

# 주파수 분할 방식의 거대 다중 안테나 시스템을 위한 빔형성 기반의 채널상태정보 기준신호 전송기술

홍준기\*, 조한신\*, 문철\*\*, 육종관<sup>o</sup>

## Beamforming Based CSI Reference Signal Transmission for FDD Massive MIMO Systems

Jun-Ki Hong<sup>\*</sup>, Han-Shin Jo<sup>\*</sup>, Cheol Mun<sup>\*\*</sup>, Jong-Gwan Yook<sup>o</sup>

### 요약

기존 MIMO 시스템 대비 수십 또는 수백 배 많은 송신 안테나들이 설치되어 있는 주파수 분할(frequency division duplex, FDD) 방식의 거대 다중 안테나(massive multiple-input multiple-output, Massive MIMO)에선 송신 안테나 별 CSI-RS(channel state information reference signal) 전송을 위해 기존 MIMO 시스템 대비 너무 많은 하향 및 상향링크 자원 요소가 필요하다는 한계를 갖는다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 본 논문에선 주파수 분할 방식의 거대 다중 안테나 시스템에서 많은 송신 안테나를 사용하더라도 자원요소(resource element, RE)를 재사용함으로써 송신 안테나 수에 비례하지 않는 제한된 양의 하향링크 자원만을 사용하여 CSI-RS를 효과적으로 전송하는 기술 및 자원격자 구조를 제안하였다.

**Key Words** : FDD, massive MIMO, CSI-RS, Resource grid, Reuse factor, Beamforming

### ABSTRACT

Since FDD massive MIMO (multiple-input multiple-output) system deploys hundreds of transmit antennas at base station (BS) compared to conventional MIMO system, the overhead of transmitting channel state information reference signal (CSI-RS) increases proportionally to the number of transmit-antennas. To overcome these disadvantages, we proposed beamforming based CSI-RS transmission technique for FDD massive MIMO system which transmit CSI-RS by limited amount of downlink resources.

### I. 서론

Cisco 사의 전망에 따르면 2014년부터 2016까지 무선 데이터 트래픽의 연평균 10배씩 증가할 것으로 예상하고 있다<sup>[1]</sup>. 이처럼 급증하고 있는 데이터 트래픽

의 해결을 위한 차세대 기술로써 small cell network, mmWave, 거대 다중 안테나(massive MIMO, massive multiple-input multiple-output)시스템 등 다양한 기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 거대 다중 안테나 기술은 기존 LTE-A(long term

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과 (IITP-2016-H8601-16-1008)와 연구재단의 이공학개인지초연구지원사업 (NRF-2015R1D1A3A01019560) 의 연구결과로 수행되었음.

• First Author : Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, junki\_hong@yonsei.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, jgyook@yonsei.ac.kr, 종신회원

\* Hanbat National University, Department of Electronics and Control Engineering, hsjo@hanbat.ac.kr, 정회원

\*\* Korea National University of Transportation, Dept. of Information and Communication Engineering, chmun@ut.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2016-01-023, Received January 29, 2016; Revised April 5, 2016; Accepted April 28, 2016

evolution advanced) 시스템의 송신 안테나 개수 대비 수십 또는 수백 배 많은 안테나를 사용하여 스펙트럼 효율(spectral efficiency)을 증가시키는 기술이다<sup>2-4)</sup>. 하지만 주파수 분할(frequency division duplexing, FDD) 방식의 거대 다중 안테나 시스템에선 증가한 송신 안테나의 개수만큼 CSI-RS(channel state information reference signal)의 개수가 증가하여 오버헤드(overhead)가 발생하므로 기존 LTE-A 시스템의 CSI-RS 전송기술 및 자원격자 구조로는 효율적인 전송이 불가능하여 새로운 CSI-RS 전송기술이 요구되고 있다<sup>5-7)</sup>. 이처럼 거대 다중 안테나 시스템의 채널 정보 피드백 양을 줄이기 위한 기법으로 압축센싱(compressed sensing)<sup>8,9)</sup> 기반 피드백 기법이 제안되었다<sup>10-14)</sup>. 압축센싱은 원신호가 성진(sparse) 특성을 가지고 있다면 Nyquist율보다 낮게 샘플링하면서 신호를 복원할 수 있는 기법이며 성진 특성을 갖는 신호를 높은 확률로 복원시킬 수 있다. 이러한 특성으로 채널 간 상관관계가 큰 거대 다중 안테나 시스템에서 피드백 양을 줄이기 위한 기법으로 압축센싱이 주목받고 있다. 하지만 거대 다중 안테나의 송신 배열 안테나는 기존 다중 안테나 시스템의 송신 배열 안테나보다 물리적인 크기가 증가하기 때문에 안테나간 채널의 상관관계(correlation)가 페이딩(fading) 변화로 인해 낮아지거나 변화할 수 있다<sup>15)</sup>. 따라서 송신 배열 안테나의 크기가 증가할수록 페이딩으로 인해 안테나간 채널의 상관관계가 변화할 수 있는 점을 고려해야 하는 단점을 가지고 있다.

또한 2차원 평면 송신 배열 안테나로 이루어진 거대 다중 안테나 시스템의 채널 추정을 위해 공간적으로 근접한 안테나들을 그룹화하고 그룹화된 안테나들을 대표할 수 있는 하나 값으로 오버헤드를 줄이고 채널 상태를 추정하는 방법이 제안되었다<sup>16)</sup>. 하지만 채널 추정을 위한 압축센싱 기법과 마찬가지로 거대 다중 안테나의 송신 배열 안테나의 안테나간 채널의 상관관계가 페이딩 변화로 인해 낮아지거나 변화할 수 있기 때문에 보다 정확한 채널을 추정하기 어려운 한계를 가지고 있다. 반면 본 논문에서 제안한 채널 추정기술은 거대 다중 안테나 시스템의 송신 안테나간 채널 상관관계가 낮거나 변화하더라도 재사용률(reuse factor)을 통해 모든 안테나들의 빔 인덱스(beam index)들이 채널 추정을 위해 사용되기 때문에 보다 정확하게 채널을 추정하는 기술을 제안하였다.

본 논문에서는 주파수 분할 방식의 거대 다중 안테나 시스템에서 기존 패킷(packet) 구조를 사용하고 높은 빔형성(beamforming) 이득을 바탕으로 CSI-RS를

효율적으로 전송하기 위한 기술 및 자원격자(resource grid) 구조를 제안한다. 기존 LTE-A 통신 시스템에서는 8개 송신 안테나 지원을 위한 CSI-RS를 PDSCH(physical downlink shared channel) 영역에 할당하여 5 ms 이상의 주기로 전송한다. 8개 송신 안테나의 CSI-RS는 주파수 분할 다중 방식(frequency division multiplexing, FDM)과 시분할 다중 방식(time division multiplexing, TDM)에 의해 시간과 주파수 영역에서 다중화 되어 전송한다. CSI-RS는 전송되는 코드워드(codeword)나 레이어(layer) 개수에 관계없이 항상 안테나 개수만큼 전송되며 서로 다른 안테나 포트에서 CSI-RS 간의 직교성을 보장하기 위해 각 슬롯에서 CSI-RS 전송을 위해 하나의 안테나 포트에서 사용된 자원요소(resource element, RE)는 다른 안테나 포트들이 사용하지 않는다. 따라서 송신 안테나의 수가 증가할수록 요구되는 CSI-RS의 수가 증가하기 때문에 슬롯(slot)내 더욱 많은 자원요소들이 CSI-RS 전송을 위해 할당되어야 하는데 이로 인해 실제 데이터 전송을 위해 할당되어야 하는 자원요소들의 수는 감소하게 되어 하향링크 전송 용량이 감소하게 된다.

이처럼 하향링크 전송 용량이 감소하는 문제점 해결하기 위해 제안한 CSI-RS 전송기술은 주파수 분할 방식으로 작동하는  $S$ 개의 송신 안테나가 빔형성을 통해 전송하는 거대 다중 안테나 시스템을 고려한다. 거대 다중 안테나 시스템의 송신기에서는 DFT(discrete Fourier transform) 행렬의  $S$ 개의 컬럼 벡터(column vector)들로  $S$ 개의 CSI-RS를 각각 빔형성 전송하여 높은 빔형성 이득을 기반으로 하는 공간적인 간섭 억제에 의해 동일채널 간섭이 충분히 억제될 수 있는 빔들에 의해 전송되는 CSI-RS들에게 동일한 자원요소를 할당하여 다수의 CSI-RS가 하나의 자원요소를 재사용하는 기술을 제안한다. 즉, 주파수 분할 다중 방식과 시분할 다중방식에 의해 주파수와 시간 영역에서 다중화되어 전송되는 CSI-RS를 추가적으로 공간 분할 다중화(space division multiplexing, SDM)에 의해 공간 영역에서 다중화하여 전송한다. 이와 같은 공간 분할 다중화에 의한 추가적인 공간영역 다중화를 통해 주파수와 시간 영역에서 다중화된 자원요소를 재사용함으로써 송신 안테나 수에 비례하지 않는 적은 개수의 자원요소를 사용하여 많은 수의 CSI-RS를 전송할 수 있는 기술을 제안하였다.

## II. 거대 다중 안테나 시스템의 CSI-RS를 전송하기 위한 기존 LTE-A 자원격자의 한계점

기존 LTE-A 표준에 따르면 8개 송신 안테나(transmitter, Tx)의 CSI-RS를 전송하기 위해선 총 168개의 자원요소로 이루어진 2개의 자원블록(resource block, RB)내 8개의 자원요소가 필요하다. 예를 들어 LTE-A 시스템의 8개 송신 안테나의 8개 CSI-RS 전송을 위한 자원블록내 자원요소의 위치는 그림 1과 같다.

그림 1과 같은 기존 LTE-A 시스템의 자원격자 구조에선 총 168개의 자원요소 중 8개의 CSI-RS 전송을 위해 8개의 자원요소들이 할당되면 데이터 전송을 위해 160개의 자원요소들이 할당된다.

하지만 수십 또는 수백 개 송신 안테나로 이루어진 거대 다중 안테나 시스템의 CSI-RS를 전송을 위해 할당되어야 하는 자원요소는 송신 안테나의 수에 비례하여 증가하기 때문에 실제 데이터 전송을 위해 할당되어야 하는 자원요소들의 수는 감소하게 되어 매우 비효율적이다.

예를 들어 총 128개 송신 안테나로 이루어진 거대 다중 안테나 시스템의 총 128개 CSI-RS를 전송하기 위해선 128개의 자원요소가 필요하므로 2개의 슬롯에 최대 168개의 자원요소를 할당할 수 있는 기존 LTE-A 시스템의 자원격자 구조로 CSI-RS를 전송하게 된다면 40개의 자원요소만이 데이터 전송을 위해 할당되므로 매우 비효율적이다. 따라서 제안한 CSI-RS 전송기술 및 자원격자 구조는 거대 다중 안테나의 빔형성을 통해 한정된 방향으로만 신호를 전달하는 고지향성 특성을 활용하여 CSI-RS를 전송한다. 빔형성을 통해 시간 영역에서 감소된 지연 확산(delay

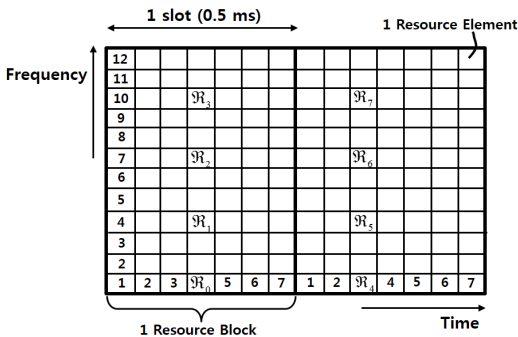


그림 1. 기존 8Tx LTE-A 시스템의 자원격자 구조 및 CSI-RS 전송 위치  
Fig. 1. CSI-RS allocation on resource grid of conventional 8Tx LTE-A system

spread)과 주파수 영역에서 증가한 상관 대역폭(coherence bandwidth)을 활용하여 거대 다중 안테나 시스템에서 송신 안테나 개수에 비례하지 않는 적은 수의 자원요소만으로도 CSI-RS 전송이 가능하도록 제안하고 성능을 평가하였다.

## III. CSI-RS 전송을 위한 빔형성 및 자원요소 재사용을 이용한 자원격자 구조 설계

### 3.1 시스템 모델

다중경로 페이딩 환경에서 기지국이 송신한 전파들은 각각 서로 다른 경로를 거쳐 이동국(mobile station, MS)에 수신된다. 이때 첫 번째 수신된 전파와 그 다음 반사되어 수신된 전파사이 시간 지연이 발생하는데 이 같은 현상을 지연 확산이라 한다.

그림 2와 같이 채널 모델링을 위해 사용되는 3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 공간채널모델(spatial channel model, SCM)은 서로 다른 6개의 클러스터(cluster)들을 통해 이동국에 수신되어진 지연된 전파들을 바탕으로 채널을 모델링 한다<sup>[17]</sup>. 본 논문에선 단일편파 S개의 안테나로 이루어진 기지국

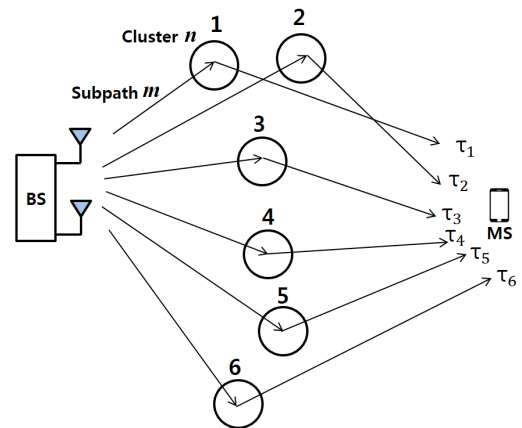


그림 2. 3GPP 공간채널모델의 6개 클러스터들과 시간 지연(delay( $\tau_{1,...,6}$ ))  
Fig. 2. 6 clusters and its delays( $\tau_{1,...,6}$ ) of 3GPP SCM

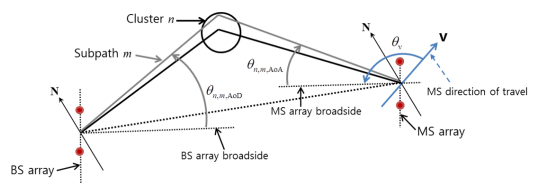


그림 3. 3GPP 공간 채널모델의 개념도  
Fig. 3. Conceptual diagram of 3GPP SCM

이 동시에  $S$ 개의 이동국들에게 전송이 가능하다고 가정한다. 이때  $i$ 번째 이동국의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = \mathbf{H}_i \mathbf{x} + z_i \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{H}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ \dots \ h_{iS}]$ 는  $i$ 번째 이동국의 채널이다. 이동국에 대한  $n$ 번째 클러스터의 채널 계수는 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 그림 3은 수식 (2)를 모델링하기 위해 필요한 변수들을 나타내며 총 20개 subpath들과 6개 클러스터들을 가정하여 이동국의 채널을 모델링한다<sup>[17]</sup>.

$$h_{s,n}(t) = \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M \begin{pmatrix} \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})} \exp(j2\pi\lambda^{-1} [d_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m}]) \times \\ \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \exp(j2\pi\lambda^{-1} [d_u \sin(\theta_{n,m,AoA})]) \times \\ \exp(j2\pi\lambda^{-1} \|\mathbf{v}\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v) t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서  $t$ 는 시간,  $P_n$ 은  $n$ 번째 클러스터의 전력,  $\sigma_{SF}$ 는 로그정규 음영감쇄(lognormal shadow fading),  $\lambda$ 는 전파 파장을 나타낸다.  $\theta_{n,m,AoA}$ 와  $\theta_{n,m,AoD}$ 는 각각  $n$ 번째 클러스터의  $m$ 번째 subpath에 대한 도착 방위각과 출발 방위각을 나타내며  $G_{BS}$ 와  $G_{MS}$ 는 출발 방위각과 도착 방위각의 안테나 이득,  $\Phi_{n,m}$ 는 랜덤 초기 위상,  $\mathbf{v}$ 는 이동국의 속도,  $\theta_v$ 는 움직이는 이동국의 각도를 나타낸다.  $z_i$ 는  $i$ 번째 이동국의 잡음을 나타내며  $\mathbf{x}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}\mathbf{b} = \sum_{i=1}^S \mathbf{f}_i b_i \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1 \ \mathbf{f}_2 \ \dots \ \mathbf{f}_S]$ 는  $S \times S$  DFT 코드북(codebook)을 나타내며  $\mathbf{f}_i$ 는 선택된  $i$ 번째 이동국의  $S \times 1$  프리코딩 벡터(precoding vector)를 나타낸다.  $\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_S]^T$ 는  $S \times 1$  전송 심볼 벡터(symbol vector)를 나타내며  $b_i$ 는  $i$ 번째 이동국의 전송 심볼을 나타낸다. 따라서 minimum mean square error(MMSE) 수신기를 사용하는  $i$ 번째 이동국의 SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_i(\mathbf{F}) = b_i^H \mathbf{f}_i^H \mathbf{H}_i^H \left( \mathbf{I}_{1 \times 1} + \sum_{k=1, k \neq i}^S \mathbf{H}_i \mathbf{f}_k b_k b_k^H \mathbf{f}_k^H \mathbf{H}_i^H \right)^{-1} \mathbf{H}_i \mathbf{f}_i b_i \quad (4)$$

따라서 채널의 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(\mathbf{F}) = \sum_{i=1}^S \log_2 (1 + \gamma_i(\mathbf{F})) \quad (5)$$

### 3.2 빔형성 후 지연 확산

본 논문에선 다중경로 페이딩 채널의 지연 확산특성을 활용하여 거대 다중 안테나 시스템의 기지국에서 빔형성을 통해 특정 경로들의 지향성을 높여 시간 영역에서의 지연 확산을 감소시키고 주파수 영역의 상관 대역폭의 상관관계를 증가시킨다. 이처럼 주파수 영역에서 증가한 상관관계를 바탕으로 자원격자 구조의 채널상태정보 추정에 필요한 CSI-RS 할당 자원요소의 간격을 주파수 영역에서 증가시켜 전송하여도 채널 추정이 가능한 기술을 제안하였다. 따라서 본 절에선 거대 다중 안테나 시스템의 빔형성 전후 지연 확산(delay spread)의 변화를 살펴본다. 다중경로 페이딩에 의한 rms(root mean square) 지연 확산은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (\tau_i - \tau_A)^2 P(\tau_i)}{\sum_{m=1}^M P(\tau_i)}}, \quad \tau_A = \frac{\sum_{m=1}^M \tau_i P(\tau_i)}{\sum_{m=1}^M P(\tau_i)} \quad (6)$$

여기서  $\tau_i$ 와  $P(\tau_i)$ 는 클러스터들의  $m$ 번째 subpath의 지연 시간과 전력을 나타낸다.

그림 4는 특정 시간 샘플에서의 BS와의 거리가 10 m 떨어진 이동국의 빔형성 전후 전력 지연 프로파일

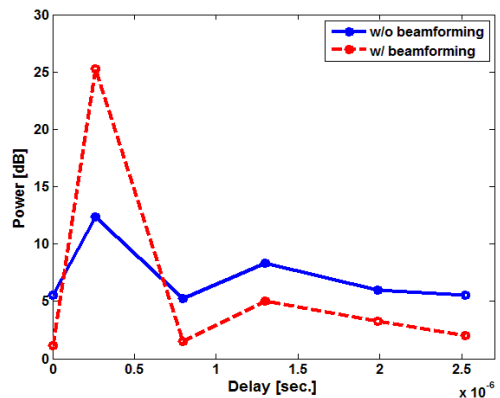


그림 4. 6개 클러스터를 통한 다중 경로들의 빔형성 전후 전력 지연 프로파일 비교  
Fig. 4. Comparative PDPs of 6 multipath from its clusters with and without beamforming

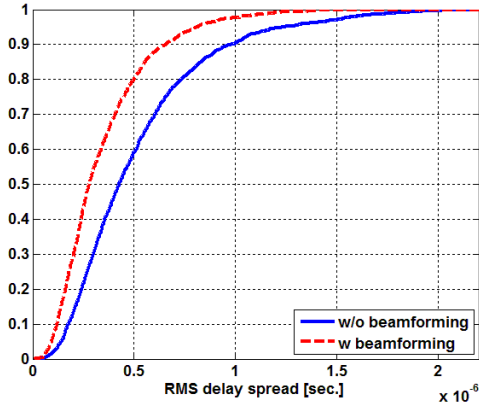


그림 5. 빔형성 전후 지연 확산 누적분포함수 그래프 비교  
Fig. 5. Comparative CDF graphs of delay spread with and without beamforming

(power delay profile, PDP)을 나타내며 빔형성 후 고 지향성 특성에 의해 특정 클러스터 전력이 증가하는 것을 확인하였다. 그림 5는 128Tx 거대 다중 안테나 시스템에서 랜덤하게 위치한 이동국들의 총 100,000 개 이상의 시간 샘플들의 빔형성 후 시간 영역에서의 지연확산 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)를 나타내며 빔형성 후 rms 지연 확산이 감소하는 것을 확인하였다.

### 3.3 빔형성 후 상관 대역폭

무선 통신 시스템에서의  $i$ 번째 이동국의 주파수 응답 채널  $h_{k,i}$ 은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$h_{k,i}[t] = \sum_{l=1}^{L-1} h_l[t] \exp(-j2\pi k l / L) \quad (7)$$

여기서  $k$ 는 부반송파 인덱스를 나타내고  $L$ 은 전체 부반송파의 개수를 나타낸다. 3.2절에서 거대 다중 안테나 시스템의 빔형성 효과로 인한 시간 영역에서의 감소한 rms 지연확산을 확인하였으며 본 절에서는 자원 격자 구조 제안을 위해 빔형성으로 인한 주파수 영역의 변화를 확인하였다.

그림 6은 특정 시간 채널에서의 특정 이동국의 채널( $h_i$ )의 빔형성 전후 주파수 영역의 자기 상관 비교 그래프를 나타낸다. 그림 6에서와 같이 빔형성 후 주파수 영역에서의 상관 대역폭의 자기 상관값이 증가함을 확인할 수 있었다.

그림 7은 빔형성 후 주파수 영역의 100,000개 이상 샘플들의 자기 상관 계수가 0.5인 값의 누적분포함수 그래프를 나타내며 빔형성 후의 상관 대역폭은 기존 상

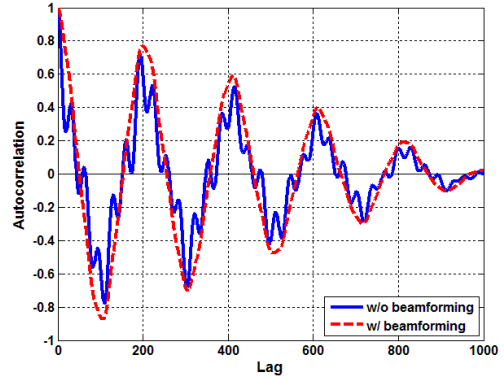


그림 6. 주파수 영역의 빔형성 전후 자기 상관 비교  
Fig. 6. Comparative autocorrelation graphs with and without beamforming in frequency domain

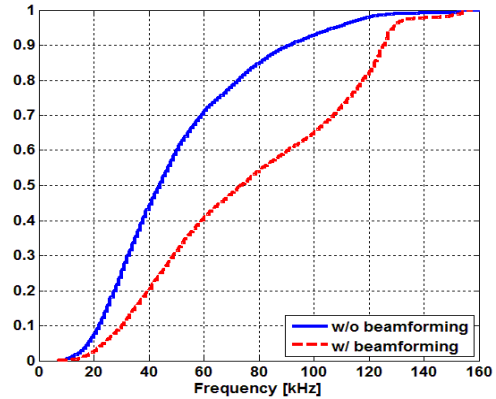


그림 7. 빔형성 전후 상관 대역폭 누적분포함수 그래프 비교  
Fig. 7. Comparative CDF graphs of coherence bandwidth with and without beamforming

관 대역폭보다 2배 가까이 증가함을 확인할 수 있다. 이처럼 증가한 주파수 영역의 상관 대역폭을 활용하여 제안한 자원격자 구조는 주파수 영역에서 CSI-RS 전송을 위한 자원요소의 간격을 기존 LTE-A 자원격자 대비 2배 이상 증가시켜도 채널 추정 가능성이 높도록 설계하였다.

### 3.4 빔형성을 통한 CSI-RS 전송기술

그림 8은 CSI-RS 송신을 위해 수행되는 물리적 프로세싱의 개요를 나타낸다. 그림 8의 ①과정에서는 안테나 포트별로 전송될  $S$ 개의 CSI-RS를 생성한다. 과정 ②에서는  $S \times S$  DFT(행렬  $U$ 를 구성하는  $S \times 1$  크기의  $S$ 개의 컬럼 벡터들( $\{U_s\}_{s=0, \dots, S-1}$ ))로  $S$ 개의 CSI-RS ( $\{R_s\}_{s=0, \dots, S-1}$ )를 다음과 같이 각각 프리코딩한다. 여기서  $s$ 번째 CSI-RS은  $s$ 번째 컬럼벡터  $U_s$

에 의해 프리코딩된다.

$$R_s u_s = \begin{bmatrix} R_s u_{s,1} \\ R_s u_{s,2} \\ \vdots \\ R_s u_{s,S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s,1} \\ r_{s,2} \\ \vdots \\ r_{s,S} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 컬럼 벡터는  $U_s = [u_{s,1} u_{s,2} \dots u_{s,S}]^T$ 이므로 프리코딩을 통해 CSI-RS( $R_s$ )는  $S \times 1$  크기의 벡터  $[r_{s,1} r_{s,2} \dots r_{s,S}]^T$ 로 변환된다. 따라서 DFT 행렬의 컬럼 벡터들( $[u_{s,1} u_{s,2} \dots u_{s,S}]^T$ )은 서로 직교성한 성질을 갖기 때문에 이동국에서 수신받은 CSI-RS은 직교성을 보장 받을 수 있다. 또한 데이터 전송을 위해 사용되는 자원요소에도 CSI-RS 프리코딩에 사용되는 동일한 DFT 행렬로 전송하여 이동국에서 안테나별 채널로 변환하고 데이터 수신에 가능하도록 설계하였다.

그림 8의 ③과정에서는 하나의 자원요소를 공유할 CSI-RS들을  $g$ 개의 자원요소 재사용 그룹들로 분리한다. 거대 다중 송신 안테나는 한정된 방향으로만 신호를 전달하는 고지향성 특성을 가진다. 따라서 전송신호 방향이 충분히 먼 빔들에 의해 전송되는 다수의 CSI-RS들에게 동일한 자원요소를 할당하더라도 동일한 자원요소를 공유하는 CSI-RS간의 동일채널 간섭은 빔들의 고 지향성 특성에 의해 공간적으로 필터링됨으로써 효과적으로 억제될 수 있다. 즉, 하나의 자원요소 재사용 그룹에 속하는 CSI-RS들은 추가적으로 공간 분할 다중화에 의해 공간 영역에서 다중화한다. 이와 같은 추가적인 공간 분할 다중화에 의한 자원요소 재사용을 통해  $S$ 개의 CSI-RS를 전송하기 위해 요구되는 주파수와 시간 영역에서 다중화 된 자원요소의 수를 성능 열화 없이 획기적으로 줄일 수 있다. 예를 들어 128Tx 거대 다중 안테나 시스템에서 16개의 CSI-RS가 하나의 자원요소를 재사용하면 총 8개( $G=8$ )의 재사용 그룹  $\{\mathcal{R}_g\}_{g=0, \dots, 7}$ 으로 나눌 수 있다. 이 때 128개의 CSI-RS를 전송하는데 8개의 자원요소만을 사용하고  $g$ 번째 자원요소를 사용하는 자원

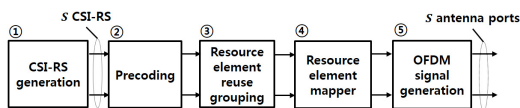


그림 8. CSI-RS 송신을 위해 수행되는 물리적 프로세싱  
Fig. 8. Physical processing of the proposed CSI-RS transmission system

요소 재사용 그룹들( $\mathcal{R}_g$ )은 식 (9)와 같이 표현 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_0 &= \{R_0, R_8, \dots R_{120}\} \\ \mathcal{R}_1 &= \{R_1, R_9, \dots R_{121}\} \\ &\vdots \\ \mathcal{R}_6 &= \{R_6, R_{14}, \dots R_{126}\} \\ \mathcal{R}_7 &= \underbrace{\{R_7, R_{15}, \dots R_{127}\}}_{16 \text{ CSI-RS}} \end{aligned} \quad (9)$$

이처럼 각 자원요소의 재사용 그룹에 속하는 16개의 CSI-RS들은 16개의 빔들에 의해 공간적으로 다중화되어 전송된다. 그림 8의 ④과정에서는 ③과정에서 지정된 재사용 그룹별로 자원 격자의 자원요소에 할당하고 ⑤과정에서 안테나 포트별 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 신호생성기로 전송되어 생성된 OFDM 신호는 각 안테나 포트로 전송된다. 따라서  $s_d$ 개의 빔만큼 떨어진 빔들을 그룹으로 형성했을 경우 자원요소 재사용에 비례하는 재사용률( $F_R$ )은 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$F_R = \frac{1}{s_d} = \frac{1}{G} \quad (10)$$

따라서 CSI-RS를 보내기 위해 필요한 자원요소의 개수는 다음과 같이 재사용 그룹의 개수와 같다.

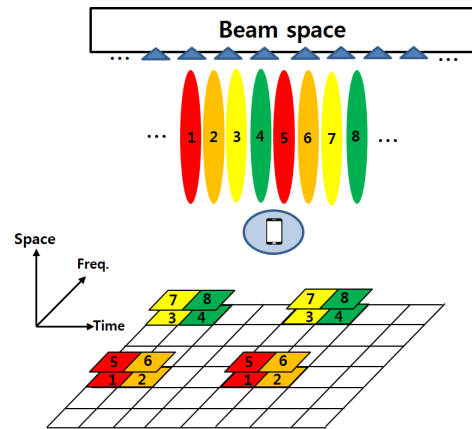


그림 9. 공간 분할 다중화에 의한 재사용률 1/4에 따른 자원요소 할당  
Fig. 9. Allocation of RE by reuse factor 1/4 by SDM

$$s_{RE} = \frac{1}{F_R} = G \quad (11)$$

예를 들어 그림 9은 공간 분할 다중화에 의해 자원 요소를 재사용하고 할당하여 공간적으로 4개의 빔만큼 떨어진 빔들을 한 그룹으로 묶어 자원요소에 할당하는 시스템의 예제를 나타낸다(재사용률 1/4).

### 3.5 거대 다중 안테나 시스템의 자원격자 설계

제안한 기술의 성능 분석을 위해 128개 송신 안테나들의 128개 CSI-RS들을 자원요소 재사용률을 이용한 기술로 모든 128개의 CSI-RS가 전송 가능하도록 자원격자 구조를 설계하였다. 예를 들어 128개의 CSI-RS들 중 8개의 CSI-RS가 1개의 자원요소를 재사용하면 총 16개의 자원요소 재사용 그룹  $\{\mathfrak{R}_g\}_{g=0,\dots,16}$ 으로 나눌 수 있다 (재사용률 1/16). 이 때 128개 CSI-RS를 전송을 위해 16개의 자원요소만을 사용하게 되며  $g$ 번째 자원요소를 사용하는 재사용 그룹 ( $\mathfrak{R}_g$ )은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_0 &= \{R_0, R_{17}, \dots, R_{112}\} \\ \mathfrak{R}_1 &= \{R_1, R_{18}, \dots, R_{113}\} \\ &\vdots \\ \mathfrak{R}_{14} &= \{R_{14}, R_{30}, \dots, R_{126}\} \\ \mathfrak{R}_{15} &= \underbrace{\{R_{15}, R_{31}, \dots, R_{127}\}}_{8 \text{ CSI-RSs}} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)의 자원격자 구조는 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

그림 10에서와 같이 제안한 자원격자 구조에서의 주파수 영역의 CSI-RS 전송을 위한 자원요소의 간격은 기존 LTE-A 시스템의 간격보다 2배 증가 시켜 전송 수 있다. 이는 그림 7에서와 같이 빔형성을 통해 주파수 영역에서의 상관 대역폭이 약 2배 가까이 증가하였기 때문에 주파수 영역에서 CSI-RS 전송에 필요한 자원요소의 간격을 기존 LTE-A 자원격자 구조 대비 2배 증가 시켜도 채널추정이 가능하기 때문이다.

또한 128Tx 거대 다중 안테나 시스템의 128개 CSI-RS를 전송하기 위해선 기존 8Tx 다중 안테나 시스템의 CSI-RS 전송 방식으로는 16배 많은 128개의 자원요소가 필요하다. 반면 제안한 CSI-RS 전송기술은 재사용률 1/16을 사용하고 빔형성으로 증가한 주파수 영역의 자기 상관을 바탕으로 자원요소 간격을 2배 증가시켰기 때문에 128개 CSI-RS 전송을 위해 사

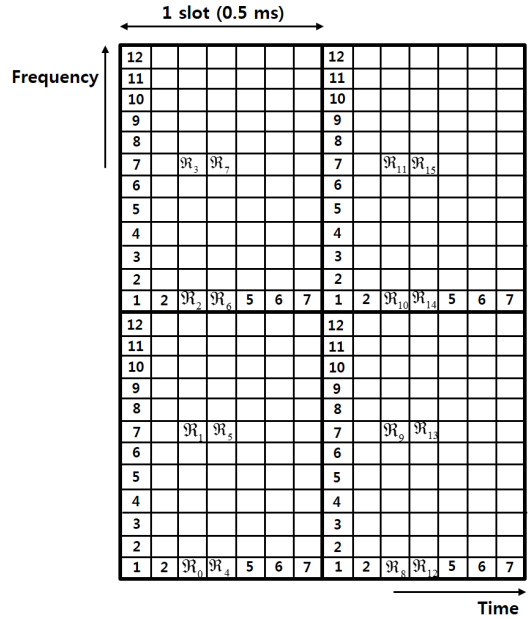


그림 10. 재사용률 1/16을 이용한 제안한 시스템의 CSI-RS 재사용 그룹 위치

Fig. 10. Allocation of CSI-RS with reuse factor 1/16 from proposed resource grid

용되는 자원블록당 사용되는 자원요소의 개수는 8개로 기존 8Tx 다중 안테나 시스템과 동일하지만 2개 자원블록의 16개 자원요소만을 사용하여 모든 128개의 CSI-RS 전송이 가능하도록 설계하였다.

## IV. 성능 분석

### 4.1 채널 추정 성능 검증

앞서 제안한 CSI-RS 전송기술을 채널 추정 성능 검증을 위해 시스템 레벨에서의 성능 평가에 앞서 128개 송신 안테나와 MMSE 수신기를 사용하는 1개의 수신 안테나를 사용하는 거대 다중 안테나 시스템에서 제안한 재사용률 변화 및 격자구조에 따른 SNR(signal-to-noise ratio) 성능을 비교 분석하였다.

표 1에 따르면 재사용률이 감소할수록 재사용 그룹 ( $\mathfrak{R}_g$ )내 빔간 간섭이 감소하기 때문에 성능이 증가

표 1. 재사용률 변화에 따른 SNR  
Table 1. SNR value with respect to reuse factor

Reuse factor	SNR [dB]
1/8	8.30
1/16	16.36
1/32	24.85
1/64	38.53

하였으며 재사용률을 이용하여 CSI-RS를 전송하여도 채널 추정을 위한 충분한 SNR값 대비 SER(symbol error rate)값을 갖는 것을 확인하였다<sup>16)</sup>.

#### 4.2 시스템 레벨 시뮬레이션 및 변수

앞서 제안한 CSI-RS 전송기술 및 자원격자 구조의 성능을 평가하기 위해 3GPP의 공간 채널모델을 이용하여 128개의 송신 안테나로 구성된 기지국과 1개의 수신 안테나로 이루어진 이동국 사이 간 채널을 생성하고 시스템 레벨에서의 성능을 평가하였다. 성능 분석을 위해 제작된 시스템 레벨 시뮬레이터는 IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document를 바탕

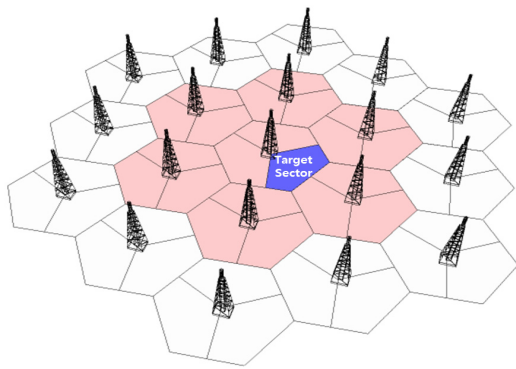


그림 11. 시스템 레벨 시뮬레이션의 매크로셀 구조와 타겟 섹터  
Fig. 11. Macrocell layout of system level simulation with its target sector

표 2. 시뮬레이션 변수  
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Assumption
Cellular layout	Hexagonal grid, 19 sites, and 3 sectors per site <sup>[19]</sup>
Antenna pattern	70 deg. (-3 dB) with 20 dB front-to-back ratio
Angular spread	$8^{\circ}$ <sup>[17]</sup>
Sector radius	350 m
FFT size	64
No. of resource blocks	4
Carrier frequency	1.9 GHz
Noise power density	-174 dBm/Hz
System bandwidth	10 MHz
Instantiation interval	1 ms
BS height	35 m
MS height	1.5 m
Antenna spacing	$0.5\lambda$
BS transmit power	20 W (43 dBm)
Speed of moving MS	3 km/h
Noise figure	7 dB
Pathloss	COST 231 Hata model <sup>[20]</sup>

으로 제작되었다<sup>19)</sup>.

시스템 레벨 시뮬레이터는 그림 11에 묘사된 것같이 2-tier형태로 분포하며 총 19개의 각 셀(cell)은 3개의 섹터(sector)들로 구성되어 있다. 그림 11에 묘사된 파란색 섹터는 성능 평가를 위한 타겟 섹터(target sector)를 나타내며 타겟 섹터내 이동국의 개수와 함께 재사용률 변화에 따른 성능을 분석하였다. 표2는 성능 평가를 위한 시스템 레벨 시뮬레이션의 주요 변수들을 나타낸다.

#### 4.3 재사용률을 이용한 성능 분석

제안한 기술의 성능 평가를 위해 128Tx 거대 다중 안테나 시스템의 시스템 레벨 시뮬레이터를 제작하여 성능을 평가하였다. 본 논문에서 제안한 주파수 재사용 및 빔형성을 이용한 CSI-RS 전송기법과 유사한 기술은 기존에 연구되지 않았기 때문에 직접적인 성능 비교가 불가능하다. 따라서 본 절에선 제안한 CSI-RS 전송기술을 128Tx 거대 다중 안테나 시스템에 적용하여 기존 LTE-A 표준 방식을 사용하는 8Tx 다중 안테나 시스템과의 정량적인 성능을 비교하였다.

제안한 기술의 평가를 위해 타겟 섹터내 랜덤한 위치의 이동국 수를 1, 2, 5, 15, 20, 30의 순서로 증가시켜가며 재사용률 1/16과 1/32를 사용하여 128개의 CSI-RS를 전송하여 성능을 분석하였다.

그림 12에 따르면 이동국의 수가 15보다 적을 때 재사용률 1/32가 1/16보다 높은 용량을 갖지만 그 이상의 이동국 수에선 재사용률 1/16이 1/32보다 높은 성능을 나타내었다. 이처럼 15개 이하 이동국들이 존

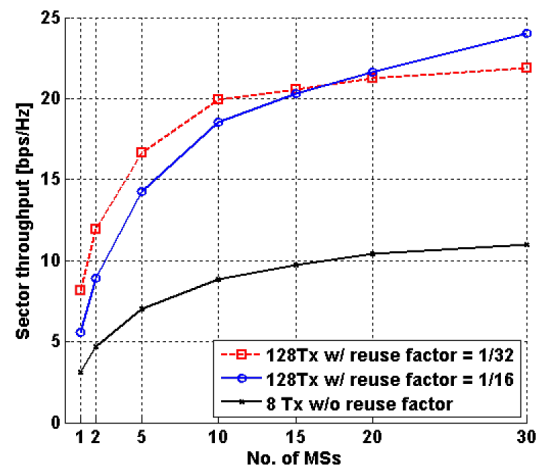


그림 12. 128Tx 거대 다중 안테나의 재사용률 1/16과 1/32를 이용한 시스템-레벨에서의 성능 분석  
Fig. 12. Performance analysis of 128Tx massive MIMO with reuse factor 1/16 and 1/32



재 할 때 재사용률 1/32가 재사용률 1/16보다 높은 성능을 나타내는 원인은 다음과 같다.

재사용률이 1/32일 때 CSI-RS 그룹( $\mathcal{R}_g$ )내 할당된 빔의 개수가 재사용률이 1/16보다 적기 때문에 빔간 간섭이 적게 발생한다. 또한 데이터 전송을 위한 자원요소의 개수가 재사용률 1/32가 재사용률 1/16보다 적지만 적은 수의 자원요소로도 이동국들을 충분히 감당할 수 있기 때문이다.

반면 이동국이 15개 이상 존재할 경우 재사용률 1/16이 재사용률 1/32보다 높은 성능을 나타냈다. 재사용률이 1/16일 때 CSI-RS 그룹( $\mathcal{R}_g$ )내 할당된 빔의 개수가 재사용률이 1/32보다 증가하여 빔간 간섭이 증가하지만 데이터 전송을 위한 자원요소들은 증가한다. 이처럼 데이터 전송을 위해 늘어난 자원요소들은 충분히 많은 이동국들이 존재할수록 좋은 채널 환경의 이동국들에게 데이터를 전송 할 수 있는 확률 및 다중 사용자 다이버시티(multiuser diversity)가 증가하기 때문에 재사용률 1/16이 재사용률 1/32보다 높은 성능을 나타내었다.

또한 타겟 색택내 충분한 수의 이동국들이 존재할 경우 128Tx 거대 다중 안테나 시스템은 기존 8Tx 다중 안테나 시스템 대비 성능이 2배 가까이 증가함을 확인하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 거대 다중 안테나 시스템의 높은 빔형성 이득을 기반으로 다수의 CSI-RS가 하나의 자원요소를 재사용하여 송신 안테나 수에 비례하지 않는 한정된 자원요소만으로 CSI-RS를 전송할 수 있는 기술을 제안하였다. 또한 제안한 CSI-RS 전송기술의 성능 분석을 위해 시스템 레벨에서 이동국의 개수와 재사용률의 변화에 따른 성능을 평가하였다. 기존 LTE-A 8Tx 다중 안테나 시스템을 비교기준으로 했을 때, 128Tx 거대 다중 안테나 시스템의 128개 CSI-RS 전송을 위해 16배 많은 128개의 자원요소가 사용된다. 하지만 제안한 CSI-RS 전송기술은 재사용률 1/16을 사용하여 자원블록당 CSI-RS 전송을 위해 할당되는 자원요소의 수는 8개로 기존 8Tx LTE-A 시스템과 동일하나 2배 많은 16개의 자원요소만으로 128개의 CSI-RS 전송이 가능함을 시뮬레이션을 통해 확인 하였다.

## References

- [1] Cisco, *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology*, 2014 - 2019 white paper, Retrieved Mar., 29, 2016, from <http://www.cisco.com>
- [2] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [3] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013.
- [4] B. Shim and B. Lee, "Evolution of MIMO technology," *J. KICS*, vol. 38A, no. 8, pp. 712-723, Aug. 2013.
- [5] Y.-H. Nam, et al., "Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 6, pp. 172 - 179, Jun. 2013.
- [6] J. Chung, Y. Han, and J. Lee, "Adaptive channel estimation techniques for FDD massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 1239-1247, Jul. 2015.
- [7] Y.-G. Lim and C.-B. Chae, "Limited feedback precoding for correlated massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 39A, no. 7, pp. 431-436, Jul. 2014.
- [8] E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 489-509, Feb. 2006.
- [9] R. G. Baraniuk, "Compressive sensing," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 4, pp. 118-124, Jul. 2007.
- [10] M. E. Eltayeb, T. Y. Al-Naffouri, and H. R. Bahrami, "Compressive sensing for feedback reduction in MIMO broadcast channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 9, pp. 3209-

3222, Sept. 2014.

- [11] H. Song, W. Seo, and D. Hong, "Compressive feedback based on sparse approximation for multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 1017-1023, Feb. 2010.
- [12] J.-H. Kim, I.-K. Kim, J.-S. Park, H.-Y. Song, and S.-W. Han, "Channel state information feedback scheme based on non-convex compressed sensing for massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 628-636, Apr. 2015.
- [13] M. S. Sim, J. Park, and C.-B. Chae, "Compressed channel feedback for correlated massive MIMO systems," in *Proc. KICS Conf. Commun. 2013*, pp. 547-548, Seoul, Korea, Dec. 2013.
- [14] S. Y. Irtaza, J. H. Yoo, and J. W. Choi, "Compressed sensing-based pilot reduction for FDD-based massive MIMO," in *Proc. KICS Conf. Commun. 2016*, pp. 486-467, Gangwon, Korea, Jan. 2016.
- [15] X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, and F. Tufvesson, "Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 7, pp. 3899-3911, Jul. 2015.
- [16] B. Lee, J. Choi, J.-Y. Seol, D. J. Love, and B. Shim, "Antenna grouping based feedback compression for FDD-Based massive MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 9, pp. 3261-3274, Sept. 2015.
- [17] 3GPP TR 25.996, *Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations*, 12.0.0 ed., Apr., 1, 2016, from [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org).
- [18] Y. Shen and E. Martinez, "Channel estimation in OFDM systems," *Freescall Semiconductor Application Note*, Retrieved Apr., 2, 2016, from [www.nxp.com](http://www.nxp.com).
- [19] R. Srinivasan, ed., "IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)," *IEEE 802.16m-Advanced Air Interface*, Retrieved Mar., 30, 2016, from <http://ieee802.org>.
- [20] COST Action 231, "Digital mobile radio

towards future generation systems," *European Commission tech. rep.*, Retrieved Mar., 29, 2016, from <http://www.cost.eu>.

**홍 준 기 (Jun-Ki Hong)**



2010년 8월 : Carleton University, Systems and Computer Engineering 졸업  
 2010년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정  
 <관심분야> Massive MIMO, Dual-polarized MIMO system 등

**조 한 신 (Han-Shin Jo)**



2001년 8월 : 연세대학교 전자공학과 학사  
 2004년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사  
 2009년 8월 : 연세대학교 전자공학과 박사  
 2009년 10월~2011년 10월 : University of Texas at Austin, Postdoctoral Fellow  
 2011년 11월~2012년 2월 : 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원  
 2012년 3월~현재 : 한밭대학교 전자제어공학과 조교수  
 <관심분야> MIMO 시스템, 펄스셀 및 소형셀 네트워크, 확률기하이론 등

문 철 (Cheol Mun)



1995년 2월 : 연세대학교 전자  
공학과 학사

1997년 2월 : 연세대학교 전자  
공학과 석사

2001년 2월 : 연세대학교 전자  
공학과 박사

2001년 3월~2002년 2월 : 삼성  
전자 네트워크사업부 선임연구원

2003년 8월~현재 : 한국교통대학교 정보통신공학과  
교수

<관심분야> MIMO시스템, 채널모델링, ITS시스템  
등

육 중 관 (Jong-Gwan Yook)



2000년 3월~현재 : 연세대학교  
전기전자공학과 교수

2012년~2013년 : IEEE Disti-  
nguished Lecturer (EMC  
Society)

<관심분야> 수치해석, 마이크  
로파 구조 해석 및 설계,  
EMI/EMC, HEMP, TF 바이오/가스 센서 등