

Extreme MIMO 시스템에서의 CSI 획득 운용 모드에 대한 고찰

신우람, 조원철, 김민식, 명정호, 고영조
한국전자통신연구원

{w.shin, woncheol, msk, jhmyung, koyj}@etri.re.kr

On the Modes of Operation for CSI Acquisition in an Extreme MIMO System

Wooram Shin, Woncheol Cho, Minsik Kim, Jungho Myung, Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문에서는 E-MIMO(Extreme Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 단말들의 배치 및 능력에 따라 적절한 CSI(Channel State Information) 획득 방식을 제공할 수 있는 CSI 획득 운용 모드들을 논의한다. CSI 획득 운용 모드는 크게 SRS(Sounding Reference Signal) 기반의 채널 측정 방식과 CSI-RS(CSI Reference Signal) 기반의 CSI 보고 방식으로 구분되며, 후자는 다시 CRI(CSI-RS Resource Indicator) 미포함 방식, 단일 CRI 기반 방식, 다중 CRI 기반 방식으로 세분화될 수 있다. E-MIMO 시스템에서는 초다수의 안테나 소자와 이보다 적지만 매우 많은 TXRU(Transceiver Unit)들이 사용되며, 이에 따라 각 안테나 포트에서 전송되는 물리 신호 내지 물리 채널은 안테나 포트 가상화 및/또는 TXRU 가상화를 통해 빔포밍되어 전송된다. 본 논문에서는 CSI 획득 방식별 안테나 포트 및 TXRU 가상화의 특징을 살펴보고, 서로 다른 CSI 획득 방식이 설정된 단말들에 대한 동시 스케줄링 시 고려해야 할 제약과 TXRU 및 안테나 포트 가상화에 대해 논의한다.

I. 개요

2023년 12월 ITU-R WP5D에서 작업한 IMT-2030 프레임워크 권고안의 승인을 시작으로 [1], 6세대 이동통신 시스템(6G)을 성공적으로 개발하기 위해 전세계적으로 산학연 그리고 3GPP 및 O-RAN Alliance와 같이 관련 표준 단체에서 연구 개발을 활발히 진행하고 있다. 5G의 FR1과 유사한 커버리지를 제공하면서 향상된 대역폭을 제공할 수 있는 Upper Mid-Band를 발굴하여 물입형 통신과 AI 서비스 확산에 따른 트래픽 수요 증가에 대응하기 위해 E-MIMO(Extreme Multiple-Input Multiple-Output)가 주요 후보 기술로서 주목받고 있다 [2]. 본 논문에서는 실제 시스템에서 E-MIMO 기술을 효과적으로 활용하는데 있어 필수적인 CSI(Channel State Information) 획득 운용 방식을 살펴보고 MU-MIMO(Multi-user MIMO) 스케줄링을 위해 고려해야 할 사항들을 논의하고자 한다.

II. CSI 획득을 위한 운용 방식

E-MIMO 시스템에서는 넓은 커버리지 제공과 더불어 셀 평균 주파수 효율 및 셀 경계 사용자 주파수 효율 모두를 향상시키기 위해 초다수의 안테나 소자로 구성된 안테나 어레이 기반의 기지국 시스템을 고려하고 있다. 안테나 소자 수만큼의 TXRU(Transceiver Unit)들로 기지국 시스템을 구성하기 위해서는 비용 증대와 함께 이를 구동하기 위한 소비 전력도 증가되므로, 3GPP LTE-Advanced (Pro) [3] 및 3GPP 5G NR 설계 시 [4], 안테나 소자보다 적은 수의 TXRU 들로 구성된 하이브리드 빔포밍 구조를 기본적으로 고려하였다. 본 절에서는 하이브리드 빔포밍 기반의 E-MIMO 시스템에서의 CSI 획득을 위한 운용 모드들에 대해 논의한다.

하향링크 전송에 있어 하이브리드 빔포밍이 적용된 주어진 자원 요소에 대한 유효 채널 행렬 \mathbf{H}_{eff} 는 아래 식과 같이 일반화하여 표현될 수 있다.

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{F} \mathbf{Z} \mathbf{A} \mathbf{H}_{\text{CFR}} \mathbf{B} \mathbf{V} \mathbf{W} \mathbf{P} \quad (1)$$

위 식에서 \mathbf{H}_{CFR} 는 주어진 자원 요소에서의 채널 주파수 응답 행렬을 의미하고 자원 요소 인덱스의 표기는 생략한다. \mathbf{B} 는 TXRU에서 안테나 소자로의 가상화(즉, 송신 TXRU 가상화) 행렬을 의미하고, \mathbf{V} 는 안테나 포트(Antenna Port: AP)에서 TXRU로의 가상화(즉, 송신 AP 가상화) 행렬을 의미한다. 상향링크 수신에 있어서는 각각 수신 TXRU 가상화 및 수신 AP 가상화에 해당된다. 또한, \mathbf{W} 는 MIMO 프리코딩 행렬을 의미하고, \mathbf{P} 는 레이어 별 전력 할당 행렬을 의미한다. 마찬가지로 단말 수신에 있어, \mathbf{A} 는 안테나 소자에서 TXRU로의 가상화(즉, 수신 TXRU 가상화) 행렬의 의미하고, \mathbf{Z} 는 TXRU에서 AP로의 가상화(즉, 수신 AP 가상화) 행렬을 의미하며, \mathbf{F} 는 수신 필터링 행렬을 의미한다. 단말의 경우 FR1 대역에서는 안테나 스위칭 목적 외에 빔을 형성하기 위한 TXRU 가상화 내지 AP 가상화를 적용하지 않는 것이 일반적이다. TXRU 가상화는 채널 대역폭 내에서 주파수 공통의 아날로그 빔을 형성할 수 있고 AP 가상화는 주파수 선택적인 디지털 빔을 형성할 수 있다.

하향링크 데이터 채널 전송을 위한 CSI 획득 방식은 크게 채널 호혜성(reciprocity)을 이용한 SRS(Sounding Reference Signal) 측정 기반의 CSI 획득과 CSI 보고 기반의 CSI 획득으로 나눌 수 있다. 전자는 단말에 의해 전송되는 SRS를 기지국이 수신하여 채널 추정을 통해 CSI를 획득하므로 전체 AP에 대한 채널을 온전히 획득할 수 있는 장점이 있는 반면, 단말의 상대적으로 낮은 송신 전력에 의해 커버리지가 제약되기 때문에 셀 경계 단말에게는 해당 방식을 적용할 수 없다. 물론, 협대역 SRS 또는 SRS 주파수 호핑(hopping) 또는 SRS 반복 전송과 같은 SRS 커버리지 증대를 위한 기법들을 적용할 수도 있으나, 셀 내 서빙(또는 활성화된) 단말 수가 많거나 단말 안테나 수가 많은 경우 SRS 오버헤드가 지나치게 증가하는 문제가 있다. 한편, CSI-RS 기반의 CSI 획득은 기지국이 전송하는 CSI-RS를 단말이 수신하여 채널 추정을 통해 CSI를 측정하고 이를 기지국에게 보고하는 방식으로서, 각 AP에서 셀

전방위로 넓은 빔(예를 들면, 안테나 서브어레이를 통해 형성되는 아날로그 빔)의 CSI-RS 를 전송하거나, 일부의 서로 다른 AP 들로 구성되는 CSI-RS 자원마다 서로 다른 셀 영역을 커버하는 (상대적으로) 좁은 빔의 CSI-RS 를 전송할 수 있다. 전자는 전체 포트가 동일한 빔으로 CSI-RS 를 전송하므로 단말은 별도의 빔 선택 없이, 즉, CRI(CSI-RS Resource Indicator)를 포함하지 않는 CSI 를 보고한다. 후자에서 CSI-RS 송신 빔은, 한 CSI-RS AP 가 복수의 TXRU 들과의 AP 가상화를 통해 복수의 TXRU 레벨의 아날로그 빔들에 추가적으로 디지털 빔포밍이 적용되므로, 합성 빔 관점에서 TXRU 레벨의 아날로그 빔보다 좁은 빔폭을 가지면서 더 높은 빔포밍 이득을 달성할 수 있다. 따라서 후자에서는 단말이 가장 좋은 CSI-RS 빔(즉, 이에 대응하는 CSI-RS 자원)을 선택하고 해당 CRI 를 포함한 CSI 를 보고한다. 여기서, 보고되는 CSI 는 선택된 CRI 에 대응하는 CSI-RS 자원에서 측정된다. 3GPP Release 18 까지는 32 개 까지의 안테나 포트들에 대해 단일 CRI 및 이에 대한 CSI 보고를 지원하고 있으나 [4], 현재 표준화가 진행중인 3GPP Release 19 에서는 128 개까지의 안테나 포트들에 대해서는 공간 해상력 증가로 인해 복수의 CRI 및 이들 각각에 대한 CSI 보고를 지원하고 있다 [5]. CSI 보고 기반 채널 획득은 CSI 가 실리는 UCI(Uplink Control Information) 전송에 의해 커버리지가 제약되는데, UCI 는 전파 손실과 채널 페이딩에 개인하도록 채널 부호화 및 디지털 변조가 적용되어 전송되므로 SRS 채널 추정보다 더 낮은 동작(또는 요구) SNR 을 가진다. 따라서 TDD(Time Division Duplexing) 시스템이라 하더라도 셀 경계 단말을 위해서는 CSI 보고 기반의 CSI 획득 방식을 운용하는 것이 바람직하다. 또한, SRS 용량이 부족한 경우, 셀 중심 단말을 위해서 TXRU 가상화만 적용된 넓은 빔의 CSI-RS 를 전송하는 비-CRI(non-CRI) 기반의(즉, CRI 를 포함하지 않는) CSI 보고를 설정할 수도 있다.

III. 다양한 CSI 획득 운용 모드를 위한 MU-MIMO 스케줄링 고려사항

본 절에서는 셀 내 단말들의 다양한 배치 상황(즉, 커버리지)들을 고려한 단말 특정한 CSI 획득 방식들의 운용 시 MU-MIMO 를 위한 동시 스케줄링에 있어 고려해야 할 사항들을 논의한다.

SRS 측정의 경우, SRS 수신을 위한 TXRU 가상화 및/또는 AP 가상화를 겪은 채널이 추정된다. 여기서, TXRU 수만큼의 AP 를 사용하는 경우, 공간 영역에서의 채널 표현력이 가장 높다. 그러나 SRS 커버리지가 충분하지 않은 경우에는, 수신 신호의 수신 방향에 AP 를 정렬할 수 있도록 AP 가상화를 적용함으로써, 각 AP 의 수신 채널 SNR 을 향상시켜 채널 추정의 정확도를 높일 수 있다. 한편, 비-CRI 기반 CSI 보고의 경우 CSI-RS 송신을 위한 TXRU 가상화를 겪은 채널에 대한 CSI 가 보고되고, 단일 또는 다중 CRI 기반 CSI 보고의 경우에는 CSI-RS 송신을 위한 TXRU 가상화 및 AP 가상화를 겪은 채널에 대한 CSI 가 보고된다. CSI 획득 오차를 고려함에 있어, 앞선 절에서 논의한 바와 같이, 각 CSI 획득 방식의 커버리지 한계는 상이하다. 따라서 단말의 신호 환경 지표(geometry)에 따라 단말 특정하게 CSI 획득 방식을 설정해야 하므로, 기지국이 획득한 CSI 는 서로 다른 TXRU 가상화 및/또는 AP 가상화를 거친 결과일 수 있다. 특히, Upper Mid-Band 대역에서 Lower Mid-Band 내지 Low-Band 에 상응하는

커버리지를 제공하기 위해서는 TXRU 가상화에 의한 빔포밍 이득이 여러 방향에 제공될 수 있도록 격자 빔 기반으로 운용될 수 있어야 한다. 일반적으로 한 AP 관점에서 한 시점에 주파수 공통의 TXRU 가상화가 적용되어야 하지만, 초다수의 TXRU(예를 들면, 256 개)로 구성된 경우 TXRU 특정한 가상화를 적용할 수 있다. 셀 내 단말의 공간적인 배치를 고려하여 TXRU 별 수평/수직 방향에 대한 효율적인 빔 할당(즉, 각 빔에 해당하는 TXRU 가상화)을 통해 한 시점에 다양한 방향에 위치한 단말을 동시에 스케줄링할 수 있다.

단말들이 MU-MIMO 를 통해 동시 스케줄링이 되기 위해서는 적어도 단말 간 동일한 TXRU 가상화 적용 하에서 CSI 획득이 수행되어야 한다. 그렇지 않은 경우 (1)로부터 유추할 수 있듯이 유효 채널 행렬만을 가지고 동시 스케줄링이 되더라도 동일한 시간 자원에서 동시 전송이 불가능하다. 따라서, TXRU 가상화가 상이한 단말들에 대해서는 동시 스케줄링 그룹을 분리해야 한다. 한편, TXRU 가상화는 동일하게 적용하면서 AP 가상화가 달리 적용된 단말들에 대해 동시 스케줄링을 가능케 하기 위해서는, AP 가상화를 적용하지 않고 CSI 를 획득할 수 있는(즉, SRS 측정 또는 비-CRI 기반 CSI 보고에 해당) 단말들의 경우, AP 가상화가 적용된 동시 스케줄링 대상 단말들의 CSI 보고에 포함된 CRI(들)에 대응하는 안테나 포트들에 대해서는 해당 AP 가상화를 적용한 유효 채널을 고려하여 동시 스케줄링을 수행한다. 또한, 서로 다른 신호 환경 지표를 갖는 단말들은 동일한 TXRU 가상화를 적용하더라도 한 AP 를 구성하는 서브어레이 기반 어레이의 크기가 서로 다른 경우 서로 다른 AP 가상화가 적용될 수 있어 상이한 AP 가상화가 적용된 단말 간 동시 스케줄링이 불가능할 수 있는데, 이를 해결하기 위해 계층(nested) 구조 기반 하에 AP 가상화를 적용할 수 있다. 뿐만 아니라, CRI 기반 CSI 보고에서 선택되지 않는 CRI 에 대응하는 CSI-RS 자원들의 안테나 포트들에 대한 유효 채널은 0 의 값으로 대체됨에 따라, MU-MIMO 프리코딩에서 해당 간섭들에 대한 간섭 처리가 불가능하므로 CSI 측정 시 해당 간섭을 직간접적으로 고려할 수 있는 운용이 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.RS-2024-00397216, Upper-mid Band Extreme massive MIMO(E-MIMO) 시스템 기술 개발).

참 고 문 현

- [1] ITU, "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond," *Rec. ITU-R M.2160-0*, Nov. 2023.
- [2] Z. Wang *et al.*, "A tutorial on extremely large-scale MIMO for 6G: Fundamentals, signal processing, and applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 26, no. 3, pp. 1560–1605, 3rd Quart., 2024.
- [3] 3GPP TSG RAN, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures," 3GPP TS 36.213 V18.3.0, Jan. 2025.
- [4] 3GPP TSG RAN, "NR; Physical layer procedures for data," 3GPP TS 38.214 V18.6.0, Mar. 2025.
- [5] RP-242394, WID revision: NR MIMO Phase 5, RAN#105, Sept. 9–12, 2024.