

Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 21, No. 4:718~723 Apr. 2017

극다중 안테나 셀룰러 시스템을 위한 파일럿 도약 기법

김성환 · 반태원 · 이웅섭 · 류종열*

Pilot Hopping Scheme for Massive Antenna Systems in Cellular Networks

Seong Hwan Kim · Tae-Won Ban · Wongsup Lee · Jong Yeol Ryu*

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

요 약

본 논문에서, 극다중 안테나 시스템을 다중셀 환경에 적용하고 기지국의 안테나 수가 무한하다고 가정한 상태에서, 파일럿 오염으로 인해 제한된 시스템 용량을 개선하는 파일럿 도약 기법을 제안한다. 기존의 파일럿 고정 방식은, 각 사용자가 긴 시간 동안 동일한 Signal-to-interference ratio (SIR)를 얻게된다. 따라서, 약한 간섭을 받게 된 사용자는 지속적으로 SIR이 높은 반면에, 강한 간섭을 받게 된 사용자의 SIR은 지속적으로 낮아서 서비스의 질이 저하된다. 본 논문에서 제안한 파일럿 도약 기법에서는 매 타임 슬롯마다 다른 파일럿 신호를 사용하며, 이에 따라 매번 다른 양의 간섭을 받게 되므로, 매 타임 슬롯마다 SIR이 요동치게 된다. 이러한 채널에서 Hybrid Automatic Repeat & reQuest (HARQ) 기법을 적용할 경우에, 아웃티지 확률과 전송률의 개선 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 극다중 안테나 시스템에 파일럿 도약 기법을 적용 후, 체이스 결합 유형의 HARQ를 적용하고 시뮬레이션을 통하여 성능이 개선됨을 보인다.

ABSTRACT

We propose a pilot hopping scheme that improves the limited system capacity due to pilot contamination in multi-cell environment with large-scale antenna arrays at a base station, assuming the infinite number of antennas. In the conventional fixed pilot scheme, each user obtains the same signal-to-interference ratio (SIR) over a long period of time. Therefore, a user with strong interference has continuously low SIR which degrades its service quality. In the proposed pilot hopping scheme, different pilot signals are used for each time slot, and different amounts of interference are received every time. When such a pilot hopping technique is applied, the SIR fluctuates at every time slot. When the Hybrid Automatic Repeat & reQuest (HARQ) technique is applied in such a channel, the outage probability and transmission rate are improved. We show that there is the performance gain of the proposed scheme over the conventional scheme through computer simulations.

키워드 : 극다중안테나, 셀룰러 시스템, 하이브리드 재전송, 파일럿 도약 기법

Key word: large-scale antenna arrays, cellular system, HARQ, pilot hopping scheme

Received 26 January 2017, Revised 03 February 2017, Accepted 07 February 2017

* Corresponding Author Jong Yeol Ryu (E-mail:jongyeol_ryu@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9173)

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

Open Access https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.4.718

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/li-censes/ 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

기존의 다중 안테나 시스템에서 고려하는 안테나 원 소의 수보다 수십 배 많은 원소를 갖는 안테나를 도입 한 극다중 안테나 시스템이 최근 큰 주목을 받고 있다 [1]. 포치니 박사의 논문 [2]에서, 신호 대 잡음 비 (signal-to-noise ratio, SNR)가 높을 때, 송신 안테나와 수신 안테나 수의 최소값의 배만큼 커패시티가 증가한 다는 것이 정보이론적으로 증명되었다. 그러나 셀룰러 시스템에 극다중 안테나를 도입한다면, 셀 간 간섭, 채 널 추정 부하 등과 같은 현실적인 제약 때문에, 포치니 의 정보이론적 분석은 실제 성능과 어긋나게 된다. 토 마스 마제타는 멀티 셀 환경에서 각 기지국이 극다중 안테나를 가지며 각 기지국이 다수의 사용자와 동시에 통신할 때, 시스템의 한계 용량을 분석하였다 [3]. 그의 논문에서 채널 추정을 위한 파일럿 개수에 대한 제약이 수용할 수 있는 사용자 수를 제한시키고 인접셀과의 파 일럿 신호 공유로 인한 셀 간 간섭이 신호대 간섭비를 낮추어, 전체 시스템 용량을 제한함을 밝혔으며, 이러 한 현상을 파일럿 오염 (pilot contamination) 이라고 이 름 붙였다.

마제타의 논문에 이어 다중 셀 환경에서 극다중 안테 나 시스템을 분석한 연구가 다수 있었다. 논문 [4]에서 는 유한한 원소를 갖는 안테나가 배치된 기지국과 다수 의 사용자가 존재하는 다중 셀 시스템의 상향 링크 아 웃티지 성능을 분석하였다. 각 사용자 별로 시간-주파 수 결속 영역마다 하나의 파일럿 심볼을 전송해야 하는 데, 논문 [4]의 저자들은 매우 넓은 시간-주파수 결속 영 역을 가정하여, 여러 사용자들이 파일럿을 사용할 자원 이 충분하며, 따라서 인접 셀 간 파일럿 재사용을 할 필 요가 없는 환경을 고려하였다. 즉, 파일럿 오염은 없다 고 가정하였다. 논문 [5]에서는 극다중 안테나 시스템에 서도 안테나 원소 수가 유한하면 랜덤 페이딩 채널 때 문에 채널에 불확실성이 발생하여 아웃티지 사건이 발 생하고 사용자의 이동성으로 매 전송 시마다 채널이 변 하는 환경에서 하이브리드 재전송 기법이 성능을 향상 시킴을 보였다. 두 논문 [4,5] 모두 파일럿 오염을 고려 하지 않았다. 그러나 이동성이 높은 환경이나 도심과 같이 주파수 선택적 페이딩을 겪는 조건에서는 시간-주 파수 결속영역이 상대적으로 좁다. 서로 다른 사용자가 서로 직교하는 파일럿 신호를 보내게 되면 시간-주파수 자원의 상당 부분을 차지하게 되므로 파일럿을 공유해 야하며, 이 때는 마제타의 분석과 같이 파일럿 오염이 시스템에 큰 영향을 미치게 된다.

마제타는 논문 [3]에서 각 기지국의 안테나 수가 무한히 많은 조건에서, signal-to-noise-plus-intereference ratio (SINR)는 긴 시간 관점 (large-scaling)의 페이딩 값으로만 이루어진 signal-to-interference ratio (SIR)로 표현되며, 긴 시간동안 변하지 않음을 밝혔다. 기지국의 안테나가 무한히 많다는 조건은, 비현실적일 수 있지만, 분석을 간단히 만들고, 유한한 안테나 원소를 사용하는 경우에 대한 성능 한계를 제시할 수 있어 효과적인 분석방법이다. 무한히 많은 안테나 원소의 조건에서 시스템의 성능을 더욱 향상시키는 기법이 있다면,이 기법은 또한 유한한 안테나 원소를 갖는 극다중 안테나 시스템 성능을 개선시킬 수 있을 것이다.

본 논문은 기지국의 안테나 수가 무한하다고 가정한 상태에서, 파일럿 오염으로 인해 제한된 시스템 용량을 개선시키는 파일럿 도약 기법을 제안한다. 기존의 파일 럿 할당 방식에서는, 각 사용자가 고정된 파일럿 신호 를 전송하며1) 긴 시간 동안 동일한 신호-대-간섭 비 (Signal-to-Intereference, SIR)를 얻을 것이다. 이에 따라 약한 간섭을 받게 된 사용자의 SIR은 지속적으로 높게 되어 문제가 없지만, 강한 간섭을 받게 된 사용자의 SIR 은 지속적으로 낮아서 서비스 질이 저하된다. 이를 방 지하기 위해, 본 논문에서는 사용자가 매 타임 슬롯마 다 다른 파일럿 신호를 사용하며, 이에 따라 매번 다른 양의 간섭을 받게 되므로, 지속적으로 서비스의 질이 저하되는 것을 방지할 수 있다. 논문 [6]에서, 파일럿 도 약 기법을 제안하였으나, 이는 채널 추정의 정확도를 위함이며, 여러 타임 슬롯 동안 수신한 파일럿 신호를 이용하여 채널 추정을 하며 채널 추정의 MSE (mean square error)를 줄인다. 사용자별로 평균 채널 이득이 동일하다고 가정하여서, 파일럿 도약을 하더라도, 매 타임 슬롯마다 사용자의 SIR이 동일한 상태가 된다. 반 면 본 논문에서는, 채널 추정은 한 타임슬롯에서 수행 되지만, 사용자 별로 평균 채널 이득이 다르므로, 파일 럿 도약 기법 적용 시 간섭하는 사용자가 바뀌어, 매 타

¹⁾ 또는 고정된 위치에 파일럿을 전송

임 슬롯마다 SIR이 요동치게 된다. 이러한 채널에서 Hybrid Automatic Repeat & reQuest (HARQ) 기법을 적용할 경우에 아웃티지 확률과 전송률을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 극다중 안테나 시스템에 파일럿 도약 기법을 적용 후, 체이스 결합 HARQ 를 적용하고 시뮬레이션을 통하여 성능이 개선됨을 보인다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 L개의 기지국이 벌집구조의 셀룰러 네트워크를 이루며, 각 기지국은 M개의 전방위 안테나 를 사용하는 셀룰러 시스템을 고려한다. 또한 각 셀마 다 K개의 단말이 균일하게 랜덤 분포되어 있으며, 각 단 말은 하나의 전방위 안테나를 사용한다고 가정한다. 기 지국과 단말 간 다중화 방식으로 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 시스템을 사용한다. 수 신측은 신호 복원과정에 쓰일 채널 추정을 해야하며, 이를 위해 송신측에서 시간-주파수의 결속영역마다 약 속된 자원 위치에 파일럿 신호를 보낸다. 본 논문에서 는 기지국 안테나 원소 수가 단말의 수보다 훨씬 많다 고 가정하며 따라서 상향링크에서 단말이 파일럿 신호 를 전송하고 기지국에서 채널 추정을 한다. 또한 시분 할 이중 통신 방식 (time division duplex, TDD)을 사용 하기 때문에 상향링크 채널과 하향링크 채널이 동일하 다고 가정할 수 있어, 상향링크 채널 추정만으로 하향 링크 채널 추정도 가능하다.

주파수 효율을 높이기 위하여 여러 셀이 동일한 주파수 대역을 재사용할 수 있다. 채널 추정에 사용되는 자원 역시 재사용되는데, 이 때문에 기지국에서 수신한 파일럿 신호는 왜곡되게 된다. 논문 [3]에서 각 단말의 SIR은 기지국의 안테나 원소 수가 무한대일 때 $(M \to \infty)$, 비상관 잡음과 빠른 페이딩의 효과가 제거되고 동일 셀에 있는 단말간 간섭이 없어지지만, 인접셀에서 같은 파일럿 신호를 사용하는 단말로부터의 간섭은 남아있음이 밝혀졌다. 즉, 상향링크에서 j번째 셀에 있는 k번째 단말의 SIR은 다음과 같이 표현된다.

$$SIR_{rkj} = \frac{\beta_{jkj}^2}{\sum_{l \neq j} \beta_{jkl}^2} \tag{1}$$

여기서 β_{jkl} 은 l번째 셀의 k번째 단말부터 j번째 셀의 기지국까지 채널의 느린 페이딩 이득을 나타내며, 이는 부반송파에 독립적이면서 시간에 따라서 바뀌지 않는 값으로 가정한다. 또한 하향링크에서 j번째 셀에 있는 k번째 단말의 SIR은 다음과 같이 표현된다.

$$SIR_{rk} = \frac{\beta_{jkj}^2}{\sum_{l \neq j} \beta_{lkj}^2} \tag{2}$$

수식 (1)(2) 와 같이, 기지국 안테나 원소의 수가 무한 대일 때, 각 단말의 SIR은 시간에 따라 변하지 않는다.

Ⅲ. 파일럿 도약 기법

본 논문에서 각 셀 내에서 단말 별로 파일럿 신호의 위치가 매 타임 슬롯마다 바뀌는 파일럿 도약 기법을 제안한다. 그림 1은 j번째 셀의 상향링크 프레임 중 하나의 결속구간에서 파일럿 신호가 할당되는 방식을 보여준다. 파일럿 영역에서 특정 자원 원소 위치를 할당받은 단말이 매 타임 슬롯 마다 바뀌는 것을 알 수 있다. 파일럿 도약 기법을 적용하더라도 j번째 셀에 있는 k번째 단말부터 j번째 기지국까지의 느린 페이딩 이득은 매 타임 슬롯 마다 바뀌지 않는다. 상향링크에서는 j번째 셀에 있는 k번째 단말은 인접셀에 있는 단말 중에서, 자신과 같은 파일럿 신호를 사용하는 단말이 보내는 신호에 의해 간섭받는다. 이때, n번째 타임슬롯에서의 j번째 셀에 있는 k번째 단말의 SIR 은 다음과 같이 표현된다.

$$SIR_{rkj}^{PH}[n] = \frac{\beta_{jkj}^2}{\sum_{l \neq j} \alpha_{jklj}^2[n]}$$
(3)

여기서 $\alpha_{jklj}[n]$ 는 l번째 셀에 있는 단말 중 j번째 셀의 k번째 단말과 같은 파일럿 신호를 사용하는 단말로부터 j번째 기지국까지의 느린 페이딩 이득이다. 수식 (3)을 통해 알 수 있듯이, SIR은 매 타임슬롯 마다 바뀌게 된다.

반면 하향링크에서, n번째 타임슬롯에서의 j번째 셀에 있는 k번째 단말의 SIR 은 다음과 같이 표현된다.

$$SIR_{fkj}[n] = \frac{\beta_{jkj}^2}{\sum_{l \neq j} \alpha_{lkjlj}^2[n]} \tag{4}$$

$$=\frac{\beta_{jkj}^2}{\sum_{l\neq j}\beta_{lkj}^2}\tag{5}$$

여기서 (4)에서 (5)로의 변환은 j번째 셀의 k번째 단 말부터 l번째 기지국까지의 채널은 파일럿이 매번 바 뀌더라도 바뀌지 않기 때문에 타당하다. 이를 통해 하 향링크에서는 파일럿 도약 기법이 SIR의 특성에 아무 런 변화를 주지 않음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에 서는 상향링크만의 성능을 다룬다.

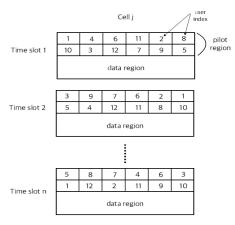


Fig. 1 The Proposed Pilot hopping scheme

Ⅳ. 성능 분석

매 타임슬롯 마다 SNR 혹은 SINR이 변하는 상황의 대표적인 예는 블록 페이딩이며, 송신단이 채널을 미리알 수 없을 때 아웃티지 사건이 발생하고, 동일한 패킷을 재전송하여 아웃티지 확률을 낮춤으로써 시간 다중화 이득 (temporal diversity gain)을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 기지국간 데이터 및 파일럿 전송 정보를 서로 공유하지 않는다고 가정하며, 따라서 특정 단말이 어떠한 셀간 간섭을 겪을지에 대한 정보를 그 단말을 지원하는 기지국이 미리알 수 없다. 이 경우 역시 아웃티지 사건이 발생하며, 파일럿 도약 기법에서 재전송을 통해시간 다중화 이득을 얻을 수 있다. j번째 셀에 있는 k번

째 단말이 R_k bps/Hz 로 전송한다고 할 때 아웃티지 확률은 $\Pr[SIR_{rkj} < 2^{R_k} - 1]$ 와 같이 정의된다. 만약 기존의 상향링크 극다중 안테나 시스템에서, 동일한 신호를 N-1번 재전송을 했다면 k번째 단말의 아웃티지 확률은 $\Pr\left[N \bullet SIR_{rk} < 2^{R_k} - 1\right]$ 와 같다[7]. 즉, N-1번 재전송을 하여 SIR이 N배 만큼 증가하는 효과를 얻을수 있다. 반면, 파일럿 도약 기법을 사용하고 N-1번 재전송을 했을 때 k번째 단말의 아웃티지 확률은 아래와 같다.

$$\Pr\left[\sum_{n=1}^{N} SIR_{rk}^{PH}[n] < 2^{R_k} - 1\right] \tag{7}$$

본 논문에서는 체이스 결합 HARQ (CC-HARQ) 기법을 적용하며 다음과 같이 동작한다. 수신단이 첫 번째 전송에서 메시지를 성공적으로 복구하면 Acknowledgement (ACK)을 보내고 송신단은 다음 메시지를 전송한다. 만약 수신단이 메시지를 복구하지 못하면 Non-acknowledgement (NACK)를 보내어 재전송을 요청한다. 재전송은 허용된 횟수까지 시도한다. 본논문에서는 아웃티지 확률이 ϵ 보다 작고, Long-term average rate (LATR)을 최대화하는 데이터율로 전송한다. LATR은 다음과 같이 정의한다[7]

Ⅴ. 수치적 결과

본 장에서는 성능분석을 위하여 MATLAB 프로그램을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한다. 1번째 기지국이 중앙에 있고 6개의 기지국이 1번 기지국을 둘러싼 형태의 1-tier 셀룰러 네트워크를 고려하였으며, 인접 기지국간 간격은 1000m를 가정하였다. 기지국으로부터 거리 d 만큼 떨어진 단말까지의 채널 이득은 아래의 수식을 이용하였다.

$$\beta = A \left(\frac{4\pi d_0 C}{f_0} \right)^2 \left(\frac{d_0}{d} \right)^{\rho} P_t$$

여기서 d_0 은 기준거리, f_c 는 중심 주파수, C는 빛의 속도, ρ 는 경로감쇄지수를, P_t 는 송신전력을 나타내고, A는 송수신 안테나 이득을 나타내며, 각 값은 $f_c=800 \mathrm{MHz},~\rho=3,~d_0=10 \mathrm{m},~A=1 \mathrm{g}$ 하였다. SIR 계산시 P_t 는 약분되므로 값을 명시하지 않았다.

그림 2은 1번 기지국의 특정 단말 (k번째 단말)이 R_k bps/Hz의 데이터율로 전송하고, N=2로 가정하며 기지국으로부터 떨어진 거리를 변화시켜가면서 측정한 아웃티지 확률을 나타낸다. R_k 는 [0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6,7] 의 8개 값을 고려하였다. 동일한 R_k 를 가질 때, 기지 국으로부터 가까운 거리에서는 파일럿 도약 기법이 파 일럿 고정 기법보다 더 낮은 아웃티지 확률을 갖지만, 거리가 멀어질수록 파일럿 고정 기법이 더 낮은 아웃티 지 확률 값을 갖는다. 그러나 그림과 같이 아웃티지 확 률 값이 0.001보다 낮아야 하는 조건에서 최대의 레이 트를 선택하는 문제에 있어서 파일럿 도약 기법이 파일 럿 고정 기법보다 더 높은 레이트를 선택할 가능성이 있다. 예를 들어 사용자가 기지국으로부터 350m의 거 리에 있을 때, 파일럿 도약 기법을 사용할 경우, $R_k = 1$ bps/Hz 가 선택될 것이지만, 파일럿 고정 기법 을 사용할 경우, $R_k = 0.5$ bps/Hz 가 선택될 것이다. 이 렇게 파일럿 도약 기법이 이득을 갖는 영역은 사용자가 기지국으로부터 멀리 있을수록 넓다.

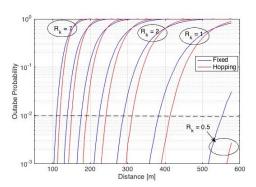


Fig. 2 The outage probability versus distance from a base station. N=2.

그림 3는 CC-HARQ기법을 사용하며 N= 2일 때, 파일럿 도약 기법과 고정 파일럿 기법의 거리에 따른 LATR 값의 변화를 보여준다. 그림을 통해 파일럿 고정

기법이 부분적으로 LATR 이득을 갖으며, 한 예로 거리가 306m 일 때, 파일럿 도약 기법이 파일럿 고정 기법에비해 약 70%의 LATR 이득을 얻음을 관찰할 수 있다.

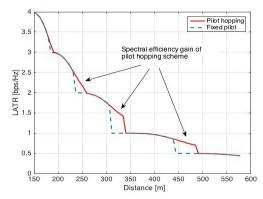


Fig. 3 The LATR vs. distance from a base station. N=2.

Ⅵ. 결 론

극다중 안테나 시스템에서 기존의 파일럿 고정 방식은, 각 사용자가 긴 시간 동안 동일한 SIR를 얻어, 강한 간섭을 받게 된 사용자의 SIR은 지속적으로 낮아서 서비스의 질이 저하된다. 본 논문에서는 매 타임 슬롯마다다른 파일럿 신호를 사용하는 파일럿 도약 기법을 제안하며, 이에 따라 매번 다른 양의 간섭을 받게 되므로, 지속적으로 서비스의 질이 저하되는 것을 방지할 수 있다. 본 논문에서는 극다중 안테나 시스템에 파일럿 도약기법을 적용 후, 체이스 결합 하이브리드 자동 재전송 기법을 적용하고 시뮬레이션을 통하여 아웃티지 확률과 전송률 성능이 개선됨을 보였다. 추후에 제안된 기법을 유한한 안테나 원소를 갖는 극다중 안테나 시스템에 적용하여 분석하는 연구를 진행한다면 제안하는 기법의 효용성을 더 확실히 증명할 수 있을 것이다.

REFERENCES

[1] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, J. C. Zhang, "What will 5G be," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, Jun. 2014.

- [2] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59, Aug. 1996.
- [3] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [4] H. Q. Ngo, M. Matthaiou, T. Q. Duong, and E. G. Larsson, "Uplink performance analysis of multicell MU-SIMO systems with ZF receivers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4471-4483, Nov. 2013.
- [5] S. H. Kim, T. V. K. and T. Le-Ngoc, "Hybrid ARQ in Multicell MU-SIMO With Large-Scale Antenna Arrays," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 9, pp. 5861 - 5874, Sep. 2016.
- [6] J. H. Sørensen and E. de Carvalho, "Pilot Decontamination Through Pilot Sequence Hopping in Massive MIMO Systems," in *Proceedings of Global Communications* Conference, pp. 3285-3290, Austin, Texas, USA, Dec. 2014.
- [7] P. Wu and N. Jindal, "Performance of hybrid-ARQ in block-fading channels: A fixed outage probability analysis," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 4, pp. 1129-1141, Apr. 2010.



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~ 국립경상대학교 정보통신공학과 조교수 ※관심분야: 차세대 이동통신 시스템, 사물인터넷, 분산 컴퓨팅 시스템



반태원(Tae-Won Ban)

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사

2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사 2010년 2월 KAIST 전기및전자공학 박사 2009년 6월~2010년 10월 KT 연구 엔지니어 2011년 2월~2012년 8월 KT Project Manager 2012년 9월~2016년 8월 경상대학교 정보통신공학과 조교수 2016년 9월~현재 경상대학교 정보통신공학과 부교수



이웅섭(Woongsup Lee)

2006년 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사

2008년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 학사 2010년 2월 KAIST 전기및전자공학과 석사

2011년 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사 2012년 2월~2013년 2월 한국과학기술원 박사후 연구원 2013년 2월~2014년 2월 독일 FAU 박사후 연구원 2014년 3월~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수 ※관심분야: 차세대 이동통신 시스템, 인지 라디오 시스템, 스마트 그리드, 빅 데이터 분석, 딥러닝

※관심분야: 차세대 이동통신, 무선 자원 관리, Cognitive Radios, Relay Systems, OFDM/MIMO



류종열(Jong Yeol Ryu)

2014년 2월 KAIST 전기및전자공학과 박사 2014년 4월~2016년 8월 싱가포르기술디자인대학교 박사후 연구원 2016년 9월~국립경상대학교 정보통신공학과 조교수 ※관심분야: 보안 통신 시스템, 차세대 이동통신 시스템, 사용자 릴레이 통신 등