

논문 2017-54-1-2

버틀러 매트릭스 기반 28GHz 8-방향 스위칭 빔포밍 안테나 시스템 설계

(Design of a 28GHz 8-Directional Switched Beamforming
Antenna System Utilizing Butler Matrix)

신 성 진*, 신 현 철**

(Sungjin Shin and Hyunchol Shin[©])

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 5세대 이동통신을 위한 28GHz 대역 8-방향 스위치 빔포밍 안테나 시스템을 설계하였다. 전체 시스템은 8x8 버틀러 매트릭스와 8 배열 안테나로 구성되어있다. 8x8 버틀러 매트릭스의 입력 단을 스위칭 하여 얻은 8개의 출력을 배열 안테나에 인가하여 총 8 방향의 빔을 생성할 수 있다. 배열 안테나 입력의 위상 간격 변화에 따라 배열지수 (Array Factor)를 계산하여 빔의 방향성을 계산할 수 있다. 5G 시스템 목표인 $\pm 40^\circ$ 의 조향 범위를 만족시키기 위한 안테나 간격은 0.65λ 이다. 빔 조향 시뮬레이션 결과 버틀러 매트릭스 입력단에 따라 $\pm 6^\circ$, $\pm 17^\circ$, $\pm 28^\circ$, $\pm 40^\circ$ 의 총 8개의 방사 방향을 갖으며, 시스템의 전체 사이즈는 $55.8 \times 51.1 \text{mm}^2$ 이다. 또한, 마이크로스트립 선로에 의한 기생 방사 효과를 확인하여 스트립라인 구조의 버틀러 매트릭스로 구현하였다.

Abstract

In this paper, an 8-direction switched beamforming antenna system at 28GHz frequency band is described for 5th generation wireless communication. This system is composed of an 8x8 Butler matrix and an 8-element patch array antenna. The antenna system switches beams in 8-direction in the wide range of $\pm 40^\circ$. The antenna spacing is 0.65λ to achieve $\pm 40^\circ$ steering range. Designed results show that the 8-direction beams are placed at $\pm 6^\circ$, $\pm 17^\circ$, $\pm 28^\circ$, $\pm 40^\circ$ offset from the center. Parasitic radiation effect from the large dimension Butler matrix need to be suppressed by employing a stripline structure.

Keywords : Beamforming, Switched beamforming, Millimeter-wave, 5G, Radiation effect

* 학생회원, 광운대학교 전자공학과 (Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University Korea)

** 정회원, 광운대학교 전자공학과 (Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University Korea)

© Corresponding Author (E-mail : hshin@kw.ac.kr)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신방송 연구개발사업(14-911-01-001, 준밀리미터파 채널적응형 안테나 및 송수신기 개발)과 대학 ICT 연구센터육성 지원사업(IITP-2016-H8501-16-1010)의 연구결과로 수행되었음

Received ; September 13, 2016 Revised ; October 13, 2016

Accepted ; December 08, 2016

I. 서 론

5세대 이동통신에서 데이터 트래픽의 폭발적인 증가에 대응하기 위한 핵심기술로 제안되는 것이 밀리미터파 대역 빔포밍 송수신 기술이다^[1]. 빔포밍은 연속적 위상변위기를 이용한 연속형 빔포밍과 단속적 위상변위소자를 이용한 스위칭 빔포밍이 가능하다^[2-3]. 스위칭 빔포밍 시스템은 로트만 렌즈^[4] 또는 버틀러 매트릭스^[5] 등 각 출력 포트별 위상을 변화시킬 수 있는 소자를 이용하게 된다. 이 중에서 버틀러 매트릭스 소자 기반 스위칭 빔포밍 시스템은 연속형에 비해서 회로의 복잡도

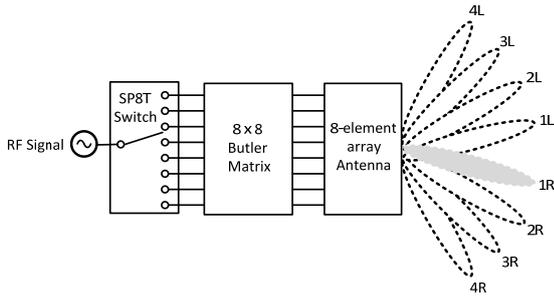


그림 1. 8방향 스위칭 빔포밍 안테나 시스템
Fig. 1. 8-direction switched beamforming antenna system.

가 낮고 회로 구현도 비교적 쉬운 장점이 있다. 이로 인해 버틀러 매트릭스 기반 스위칭 빔포밍 기술은 비교적 저가 저복잡도를 지향하는 빔포밍 시스템에서 많이 적용되고 있다.

본 연구에서는 밀리미터파 5G 이동통신에 응용하기 위한 스위칭 빔포밍 안테나 시스템을 설계하였다. 본 연구팀에서 기존에 발표한 2.4GHz 스위칭 빔포밍 안테나 설계^[6]는 주파수 대역이 낮아서 밀리미터파 5G 응용에 적합하지 않고, 28GHz 대역 5G 스위칭 빔포밍 안테나 시스템^[7]은 스캔범위가 $\pm 30^\circ$ 정도로 제한되고 4x4 버틀러 매트릭스를 이용하여서 4-방향 빔조향만 가능하였다. 하지만, 밀리미터파 5G의 소형셀 운용상황에서 통신 누락을 방지하고 통신 품질을 향상시키기 위해서는 빔포밍의 스캔 범위와 해상도를 향상 시키는 것이 필요하다. 우리는 이러한 요구에 맞게 $\pm 40^\circ$ 이상의 스캔범위와 8-방향의 빔조향이 가능한 8x8 버틀러 매트릭스 기반 스위칭 빔포밍 시스템을 설계하였다.

II. 설 계

그림 1은 8-방향 스위칭 빔포밍 안테나 시스템의 구조이다. 모뎀과 RF 트랜시버로부터 생성된 신호는 단일 입력 8중출력 (SP8T: Single-Pole Eight-Throw) 스위치를 통과하여 8x8 버틀러 매트릭스의 하나의 입력단자로 전달된다. 이때 선택된 입력단자에 따라 8개의 출력단자에 나타나는 신호간 위상차이가 달라진다. 이렇게 일정한 위상차를 갖는 8개의 신호는 8개의 배열안테나로 입력되어, 최종적으로 8개의 가능한 빔 중 하나의 빔으로 출력되게 된다. 본 연구에서 사용된 기판은 Rogers사의 RO3003 (유전율=3, 기판 높이=5mil)이고, Keysight사의 전자파해석 툴인 Momentum을 사용하여 설계했다.

우선 스위칭 빔포밍 안테나 시스템을 설계하기 위해

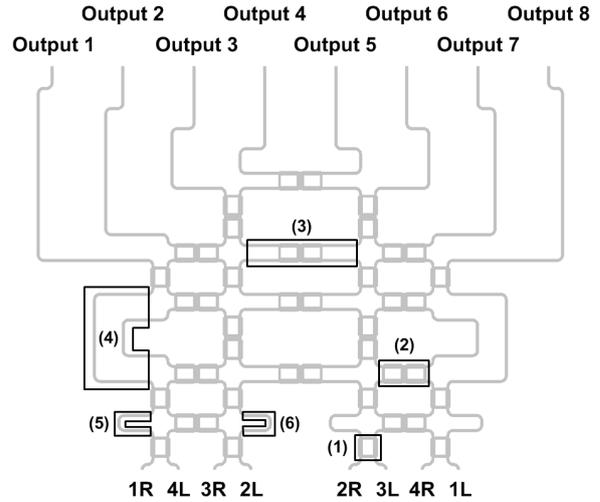


그림 2. 8x8 버틀러 매트릭스 구조
Fig. 2. 8x8 Butler matrix structure.

8개의 배열 안테나에 일정한 등간격의 위상차를 생성할 수 있는 8x8 버틀러 매트릭스가 필요하다. 그림 2는 8x8 버틀러 매트릭스의 구조이다. 그림에 주요 설계 문제를 (1)번부터 (6)번까지 표시하였다. (1)번 3dB 하이브리드 커플러는 총 4개의 단자로 구성되어 있으며 하나의 입력 단자, 두 개의 출력 단자 그리고 하나의 격리 (isolation) 단자로 구성되어 있다. 이 회로의 두 개의 출력신호는 입력신호 대비 3dB 작은 크기를 갖고 서로 90° 위상차이를 갖는 신호이다. 0dB 크로스 오버는 3dB 커플러와 마찬가지로 4개의 단자로 구성되어 있다. (2)와 (3)의 0dB 크로스오버는 좌우 각각의 입력신호에 대해 반대편 대각선 방향으로 출력이 전달되며 이때 감쇄는 없고 상대편 단자는 격리되는 특성을 갖는 회로이다. (3)번 회로의 경우 버틀러 매트릭스 구조상 중앙부의 간격이 필요해서 입출력 전송선로의 길이를 (2)에 비해 길게 만든 것이다. (4)-(6)은 위상천이기(Phase Shifter)로서 각각 45° , 67.5° , 그리고 22.5° 의 위상천이를 발생시키는 전송선로이다. 전자파해석을 통해 실제 위상천이 값은 45.03° , 67.47° , 22.54° 임을 확인할 수 있었다. 이렇게 설계된 버틀러 매트릭스는 입력신호가 인가되는 위치에 따라 8개의 출력신호의 상대적인 위상차이가 결정된다. 본 설계에 따르면 입력신호가 1R일 때 22.5° 차이, 2R일 때 67.5° 차이, 3R일 때 112.5° 차이, 4R일 때 157.5° 차이가 발생하며, 1L-4L에 대해서는 위상차이의 부호가 반전되게 된다. 이렇게 함으로써 8개의 출력단자에 일정한 위상 간격을 갖는 동일한 크기의 신호를 전달할 수 있게 된다.

위와 같이 버틀러 매트릭스 출력단자의 위상차이가

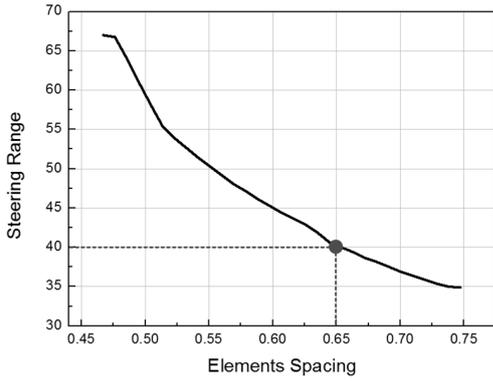


그림 3. 안테나 간격에 따른 빔 조향 범위
Fig. 3. Steering range through antenna spacing.

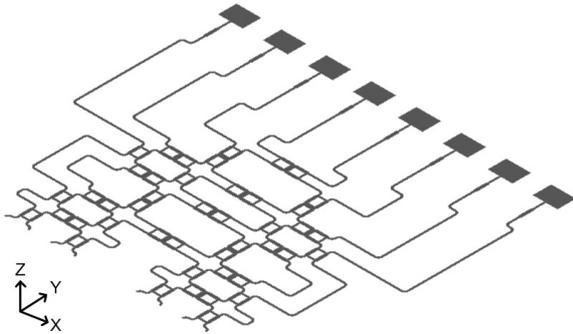
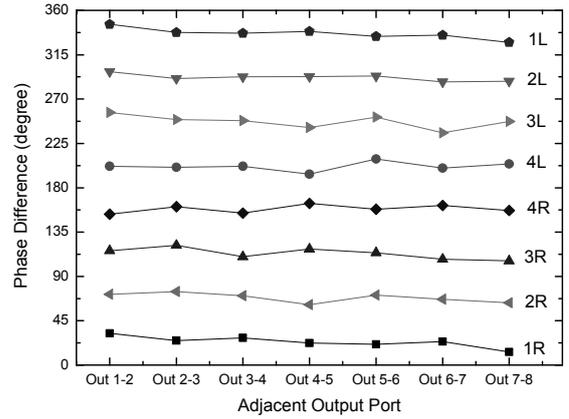


그림 4. 8x8 스위치 빔포밍 안테나 시스템의 배치도
Fig. 4. Layout of 8x8 switched beamforming antenna system.

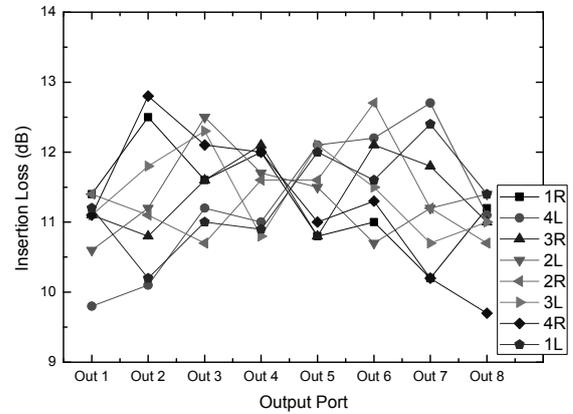
결정된 후 목표로 하는 빔조향 범위를 얻기 위해 배열 안테나의 간격을 결정한다. 다음 식은 배열안테나의 배열지수(Array Factor)를 표현한 식이다.

$$AF = \sum_{n=0}^7 A_n e^{jn\psi} \quad (1)$$

식 (1) 에서 A_n 은 각 배열 소자의 출력전력으로 본 설계에서는 동일하다. 그리고 ψ 는 안테나의 간격 및 입력신호의 위상으로 결정되는 값이다^[6]. 버틀러 매트릭스에 의해 발생하는 상대적인 위상차는 앞선 설계과정에서 이미 고정되었으므로, 본 단계에서는 배열안테나 사이의 간격을 조정하여 최종 설계 목표인 빔 조향 범위 $\pm 40^\circ$ 를 얻을 수 있도록 하였다. 버틀러 매트릭스 출력단자에서 최대 위상차 값인 157.5° 일 때 가장 외각에 빔이 형성되기 때문에 4R의 입력 단자를 이용하여 157.5° 위상차로 고정하고, 안테나의 간격을 조절하여 배열지수를 계산하였다. 이를 통하여 그림 3과 같은 안테나 간격 대비 빔 조향 범위의 관계를 구할 수 있다. 그림에서와 같이 목표 조향 범위를 $\pm 40^\circ$ 를 만족하는 안



(a)



(b)

그림 5. 버틀러 매트릭스 성능. (a) 인접 출력단자간의 위상차, (b) 삽입손실

Fig. 5. Butler Matrix performance. (a) Phase difference between adjacent output ports, (b) Insertion loss.

테나 간격은 0.65λ 임을 알 수 있다.

그림 4는 8x8 버틀러 매트릭스와 8-배열 패치 안테나를 연결한 8-방향 스위칭 빔포밍 안테나 시스템의 전체 구조이다. 전체 시스템의 크기는 $55.8 \times 55.1 \text{mm}^2$ 이고, 이중에서 버틀러 매트릭스의 크기는 $55.8 \times 42.3 \text{mm}^2$ 이다. 빔포밍 성능을 평가하기 위해 우선 버틀러 매트릭스 출력 신호의 위상과 삽입손실을 전자파해석을 통해 확인하였고, 그림 5에 그 결과를 보였다. 그림 5(a)는 8개의 입력 신호에 따른 인접 출력단자간의 위상 차이를 표시한 것이다. 입력이 1R/2R/3R/4R/4L/3L/2L/1L 일 때 위상차의 평균값은 23.5/68.4/113.2/158.4/201.6/247.0/291.9/336.4도이고, RMS 오차는 14.4/11.9/14.1/9.7/11.3/16.7/8.6/13.5도이다. 평균값 기준으로 이상적인 목표 값과의 오차는 1/0.9/0.7/0.9/0.9/0.5/0.6/1.1도임을 확인하였다.

그림 5(b)는 출력단자의 삽입손실이다. 최소 9.7 dB에서 최대 12.8 dB임을 확인하였다. 이상적인 경우에 9

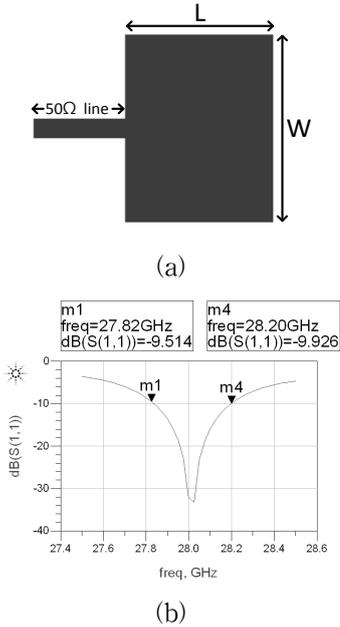


그림 6. 단일 패치 안테나. (a) 배치도, (b) 반사손실
Fig. 6. Single patch antenna. (a) Layout, (b) Return loss.

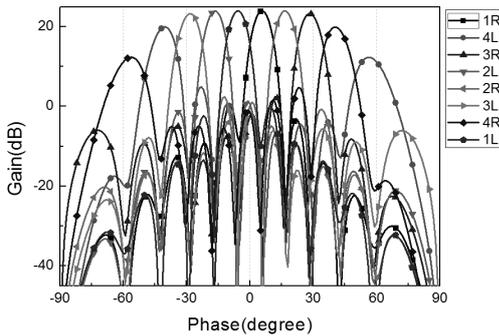


그림 7. 8x8 스위칭 빔포밍 안테나 시스템의 2-D 빔 패턴
Fig. 7. 2-D beam pattern of 8x8 switched beamforming antenna system.

dB의 삽입손실을 갖게 되는 구조이므로 최대 3.8 dB의 추가적인 삽입손실이 발생한 것을 확인하였다.

버틀러 매트릭스에 연결할 단일 패치 안테나를 설계하고 특성을 확인하였다. 안테나의 동작 중심주파수는 28GHz이며 대역폭 300MHz 이상이 되도록 설계하였다. 아래 식들은 안테나 설계에 사용된 기본 이론식이다^[7-8].

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

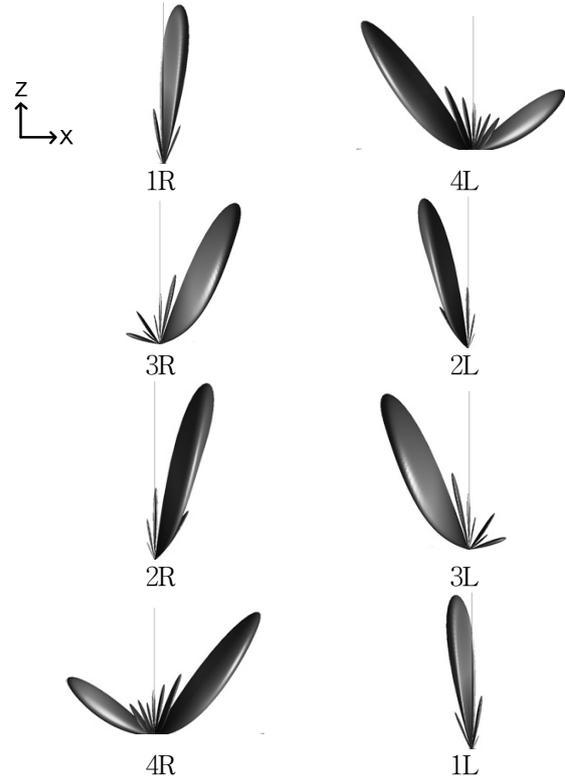


그림 8. 8x8 스위칭 빔포밍 안테나 시스템의 3-D 빔 패턴
Fig. 8. 3-D beam pattern of 8x8 switched beamforming antenna system.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (4)$$

$$L = \frac{c_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (5)$$

위의 식에서 W는 안테나의 폭, L은 안테나의 길이, h는 기판의 높이, c는 빛의 속도, f_r 은 동작주파수, ϵ_r 은 유전율, ϵ_{reff} 는 유효 유전율을 나타낸다. 설계하려는 기판의 유전율과 높이 그리고 목표 주파수가 정해지면 식(2)를 이용하여 안테나의 폭(W)을 구한다. 다음 ΔL 값을 식(3) - 식(4)을 통해 구하고, 그 결과와 식(5)를 바탕으로 L을 구할 수 있다. 위 계산을 통해 얻어진 패치 안테나의 크기는 $3.785 \times 2.823 \text{ mm}^2$ 이다. 그림 6은 설계된 안테나의 형상과 반사손실 시뮬레이션 결과이다. 안테나의 대역폭은 27.82GHz에서 28.20GHz까지 380MHz를 얻었음을 확인하였다.

이렇게 설계된 안테나와 버틀러 매트릭스를 포함한 전체 시스템의 방사패턴을 확인하였다. 그 결과는 그림 7과 같다. 입력에 따라 $6^\circ, -40^\circ, 28^\circ, -17^\circ, 17^\circ, -28^\circ, 40^\circ,$

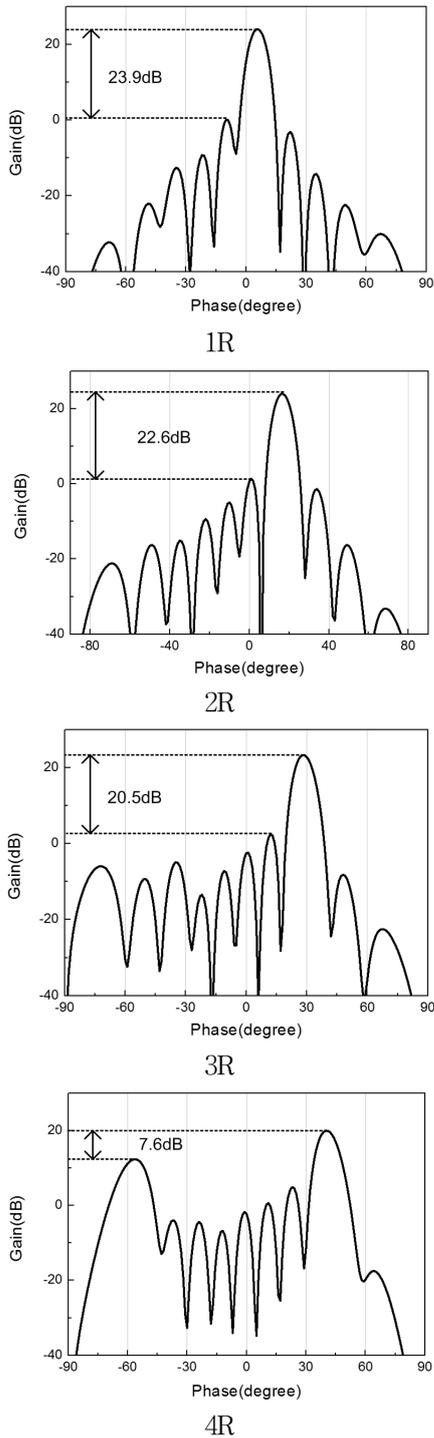


그림 9. 1R, 2R, 3R, 4R의 사이드로브 레벨
Fig. 9. Sidelobe levels of 1R, 2R, 3R, 4R.

-6°의 방사방향을 갖는 것을 확인할 수 있다. 좀 더 정확한 방사패턴을 확인하기 위해 3차원 방사패턴 확인하였다. 그림 8은 3차원 방사패턴의 시뮬레이션 결과이다. 그림 7과 그림 8에서 보듯이, 버틀러 매트릭스의 출력 위상 오차가 최대 1.1° 이고 전력오차 3.8dB 인 상태에서도 실제 빔 방사 조향은 설계 목표인 $\pm 40^\circ$ 를 얻을 수

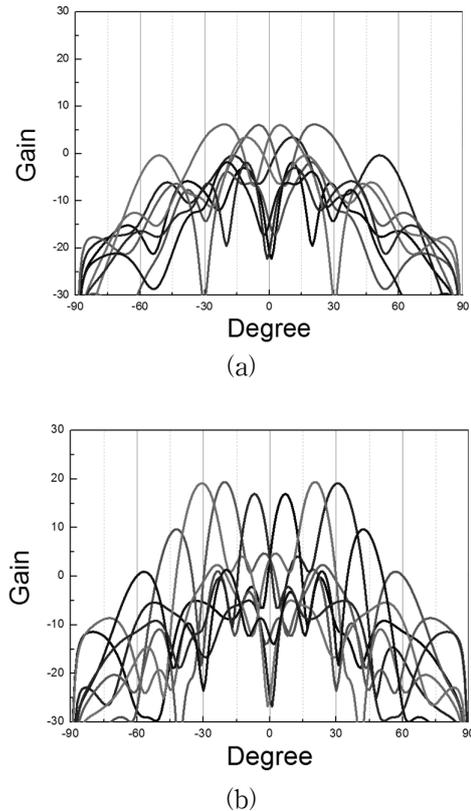
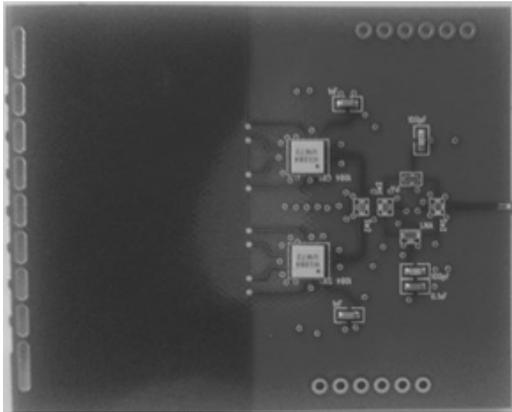


그림 10. (a) 8×8 버틀러 매트릭스의 방사 빔 패턴과 (b) 버틀러 매트릭스와 안테나 전체 통합 시스템의 2차원 빔 패턴

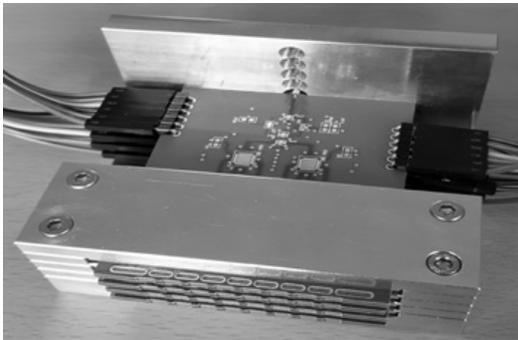
Fig. 10. 2-D beam pattern of (a) 8x8 butler matrix and (b) total system including array antenna and Butler matrix.

있었다.

빔포밍 시스템에서 원하는 방향으로 빔을 형성할 때 메인 빔 외에 다른 방향으로 추가적인 부수적인 빔들이 발생한다. 부수적인 빔 중에서 가장 큰 빔을 사이드로브라 한다. 사이드로브 레벨 (Sidelobe Level)은 빔포밍 시스템에서 빔의 형성이 얼마나 제한적으로 잘되었는지 말해주는 지표로 이 값이 좋을수록 바람직하다. 그림 9는 1R, 2R, 3R, 4R의 방사패턴을 각각 보여주고 있고, 이를 보면 4R의 빔 형성이 다른 빔 형성에 비해 사이드로브 레벨이 가장 안 좋다는 것을 알 수 있다. 그림 9에서 보듯이 1R, 2R, 3R의 사이드로브 레벨은 20.5 dB - 23.9 dB의 값을 갖는다. 하지만 4R의 사이드로브 레벨은 7.6dB로 1R-3R의 사이드로브 레벨에 비해 상대적으로 낮은 값을 보인다. 상대적으로 낮은 값을 갖는 4R의 사이드로브 레벨을 높이기 위해선 버틀러 매트릭스 8개의 출력단에 감쇄기를 연결시켜 신호의 크기에 Gradient를 주는 방법을 채택하는 등 추가적인 설계가 필요하다 [9~10].



(a)



(b)

그림 11. (a) 스트립라인 구조 버틀러 매트릭스 기반 빔포밍 1×8 배열 안테나 시스템. (b) 4×8 배열 안테나 기반 3차원 빔포밍 시스템 구현 사진

Fig. 11. (a) 1×8 array antenna system using stripline Butler matrix. (b) 3-dimensions beamforming system using 4×8 array antenna.

그림 4에서 보면 버틀러 매트릭스의 크기는 패치 안테나보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 전자파 신호가 이와 같이 큰 버틀러 매트릭스라는 구조물을 통과하면서 버틀러 매트릭스 자체를 통한 원하지 않는 기생 방사(Parasitic Radiation)도 전체 빔 방사 패턴에 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 기생방사를 전자파 해석 툴을 이용하여 확인하였다. 그림 10(a)는 버틀러 매트릭스를 마이크로 스트립라인 구조로 구성하였을 때 버틀러 매트릭스 자체에 의해서 방사되는 빔 패턴을 시뮬레이션 한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 안테나 보다 낮은 수준이긴 하지만 약 5-6 dB정도의 이득으로 빔이 방사됨을 알 수 있다. 다음으로 마이크로 스트립 구조의 버틀러 매트릭스와 배열 안테나를 통합하여 빔 방사 패턴을 시뮬레이션 했을 때의 빔 패턴 그림 10(b)에 나타내었다. 그림 7과 비교했을 때 기생방사 효과로 인해 사이드로브레벨이 높아졌음을 확인할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 스트립라인 구조로 버틀러 매트릭스를 설

계하여 버틀러 매트릭스는 기판 속에 한정하고 안테나만 노출시키는 구조가 되어야 할 것이다^[11]. 스트립라인 구조 기반 버틀러 매트릭스를 적용했을 때의 전체 시스템의 방사패턴은, 그림 10(a)와 같은 버틀러 매트릭스로부터 발생하는 기생방사효과가 사라지게 되므로, 그림 6-8에 제시된 결과를 동일하게 따를 것이다.

그림 11은 스트립라인 구조 기반 버틀러매트릭스를 적용한 스위칭 빔포밍 회로를 실제 구현한 사진이다. 보드의 크기는 61x50 mm²이다. 버틀러 매트릭스가 스트립라인 구조로 제작되어 외부로는 보이지 않는다. 우측에 추가된 회로는 스위치 부품이다. 본 연구에서는 이렇게 제작된 1×8 배열안테나 기반 2차원 빔포밍 시스템을 4층으로 쌓아서 4×8 배열안테나 구조로 까지 제작하였다. 이를 통해서 3차원 빔포밍이 가능하게 된다. 본 연구에서 설계된 빔포밍 시스템의 실제 방사패턴 측정을 위해서는 주변의 구동회로가 적절히 추가 구성되어야 한다. 향후 이에 대한 추가 연구를 진행하여 측정을 진행할 예정이다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 8-방향 빔포밍 안테나 시스템의 성능을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문은 밀리미터파 5세대 이동통신을 위한 스위치 28GHz 대역 스위칭 빔포밍 안테나 시스템을 구현하였다. 빔포밍 시스템은 8×8 버틀러 매트릭스와 8-배열 안테나로 구성하였다. 8×8 버틀러 매트릭스의 입력단을 스위칭하여 얻은 8개의 출력을 배열 안테나의 입력으로 하여 총 8-방향의 빔을 생성할 수 있고, 배열 안테나 입력의 위상 간격과 배열지수를 통해 빔의 방향성을 계산할 수 있다. 목표로 한 ±40°의 조향 범위를 만족시키기 위한 안테나 간격은 0.65λ이다. 빔 조향 시뮬레이션 결과 입력단에 대해 ±6°, ±17°, ±28°, ±40°의 총 8개의 방사 방향을 갖는다. 본 논문의 결과 값은 8x8 버틀러 매트릭스의 입력 신호 1R/2R/3R/4R/4L /3L/2L/1L 일 때, 위상차의 평균값은 23.5°/68.4°/113.2°/158.4°/201.6°/247.0°/291.9°/336.4°이고, RMS 오차는 14.4/11.9/14.1/9.7/11.3/16.7/8.6/13.5 이다. 이 시스템의 전체 사이즈는 55.8×51.1mm²이다. 또한, 마이크로스트립 선로에 의한 기생 방사 효과를 확인하여 스트립라인 구조의 버틀러 매트릭스로 구현하였다.

REFERENCES

- [1] W. Roh, J. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, and K. Cheun, "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, Feb. 2014.
- [2] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems", IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, Jun. 2011.
- [3] H. Shin, "Overview of millimeter-wave beamforming technology development for 5G", Proc. of IEIE Summer Conference, pp. 2027-2028, Jun. 2014.
- [4] I. Kim, C. Ahn and S. Oh "Design and implementation of beam steering system based on rotaman lens and its real-time display device of beam receiving" Journal of the Institute of Electronics and Information Engineering, vol. 53, no. 5, pp. 683-692, May. 2016.
- [5] C. Chang, R. Lee and T. Shih, "Design of a beam switching/steering butler matrix for phased array system", IEEE Trans. Antennas Propag, vol. 58, no. 2, pp. 367-374, Dec. 2009.
- [6] S. Park, S. Kim, J. Sohn, H. Shin, "Design of 2.4 GHz 4x4 array antenna system for switched beamforming", Proc. of IEIE Summer Conference, pp. 434-435, Jun. 2015.
- [7] S. Park, S. Kim, J. Sohn, H. Shin, "Design of a 28 GHz switched beamforming antenna system based on 4x4 Butler matrix", Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 26, no. 10, pp. 876-884, Oct. 2015.
- [8] W. L. Stuzman and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, 3rd edition, John Wiley and Sons, 2012.
- [9] G. Jain, R. Kumar and J. Ghosh, "Design of low sidelobe microstrip antenna array", IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 57-60, May-Jun. 2014.
- [10] M. Dessouky, H. Sharshar and Y. Albagory., "Efficient sidelobe reduction technique for small-sized concentric circular arrays", Progress In Electromagnetics Research, PIER 65, pp. 187-200, 2006.
- [11] J. Coonrod and R. Corporation, "The effect of radiation losses on high frequency PCB performance", in Proc. IPC APEX EXPO Conference, Mar. 2014.

저 자 소 개



신 성 진(학생회원)
2015년 광운대학교 전파공학과 학사 졸업
2015년~현재 광운대학교 석사 과정 재학 중
<주관심분야: Beamforming System, CMOS RF/Analog Circuit>



신 현 철(정회원)
1991년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학사
1993년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사
1998년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
1997년 4월~1997년 10월 독일 DaimlerBenz Research Center 연구원
1998년 1월~2000년 삼성전자 System LSI 선임 연구원
2000년 4월~2002년 4월 미국 UCLA 박사 후 연구원
2002년 5월~2003년 8월 미국 Qualcomm 선임 연구원
2010년 8월~2011년 8월 미국 Qualcomm Corporate R&D Visiting Faculty
2003년~현재 광운대학교 전파공학과/전자융합공학과 교수
<주관심분야: RF/Analog/Microwave Integrated Circuits and Systems>