

# 밀리미터파 채널 추정을 위한 압축 센싱 기법

한 용 희\*, 이 정 우<sup>o</sup>

## Compressed Sensing Techniques for Millimeter Wave Channel Estimation

Yonghee Han\*, Jungwoo Lee<sup>o</sup>

요 약

밀리미터 대역은 매우 넓은 대역폭을 활용할 수 있어 5G 시스템의 데이터 전송률을 높일 핵심 요소로 기대되고 있다. 해당 대역은 경로 감쇄가 심한 특성을 가지지만, 짧은 파장 덕분에 크지 않은 공간에 매우 많은 안테나를 배치할 수 있어 경로 감쇄를 상쇄할 수 있다. 이처럼 많은 안테나를 활용하는 채널을 기존의 기법으로 추정하기 위해서는 큰 오버헤드가 발생해, 짧은 시간에 트레이닝을 수행하는 채널 추정 기법이 요구된다. 밀리미터파 채널은 매우 적은 수의 유효 경로가 존재하는 특징을 갖기에 적은 수의 관찰 값으로부터 희소 신호를 검출하는 압축 센싱 기법의 활용이 효과적일 것으로 기대된다. 본 논문에서는 밀리미터파 채널 추정을 위한 압축 센싱 기법을 소개한다. 첫째로, 지연 확산이 존재하는 다중 경로 채널 추정을 표준적인 압축 센싱 문제로 변환하는 방식을 제시한다. 또한 압축 센싱을 통해 채널 추정을 수행하기 위해서는 좋은 특성을 갖는 검출 행렬을 생성하는 것이 중요하기에, 양자화된 phase shifter로 임의 발생시킨 검출 행렬의 mutual incoherence 특성을 수치적으로 분석한다.

**Key Words** : Millimeter wave communications, channel estimation, compressed sensing, analog beamforming

### ABSTRACT

Millimeter wave (mmWave) bands are expected to improve data rate of 5G systems due to the wide available bandwidth. While severe path loss in those bands has impeded the utilization, short wavelength enables a large number of antennas packed in a compact form, which can mitigate the path loss. However, estimating the channel with a conventional scheme requires a huge training overhead, hence an efficient estimation scheme operating with a small overhead needs to be developed. The sparsity of mmWave channels caused by the limited scatterers can be exploited to reduce the overhead by utilizing compressed sensing. In this paper, we introduce compressed sensing techniques for mmWave channel estimation. First, we formulate wideband channel estimation into a sparse recovery problem. We also analyze the characteristics of random measurement matrix constructed using quantized phase shifters in terms of mutual incoherence.

### I. 서 론

최근, 지속적으로 증가하는 모바일 데이터 트래픽

과 다양한 어플리케이션에 대한 수요를 만족시키기 위해 5G 시스템 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>. 5G의 핵심 목표 중 하나인 데이터 전송률 향상을 위

\* 본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업(NRF-2015R1A2A1A15052493), 미래창조과학부 정보통신·방송연구개발사업 (IITP-2016-B0717-16-0023), 산업통상자원부 산업기술혁신사업(10051928), 방위사업청 국방생체모방자율로봇특화센터(UD130070ID), BK21 플러스 창의정보기술 인재양성사업단 및 뉴미디어통신공동연구소 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : Department of Electrical Engineering, INMC, Seoul National University, yhan@wspl.snu.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, INMC, Seoul National University, junglee@snu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2016-10-303, Received October 11, 2016; Revised December 29, 2016; Accepted January 12, 2017

해 셀 고밀화, 주파수 효율 향상 등과 함께 기존에 사용되지 않는 주파수 대역을 사용하고자 하는 시도가 진행되고 있으며, 기존에 사용되던 주파수에 비해 매우 넓은 미사용 대역이 존재하는 밀리미터 대역을 활용하는 방안이 대두되고 있다<sup>[2],[4]</sup>. 밀리미터파는 경로 손실이 매우 크기 때문에 그간 근거리 통신 등으로 활용이 제한되었지만, 높은 이득의 방향성 빔포밍(directional beamforming)을 통해 이를 극복할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 밀리미터파의 짧은 파장 덕분에 많은 수의 안테나를 좁은 면적에 배열하는 것이 가능해져 다중 안테나를 활용한 방향성 빔포밍이 용이하다.

이처럼 많은 안테나를 활용한 빔 형성을 위해서는 채널이 정확히 추정되어야 하는데, 안테나의 수가 많아짐에 따라 채널의 차원도 높아져 기존의 채널 추정 기법을 활용할 경우에 매우 큰 오버헤드가 발생한다<sup>[5]</sup>. 또한, 빔포밍 이전의 매우 낮은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio; SNR)는 채널 추정을 더욱 어렵게 만들고, 적은 수의 RF-chain을 활용하는 아날로그 빔포밍 시스템 또는 하이브리드 빔포밍 시스템의 경우 오버헤드는 더욱 증가한다. 따라서 안테나를 많이 활용하는 밀리미터파 통신을 위해서는 적은 오버헤드로 채널 추정을 수행하는 효율적인 기법이 요구된다.

효율적인 밀리미터 채널 추정을 위해 채널의 sparsity를 이용할 수 있는데, 이는 매우 적은 수의 유효 경로가 존재하는 밀리미터 채널의 특성에서 비롯된다. Angular-time 도메인 채널에서 대부분의 값이 0으로 타나는 sparsity를 활용해 압축 센싱(compressed sensing; CS) 기법을 적용한 채널 추정 기법이 활발히 연구되고 있다<sup>[6-8]</sup>. [6]과 [7]에서는 적응적 압축 센싱 기법과 비적응적 압축 센싱 기법을 활용한 채널 추정 기법이 각각 제안되었고, [8]에서는 이를 혼합한 형태의 two-stage 압축 센싱 기법이 제안되었다. 또한, 해당 논문에서는 압축 센싱 기법의 활용을 통해 기존의 최소제곱(least squares) 방식의 채널 추정에 비해 트레이닝 오버헤드를 크게 줄일 수 있음을 보였다. 하지만, 기존의 연구들은 협대역 채널만을 고려했고 다중경로 지연확산이 존재하는 광대역 채널에 대한 연구는 현재까지 부족한 상황이다.

본 논문에서는 효율적인 밀리미터 대역 채널 추정을 위한 압축 센싱 기법을 소개한다. 협대역 시스템을 고려했던 기존의 연구의 경우 여러 심볼 시간에 걸친 다중 경로 지연 확산이 존재하는 광대역 채널의 추정에는 직접적으로 적용될 수 없다. 또한, 밀리미터파 채널의 추정에 압축 센싱 기법을 활용할 때 검출 행렬

은 phase shifter 들로 생성되며, 실제적인 시스템에서는 양자화된 위상만을 선택할 수 있기 때문에 이러한 환경에서 검출 행렬의 특성을 분석하는 것은 중요한 문제이다. 이에 본 논문에서는 지연확산이 존재하는 다중 경로 채널을 고려하며, 이와 같은 광대역 채널 추정이 표준적인 압축 센싱 문제로 변환될 수 있음을 보인다. 또한, 압축 센싱 기반의 채널 추정을 위해 검출 행렬이 양자화된 phase shifter로 구현될 때 해당 행렬의 특성을 mutual incoherence의 관점에서 수치적으로 분석하고, 이를 통해 좋은 특성을 갖는 행렬을 얻기 위해 필요한 비트의 수를 확인한다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. II장에서는 고려하는 아날로그 빔포밍 기반의 광대역 밀리미터파 통신 시스템을 소개하고, III장에서는 채널 추정을 압축 센싱 문제로 변환한다. IV장에서는 양자화된 phase shifter를 이용해 압축 센싱을 위한 검출 행렬을 구현하는 방안에 대해 제시한다. 이어 V장에서는 제안하는 기법의 모의 실험 결과를 제시하고, 마지막으로 VI장에서는 결론을 내리며 마무리한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 밀리미터 대역에서 동작하는 아날로그 빔포밍 다중 안테나 시스템을 고려한다. 송신단과 수신단은 각각  $N_t$ 개와  $N_r$ 개의 안테나를 활용하며, 이들이 등간격으로 배치된 ULA (uniform linear array)를 가정한다. 또한, 각 안테나가 독립적인 RF-chain을 활용하는 일반적인 시스템과는 다르게, 송,수신단에 각각 하나의 RF-chain이 있는 아날로그 빔포밍 시스템을 가정한다. 해당 시스템은 그림 1에 묘사되어 있다. [6]-[8]의 기존 연구들과 다르게 본 연구에서는 여러 심볼 시간에 걸친 다중 경로가 존재하는 광대역 시스템을 고려한다. 이와 같은 시스템에서  $n$ 번째 심볼 시간의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}}[n] &= \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_r(\theta_l) \mathbf{a}_t^H(\phi_l) \mathbf{x}[n - n_l] + \mathbf{z}[n] \\ &= \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_r(\theta_l) \mathbf{a}_t^H(\phi_l) \mathbf{f}_s[n - n_l] + \mathbf{z}[n] \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $L$ 은 독립적인 다중 경로의 개수를 의미하며,  $(\alpha_l, n_l, \theta_l, \phi_l)$ 은  $l$ 번째 경로의 파라미터들으로써,  $\alpha_l$ 는 경로의 이득,  $n_l$ 은 경로의 지연시간,  $\phi_l$ 은 출발각(angle of departure; AoD),  $\theta_l$ 은 도래각(angle of

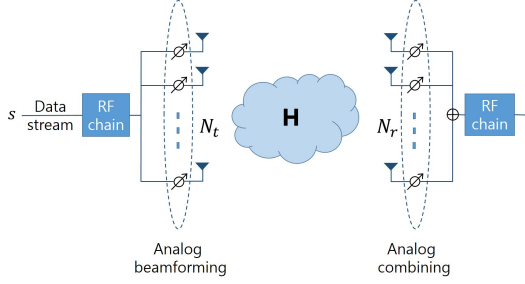


그림 1. 아날로그 빔포밍 기반의 밀리미터파 통신 시스템  
Fig. 1. Millimeter wave communication system using analog beamforming

arrival; AoA)을 나타낸다.

또한,  $\mathbf{a}_t(\phi)$  와  $\mathbf{a}_r(\theta)$  는 해당하는 출발각/도래각에 대응하는 응답 벡터이다. [6]-[8]등과 같이 응답벡터가 이산 푸리에 행렬 (discrete Fourier transform; DFT) 의 열이 되도록 AoD와 AoA를 갖는 것으로 가정한다. 이와 같은 수신 신호는 수신단의 아날로그 결함을 통해 다음과 같은 베이스밴드 신호로 나타난다.

$$y[n] = \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{y}}[n] = \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{w}^H \mathbf{a}_r(\theta_l) \mathbf{a}_t^H(\phi_l) \mathbf{f}s[n-n_l] + \mathbf{w}^H \mathbf{z}[n] \quad (2)$$

여기에서  $\mathbf{f}$ 와  $\mathbf{w}$ 는 각각 아날로그 빔포밍 벡터와 결합 벡터를 의미한다. 이 때, 아날로그 빔포밍 가정에 의해,  $\mathbf{f}$ 와  $\mathbf{w}$ 가 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\mathbf{f} = \frac{1}{\sqrt{N_t}} [e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_{N_t}}] \quad (3)$$

$$\mathbf{w} = \frac{1}{\sqrt{N_r}} [e^{j\psi_1}, e^{j\psi_2}, \dots, e^{j\psi_{N_r}}] \quad (4)$$

여기에서  $\phi_i$ 와  $\psi_j$ 는 각각  $i$ 번째 송신 안테나와  $j$ 번째 수신 안테나의 위상을 나타낸다.

### III. 압축 센싱 기반 채널 추정

밀리미터파 통신 시스템에서 심각한 경로 손실을 극복하고 높은 충분히 높은 SNR을 얻기 위해서는 정확한 채널 정보를 활용한 방향성 빔포밍이 필수적이다. 이는 채널의 변화에 맞추어 식 (2)의  $\mathbf{f}$ 와  $\mathbf{w}$ 를 적응시키는 것을 의미한다. 하지만 일반적인 다중안테나 시스템에 이용되는 채널 추정 기법을 활용할 경우, 송

신안테나의 수에 비례하는 트레이닝 오버헤드가 발생되며 본 논문에서 고려하는 아날로그 빔포밍 시스템에서는 오버헤드가 수신 안테나의 수에도 비례해 데이터 전송의 비효율성을 초래한다. 본 논문에서는 효율적인 채널 추정을 위해 적은 수의 선형 관측으로부터 희소 신호를 검출하는 압축 센싱 기법을 활용하고자 한다.

매 상관 시간(coherence time) 중  $M$  만큼의 채널 사용을 채널 추정을 위해 할당한다고 가정한다. 이 때,  $m$ 번째 트레이닝 시간의 수신 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} y_T[m] &= \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{q}_m^H \mathbf{a}_r(\theta_l) \mathbf{a}_t^H(\phi_l) \mathbf{p}_{m-n_l} + \mathbf{q}_m^H \mathbf{z}[m] \\ &= \sum_{l=1}^L \alpha_l (\mathbf{p}_{m-n_l}^T \otimes \mathbf{q}_m^H)^T \\ &= \sum_{l=1}^L \alpha_l (\mathbf{p}_{m-n_l}^T \otimes \mathbf{q}_m^H) (\mathbf{a}_t^*(\phi_l) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_l)) + \mathbf{q}_m^H \mathbf{z}[m] \\ &= (\bar{\mathbf{p}}_m^T \otimes \mathbf{p}_m^H) (\mathbf{I}_{n_{\max}} \otimes \mathbf{A}_D) \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{q}_m^H \mathbf{z}[m], \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서  $\mathbf{p}_m$ 과  $\mathbf{q}_m$ 은 각각  $m$ 번째 트레이닝 시간의 빔포밍/결합 벡터이며,  $n_{\max}$ 는  $L$ 개의 경로 지연 중 가장 큰 값을 의미한다. 또한,  $\mathbf{A}_D$ 는 각 열이 두 DFT 열의 Kronecker 곱으로 구성된  $N_t N_r \times N_t N_r$ 의 대각행렬이고,  $\bar{\mathbf{p}}_m = [\mathbf{p}_m^T, \mathbf{p}_{m-1}^T, \dots, \mathbf{p}_{m-n_{\max}+1}^T]^T$ 로 정의된다.  $\boldsymbol{\alpha}$ 는 각 출발각/도래각 조합에 해당하는 경로 이득을 나타내는  $N_t N_r n_{\max} \times 1$  벡터로,  $L$ 개의 0이 아닌 값을 갖는다.  $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$ 는 행렬  $\mathbf{A}$ 와  $\mathbf{B}$ 의 Kronecker 곱을 나타낸다. 수신단은  $M$  심볼 시간 동안의 전체 관측 값을 모아 다음과 같은 벡터를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_T &= [y_T[1], y_T[2], \dots, y_T[M]]^T \\ &= \mathbf{Q} (\mathbf{I}_{n_{\max}} \otimes \mathbf{A}_D) \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{q}_m^H \mathbf{z}[m] \end{aligned} \quad (6)$$

이 때,  $\mathbf{Q} = [\bar{\mathbf{p}}_1 \otimes \mathbf{q}_1^*, \dots, \bar{\mathbf{p}}_M \otimes \mathbf{q}_M^*]^T$ 로 정의된다.

위의 유도 결과를 관찰하면  $\boldsymbol{\alpha}$  값 중 매우 작은 수 ( $L$ )의 원소만이 0이 아닌 값을 갖기 때문에 (6)의 식이 표준적인 희소 신호 검출문제임을 확인할 수 있고, orthogonal matching pursuit (OMP) [9] 등 압축 센싱 기법을 활용해 원하는 채널 파라미터를 추정할 수 있다.

#### IV. 트레이닝 행렬 설계

희소 벡터(sparse vector)가 압축 센싱을 통해 성공적으로 검출되기 위해서는 좋은 특성을 갖는 관측 행렬이 필수적이다. III장에서 유도된 희소신호 복호 문제 (6)에서는  $\mathcal{Q}(\mathbf{I}_{N_{\max}} \otimes \mathbf{A}_D)$ 이 관측 행렬에 해당한다. 압축 센싱의 성능 분석을 위해 관측 행렬의 특성에 관해 많은 연구가 진행되었다. 이를 위해 restricted isometry property 등 다양한 기준이 정의되었지만, 본 논문에서는 관측 행렬의 특성을 mutual incoherence의 관점에서 분석한다. 행렬  $\mathbf{A}$ 의 mutual incoherence 값은 다음과 같이 정의되며,

$$\mu(\mathbf{A}) = \max_{i \neq j} |\langle \mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j \rangle| \quad (7)$$

관측 행렬의 mutual incoherence 값이 작을수록 희소 신호가 정확하게 복원될 수 있다. Gaussian 행렬 등 랜덤하게 생성된 행렬은 작은  $\mu$ 값을 갖는 것이 알려져 있다.

하지만, 아날로그 빔포밍 밀리미터파 시스템에서는 하나의 RF chain과 양자화된 phase shifter를 이용해 검출 행렬을 생성하므로 발생시킬 수 있는 랜덤 행렬이 제한적이다. 따라서 본 논문에서는 random하게 발생시킨  $\phi$ 와  $\psi$ 를 이용해 트레이닝 빔포밍/결합 벡터의 원소  $e^{j\phi}$ 과  $e^{j\psi}$ 를 생성하였다. 실제 시스템에서는 디지털 제어를 위해 양자화된 값을 갖는 phase shifter를 활용하는 점을 고려,  $\phi$ 와  $\psi$ 는  $0, 2\pi/N_Q, \dots, (N_Q-1)2\pi/N_Q$  중 한 값을 임의로 선택하는 방식으로 구현했다.

또한, 송신단의  $M_t$ 개 랜덤한 빔포밍 벡터와 수신단의  $M_r$ 개의 랜덤 결합 벡터를 조합하여  $M = M_t \times M_r$  개의 관측 값을 얻는 [7]의 방식과 달리, 본 논문에서는 송신단과 수신단이 각각  $M$ 개의 랜덤 벡터를 생성하는 기법을 제안한다. 이를 통해 [4]에서 제시된 모델에서는 송수신단에서 각각 설계한 행렬 Kronecker 곱으로 트레이닝 행렬이 정해지는 것과 달리 제안하는 방식으로 트레이닝을 위한 빔포밍/결합 벡터를 생성할 경우  $M$ 의 독립적인 랜덤 phase 벡터를 활용하기 때문에 보다 높은 randomness를 얻을 수 있어 더 낮은 mutual incoherence를 기대할 수 있다. 이는 V장에서 수치적으로 확인된다.

#### V. 모의 실험 결과

##### 5.1 트레이닝 행렬 특성

제안한 방식의 트레이닝 설계의 효율성을 확인하기 위해 앞서 설명한 바와 같이, 매 트레이닝 시간의 빔포밍/결합 벡터를 각 원소의 위상이  $\{0, 2\pi/N_Q, \dots, (N_Q-1)2\pi/N_Q\}$  중 하나의 값을 갖도록 임의로 생성했다. 이 때, 송신단과 수신단은  $N_t = 64$ 개와  $N_r = 64$ 개의 안테나를 갖지만 각각 하나의 RF-chain을 활용하는 아날로그 시스템을 고려하였다. 또, 효율적인 채널 추정을 고려해 64 심볼 시간 동안 트레이닝을 수행하는 것을 가정하였으며 비교 대상이 [7]의 Kronecker 곱 방식의 트레이닝은 송신단과 수신단이 각  $M_t = 8$ 과  $M_r = 8$ 가지의 트레이닝 벡터를 생성하고, 모든 조합을 활용해 트레이닝 하는 방식으로 동작한다. 또한 비교군으로 활용된 Gaussian 방식은, 행렬의 각 원소를 정교 Gaussian 분포로부터 임의의 발생시켰다.

그림 2의 결과를 통해 일정 해상도 이상의 위상 양자화는 행렬의 incoherence 특성에 영향이 크지 않음을 확인하였으며, 이를 통해 디지털 제어 방식의 phase shifter를 활용하는 아날로그 빔포밍 시스템에서도 압축 센싱을 활용한 채널 추정이 가능할 것을 추정할 수 있다. 또한, Kronecker 곱 방식으로 설계할 경우 제한된 임의성으로 큰 mutual incoherence를 얻는 반면 본 논문을 통해 제안된 방식에 따라 설계된 행렬은 Gaussian 행렬에 근접한 성능을 얻을 수 있음이 확인되었다.

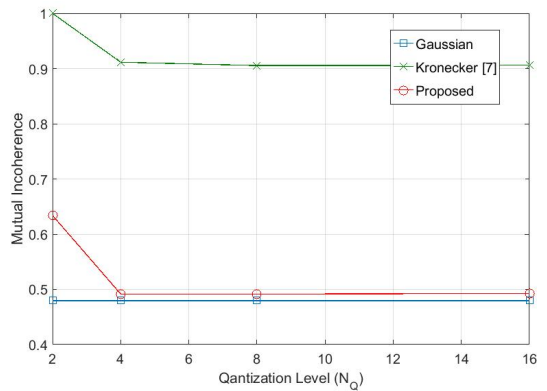


그림 2. 양자화 레벨에 따른 관측 행렬의 mutual incoherence  
Fig. 2. Mutual incoherence of measurement matrix versus quantization level

### 5.2 밀리미터파 채널 추정 성능

압축 센싱을 활용한 채널 추정의 성능을 확인하는 실험을 수행했다. 송신단과 수신단이  $N_t = 32$ 개와  $N_r = 16$ 개의 안테나를 갖는 아날로그 빔포밍 시스템을 고려했으며, 안테나의 배치는 ULA를 가정했다. 채널은 식 (1)과 같이 생성되었으며, 임의로 생성된 AoA, AoD를 갖도록  $L = 5$ 개의 경로를 가정했다. 각 경로의 지연은 0과  $N_{\max} = 10$  사이의 임의의 정수 시간을 갖도록 선택되었다. 또한, 각 안테나의 phase shifter가  $N_Q = 16$  (4비트)개의 후보 위상 중 하나를 임의로 선택되었다. 회소 벡터 복원 기법으로는 널리 알려진 OMP 알고리즘을 이용했다.

그림 3은 다양한 SNR 환경에서 각 경로의 AoA 및 AoD를 정확하게 복원할 확률을 나타낸다. 매우 낮은 SNR 조건에서도 압축 센싱 기법을 활용해 수백 심볼 시간 이내에 완벽한 채널 추정이 가능함을 확인할 수 있으며, 기존의 다중안테나 시스템에 활용되는 exhaustive search 방식의 경우 최소  $N_t N_r n_{\max} = 5120$  심볼 시간이 필요한 점을 감안하면 압축 센싱을 활용해 매우 효율적인 채널 추정이 가능함을 확인할 수 있다. 또한, 예상한 바와 같이 동작 SNR이 낮을수록 긴 시간의 트레이닝이 필요함도 확인할 수 있다.

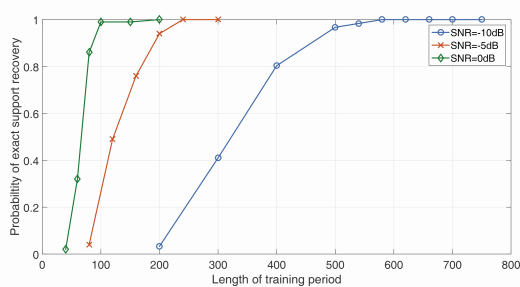


그림 3. 트레이닝 시간에 따른 채널 추정 확률  
Fig. 3. Successful AoA/AoD estimation probability versus training time

## VI. 결 론

본 논문을 통해 여러 경로 지연이 존재하는 광대역 밀리미터파 채널 추정을 회소 벡터 복원 기법인 압축 센싱 문제로 변환했다. 압축 센싱 기법의 활용을 통해 채널 추정에 필요한 오버헤드를 크게 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한, 낮은 mutual incoherence 특성을 갖는 검출 행렬을 얻기 위한 트레이닝 방식을 제안하

였으며, phase shifter의 양자화가 검출 행렬의 특성에 미치는 영향을 수치적으로 분석했다. 이를 통해 실제적인 밀리미터파 통신 시스템에서도 압축 센싱을 활용한 채널 추정이 효과적일 것을 기대할 수 있다.

## References

- [1] F. Boccardi, R. W. Heath Jr., A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology direction for 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, Feb. 2014.
- [2] T. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [3] J. Kim, Y. Bang, Y. Park, I. Kim, and T. Kim, "Physical layer modem implementation for mmWave 5G mobile communication," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 51-57, Jan. 2016.
- [4] J. Kim and Y. Byun, "Adaptive beam selection method for improvement of spectral efficiency in millimeter-wave MIMO" *J. KICS*, vol. 41, no. 8, pp. 890-895, Aug. 2016.
- [5] 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.
- [6] A. Alkhateeb, O. E. Ayach, G. Leus, and R. W. Heath Jr., "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems," *IEEE J. Sel. Topics Sign. Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 831-846, Oct. 2014.
- [7] A. Alkhateeb, G. Leus, and R. W. Heath, "Compressed sensing based multi-user millimeter wave systems: how many measurements are needed?," in *Proc. IEEE ICASSP*, Brisbane, Australia, Apr. 2015.
- [8] Y. Han and J. Lee, "Two-stage compressed sensing for millimeter wave channel estimation," in *Proc. IEEE ISIT*, Barcelona, Spain, Jul. 2016.
- [9] J. A. Tropp and C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655-4666, Dec. 2007.

한 용 희 (Yonghee Han)



2011년 2월 : 서울대학교 전기  
공학 학사

2011년 2월~현재 : 서울대학교  
전기·컴퓨터 공학부 박사과  
정

<관심분야> Massive MIMO,  
밀리미터파 통신, 압축 센싱

이 정 우 (Jungwoo Lee)



1988년 : 서울대학교 전기공학  
학사

1990년 : Princeton 대학교 전기  
공학 석사

1994년 : Princeton 대학교 전기  
공학 박사

2002년~현재 : 서울대학교 전기  
· 정보공학부 교수

<관심분야> 무선통신, 머신러닝