

논문 2012-49TC-4-3

LTE-Advanced 표준에 바탕을 둔 다중사용자 MIMO의 기술개발 현황

(Recent Trend of the Technology Development for Multiuser MIMO
based on LTE-Advanced Standard)

이 병 주*, 임 채 만**, 심 병 효***

(Byungju Lee, Chaeman Lim, and Byonghyo Shim)

요 약

최근 들어, 스마트 기기의 수요가 급증하면서 기존의 3G 표준에 비해 향상된 품질을 제공하는 long-term evolution (LTE) 서비스가 전 세계적으로 활발히 보급되고 있다. 2010년에 발표된 릴리즈 10은 흔히 LTE-Advanced (LTE-A)로 불리는데, LTE-A의 여러 특징 중 다중사용자 MIMO (MU-MIMO) 기술은 정보 처리량을 향상시키기 위한 LTE-A의 핵심기술로 근래 많은 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 LTE 및 LTE-A 시스템에서 도입된 MU-MIMO 기술의 이론적 배경 및 표준의 주요 특징을 소개한다.

Abstract

As the demand for smart phone user is rapidly increasing in recent years, the development of new mobile communication system which provides more improved quality compared to existing 3G standard is highly requested. In this point, the long-term evolution (LTE) system, which was being developed in mid of 2000's, has attracted a considerable attention. The LTE has been developed continuously to result a release 10 which is called as LTE-Advanced (LTE-A) in 2010. Among various features in LTE-A, the multiuser MIMO (MU-MIMO) design is expected to give better quality for throughput, spectral efficiency, and latency. In this paper, we first review the development process from LTE to LTE-A. We also provide the overview of design challenges and specific solutions for MU-MIMO systems developed in LTE-Advanced standard.

Keywords : Multiuser MIMO, LTE-Advanced, CSI Feedback, Reference Signal, Dual Codebook

I. 서 론

최근 들어 스마트 폰 사용자의 폭발적 증가에 따른 멀티미디어 및 인터넷 서비스의 급격한 수요증가로 인

* 정회원, *** 정회원-교신저자, 고려대학교 컴퓨터·전기통신공학과

(Korea University)

** 정회원, 삼성전자

(Samsung Electronics Co.)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2011-0012525), '2단계 BK21사업'의 지원을 받아 수행된 연구임.

접수일자: 2011년12월15일, 수정완료일: 2012년4월17일

해 기존 3G 망이 포화 상태에 이르게 되자, 미국 버라이즌을 비롯하여 우리나라의 SKT, LGU+ 등 이동통신사들은 앞 다투어 차세대 이동통신 시스템인 LTE 서비스를 시작하고 있다. LTE는 long-term evolution의 약어로, 3G 이동통신 기술인 CDMA (코드분할 다중접속)와 WCDMA (광대역 부호분할다중접속)로부터 완전한 4세대로 진화해 가는 중간단계 기술로서 주목을 받고 있다^[1]. 2004년에 시작된 LTE 표준화 작업은 범 지상파 접속 (Universal Terrestrial Radio Access: UTRA)을 공고하게 하며 3세대 이동통신 무선 표준화 단체인 3GPP (3rd Generation Partnership Project)가

제시한 라디오파 접속 구조를 최적화하는데 초점을 맞추고 있다. 초기단계 LTE의 설계목표는 3.5세대 이동통신망인 HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) 릴리즈 6의 하향링크 (downlink) 용량인 100Mbps와 HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)의 상향링크 (uplink) 용량인 50Mbps를 3배 가량 증진시키는 것이었다.

LTE 표준의 기본이 되는 최초의 표준인 릴리즈 8 (Rel. 8)은 2008년 12월에 발표되었고, 후속 표준인 릴리즈 9는 2009년 12월에 발표되었다. LTE-Advanced (LTE-A)로 불리는 LTE의 최신 표준인 릴리즈 10 (Rel. 10)은 2009년 말에 국제통신 연합 (International Telecommunication Union)의 승인을 받아 개발되기 시작하였다. LTE-A는 하향링크에서 LTE의 두 배인 600Mbps의 전송률을 목표로 하고 있다^[2]. 이 목표가 현실화 될 때 데이터 전송 속도는 3세대의 HSPA보다 10 배 이상 증진되어, 고화질 영상이나 네트워크 게임 등 온라인 상 서비스를 이동 중에도 편리하게 이용할 수 있다.

LTE-A에서 제안된 여러 특징 중 가장 주목할 만한 특징으로, 높은 스펙트럼 효율성을 달성하기 위한 다중 사용자 MIMO (MU-MIMO) 시스템을 들 수 있다. 본 논문에서는 LTE 와 LTE-A 표준에서 적용된 MU-MIMO 시스템의 이론적 배경 및 주요 특징을 소개하고자 한다. 먼저 II장에서 LTE-A의 이론적 배경을 살펴본 후, III장에서는 MU-MIMO 시스템이 실제 LTE 릴리즈 8 및 9에 적용되는 기술적 특징들을 설명한다. 그리고 IV장에서는 LTE-Advanced에 적용된 MU-MIMO 기술을 정리하고, V장에서는 결론을 제시한다.

II. 이론적 배경

정보이론의 관점에서 볼 때, MU-MIMO 시스템은 단일사용자 MIMO (SU-MIMO) 시스템에 비해 다음과 같은 장점을 갖고 있다. 첫째로, SU-MIMO 시스템의 용량 (capacity)은 $\min\{M, N\}$ (M과 N은 각기 송신단과 수신단 측에서의 안테나 수)에 비례하여 증가한다. 대부분의 셀룰라 시스템에서 사용자 (User Equipment: UE)의 안테나 수는 보통 기지국노드 (eNB)의 송신 안테나 수보다 작기 때문에, 수신자 측의 안테나가 SU-MIMO 시스템의 용량에 제한을 주게 된다. 이에

비해서, MU-MIMO의 경우 용량은 $\min(M, Nn)$ 으로 표현되기 때문에 수신단 측의 안테나 수와 다중화된 사용자장치 수를 곱한 Nn 이 송신단 측의 안테나 수인 M보다 큰 경우 (대부분의 경우 이 조건이 만족된다) 송신 안테나 수 M에 비례하는 용량의 증가를 얻을 수 있다. 둘째로, SU-MIMO 시스템은 송수신자 간 가시거리 (line of sight path)가 큰 채널이나 안테나 간의 강한 상관성이 있는 채널에서 성능 열화가 발생한다. 실제로, 이러한 상황에서 채널행렬의 유효랭크가 감소하게 되어 용량의 감소를 피하기 어렵다. 이에 반해, MU-MIMO 시스템에서는 다중사용자를 적절히 스케줄링 (scheduling)하면서 얻어지는 추가적 자유도 (degrees of freedom)를 활용할 수 있기에, 채널행렬의 ill-conditioned 상황을 효과적으로 피할 수 있어서, 개별 사용자의 유효 랭크에 상관없이 최적에 가까운 용량을 얻을 수 있다. 여러 사용자를 활용하여 얻어내는 이득을 일컬어 흔히 다중사용자 이득 (multiuser diversity)라 한다.

표 1. MU-MIMO와 LTE 표준에서의 명명법
Table 1. Terminologies in LTE standard and MU-MIMO.

MU-MIMO	LTE standard
Pilot Signal (파일럿 신호)	Reference Signal (RS)
User terminal (사용자 장치, 단말국)	User Equipment (UE)
Basestation (기지국)	Enhanced NodeB (eNB)
Precoding codbook index (프리코딩 인덱스)	Precoding matrix indicator (PMI)
MIMO channel rank (채널의 랭크)	Rank indication (RI)
Downlink data channel (하향링크 데이터채널)	Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)
Downlink control channel (하향링크 제어채널)	Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

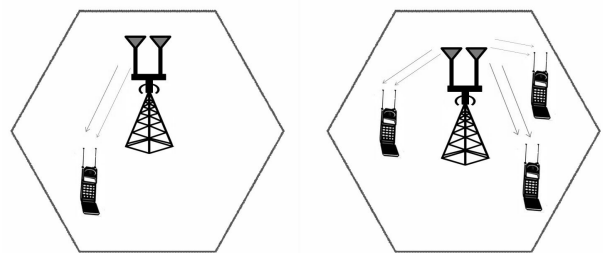


그림 1. 단일사용자 MIMO와 다중사용자 MIMO 시스템
Fig. 1. SU-MIMO and MU-MIMO systems.

단일사용자 MIMO와 다중사용자 MIMO 시스템을 도식적으로 그림 1에 나타냈다. 또한 독자들의 이해를 돕기 위해 일반적으로 사용되는 용어와 LTE에서 사용되는 용어 간의 관계를 표 1에 나타냈다.

III. LTE Release 8/9에서 MU-MIMO

이 절에서는 MU-MIMO 시스템을 이동통신시스템에 구현할 때 고려될 사항들이 실제 LTE 릴리즈 8과 9에 어떻게 적용되는지에 대한 기술적 특징을 살펴본다.

3.1. MU-MIMO 시스템의 설계 시 고려할 점들

앞 절에서 언급한 바와 같이, MU-MIMO 시스템의 주요 장점 중 하나는 높은 공간 다중이득 (spatial multiplexing gain)을 얻을 수 있다는 점이다. MU-MIMO의 동작을 지원하기 위해서는 무엇보다도 UE 사이에 적절한 자원배분 (resource allocation)이 필요하다. UE에 대한 자원배분 시 주안점은, 같이 사용되는 (co-scheduled) UE에서 채널용량 등의 성능척도가 최대가 되는 UE의 그룹 (pair)을 선택하는 것이다. 이를 위해서는 UE의 채널상태정보 (channel state information: CSI)가 기지국에 피드백 (feedback)되어야 한다. CSI 피드백에서 고려되어야 할 두 가지 중요한 요소는 피드백의 정확도 (accuracy)와 피드백으로 인한 상향링크 (uplink)의 자원소모 문제이다. 이론적으로 정확한 CSI를 피드백 시키기 위해서는 실수 값이 필요하기 때문에 무한개의 비트수가 필요하나, 실제로는 적절한 양자화를 거쳐 유한한 개수의 비트를 사용한다.

SU-MIMO 시스템의 경우, CSI의 정확도는 성능에 영향을 미치지만 다중 이득 (multiplexing gain)에는 영향을 주지 않는다. 이에 반해, MU-MIMO 시스템은 유한 피드백 조건 하에서 간섭으로 인해 성능향상이 더 이상 이루어지지 않기 때문에 (interference limited), 피드백의 정확도는 MU-MIMO 하향링크의 다중이득에 직접적 영향을 미친다^[3]. CSI의 피드백과 관련하여 또 다른 중요한 요소는 UE에서 SINR로 흔히 표현되는 채널품질정보 (channel quality information: CQI)를 추정하는 문제이다. SU-MIMO 시스템과 달리, MU-MIMO 시스템의 각 UE는, 동시에 스케줄되는 UE에 대한 정보를 알 수 없기에 SINR (signal to interference and noise ratio)을 정확히 추정할 수 없다. 각 UE가 전달하는 CQI 값을 가지고 기지국에서 사용할 UE를 결정하

기 때문에, 각 UE에서 CQI를 계산하는 시점에서 다른 UE의 신호 품질을 파악할 수 없다. 따라서 CQI 계산에 오차가 있을 수 밖에 없으며 이와같은 부정확한 CQI로 인하여 기지국에서 최적의 UE선택이 어려워지게 된다. MU-MIMO 시스템의 표준을 설계할 때 이러한 특징 및 현실적 제약을 두루 고려해야 한다.

3.2. LTE Rel. 8과 MU-MIMO 시스템

LTE 릴리즈 8에서 MU-MIMO는 코드북 (codebook) 방식의 프리코딩 (precoding)을 사용하는데, 이때 각각의 UE는 기지국에서 전송된 공용 파일럿 (common RS: CRS)을 이용하여 공간채널 (spatial channel)을 측정하고, 미리 정해진 코드북 집합 중에서 채널을 가장 잘 대표하는 원소를 찾아, 상향링크 채널을 통해 기지국에 대한 코드북의 인덱스 (PMI) 및 측정된 CQI를 피드백한다.

기지국은 여러 UE로부터 PMI와 CQI결과를 취합하여, 사용자 쌍 (user pair) 사이에 스트림 간 간섭 (inter stream interference)을 최소화시키는 (시간/주파수 자원에 대한) UE 그룹을 찾는다. 피드백 메커니즘에 관한 한, UE는 SU-MIMO와 MU-MIMO를 구별할 수 없다. 따라서, UE에서의 CQI는, 기지국에서 동시 사용되는 UE로 동시전송할 때 발생할 수 있는 스트림 간 간섭이 없다는 가정 하에 계산된다. 이러한 방식으로 얻어낸 CQI는 실제 값보다 다소 높을 수 있기 때문에, 기지국은 변조방식과 부호율 (code rate)을 고려하여 CQI에 적절한 보정을 수행해야 한다.

MU-MIMO 릴리즈 8에서 기지국은 데이터 채널을 통해서 어떠한 전용 파일럿 (dedicated pilot) 신호도 전송하지 않기 때문에, 채널 추정이나 데이터의 복조 (demodulation)시 각각의 UE는 CRS라고 불리는 공통 파일럿에 전적으로 의존해야 한다. CRS는 모든 UE에 사용되기 때문에 프리코딩 되지 않으므로, UE는 제어 채널을 통해 별도로 전송된 프리코딩 정보에다 추정된 채널을 곱해서 프리코딩된 채널을 추정해야 한다. 이와 같은 접근방식은 코드북에서 정의된 행렬로만 프리코딩을 해야 한다는 단점이 있다. 참고로 이러한 제약은 Rel. 10에서는 다소 완화되었다 (III절을 참조).

MU-MIMO 릴리즈 8에서는 모든 대역의 평균 채널 방향에 대하여, UE당 단 한 개의 PMI reporting을 허용한다. 즉 모든 서브캐리어에 대해 하나의 PMI만을 report하기 때문에, 서브캐리어간 상관도가 높은 균일한

선형 정렬 (uniform linear array: ULA)형의 안테나 배열을 가진 기지국 이외에는 사용 효율이 낮은 단점이 있다.

또한, 릴리즈 8에서는 SU-MIMO와 MU-MIMO간의 변환이 정적 (semi-statically)인 방식으로 이루어진다. 이론적으로는 동적 스위칭 (dynamic switching)이 스케줄링 과정에서 더 많은 유연성을 제공하고 다중사용자의 다이버시티 (diversity)를 증가시킬 수 있지만, MU-MIMO-specific CQI reporting의 부족과 릴리즈 8에서 제한된 프리코딩 등으로 인해 실제 동적 스위칭 기법의 효율은 그다지 높지 않다. 실제로, 릴리즈 8은 상관도가 높은 ULA 안테나를 사용하며 셀 내 많은 사용자가 있는 경우 등의 특수한 상황을 제외하면 그다지 큰 이득이 없다. 이러한 점들과 설계의 용이성을 고려하여, 릴리즈 8에서는 정적 스위칭 방식을 선택하였다.

3.3. LTE Rel. 9와 MU-MIMO 시스템

릴리즈 9에서는 공통 파일럿 (CRS) 이외에도 DM-RS로 불리는 전용 파일럿을 사용하여 이중 계층 빔형성 (dual layer beamforming)이라 불리는 랭크-2 전송을 지원한다. 공통 파일럿은 말 그대로 셀 내의 모든 사용자에게 공통적이기 때문에 프리코딩이 불가능하지만, DM-RS는 각각의 UE마다 프리코딩될 수 있다. 파일럿 데이터가 프리코딩되는 경우 프리코더 (precoder) 정보를 UE쪽으로 따로 전송할 필요가 없기 때문에 각 UE는 코드북 없는 프리코딩이 가능하기에 성능의 증가를 얻을 수 있다. 다만, 성능의 증가와 전용 파일럿을 보내는 오버헤드간의 상충으로 인하여 실제의 성능이득은 다소 제한적일 수 있다. 이중계층 빔형성에서는 파일럿 데이터를 두 개의 계층으로 나누기 위해 직교 부호를 사용한다. 이렇게 하여, SU-MIMO 작동에서는 하나의 UE가 두 계층에 할당되며, MU-MIMO 작동에서는 두 계층이 두 개의 UE에 할당된다.

IV. LTE Release 10에서 MU-MIMO

LTE-A 시스템의 상용화를 위해서는 정보 처리량 (throughput)의 최고치와 평균치, 그리고 셀 경계 스펙트럼 효율성 등 ITU-R (ITU Radio Communication Sector)에서 설정한 여러 요구조건을 만족시켜야 한다^[4]. 이를 만족시키기 위하여 릴리즈 10에서 새로 도입된 기술적 특징들은 다음과 같이 요약된다.

- 높은 차원 (8×8 MIMO 까지)의 SU-MIMO 모드를 지원하며 또한 MU-MIMO의 성능을 향상시키기 위해, 하향링크에 CRS와 DM-RS 그리고 CSI-RS 등 새로운 파일럿 RS를 도입하였다. CRS는 CSI측정과 잔여 (릴리즈 8/9) 전송의 복조 뿐 아니라 제어 채널의 디코딩 등 UE의 여러 과정에 이용된다. 릴리즈 9에 도입한 DM-RS는 릴리즈 10에서는 새로운 전송 모드에서 랭크-8까지의 전송을 지원하도록 확대되었다.
- SU-MIMO와 MU-MIMO 간에 동적 스위칭을 도입하였다. 이로서 DM-RS를 사용하여 UE에 프리코딩 정보를 제공할 필요 없이, 기지국은 UE의 MIMO 작동 모드를 원활하게 변경할 수 있다. 이는 통신형태나 UE의 개수 등 시스템의 조건이나 채널에서의 변화에 기지국이 신속히 대응할 수 있도록 돕는다.
- 피드백 부하를 줄이기 위해 8-Tx 배열에 이중 코드북 (dual codebook) 구조를 채용하였는데, 첫 번째 코드북은 광역밴드와 long term 채널에 관여하고 다른 코드북은 주파수 선택성 채널이나 short term 채널을 담당하도록 설계되었다.

4.1. 파일럿 신호 (reference signal)의 설계

근래 들어 비교적 낮은 복잡도를 가지면서도, 높은 채널 용량을 얻을 수 있는 다양한 프리코딩 기법들이 제안되었다^[5-6]. 앞에서 언급한 바와 같이, 이러한 방식들은 CSI 피드백의 정확도가 충분히 큰 경우에만 이득을 얻을 수 있다. 파일럿이 차지하는 오버헤드를 피하면서 CSI의 품질을 유지하기 위해, CRS를 단순히 확장하는 대신 릴리즈 10은 별도의 DM-RS/CSI-RS 접근 방식을 채용하였다. 릴리즈 10에서 도입된 파일럿 신호의 주요 특징은 다음과 같다.

- 파일럿의 부하를 제한하기 위해 CRS는 4개의 송신 안테나까지만 정의되었다.
- 새로 도입된 송신모드(송신모드 9: TM 9)에서는, CSI-RS를 이용하여 CSI측정을 수행한다. CSI-RS는 8개의 송신 안테나까지 적용되지만 CRS에 비해 상당히 낮은 부하를 가진다.
- rank-4까지 지원할 수 있는 잔여 송신 모드 (transmission mode)에서는 CRS를 이용하여 CSI측정을 수행한다.

DM-RS는 CSI측정에 사용하기에는 적절하지 않다. 왜냐하면 DM-RS는 각각의 UE가 사용되는 시간/주파수 자원에서만 간헐적으로 존재하기 때문이다. 반면에 CSI-RS는 프리코딩 되지 않으며 또한 모든 대역에 대해 사용되기 때문에 CSI측정에 적합하다. 이 때 부하를 최소화하기 위해 CSI-RS는 서브프레임 (subframe) (그림 2)의 한 부분으로 전송된다. 이는 복조와 CSI 측정을 위해 사용되는 CRS와 구분되며, 따라서 매 서브프레임마다 전송할 필요가 있다.

CRS와 달리, DM-RS는 데이터가 존재하는 시간/주파수에서만 전송하면 된다. 따라서, DM-RS는 데이터 전송 랭크 (rank)가 전송 안테나 수보다 작은 경우 (8개의 송신 안테나 배열의 경우) 파일럿 부하가 줄어드는 이점이 있다. 실제로 릴리즈 10에서 DM-RS 패턴은 파일럿 부하를 최소화하기 위해 각 랭크에 대해 최적화되었다. 릴리즈 10에서 랭크가 3-8의 경우에 DM-RS 패턴은 릴리즈 9에서 랭크 2에 대한 경우의 확장으로, 하이브리드 (hybrid) 코드/주파수 분할 다중화에 기반을 두고 있다. 랭크 1과 2의 경우 제 1 및 2 계층에 대한 DM-RS 패턴은 코드 분할 다중화에 의해 다중화되는 반면, 랭크가 3과 4인 경우에는 제 1 계층 및 2 계층 그리고 제 3 계층 및 4 계층에 대한 DM-RS 패턴은 주파수 분할 다중화 (FDM)에 의해 다중화된다.

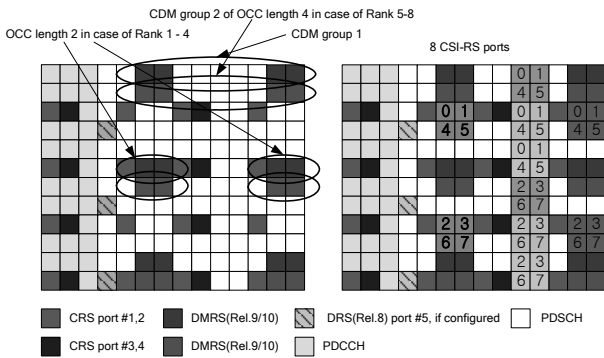


그림 2. DM-RS와 CSI-RS 패턴
Fig. 2. Patterns of DM-RS and CSI-RS.

4.2. MU-MIMO의 차원화

릴리즈 10에서는 성능 및 신호의 부하를 종합적으로 고려하여, MU-MIMO 시스템의 차원 (dimension)에 대해 다음과 같은 제한을 두었다.

- 최대 4개까지의 UE를 동시에 스케줄링 할 수 있다.

- 각 UE마다 최대 두 개까지만 계층을 할당한다.
- 계층의 총합이 4개를 초과하지 않는다.

4개의 UE를 할당하는 경우 각 UE는 평균적으로 총 전송 전력의 1/4만 할당 받게 되어 각각의 UE의 SINR이 상당히 낮아지게 된다. 따라서, 셀 내에 다수의 UE를 포함하는 경우 (즉, SINR이 높은 UE를 높은 확률로 찾아낼 수 있는 경우)를 제외하고는 대부분의 경우 그다지 효과적이지 못하다. 예를 들면, UE 사이에 공간분리가 쉬운 단일 폴 (single-pole) ULA 시스템에서는 4개의 계층에 대한 지원이 가능하지만, 이중 편광 (dual-polarized) 배열을 가진 경우에는 MU-MIMO 간섭을 제어하기 매우 어렵기 때문에 동시 사용되는 UE의 개수는 대부분의 경우 2가 된다.

높은 상관관계를 가진 ULA의 경우 기지국 노드는 두 개의 스트림 (stream)을 분리하여 두 개의 UE로 보낼 수 있기 때문에 공간다중화 이득을 얻을 수 있다. 이는 셀 내에 UE의 개수가 많아 다중사용자 스케줄링에 의해 공간 자유도를 증가시킬 수 있는 경우에 적합하다. 실제로도 이러한 경우에는 UE당 랭크-1 전송이 가장 효율적이다. 랭크-1 보다 큰 경우에 ULA에서의 이득은 그다지 크지 않으나, 이중편광 시스템에서는 증가하게 된다. 예를 들면, 이중 편광 8개의 송신 안테나 배열에서는 각 분극 배열이 빔을 형성하여 UE쪽으로 스트림을 보낼 수 있기 때문에 UE당 랭크-2로 전송할 경우 성능의 향상을 얻을 수 있다.

4.3. MU-MIMO의 투명성 (transparency)

Transparent MU-MIMO 방식에서는 UE는 단지 제어 신호정보 (랭크나 DM-RS 포트 등)만 가지고도 디코딩을 수행할 수 있는데 반해, Non-transparent MU-MIMO 방식에서는 동시 사용되는 사용자에 대한 정보가 제공되어야 한다. 동시 사용자 (co-scheduling) 정보는 같이 사용되는 사용자의 총 랭크나 DM-RS 포트를 포함한다. 두 방식의 주요 차이점과 시스템 설계에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 스케줄링 유연성: Transparent MU-MIMO 방식에서는 좀 더 유연한 스케줄링을 허용한다. 예를 들면, Transparent MU-MIMO 하에서 MU-MIMO에 다중화된 사용자장치에 할당된 자원 (RBs)을 반드시 정렬할 필요가 없다. 기지국은 UE에 부분적으로 중

첩된 자원을 할당할 수 있고, 서로 다른 RB에 다른 수의 UE를 다중화 할 수도 있다. 또한 동시 사용되는 UE의 DM-RS 포트는 각 RB에 대해 동적으로 지정할 수 있다. 반면에, Non-transparent MU-MIMO하에서 기지국은 총 랭크 및 동시 사용되는 UE의 DM-RS 포트의 단일 신호화가 가능하도록 동시 사용되는 UE의 자원할당 정렬이 필요하다. 그러나 이는 기지국의 스케줄러 유연성에 제한을 주어 MU-MIMO 시스템의 성능을 최대화시키기 어려울 수 있다.

- 제어 신호화 부하: Transparent MU-MIMO는 동시 사용되는 UE에 대해 부가적 제어 신호화가 필요 없지만, Non-transparent MU-MIMO는 사용자 다중화를 지원하기 위해 더 많은 PDCCH (Physical Downlink Control Channel: 물리적 하향링크 제어 채널) 자원 (신호 대 총 랭크와 같이 사용되는 UE의 DM-RS 포트)이 필요하다. PDCCH의 한정된 자원을 고려할 때, 제어정보 부하의 증가는 바람직하지 않으며 서브프레임 당 동시 사용되는 UE의 개수에 대해 좀 더 엄격한 제한이 필요하다.
- 향상된 수신 기법의 지원: Non-transparent MU-MIMO에서는 제어 채널을 통해서 제공되는 여러 가지 정보를 활용하여 향상된 수신알고리즘을 사용할 수 있다. 예컨대 UE에서 사용자간 간섭을 완화 또는 억제하기 위해 간섭 제거 기법 (interference rejection combining: IRC)과 같은 알고리즘이 사용될 수 있다. 이에 반해서 Transparent MU-MIMO에서는 동시 사용되는 UE에 대한 정보가 없으므로 블라인드 알고리즘 (예컨대 non-parametric MMSE 알고리즘)을 사용할 수 밖에 없다. 더 우수한 수신 알고리즘을 사용하기 위한 부가적 신호화 이슈는 릴리즈 10 이후에 계속 논의되고 있다.

4.4. SU/MU-MIMO의 동적 스위칭

SU-MIMO 시스템은 같은 시간/주파수 대에 다중 스트림을 전송함으로써 사용자 정보 처리량의 피크치 및 평균치를 향상시키는데 반해, MU-MIMO 시스템은 다중사용자 다이버시티를 도입함으로써 피크치와 평균치, 그리고 시스템의 전송률을 증진시킨다. 상보적인 두 시스템의 장점을 극대화하기 위해, 릴리즈 10은 SU-MIMO와 MU-MIMO모드 사이에 동적 스위칭을

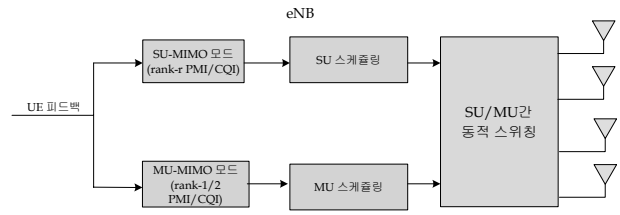


그림 3. SU/MU-MIMO 사이의 동적 스위칭
Fig. 3. Dynamic switching between SU-MIMO and MU-MIMO.

도입하였다 그림 3에 동적 스위칭의 구조를 나타내었다. 동적 스위칭을 사용할 때 서브프레임 당 채널 상황과 트래픽량에 따라 한 모드에서 다른 모드로 쉽게 전환이 가능하다.

SU/MU-MIMO 동적 스위칭 뿐 아니라 SU-MIMO 모드에서 랭크 변경 (rank adaptation)을 지원하기 위해 DM-RS 안테나 포트와 계층의 수에 대한 정보가 UE에 제공되어야 한다. 이를 위하여, 새로운 하향링크 제어 정보 (downlink control information; DCI) 포맷인 DCI 포맷 2C를 도입되었다.

4.5. 이중 코드북 구조

릴리즈 10은 이중 단계 피드백 기법을 채택한다^[7]. 이중 단계 피드백에서 프리코더는 두 개의 행렬 (W_1 과 W_2)로 구성되는데 각각은 별도의 코드북에 속한다. 복합 프리코더는 두 행렬의 곱으로 다음과 같이 주어진다.^[8]

$$W = W_1 W_2 \tag{1}$$

위에서 W_1 은 광대역 및 long term 채널 특성을 반영하며 W_2 는 주파수 선택성 (frequency selectivity) 채널과 short term 채널 감쇄를 반영한다. 본 기법은 CSI 피드백 성분을 두 종류로 분리함으로써 단일 코드북을 사용할 때 보다 더 나은 성능을 달성하면서도 낮은 피드백 부하를 갖게 되는 장점이 있다^[9]. 릴리즈 10 코드북을 설계하는데 필요한 고려사항 및 제약조건은 다음과 같다.

- 코드북 설계에서는 프리코딩 이득을 크게 얻을 수 있는 랭크 1/2에 주안점을 둔다.
- 프리코딩 행렬에서 모든 요소는 전력 증폭 설계의 부하를 줄이기 위해 같은 크기 (일정한 modulus)를 가져야 한다.

- 일정한 평균 전송 전력을 유지하기 위해 유니터리 프리코딩을 채택한다.
- $W_1 (= [X \ 0; 0 \ X])$ 는 어떠한 간격 (예를 들면 $\lambda/2$ 나 $\lambda/4$)을 가진 dual-polarized 안테나 배열의 공간 불변성을 충족시키도록 블록 대각화 시켜야 한다.
- X 는 $4 \times N_b$ 행렬이며 여기서 N_b 는 빔의 개수 (1~4)이다. 각 W_1 에 대해, 주파수 선택 프리코딩의 가장자리 효과를 줄이기 위해 이웃한 중첩 빔을 사용한다.
- W_1 으로부터 최소한 16개의 8-Tx DFT가 생성되며, 분극 사이의 위상이동을 대처하고 ULA안테나 배열의 공간불변성을 유지하기 위해 W_2 를 통한 co-phasing을 수행하여야 한다.

이중 코드북 구조는 8-Tx 모드에만 적용된다. 4-Tx나 2-Tx 모드에서는 이중 코드북 설계에 의해 얻어지는 이득에 한계가 있기 때문에, 이들 모드는 여전히 잔여 코드북(릴리즈 8 기반의 코드북)을 채용한다.

4.6. CSI 피드백 방식

피드백 방식을 설계할 때 고려되는 사항은 다음과 같다.

- 역방향 호환성이 보장되어야 한다. 릴리즈 8/9 네트워크에 진입하는 릴리즈 10 UE는 중단 없는 서비스 (seamless service)를 위해 릴리즈 8/9 시스템에 부합하는 피드백 정보(PMI, RI, CQI)를 제공할 수 있어야 한다. 이와 비슷하게 PMI, RI, 그리고 CQI 피드백 방식은 릴리즈 10 네트워크에서 릴리즈 8/9 사용자장치를 지원하여야 한다.
- 피드백 부하를 고려하여 설계하여야 한다. 피드백 방식에는 직접 피드백과 간접 피드백의 두 가지 형태가 있다. 직접 피드백은 UE에서 기지국으로 채널 행렬 H 또는 공분산 (covariance) 행렬 HH^H 를 전송하는 방식이며, 간접 피드백은 릴리즈 8 방식의 PMI, RI 및 CQI를 사용하는 방식을 의미한다. 피드백 부하가 낮은 장점으로 인하여 릴리즈 8, 9, 10에서 간접 피드백 방식이 지속적으로 채택되었다. 하지만, 높은 이득을 요구로 하는 이후의 릴리즈에서 직접 피드백 방식이 계속 논의될 것으로 보인다.
- UE 피드백 설계에서 실제적 배열 시나리오를 고려하여야 한다. 안테나를 실장하는 공간의 제한으로

- 인해 사용자장치에서 뿐 아니라 기지국에서도 넓은 공간이 허용되지 않는다. 물리적 공간을 줄이기 위해 흔히 사용하는 기술은 dual-polarized 안테나를 채용하는 것으로, 이는 안테나를 짝지어 분극 평행 안테나를 형성하는 것이다. 2-Tx 모드에서는 ULA가 적합하며, 4-Tx나 8-Tx 모드에서는 직교하는 분극 배열이 좀 더 적합할 수 있다.
- 피드백 메커니즘은 위의 고려사항들을 반영하고 또한 하향채널의 성능과 상향채널간의 tradeoff를 고려하여 설계하여야 하며 차후의 릴리즈에서 계속 논의 발전될 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는, LTE와 LTE-A 표준에 채용되는 MU-MIMO 기술의 주요 특성을 정리하였다. LTE 릴리즈 8/9 와 관련되는 MU-MIMO 기술을 정리하였고, LTE-A와 관련한 프리코딩 기법, MU-MIMO의 차원화 와 투명성 등을 살펴보았다. 또한 MU-MIMO의 동적 스위칭, 이중 코드북 구조 및 CSI 피드백 방식 역시 소개하였다.

최근, 3GPP 표준에서는 LTE 릴리즈 11 표준의 연구를 시작하였으며, 이전 릴리즈에 비해 더욱 향상된 성능을 얻기 위한 방법에 대해 활발한 논의를 하고 있다. 수년 내에 LTE 서비스가 보편화되며 사용자의 요구조건이 더욱 증대될 것이기 때문에, 이를 충족시키기 위해, 릴리즈 11에서도 CSI 피드백과 제어 시그널링에 대한 연구가 계속 이루어질 것이다. 또한, 릴리즈 11에서는 MU-MIMO의 성능을 더욱 증진시키기 위해 실제적 배열 시나리오에 더 많은 관심을 집중시키고 있다. 예를 들면, 4-Tx 직교 분극 안테나 배열에서 CSI 피드백을 향상시키는 방식이 논의되고 있다. 더욱이, 최근의 이중 네트워크 (heterogeneous network)가 보편화되는 상황에서 MU-MIMO를 설계할 때 소규모 펌토셀 (femtocell) 및 피코셀 (picocell) 배치를 고려하고 있으며 이때 발생하는 MU-MIMO 시스템의 이슈들은 계속 논의될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] <http://network4g.verizonwireless.com/#/4g-network-verizon-wireless>

- [2] D. Martin-Sacristan et al, "On the way towards fourth generation mobile:3GPP LTE and LTE-Advanced", *EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, 10 pages
- [3] T. Yoo, A. Jindal, A. Goldsmith, "Finite-rate feedback MIMO broadcast channels with a large number of users" in *Proc. of IEEE ISIT*, pp. 1214-1218, July 2006.
- [4] 3GPP TS 36.913, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) LTE-Advanced".
- [5] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information." *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 2, Feb. 2005, pp. 506-522.
- [6] T. Yoo, A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using Zero-forcing beamforming." *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, March 2006, pp. 528-541.
- [7] 3GPP TSG RAN WGI #60, R1-101129, "On Extentions to Rel. 8 PMI Feedback." February 2010.
- [8] 3GPP TSG RAN WGI #61, R1-103332, "Way Forward on UE Feedback." May 2010.
- [9] 3GPP TSG RAN WGI #61, R1-103378, "Performance evaluation of Rel. 10 feedback framework." May 2010.
- [10] 3GPP TSG RAN WGI #62, R1-105011, "Way Forward on 8Tx Codebook for of Rel. 10 DL MIMO." August 2010.

 저 자 소 개



이 병 주(정회원)

2008년 고려대학교 전파통신
공학과 학사 졸업.

2010년 고려대학교 컴퓨터·전파
통신공학과 석사 졸업.

2010년~고려대학교 컴퓨터·
전파통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 신호처리, 무선통신, 정보이론>

임 채 만(정회원)

2010년~현재 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과
박사과정

<주관심분야 : 무선통신, 신호처리>



심 병 호(정회원)-교신저자

1995년 서울대학교 제어계측공
학과 학사 졸업.

1997년 서울대학교 제어계측공
학과 석사 졸업.

2004년 University of Illinois at
Urbana-Champaign
Mathematics 석사 졸업.

2005년 University of Illinois at Urbana-
Champaign Electrical and Computer
Engineering 박사 졸업.

2005년~2007년 미 쉘컴사 선임 및 책임연구원

2007년~현재 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과
부교수

<주관심분야 : 정보이론, 신호처리, 무선통신>