

4×4 버틀러 매트릭스 기반 28 GHz 스위치 빔포밍 안테나 시스템 설계

Design of a 28 GHz Switched Beamforming Antenna System Based on 4×4 Butler Matrix

박성춘 · 김승현 · 손지훈 · 신현철

Seongchun Park · Seunghyeon Kim · Jihoon Sohn · Hyunchol Shin

요 약

본 논문에서는 5세대 이동통신을 위한 28 GHz 주파수 대역에서 스위치 빔포밍 안테나 시스템을 설계하였다. 본 빔포밍 시스템은 버틀러 매트릭스를 사용하였으며, 이는 다른 4 방향의 빔 조향을 할 수 있도록 각 출력단에 등간격의 위상을 생성한다. 배열 안테나는 28 GHz 주파수 대역에서 원하는 4개의 방향으로 조향할 수 있도록 설계하였다. 설계한 버틀러 매트릭스는 커플러와 지연선으로 구성되며, 그 동작에 대하여 설명하였다. 본 안테나 시스템은 유전율이 3이고, 5 mil의 높이를 가진 RO3003 기판을 이용하여 설계하였다. 설계한 버틀러 매트릭스의 사이즈는 20.3×13.0 mm²이고, 배열 안테나의 사이즈는 21.2×19.9 mm²이다. 본 시스템은 -34°~+33°까지 조향을 할 수 있고, Sidelobe level(SLL)의 최소값은 12.9 dB이다.

Abstract

In this paper, a switched beamforming antenna system at 28 GHz frequency band is described for 5th generation wireless communication. The butler matrix is used as a beamforming system and it produces linear spaced phase difference at four output ports. Array antenna is designed that can be steered in desired 4 different directions 28 GHz frequency band. Operation of designed butler matrix that composed of couplers and feedline is explained. The antenna system is designed in RO3003 substrate that has a height of 5 mil and dielectric constant of 3. The size of butler matrix is 20.3×13.0 mm² and size of array antenna is 21.2×19.9 mm². This system can be steered from -34° to 33° and minimum sidelobe level is 12.9 dB.

Key words: Beamforming, Switched-Beamforming, Millimeter-Wave, Butler Matrix, Array Antenna

I. 서 론

이동통신 데이터 트래픽의 폭발적인 증가로 인하여 사용자당 데이터 전송률을 극대화 시킬 수 있는 소형 셀에 대한 대비가 매우 중요하며, 이러한 5세대 이동통신 핵심 기술로 제안되는 것이 밀리미터파 빔포밍 기술이다^[1]. 밀

리미터파 주파수 대역 후보로는 28, 38 GHz, 또는 그 이상의 주파수 대역 사용에 대해 현재 논의 중이며, 이 중 28 GHz 대역이 기존 통신과의 간섭이 작고, 전파전파 감쇄가 낮아 유력한 후보 주파수로 고려되고 있다^[2]. 빔포밍을 구현하는 방법으로는 크게 디지털 빔포밍과 RF 빔포밍 방식이 있는데, 디지털 빔포밍 방식은 RF 송수신기

「본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신방송연구개발사업(14-911-01-001)의 지원으로 수행되었음.」

광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received July 10, 2015 ; Revised September 23, 2015 ; Accepted October 2, 2015. (ID No. 20150710-10S)

· Corresponding Author: Hyunchol Shin (e-mail: hshin@kw.ac.kr)

및 ADC/DAC가 많이 필요해서 시스템의 복잡도가 높아지고 전력소모가 큰 단점이 있다^[3]. RF 빔포밍 기술은 디지털 빔포밍 기술에 비해 복잡도가 낮아 빔포밍 시스템 설계에 유리하다. 한편, RF 빔포밍 방식에는 위상배열 기반 빔포밍과 스위치 빔포밍 방식이 있는데, 위상배열 기반의 빔포밍은 출력단에 진폭과 위상을 변화시켜 빔포밍하는 방식으로 N 개의 안테나 element에 N 개 이상의 위상 천이기가 필요하며, 각각 감쇄기를 이용하여 설계되어진다. 스위치 빔포밍 방식은 출력단 진폭의 변화 없이 빔포밍 회로를 구현하여 출력의 위상만 변화시키는 구조로 위상배열방식에 비해 시스템의 이해가 쉽고, 구현비용 측면에서도 이점이 있다. 이러한 장점들로 인해 스위칭 빔포밍 기술을 많은 빔포밍 시스템에서 이용하고 있다^{[4]~[7]}.

본 연구에서는 밀리미터파 대역에서 시스템이 간단하고, 구현비용이 적은 시스템으로서, 28 GHz 스위치 빔포밍 안테나 시스템을 설계하였다.

II. 스위치 빔포밍 안테나 시스템 설계

본 논문에서 설계한 스위치 빔포밍 안테나 시스템은 4×4 버틀러 매트릭스 기반으로 구현하였고, 배열 안테나는 패치 안테나로 구현하였다^[8]. 버틀러 매트릭스는 각각 다른 위상을 갖는 출력을 생성하고, 이 출력을 배열 안테나로 입력한다. 안테나의 방사 패턴은 앞서 입력한 신호들의 위상에 따라 그림 1과 같이 각기 다른 방향의 빔을 만들어 낼 수 있다.

2-1 배열 안테나

안테나의 동작주파수는 목표 주파수인 28 GHz에서 중심주파수를 가지며, 대역폭 300 MHz 이상이 되도록 설계

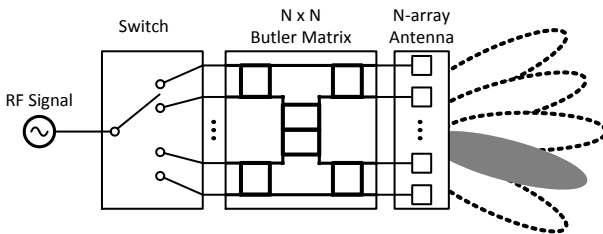


그림 1. N-스위치 빔포밍 시스템의 구성
Fig. 1. Structure of N-switched beamforming system.

가 필요하다. 이때 안테나의 대역폭은 Input return loss가 -10 dB 이하가 되는 영역으로 보았다. 본 설계는 Rogers사의 RO3003 기판을 기반으로 단층으로 설계하였으며, 본 기판의 유전율(ϵ_r) 값은 3이고, 기판의 높이(h)는 5 mil이다. 아래 식들은 안테나 설계에 사용된 기본 이론식들이다.

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

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

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \tag{3}$$

$$L = \frac{c_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \tag{4}$$

위의 식에서 W 는 안테나의 폭, L 은 안테나의 길이, h 는 기판의 높이, c 는 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 (1)을 통해 안테나의 폭(W)을 구한다. 기판 정보 및 주파수로 인해 안테나 사이즈에 영향을 주는 값을 식 (2)~식 (3)을 통해 구하고, 그 결과와 식 (4)를 바탕으로 L 을 구할 수 있다^[9]. 위 계산을 통해 얻어진 패치 안테나의 사이즈는 3.785×2.823 mm²이다. 그림 3은 설계된 안테나의 S-parameter 시뮬레이션 결과이다. 안테나의 대역폭은 27.82 GHz에서 28.20 GHz까지 380 MHz이고, 반사손실이 28 GHz에서 최소값을 가지도록 설계됨을 확인하였다.

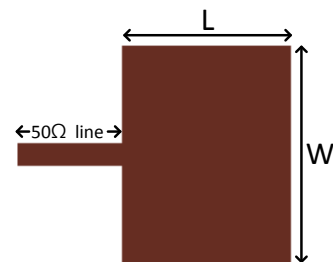


그림 2. 단일 패치 안테나의 배치도
Fig. 2. Layout of single patch antenna.

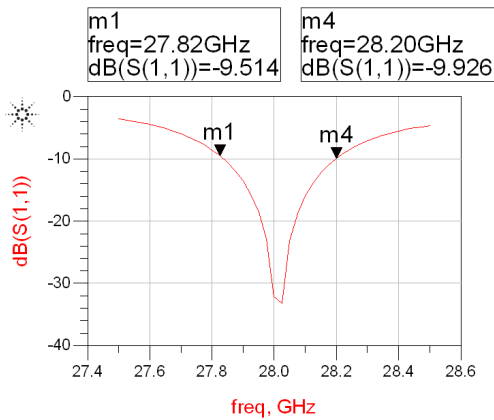


그림 3. 단일 패치 안테나의 반사손실
Fig. 3. Input return loss of single patch antenna.

1×4 배열안테나에 배열된 안테나는 앞서 설계한 단일 패치 안테나보다 높은 이득을 얻기 위해 단일 패치 안테나를 4중으로 연결한 4중 직렬 연결 안테나(4-element series-fed array)로 설계하였으며, 이 안테나를 출력단자가 4개인 버틀러 매트릭스에 연결하여 빔 조향을 하기 위해 $\lambda/2$ 의 간격을 갖게 1×4로 배열하여 설계하였다^{[10],[11]}. 이를 기반으로 1×4 배열 안테나는 그림 4와 같이 설계할 수 있으며, 전체 사이즈는 21.2×19.9 mm²이다. 그림 5의 시뮬레이션을 통해 본 설계한 4중 직렬 연결 안테나의 반사손실 특성은 그림 3의 단일 패치 안테나의 특성과 거의 동일함을 알 수 있다.

2-2 버틀러 매트릭스

앞서 설계된 4×4 배열 안테나를 조절하기 위한 빔포밍

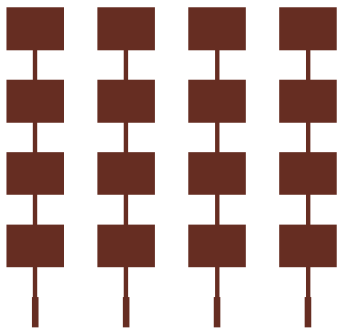


그림 4. 1×4 배열 안테나의 배치도
Fig. 4. Layout of 1×4 array antenna.

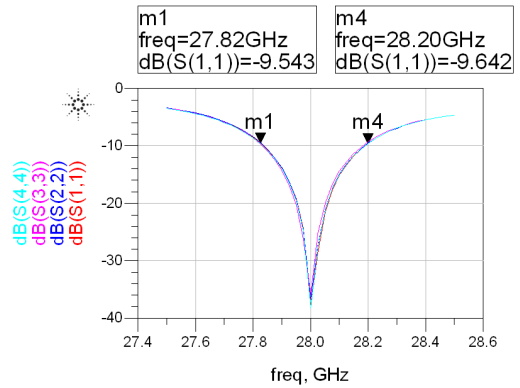


그림 5. 4중 직렬 연결 안테나의 반사손실
Fig. 5. Input return loss of 4-element series-fed array.

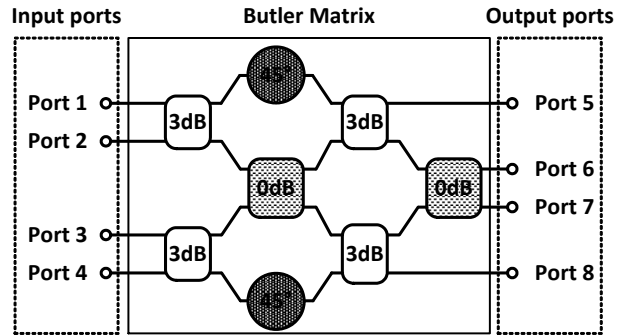


그림 6. 버틀러 매트릭스의 구성도
Fig. 6. Block diagram of butler matrix.

회로인 버틀러 매트릭스는 4×4 구조로 설계되었다. 버틀러 매트릭스는 그림 6과 같이 2개의 0-dB, 4개의 3-dB 커플러(coupler)와 45°의 위상차를 갖는 지연선으로 구성되어 있다.

설계에 사용된 3-dB 커플러는 총 4개의 단으로 구성되어 있으며, 하나의 입력단자와 2개의 출력단자 그리고 하나의 Isolation 단자로 구성되어 있다. 출력은 입력 대비 3-dB 만큼 감쇄되어 두 개의 출력에 각각 인가되며, 두 출력의 위상은 90°의 차이를 갖게 설계되었다. 그림 7~9를 통해 설계한 3-dB 커플러의 배치도, S-parameter 값과 위상차를 볼 수 있다. 그림 8의 시뮬레이션 결과, 출력단에서 -2.95 dB만큼 감쇄가 일어나고, Isolation은 24.0 GHz에서 33.6 GHz 주파수 영역 안에서 -10 dB 이하의 값을 갖고, 목표 주파수에서 최소값을 갖게 되기에 충분

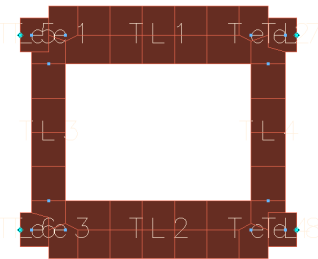


그림 7. 3-dB 커플러의 배치도
Fig. 7. Layout of 3-dB coupler.

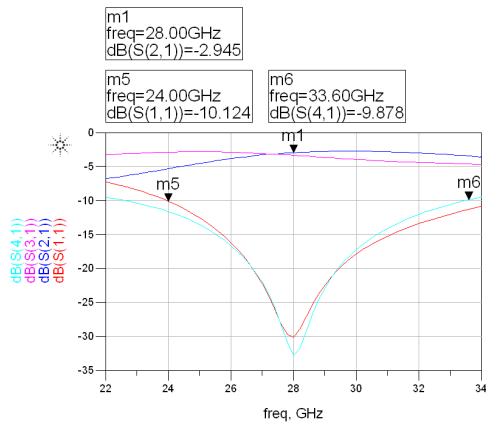


그림 8. 3-dB 커플러의 S-파라미터
Fig. 8. S-parameter of 3-dB coupler.

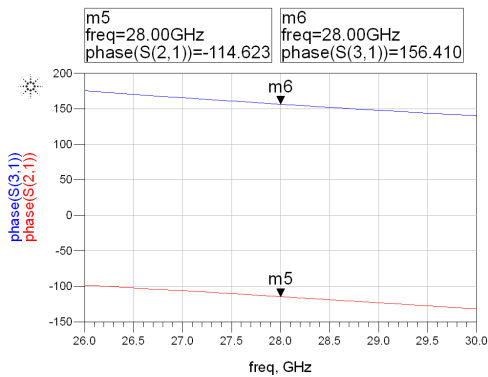


그림 9. 3-dB 커플러의 위상차
Fig. 9. Phase difference of 3-dB coupler.

히 Isolation 되었다고 볼 수 있다. 또, 그림 9의 시뮬레이션을 통해 두 출력간의 위상차가 88.97°인 것을 확인할 수 있다.

0-dB 커플러는 3-dB 커플러 2개를 붙여놓은 모습으로 마찬가지로 총 4개의 단자로 구성되어 있지만, 그림 10과 같이 3-dB 커플러와 달리 하나의 입력단자와 하나의 출력단자 그리고 2개의 Isolation 단자로 구성되어 있다^{[12]~[14]}. 그림 10의 배치도를 보면 0-dB 커플러는 3-dB 커플러와 같이 2개의 출력단자가 존재하지만, 한 출력단자는 커플러를 통과하면서 위상이 180° 변화하여 상쇄되어 Isolation 단자가 되고, 다른 한 출력단자는 파워의 감쇄가 없는 출력단이 된다. 출력단자는 배치도상에서 입력단자의 대각선에 존재하는 단자이다. 그림 11의 시뮬레이션 결과, 출력단에서 -0.2 dB만큼 감쇄가 일어나고, Isolation 은 26.0 GHz에서 33.0 GHz 주파수 영역 안에서 -10 dB 이하의 값을 갖고, 목표 주파수에서 최소값을 갖게 되기에 충분히 Isolation 되었다고 볼 수 있다.

앞서 설계된 커플러와 지연선로를 통해 그림 12와 같

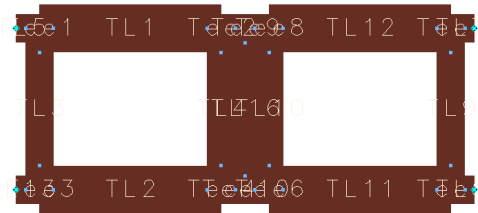


그림 10. 0-dB 커플러의 배치도
Fig. 10. Layout of 0-dB coupler.

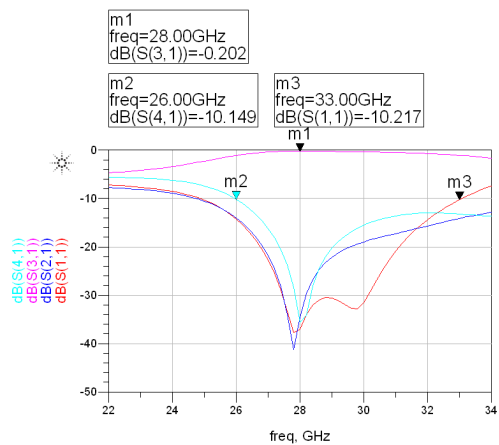


그림 11. 0-dB 커플러의 S-파라미터
Fig. 11. S-parameter of 0-dB coupler.

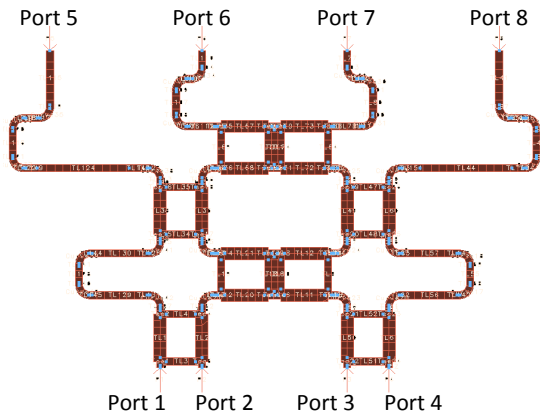


그림 12. 버틀러 매트릭스의 배치도
Fig. 12. Layout of Butler matrix.

이 버틀러 매트릭스를 구성할 수 있다. 설계된 버틀러 매트릭스의 이론적 결과는 다음과 같다. 4×4 버틀러 매트릭스의 두 입력 port 1, 4에 입력을 인가하고, 출력단에서 보았을 때 각 출력간의 위상차가 ±45° 간격의 결과를 얻을 수 있고, 입력 port 2, 3에 입력을 인가하고, 출력단에서 보았을 때 위상이 ±135° 간격으로 결과가 나온다. 설계된 버틀러 매트릭스의 전체 사이즈는 20.3×13.0 mm²이다.

그림 13은 각 입력단자를 기준으로 4개의 출력단자에서의 위상값을 시뮬레이션한 것이다. 즉, 입력단자를 1번부터 4번까지 변화시키면서, 4개의 출력단자에 나타나는 위상을 시뮬레이션한 것이다. 이때 신호가 인가되지 않는 입력단자는 50 ohm 매칭을 하였다, 그림 13의 결과에서 28 GHz에서의 값들을 표 1에 정리하였다. 표 1의 Ideal Gap은 이상적인 상황에서 출력단자 간의 위상 차이를 나타낸 것이다. 실제 시뮬레이션 결과 값에서의 Gap을 Ideal Gap과 비교하면 최대 7%의 오차 내에서 일치함을 알 수 있다. 이 일정한 위상 간격을 갖는 출력단의 위상값의 차

표 1. 출력단의 위상

Table 1. Phases of output ports.

	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Ideal Gap
Port 1	139.3°	94°	46.7°	0°	-45°
Port 2	46.5°	-173.4°	-33.4°	92.1°	+135°
Port 3	90.7°	-34.8°	-174.2°	46°	-135°
Port 4	-0.1°	46.8°	94.6°	139.9°	+45°

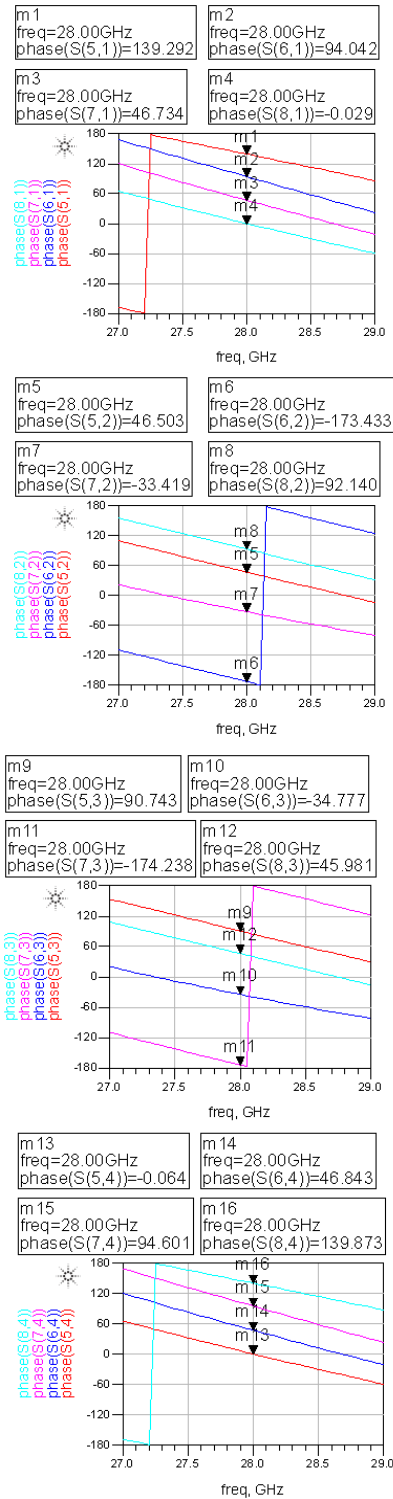


그림 13. 출력단의 위상
Fig. 13. Phases of output ports.

이는 Array factor를 통하여 계산하면 빔의 방향성을 알아 낼 수 있다¹⁵⁾. 위상의 이상적 간격을 통해 계산된 빔의 방향은 $\pm 42^\circ$, $\pm 13^\circ$ 이며, 설계된 안테나 시스템의 빔의 방향은 $\pm 15^\circ$, $+33^\circ$, -34° 의 빔을 생성한다. 설계된 시스템은 출력단 위상의 이상적 간격과 오차가 있어 빔의 방향에서도 오차가 발생하였다.

2-3 전체 시스템

앞서 설계한 1×4 배열 안테나와 4×4 버틀러 매트릭스를 통해 전체 시스템을 설계할 수 있다. 그림 14는 스위치 빔포밍 안테나 시스템 전체 시스템 배치도이고, 전체 사이즈는 $36.2 \times 20.6 \text{ mm}^2$ 이다.

버틀러 매트릭스의 입력단을 스위칭하여 동작시키면 표 2의 제시된 방향으로 빔 조향이 되며, 그림 15과 같이 빔의 조향을 확인할 수 있다. 그림 15의 결과는 ADS Momentum EM 시뮬레이터를 이용하여 얻은 결과이다. 그림 15에서 Port 1, 4로 인해 생성되는 빔의 출력이 상대적으로 낮은 값을 갖게 나왔다. 이는 그림 12에 보이는 출력단자들에 연결된 지연선로 손실들의 차이 값으로 인해 그림 15와 같이 빔의 출력 차이를 발생시켰다. 이를 확인하기 위해 버틀러 매트릭스의 입력단에 대한 출력단에서의 출력을 확인하는 그림 16 S-파라미터 시뮬레이션을 하

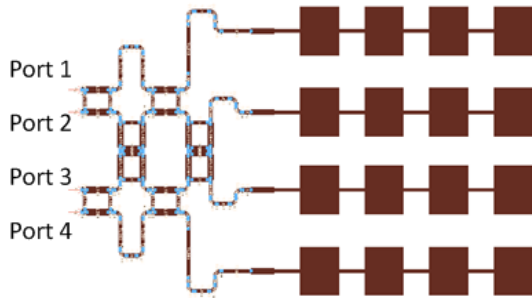


그림 14. 전체 시스템 배치도
Fig. 14. Layout of total system.

표 2. 입력단에 따른 빔의 방향성
Table 2. Direction of beam according to input ports.

Input port	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
Direction	15°	-34°	33°	-15°

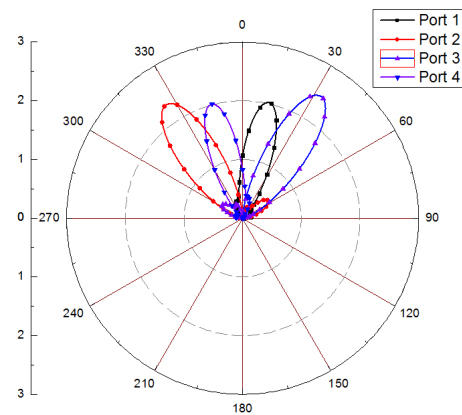
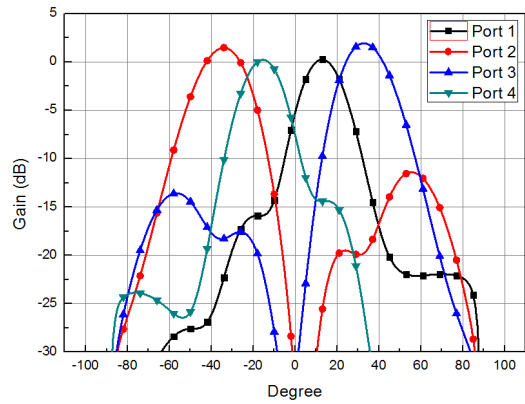


그림 15. 각 입력에 대한 빔의 방향
Fig. 15. Beam direction about each inputs.

였다. 시뮬레이션 결과, 각 출력단자에 전달된 출력의 차이를 통해 지연선로에 의한 손실을 알 수 있다. Port 2, 3에 대한 출력단에서의 지연선로로 인한 손실로 출력단의 출력이 -7.1 dB 에서 -6.6 dB 의 최대 0.5 dB 의 차이를 갖고, Port 1, 4에 대한 출력단에서의 지연선로로 인한 손실로 출력단의 출력이 -7.5 dB 에서 -6.5 dB 의 최대 1.0 dB 의 차이를 가졌다. 이러한 차이는 그림 15의 4가지 빔의 크기 차이를 발생시켰다. 시뮬레이션 결과 Port 2, 3는 Port 1, 4에 비해 출력단에 상대적으로 균등한 출력을 얻었기 때문에 출력 빔의 크기도 크게 얻을 수 있다. 이러한 빔의 출력에 영향을 주는 지연선로로 인해 발생하는 손실을 최소화하거나 또는 균일화시키는 노력이 필요할 것이다.

본 논문의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 전체 시

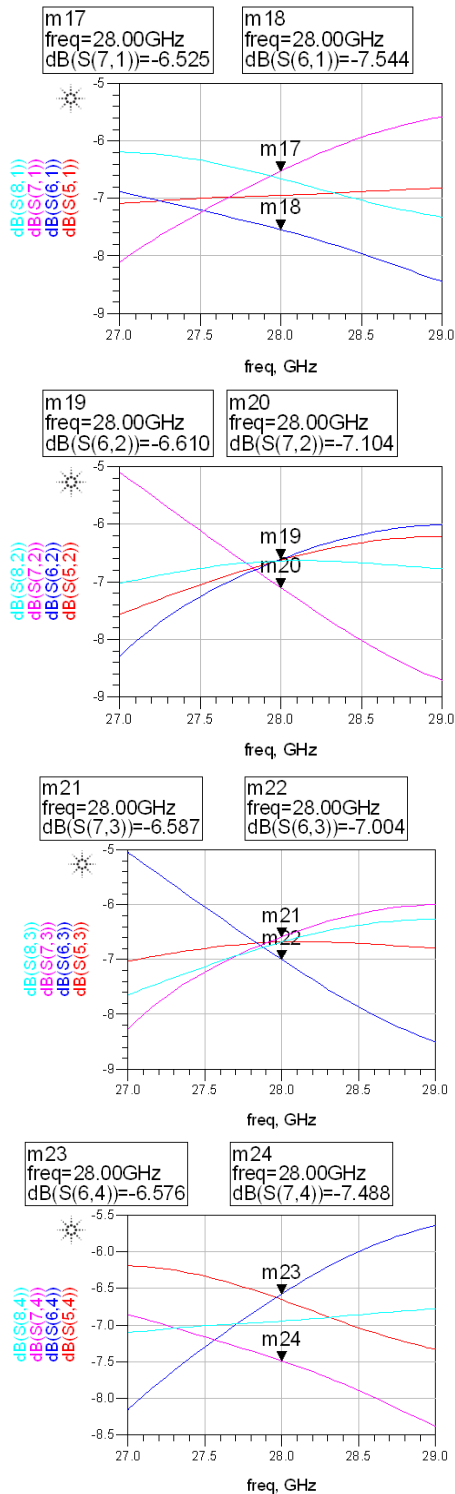


그림 16. 출력단의 S-파라미터
Fig. 16. S-parameter of output ports.

시스템을 구현할 시에 고려해야 할 사항으로 안테나들 사이의 상호 결합이 있다. 설계된 1x4 배열 안테나는 각각 동일한 대역에서 동작할 경우, 빔포밍을 하는데 큰 문제는 없다. 왜냐하면 동일한 대역에서 동작할 경우, 공진 주파수가 동일하고, 안테나의 공진을 일으키는 리액턴스 성분이 동일하기 때문에 특성 임피던스 값이 동일하여 안테나 간에 발생하는 커플링 영향이 감소된다^[16]. 하지만 실제 제작 시 시뮬레이션과 정확하게 일치되게 제작될 수 없으므로 안테나 간의 상호 결합이 발생한다. 이러한 상호 결합으로 인해 안테나의 패턴이 바뀌게 될 수 있다.

이러한 상호 결합을 피하기 위해선 안테나의 간격을 조절해야 한다. 본 논문은 상대적으로 상호 결합커플링의 영향이 낮으면서 빔 폭 줄이기 위한 이론적 간격인 $\lambda/2$ 으로 배치함으로써 커플링에 대한 영향을 낮추려 노력을 하였지만, 커플링이 발생함으로써 빔이 생성될 때 빔의 출력 파워, 폭, 방향성에 영향을 미칠 것이다. 이는 배열 안테나를 설계함에 있어 큰 이슈로 이 문제를 해결하기 위한 많은 기술들이 소개되고 있다^{[17],[18]}.

III. 결 과

본 논문에서 설계된 4x4 버틀러 매트릭스는 높은 데이터 전송률을 요구하는 5세대 이동통신을 위한 28 GHz 대역 스위치 빔포밍을 적용하기 위해 설계되었다. 본 안테나 시스템의 설계 결과 -34° 에서 33° 까지 빔 조향이 가능하며, Sidelobe level(SLL)은 최소값은 12.9 dB이다.

References

- [1] W. Roh et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications", *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, pp. 106-113, Feb. 2014.
- [2] T. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!", *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.
- [3] 신현철, "5G 이동통신을 위한 밀리미터파 대역 빔포밍 기술 개발 동향", 대한전자공학회 하계종합학술대회, pp. 2027-2028, 2014년 6월.

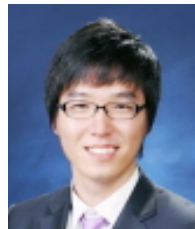
- [4] K. Wincza et al., "Reduced sidelobe four-beam antenna array fed by modified Butler matrix", *Electronics Letters*, vol. 42, pp. 508-509, Apr. 2006.
- [5] W. R. Li et al., "Switched-beam antenna based on modified Butler matrix with low sidelobe level", *Electronics Letters*, vol. 40, pp. 290-292, Mar. 2004.
- [6] R. A. Alhalabi et al., "High-gain yagi-uda antennas for millimeter-wave switched-beam systems", *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. 57, pp. 3672-3676, Nov. 2009.
- [7] H. Wang, "A switched beam antenna with shaped radiation pattern and interleaving array architecture", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 2914-2921, Apr. 2015.
- [8] 박성춘, 김승현, 손지훈, 신현철, "밀리미터파 기반의 배열 안테나를 포함한 4×4 빔포밍 회로 설계", 마이크로파 및 전파전파 학술대회, p. 51, 2015년 6월.
- [9] M. M. Alam, "Microstrip antenna array with four port butler matrix for switched beam base station application", *12th International Conference on Computers and Information Technology, 2009. ICCIT '09.CCIT*, pp. 531-536, Dec. 2009.
- [10] M. M. Alam et al., "Design and performance analysis of microstrip array antenna", *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, pp. 1837-1842, Aug. 2009.
- [11] M. T. I. Huque et al., "Design and performance analysis of microstrip array antennas with optimum parameters for X-band applications", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 2, pp. 81-87, 2011.
- [12] J. S. Wight et al., "A microstrip and stripline crossover structure", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 24, p. 270, May 1976.
- [13] N. S. A. Archad et al., "0 dB coupler employing slot technique on planar microstrip", *2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology(I4CT)*, pp. 294-299, Sep. 2014.
- [14] T. A. Denidni et al., "Wide band four-port butler matrix for switched multibeam antenna arrays", *14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, pp. 2461-2464, Sep. 2003.
- [15] W. L. Stuzman et al., G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design 3rd Edition*, pp. 316-326, May 2012.
- [16] LG Electronics Inc., "안테나 배열에서 빔 형성 방법 및 장치", PCT, 공개번호 WO2014204070A1(2014. 12. 24)
- [17] H. Steyskal et al., "Mutual coupling compensation in small array antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, pp. 1971-1975, Dec. 2014.
- [18] 민경식, 김동진, 박철근, 문영민, 김영일, "평면 배열 안테나의 소자간 상호 결합 억압 설계", 한국전자파 학회논문지, 16(8), pp. 803-809, 2005년 8월.

박 성 춘



2014년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)
 2014년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정 재학중
 [주 관심분야] Beamforming System

김 승 현



2010년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2010년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석박통합과정 재학중
 [주 관심분야] CMOS Low Power Transceiver

손 지 훈



2010년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
2010년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자공학과 석박통합과정 재학중
[주 관심분야] CMOS Frequency Synthesizer

신 현 철



1991년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1997년 4월 ~ 1997년: 독일 Daimler-Benz Research Center 연구원
1998년 1월 ~ 2000년: 삼성전자 선임연구원
2000년 4월 ~ 2002년 4월: UCLA 박사후 연구원
2002년 5월 ~ 2003년 8월: Qualcomm 선임연구원
2010년 8월 ~ 2011년 8월: Qualcomm Corporate R&D Visiting Faculty
2003년 ~ 현재: 광운대학교 전자융합공학과 교수
[주 관심분야] RF/Analog/Microwave Integrated Circuits and Systems