및 삽입 손실 측정 결과

버틀러 매트릭스의 반사 손실, 삽입 손실 측정 결과를 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 반사 손실의 경우, 3 GHz ~ 4.5 GHz에서 모두 15 dB 이상 성능을 만족하는 것을 확인하였고, 평균 삽입 손실은 포트 1의 경우 -7.97 dB, 포트 2는 -7.96 dB, 포트 3은 -7.9 dB, 포트 4는 -7.83 dB로 측정되었다. 파워 분배로 인한 이상적인 손실이 6 dB이며, 임출력 SMA 커넥터 손실 0.5 dB를 고려할 때 4×4 버틀러 매트릭스의 실제 구현 손실(implementation loss) 평균값은 1.3 dB ~ 1.5 dB 수준으로 확인하였다.



(a) 4×4 버틀러 매트릭스 레이아웃 정보
(a) 4×4 butler matrix layout



(b) 버틀러 매트릭스 외관
(b) Top view of Butler matrix

그림 7. 버틀러 매트릭스 레이아웃 및 외관
Fig. 7. Butler matrix layout and top view.

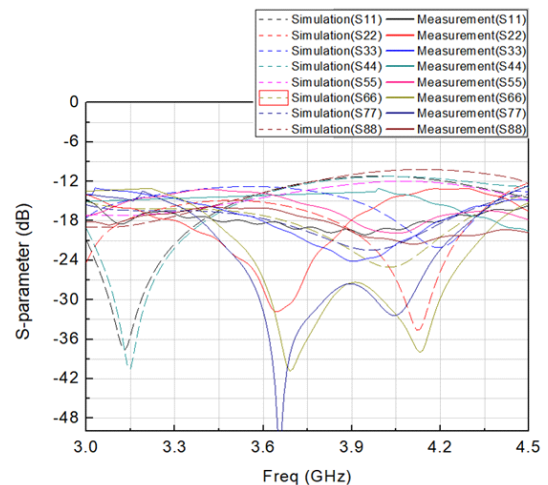


그림 8. 4×4 버틀러 매트릭스 임출력 반사 손실 측정 결과
Fig. 8. Measurement of 4×4 Butler matrix input and output return loss.

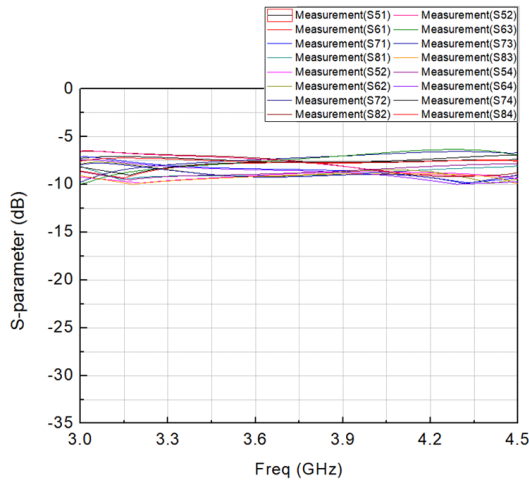


그림 9. 4×4 버틀러 매트릭스 삽입 손실 측정 결과
Fig. 9. Measurement of 4×4 Butler matrix insertion loss.

4-2 출력 포트별 위상차 측정 결과

버틀러 매트릭스는 입력 신호가 어느 포트에 인가되는냐에 따라 출력 인접 포트 간 위상 차이값이 달라지는데, 포트 1에서 포트 4까지 입력 포트를 변경하며 신호를 인가했을 시에 각각 -45° , 135° , -135° , 45° 의 위상차를 이상적인 값으로 가지게 된다. 출력 포트의 위상차는 그림 10과 같이 나타내며, 34.5 GHz 주파수에서 포트별 위상차 평균치를 구하였을 때 포트 1의 경우 -43.04° , 포트 2의

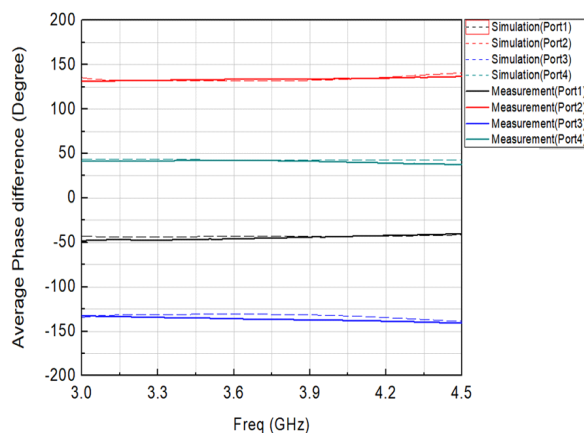


그림 10. 버틀러 매트릭스 출력 포트별 평균 위상차 그래프
Fig. 10. Butler matrix average phase difference graph of each output port.

표 1. 버틀러 매트릭스 포트별 위상차 평균값

Table 1. Butler matrix average value of phase difference each port.

Frequency	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
3 GHz	-43.38	135.66	-134.77	43.32
3.2 GHz	-43.77	132.20	-131.36	43.52
3.4 GHz	-43.55	131.80	-131.00	43.24
3.6 GHz	-43.25	131.54	-130.84	42.99
3.8 GHz	-43.00	131.81	-131.11	42.87
4 GHz	-42.93	133.15	-132.22	42.96
4.2 GHz	-42.88	135.93	-134.50	43.08
4.5 GHz	-41.54	140.58	-138.47	42.57
Ideal phase	-45	135	-135	45

경우 134.08° , 포트 3의 경우 -133.03° , 포트 4의 경우 43.07° 로 확인되었다. 이상적인 값 대비 $\pm 3^\circ$ 미만의 오차 수준이며, 정리된 결과를 표 1에 나타내었다.

4-3 버틀러 매트릭스 안테나 측정 시험 결과

제작된 버틀러 매트릭스의 출력 포트 간 위상차로 인하여 빔조향 성능이 어느 정도 확보되는지 확인하기 위해 0.7λ 간격의 송신용 E-shape micro-strip 안테나를 제작하였다. 입력되는 위상차에 따른 빔 조향 각도는 식 (1) 및 식 (2)를 통해 계산할 수 있는데 θ 는 빔 조향 각도를 의미하며 ϕ 는 안테나 패치 간 위상 차이값을 의미한다. 변수에 대한 상세 설명은 그림 11과 같이 나타내었다.

버틀러 매트릭스 입력 포트 별로 -45° , 135° , -135° , 45° 의 위상차 출력이 안테나로 전달되기 때문에, 빔 조향

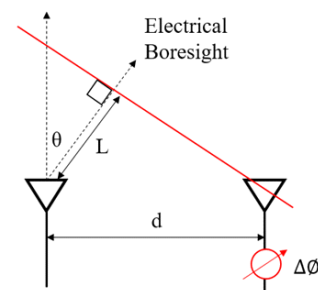


그림 11. 빔 조향 각도 및 위상 차이값
Fig. 11. Beam steering angle and phase difference.

각도의 이론상 계산값은 포트 1에 입력 신호를 인가했을 때는 10.29° , 포트 2에 인가했을 때는 -32.41° , 포트 3 인가 시에는 32.41° , 포트 4에 인가 시에는 -10.29° 로 계산된다.

$$L = d \sin \theta \quad (1)$$

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (2)$$

그림 12와 같이 버틀러 매트릭스와 송신용 안테나를 SMA 커넥터를 이용하여 조립 후 방사되는 빔 패턴을 실측하였다. 버틀러 매트릭스가 포함된 어레이 안테나의 이득은 표 2에 모의실험과 실측한 결과를 비교하여 정리하였으며, 3.7 GHz에서 모의실험의 경우 포트별 안테나 이득이 7.61~8.23 dB 수준이었고, 실측 결과는 7.12~7.53

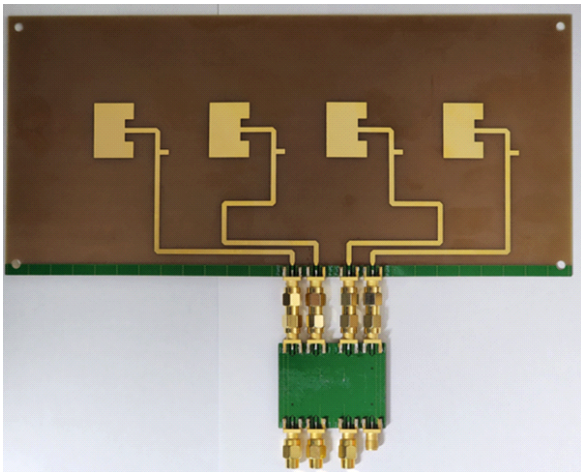


그림 12. 버틀러 매트릭스와 송신용 안테나 사진
Fig. 12. Top view of Butler and TX antenna assembled.

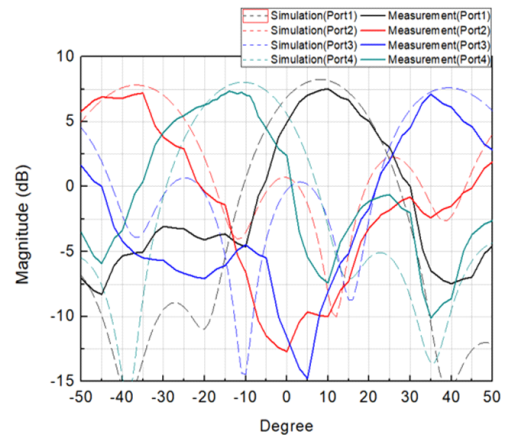
표 2. 포트별 안테나 이득 측정 결과
Table 2. Measurement of antenna gain each port.

Antenna gain (dB)	3.7 GHz		4 GHz	
	Simulation	Measurement	Simulation	Measurement
Port1	8.23	7.53	8.02	7.01
Port2	7.81	7.21	7.54	6.91
Port3	7.61	7.12	7.62	7.18
Port4	8.03	7.35	7.92	7.51

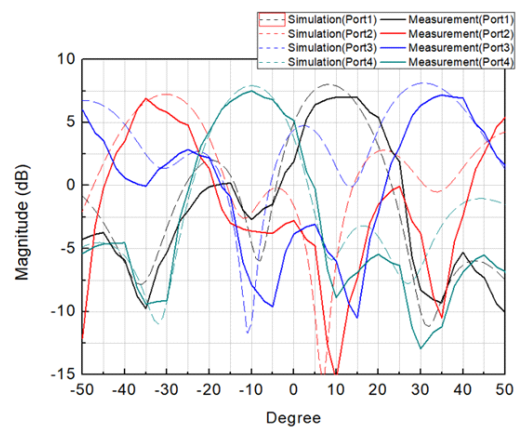
dB로 확인되었다. 4 GHz에서 모의실험은 포트별 안테나 이득이 7.54~8.02 dB 수준이었고 실측 결과는 6.91~7.51 dB로 측정되었다. 실측 결과의 경우, 보드 간 SMA 커넥터 연결 손실 0.7 dB를 감안하였을 때, 모의실험 결과와 유사한 안테나 이득값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 13(a) 및 그림 13(b)는 3.7 GHz, 4 GHz 주파수에서의 입력 포트에 따른 빔 조향 성능을 실측한 결과를 나타내었다.

해당 주파수 범위 안에서 포트 1은 $10.29^\circ \pm 1^\circ$, 포트 2는 $-32.41^\circ \pm 1.5^\circ$ 이며, 포트 3은 $32.41^\circ \pm 1.1^\circ$, 포트 4는 $-10.29^\circ \pm 2.5^\circ$ 이므로 최대 $\pm 2.5^\circ$ 미만의 오차 수준으로 이론상의 시뮬레이션 매우 근접한 실측 결과를 얻을 수 있



(a) 3.7 GHz



(b) 4 GHz

그림 13. 주파수별 빔 패턴 실측 결과
Fig. 13. Measurement of array beam pattern results.

표 3. 이전 관련 연구 결과들과 비교

Table 3. Performance comparison to the previous works.

Reference / year	Size (mm×mm)	Size ratio (%)	Insertion loss (dB)	Center frequency (GHz)	Bandwidth (%)
Ref. [6] / 2017	140×140	377	-7.7±1.2	2.4	8.3
Ref. [7] / 2017	190×240	407	-6.7±0.7	2.401	2.2
Ref. [8] / 2019	96×96	179	-7	2.42	8.3
Ref. [9] / 2019	170×170	560	-9.2±0.5	2.4	37.5
Ref. [10] / 2020	70×73.7	100	-7±2	3.5	15.7
This work	40×38.6	30	-7.5±1.3	3.85	40

었다.

표 3에 이전 연구들과의 성능 비교를 정리하였다. 기존 버틀러 매트릭스 논문 대비 개선된 성능을 확인하였고 특히 크기만 소형화하거나 대역폭만 향상된 것이 아닌 크기와 대역폭을 동시에 개선하였으며, 유사한 5G NR 3.5 GHz 주파수 조건에서 제작된 설계 대비 30 % 수준의 크기 감소 및 2.54배 수준의 대역폭 개선이 되었음을 확인하였다^[10].

V. 결 론

본 논문은 개선된 광대역 성능을 가지는 소형 4×4 버틀러 매트릭스 설계를 제안하여 이를 구현 및 실측하였다. 광대역 성능을 얻기 위해 broad-side 형태의 커플러를 적용하였으며, 소형화 설계를 위해 FR-4 4층 기판을 활용하여 strip line 기반으로 주요 회로들을 설계하였다. 제작된 버틀러 매트릭스의 크기는 40×38.6×1.2 mm³이며 기존 버틀러 매트릭스 구조 대비 30 % 수준의 크기 감소와 2.54배의 수준의 대역폭 향상을 이루었다^[6]. 상세 실측 결과, 5G NR(3~4.5 GHz)에서 구현 손실은 1.3~1.5 dB, 반사 손실은 15 dB 이상으로 측정되었고, 출력포트별 평균 위상차 성능은 이론값인 -45°, 135°, -135°, 45° 대비 ±3° 수준의 오차임을 확인하였다. 또한, 버틀러 매트릭스와 송신 안테나를 실장하여 실측한 빔 조향 성능의 경우 포트 1은 10.29°±1° 포트 2는 -32.41°±1.5°이며, 포트 3은 32.41°±1.1°, 포트 4는 -10.29°±2.5°이므로 최대 ±2.5° 미만의 오차 수준으로 시뮬레이션 이론상의 계산과 근접한 결과를 확인하였으며, 향후 5G NR 대역을 사용하는 광대

역 아날로그 빔포밍 시스템 소형화에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] I. A. Rumyantsev, A. S. Korotkov, "Survey on beam-forming techniques and integrated circuits for 5G systems," in *2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics(EExPolytech)*, St. Petersburg, Oct. 2019, pp. 76-80.
- [2] J. Lee, M. Seo, "A miniaturized 28 GHz 4-bit phase shifter in 65 nm LP CMOS for multi-channel 5-G radios," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, no. 2, pp. 381-385, Feb. 2019.
- [3] W. Roh, J. Y. Seol, J. H. Park, B. Lee, J. Lee, and Y. Kim, et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Communities & Collection*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, Feb. 2014.
- [4] S. Park, S. Kim, J. Sohn, and H. Shin, "Design of a 28 GHz switched beamforming antenna system based on 4×4 Butler matrix," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 10, pp. 876-884, Oct. 2015.
- [5] S. B. Cohn, "Characteristic impedances of broadside-coupled strip transmission lines," *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 8, no. 6, pp. 633-637, Nov. 1960.

- [6] H. N. Chu, T. G. Ma, "An extended 4×4 Butler matrix with enhanced beam controllability and widened spatial coverage," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 3, pp. 1301-1311, Mar. 2018.
- [7] N. V. Priyadarshan, A. Thenmozhi, "Beam forming network using 4×4 narrowband Butler matrix for tracking and localization applications," in *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems(ICICCS)*, Madurai, Jun. 2017, pp. 1241-1246.
- [8] G. A. Adamidis, I. O. Vardiambasis, M. P. Ioannidou, and T. N. Kapetanakis, "Design and implementation of single-layer 4×4 and 8×8 Butler matrices for multibeam antenna arrays," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, p. 1645281, Mar. 2019.
- [9] K. T. Chandrasekaran, N. Nasimuddin, A. Alphones, and M. F. Karim, "Compact circularly polarized beam-switching wireless power transfer system for ambient energy harvesting applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 1, p. e21642, Jan. 2019.
- [10] A. K. Vallappil, M. K. A. Rahim, B. A. Khawaja, and M. N. Iqbal, "Compact metamaterial based 4×4 Butler matrix with improved bandwidth for 5G applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 13573-13583, Jan. 2020.

정 진 영 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0007-8094-6670>



2015년 2월: 한동대학교 전자공학과 (공학사)
 2015년 1월~현재: 삼성전자 책임연구원
 2022년 3월~현재: 성균관대학교 DMC 공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF Transceiver, 안테나

김 병 성 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3084-6499>



1989년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 1997년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신대학 교수

[주 관심분야] RFIC 설계, RF 소자모델링