

6G 이동통신 시스템을 위한 단일화된 대규모 다중 안테나 시스템 설계 방안에 대한 연구

박소민, 유철우*
명지대학교 정보통신공학과

thalsi@mju.ac.kr, *cwyou@mju.ac.kr

A Study of Unified Massive MIMO Design for 6G Mobile Communications Systems

Somin Park, Cheolwoo You*
Myongji University

Abstract

차세대 (5G 및 6G) 기지국은 다양한 환경하에 적응적으로 대처하기 위해 다양한 방식의 다중 안테나 시스템(Multiple-input multiple-output: MIMO)들을 사용하여야 한다. 그러나, 현존하는 MIMO 기술들은 그 구조와 운용 방식에 많은 차이가 존재하여 필요한 요소들을 모두 구비하기에는 많이 어려움이 존재한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해, 본 논문에서는 다양한 MIMO 방식들을 하나의 플랫폼 하에 사용할 수 있도록 해주는 단일화된 대규모 다중 안테나 시스템(Unified Massive MIMO)을 설계하기 위해 고려해야 하는 중요 사항들에 대해서 고찰한다.

I. Introduction

6G 무선접속 기술의 기본 철학 중의 하나는 다양한 환경 하에서 동작하기 위한 공통 모드(Common mode)를 지원하는 기술들의 개발이라 할 수 있다. 이를 위해서 가장 중요한 핵심 요소기술인 다중 안테나 시스템(Multiple-input multiple-output: MIMO)은 다양한 종류의 안테나 및 사용자, 그리고 서비스를 지원할 수 있는 유연하고 통합된 구조를 가져야 한다. 뿐만 아니라 특정 요소기술 내에서도 채널 환경이나 무선 액세스 터미널(RAT)의 종류에 따라 지원 가능한 여러 mode 들이 존재하는데 다양한 RAT 간의 상호 운용성을 지원할 수 있어야 한다. 이는 대규모 다중 안테나 시스템(Massive MIMO System)의 활용을 통해 달성 가능하다고 여겨지고 있다.

Massive MIMO 의 동작 시나리오를 고려한다면 RAT 별로 다양한 안테나 수, 수신 알고리즘, 피드백 채널 환경이 존재할 수 있다. 표 1 은 본 연구에서 고려한 주요 시나리오에 대한 설명이다. 이런 이중 터미널을 기지국에서 상황에 맞게 지원할 수 있으려면 송신기의 기본 구조는 같거나 비슷해야 하고 피드백 채널에 따라 송신기가 데이터 전송률, 빔의 방향, Diversity-multiplexing 등을 적절하게 지원하는 것이 필요하며, 향후 새롭게 추가될 시나리오를 지원하기 위해 개방형 구조를 가져야 할 것이다. 6G 에서 제일 강력한 경쟁상대인 미국의 Qualcomm Inc. 와 유럽연합은 이러한 Massive MIMO 의 가장 중요한 요구사항을 미리 잘 파악하고 있고 거기에 맞는 적절한 특허를 보유하고 있다. 먼저 Qualcomm 을 살펴보면, OL(Open-loop)-MIMO 와 SCW(Single Code Word), MCW(Multiple Code Words)로 대변되는 CL(Closed-loop)-MIMO 기술, 그리고 Matched-filter based precoding 이라는 SDMA(Spatial

Division Multiple Access)를 위한 기술, 그리고 DPC(Dirty paper coding) [1]를 위한 ES(Eigenvector Steering) 기술을 보유하고 있는데, 이 네 종류 모두 Qualcomm 이 보유하고 있는 Common 기술 기반 위에서 동작하도록 설계되어 있다. 반면에 OL-MIMO 의 핵심이라고 할 수 있는 Diversity-spatial multiplexing (SM) order 를 조절하기 위해서 Effective (virtual) antenna 개념을 도입하여 채널 상황에 맞게 자유롭게 적용하고 있다. 이러한 단일화되고 유연한 구조는 유럽연합 쪽에서도 동일하게 발견할 수 있는데, 특히 LDC(linear dispersion code) [2] 계열을 사용함으로써 유연성을 얻고자 하고 있다.

표 1.8 가지 동작 시나리오 및 대표 변수들

시나리오	셀 타입	커버리지	전파 환경	이동성
Mobile1	Cellular (Large Cells)	WAN	Rural	Low/Medium
Mobile2	Cellular (Midsized Cells)	MAN	Urban/Suburban/Rural	Low/Medium
Nomadic1	Isolated (Small Cells)	Hot spot, LAN	Urban/Indoor/Outdoor to indoor	Medium/High
Nomadic2	Cellular (Small Cells)	Indoor/Around building	Indoor/Indoor to outdoor	Medium/High
Relay	Cellular/Isolated	Range 확장, 채도인 완화	Urban	Low/Medium/High
Moving Network	Isolated	Bus, Subway, Train, Plane	LOS	Low/Medium/High
Ad-Hoc	Isolated	TRS, P2P	Indoor/Indoor to outdoor/Urban	Low/Medium/High
Broadcasting	Cellular/Isolated	Broadcasting	Urban/Suburban/Rural	Low/Medium

위와 같은 요구사항과 동향을 종합해 볼 때 6G 에서의 Massive MIMO 는 여러 mode 들 사이의 변경을 쉽고 유연(flexible)하게 할 수 있는 하나의 플랫폼을 가진 단일화된(unified) 형태로 가야 할 것이다. Diversity, SM, 그리고 둘을 절충한 하이브리드 방식을 미리 구성해 놓고 피드백의 정보에 따라 선택해서 사용하는 기존의 방식들은 다양한 이중 RAT 을 지원하는 6G 에서는 동작하지 않거나 성능이 제한적일 가능성이 높다. 뿐만 아니라 같은 셀(cell) 내에서도 Geometry 에 따라 피드백 채널(feedback channel)의 상태와 그로 인한 사용할 수 있는 MIMO 기술들 역시 달라지기 때문에 Geometry 통합 관점에서도 유연하고 단일화된 구조로 가야 함을 알 수 있다.

표 2. MIMO 송신 기술 분류

분류	정의
Space-Time Block Code	Full diversity, rate 1 을 가지는 code 류
BLAST (SM)	Full multiplexing, no diversity 를 가지는 코드류
LDC	STC(Space-Time Code)를 dispersion matrix 의 선형적 합으로 표현 가능한 종류
Perfect STC (PSTC)	Cyclic division algebra 를 이용해 design 한 full-rate, full-diversity code
SDM	SU-MIMO 에서 precoder codebook index, rank adaptation 정보, 평균 채널 정보만 피드백 받는 경우의 프리코딩 방법
Per Ant. (Stream) Rate Control	SU-MIMO 에서 안테나별 혹은 스트림별 전송속도를 조절할 수 있는 방법
SDMA	한 개의 수신안테나를 가진 MU-MIMO
MU-MIMO w/ Multiple Rx Ant. per user	SDMA 와 같으나 각 유저가 안테나를 1 개~Tx 안테나만큼 가지는 경우. SDM 과 SDMA 를 합한 형식으로 볼 수 있음
DPC	송신단에서 CSI 혹은 그에 준하는 정보를 알고 있을 때의 간섭 제거 기술

표 3. MIMO 수신 기술 분류

분류	정의
Linear Receiver	선형 방식의 수신기로, 채널 matrix 의 inverse 를 곱하거나 거기에 noise variance 를 더한 형태를 가지고 있음
Near-ML Receiver (Sphere Decoder 등)	최적 방식인 ML 의 복잡도는 줄이고 성능은 유사하게 얻는 방식 (여전히 복잡도는 높음)
SIC	각 Layer 별로 순차적으로 decoding 을 수행. MMSE 등과 결합해서 복잡도와 성능 사이에서 적당한 tradeoff 를 형성
Joint Detection w/ Optimized FEC	FEC(Forward error correction)에 필요한 LLR(Log likelihood ratio) 계산을 위해 soft bit 을 발생시키는 방식
Mode Selection based on rank	Tx 가 Diversity mode 로 보낼 것인지 Spatial Multiplexing mode 로 보낼 것인지 Rx 가 정해서 feedback 하는 기술
Antenna Subset Selection	Mode Selection based on rank 에 더해서, 어떤 Antenna 로 보냈을 때 Throughput 이 최대가 되는지 결정하는 알고리즘

II. Unified MIMO Design

단일화된 MIMO 설계를 위해 고려해야 하는 중요 MIMO 송신 기술과 수신 기술을 표 2 와 표 3 에 각각 간략히 기술하였다. 표 2 에서, LDC 와 PSTC(Perfect Space-Time Code) [3]는 모두 송신기가 채널 정보를 약간 알고 있다는 가정이며, 이는 기존의 의미에서 보면 OL-MIMO 는 아니지만 Antenna selection bit 혹은 Spatial stream bit 의 수 까지를 받는 것은 OL-MIMO 라고 정의를 하였다. 따라서 LDC, PSTC 모두 OL-MIMO 의 범주에 포함된다. 그리고 CL-MIMO 는 다시 SU(Single User)-MIMO, MU(Multi-user) MIMO 로

나뉘는데 SU-MIMO 는 SDM(Spatial Division Multiplexing)이라고 칭하기도 하고 MU-MIMO 는 SDMA 라고 칭하기도 한다.

표 3 에서, 수신안테나 수가 송신안테나보다 적을 경우나 SIC(Successive Interference Canceller), ML(Maximum likelihood) 같은 고성능 수신기를 사용하지 않는 RAT 의 경우에는 SDMA 를 쓰는 것이 자원 관리에 더 효율적이다. 지금까지의 SM 수신기는 구현이 너무 복잡하거나 성능 열화가 심하거나 혹은 둘 모두이기 때문에 성능을 떨어뜨리는 주범으로 여겨져 왔다. 구현 복잡도 측면에서 ML 방식은 수신기에서 수행하는 연산의 수가 지나치게 높은 반면에 성능은 최적이므로 많은 수신 알고리즘이 성능은 ML 수준으로 유지하면서 복잡도는 획기적으로 낮추는 연구를 수행하여 왔다. 현재 가장 널리 고려되는 기술이 MMSE(Minimum mean square error)-OSIC(Ordered SIC)이다. MMSE 는 스트림 별 SNR(Signal-to-noise ratio)을 최대화할 수 있는 기술이고, OSIC 는 각 스트림별 SNR 순서대로 간섭 제거를 수행하여 오류 확률을 최소화시키지만, 성능은 최적 대비 많은 차이가 있기 때문에 ML 에 기반을 둔 준최적(Sub-optimal) 방식의 알고리즘이 많이 연구되고 있는 실정이다.

III. 결론

본 연구에서는 6G 이동 통신 시스템의 핵심 기술이라 할 수 있는 Unified Massive MIMO 를 설계하기 위해 고려해야 하는 중요한 사항들을 송수신 알고리즘 관점에서 고찰하였다. Unified Massive MIMO 의 기본 철학은 OL, CL 에 관계없이 동일한 송신기 모양을 가지는 데 있다. 즉 활용 가능한 피드백 양과 SNR 값에 따라 가능한 프리코더(Precoder)의 수를 조절하거나 Multiplexing order 를 조절할 수 있다. 그리고 가능한 피드백 양과 SNR 값에 따른 임계치(Threshold)를 적절히 정할 수 있으면 OL 과 CL 은 동일한 구조로 설계할 수 있다. 이 Threshold 를 정하는 대표적인 해결책은 MIMO 의 채널 경화(Channel hardening)을 이용해 사용자의 수에 따라 각 사용자별 피드백을 정하고 스케줄링을 정하는 것인데 [4], 각 사용자별 SINR(Signal-to-interference-plus-noise ratio)에 따라 가능한 피드백 양을 도출하고 거기에 맞는 피드백을 각각 보내면 송신기가 적절히 판단을 해서 OL 인지 CL 인지 어느 사용자를 선택할지 등을 결정할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1A2C1005877).

참 고 문 헌

- [1] M. H. M. Costa, "Writing on dirty paper," IEEE Trans. Info. Theory, 29(3), pp. 439-441, May 1983.
- [2] B. Hassibi and B. Hochwald, "High-rate codes that are linear in space and time," IEEE Trans. Info. Theory, 48(7), pp. 1804-1824, July 2002.
- [3] F. Oggier, G. Rekaya, J.-C. Belfiore, and E. Viterbo, "Perfect Space Time Block Codes," IEEE Trans. Info. Theory, 52(9), pp. 3885-3902, Aug. 2006
- [4] B. M. Hochwald, T. L. Marzetta, and V. Tarokh, "Multi-Antenna Channel Hardening and its Implications for Rate Feedback and Scheduling," IEEE Trans. Info. theory, 50(9), pp. 1893-1909, Sep. 2004