

복수의 수신 안테나를 이용하는 다중 셀 상향링크용 기회적 전송기법

남 현 우*, 전 상 운*, 정 방 철^o

Opportunistic Transmission Techniques for a Multi-Cell Uplink Network with Multiple Receiver Antennas

Hyunwoo Nam*, Sang-Woon Jeon^o, Bang Chul Jung*

요 약

본 논문은 다중 셀 상향링크에서 수신단 안테나 다이버시티를 이용하여 무선채널 특성을 효과적으로 이용하는 기회적 전송 (opportunistic transmission, OT) 기법을 제안한다. 구체적으로 모든 사용자가 독립적인 페이딩 채널을 겪을 때, 각 사용자는 자신과 관련된 채널 정보만을 이용하면서 주어진 임계값을 기준으로 인접셀에 미칠 간섭의 양을 고려하여 전송여부를 결정하는 기회적 전송기법(proposed-1)과 자신의 채널정보만을 고려하여 전송여부를 결정하는 기회적 전송기법 기법(proposed-2)을 제안한다. 특히, 본 논문은 송·수신단 단일 안테나(single-input single output, SISO)를 가정한 기존 기회적 전송기법을 다중 안테나 환경으로 확장하고 그 성능을 분석한다. 시뮬레이션 을 통해 수신단 다중안테나를 이용할 경우 기회적 전송기법의 성능이 기존 기회적 전송기법의 성능보다 개선되는 것을 확인하였으며, 신호 대 간섭비(signal to noise ratio, SNR)가 증가하면 제안된 기회적 전송기법의 전송 확률이 감소하다 특정 값으로 수렴함을 확인하였다.

Key Words : K-user fading interference channel, achievable rate, bursty transmission, antenna diversity, opportunistic transmission

ABSTRACT

In this paper, we propose two opportunistic transmission (OT) techniques that efficiently utilize wireless channel characteristics for a multi-cell uplink network with multiple receiver antennas. We assume that all wireless links experience independent fading channels. To be specific, we consider two different OTs with fixed power: OT based on generating interference to other cells (proposed-1) and OT based on desired channel gain (proposed-2). In particular, this paper extends the conventional OT with a single-input single output (SISO) system to a multi-antenna environment and analyzes the performance of the proposed OTs in terms of achievable rate. Simulation results show that the proposed OTs outperform the conventional OT. In addition, it is observed that the transmissions probability decreases as signal-to-noise ratio (SNR) increases and becomes saturated to a certain value.

※ 본 논문은 2015학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

• First Author : (ORCID:0000-0002-9852-8449)Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, hwnam@cnu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4485-9592)Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr 중신회원

* (ORCID:0000-0002-0199-2254)Department of Information and Communication Engineering, Andong National University, swjeon@anu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2017-09-288, Received September 30, 2017; Revised January 8, 2018; Accepted January 9, 2018

I. 서 론

전 세계적으로 수십억명이 넘는 일일 모바일 사용자들이 요구하는 데이터 트래픽은 엄청나다. 요구량을 수용하고자, 지난 수십 년 동안 유·무선 통신 네트워크의 데이터 처리를 위해 많은 연구가 진행되었다. 스펙트럼 효율을 개선하기 위하여, Cell breathing^[1], 스펙트럼 네트워크^[2,3] 등 다양한 네트워크 환경이 연구되었고, 보다 많은 사용자들이 광대역 멀티미디어 통신 및 셀룰러 네트워크에서 통신자원 부족으로 인하여, 동일 주파수 대역을 공유할 수밖에 없는 현재 무선 네트워크 시스템에서는 간섭에 의해 성능이 심각하게 저하된다^[4]. 따라서 다중셀 네트워크에서 전송률의 증가를 위해서는 셀간 간섭을 효과적으로 관리하는 것이 매우 중요하다. 특히 상향링크에서는 셀간 협력의 한계로 인해 간섭관리가 더욱 도전적인 과제이다^[5]. 최근 간섭이 극심한 다중 셀 시분할 간섭 다중 접속 채널(Time Division Duplexing, TDD) 상향링크에서 기회적 전송 기법이 제안되었다^[6,7]. [6]에서는 사용자가 인접셀에 미치는 간섭의 양을 고려하여 간섭의 양이 특정 임계치보다 작으면 기회적으로 데이터를 전송하는 기법이 제안되었고, [7]에서는 사용자가 자신의 무선채널 이득값이 특정 임계치보다 클 때 기회적으로 데이터를 전송하는 기법이 제안되었다. 그러나 [6,7]에서 제안된 기회적 전송기법은 송수신단에서 단일안테나를 가정하였다. 본 논문에서는 수신단에 다중안테나가 존재하는 환경에서 [6,7]에서 제안된 기회적 전송기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 다중 셀로 구성된 간헐적 간섭 채널 환경에서 상향링크 네트워크를 고려한다. 또한, 실제 셀룰러 네트워크를 잘 묘사하는 시분할 간섭 다중 접속 채널(TDD)을 고려한다. 전체 네트워크에는 K 개의 셀이 존재하고 각 셀 내에는 동일한 주파수를 사용하는 한명의 사용자가 단일 안테나를 사용하며, 각 기지국은 N_R 개의 다중 안테나를 가진다고 가정한다. 각 사용자는 주어진 채널 정보를 기반으로 기회적 전송을 한다. 그림 1에서는 K 개의 셀이 존재하고 N_R 개의 안테나를 갖는 경우의 단일입력 다중출력(Single-Input Multiple-Output, SIMO) 모델을 나타낸다. $i(\in \mathbf{K} \triangleq \{1, 2, \dots, K\})$ 번째 기지국에서 수신된 신호 벡터 $\mathbf{y}_i(\in \mathbb{C}^{N_R \times 1})$ 는 다음 식으로 표현된다.

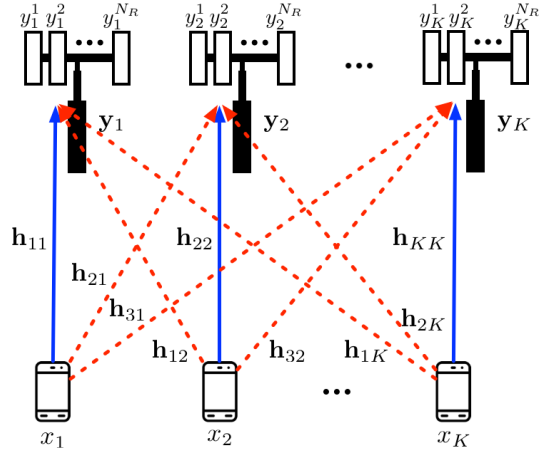


그림 1. SIMO K-사용자의 간헐적 간섭 네트워크
Fig. 1. SIMO K-user bursty interference channel.

$$\mathbf{y}_i = b_i \sqrt{P} \mathbf{h}_{ii} x_i + \sum_{j \in \mathbf{K}, j \neq i} b_j \sqrt{P} \mathbf{h}_{ij} x_j + \mathbf{z}_i, \quad (1)$$

이 때, P 는 송신전력을 나타내며 x_i 는 i 번째 셀에 속한 사용자의 심볼을 나타낸다. 각 심볼은 전송블록 동안 채널이 일정한 값을 갖는 블록 페이딩을 겪으며, 모든 전송 블록은 독립적으로 변함을 가정한다. 또한 $E[|x_i|^2] = 1$ 로 가정한다. $\mathbf{h}_{ij}(\in \mathbb{C}^{N_R \times 1})$ 는 j 번째 셀의 사용자로부터 i 번째 기지국으로의 무선채널 벡터를 나타낸다. 여기서 채널 벡터의 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 따르며, i, j 간 서로 독립적이며 동일한 분포(independent and identically distribution, i.i.d.)를 따른다고 가정한다. 즉, $\mathbf{h}_{ij} \sim CN(0, 1)$ 이다. $\mathbf{z}_i(\in \mathbb{C}^{N_R \times 1})$ 는 평균이 0이고 분산이 N_0 인 복소 가우시안 잡음으로 가정한다. 즉, $\mathbf{z}_i \sim CN(0, N_0)$ 이다. 이때 N_0 는 잡음의 스펙트럴 밀도를 나타낸다. 따라서, 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)는 P/N_0 로 가정한다. $b_i \in \{0, 1\}$ 는 i 번째 셀에 속한 사용자의 전송여부를 나타내며, 1이 전송하는 경우를 나타낸다. 이때 i 번째 셀에 속한 사용자는 α_i 의 동작주기로 베르누이분포를 따른다고 가정한다. 즉, $b_i \sim \text{Bern}(\alpha_i)$ 이다. 본 논문에서는 모든 사용자의 α_i 가 동일한 α 를 따르는 대칭 구조를 가정한다. 시분할 간섭 다중 접속 채널의 상호호환성 특성으로 각 사용자는 기지국으로부터 받은 파일럿 신호들을 통해 상향링크 채널 벡터를 정확히 알 수 있다. 우리는 기지국간의 정보교환이나 협력이

이루어지지 않고, 사용자에게 주어진 채널정보만을 이용하여 기회적 전송을 하는 시스템을 고려한다.

2.1 기존의 기회적 전송기법

2.1.1 간섭 채널이득을 고려한 전송기법 (OT-1)

간섭 채널이득을 고려하는 기회적 전송기법은 사용자에게 주어진 채널정보만을 이용하여 인접 기지국들로 미치는 간섭 채널이득들이 임계값 η 보다 모두 낮을 경우 전송하는 방법이다. 이 기회적 전송기법으로 동작하는 i 번째 사용자는 다음과 같은 수식으로 결정된다.

$$b_j = \begin{cases} 1 & \text{w.p. } \alpha_j (= \Pr(|h_{ij}|^2 < \eta, \forall i \in K \setminus j)) \\ 0 & \text{w.p. } 1 - \alpha_j, \end{cases} \quad (2)$$

이때 동작주기 α_i 는 레일리 채널의 통계적 특성에 따라 전체 k 개의 셀이 존재할 때, 각 채널은 서로 독립적이며 동일한 분포를 따르므로 α_j 는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\alpha_j = \Pr(|h_{ij}|^2 < \eta \forall i \in K \setminus j) = (1 - e^{-\eta})^{k-1} \quad (3)$$

2.1.2 자기 채널이득을 고려한 전송기법 (OT-2)

자기 채널이득을 고려하는 기회적 전송기법은 주변 정보를 전혀 고려하지 않고 오직 자기 기지국과의 채널이득이 임계값 ζ 보다 높은 경우 전송하는 방법이다. 이 기회적 전송기법으로 동작하는 i 번째 사용자는 다음과 같은 수식으로 결정된다.

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{w.p. } \alpha_i (= \Pr(|h_{ii}|^2 > \zeta)) \\ 0 & \text{w.p. } 1 - \alpha_i, \end{cases} \quad (4)$$

이때 동작주기 α_i 는 레일리 채널의 통계적 특성에 따라 $\alpha_i = \Pr(|h_{ii}|^2 > \zeta) = e^{-\zeta}$ 와 같은 수식으로 표현된다.

III. 제안하는 기회적 전송기법

본 장에서는 수신단 안테나 다이버시티를 고려한 기회적 전송기법에 대한 전체적인 동작 절차를 설명한다.

3.1 초기화 (기준 신호 및 간섭 임계값 전송)

각 기지국은 미리 결정된 파일럿 신호를 각 사용자

에게 전달하여 무선 채널 정보를 알 수 있도록 한다. 따라서, 각 사용자는 파일럿 신호를 통해 기지국과의 채널정보를 완전히 측정 할 수 있음을 가정한다. 이때 시분할 간섭 다중 접속 채널의 상호 호환성 특성에 따라 상향링크 채널정보도 정확히 알 수 있다. 또한, 각 기지국은 시스템 파라미터로서 임계값 ζ, η 를 전송한다. 이때 임계값 ζ 는 자기 채널이득을 고려할 때 전송할지 여부를 결정하는 최소 임계값을 나타내고, 임계값 η 는 사용자가 각각의 인접 기지국으로 미치는 간섭의 최대 허용치를 나타낸다.

3.2 순간 전송 여부 결정

각 사용자는 파일럿 신호를 통하여 자기 신호가 각 기지국으로 미치는 모든 채널 정보를 알 수 있으므로, 사용자들은 각각 분산적으로 아래의 전송기법에 따라 통신여부를 결정한다.

3.2.1 간섭 채널 이득을 고려하는 기회적 전송기법 (Proposed-1)

i 번째 셀의 사용자가 j 번째 기지국으로 미치는 간섭의 양을 다음의 식에 따라 나타낸다.

$$\eta_i^j = \|h_{ij}\|^2, \quad (5)$$

이때 $i \in K, j \in K \setminus i$ 이며, $h_{ij} = [h_{ij}^1, h_{ij}^2, \dots, h_{ij}^{N_{Ri}}]$ 는 i 번째 셀의 사용자로부터 전송된 신호가 j 번째 N_{Ri} 개의 안테나로 구성된 기지국으로 수신된 채널벡터를 나타낸다. 이때 η_i^j 가 모든 $j \in K \setminus i$ 에 대하여 시스템 파라미터 η 보다 작을 경우 전송을 결정한다. 즉,

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{when } \sum \eta_i < \eta = K-1 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

이때 $\eta_i = [\eta_i^1, \eta_i^2, \dots, \eta_i^{N_{Ri}}]$ 는 i 번째 셀의 사용자 j ($\in K \setminus i$)번째 기지국으로 미치는 간섭을 나타내는 벡터이며 모든 η_i^j 가 조건을 만족하는 경우를 나타낸다. 따라서 동작주기 α_i 는 레일리 채널의 통계적 특성

에 따라 $\sum_{n=1}^{N_{Ri}} |h_{ij}^n|^2 < \eta \forall j \in K \setminus i$ 를 만족해야 하며, 각 채널은 서로 독립적이며 동일한 분포를 따르므로 N_{Ri} 개의 지수분포를 따르는 랜덤변수들이 합성되어 $2N_{Ri}$ 인 카이제곱 분포가 된다. 이러한 랜덤변수 X^2 의 누적분포함수를 $F_{\chi^2}(l, x)$ 라고 하면, 임계값 ζ 가 주어졌을 때

전송확률은 아래와 같다.

$$\Pr_{\eta}(N_R) = [F_{X^2}(N_{R,\eta})]^{K-1} \quad (7)$$

이렇게 전송여부를 결정한 사용자는 자기 셀 기지국에 피드백하여 전송여부를 전파한다. 이때 인접 셀 기지국들도 전송하는 사용자 여부를 파악할 수 있다.

3.2.2 자기 채널이득을 고려하는 기회적 전송기법 (Proposed-2)

i 번째 셀의 사용자가 자기 기지국으로 미치는 채널 이득은 주변의 정보를 고려하지 않고 오직 자기 기지국과의 채널이득이 임계값 ζ 보다 높은 경우 전송하는 방법으로 i 번째 사용자는 다음과 같은 수식으로 전송 여부를 결정한다.

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{when } \|\mathbf{h}_{ii}\|^2 > \zeta \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (8)$$

이때 \mathbf{h}_{ii} 는 i 번째 셀의 사용자로부터 전송된 신호가 N_R 개의 안테나로 구성된 자기 셀 기지국으로 수신된 채널벡터를 나타낸다. 따라서, 동작주기 α_i 는 레일리 채널의 통계적 특성에 따라 $\|\mathbf{h}_{ii}\|^2 > \zeta$ 를 만족해야 하며, 각 안테나에서 수신되는 채널은 서로 독립적이며 동일한 분포를 따르므로 자기 신호 이득은 N_R 개의 지수분포를 따르는 채널이득 랜덤변수들이 합성되어 $2N_R$ 인 카이제곱 분포가 된다. 이러한 랜덤변수 X^2 의 누적분포함수를 $F_{X^2}(l, x)$ 라고 하면, 임계값 η 가 주어졌을 때 전송확률은 아래와 같다.

$$\Pr_{\zeta}(N_R) = 1 - F_{X^2}(N_{R,\zeta}) \quad (9)$$

이렇게 전송여부를 결정한 i 번째 사용자는 자기 셀 기지국에 피드백하여 전송여부를 전파하며 인접 셀 기지국들도 전송하는 사용자 여부를 파악할 수 있다.

3.3 Local CSI를 이용한 송신 코드비 결정

기지국은 자기 셀 내 사용자가 동작할 경우, 수집한 인접 셀 내 사용자의 전송여부 정보와 주어진 채널정보만을 이용하여 최대비 결합 복호 방식 (Maximal-Ratio Combining, MRC)을 통해 달성 가능한 데이터 전송률을 계산 한 뒤, 그 전송률을 달성 가능한 코드비를 결정하여 사용자에게 피드백한다. 그 후, 최종적으로 사용자는 통신 중인 기지국으로 데이

터를 전송한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 다중 셀로 구성된 서로 독립적이며 동일한 분포의 채널상태를 갖는 상향링크 네트워크에서 각 사용자가 간헐적으로 동작시의 성능을 분석한다. 이때, 지속적으로 전송하는 방법을 'Non-bursty'라고 명명하여, 기회적 전송기법을 적용하지 않은 경우로서 기회적 전송기법 성능 분석의 기준으로 사용한다. 이때, 모든 기회적 전송기법은 최선의 전송률을 얻기 위하여 전송확률을 최적화한다.

그림 2는 제안하는 기회적 전송기법의 기회적 안테나 수가 1개인 경우와 3개인 경우의 셀당 전송률을 보여준다. 'OT-1', 'OT-2'는 각각 [7]과 [6]에서 단일안테나를 이용하는 환경에서 제안된 기회적 전송기법들을 나타낸다. 'Non-bursty'는 기회적 전송기법을 적용하지 않은 경우의 전송률을 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 통해 수신단 다중안테나를 이용하는 기회적 전송기법들이 기존 기법에 비하여 높은 성능을 달성함을 알 수 있다. 특히 자기 기지국과의 채널정보만을 고려한 Proposed-1의 경우가 가장 성능이 월등함을 알 수 있다.

그림 3은 제안하는 기회적 전송기법을 사용하였을 때 최적의 전송률을 얻기 위하여 간헐적으로 동작하는 전송확률(α)을 보여준다. 수신단은 MRC를 통해 다중안테나 이득으로서 간섭의 영향이 단일 안테나 대비 비교적 감소하여 단일안테나의 경우에 비해 전송확률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 송신

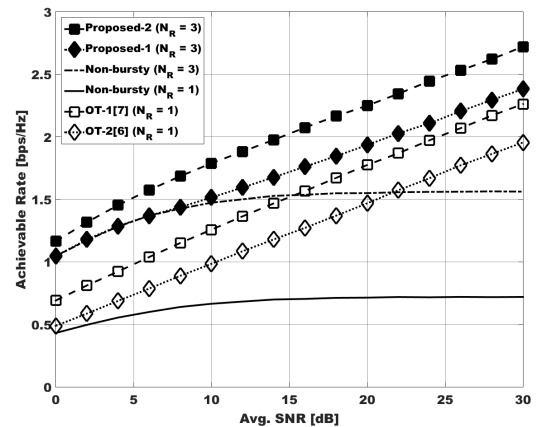


그림 2. 제안하는 기법의 전송률 성능($N_R = 3, K = 3$)
Fig. 2 Achievable rate of the proposed opportunistic transmission techniques in cases of $N_R = 3$ and $K = 3$.

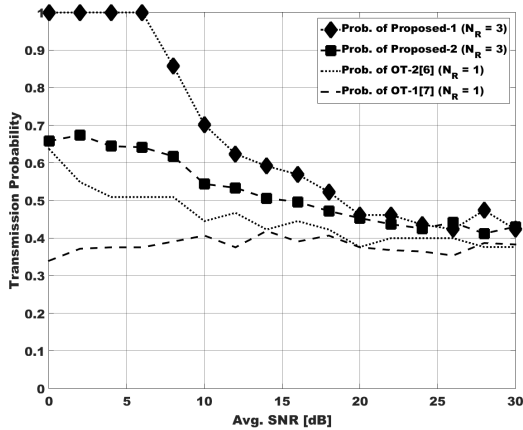


그림 3. 각 기법의 최적 전송 확률 ($K=3$)
 Fig. 3. Optimal transmission probability in case of $K=3$.

전력이 낮은 구간에서는 잡음이 성능에 주요한 영향을 미치기 때문에 proposed-1의 기회적 전송기법 효과가 전송 확률에 큰 영향을 미치지 않고 거의 전송하게 된다. 반면, proposed-2의 경우 간섭의 영향이 낮은 구간에서도 기회적 전송을 하는 것을 확인할 수 있다. 송신전력이 높은 구간에서는 간섭의 영향이 크므로, 특정 기회적 전송확률을 띄며 이는 proposed-2의 전송확률과 유사한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 송신전력이 높아질수록 단일안테나를 이용하는 환경에서의 전송확률과 유사한 값으로 수렴한다. 이는 직관적으로, 제한된 통신자원을 시분할 다중화 방법과 유사하게 동등하게 사용하기 위한 경향으로 파악할 수 있다.

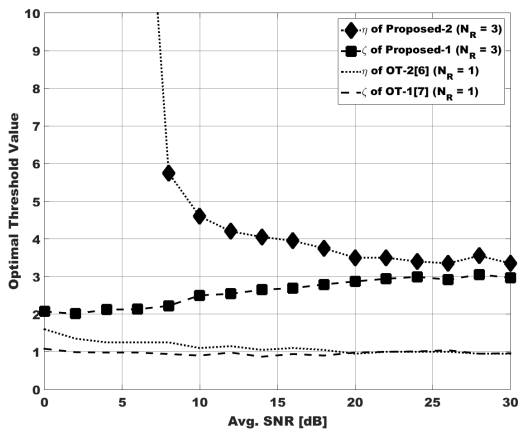


그림 4. 각 기법의 최적 전송 임계값 ($K=3$)
 Fig. 4. Optimal threshold value as system parameter in case of $K=3$.

그림 4는 간헐적으로 전송하는 각 기법들의 최적의 전송확률을 얻기 위한 임계값을 보여준다. 임계값의 경향을 통해, 수신단은 MRC 이득으로서 임계값이 전체적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 송신전력이 낮은 경우 proposed-1이 기회적 전송기법의 성능이득을 얻지 못하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 다중 셀 상향링크 네트워크에서 데이터 전송률을 개선시키기 위하여 수신단 다중안테나 이득을 이용하였을 때 기회적 전송기법 방식을 제안한다. 수신단에서의 SNR은 MRC를 통해 개선된다. 시뮬레이션을 통하여 제안하는 기회적 전송기법 방식이 수신단에 다중 안테나가 존재하는 환경에서 기존의 단일안테나 방식에 비하여 높은 전송률을 달성함을 보였다. 또한 SNR이 높아짐에 따라 기회적 전송기법의 전송확률이 감소하다 특정 값으로 수렴한다는 것이 관찰되었다. 이러한 간헐적 통신환경의 이산적 특성을 고려하여 차후 수학적으로 성능분석을 할 예정이다.

References

- [1] B. C. Jung and H. Jin, "Energy efficiency of small-cell networks with adaptive cell-breathing," in *Proc. JCCI*, Apr. 2016.
- [2] S.-W. Jeon and B. C. Jung, "Interference neutralization for small-cell wireless networks," *J. KICS*, vol. 38A, pp. 1117-1124, Dec. 2013.
- [3] S.-W. Jeon and W.-Y. Shin, "Dynamic opportunistic interference alignment for random-access small-cell networks," *J. KICS*, vol. 39A, pp. 675-681, Nov. 2014.
- [4] Draft IEEE std 802.16e/D9, *IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems*, Jun. 2005.
- [5] B. C. Jung and W. -Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 148-150, Feb. 2011.
- [6] B. C. Jung, Y. -J. Hong, D. K. Sung, and S. -Y. Chung, "Fixed power allocation with

nulling for TDD-based cellular uplink,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 253-255, Apr. 2008.

- [7] H. Nam, K. S. Ko, I. Bang, and B. C. Jung, “Performance Analysis of Opportunistic Transmission in Multi-Cell Uplink Networks,” in *Proc. Symp. KICS*, pp. 495-495, Jan. 2017.

남 현 우 (Hyunwoo Nam)



2016년 2월 : 충남대학교 전자공학과 졸업
 2016년 3월~현재 : 충남대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 통계적 신호처리, 간섭관리, 이동통신 시스템

전 상 운 (Sang-Woon Jeon)



2003년 8월 : 연세대학교 전기전자공학부 공학사
 2006년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 공학석사
 2011년 8월 : KAIST 전자전산학과 박사
 2011년 8월~2013년 2월 EPFL 박사후 연구원

2013년 3월~현재 안동대학교 정보통신공학과 조교수
 <관심분야> 무선통신, 정보이론

정 방 철 (Bang Chul Jung)



2002년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업
 2004년 8월 : KAIST 전자전산학과 석사
 2008년 2월 : KAIST 전자전산학과 박사
 2008년 3월~2009년 8월 : KAIST IT 융합연구소 팀장
 2009년 9월~2010년 2월 : KAIST IT 융합연구소 연구교수
 2010년 3월~2014년 2월 : 경상대학교 정보통신공학과 조교수
 2014년 3월~2015년 8월 : 경상대학교 정보통신공학과 부교수
 2015년 9월~현재 : 충남대학교 전자공학과 부교수
 2010년 4월~현재 : KAIST IT 융합연구소 겸직교수
 <관심분야> 무선통신, 통계적 신호처리, 정보이론, 압축센싱, 이동통신 시스템