

5G 밀리미터파 통신 물리계층 연구 동향

정지훈 소정호 서준영 박기승* 성영철**

한국과학기술원 박사과정

한국과학기술원 석사과정 *

한국과학기술원 부교수 ***

국제전기통신연합(ITU)에서는 2020년에 IMT2020이라는 이름으로 5세대 이동통신(5G)의 국제 표준을 승인할 예정이다. 본 고에서는 5G의 초고속 전송을 위해 사용되는 밀리미터파(millimeter wave) 통신에 대해서 알아본다. 특히, 물리계층에서 밀리미터파 통신의 특성들을 살펴보고, 이 특성들을 이용한 채널 추정과 빔포머 설계 기술 연구 동향에 대해 살펴본다. 또한, 이를 구체화한 3GPP의 관련 표준 동향도 간단히 소개한다.

I. 서론

이동통신 기술은 4세대 LTE, LTE-Advanced, LTE-Advanced Pro를 거쳐 이제 바야흐로 5세대 이동통신(5G)으로 발전되어 가고 있다. 5G는 초고화질 동영상 스트리밍, 3차원 영상, 실감 미디어 등 사용자 경험을 극대화하는 멀티미디어 애플리케이션들과 IoT(Internet-Of-Things) 실현을 위한 무선 인프라를 제공할 것이다. 국제전기통신연합(ITU)에서는 IMT-2020이라는 이름으로 5세대 이동통신 기술의 국제 표준을 2020년에 승인할 예정이다[1]. 이를 위해 3GPP(3rd Generation Partnership Project)에서는 '5G'라는 이름으로 IMT-2020의 후보기술을 만들고 있으며, 이것이 흔히 '5G'라고 불리는 표준 기술이다. 3GPP에서는 새로운 무선접속 기술인 NR(New Radio)의 정의 및 개발과 4세대 기술인 기존의 LTE를 발전시키는 방향, 모두를 5G라고 정의하고 있으며[2], 2018년 9월에 phase I, 2019년 12월에 phase II를 완료하는 것을 목표로 삼고 있다. 5G 표준에서는 다음의 3가지가 큰 축을 이룬다. 첫째, 높은 전송 속도를 목표로 하는 eMBB(enhanced

* 본 내용은 정지훈 박사과정(☎ 042-350-5484, j.chung@kaist.ac.kr)에게 문의하시기 바랍니다.

** 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

[표 1] IMT-2020 eMBB를 위한 요구조건

구분	Key capabilities
Peak data rate	20Gbit/s
User experienced data rate	100Mbit/s
Area traffic capacity	10Mbit/s/m ²
Spectrum efficiency	3x
Network energy efficiency	100x
Mobility	500km/h

〈자료〉 ITU-R, M.2083-0

mobile broadband), 둘째, 신뢰성을 높이고, 지연 속도를 획기적으로 단축시키는 URLLC(Ultra-Reliable and Low Latency Communication), 셋째, 수많은 기기들의 무선 접속을 목표로 하는 mMTC(massive Machine Type Communication)이다. 본 고에서는 이 세 가지 축 중에 초고속 무선 전송을 통해 초고화질 동영상 스트리밍, 3차원 영상, 실감 미디어 서비스를 가능하게 하는 eMBB에 대해 간단히 살펴본다[1].

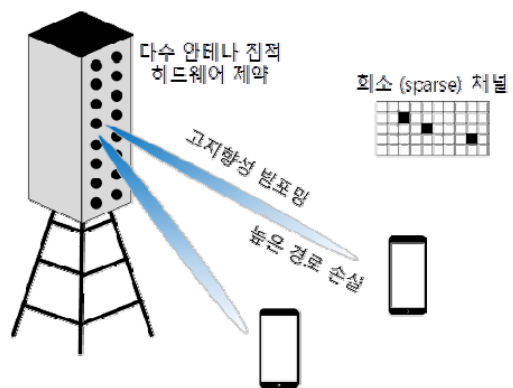
[표 1]은 IMT-2020의 eMBB에 관한 요구조건이다. ITU가 지정한 5G 요구사항에 따르면 eMBB의 최대 전송 속도는 하향 링크(downlink, DL) 기준으로 20Gbps를 요구하며, 이는 기존 4G에 비해 20배 빠른 속도이다[1]. 이를 달성하기 위해서는 대역폭당 전송속도, 즉 주파수 효율(spectral efficiency)을 증대시키는 기술들과 더불어 통신에 사용되는 대역폭 자체를 넓힐 필요성이 있다. 밀리미터파 대역은 기존의 이동통신에서 사용하던 6GHz 미만(sub-6GHz) 대역과 구별되는, 파장이 mm 단위인 30~300GHz의 주파수 대역을 지칭한다. 채널 용량은 주파수 대역폭에 비례해서 증가하기 때문에, 높은 주파수의 밀리미터파 대역의 아직 할당되지 않은 넓은 대역폭을 사용하면 고속의 데이터 전송이 가능하다. 밀리미터파는 짧은 파장 때문에 기존의 sub-6GHz 대역 통신보다 경로 손실(path loss)이 훨씬 크다는 단점이 존재하지만, 다수의 안테나를 작은 공간에 집적시킬 수가 있어서 하드웨어의 소형화가 가능하다. 이러한 특징을 바탕으로 다중 안테나 빔포밍 기술을 적용하여 밀리미터파 대역에서의 큰 경로 손실을 극복하기 위한 많은 연구가 진행되고 있고, 3GPP에서도 밀리미터파 통신을 'above-6GHz'라는 이름으로 표준으로 채택하고 있다.

본 고에서는 크게 ① 밀리미터파 대역 통신의 특성, ② 밀리미터파 채널 추정 기술, ③ 밀리미터파 빔포밍 설계 기술을 중심으로 밀리미터파 물리계층(physical layer) 연구에 대해 간략히 소개하고, 또한 이와 관련된 표준화 동향을 소개한다.

II. 밀리미터파 대역 통신의 특성

밀리미터파 대역의 무선 채널은 다음과 같은 주요 특성들을 가진다. 첫째, 밀리미터파 대역 무선 채널은 넓은 대역폭을 제공할 수 있다. 둘째, 밀리미터파 대역 무선 채널은 높은 주파수 특성으로 인해 높은 직진성과 큰 경로 손실을 가지며, 셋째, rich scattering 환경의 채널 특성을 가지는 기존의 sub-6GHz 대역과는 달리 전파 경로의 수가 매우 적은 희소(sparse) 채널 특성을 가진다. 이로 인해 기존 채널 모델과는 다른 밀리미터파 채널 특성에 맞는 새로운 채널 모델이 만들어지고 있다.

넓은 대역폭의 밀리미터파 대역 통신을 위해서는 첫째, 다중 반송파 전송방식(Multi-Carrier Transmission)을 이용할 경우, 넓은 대역폭을 효율적으로 사용할 수 있는 무선 리소스 그리드(Resource Grid)의 재설정이 필요하며, 둘째, 앞서 말한 큰 경로 손실을 극복해야 한다. 전자의 다중 반송파 통신의 경우, 기존의 협대역에서 사용하던 부반송파 간격(Subcarrier Spacing)을 유지할 경우 넓은 대역폭을 모두 커버하기 위해서는 엄청난 수의 부반송파를 필요로 하게 된다. 이 경우 필요한 DFT(Discrete Fourier Transform) 사이즈가 너무 증가하여 하드웨어 복잡도가 현격히 늘어나게 된다. 이 문제는 다양한 부반송파 간격을 정의하여 넓은 대역폭을 커버함으로써 해결할 수 있다. 후자의 큰 경로 손실의 경우, 파일럿 신호와 빔트레이닝(Beam Training) 등을 통해 sparse 특성의 채널을 효율적으로 추정한 후, 높은 지향성 빔포밍(Highly Directional Beamforming)으로 경로 손실을 극복할 수 있다. 이러한 높은 지향성의 빔포밍을 위해서는 다수의 안테나가 필요하다. 다행히, 밀리미터파는 파장이 짧아 작은 공간에 다수의 안테나를 집적할 수 있다. 하지만, 빔포밍을 위해서는 안테나뿐만 아니라 안테나를 구동하는 회로들도 필요로 하는데, 모든 안테나마다 RF(Radio Frequency) 체인을 사용하여 빔포밍을 전적으로 디지털단에서 구현할 수 있지만, 이 경우 엄청난 하드웨어 복잡도를 요구한다. 빔포밍에 필요한 하드웨어 복잡도를 줄이고 현실적 구현을 위해 빔포밍을 아날로그단과 디지털단에 적절히 배분해서 구현하는 하이브리드 빔포밍이 고려되고 있다[3]. 학계와 산업계에서는 이와 같은 5G 밀리미터파의 단점을 극복하고, 장점을 살려 초고속의 밀리미터파 대역 무선 통신을 가능하게 하는 채널 특성 모델링, 파일럿 신호 설계, 빔트레이닝, 채널 추정, 고지향



〈자료〉 한국과학기술원 자체 작성

[그림 1] 밀리미터파 통신의 특성

성 빔포밍 등 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

1. 5G NR 표준 채널 모델 및 프레임 설정

3GPP의 5G NR에서는 밀리미터파 대역 통신을 위해 above 6GHz 라는 이름으로 표준 규격을 만들고 있다. 기존의 LTE에서 논의되었던 3차원 채널 모델이 'above 6GHz'까지 확장된 형태로 NR 표준으로 제시되었다[4],[5]. 기존의 UMi(urban micro cell), UMa(urban macro cell) 외에 실내 모델인 'Indoor-office'와 rural deployment scenario를 고려하는 RMa(rural macro cell) 시나리오가 추가되었다. 또한, 링크 계층(Link Level) 구현을 위해 간소화한 모델인 CDL(Clustered Delay Line)과 TDL(Tapped Delay Line) 모델이 표준에 추가되었다. CDL 모델은 신호가 채널에 존재하는 각각의 클러스터를 통과할 때 20개의 신호로 분산되어 수신 안테나에 도달하는 것을 모델링한 것이다. 이 때 클러스터 각각을 통과하는 신호의 지연시간(delay), 파워, 네 종류의 각도(Angle Of Departure: AoD, Zenith angle Of Departure: ZoD, Angle Of Arrival: AoA, Zenith angle Of Arrival: ZoA) 값 및 관련 파라미터가 정의된다. 반면, TDL 모델의 경우, CDL 모델처럼 채널에 있는 각각의 클러스터 파라미터를 정의하는 대신 채널 전체에 대해 각 탭들의 PDP(Power-Delay Profile)만을 정의하여 제공한다. 따라서, 네 종류의 각도 값이 나타나지 않고, 각 클러스터를 통과한 신호가 20개의 신호로 분산되는 과정도 모델화되어 있지 않은 간소화된 형태이다. CDL과 TDL 모델 각각 NLOS(Non-Line-of-Sight) 만을 반영하는 모델 3가지와 LOS(Line-of-Sight)까지도 반영하는 모델 2가지가 있다. CDL 모델과 TDL 모델에서 정의된 지연시간은 정규화된 값으로, delay spread model의 설정에 따라 그에 해당하는 미리 정의된 파라미터 값을 곱하여 사용하게 되며, 미리 정의된 각도 값은 채널 모델을 설계할 때 원하는 각도 분포에 따라 선형 변환하여

[표 2] Numerology에 따른 subcarrier spacing과 서브프레임 당 슬롯 수의 관계

Numerology(μ)	$2^{\mu} \times 15$ [kHz]	subframe당 슬롯 수	슬롯당 심볼 수
0	15	1	14
1	30	2	14
2	60	4	14
3	120	8	14
4	240	16	14
5	480	32	14

<자료> 3GPP TS 38.211

적용할 수 있다.

다중 반송파 전송 방식을 이용하여 밀리미터파 대역의 넓은 대역폭을 효과적으로 사용하기 위해서는 4G 대비 새로운 프레임 구조가 필요하다. 이를 위해 5G NR에서는 다양한 전송 프레임 설정을 제공한다. 즉, numerology라는 파라미터를 도입하여 기존 LTE의 리소스 그리드 상의 부반송파를 확장하여 부반송파 간격을 유동적으로 설정할 수 있도록 하였다. Numerology 파라미터는 0~5까지 설정할 수 있는데, 0일 때 기존 LTE에서 사용하던 15kHz의 부반송파 간격을 사용하고, numerology 값이 1 늘어날 때마다 부반송파 간격은 2배로 늘어나며, 주어진 길이의 서브프레임 당 슬롯 수는 두 배로 증가한다[4]. 5G NR에서는 다양한 numerology 값을 통해 다양한 주파수 간격과 시간영역 길이를 가진 심볼들을 정의함으로써 넓은 대역폭을 적당한 크기의 DFT로 커버할 수 있도록 하였다.

III. 밀리미터파 채널 추정 기술

밀리미터파 대역 채널에서의 큰 경로 손실을 보상하기 위해서는 좁은 빔폭의 지향성 빔포밍 기술이 필수적이다. 이러한 빔포밍을 위해서는 기본적으로 파일럿 빔 및 신호(Pilot Beam and Signal)를 이용한 송신기와 수신기 사이의 채널 정보(Channel State Information)의 획득이 이루어져야 한다. 그러나, 밀리미터파 채널의 경우 앞서 언급하였듯이, 큰 경로 손실과 sparse 채널 특성으로 인해 채널 추정이 어렵게 된다.

이러한 큰 손실의 sparse 밀리미터파 채널을 추정하기 위한 쉽고 효과적인 방법은 빔트레이닝(Beam Training) 방식이다. 빔트레이닝 방식은 위상 천이기(Phase Shifter)만을 이용하여 아날로그 영역에서 빔 채널 추정이 가능하다[5]-[6]. 이 방식은 송신기와 수신기가 순차적으로 지향성 아날로그 빔을 교체하면서 링크의 신호대잡음비를 최대화 하는 송수신 빔 짝(Beam Pair)을 찾는 방식으로, 이러한 접근은 IEEE 표준 802.11ad[7]와 802.15.3c[8] 등에 이미 사용되었다. 하지만, 이 방식은 모든 송수신 빔을 순차적으로 전송해야 하는 큰 오버헤드가 발생하는 단점을 갖는다. 이러한 순차적 빔트레이닝의 오버헤드 단점을 극복하기 위해 학계에서 밀리미터파 채널의 희소성(Sparsity) 성질을 활용한 다양한 채널 추정 기법들이 제안되었다.

밀리미터파 채널은, 기지국과 단말기 사이에 다수 방향의 전파 경로가 존재하는 rich scattering 환경과는 달리 매우 적은 수의 방향에서만 전파 경로가 존재하는 sparse 전파 특성을 가지며, 간략하게 아래와 같이 L개의 전파 경로가 존재하는 sparse MIMO 채널로 모델링할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \sqrt{N_t N_r} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_{RX}(\theta_l^r) \mathbf{a}_{TX}^H(\theta_l^t)$$

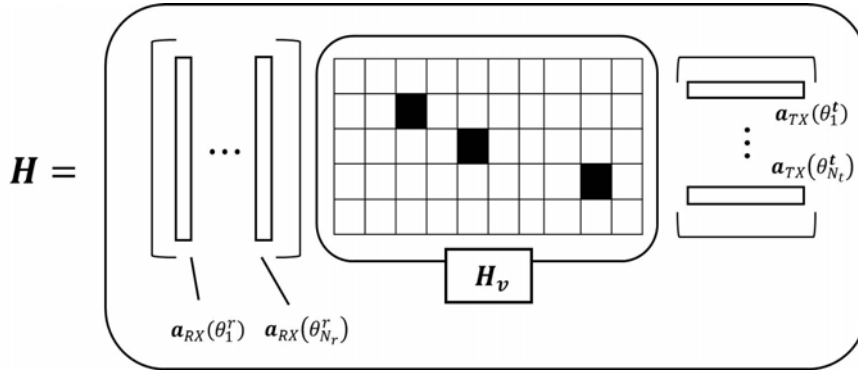
여기서, N_t 와 N_r 은 각각 송신기와 수신기의 안테나 개수, α_l 는 l 번째 전파 경로의 이득, θ_l^t 와 θ_l^r 는 각각 l 번째 전파 경로의 정규화된 도래각(AOA)과 발사각(AOD)을 의미하고, $a_{RX}(\cdot)$ 과 $a_{TX}(\cdot)$ 는 각각 수신 응답 벡터(response vector)와 송신 조종 벡터(stearing vector)를 의미한다. 전파 경로의 희소성 특성은 경로 수 L 이 송수신 안테나의 개수에 비해 매우 작다는 것을 의미한다. 즉, $L \ll N_t, N_r$ 을 의미한다. 위 채널 모델을 아래와 같은 가상 채널 표현(virtual channel representation)으로 다시 쓸 수 있다[3].

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}_R \mathbf{H}_V \mathbf{A}_T^H$$

여기서, \mathbf{A}_R 는 도래각을 $-1/2$ 부터 $1/N_r$ 간격으로 N_r 개 만큼 양자화 한 각도들에 대한 응답 벡터들을 늘어 놓은 행렬이고 \mathbf{A}_T 는 전체 발사각의 범위를 N_t 개 만큼 양자화 한 각도들에 대한 조종 벡터들을 늘어 놓은 행렬이다. 다시 채널의 희소성 특성은 이 \mathbf{H}_V 행렬이, 양자화의 오차를 무시하였을 경우, L 개의 성분만 0이 아닌 값을 가진다는 것을 의미한다. 흔히, 이 \mathbf{H}_V 행렬을 가상 채널 행렬(virtual channel matrix)이라 부른다. 이러한 양자화된 가상 채널 표현을 사용하면, 밀리미터파 대역 sparse MIMO 채널 추정 문제는 가상 채널 행렬의 $L(\ll N_t, N_r)$ 개의 0이 아닌 성분의 위치와 값을 구하는 문제로 변환될 수 있고, 이는 최근 sparse recovery 문제에 각광받고 있는 CS(Compressed Sensing) 이론을 적용하여 풀 수 있다[9]–[12]. 즉, \mathbf{H}_V 행렬을 구하는 채널 추정 문제는 벡터화(Vectorization)를 통해 송신 신호와 수신 빔포머로 결정되는 sensing matrix인 \mathbf{A} 와 $\mathbf{h}_v = \text{vec}(\mathbf{H}_V)$ 를 만족하는 \mathbf{h}_v 를 사용하여 아래와 같이 선형화된 꼴로 적을 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{h}_v + \mathbf{n}$$

여기서, \mathbf{h}_v 는 L 의 희소성을 가지게 되는데, 위 문제는 바로 CS에 있어 기준 문제의 꼴이 된다. 이러한 채널의 sparse 모델과 CS에 기반한 다양한 채널 추정 및 파일럿 신호 설계에 관한 연구가 진행되고 있는데(Adaptive Compressed Sensing[9], Random Compressive Sensing[10], [12], Joint Random and Adaptive Compressed Sensing[11]), 이러한 연구들이 빔트레이닝을 대체하여 실제 표준에 사용되기 위해서는 높은 추정 정확도의 sensing matrix를 야기하는 효과적인 송신 파일럿 빔 설계, 저복잡도의 CS 디코딩 알고리즘 등이 개발되어야 할 것으로 보인다. 또한, 특정 사용자가 장시간 동안 서비스를 받을 경우 매 슬롯 당 사용자의 채널을 새로 추정하는 것보다 기존의 채널 정보를 이용해 채널을 추적(Tracking)하는 것이 더욱 효율적이다. 이를 위해 sparse MIMO 채널이 시간에 따라 변화하는 밀리미터파 대역 시변 채널(Time-Varying Channel)에 대한 채널 추정 및 채널 트래킹 기법들이 연구되었다. 예로서, [13]에서는 시간에 따라 변화하는 sparse MIMO 채널의 전파 경로들의 도래각과 발사각의 변화를 아래와 같이 가정하고, 이에 대한



〈자료〉 한국과학기술원 자체 작성

[그림 2] sparse MIMO 채널과 가상 채널 행렬

채널 트래킹 기법이 제안되었다.

$$\theta_{n+1}^r = \theta_n^r + \Delta\theta_n^r, \theta_{n+1}^t = \theta_n^t + \Delta\theta_n^t, \Delta\theta_n^r, \Delta\theta_n^t \sim U(-\delta, \delta)$$

여기서, n 은 채널 블록의 시간 축의 인덱스, $X \sim U(-\delta, \delta)$ 는 X 가 $[-\delta, \delta]$ 구간에서 균등 분포로 생성되는 랜덤 변수임을 의미하고 δ 는 작은 값이 가정되었다. 또한, [14]에서는 시간에 따라 변화하는 가상 채널 행렬의 0이 아닌 성분들의 위치 변화를 Markovian random walk로 모델화하고, POMDP(Partially Observable Markov Decision Process) 기법 기반 Channel Estimation 및 트래킹을 위한 파일럿 설계 방식이 제안되었다.

앞서 언급한 많은 채널 추정 방식들이 다중 반송파 통신에서 한 부반송파 채널로 주어진 협대역 (Narrow Band) 채널 모델을 기반으로 제안되었다. 하지만, 밀리미터파 대역의 광대역 채널에서 Frequency-Selectivity를 이용하는 채널 추정 기법들의 필요성이 대두되었으며[15],[16], 현재 광대역 기반의 채널 추정 기법들에 대한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.

1. 5G NR 채널 추정

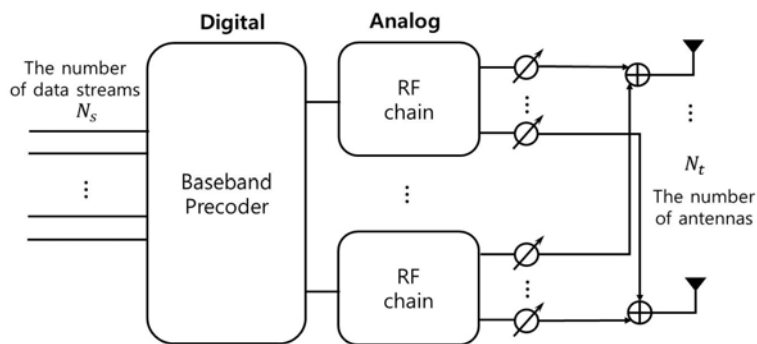
앞에서는 밀리미터파 대역의 무선 채널을 추정하는 이론적 연구에 대해서 간략히 살펴보았다. 이제, 5G NR에서 고려되는 현실적 채널 추정에 대해서 살펴본다. 수신기에서의 수신 신호는 송신 신호와 채널의 곱(좀 더 복잡하게는 Convolution)으로 나타난다. 이때 채널값을 알면 수신 신호로부터 송신 신호 값을 알 수 있고, 반대로 송신된 신호의 값을 미리 알고 있다면 수신기는 수신 신호로부터 채널값을 알 수 있다. 이러한 채널 추정 방식을 트레이닝 기반 채널 추정 방식이라고

부른다. 4G와 더불어 5G에서도 이러한 트레이닝 기반 채널 추정 방식을 사용하고 이를 위해서 수신기에게 미리 알려진 송신 신호 즉, 파일럿 신호 또는 기준 신호(Reference Signal: RS)를 전송한다. 이러한 기준 신호는 다시 셀 전체에 적용되는 셀 공통의 기준 신호(cell-specific reference signal)와 각 사용자별 기준 신호(User-Dedicated Reference Signal)로 구분되며, 이러한 다양한 기준 신호는 채널 추정뿐만 아니라 잡음 및 간섭 전력의 크기, 수신 신호대잡음비 추정 등에도 이용된다. 특히, 4G LTE에서 다중 안테나 MIMO 기술이 적용됨으로써 다양한 기준 신호의 필요성이 발생하였다. 기지국과 단말기 사이의 실제 채널은 프리코딩이 적용되지 않은 셀 공통의 기준 신호를 통해서 알 수 있다. 하지만, 다중 안테나 MIMO 기술이 적용될 경우 전송의 성능을 증가시키기 위해 송신단에서 각 사용자별로 MIMO 프리코딩(precoding)이 적용된다. 이 경우 수신을 위해서는 수신기는 기지국과 사용자 단말기 간의 실제 채널과 더불어 송신기에서 사용된 프리코더(precoder)도 알아야 한다. 이를 위해 기지국은 제어 채널을 이용해 각 사용자별로 사용된 프리코더 정보를 알려 주거나, 아니면, 프리코더 이전에 사용자별 기준 신호를 삽입함으로써 각 사용자 수신기는 채널과 프리코더의 곱을 한꺼번에 추정하여 디코딩할 수 있다.

이러한 기준 신호를 4G에서는 DMRS(Demodulation Reference Signal)로 명명하였다. 현재 논의가 진행되고 있는 5G NR 표준의 채널 추정을 위한 RS에서는 기존 LTE/LTE-A에서 CSI 획득을 위한 CRS가 사라지고, 크게 DMRS(Demodulation Reference Signal), CSI-RS(Channel-State Information Reference Signal), SRS(Sounding Reference Signal), 그리고 PTRS(Phase-Tracking Reference Signal) 등 4가지 RS가 채널 추정을 위해 사용된다. 밀리미터파 대역의 전파 특성상 셀 전체에 빔포밍 없이 어느 정도 성능의 채널 추정이 어렵기 때문에 CRS는 크게 의미가 없어진 것이다. 나머지 기준 신호에 대해서 간략히 설명하면, 먼저 DMRS는 기존 4G에서처럼 demodulation을 위한 기준 신호로 precoding 및 빔포밍을 포함하는 채널을 추정하기 위해 사용된다. 밀리미터파 통신의 경우 빔포밍의 폭이 좁기 때문에 더 많은 수의 다중 사용자 지원이 가능하데, 이를 위해 NR에서의 DMRS는 다중 사용자 멀티플렉싱을 지원함으로써 성능 향상을 제공한다. CSI-RS는 NR에서 하향 링크의 CSI 획득, DL beam management, time/frequency tracking, mobility 등의 다양한 기능을 지원한다. 송신기와 수신기의 실질적인 채널 정보를 효율적으로 획득하기 위해 NR에서는 aperiodic/semi-persistent/periodic 및 wideband/partial band 등 유연한 형태의 CSI-RS를 제공한다. SRS는 상향 링크에 대해 CSI-RS와 비슷한 역할을 수행한다. PTRS는 NR 빔포밍에 있어 중요한 기준 신호로, 발진기에서 발생하는 위상(phase) 잡음 및 변이를 보상하는 역할을 수행하는데 사용된다.

IV. 밀리미터파 대역 빔포머 설계 기술

앞서 언급하였듯이, 밀리미터파 대역 통신에서는 고주파 채널의 특성상 낮은 주파수 대역에 비해 큰 경로 손실이 발생하고, 이를 보완하기 위해서는 많은 수의 안테나를 활용한 고지향성 빔포밍 기술이 필수적이다. 이를 달성하기 위한 거대 배열 안테나 시스템 구현 방식은 크게 세 가지이다. 첫째는 모든 빔포밍에 따른 처리를 아날로그 영역에서 하는 full analog beamforming, 둘째는 모든 빔포밍 처리를 디지털 영역에서 수행하는 full digital beamforming, 셋째는 이 둘을 적절히 배합한 analog-digital hybrid beamforming이다. 이 중 full analog beamforming은 구현 복잡도는 상대적으로 낮으나, 임의의 빔포밍 행렬을 구현하기가 어렵다. Full digital beamforming의 경우 디지털 신호처리를 이용하여 임의의 빔포밍 행렬을 구현하여 사용자 간 간섭 및 전력 제어가 용이하나, 각 안테나와 ADC/DAC 사이에 RF 체인 하나씩을 요구하여 구현 복잡도가 높다. 그리하여, 현실적인 구현 방법으로 이 두 방식을 적절히 배합한 analog-digital hybrid beamforming이 고려되고 있다. 이 하이브리드 빔포밍 방식에서는 안테나의 수보다 적은 수의 RF 체인을 사용하는 데, 안테나 단과 DAC(Digital-to-Analog Converter) 사이에서는 아날로그 빔포머를 구성하고, DAC 이전의 디지털 영역에서 디지털 프로세싱을 통해 디지털 빔포머를 구현하는 방식이다. 이때 아날로그 빔포머의 경우 빔포밍에 필요한 각 복소변수로 나타나는 보정값(weight)은 가변 이득 증폭기(variable-gain amplifier)와 위상 천이기(phase shifter)로 구현할 수 있다. 뿐만 아니라, 구현의 복잡도를 줄이기 위해 위상 천이기만으로도 구현할 수 있다. 주로 아날로그 빔포밍을 통해서 사용자 채널에 잘 정합된 방향으로 빔을 형성하고, 완벽하지 못한 아날로그 빔포밍에서 발생하는 사용자 간 간섭 제거나 추가 프로세싱은 디지털 단에서 빔포밍이나 신호처리 등으로 구현한다. 여기



〈자료〉 한국과학기술원 자체 작성

[그림 3] 하이브리드 빔포밍 구조

서, 디지털 단에서 적용하는 기술의 종류에 따라 아날로그 빔포밍은 그에 맞게 적절히 이루어져야 한다. 디지털 단에서는 간단히 선형 프리코딩(linear precoding)을 적용할 수 있고, 더 높은 성능을 위해서는 Tomlinson-Harashima Precoding과 같은 비선형 신호처리 방식을 적용할 수도 있다. 하이브리드 빔포밍 방식은 훨씬 적은 RF 체인 수로 full digital beamforming에 근접하는 성능을 낼 수 있음이 알려졌다. 이러한 하이브리드 빔포밍 방식의 장점으로 인해 학계와 산업계에서 하이브리드 빔포밍에 관해 단일 사용자 경우, 다중 사용자 경우, 광대역 다중 사용자 경우와 같은 다양한 환경에서 광범위한 연구가 이루어졌고, 현재도 이루어지고 있다.

단일 사용자의 예를 간단히 살펴보면, 빔 설계 문제의 최적화 목표함수로 전송용량을 고려하여 주어진 빔 설계의 제약 조건 내에서 전송용량을 최대화하도록 빔을 설계할 수 있다. 하지만, 이러한 제약 하의 아날로그 빔과 디지털 빔의 설계 최적화 문제는 일반적으로 매우 어려운 문제이다. 이를 위해 다양한 방법의 우회 설계 기법들이 제안되었는데, [17]에서는 직접적으로 전송용량을 최대화하는 하이브리드 빔포머를 설계하지 않고 아래 수식과 같이 우리가 구할 수 있는 전송용량을 최대화하는 풀 디지털 빔포머와 설계하고자 하는 하이브리드 빔포머의 차이를 최소화하는 빔 설계 방법을 제안하였다.

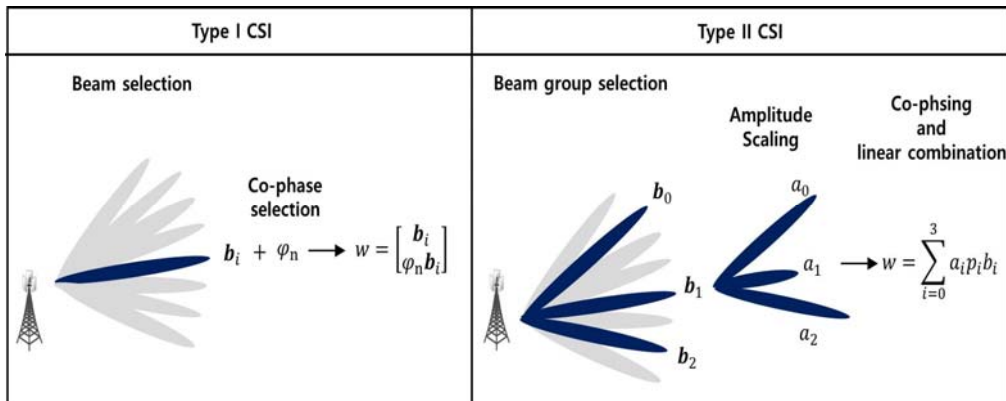
$$\min \|F_{opt} - F_{RF}F_{BB}\|_F$$

여기서, F_{opt} 는 최적의 풀 디지털 빔포머, F_{RF} 와 F_{BB} 는 각각 하이브리드 빔포머에서 아날로그 빔포머와 디지털 빔포머를 나타낸다. 단일 사용자 MIMO에서 더 나아가서 다중 사용자 환경에서 다수의 안테나를 사용하여 하이브리드 빔포머를 설계할 때 필요한 채널 피드백 오버헤드를 줄이기 위해 아날로그 빔을 미리 설계된 코드북 내에서 선택하는 방식이 제안되었다. [18]에서는 미리 설계된 아날로그 빔을 저장한 코드북 내에서 각 사용자의 채널의 가장 큰 고유벡터와 가장 정합된 아날로그 빔을 선택하고, 선택된 아날로그 빔에 기반하여 디지털 단에서 제로 포싱(Zero-Forcing) 빔을 설계함으로써 스트림간 또는 사용자간 간섭을 제어하는 하이브리드 빔포머 설계 방법을 제안하였다. 이 방식 외에도 현재 다양한 하이브리드 빔 설계 알고리즘들이 존재하며, 이러한 하이브리드 설계 방식은 매우 현실적인 방안으로 실제 5G NR에서의 적용 가능성은 매우 높다. 최근에는 가변 이득 증폭기를 사용하지 않고 위상 천이기 두 개를 사용하여 2보다 작은 임의의 이득과 위상을 구현하는 방식이 개발되어 아날로그 빔포머 구현의 복잡도가 한층 감소하였다[19]. 다중 반송파 통신 하이브리드 빔포밍의 경우 디지털 빔포머는 부반송파 채널별로 독립적으로 구현될 수 있으나, 아날로그 빔포머는 모든 부반송파 채널에 동시에 적용된다. 이러한 제약을 고려한 광대역 하이브리드 빔포머 설계에 관한 연구가 최근 진행되고 있다. 이와 같이 경로 손실이 큰 밀리미터파 대역에서 무선 통신을 가능케 하는 고지향성 빔포밍을 저전력, 저복잡도로 구현하는 많은 연구들이 진행되었으며, 이러

한 연구 결과들이 실제 5G 밀리미터파 대역 통신에 적용될 것으로 예상된다.

1. 5G NR 빔 형성 기법

이제 5G NR에서 고려되는 실질적 빔포밍 방식에 대해 간단히 살펴 보면, 현재 활발히 논의가 진행되고 있는 5G NR 표준에서는 기지국에서 많은 안테나를 사용하기 위해 편파 안테나(polarized antenna)를 고려하고, 이러한 많은 안테나 사용에 적합한 앞서 언급한 하이브리드 빔포밍 구조를 고려하고 있다[20]. 이렇게 많은 안테나를 사용할 경우 빔포밍에 필요한 채널 정보 피드백을 위해 큰 오버헤드가 발생하기 때문에, 채널 정보를 그대로 피드백하는 것이 아니라, 채널 정보 피드백을 위한 코드북(codebook)을 설계하였다. 기본적으로 표준상에서 논의된 코드북은 아날로그 빔 벡터들로써 DFT를 기반으로 하는 빔을 사용한다. 기지국에서는 여러 개의 안테나 패널을 고려하는데 각 안테나 패널은 수직에 해당하는 안테나 패널의 행의 수 N_1 , 수평에 해당하는 안테나 패널의 열의 수 N_2 , 추가적으로 각 안테나에 대응되는 편파 안테나가 존재하여 총 $N_t=2 \times N_1 \times N_2$ 개의 안테나로 이루어진다. 이때 아날로그 빔포머는 각각의 수직, 수평으로 2π 만큼의 공간을 가장 간단하게 각각 N_1 , N_2 개의 크기로 공간을 분리하는 DFT 빔을 사용하고, 추가적으로 오버샘플링을 통해 각 DFT 빔 사이의 빈 공간을 채워 넣는 빔을 사용한다. 따라서, 오버샘플링 정도에 따라 전체 공간을 몇 개의 각도로 나누는지가 결정된다. 이때 편파 안테나의 경우 같은 방향의 빔을 공유하게 되며 하나의 편파 안테나 그룹과 다른 편파 안테나 그룹이 형성하는 빔 간의 추가적인 위상 변환을 위한 값이 들어가게 된다. 이러한 추가적인 위상 변환을 위한 값의 경우 전체 대역폭이 아닌 sub-band



〈자료〉 한국과학기술원 자체 작성

[그림 4] Type I, II CSI 코드북 구조

라는 몇 개의 부반송파 그룹별로 피드백이 이루어지게 된다. 즉, 빔 방향에 관련된 피드백 값이 이 아날로그 빔포머 설정을 위한 값이고, 각 부반송파 그룹별로 피드백을 하게 되는 위상 변환 값이 디지털 빔포머를 위한 피드백 값이 된다.

표준에서는 채널 정보의 피드백 양을 조절하기 위해 [그림 4]와 같이 크게 두 가지 형태로 코드북을 설계한다. 먼저 Type I CSI 코드북은 각 아날로그 빔을 그대로 사용하되 편파 안테나로 사용하는 빔의 위상을 서로 다르게 하는 것만을 고려하였지만, Type II CSI 코드북은 아날로그 빔의 위상뿐만 아니라 선형 결합까지 고려하여 코드북을 설계한다. 이외에도 Type II CSI 코드북에서는 DFT 빔을 기반으로 하지 않는 방식의 빔 설계를 위한 코드북도 지원한다.

V. 결론

본 고에서는 5G를 이루는 많은 기술들 중에서 물리계층 밀리미터파 대역 통신 기술에 관한 연구 동향을 간략히 살펴보았다. 밀리미터파 대역 통신은 6GHz 이상의 주파수 대역을 사용하여 넓은 대역폭을 제공하고, 경로 손실은 크지만 고지향성 빔포밍을 사용하여 이를 보상해 줄 수 있다. 희소한 밀리미터파 무선 채널을 효율적으로 빨리 추정하는 빔트레이닝 기술, 저복잡도로 고지향성의 빔포밍을 달성하는 하이브리드 빔포밍 기술, 이에 필요한 파일럿 신호 설계 및 피드백 설계 기술 등이 이미 높은 수준에 도달해 있다. 3GPP에서도 관련 기술을 바탕으로 표준을 작성하고 있으며, IMT-2020 표준에 적용되는 것이 기대된다. 밀리미터파 대역 통신은 기존 저주파 대역의 제어 시그널링과 결합되어 작은 크기의 핫스팟 셀에서 이전까지 셀룰러시스템이 제공하지 못했던 엄청난 데이터 전송속도를 제공해 줄 것이다. IMT-2020의 요구사항을 충족시키고 작은 스마트폰 내에서 밀리미터파 통신을 실현하기 위해 관련 후속 연구가 지속적으로 필요하고, 앞으로도 이 연구 분야에서 많은 성과가 나올 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] Recommendation ITU-R M.2083-0, "IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Sep. 2015.
- [2] PCG38_02, Summary minutes, decisions and actions from 3GPP PCG Meeting#37, held in London, UK, on 20 Oct. 2016.
- [3] R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems," IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol.10, no.3, Apr. 2016, pp.436-453.

- [4] 3GPP TS 38.211 "NR; Physical channels and modulation," V15.0.0, Dec. 2017.
- [5] J. Wang et al., "Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.27, no.8, Oct. 2009, pp.1390-1399.
- [6] L. Chen, Y. Yang, X. Chen, and W. Wang, "Multi-stage beamforming codebook for 60 GHz WPAN," in Proc. 6th Int. ICST Conf. Commun. Netw. China(CHINACOM), Aug. 2011, pp.361-365.
- [7] E. Perahia, C. Cordeiro, M. Park, and L. L. Yang, "IEEE 802.11ad: Defining the next generation multi-Gbps Wi-Fi," in Proc. 7th IEEE Consum. Commun. Netw. Conf.(CCNC), Jan. 2010, pp.1-5.
- [8] IEEE 802.15 WPAN Millimeter Wave Alternative PHY Task Group 3C(TG3c). [Online]. Available: http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c_contributions.html
- [9] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, Jr., "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems," IEEE J. Sel. Topics Signal Process., vol.8, no.5, Oct. 2014, pp.831-846.
- [10] A. Alkhateeb, G. Leusz, and R. W. Heath, "Compressed sensing based multi-user millimeter wave systems: How many measurements are needed?" in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process.(ICASSP), Brisbane, QLD, Australia, Apr. 2015, pp.2909-2913.
- [11] Y. Han and J. Lee, "Two-stage compressed sensing for millimeter wave channel estimation," in Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Jul. 2016, pp.860-864.
- [12] D. E. Berraki, S. M. D. Armour, and A. R. Nix, "Application of compressive sensing in sparse spatial channel recovery for beamforming in mmWave outdoor systems," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.(WCNC), Apr. 2014, pp.887-892.
- [13] J. He et al., "Millimeter wave MIMO channel tracking systems," in Proc. IEEE GLOBECOM Workshop, Dec. 2014, pp.416-421.
- [14] J. Seo, Y. Sung, G. Lee, and D. Kim, "Training beam sequence design for millimeter-wave MIMO systems: A POMDP framework," IEEE Trans. Signal Process., vol.64, Mar. 2016, pp.1228-1242.
- [15] Z. Gao, C. Hu, L. Dai, and Z. Wang, "Channel estimation for millimeterwave massive MIMO with hybrid precoding over frequency-selective fading channels," IEEE Commun. Lett., vol.20, no.6, June 2016, pp.1259-1262.
- [16] K. Venugopal, A. Alkhateeb, N. G. Prelcic, and R. W. Heath, Jr., "Channel estimation for hybrid architecture based wideband millimeter wave systems," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.35, no.9 Sep 2017.
- [17] O. E. Ayach, R. W. Heath Jr., S. A.-Surra, S. Rajagopa, and Z. Pi, "Low complexity precoding for large millimeter wave MIMO systems," IEEE International Conference on Communications(ICC), Jun. 2012.
- [18] A. Alkhateeb, G. Leus and R. W. Heath Jr., "Limited feedback hybrid precoding for

- multi-user millimeter wave systems,” IEEE Trans. On. Wireless Commun., Nov. 2015.
- [19] X. Yu, J Zhang and K. B. Letaief, “Partially-connected hybrid precoding in mm-wave systems with dynamic phase shifter networks,” IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications(SPAWC), Jul. 2017.
- [20] 3GPP TS 38.214 “NR; Physical layer procedures for data,” V15.0.0, Dec. 2017.