

공간 상관도를 가지는 거대배열 다중안테나 시스템에서 압축채널 제한적 피드백 알고리즘

임연근*, 채찬병^o

Limited Feedback Precoding for Correlated Massive MIMO Systems

Yeon-Geun Lim*, Chan-Byoung Chae^o

요약

본 논문에서는 높은 공간 상관도(spatial correlation)를 가지는 massive MIMO(multiple-input multiple-output) 시스템에서 Compressive Sensing 기반의 제한적 피드백 알고리즘을 제안한다. 현실적으로 많은 안테나를 설치하기 위해 기지국에서는 조밀한 uniform square array를 가정하였다. 또한 다중 사용자를 지원하기 위해 기지국에서는 영점강제(zero-forcing) 프리코더를 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 제한된 피드백 알고리즘이 기존의 random vector quantization 코드북 보다 더 좋은 성능을 보이고 피드백 오버헤드와 코드북 인덱스를 찾는 계산량이 감소함을 보였다.

Key Words : Massive MIMO, ergodic achievable rate, limited feedback, codebook, compressive sensing

ABSTRACT

In this paper, we propose a compressive sensing-based channel quantization feedback mechanism that is appropriate for practical massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems. We assume that the base station (BS) has a compact uniform square array that has a highly correlated channel. To serve multiple users, the BS uses a zero-forcing precoder. Our proposed channel feedback algorithm can reduce the feedback overhead as well as a codebook search complexity. Numerical simulations confirm our analytical results.

I. 서론

현재 통신 기술은 SU-MIMO (single user multiple-input multiple-output)와 MU-MIMO (multiuser MIMO)를 기반으로 진화하고 있다¹⁾. MIMO 기술은 안테나가 많아지면 많아질수록 이론적으로 용량이 증가되지만 간섭 등의 문제로 용량향상이 제약되기 때문에 여전히 많은 연구들이 이루어지고 있다. SU-MIMO는 스트림(stream)간의 간섭, MU-MIMO

는 스트림/유저 간의 간섭, 그리고 다중셀(multi-cell)에서 고려하는 MIMO에서는 셀 내부에서 오는 스트림/유저 간의 간섭뿐만 아니라 인접셀 간 간섭들을 처리해주어야만 한다.

Massive MIMO는 기지국(base station, BS)에서 무수히 많은 안테나를 사용하여 간섭과 잡음을 제거하고 송신 전력을 최소화하는 기술이다. Massive MIMO의 장점은 선형(linear) 송수신 필드로 충분히 비선형(non-linear) 송수신 필드에 필적하는 성능에도

* 본 연구는 미래부가 지원한 2014년 정보통신·방송(ICT)연구개발사업의 연구결과로 수행되었습니다.
 ※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.
 • First Author : Yonsei University School of Integrated Technology, yglim@yonsei.ac.kr, 학생회원
 ◦ Corresponding Author : Yonsei University School of Integrated Technology, cbchae@yonsei.ac.kr, 정회원
 논문번호 : KICS2014-06-225, Received June 3, 2014; Revised July 18, 2014; Accepted July 18, 2014

달할 수 있다는 점이다^{2,3}. 따라서 안테나 수가 많아지면 많아질수록 송수신 필드 디자인이 복잡해지는 MIMO 기술임을 고려할 때 이런 제약조건이 사라지는 massive MIMO는 통신기술이 앞으로 나아가야 할 필수 요소를 시사한다.

기존 MIMO 기술들은 안테나 수의 제약으로 동시에 전송 가능한 스트림의 수가 제약되어 비교적 적은 유저를 지원하였다. 이런 제약이 사라지는 massive MIMO 시스템에서는 무수히 많아진 안테나만큼 무수히 많은 유저를 지원할 수 있게 되었다. MU-MIMO 하향링크에서는 유저 간 협력이 거의 불가능하기 때문에 유저 간 간섭을 제거하거나 완화하기 위해서는 기지국에서 프리코딩(precoding)을 해주어야 하고 이를 위해서 기지국에서 채널정보를 알아야 한다. Massive MIMO에서 다중 사용자를 지원하기 위한 연구들은 채널 대칭성(channel reciprocity)으로 기지국에서 채널을 완벽하게 알 수 있는 시분할 이중(time-division duplex, TDD)에서 진행되었다⁴⁻⁷. 하지만 기존의 통신 표준에서는 주파수분할 이중(frequency-division duplex, FDD)을 지원하고 있다. 따라서 하위 호환성(backward compatibility) 확보를 위해서는 FDD에서 massive MIMO 기술을 구현하는 것이 필수적이다.

FDD 하향링크 시스템의 기지국에서 채널정보를 얻는 가장 일반적인 방법은 제한된 피드백(limited feedback)이다. MU-MIMO 시스템에서 고려하는 제한된 피드백 기술에는 직교빔포밍(orthogonal beamforming)과 벡터양자화(vector quantization)가 있다. 직교빔포밍은 유저가 프리코딩 매트릭스 인덱스(precoding matrix index, PMI)를 선택하여 기지국으로 피드백하는 방식이며 벡터양자화는 유저가 채널 방향 인덱스(channel direction index, CDI)를 선택하여 기지국으로 피드백하는 방식이다.

직교빔포밍의 대표적인 예로 PU2RC와 discrete Fourier transform(DFT) 코드북(codebook)⁸이 있다. 직교빔포밍은 동시에 지원 가능한 유저수가 유저풀(user pool)보다 적을 때 더 좋은 성능을 보이기 때문에 기존의 안테나가 적은 MIMO 시스템에서는 PMI를 기지국으로 피드백하는 방식이 주로 논의되어 왔다⁹. 채널 양자화의 대표적인 예로 random vector quantization (RVQ) 코드북과 Grassmannian 코드북¹⁰이 있다.

MIMO에서는 멀티플렉싱 게인(multiplexing gain)을 얻기 위해서 피드백 오버헤드가 안테나 수에 비례해서 증가하게 되고¹¹, 코드북 인덱스 계산량 역시 안

테나 수에 비례해서 증가한다. 또한 높은 공간상관도(spatial correlation)에 적합한 피드백 방법에 대한 연구도 거의 이루어 지지 않았다. 이 문제를 해결하기 위한 방법 중 공간상관도가 높은 massive MIMO에서 피드백의 양을 줄이기 위해 Compressive Sensing(CS) 기법을 피드백에 사용하는 방법이 있다¹². 하지만 SU-MIMO에서 추정 채널의 평균제곱오차(mean square error, MSE)를 최소화 하는 방향으로 연구가 진행되어 왔으며 현재 시스템에 맞지 않는 아날로그 피드백을 고려하였다.

Massive MIMO를 현실적으로 구현하기 위해서는 좁은 공간에 많은 안테나를 설치해야 한다. 이를 위해서 2차원 배열 안테나 시스템이 고려되고 있으며 높은 공간 상관도를 제공한다. 기존의 제한된 피드백은 비교적 낮은 공간 상관도에서 설계되어 왔으며 오버헤드와 코드북 인덱스 계산량은 안테나가 늘어날수록 증가했다. 또한, FDD system에서는 파일럿의 양이 안테나가 늘어날수록 증가한다. 지금까지의 채널 피드백 기술은 주로 많지 않은 유한개의 안테나 시스템 환경에서 개발되었다. Massive MIMO 시스템에서는 동시에 지원 가능한 유저가 많아지면서 PMI를 피드백하는 직교 빔포밍보다 CDI를 피드백하는 벡터 양자화가 더욱 유리하다. 또한, 직교 빔포밍 및 벡터 양자화 방식 모두 인덱스를 찾기 위한 연산량이 massive MIMO에서 더욱 증가하게 되었다.

본 논문에서는 공간 상관도가 상대적으로 높은 massive MIMO에서 사용하는 CS기반의 CDI 코드북 알고리즘을 제안한다. 제안하는 코드북은 채널 피드백의 오버헤드와 파일럿의 양을 줄이고 코드북 인덱스를 찾는 계산량을 줄인다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 코드북 알고리즘은 높은 상관도를 가지는 massive MIMO 시스템에서 더 적은 피드백 오버헤드로 기존의 RVQ 코드북 보다 더 높은 성능을 제공하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 a 는 스칼라(scalar), \mathbf{a} 는 벡터, \mathbf{A} 는 행렬, \mathbf{A}^H 는 에르미트(Hermitian) 행렬, \mathbf{A}^T 는 전치(transpose) 행렬을 나타낸다.

2.1 시스템 모델

그림 1은 M 개의 안테나를 가지는 기지국이 1개의 안테나를 가지는 K 명의 유저를 서비스 하는 massive MIMO 시스템의 블록다이어그램이다. 기지국에서 공간상관도가 고려된 k 번째 유저의 MIMO 채널은 아래

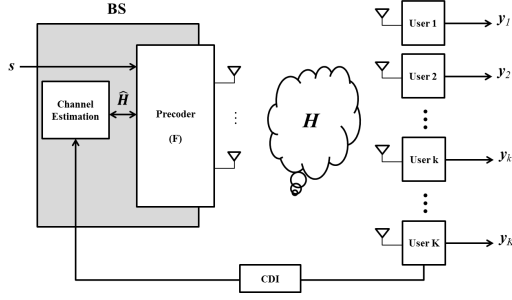


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. Block diagram of MU-MIMO system with limited feedback.

와 같다.

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{R}_{\text{TX}}^{1/2} \mathbf{h}_{\text{IID},k}$$

$\mathbf{h}_{\text{IID},k}$ 는 평균은 0 분산은 1인 독립 복소 가우시안 랜덤변수(independent complex Gaussian random variable)이며, \mathbf{R}_{TX} 는 기지국에서 공간 상관도 행렬이고 유저는 알고 있다고 가정하였다. 3D ring 모델의 등방성 산란(isotropic scattering) 환경에서 \mathbf{R}_{TX} 의 각 성분은 아래와 같다^[13].

$$r_{ij}^{\text{TX}} = \text{sinc}\left(\frac{2\pi d_{ij}}{\lambda}\right).$$

d_{ij} 는 i 번째 안테나와 j 번째 안테나 사이의 거리이고 λ 는 캐리어(carrier)의 파장이다. \mathbf{R}_{TX} 는 대칭 행렬이므로 모든 유저가 고려된 $K \times M$ 채널 행렬은 아래와 같다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{IID}} \mathbf{R}_{\text{TX}}^{1/2}$$

기지국에서 프리코더(precoder)는 식 (1)의 영점강제(zero-forcing, ZF)를 사용하고 $\hat{\mathbf{H}}$ 는 기지국에서의 추정 채널(estimated channel)이다.

$$\mathbf{F} = \hat{\mathbf{H}}^* (\hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{H}}^*)^{-1} = [\mathbf{f}_1 \ \mathbf{f}_2 \ \cdots \ \mathbf{f}_k \ \cdots \ \mathbf{f}_K]. \quad (1)$$

기지국의 총 송신 파워가 P 이고 프리코더 벡터를 벡터 노멀라이제이션(vector normalization)하였을 때 k 번째 유저의 수신 신호는 아래와 같다.

$$y_k = \sqrt{P} \mathbf{h}_k^T \frac{\mathbf{f}_k}{\sqrt{K} \|\mathbf{f}_k\|} s_k + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sqrt{P} \mathbf{h}_k^T \frac{\mathbf{f}_l}{\sqrt{K} \|\mathbf{f}_l\|} s_l + n_k. \quad (2)$$

식 (2)로부터 k 번째 유저의 신호 대 간섭 및 잡음비(signal-to-interference-plus-noise, SINR)은 아래와 같다.

$$\text{SINR}_k = \frac{\left| P \mathbf{h}_k^T \frac{\mathbf{f}_k}{\sqrt{K} \|\mathbf{f}_k\|} \right|^2}{P \sum_{l=1, l \neq k}^K \left| \mathbf{h}_k^T \frac{\mathbf{f}_l}{\sqrt{K} \|\mathbf{f}_l\|} \right|^2 + 1}$$

2.2 Compressive Sensing 기법 및 채널 추정

CS기법은 기존 M 차원 벡터 신호가 $M \times M$ 크기의 스파스(sparse) 행렬(Ψ)을 곱하여 나온 M 차원 벡터의 성분이 0이 많은 스파스 신호로 표현이 되면 $N \times M$ 크기의 랜덤 측정(measurement) 행렬(Φ)에 기존 신호를 곱하여 $N (\leq M)$ 차원 신호로 압축하는 기법이다. Restricted isometry property (RIP)를 만족하는 L1 최소화 복원알고리즘에 압축된 신호를 적용하면 원신호를 복원할 수 있다.

따라서 CS기법을 사용하면 간단한 선형 정사영(linear projection)을 통해 채널을 아래와 같이 압축할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{h}}_k = \Phi \mathbf{h}_k$$

본 논문에서는 정규분포를 가지는 랜덤 측정 행렬을 사용하였고, 스파스 행렬은 아래의 조건을 만족하는 principal component transform(PCT) 행렬을 사용하였다. Λ 는 대각 성분이 고유값(eigen value)인 대각 행렬이다.

$$\mathbf{R}_{\text{TX}} = \Psi \Lambda \Psi^*$$

유저는 압축된 채널($\tilde{\mathbf{h}}_k$)의 CDI를 기지국으로 피드백하고, 기지국은 압축된 채널을 OMP(orthogonal matching pursuit)^[14]을 사용하여 \mathbf{h}_k 를 추정하여 프리코더를 생성한다.

III. 제안하는 피드백 알고리즘

3.1 파일럿 디자인

일반적으로 기지국에서는 채널을 유저에게 알려주기 위해 직교(orthogonal) 파일럿 시퀀스(sequence)를 사용하며, 파일럿 시퀀스의 길이는 안테나 수에 비례한다. Massive MIMO에서는 안테나가 매우 많아지므로 채널추정을 위한 파일럿 시퀀스 역시 비례하여 매우 길어지게 된다. 하지만 측정 행렬의 열(row) 벡터를 파일럿 시퀀스로 사용하게 되면 유저는 압축된 채널을 알 수 있게 된다. 즉, 기존 채널을 유저가 알기위해서 길이가 M 인 파일럿 시퀀스가 필요하였다면 압축 채널을 유저가 알기 위해서는 길이가 N 인 파일럿 시퀀스가 필요하게 되어 massive MIMO에서 큰 문제 중 하나인 파일럿 시퀀스 길이가 대폭 감소하게 된다.

3.2 제안하는 피드백 알고리즘

본 논문에서는 FDD 시스템에서 채널 양자화를 통한 RVQ 코드북 기반 채널 추정을 고려한다. C 를 기지국과 유저사이에 기약속된 코드북이라하고 B 를 피드백 오버헤드 비트수로 정의한다.

$$C = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_j \ \dots \ c_{2^B}].$$

C_{RVQ} 를 RVQ 코드북이라고 하면 채널 공간 상관도가 고려된 RVQ 코드북은 아래와 같다.

$$W_{RVQ} = R_{TX}^{1/2} C_{RVQ}$$

W_{RVQ} 는 h_k 와 같은 분포를 가지는 코드북이다. 유저는 h_k 대신 압축 채널인 \tilde{h}_k 를 알고 있기 때문에 제안하는 코드북은 아래와 같이 디자인할 수 있다.

$$W_{proposed} = \Phi W_{RVQ}$$

유저가 알고 있는 채널에 가장 근접한 양자화 채널의 인덱스를 찾기 위해 아래의 내적(inner product)을 사용하여 CDI인 j^* 를 찾는다.

$$j^* = \arg_j \max |\tilde{h}_k^* c_j|.$$

기지국은 인덱스 j^* 를 받으면 N 차원 벡터인 c_k 를 OMP 알고리즘으로 M 차원 벡터인 \hat{h}_k 로 추정을 하게

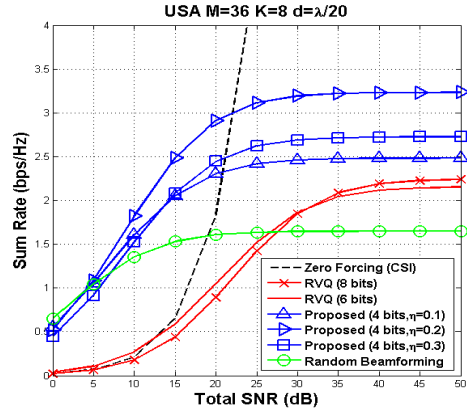


그림 2. 안테나 간격이 $d = \lambda/20$ 일 때 성능평가
Fig. 2. Sum rate comparison of the proposed channel feedback algorithm and RVQ. ($d = \lambda/20$)

된다.

IV. 성능 평가

시뮬레이션을 위해 기지국은 6×6 의 uniform square array를 이루는 36개의 안테나를 가지고 있다고 가정하였다. 시뮬레이션은 기지국이 채널을 완벽하게 알고 있을 때, W_{RVQ} 코드북을 사용하였을 때, $W_{proposed}$ 코드북을 사용했을 때와 랜덤빔포밍(random beamforming)을 사용했을 때를 비교하였다. 랜덤 빔포밍은 빔포밍 벡터의 각 성분이 평균은 0 분산은 1인 독립 복소 가우시안 랜덤변수를 가진다고 가정하였다.

그림 2는 안테나 간격이 $\lambda/20$ 일 때 성능 평가 그래프이다. 높은 공간 상관도를 가지는 채널의 ZF의 특성에 의해 낮은 신호 및 잡음비(signal-to-noise-ratio, SNR)에서는 채널을 완벽하고 알고 있을 때보다 랜덤빔포밍 성능이 더 좋게 나온다. 기존의 CS기법을 통한 채널 복구 알고리즘은 압축비(compression ratio, η)가 높을수록 좋은 MSE를 제공하였다. 하지만 제안한 CS기법의 피드백 알고리즘은 $\eta = 0.2$ 에서 가장 좋은 성능을 보였다. 기존의 CS기법의 피드백 알고리즘은 SU-MIMO를 가정하였기 때문에 유저가 알아야 하는 채널역시 중요하여 MSE 성능을 향상 시키는 것이 주목적이었다. 하지만 제안하는 기법은 MU-MIMO를 가정하여 유저는 완벽한 채널을 알 필요가 없고 압축된 채널만을 트레이닝(training)하여 기지국으로 양자화된 채널을 피드백하면 되기 때문에 MSE성능은 의미가 없다. 이러한 이유로 제안한 기법이 4비트를

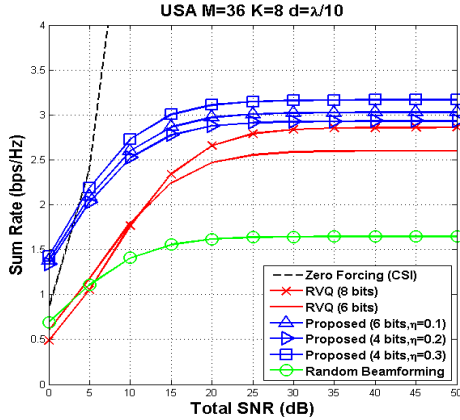


그림 3. 안테나 간격이 $d = \lambda/10$ 일 때 성능평가
Fig. 3. Sum rate comparison of the proposed channel feedback algorithm and RVQ. ($d = \lambda/10$)

표 1. 코드북 인덱스를 찾는 계산량 비교
Table 1. comparison of computational complexity.

Compression ratio	Number of Multiplications
1 (RVQ)	144
0.3	48
0.2	28
0.1	16

사용하더라도 기존의 6비트와 8비트 RVQ 코드북보다 더 좋은 성능을 보인다. 또한 트레이닝을 위한 파일럿 시퀀스 길이도 대폭 감소하게 된다.

그림 3은 안테나 간격이 $\lambda/10$ 일 때 성능 평가 그래프이다. 여전히 제한한 기법이 더 좋은 성능을 보였다. 또한, 표 1은 코드북 인덱스를 찾는 계산량을 비교한 표이다. 계산량은 복소 곱 연산량에 비례하므로 RVQ의 경우 144인데 반해 제한한 기법은 압축비가 0.3일 때 48이고 0.1일 때 16으로 대폭 감소하였다.

V. 결론

본 논문에서는 높은 공간 상관도를 가지는 massive MIMO 시스템에서 CS기반의 제한적 피드백 알고리즘을 제안하였다. 현실적으로 많은 안테나를 설치하기 위해 기지국에서는 조밀한 uniform square array를 가정하였다. 또한 다중 사용자를 지원하기 위해 기지국에서는 영점강제 프리코더를 사용하였다. 제안한 피드백은 RVQ 코드북으로부터 쉽게 생성할 수 있다. 또한 RVQ 코드북을 사용하는 시스템보다 파일럿 시퀀스의 길이가 대폭 감소하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 피드백 알고리즘이 기존의 RVQ 코드북보다 더 좋은 성능을 보이고 피드백 오버헤드와 코드북 인덱

스를 찾는 계산량이 감소함을 보였다.

References

- [1] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath Jr., C.-B. Chae, and T. Salzer, "From single user to multiuser communications: shifting the MIMO paradigm," *IEEE Sig. Processing. Mag.*, vol. 24, No. 5, pp. 36-46, Sept. 2007.
- [2] 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 Large arrays," *IEEE Sig. Processing. Mag.*, vol. 30, No. 1, pp. 40-60, Jan. 2013.
- [3] C.-B. Chae, D. Mazzaese, N. Jindal, and R. W. Heath, Jr., "Coordinated beamforming with limited feedback in the MIMO broadcast channel," *IEEE J. Select. Areas in Comm.*, vol. 26, no. 8, pp. 1505-1515, Oct. 2008.
- [4] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wirel. Comm.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [5] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," submitted to *IEEE Trans. Comm.*, arXiv:1112.3810, 2011.
- [6] J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, "Massive MIMO: How many antennas do we need?," in *Proc. Allerton Conf. Commun., Control, and Computing (Allerton)*, pp. 545-550, Sept. 2011.
- [7] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, "Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems," *IEEE Trans. Wirel. Comm.*, vol. 10, no. 8, pp. 2640-2651, Aug. 2011.
- [8] B. M. Hochwald, T. L. Marzetta, T. J. Richardson, W. Sweldens, and R. Urbanke, "Systematic design of unitary space-time constellations," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 6, pp. 1962-1973, Sept. 2000.
- [9] K. Huang, J. G. Andrews, and R. W. Heath Jr., "Performance of orthogonal beamforming

for SDMA with limited feedback,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 152-164, Jan. 2009.

- [10] D. J. Love, R. W. Heath Jr., and T. Strohmer, “Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output Wireless Systems,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2735-2747, Oct. 2003.
- [11] N. Jindal, “MIMO broadcast channels with finite-rate feedback,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 11, pp. 5045-5060, Nov. 2006.
- [12] P-H. Kuo, H. T. Kung, and P-A. Ting, “Compressive sensing based channel feedback protocols for spatially-correlated massive antenna arrays,” in *Proc. IEEE Wirel. Comm. and Net. Conf. (WCNC)*, pp. 492-497, Shanghai, Apr. 2012.
- [13] T. S. Pollock, T. D. Abhayapala, and R. A. Kennedy, “Introducing ‘space’ into space-time MIMO capacity calculations: A new closed form upper bound,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Telecommun.(ICT 2003)*, vol. 2, pp. 1536-1541, Mar. 2003.
- [14] J. A. Tropp and A. C. Gilbert, “Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655-4666, Dec. 2007.

임연근 (Yeon-Geun Lim)



2012년 3월~현재 : 연세대학교
글로벌융합공학부 석박사 동
합과정

채찬병 (Chan-Byoung Chae)



2011년 3월~현재 : 연세대학교 글
로벌융합공학부 조교수