

4축 구조를 사용한 4G 겸용 5G 이동통신용 빔 방향탐지 및 빔포밍 시스템

조규남*, 윤원상**, 채상훈***

Beam Direction Finding and Beamforming System for 4G and 5G Mobile Communication using 4-Axes Structure

Kyu-Nam Jo*, Won-Sang Yoon**, and Sang-Hoon Chai***

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 재원으로 산학연 Collabo 사업(S2909374)의 연구수행 결과이며, IDEC의 일부 CAD tool 지원을 받았음

요 약

본 연구에서는 모터를 사용하지 않고 빔 방향탐지와 빔포밍을 동시에 할 수 있는 4G 겸용 5G 이동통신용 지향성 안테나 시스템을 구현하였다. 5G 신호의 능동적인 빔 방향탐지와 빔포밍은 4개의 축을 갖는 어레이 형태의 지향성 안테나에 의해 이루어진다. 사용자가 많은 방향으로 전파를 많이 보내기 위하여 수신부에는 빔 방향탐지 알고리즘 적용하였으며, 송신부에는 이웃한 두 축 방향으로 가해지는 신호 전력을 감쇠기에 의해 0~31.5dBm 범위 내에서 각각 조절하여 빔포밍을 하는 방법을 사용하였다. 4축 어레이 안테나 시스템을 제작하여 실험해 본 결과 10° 정도의 해상력으로 빔 방향탐지가 가능하였으며, 이웃한 2축에 대하여 0~31.5dBm 범위로 각각 RF 신호를 감쇠시킬 때 10°의 해상력으로 0~90° 빔포밍이 가능한 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, a directional antenna system for 4G and 5G mobile communication that can simultaneously perform beam direction finding and beamforming without using a motor was implemented. Active beam direction finding and beamforming of 5G signals is accomplished by an array-type directional antenna with 4 axes. In order to send a lot of RF signal to many users, the beam direction finding algorithm is applied to the receiver. In the transmitter, the beamforming method was used by adjusting the RF signal power applied to the two adjacent axes within the range of 0~31.5 dBm by an attenuator. As a result of experimenting with manufacturing a 4-axis array antenna system, beam direction finding was possible with a resolution of about 10°, and it was confirmed that 0~90° beamforming was possible with a resolution of about 10°.

Keywords

beam direction finding, beamforming, array antenna, 5G mobile communication, RF power detector, attenuator

* 호서대학교 전자융합공학부 석사과정

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7163-4471>

** 호서대학교 전자융합공학부 부교수

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1125-384X>

*** 호서대학교 전자융합공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1189-8237>

• Received: Jun. 02, 2022, Revised: Jun. 27, 2022, Accepted: Jun. 30, 2022

• Corresponding Author: Sang-Hoon Chai

Division of Electronic Convergence Engineering, Hoseo University 20,
Hoseo-ro 79 Beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungnam-do, Korea

Tel.: +82-41-560-5665, Email: shchai@hoseo.edu

1. 서 론

현재 실생활에서 사용하는 휴대폰이나 WiFi 공유기 등 무선통신 기기들은 일반 다이폴 안테나를 사용하고 있다. 다이폴 안테나는 지향 방향이 없어 주어진 공간 내에 존재하는 모든 이용자가 사용할 수 있다. 그러나 통신 도달거리가 짧아 먼 거리에 있는 이용자가 사용하기에는 불편함이 있으며, 이용자가 많은 곳과 적은 곳에서 같은 양의 전파를 사용하기 때문에 효율성 측면에서도 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 모터를 이용하여 안테나의 방향을 제어하여 빔 방향탐지(Beam direction finding) 및 빔포밍(Beamforming)을 하는 방법이 사용된다. 모터를 사용한 5G 이동통신용 시스템은 천정용으로 개발되어 사용되고 있으나 관련 IC가 모두 해외 제품이며 기능과 성능 대비 고가이다. 따라서 이러한 단점을 해결할 수 있는 간단하면서 효율적인 빔 방향탐지 및 빔포밍 안테나 시스템이 요구된다[1]. 따라서 5G 이동통신용 안테나의 가장 핵심 요소 기술인 전파 장거리 송출을 위하여 어레이(Array) 안테나 등을 이용하여 간편하게 지향 방향으로 빔을 보낼 수 있는 기술의 확보가 필요하다[2]-[4].

본 연구에서는 이를 위하여 여러 개의 축을 갖는 어레이 형태의 안테나를 이용하여 무지향성과 지향성을 동시에 갖는 4G 겸용 5G 멀티빔 안테나 시스템을 구현하였다.

II. 5G 이동통신 빔포밍 기술

5G 이동통신에서 빔포밍은 중요한 기술 요소로 주목받고 있다. 하나의 안테나는 고정된 방사 패턴을 보이지만 두 개 이상의 안테나를 조합하면 빔포밍을 통하여 주파수/시간/공간적으로 다른 방사 패턴을 얻을 수 있다. 복수 입출력 안테나 시스템의 빔포밍을 위하여 RF 신호 위상변환기(Phase shifter)나 RF 신호 감쇠기(Attenuator)를 사용하는 기술이 꾸준히 연구되고 있다. 위상변환기를 이용하는 방법은 송수신기의 높은 집적도 및 고가의 부품이 요구되며 구조의 단순화도 어렵다[5][6]. 이를 해결하기 위하여 아날로그와 디지털 방식을 혼합한 하이브리드 빔포밍의 연구도 다수 진행 중이다[7]-[9]. 반면

에 감쇠기기를 이용하는 방법은 송수신기의 구조가 단순하여 설계가 쉬울 뿐만 아니라 저가로도 구현할 수 있으므로 경제적인 면에서도 이점이 있다[4].

본 연구에서는 수신기 안테나의 여러 개의 축으로부터 수신되는 RF 전파의 세기를 분석하여 사용자가 위치한 방향을 탐지하고, 송신기 안테나 각 축에 설치된 감쇠기의 값을 조절하여 해당 방향으로 빔포밍을 하는 지향성 안테나 시스템을 구현한다.

III. 시스템 구성

3.1 5G 빔포밍용 안테나의 구성

효율적인 4G 겸용 5G 이동통신용 안테나를 구현하기 위하여 2.4GHz 4G용 1개의 다이폴형 옴니(Omni) 안테나와 지향성을 높여주기 위하여 Endfire 패턴을 결합한 형태의 3.5GHz 5G용 다이폴 안테나 4개를 조합한 다중 안테나를 구성하였다. 4개의 다이폴 안테나 중 이웃한 안테나 두 축으로부터 각각 수신된 RF 전력을 비교 분석하면 빔의 방향을 탐지할 수 있다. 또한 다이폴 안테나에 각각 연결된 4개의 감쇠기를 이용하여 0~31.5dB 감쇠를 시킴으로써 빔이 탐지된 방향으로 빔 패턴이 집중되는 빔포밍을 구현할 수 있다.

그림 1은 본 연구에서 구상한 듀얼 밴드를 갖는 안테나의 입체도로 수직(+Z) 방향 다이폴 안테나(P0)는 4G용 무지향성이며, 4개의 수평(+X, -X, +Y, -Y) 방향 다이폴 안테나(P1~4)는 5G용으로 지향성 각각의 안테나는 서로 90°의 간격으로 배치된다.

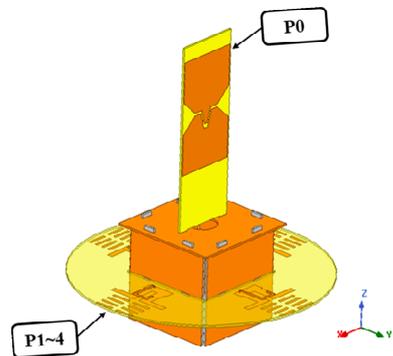


그림 1. 4G/5G 이동통신용 안테나(3D)
Fig. 1. 4G/5G mobile communication antenna(3D)

안테나의 재질은 4.4의 유전율을 갖는 FR4를 사용하였다. 안테나의 전체 직경은 13cm이며, 그림 2의 각 다이폴 안테나는 3.42~3.7GHz의 주파수를 송수신 할 수 있게 패턴 길이 L을 식 (1)에 따라 설계하였다. 여기서 c는 빛의 속도, f는 주파수, ϵ_r 은 재료의 유전율을 나타내며, $2\Delta l$ 은 양쪽 가장자리에 의해 나타나는 Fringe 효과를 고려한 것이다[4].

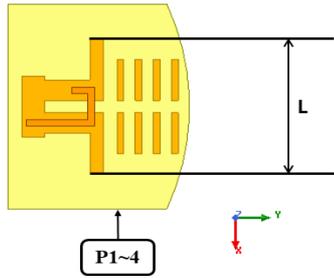


그림 2. 5G 이동통신용 안테나(2D)
Fig. 2. 5G mobile communication antenna(2D)

$$L = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta l \quad (1)$$

3.2 제어용 보드 구성

그림 3은 5G 빔 방향탐지 및 빔포밍을 위한 시스템의 구성도이다. 설계 제작된 5G 이동통신용 4축

어레이 형태의 안테나를 통하여 신호가 수신되면 대역통과필터(Band pass filter)를 거쳐 원하는 신호만 통과 시킨 후 저잡음 증폭기(Low noise amplifier)로 신호를 증폭시킨다. 증폭된 신호는 방향성 커플러(Directional coupler)를 통하여 4:1 결합기(Combiner)와 RF 감지기(Detector)로 나누어 보내진다. 4:1 결합기로 간 신호는 통신시스템으로 전달되어 처리되며, RF 감지기로 전달된 4개의 신호는 ADC 변환을 거쳐 MCU에 보내진다. MCU에서는 미리 준비된 알고리즘 및 소프트웨어를 이용하여 4개의 신호에 대한 비교·연산을 통하여 수신된 신호의 방향을 탐지하게 되며, 이를 바탕으로 송신부에 있는 RF 신호 감쇠기를 제어하여 통신시스템에서 전달된 RF 송신 신호를 제어한다. 즉, 서로 이웃된 축의 신호전력을 적당한 비로 감쇠시킴으로써 빔 패턴이 변화되어 빔포밍이 가능해진다.

IV. 제작 및 측정 분석

4.1 5G 빔포밍용 안테나 측정 결과

그림 4는 식 (1) 및 그림 2를 이용하여 설계 제작한 수평 방향의 지향성 다이폴 안테나의 리턴ロス(Return loss)이며, 3.3GHz~3.7GHz의 주파수 대역에서 -15~-22dB의 양호한 값을 나타내었다.

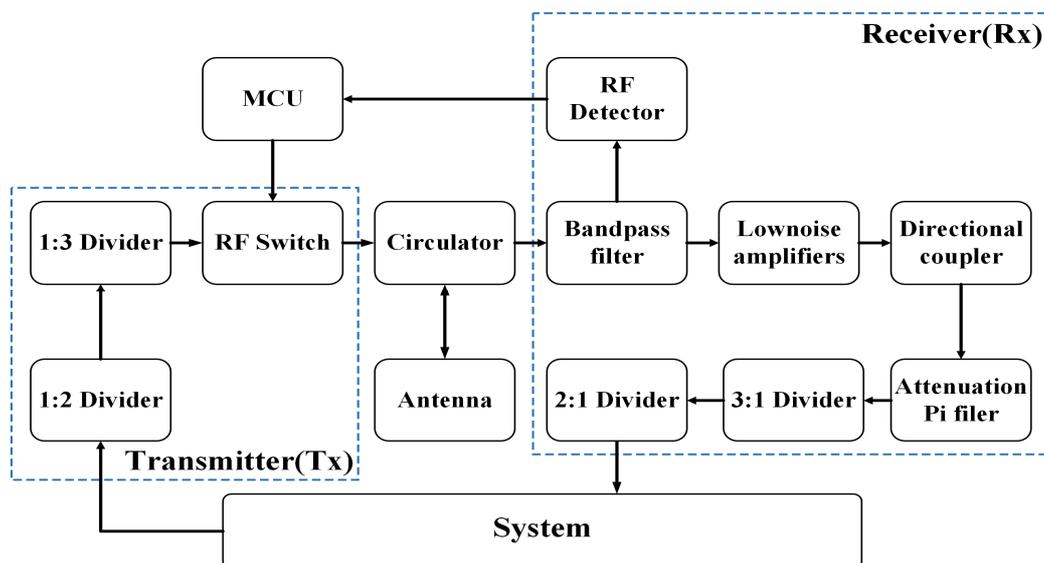


그림 3. 5G 빔포밍 시스템 구성도
Fig. 3. 5G beamforming system block diagram

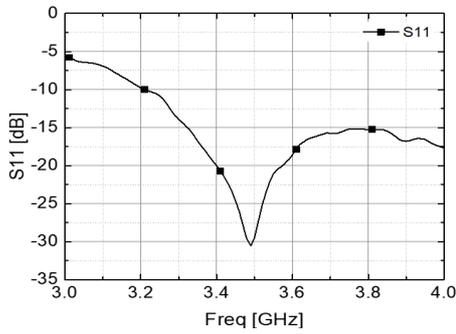


그림 4. 제작된 패치 안테나의 반사 손실(S11)
Fig. 4. Fabricated patch antenna return loss(S11)

그림 5는 +Y 방향 지향성 단일 다이폴 안테나에 대한 빔 패턴과 이득을 나타낸 그래프이다. 3.5GHz 대역에서 안테나 이득은 전방 방사 0.77dBi, 후방 방사 2.32dBi가 나타났다. 150~210° 사이에서 시뮬레이션과 측정 결과가 차이를 보이는 것은 측정 시에 이 방향에 시스템에 전력을 공급하고 제어를 위한 선들이 지나가기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다.

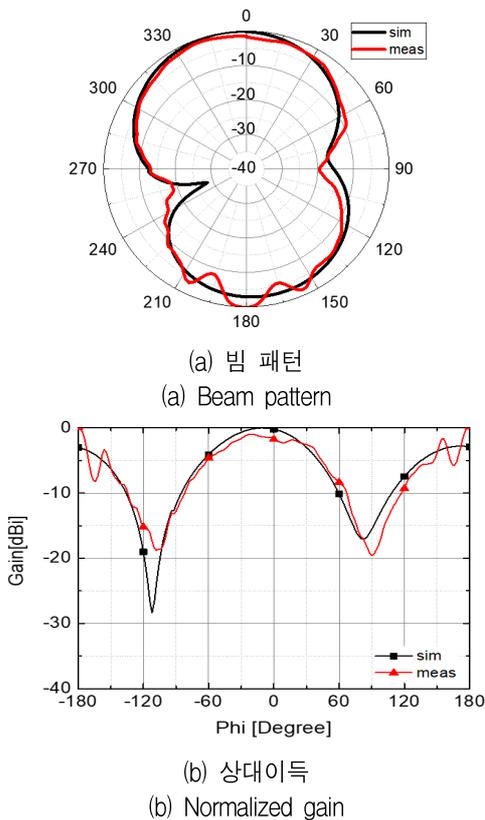


그림 5. 제작된 안테나의 P1
Fig. 5. Fabricated antenna P1

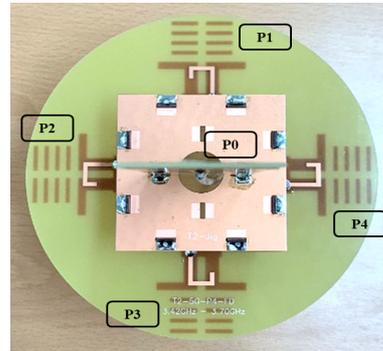


그림 6. 제작된 5G 이동통신용 안테나
Fig. 6. Fabricated 5G mobile communication antenna

그림 6은 설계 제작된 5G용 다중 안테나의 전체 평면도이며, 수직 방향으로 무지향성 다이폴 안테나(P0)가 배치되고, 수평 방향으로 지향성 다이폴 안테나(P1~P4) 4개가 90° 간격으로 배치된다. 각 다이폴의 안쪽에는 반사판을 배치하여 수신효율을 높이고, 180° 방향에서 오는 신호도 차단하였다.

4.2 빔 방향탐지 보드 제작 및 측정 분석

그림 7은 능동적인 빔포밍을 위하여 빔 방향탐지를 하기 위한 수신부(Rx) 보드이다. 수신부는 90° 간격으로 배치된 안테나에 수신된 신호가 RF 검출기를 통하여 ADC 변환되도록 설계하였다. 공간으로부터 수신되는 신호는 매우 약하기 때문에 3.5GHz의 대역폭에서 약 28dB의 높은 이득을 갖는 LNA를 사용하였다. RF 검출기는 Analog Devices사의 ADL5906A이며, 검출되는 DC 전압은 3.5GHz에서 약 -63dBm부터 유효한 값이 나타난다.

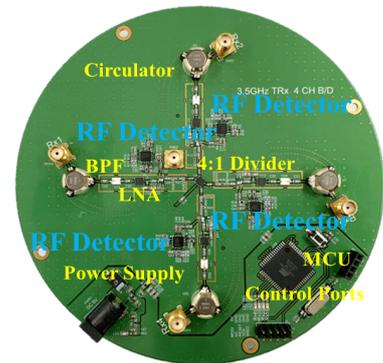


그림 7. 설계 제작된 수신부(Rx) 보드
Fig. 7. Designed and fabricated receiver(Rx) board

표 1은 설계된 수신부 보드에 4축 어레이 안테나를 결합하여 수신안테나를 구성한 다음 모바일 가입자에 해당하는 송신안테나를 1.5m 떨어진 곳에 배치하여 수신안테나 주위를 일정 반경을 유지하면서 360° 회전할 때 수신안테나 각 축의 RF 감지기에서 나타나는 DC 전압을 측정한 결과이다. 표에서 P1~P4 각각의 가장 높은 전압은 송신안테나와의 각도 차이가 0°로 일치할 때(P1; 0°, P2; 90°, P3; 180°, P4; 270°) 나타났으며, 그 외에는 각도가 차이 나는 만큼 전압이 점차 줄어들고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 수신부의 빔 방향탐지 알고리즘으로 RF 감지기로부터 MCU로 입력된 신호를 이용하여 각 Port의 값을 비교하며, 식 (2)를 이용하여 서로 이웃한 Port의 합산 값 중에서 가장 큰 값만 RF 신호로 역환산하면 전력비를 구할 수 있다[10].

$$R = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (2)$$

측정을 통하여 전력비가 수신되는 방향마다 일정 범위 내로 계산되는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 전력비를 Lookup table 형태로 알고리즘에 미리 반영해 두어 이를 바탕으로 방향을 탐지하였다.

표 1. RF 감지기 측정 결과
Table 1. RF detector measurement result

Angle[°]	Ant port			
	P1	P2	P3	P4
0	1.28	0.87	0.67	0.51
30	1.22	1.08	0.76	0.75
60	1.03	1.18	0.60	0.86
90	0.62	1.23	0.83	0.91
120	0.9	1.14	1.01	0.67
150	0.88	0.91	1.19	0.61
180	0.89	0.72	1.22	0.62
210	0.74	0.73	1.11	1.08
240	0.62	0.79	0.93	1.17
270	0.87	0.78	0.71	1.22
300	0.99	0.79	0.85	1.12
330	1.19	0.51	0.65	1.01

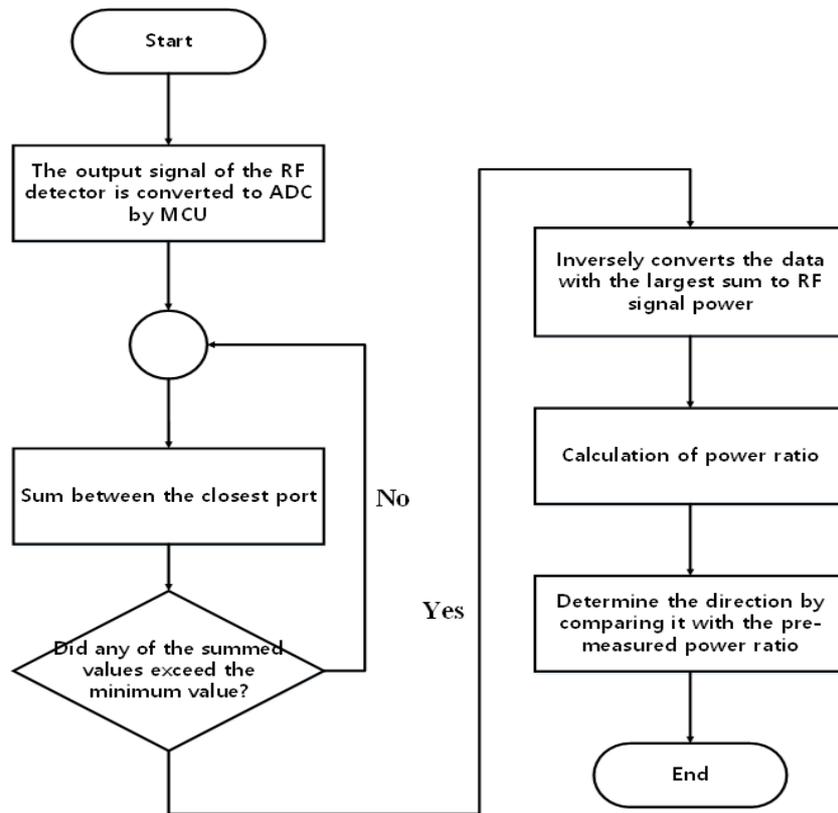


그림 8. 방향탐지 알고리즘
Fig. 8. Direction finding algorithm

4.3 빔포밍 보드 제작 및 측정 분석

그림 9는 빔포밍을 하는 송신부(Tx) 보드로써 그림 5의 수신부 보드 반대쪽 면에 배치되며, 1:4 분배기(Splitter)와 0~31.5dBm 감쇠비를 갖는 4개의 감쇠기로 이루어진다. 수신부에서 탐지된 방향으로 송신 신호를 보내기 위하여 4개의 안테나에 배치된 각각의 감쇠기를 6bit 데이터로 RF 전력 감쇠량을 제어하여 빔 패턴 형성 및 빔 방향을 조절해 준다.

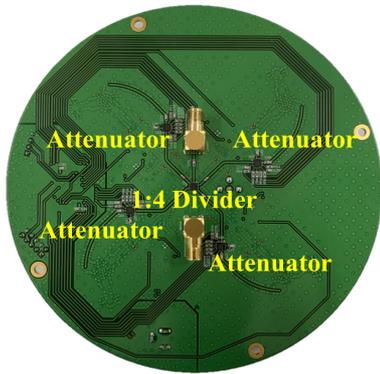


그림 9. 설계 제작된 송신부(Tx) 보드
Fig. 9. Designed and fabricated transmit(Tx) board

그림 10은 감쇠기를 이용하여 +Y축으로는 0dBm, +X축으로는 -31dBm 감쇠시켜 빔 방향을 +Y축 0° 방향으로 제어하였을 때 나타난 결과이다. 안테나 최대 이득은 0°에서 5.52dBi이며, Ansys 사의 HFSS를 이용한 EM 시뮬레이션 결과와 매우 유사하였다. 120~150° 사이에서 시뮬레이션과 측정 결과가 차이를 보이는 것은 측정 시에 이 방향에 시스템에 전력을 공급하고 제어를 위한 선들이 지나가기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다.

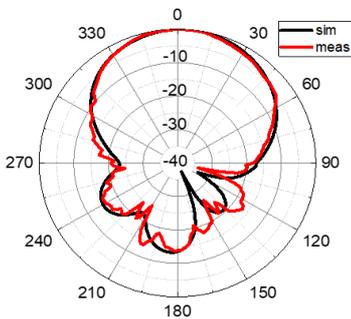


그림 10. 0° 빔 방향 제어
Fig. 10. 0° beam direction control

그림 11은 감쇠기를 이용하여 빔 방향을 +Y축에서 +15° 방향으로 제어하였을 때 나타난 결과이다. 빔 방향을 0°로 제어한 그림 10에 비하여 +15° 방향으로 빔이 틀어진 것을 확인할 수 있었다. 이때 안테나 최대 이득은 5.75dBi이다. 그림 12는 감쇠기를 이용하여 빔 방향을 +Y축 +30° 방향으로 제어하였을 때 나타난 결과이다. 빔 방향을 0°로 제어한 그림 10에 비하여 +30° 방향으로 빔이 틀어진 것을 확인할 수 있었다. 이때 안테나 최대 이득은 5.46dBi이다. 그림 13은 감쇠기를 이용하여 빔 방향을 +Y축 +45° 방향으로 제어하였을 때 나타난 결과이다.

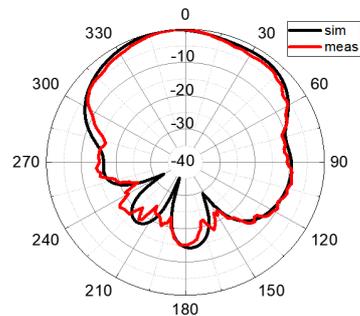


그림 11. 15° 빔 방향 제어
Fig. 11. 15° beam direction control

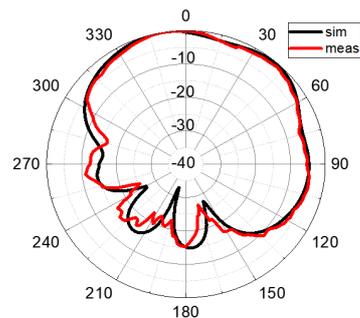


그림 12. 30° 빔 방향 제어
Fig. 12. 30° beam direction control

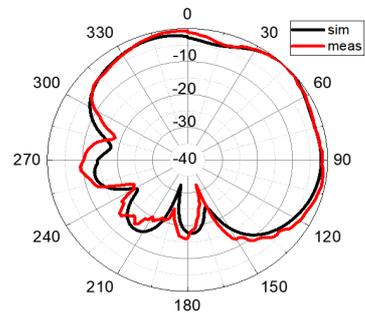


그림 13. 45° 빔 방향 제어
Fig. 13. 45° beam direction control

빔 방향을 0°로 제어한 그림 10에 비하여 +45° 방향으로 빔이 틀어진 것을 확인할 수 있었으며, 안테나 최대 이득은 6.27dBi이다. HPBW(Half Power Beam Width)는 빔포밍 방향에 따라 40~76° 사이로 나타나는 것을 확인하였다.

이상의 결과를 확장하여 $\pm X$ 축과 $\pm Y$ 축을 모두 제어하면 360° 모든 방향으로 빔포밍을 할 수 있다. 본 연구에서는 $\pm X$ 축과 $\pm Y$ 축의 감쇠 값을 조절하여 360° 모든 방향 10° 간격으로 빔 방향탐지와 빔 방향제어가 가능하도록 설계하였으며, 시뮬레이션 및 측정 결과에서도 설계대로 나타나는 것을 확인하였다. 다만 이 방법은 감쇠기에서 신호가 약해지는 양을 조절하기 때문에 자체 RF 전력손실이 일부 발생하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 RF 전력 감쇠기 대신에 RF 위상변환기를 사용하는 방법을 도입하는 것도 고려해 볼 필요가 있다.

V. 결 론

5G 이동통신용 빔 방향탐지 및 빔포밍 안테나 시스템을 구현하였다. 설계 제작된 안테나 시스템은 4개의 축을 갖는 어레이 형태의 지향성 안테나로 구성된다. 서로 이웃한 축으로부터 수신되는 전력을 감지하여 빔의 방향을 탐색하며, 역시 서로 이웃한 축에 설치된 감쇠기를 이용하여 신호 전력을 조절하여 빔의 송신 방향을 제어한다. 4축 어레이 안테나 시스템을 제작하여 측정해 본 결과 빔 방향을 360° 모든 방향으로 탐지할 수 있었으며, 역시 360° 모든 방향으로 빔포밍도 가능함을 알 수 있었다. 앞으로는 개선된 알고리즘으로 빔 방향탐지를 하고, 감쇠기 대신에 위상변환기를 사용하여 빔포밍을 구현함으로써 안테나의 성능을 개선할 예정이다.

Acknowledgment

본 연구를 위하여 도움을 주신 (주)블루웨이브텔에 진심으로 감사드립니다.

References

[1] In-Kyung Choi, Chung-Il Yae, Young-Suk Song,

Sung-Jun Lee, and Dong-Sung Kwon, "Trend of multiple transmit and receive antenna transmission technology for mobile communication", ETRI, Electronic Communication Trend Analysis, Vol. 21, No. 3, pp. 46-58, Nov. 2007. <https://doi.org/10.1049/ic.2007.1522>.

[2] Gil-Won Lee, Young-Cheol Sung, Jeong-Ho So, and Jun-Young Seo, "Research trends for 5G massive MIMO", The Magazine of IEIE, Vol. 42, No. 10, pp. 858-876, Oct. 2015.

[3] Kwang-Hyun Jeon, Hoe-Bing, Kyung-Hee Jang, Hyung-Sook Park, and Yun-Ok Park, "Beyond 4G technology trends; polarized antenna technology", The Magazine of IEIE, Vol. 39, No. 3, pp. 200-207, Mar. 2012.

[4] Chang-Hyun Moon, Tae-Hun Lee, and Sang-Hoon Chai, "A Study on beamforming of 5G antenna using 4 pole array structure", JKIIIT, Vol. 18, No. 3, pp. 89-95, Mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.3.89>.

[5] N. H. Noordin and Z. Khalidin, "Beamforming algorithms for adaptive array antenna", 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED), Penang, Malaysia, pp. 5-9, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1109/ICED.2014.7015761>.

[6] Ju-Yong Lee, Jong-Won Lee, Jong-Ho Lyu, Sung-Won Kum, and Sung-Chul Hong, "All digital beamforming technology for B5G mobile communication", IITP, Weekly Technology Trend, No. 1847, pp. 2-15, May 2018.

[7] Octavian Manu, Mihai Dimian, and Adrian Graur, "Analysis of beamforming in phased antenna arrays", Proceedings of the 10th International Conference on Development and Application Systems, Suceava, Romania, pp. 294-298, May 2010.

[8] Seong-Joon Shim, Won-Seok Lee, Seul-Gi Lee, and Hyoung-Kyu Song, "Hybrid beamforming technique for improving performance in MU-MISO system", South Korea, pp. 399-401, Jun. 2019.

[9] Seong-Hwan Kim, "Performance evaluation of analog-digital beamforming for uplink multi-user millimeter wave systems", J. of Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 29-34, Jan. 2017. <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.1.29>.

[10] Byung-Jun Jang, "Direction finding technology : Tutorial, Review, and Research Prospects", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 30, No. 8, pp. 607-617, Aug. 2019. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.8.607>

채 상 훈 (Sang-Hoon Chai)



1981년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학사)
1983년 2월 : 부산대학교
전자공학과(공학석사)
1992년 2월 : 부산대학교
전자공학과(공학박사)
1983년 3월 ~ 1997년 8월 :
한국전자통신연구원 반도체연구단 책임연구원
2004년 9월 ~ 2006년 8월 : University of Florida
연구교수
1997년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자융합공학부 교수
관심분야 : RF 아날로그 ASIC 설계, RF 전력제한기, 5G
안테나, 태양전지, 전력소자, LED 조명시스템

저자소개

조 규 남 (Kyu-Nam Jo)



2022년 2월 : 호서대학교
전자디스플레이공학부(공학사)
2022년 3월 ~ 현재 : 호서대학교
전자융합공학부 석사과정
관심분야 : 5G 안테나, RF
전력제한기, LED 조명시스템

윤 원 상 (Won-Sang Yoon)



1997년 2월 : 고려대 전파공학과
(공학사)
1999년 2월 : 고려대 대학원
통신시스템공학과(공학석사)
2010년 8월 : 고려대 대학원
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)
1999년 3월 ~ 2015년 8월 :

한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 수석연구원
2015년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자융합공학부 부교수
관심분야 : RF/Microwave transceivers, Reconfigurable
antenna systems, Wireless sensor systems,
RF/Microwave components