

다수 사용자를 지원하는 상향링크 밀리미터 파 시스템을 위한 아날로그-디지털 빔포밍의 성능 평가

김성환*

Performance Evaluation of Analog-digital Beamforming for Uplink Multi-User Millimeter Wave Systems

Seong Hwan Kim*

Department of Information & Communications Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

요 약

본 논문은 다수의 사용자가 동시에 전송하는 상향링크 상황에서 밀리미터 파 시스템을 위한 하이브리드 빔포밍을 고려한다. 기존의 디지털 시스템에 비하여, 하이브리드 빔포밍은 저비용 저전력 소비의 특성을 갖는다. 각 사용자는 하나의 송신 안테나만을 사용하며, 하나의 데이터 스트림을 보내고, 기지국은 다수의 수신 안테나와 다수의 라디오 주파수 체인을 사용한다. 따라서, 하이브리드 빔포밍은 기지국 측에서만 수행된다. 각 사용자는 채널 정보를 알기 어렵고, 수신자인 기지국은 채널을 정확히 추정할 수 있다고 가정한다. 이러한 채널 가정 하에서 아웃티지가 발생할 확률이 0이 아니다. 따라서 성능 평가 지표로서, 아웃티지 확률을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 측정한다. 논문에서 고려한 하이브리드 빔포밍의 아웃티지 확률을 디지털 빔포밍의 아웃티지 확률과 비교하며, 하이브리드 빔포밍이 디지털 빔포밍의 성능에 근접할 수 있음을 보인다.

ABSTRACT

This paper considers hybrid beamforming for millimeter wave system in uplink transmission where multiple users send their data streams simultaneously. Hybrid beamforming has low-cost and low power consumption features compared to conventional digital beamforming schemes. We assume that each user uses one transmit antenna and sends one data stream, while the base station has multiple receive antennas and multiple radio frequency chains. Therefore, hybrid beamforming is performed only at the base station. We also assume that each user does not know instantaneous channel side information (CSI), while the base station is able to estimate the CSI from all users accurately. Under this channel assumption, the outage probability is not zero. We evaluate the outage probability of the considered hybrid beamforming as a performance metric through computer simulations. We show that the outage probability of hybrid beamforming approaches that of digital beamforming in some cases.

키워드 : 밀리미터 파 시스템, 하이브리드 빔포밍, 다수 사용자, 상향링크

Key word : millimeter wave system, hybrid beamforming, multiple users, uplink

Received 10 October 2016, Revised 10 October 2016, Accepted 20 October 2016

* Corresponding Author Seong Hwan Kim (E-mail: seonghwan.kim@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-9176)

Department of Information & Communications Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2017.21.1.29>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

밀리미터 파 (millimeter wave, mmWave) 통신은 넓은 주파수 대역을 활용할 수 있어 무선 LAN (local area network) 과 차세대 셀룰러 시스템의 주요한 후보 기술 중 하나로 거론되고 있다[1, 2]. 밀리미터 파 신호는 매우 짧은 파장 때문에 마이크로 파 신호 보다 수십 배 강한 경로 손실을 겪는 단점이 있다. 하지만 이 짧은 파장 덕분에 안테나 단자 간격을 줄여, 면적 당 안테나 단자의 개수를 크게 할 수 있기 때문에 큰 빔포밍 (beamforming) 이득을 얻게 되어 경로 손실의 단점을 극복할 수 있다. 뿐만 아니라 다수의 데이터 스트림을 보냄으로써 높은 다중화 이득을 얻을 수 있다. 다수의 데이터 스트림을 포함한 빔포밍, 즉 프리코딩 (Precoding)은 밀리미터 파 시스템의 주파수 효율을 크게 높일 것으로 예상된다.

통상적인 다중 안테나 시스템에서 빔포밍과 프리코딩은 기저대역에서 디지털 방식으로 처리된다. 이를 위해서는 증폭기, 아날로그-디지털 변환기(Analog-digital converter, ADC), 디지털-아날로그 변환기(DAC) 등이 안테나 수 만큼 필요하게 된다. 그러나 이러한 부품들은 고가이면서 전력 소비가 높다. 반면 위상-천이기 (Phase shifter) 와 같이 라디오 주파수 (radio frequency, RF) 영역에서 쓰이는 아날로그 소자는 저가이기 때문에 수십~수백개의 안테나 단자를 사용하는 밀리미터 파 시스템에서는 위상 천이기만을 이용하는 아날로그 빔포밍이 더 많은 주목을 받아왔다[3-5]. 아날로그 빔포밍이 적용된 밀리미터 파 시스템이 실용적인 반면에 빔포밍 행렬의 요소가 절대값이 고정된 복소수값이어야하는 제약때문에 빔포밍 해의 범위를 제한시키는 단점이 있다. 이러한 제약은 아날로그 빔포밍이 디지털 빔포밍에 비하여 성능이 열하되는 주요인이다.

최근 빔포밍 과정을 아날로그 영역과 디지털 영역으로 나누어 아날로그 빔포밍 방식 보다 정확히 빔포밍을 수행하면서 다수의 데이터 스트림을 전송할 수 있는 하이브리드 빔포밍 (hybrid beamforming) 방식이 제안되었다[6-8]. 논문 [6]에서는 밀리미터 파 채널의 반사 성분 이 최소한 특성을 이용하여 하이브리드 빔포밍 문제

를 회소성 재구성 최적화 문제로 만들었으며, 낮은 복잡도의 계산으로 해를 찾는 알고리즘을 개발하였다. 논문 [7]에서는 단일 사용자 단일 스트림 다중안테나 시스템을 위한 저 복잡도 하이브리드 빔포밍 알고리즘이 제안되었다. 논문 [8]에서는 밀리미터 파 채널에 대한 부분 정보만을 이용하는 하이브리드 프리코딩 알고리즘이 개발되었다. 논문 [6-8]에서는 모두 단일 사용자를 고려하였다. 그러나 상용 통신에서는 다수의 사용자들이 기지국이나 액세스 포인트에 접속하는 일대다 통신이 주이기 때문에, 다수의 사용자가 공존하는 상황을 고려하는 연구가 필요하다.

밀리미터 파 시스템에서 다수 사용자에게 적용 가능한 저 복잡도 하이브리드 빔포밍 기법이 [9]에서 개발되었다. 이 기법은 하향링크에 적용가능하며, 제한된 채널 피드백이 있다고 가정하였다. 특히 사용자 측에서는 아날로그 빔포밍만 수행하며, 송신기에서만 하이브리드 빔포밍을 수행한다. 제안된 기술은 아날로그 빔포밍 기법에 비해 높은 합계 전송률을 갖으며, 디지털 빔포밍 기법의 성능에 근접함이 밝혀졌다. 논문 [10]에서는 하향링크에서 다수 사용자를 지원하기 위한 하이브리드 빔포밍 기법을 연구하였다. 특히 디지털 빔포밍에 사용되는 안테나 수가 주어졌을 때, 그것과 동일한 성능을 내는 하이브리드 빔포밍의 안테나 수와 RF 체인¹⁾ (chain) 수를 알아냈다. 위 두 논문은 기지국이 송신자가 되는 하향링크를 고려하였으며, 채널 정보를 수신자 뿐만 아니라 송신자도 정확히 안다고 가정하였다.

본 논문은 다수의 사용자가 동시에 전송하는 상향 링크 상황에서 하이브리드 빔포밍을 수행했을 때의 성능을 평가한다. 각 사용자는 하나의 송신 안테나만을 사용하며, 하나의 데이터 스트림을 보낸다. 또한 각 사용자는 채널 정보를 알기 어렵고, 수신자인 기지국은 채널을 정확히 추정할 수 있다고 가정한다. 이러한 가정은 사용자에게 높은 이동성이 있어 매 타임슬롯마다 채널이 바뀌게 되어 채널 정보의 피드백이 부정확해지는 경우에 타당하다. 송신자의 안테나가 하나이므로, 송신측에서의 프리코딩은 수행되지 않는다. 그러나 수신측에서는 N_r 개의 안테나와 N_{RF} 개의 RF 체인을 갖기 때문에 $N_r \times N_{RF}$ 크기의 아날로그 컴바이너와

1) 송신기, 수신기, 증폭기, 감쇄기, 케이블 등의 RF 장치들로 구성된 부분

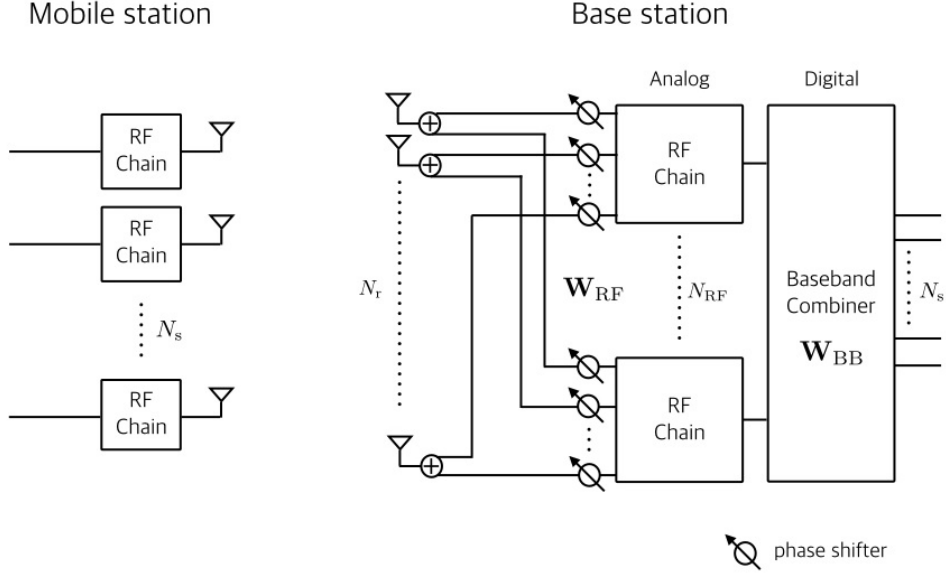


Fig. 1 Uplink multi-user mmWave system model with hybrid beamforming only at a receiver

$N_{RF} \times N_s$ 크기의 디지털 콤바이너가 사용된다 (여기서 N_s 는 데이터 스트림의 개수를 나타내며, 사용자의 수와 같다.) 송신 전에 채널 정보를 알지 못하기 때문에 송신자는 순간적인 채널 용량을 알 수 없고 따라서 고정된 데이터율을 사용한다.

이때 아웃티지가 발생할 확률은 0이 아니다. 따라서 성능 평가 지표로서, 아웃티지 확률을 측정한다. 본 논문의 성능 평가는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행된다. 문헌 조사결과 현재까지 상향링크에서 다수 사용자를 지원하는 밀리미터 파 시스템의 하이브리드 빔포밍 기법에 대한 연구는 수행되지 않은 것으로 파악된다. 본 논문이 기여하는 바는 다음과 같다.

- 밀리미터 파 시스템의 상향링크에서 다수 사용자를 지원하는 하이브리드 빔포밍 기법의 아웃티지 확률을 시뮬레이션을 통해 측정한다.
- 디지털 빔포밍의 아웃티지 확률을 하이브리드 빔포밍의 아웃티지 확률과 비교하며, 하이브리드 빔포밍이 디지털 빔포밍의 성능에 근접함을 보인다.

본 논문에서 다음의 기호를 사용한다: \vec{A} 는 행렬, \vec{a} 는 벡터, a 는 스칼라를 나타낸다. $\vec{A}^{(i)}$ 는 행렬 \vec{A} 의 i 번째 열을 나타낸다. A^* 는 행렬 \vec{A} 의 복소공액전치행

렬을 나타내고, $\|\vec{A}\|_F$ 는 행렬 \vec{A} 의 프로베니우스 노름 (Frobenius norm) 을 나타낸다 [11]. \vec{I}_N 는 $N \times N$ 크기의 단위행렬을 나타낸다. $E[X]$ 는 랜덤변수 X 이 기댓값을 나타낸다.

II. 시스템 모델

본 장에서는 하이브리드 빔포밍 기법에 대한 시스템 모델을 설명하며, 주로 논문 [6]의 모델을 확장하였다.

2.1. 시스템 모델

그림 1과 같이 N_s 의 사용자가 기지국에 접속하는 밀리미터 파 시스템을 고려한다. 기지국에는 N_r 개의 수신 안테나가 있고, N_{RF} 개의 RF 체인이 있으며, $N_s \leq N_{RF} \leq N_r$ 의 조건을 만족한다. \vec{s} 는 $N_s \times 1$ 심볼 벡터를 나타내고, $E[\vec{s}\vec{s}^*] = P_s \vec{I}_{N_s}$ 으로 가정한다. 즉, 모든 사용자는 동일한 송신 전력 P_s 를 사용한다. 수신 신호는 아래와 같이 표현되고

$$\vec{y} = \vec{H}\vec{s} + \vec{n}, \quad (1)$$

여기서, \vec{y} 는 $N_r \times 1$ 수신 벡터, \vec{H} 는 $N_r \times N_s$ 채널 행렬이면서 $E[\|\vec{H}\|_F^2] = N_r N_s$ 를 만족하며, \vec{n} 은 $CN(\vec{0}, I_{N_r})$ 인 $N_r \times 1$ 노이즈 벡터이다. 수신자는 \vec{H} 를 정확히 알고 있지만, 송신자는 \vec{H} 를 모른다고 가정한다.

수신자는 RF 체인과 아날로그 위상 천이기를 이용하여 다음의 과정후 (post-processing) 수신 신호를 얻으며

$$\vec{y} = \vec{W}_{BB}^* \vec{W}_{RF}^* \vec{H} \vec{s} + \vec{W}_{BB}^* \vec{W}_{RF}^* \vec{n}, \quad (2)$$

여기서 \vec{W}_{RF} 는 $N_r \times N_{RF}$ RF 컴바이닝 행렬을 나타내고, \vec{W}_{BB} 는 $N_{RF} \times N_s$ 기저대역 행렬을 나타낸다. \vec{y} 의 k 번째 원소는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} y_k = & \underbrace{\vec{W}_{com}^{<k>*} \vec{H}^{<k>} s_k}_{X_k} \\ & + \underbrace{\vec{W}_{com}^{<k>*} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^{N_s} \vec{H}^{<n>} s_n + \vec{W}_{com}^{<k>*} \vec{n}}_{\Phi_k} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\vec{W}_{com} = \vec{W}_{RF} \vec{W}_{BB}$ 이다. (3)에서 사용자 k 의 신호와 관련된 항을 X_k 라 두었으며, 그 외의 사용자의 신호와 노이즈와 관련된 항을 Φ_k 라 두었다. 두 항의 전력을 아래와 같이 구할 수 있다

$$E[X_k X_k^*] = P_s \vec{W}_{com}^{<k>*} \vec{H}^{<k>} \vec{H}^{<k>} \vec{W}_{com}^{<k>} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E[\Phi_k \Phi_k^*] = & P_s \vec{W}_{com}^{<k>*} \left[\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^{N_s} \vec{H}^{<n>} \vec{H}^{<n>*} \right] \vec{W}_{com}^{<k>} \\ & + \vec{W}_{com}^{<k>*} \vec{W}_{com}^{<k>} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)로부터 사용자 k 의 상호 정보량 (mutual information)을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$I_k = \log_2 \left(1 + \frac{E[X_k X_k^*]}{E[\Phi_k \Phi_k^*]} \right) \quad (6)$$

I_k 값은 매 타임 슬롯 마다 변하는 값이고 k 번째 송신자가 모르는 값이므로, 각 송신자는 전송 데이터율을 R_k 로 고정하여 보낸다. 이 때, k 번째 송신자의 아웃티지 확률을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$P_{out}^k [I_k < R_k] \quad (7)$$

디지털 빔포밍을 사용하는 경우, 본 논문에서는 MMSE (minimum mean square error) 수신기를 사용한다. MMSE 컴바이너는 다음과 같다 [12].

$$\begin{aligned} \vec{W}_{MMSE}^* = & E[s y^*] E[y y^*]^{-1} \\ = & \sqrt{P_s} \vec{H}^* (P_s \vec{H} \vec{H}^* + I_{N_r})^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

\vec{W}_{RF} 와 \vec{W}_{BB} 는 논문 [6]의 알고리즘 2를 이용하여 구한다. 디지털 빔포밍을 사용할 경우에도 아웃티지 확률이 존재하며, 식 (5)에서 $\vec{W}_{com} = \vec{W}_{MMSE}$ 으로 정의한 후 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 아웃티지 확률을 구할 수 있다.

2.2. 채널 모델

밀리미터 파는 높은 경로 감쇄 특성 때문에 반사되어 오는 신호가 적으며, 좁은 안테나 간격은 안테나 소자 간에 높은 상관을 야기한다. 따라서 전통적으로 멀티 안테나 채널에서 사용되는 페이딩 모델은 밀리미터 파 채널 모델로서 적합하지 않다.

논문 [6]에서는 밀리미터 파 채널의 구조를 정확히 반영한 협대역 클러스터 채널 모델을 사용하였다. 이 모델에서는 채널 행렬이 N_d 개의 클러스터와 각 클러스터 내에 N_{ray} 개의 전파경로들의 영향이 합쳐진 결과로 가정하며 송신 (수신) 안테나 단자 간 상관을 고려하였다. 본 논문에서는 송신자들이 서로 충분히 멀리 떨어져 있어서 송신자의 안테나 간에 상관성이 없다고 가정하여, 논문 [6]에서 사용한 채널 모델을 다음과 같이 수정하였다.

$$\vec{H} = \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{l=1}^{N_{ray}} a_r (\phi_{il}^r, \theta_{il}^r) \vec{\alpha}_{ij} \quad (4)$$

여기서 $\vec{\alpha}_{ij}$ 는 $1 \times N_s$ 복소 벡터이며, 벡터의 k 번째 원소는 $CN(0, \sigma_k^2)$ 로서 k 번째 사용자로부터 오는 i 번째 클러스터의 j 번째 전파경로의 채널 이득이다. $\vec{a}_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r)$ 는 방위각 ϕ_{il}^r 과 고도각 θ_{il}^r 일 경우에 정규화된 수신 안테나 배열의 응답 벡터를 나타낸다. $\vec{a}_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r)$ 의 값은 논문 [6] 에서 사용된 균일 평면 배열 (uniform planar array, UPA)을 참조하였다. 채널 모델을 단순화하기 위하여 각 사용자로부터 수신 안테나까지 채널의 N_d 와 N_{ray} 이 동일하다고 가정하였다.

III. 시뮬레이션 결과

그림 2 는 $N_{RF} = 16$, $N_r = 64$, $N_s = 4$ 일 때, 하이브리드 빔포밍의 아웃티지 확률을 신호대잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR) 을 변화시켜가면서 측정한 그림이다. 기타 시뮬레이션 환경으로 모든 k 에 대해 $\sigma_k^2 = 1$ 로 가정하였으며, 따라서 모든 사용자의 신호대 잡음비는 P_s 와 같다. 고정된 데이터율은 $R_k = 1$ bps/Hz를 사용하였다. 디지털 빔포밍의 경우, $N_{RF} = 64$ 의 경우를 가정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 디지털 빔포밍과 하이브리드 빔포밍의 아웃티지 (outage) 곡선의 기울기가 매우 유사한 것을 관찰 할 수 있다. 또한 높은 신호대 잡음비 영역에서 동일한 아웃티지 확률을 나타내는 신호대 잡음비의 차이가 2 dB 이내 인 것을 확인

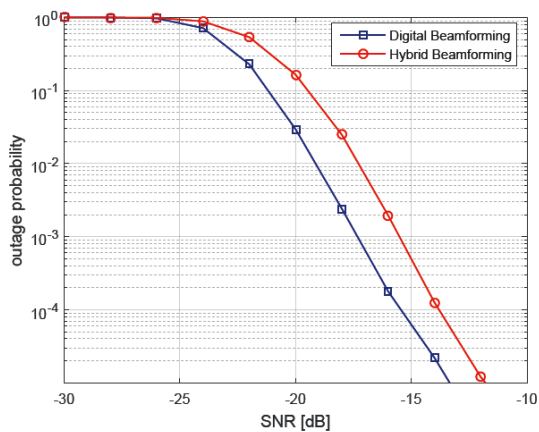


Fig. 2 Outage probability vs. SNR with $N_{RF} = 16$, $N_r = 64$, $N_s = 4$.

할 수 있다.

그림 3은 그림 2와 동일한 환경을 고려하였고, 단 $N_{RF} = 8$, $N_r = 64$, $N_s = 2$ 을 사용한 상태에서 아웃티지 확률을 측정한 그림이다. 그림과 같이 높은 신호대 잡음비 영역에서 동일한 아웃티지 확률을 나타내는 신호대 잡음비의 차이가 약 1 dB 인 것을 확인 할 수 있다. 또한 두 기법의 아웃티지 곡선의 기울기가 동일한 것을 확인할 수 있다.

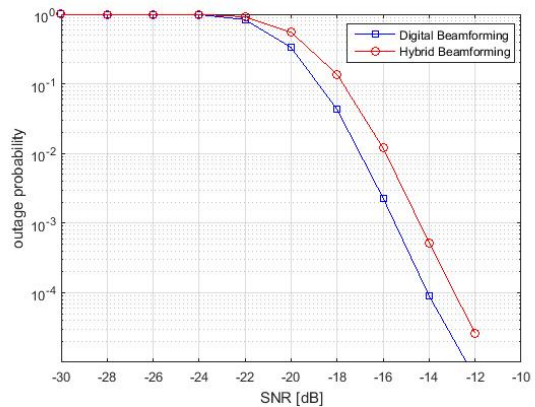


Fig. 3 Outage probability vs. SNR with $N_{RF} = 8$, $N_r = 64$, $N_s = 2$.

위 결과를 토대로, 송신자가 채널 정보를 모르는 밀리미터 파 시스템의 상향링크 상황에서, 아웃티지 확률 관점에서 하이브리드 빔포밍이 디지털 빔포밍에 근접한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 다수의 사용자가 동시에 전송하는 상향링크 상황에서 밀리미터 파 시스템을 위한 하이브리드 빔포밍을 고려하고 그것의 아웃티지 성능을 평가하였다. 논문에서 고려한 하이브리드 빔포밍의 아웃티지 확률을 디지털 빔포밍의 아웃티지 확률과 비교하였으며, 시뮬레이션에서 고려한 환경에서 하이브리드 빔포밍이 디지털 빔포밍의 성능에 1~2 dB 차이 정도로 근접함을 확인하였다. 따라서 사용자가 빠르게 이동하여 송신자가 채널정보를 정확히 추정할 수 없는 상황에서 상향링크 밀리미터 파 시스템을 운용할 시 하이브리드 빔포밍

이 효과적인 수 있음을 알았다. 덧붙여, N_{RF} 와 N_r 이 아웃지 확률에 미치는 영향을 수학적으로 엄밀히 분석하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Budding Research Association Business of the Marine Industry Research Institute in Gyeongsang National University.

REFERENCES

- [1] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 70-77, Sep. 2014.
- [2] T. Bai, A. Alkhateeb, and R. Heath, "Coverage and capacity of millimeter-wave cellular networks," *IEEE Communications Magazine*., vol. 52, no. 9, pp. 70-77, Sep. 2014.
- [3] J. Wang et al., "Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 8, pp. 1390-1399, Nov. 2009.
- [4] S. Hur et al., "Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 10, pp. 4391-4403, Oct. 2013.
- [5] Y. Tsang, A. Poon, and S. Addepalli, "Coding the beams: Improving beamforming training in mmWave communication system," in *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*, Houston, TX, USA, pp. 1-6, Dec. 2011.
- [6] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, Jr., "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1499-1513, Mar. 2014.
- [7] C. Kim, T. Kim, and J.-Y. Seol, "Multi-beam transmission diversity with hybrid beamforming for MIMO-OFDM systems," in *Proceedings IEEE GLOBECOM Workshop*, Atlanta, GA, USA, pp. 61-65, Dec. 2013.
- [8] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. Heath, "Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge," in *Proceedings. Information Theory and Applications Workshop*, pp. 1-5, Feb. 2013.
- [9] A. Alkhateeb, G. Leus, and R. W. Heath, Jr. "Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 11, pp. 6481-6494, Nov. 2015.
- [10] T. E. Bogale, L. B. Le, A. Haghighat, and L. Vandendorpe, "On the Number of RF Chains and Phase Shifters, and Scheduling Design with Hybrid Analog-Digital Beamforming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 5, pp. 1536-1276, Jan. 2016.
- [11] G. Strang, *Introduction to Linear Algebra*, Wellesley, MA, USA, Wellesley-Cambridge Press, 1998.
- [12] T. Kailath, A. H. Sayed, and B. Hassibi, *Linear Estimation*, Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall, 2000.



김성환(Seong Hwan Kim)

2006년 8월 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
2008년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
2013년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사
2013년 8월 ~ 2016년 2월 맥길대학교 박사후 연구원
2016년 3월 ~ 경상대학교 정보통신공학과 조교수
※관심분야 : 차세대 이동통신 시스템, 사물인터넷