5G 통신 RF 소자 기술

DOI: 10.3938/PhiT.29.006

이재영·홍원빈

RF Device Technologies for 5G Communications

Jae-Yeong LEE and Wonbin HONG

An urgent need exists to secure high-performance, versatile millimeter-wave 5G RF device technology, which will be an asset and the foundation of the future national infrastructure industry. This paper describes the required specifications and major research trends of 5G core RF devices, such as millimeter-wave 5G communication antennas, RF passive devices, and electromagnetic filter-absorbers. First, in the case of millimeter-wave 5G antennas, the types of antennas mainly used in base stations, repeaters and mobile terminals are described, followed by recent commercialization efforts. Then, RF passive devices, such as polarization modulators for path loss compensation and non line-of-sight reduction, are presented. Lastly, the latest research trend regarding broadband filter-absorbers that can effectively suppress electromagnetic interferences is presented in detail. The authors predict that continuing advancements of the aforementioned 5G RF devices will serve as a catalyst to the proliferation of 5G+/6G communications using the sub-millimeter wave/THz spectrum.

저자약력

이재영 연구교수는 광주과학기술원 나노바이오소재전자공학에서 2018년 박사학위를 취득 후, 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후연구원을 거쳐, 2019년부터 포항공과대학교 전자전기공학과 연구조교수로 재직 중이며, 메타 소재, 밀리미터파/테라헤르츠파 RF 회로 및 안테나 공학 분야 연구를 진행하고 있다. (jylee82@postech.ac.kr)

홍원빈 교수는 University of Michigan 전기공학에서 2009년 박사학위를 취득 후, 삼성전자 수석연구원을 거쳐, 2016년부터 포항공과대학교 전자전기공학과 부교수(2019-현재 부교수)로 재직 중이며, 전자기파 및 안테나, 5G/6G RF 회로 분야 연구를 진행하고 있다. (whong@postech.ac.kr)

밀리미터파 5G 통신용 RF 소자

밀리미터파 5G 통신 기술은 4차 산업혁명의 가장 큰 화두이며 현재 진행 중인 미중 무역분쟁의 가장 큰 쟁점으로 이를 선도하는 국가가 세계 경제를 좌우할 수 있는 매우 큰 기간 산업이다. 그 중 5G 통신용 RF 소자는 초고속, 저지연, 초연결 특성의 차세대 통신 구현을 위한 초광대역 밀리미터파 전송의 핵심 기술로 고성능의 안테나 및 RF 수동 소자 확보가 절실한 상황이다. 그림 1과 같이 6 GHz 이하 4G LTE, Wi-Fi, Sub-6 GHz 5G 등의 기존 통신용 가용 주파수 대비 최소 수배에서 십수 배 이상 높아질 것이 유력한 밀리미터파 5G 통신은 공기 중의 산소, 물 분자의 흡수, 반사, 회절 손실에 의한 전파 감쇄 현상이 심화된다.^[1,2]

밀리미터파 5G 통신의 경우 주파수가 기존 통신 대비 수 배에서 수십 배 증가함에 따라 다양한 페이딩(fading) 및 경로 손실(path loss)에 의한 송신 신호의 감쇄가 발생한다. 밀리미터파 주파수 대역에서 반도체 공정 기반 소자의 기술적 한계에 의해 감쇄된 수신 신호를 데이터로 복원하는 과정에서 상당한 기술적인 난제가 존재한다. 결과적으로 이동성에 대비하거나 음영지역까지 전파가 도달하기 위해 넓은 공간에서 매우 높은 이득(gain)으로 실시간으로 조향하도록 8개 방사소자 이상을 가지는 빔포밍(Beamforming) 위상 배열(Phased array) 안테나가 5G 통신에서 필수적이다.^[3,4] 나아가 다양한 전파 환경, 및 5G 송수신기가 이동성을 가지는 모바일 통신 환경에서의 적용을 고려하여 최적의 송수신율(RSSI, bit error rate(BER), packet error rate(PER))을 가지도록 안테나를 제어하여야 한다. 이를 통하여 그림 2와 같이 복수의 뿔족한 안테나 빔을 송신 기지국, 액세스 포인트, 단말기 등에서 수신 단말기로 신호를 전달하는 5G 시나리오가 가능하다.

REFERENCES

- [1] Qualcomm & Nokia, White paper: Making 5G a reality, Sep. (2017).
- [2] T. S. Rappaport *et al.*, Proc. IEEE **99**, 1390 (2011).
- [3] O. Jo *et al.*, IEEE Commun. Mag. **52**, 30 (2014).
- [4] W. Roh *et al.*, IEEE Commun. Mag. **52**, 106 (2014).

Fig. 1. (a) Overview of global 5G spectrum.^[1] (b) Propagation attenuation at millimeter-wave and THz spectrum.^[2]

Fig. 2. Communication scenario between 4G and millimeter-wave 5G.

본고에서는 이러한 기지국, 중계기, 단말기 등 다양한 밀리미터파 5G 통신 소자에 활용 가능한 안테나, RF 수동 소자, 흡수체의 개발 동향 및 전망 등을 기술하고자 한다. 세부적인 구성은 밀리미터파 5G 안테나, RF 수동 소자, 전자파 필터-흡수체의 주요 연구 동향과 응용 분야에 대해 살펴본 후, 이를 기반으로 향후 5G+/6G 통신용 안테나, RF 수동 소자, 필터-흡수체의 연구 방향에 대해 예측할 것이다.

밀리미터파 5G 안테나

밀리미터파 5G 통신용 안테나는 크게 기지국(인프라)용 안테나(Electrically large arrays, 체적 > 20 cm), 모바일 기기(단말기)용 안테나(Electrically small arrays, 체적 < 2 cm), 그리고 중간 체적의 중계기용 안테나로 분류된다. 이러한 통신용 안테나는 기본적으로 빔포밍 기술이 가능한 위상 배열 안테나 시스템의 형태를 가진다. 일반적인 위상 배열 안테나 시스템은 그림 3과 같이 RFIC 회로, 전치단 회로(위상천이기, 전력증폭기), 급전부 회로, 배열 안테나 방사소자로 구성되며 타일 형태로 집적된다. 수동 소자 중에서 급전부 회로, 배열 안테나 방사소자는 위상 배열 안테나의 이득, 빔조향 각도, 빔폭 등 주요 안테나 성능을 크게 좌우할 수 있다. 특히 저손실 급전부 회로, 고이득 배열 안테나 방사소자 설계, 집적 및 측정 은 위상 배열 안테나의 이득과 배열 개수에 따른 확장성과 연관된 가장 중요 핵심 기술로 현재 다양한 구조 형태의 연구가 활발히 진행 중이다.^[5,6]

밀리미터파 5G 기지국 및 중계기용 안테나의 경우 그림 4(a)와 같이 뾰족한 고이득의 안테나 빔을 3차원 공간에서 실시간으로 조향하며 이동성은 극히 제한적이다. 결과적으로 일정 수준 이상 예측 가능한 위치의 전파 환경에서 안테나가 동작하게 되며 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 빔 조향 공간을 세부적으로 분할하여 구현 가능할 것으로 전망된다. 이러한 방식은 현재 4G LTE 기지국 안테나의 운용 방식과 일치하며 결과적으로 5G 통신 인프라 경비 절감 차원에서 매우 유리한 안테나 구현 방안이다.

REFERENCES

- [5] S. Shakib *et al.*, IEEE Commun. Mag. **57**, 98 (2019).
- [6] K.-M. Luk *et al.*, IEEE Trans. Antennas Propag. **63**, 1075 (2015).

Fig. 3. (a)-(b) Beamforming architecture in mm-wave base station and mobile antenna. [5] (c) Scalability of phased array antenna. [6]

밀리미터파 5G 기지국 및 중계기용 안테나는 20 dBi 이상의 고이득을 가지는 안테나 형상이 매우 유력하며, 설치 공간, cell coverage, 설치 예산 등에 따라 구체적인 형상이 선택될 수 있다. 고이득 안테나의 경우 통상 10도 내외의 반전력(3 dB) 빔폭을 가지는 것이 특징이며, 특히 수평축(azimuth)과 수직축(elevation)의 빔폭에 대한 정밀한 설계, 관리 및 성능 검증이 필수적이다. 그림 5의 예시와 같이 기지국 및 중계기용 안테나 형상은 패치 안테나를 배열한 PCB 기반 평면 배열 안테나, 렌즈 안테나, 유전율 기반 레이돔 안테나, 반사체 안테나 등이 활용된다. 현재 삼성전자, Huawei, Ericsson, Nokia, Qualcomm 등 국내외 우수 대기업들이 밀리미터파 5G 기지국 및 중계기용 안테나를 개발하기 위해 주도적으로 참여하고 있다.

Fig. 4. (a) Operating method for mm-wave 5G base station antenna. (b) Beam steering techniques and its sector antenna.

Fig. 5. Various configurations mm-wave 5G base station antenna.

밀리미터파 5G 단말기용 안테나는 삼성전자에서 세계 최초로 제안하여 그림 6(a)와 같이 밀리미터파 5G 상용화를 위한

Fig. 6. (a) mm-wave 5G antenna array configuration for cellular mobile terminals.^[7] (b) Configuration of massive array antenna featuring dual-polarization and end-fire radiation.^[8]

표준 안테나 형상을 제시하였다.^[7,8] 본 연구에서는 좌표가 수시로 변하는 단말의 특성상 편파 부정합에 의한 수신 감도 저하를 방지하기 위해 고이득의 편파 빔을 2차원 공간에서 실시간으로 조향하고 이중편파 특성의 다중 안테나를 활용하여 데이터 채널을 2배 늘리는 안테나 형상을 제안하였다. 제안된 안테나는 그림 6(b)와 같이 단말의 단축 외곽 상단에 이중편파 안테나가 각각 2개씩 위치하며 상호 간섭이 억제되도록 직교하는 2개의 편파 특성을 포함한 종방향의 빔조향 방사가 이뤄지도록 하였다.

삼성전자에서 발표한 본 안테나의 방사소자는 그림 7(a)과 같이 수평 편파 특성의 Mesh grid patch 구조를 활용하였으며 다층 PCB 형태의 패키지 기반 5G 1×16 배열 안테나로 연구를 수행하였다. 최종 제작된 안테나는 하이브리드 방식의 빔포밍 위상 배열 구조를 채택하였으며 빔조향 각도는 약 $\pm 70^\circ$ 이며 스마트폰 상/하부에 위치하면서 종방향에서 360도 빔을 대부분 커버 가능하다.^[7] 하지만 본 안테나는 단말의 위치 변화로 편파 부정합에 의한 수신 감도가 저하되는 치명적인 단점이 있

Fig. 7. (a) Horizontal polarized antenna for single channel.^[8] (b) Vertical polarized antenna for MIMO channel.^[8]

Fig. 8. mm-wave 5G antenna module-SDR051 in Qualcomm.^[9]

REFERENCES

- [7] W. Hong *et al.*, IEEE Commun. Mag. **52**, 63 (2014).
- [8] W. Hong *et al.*, IEEE Trans. Antennas Propag. **65**, 6250 (2017).

Fig. 9. (a) Antenna-on-display for mm-wave 5G in mobile handset.^[10] (b) Invisible antenna concept.^[10,11] (c) Galaxy gears 2 using AoD concept.^[11] (d) News and papers about AoD.^[10]

어 이를 극복하기 위해 그림 7(b)와 같이 이중 편파 특성을 지원하는 다채널의 대용량 위상 배열 안테나가 제안되었다.^[8] 전류 분포를 변화 유도한 수직 편파 특성의 Mesh grid patch 구조를 추가 설계하였으며 그림 6(a)와 같이 수직-수평 편파 안테나 방사소자가 서로 교차하는 형태로 단말의 위치 변화에 둔감한 대용량 위상 배열 안테나를 구현하였다.

해외에서는 Qualcomm이 밀리미터파 5G용 RF 칩셋과 안테나 모듈을 모두 개발하여 해당 솔루션을 전 세계 단말 업체에 제공하며 밀리미터파 5G용 RF 소자 기술을 선도하고 있다. 그림 8과 같이 스마트폰 실장을 위한 Qualcomm SDR051-based 2×2 배열 빔형성 및 이중 편파 안테나 모듈을 개발하였다. 이를 통해 밀리미터파용 Modem칩, RF 전치단 회로 구성과 패키지 기반 안테나 모듈까지 모두 제조하여 hand-blocking에 취약한 밀리미터파 특성 개선에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 또한 적응형 아날로그 빔포밍과 빔추적/조향 기술을 접목하여 전파 음영 환경에서도 통신이 끊기지 않고 자유자재로 연결되는 기술도 제공하고 있다.^[9]

포항공과대학교에서는 국내외 산학 연계 컨소시엄(SK텔레콤, LG 전자, 삼성전자 반도체사업부, Keysight Technologies, 동우화인켐, 삼성코닝 등)을 구성해 미래형 5G 스마트폰에

활용 가능한 세계 최초의 디스플레이 일체형 밀리미터파 5G 안테나를 개발하였다.^[10] 미관상 스마트폰의 디스플레이가 대면적화되어 안테나가 실장될 공간이 부족하였다. 하지만 개발된 디스플레이 일체형 안테나를 활용해 안테나 실장 공간 부족을 극복하고 디스플레이 구동과의 상호 간섭 없이 안테나가 정상 구동하도록 상용화 가능성을 확보하였다. 구현 방법으로 그림 9와 같이 안테나 소자 패턴을 급전선로용 FPCB와 디스플레이 패널 위에 등방성 전도성 필름으로 부착하여 밀리미터파 빔포밍 위상배열 안테나를 구현하였고 개방 경계의 금속 더미를 안테나 방사체 주변에 추가하여 터치패널 사용 시 노이즈에 의한 빛반점 현상인 시인성 문제를 해결하였다.^[11]

밀리미터파 5G RF 수동 소자

앞서 언급한 바와 같이 밀리미터파 대역은 파장이 짧아 자

REFERENCES

- [9] Qualcomm, Making the wireless barriers to mobilize 5G NR mmWave, May. (2019).
- [10] W. Hong *et al.*, IEEE Trans. Antennas Propag. **67**, 2942 (2019).
- [11] W. Hong *et al.*, IEEE Trans. Antennas Propag. **65**, 3750 (2017).

Fig. 10. (a) Polarization converter and its equivalent circuits.^[13] (b) Simulated and measured results.^[13] (c) CP wave beamforming system.^[13] (d) Measured beamforming results.^[13]

유 공간상 경로 손실이 크게 증가하여 전파 음영지역을 제거하는 별도의 RF 수동 소자가 필요하다. 경로 손실 보상 및 전파 음영지역 제거를 위해 렌즈, 반사체, 변조기(편파, 주파수, 진폭, 위상) 등의 중계형 RF 수동 소자가 매우 효율적으로 배치 및 활용되어야 한다. 최근 이러한 밀리미터파 5G 통신 RF 수동 소자 개발을 위해 대학을 중심으로 한 기초 연구가 활발히 진행 중이며 등방성 및 비등방성 구조를 가진 주파수 선택 표면이나 메타표면 구조체 등이 주로 연구되고 있다.^[12]

최근 밀리미터파 5G RF 수동 소자에서 편파 변조기가 주목받고 있다. 특히 근거리장에서 일차원 Fresnel zone plate를 활용하여 선형 편파를 가진 전파를 광대역(24 ~ 40 GHz) 내에서 원형 편파로 변환시킴과 동시에 22도 빔조향 기능까지 갖춘 편파 변조기를 개발하였다.^[13] 제안된 편파 변조기는 그림 10과 같이 입사되는 편파에 보강 또는 상쇄 간섭을 일으켜 전자적으로 개방 및 단락되는 특성을 가진다. 이러한 전자적 특성을 활용해 두 직교 편파 성분(수직, 수평 편파)에서 모두

1 dB 이내 삽입손실을 가진다. 또한 두 직교 편파 간에 3 dB 이내 진폭차이와 90도 위상차이를 가져 선형 편파에서 원형 편파로 변환됨을 알 수 있다.

또한 자율 주행차의 통신처럼 전파 차단이 발생할 경우 이를 실시간 보상하기 위해 전기적으로 제어 가능한 능동형 편파 변조기가 개발되었다.^[14] 그림 11과 같이 I자의 PCB 상단에 90도 직교하는 주파수 선택 표면을 상용 Varactor 소자와 결합시켜 능동형 편파 변조기를 구현하였다.^[13] 제안된 편파 변조기는 앞선 그림 10과 같은 전자적 필터 특성을 가지며 이러한 특성을 통해 상호 직교하는 편파로 변환함과 동시에 30도 빔조향 가능하다.

REFERENCES

- [12] W. Hong *et al.*, The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science **29**, 3 (2018).
- [13] W. Hong *et al.*, Microw. Opt. Technol. Lett. **61**, 1 (2019).
- [14] W. Hong *et al.*, IEEE Trans. Veh. Technol. **69**, 1719 (2020).

Fig. 11. (a) Unit cell of polarization converter.^[14] (b) Measured results.^[14] (c) Vertical polarization beamforming.^[14] (d) Horizontal polarization beamforming.^[14]

고성능-다기능성 전자파 필터-흡수체

대부분의 전자파 필터, 차폐-흡수-방열 소재의 경우 대일 의 존도가 높고 세라믹 계열의 유전 재료, 페라이트 계열의 자성 재료 등이 각각 사용되고 있으나 모두 수 GHz 이하에서 구동 하는 필터-흡수체에 불과하다. 따라서 10 GHz 이상의 차세대 통신용 필터-흡수체가 반드시 필요하다. 최근 소형 모듈 내에 패키징화된 다중 소자들 간의 상호 전파 간섭 억제 및 최적의 전파 특성을 확보하기 위해 Graphene, CNT, Mxene 등의 2 차원 복합소재 기반 광대역 전자파 필터와 다중 대역 전자파 흡수체 연구가 활발히 수행 중이다.^[15]

10 GHz 이상의 차세대 통신용 다중 대역 전자파 필터-흡수 체는 싱가포르 난양공대에서 3차원 주파수 선택 표면 기반 전 파 필터-흡수체 연구로 선도하고 있다.^[16] 제안된 필터-흡수체

는 그림 12와 같이 중심 주파수 0.12 파장 두께의 박형 자성 체임에도 불구하고 1.8 GHz에서 14.4 GHz의 광대역 전파 흡 수 반사 필터와 1 dB 이내의 전파 흡수-투과 특성을 가진다. 또한 3차원 유닛 셀 구조의 다중 공진을 활용하여 전파 투과 대역을 중심으로 저대역에서 54%, 고대역에서 76%의 전파 흡수 대역을 달성하였다. 이러한 전자파 필터-흡수체는 투명 박막과 결합한 전자기 캐노피용 전자파 흡수체, 보안에 강인한 저비용 고효율 빌딩의 창문, 자율 주행 차량 통신 등에 활용될 수 있다.

REFERENCES

- [15] C. M. Koo *et al.*, Science **353**, 1137 (2016).
- [16] Z. Shen *et al.*, IEEE Antennas Propag. Mag., Accepted (2020).

Fig. 12. Ultra wideband absorptive frequency-selective reflection/transmission structures.^[16]

결론 및 5G+/6G 통신용 RF 소자의 미래

본고에서는 곧 도래할 밀리미터파 5G 통신용 소자별 주요 연구 동향과 활용 분야에 대해 논하였다. 현재 연구되고 있는 밀리미터파 5G 안테나, RF 수동 소자, 전자파 흡수체 등은 RF 능동 소자와 함께 지속적으로 상호 보완적이며 다기능성 소자로 발전되어야 하며 구현 기술 확보가 매우 절실하다. 이러한 밀리미터파 5G RF 소자 기술 발전이 2030년 상용화 목표를 위한 5G+/6G 통신용 서브밀리미터파/THz 대역 소자 기술의 원천이 될 것이다. 특히 소재, 공정, 부품 간 융복합 연구가 원활히 수행되어 현재의 산업 및 방산 분야에서 난제인 고분해능/고효율 특성을 가진 소자 기술의 대안이 될 수 있다. 또한 통신뿐만 아니라 전파치료용 및 반도체 비파괴 검사용 이미징 분야, 무인이동체 레이다 및 무선전력전송, 물질 식별이 가능한 Block-chain 기반 응용 산업 등에도 활용될 것으로 기대된다.^[17]

Acknowledgments

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (Grant No. 2018R1A6A3A01013261), in part by Next Generation Engineering Research Program of National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT (Grant No. 2019H1D8A2106519), and in part by Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (Grant No. 2018-0-00733 and 2018-0-00823).

REFERENCES

- [17] S. Dang *et al.*, Nat. Elec. 3, 20 (2020).