

## 옥내용 모바일 통신 시스템을 위한 적응적 Load-Balancing 알고리즘 제안 및 시스템 레벨 시뮬레이션 기반 성능 분석

이용섭<sup>1</sup> · 이호원<sup>2\*</sup>

### Adaptive Load Balancing Algorithm and Its Performance Analysis Based on System-Level Simulations in Indoor Mobile Communication System

Woongsup Lee<sup>1</sup> · Howon Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Institute for Digital Communications, University Erlangen-Nürnberg, Erlangen, D-91058, Germany

<sup>2</sup> Dept. of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

#### 요 약

최근 옥외용 이동통신시스템과 동일 주파수를 사용하면서 추가적으로 용량을 확보할 수 있는 옥내용 모바일 통신 시스템을 위한 초소형 기지국에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 옥내용 모바일 통신 시스템에서 초소형 기지국의 특성을 고려한 시스템 레벨 시뮬레이터를 개발하였고 초소형 기지국 환경에서 혼잡한 (Congested) 기지국의 아웃티지 확률(Outage Probability)을 줄이는 적응적 Load-Balancing 방안을 제안하였다. 본 시뮬레이터에서는 초소형 기지국 특성을 고려한 링크 레벨 시뮬레이션 결과를 반영하였으며, 본 시뮬레이터를 이용하여 옥내용 모바일 통신 시스템에서 Load-Balancing 방안을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 아웃티지 확률을 비교해 보았다. 제안한 Load-Balancing 방안의 사용을 통해 혼잡한 기지국의 아웃티지 확률을 줄이고 전체 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다.

#### ABSTRACT

Recently, various solutions to support explosively growing mobile data traffic have attracted intensive attentions. However, the range of spectrum which can be exploited for mobile communications is very limited. Small cell networks are actively investigated because they can efficiently offload mobile data traffic from macro cells without using additional spectrum. In this paper, we developed a system-level simulator considering small cell networks in the indoor environments. We compare the performance of outage probability when a load-balancing algorithm is utilized or not. We can reduce the outage probability of congested BS with the load-balancing algorithm. In addition, overall outage probability of whole wireless systems can be reduced by using the proposed load-balancing algorithm.

**키워드** : 옥내용 모바일 통신 시스템, 부하 균형, 시스템 레벨 시뮬레이션, 아웃티지 확률

**Key word** : Indoor Mobile Communication System, Load Balancing, System-Level Simulation, Outage Probability

접수일자 : 2013. 07. 05 심사완료일자 : 2013. 08. 20 게재확정일자 : 2013. 09. 02

\* **Corresponding Author** Howon Lee(E-mail:hwlee81@gmail.com, Tel:+82-31-670-5198)

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering & IITC, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2013.17.11.2563>

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

최근 스마트폰과 스마트패드 사용자들의 급증으로 인해 멀티미디어 및 소셜 네트워크 서비스에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있다 [1][2]. 그 결과, 모바일 트래픽 양이 기하급수적으로 늘어나고 있으며, 이를 위해 보다 빠른 속도의 차세대 무선통신 서비스에 대한 필요성이 증대되고 있다 [3]. 전 세계적으로 다양한 모바일 기기들의 보급이 급증하고 있기 때문에, 무선 트래픽의 양은 더욱 가파르게 증가할 것으로 예측된다. Cisco 사의 전망에 의하면 북미에서 모바일 데이터 트래픽의 양은 2009년 대비 2014년에 약 50배 이상 증가할 것으로 예측하고 있다 [1]. 이러한 모바일 환경의 변화에 대응하기 위하여 Massive MIMO, Small Cell Network, Heterogeneous Network, Device-to-Device (D2D) Communication, Cognitive Radio, mmWave, Beamforming, Coordinated Multi-Point transmission/reception (CoMP) 등의 다양한 기술에 대한 연구가 각광을 받고 있다.

모바일 시스템에서 용량을 늘릴 수 있는 가장 효과적인 방법 중 하나는 단위면적 당 셀의 개수를 최대한 많이 늘리는 것이다. 특히 음성 트래픽의 60%, 데이터 트래픽의 70%가 옥내용 모바일 통신 시스템에서 발생된다고 알려져 있기 때문에, 이렇게 폭발적으로 증가하는 트래픽을 지원해 주기 위하여 Small Cell Network /Heterogeneous Network 연구의 일환인 옥내용 모바일 통신 시스템에서의 초소형 기지국에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [4]. 특히, 옥내용 셀 안에서 사용자들의 아웃티지 확률(Outage Probability)을 감소시키기 위한 적응적 Load-Balancing에 관한 연구는 옥내용 모바일 통신 시스템의 중요한 연구 분야 중 하나이다.

본 논문의 II장에서는 옥내용 모바일 통신 환경에서 초소형 기지국의 적응적인 Load-Balancing 동작 방안을 제시하고 III장에서는 시스템 레벨 시뮬레이션을 기반으로 Load-Balancing 알고리즘을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 아웃티지 확률을 분석한다. 제안한 Load-Balancing 방안의 사용을 통해 혼잡한 (Congested) 기지국의 아웃티지 확률을 줄이고 전체 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 보인다. 마지막으로 IV장에서 본 논문을 마무리 한다.

## II. 적응적 Load-Balancing 방안

본 논문에서는 각 기지국에 속해 있는 단말의 수에 따라서 적응적으로 초소형 기지국의 전송 파워를 조절하여 셀 간 통신 부하를 조절하는 방안에 대해서 고려하였다. 특히 많은 수의 사용자들이 특정 장소에 몰리는 경우 다수의 단말이 특정 기지국으로 몰릴 수 있고 이로 인해 해당 기지국이 단말들이 원하는 서비스를 충족시켜줄 수 없게 되고 이는 심각한 통신 서비스의 QoS (Quality of Service) 저하를 가져오게 된다. 이 경우 단말이 몰린 기지국의 전송 파워를 줄여서 단말이 몰린 기지국에 속해있는 단말의 수를 조절할 수 있고 이를 통해서 통신 부하를 분산시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단말이 특정 기지국에 몰릴 경우 통신 시스템의 성능 저하가 큰 것을 보이고 새로이 제안하는 적응적 Load-Balancing 방안의 적용을 통해 이러한 통신 시스템 성능 저하를 줄일 수 있음을 보인다.

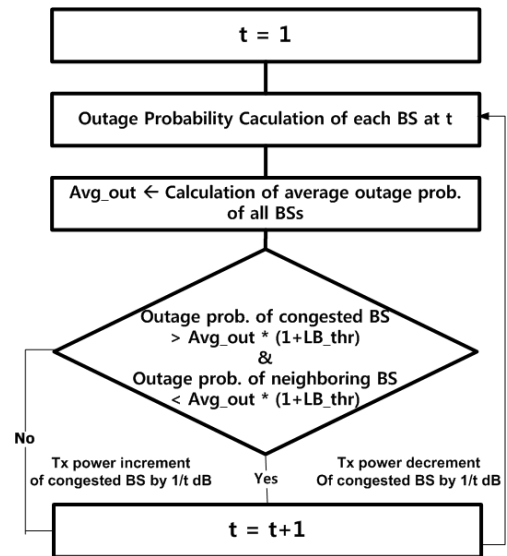


그림 1. Load-Balancing 동작 방안  
Fig. 1 Operation Procedure of Load-Balancing Algorithm

본 연구에서 제안하는 Load-balancing 방안은 그림 1에 나와 있다. 각 기지국들은 단말에게 서비스를 제공하면서 적응적으로 기지국의 전송 파워를 조절한다. 각 시간 t마다 중앙 관리 장치는 전체 기지국의 아웃티지 확률 평균값(Average Outage Probability)을 계산하고

이를 Avg\_out이라는 값에 저장한다. 본 연구에서 제안하는 Load-balancing 방안에서는 단말들 중 LB\_out rate 보다 적은 Data Rate를 할당 받은 단말들에게 아웃티지가 발생한다고 가정하였다. 혼잡한 기지국은 자신의 아웃티지 확률이  $Avg\_out * (1+LB\_thr)$  보다 크고 주변 아웃티지 확률이  $Avg\_out * (1+LB\_thr)$  보다 작을 때 자신의 전송 파워를 1/t dB 만큼 감소시키고 아닐 경우 1/t dB 만큼 증가시킨다. 이렇게 시간에 따라서 파워 조절 정도를 줄여나감으로써 전송 파워 유동성 문제를 해결하고 파워를 안정화 시킨다. 본 연구에서 제안하는 Load-balancing 방안에서는 혼잡한 기지국뿐만 아니라 혼잡한 기지국의 주변 기지국의 아웃티지 확률도 함께 고려를 하였는데 이는 혼잡한 기지국이 자신의 아웃티지 확률만 보고 전송 파워를 낮출 경우 주변 기지국의 아웃티지 확률이 급격히 증가할 수 있기 때문이다. 다시 말해서, 혼잡한 기지국이 자신의 아웃티지 확률만 보고 전송 파워를 줄이게 되면 혼잡한 기지국의 셀 경계면에 있던 단말들이 주변 기지국으로 핸드오버를 하게 된다. 그 결과, 주변 기지국으로 넘어가는 단말들의 수가 증가함으로써 주변 기지국들의 아웃티지 확률이 증가할 수 있다. 따라서 혼잡한 기지국이 자신의 아웃티지 확률만을 보고 전송 파워를 조절하면 주변 기지국의 큰 성능 저하를 야기할 수 있으므로, 본 논문에서는 혼잡한 기지국뿐만이 아니라 주변의 기지국에 미치는 영향을 함께 고려하였다. 또한 혼잡한 기지국 주변 아웃티지 확률이  $Avg\_out * (1+LB\_thr)$  보다 작을 때만 제안 방안이 동작하게 하여 혼잡한 기지국이 몰려있을 경우 혼잡하지 않는 기지국과 접하고 있는 혼잡한 기지국의 전송 파워부터 점차적으로 조절되게 하였다. 이를 통해서 급격한 시스템 변화를 막을 수 있다.

를 +45도와 -45도에 위치시킨 안테나를 사용한다. 이렇게 안테나 배치를 함으로써 두 안테나가 서로 다른 polarization을 가지게 할 수 있고 좁은 면적에 2개의 안테나를 집적할 수 있다 [5]. 이렇게 안테나를 배치시킴으로써 최대 8 dBi의 Directional Gain 얻을 수 있었고 두 개의 안테나 간의 Cross Correlation이 -30dB 이하로 조절 되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 적응적으로 각 안테나의 패턴을 조절하는 방안은 고려하지 않았다) [6]. 본 논문에서 고려되고 있는 초소형 기지국은 3GPP LTE (Long-Term Evolution) 서비스 대역(Downlink 1840-1850MHz, Uplink 1745-1755MHz)을 사용하도록 구현되어 있다. 더불어 초소형 기지국은 단일 셀 기준 1W 출력 및 3GPP TS 36.104 ACLR 45dBc를 만족하도록 구현되어 있다 [7].

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table. 1 Simulation Parameter

Parameter	Value
RF carrier frequency	1.85 GHz
Channel bandwidth	10 MHz
DL subchannel	PDSCH
Antenna configuration	2-by-2, 4-by-4
Multipath fading model	LOS: Rician channel NLOS: Rayleigh channel
BS transmission power	30 dBm
Noise power	-174 dBm
Number of users	10
Path-loss model [8]	LOS: $16.9 * \log_{10}(d) + 32.8 + 20 * \log_{10}(fc)$ NLOS: $43.3 * \log_{10}(d) + 11.5 + 20 * \log_{10}(fc)$
Wall loss	13 dBm
Shadow fading	0
Target PER	1%
Scheduling	Proportional Fairness

### III. 성능분석

#### 3.1. 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 안테나가 기지국에 집적되어 있는 초소형 기지국을 고려한다. 따라서 본 연구에서 고려한 기지국은 기존의 기지국과는 다른 안테나 패턴을 가진다. 본 연구에서 고려한 초소형 기지국은 2개의 안테나

본 연구에서는 3GPP LTE 환경을 기반으로 시스템 레벨 시뮬레이터를 개발하였다. 또한, Indoor Hotspot 시나리오가 초소형 기지국에서 고려하는 환경과 유사하기 때문에 ITU-R M.2135 문서의 Indoor Hotspot 시나리오를 기반으로 시뮬레이션 파라미터들을 설정하였다 [8]. 더불어 시뮬레이터에 사용된 파라미터들은 표 1과 같다 [9].

1) 즉, 각 안테나에서 Fixed Beamforming이 사용되었다.

본 시뮬레이터에서는 4x4 MU-MIMO를 이용하여 데이터가 전송된다고 가정하였다. 본 시뮬레이터에서는 Link Level Abstraction을 사용하였다. 따라서 미리 각 SINR 및 MCS 레벨에서의 Packet Error Rate (PER) 값을 링크 레벨 시뮬레이션을 통해서 구하고, 시스템 레벨 시뮬레이터에서는 각 링크 별 SINR만을 계산하여 미리 계산된 PER값을 사용하였다 [10]. Link Level Abstraction에 사용된 링크 레벨 시뮬레이터는 LTE 환경을 기반으로 구현되었으며 1/3 티보 코드를 이용한 환경에서 구현되었다. LTE 표준에 맞게 QPSK, 16QAM, 64QAM의 3가지 MCS 레벨을 고려하였고 Pedestrian 환경에서 링크 테이블을 계산하였다 [11]. 본 시뮬레이터에서 고려한 링크 레벨 시뮬레이터와 시스템 레벨 시뮬레이터의 관계는 그림 2에 나와 있다.

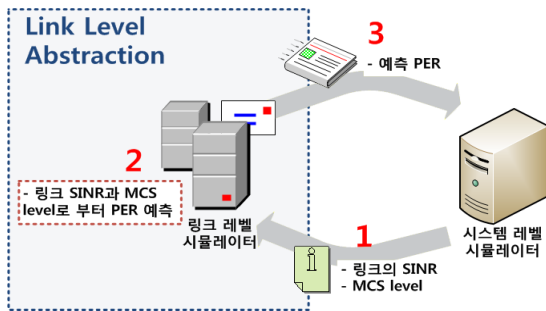


그림 2. 링크 레벨 시뮬레이터와 시스템 레벨 시뮬레이터의 관계도

Fig. 2 Relation of Link Level Simulator and System Level Simulator

본 연구에서는 건물 내부에 초소형 기지국들이 설치되어 있고 이 초소형 기지국들이 건물 내부의 단말들을 서비스 해 주는 환경을 고려하였다. 또한 건물 내부에 4개의 기지국을 설치하였고 225m<sup>2</sup>의 정사각형 방이 9개가 있는 정사각형 건물을 고려하였다. 초소형 기지국의 전송 방향성 특성을 고려하여 초소형 기지국들을 건물의 4 모서리에 설치하였다. 건물 내부에서는 초소형 기지국과 단말 사이에 벽과 같은 장애물이 있을 가능성이 높으므로 NLOS (Non Line-of-Sight) 채널 환경을 가정하였다. 따라서 NLOS path-loss 모델 및 Rayleigh

multipath 페이딩을 고려하였다 [12]. 또한 각 단말들은 Poisson Point Process (PPP)에 따라서 전체 면적에 랜덤하게 위치시켰다 [13]. 더불어 각 단말들은 기지국들로부터 파일럿 신호의 크기를 보고 파일럿 신호 크기가 제일 큰 기지국과 연결이 된다고 하였다.

### 3.2. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 LB\_thr의 값을 1로 놓고 0.15 bps/Hz 이하의 Rate를 할당 받은 단말들에게 아웃티지가 발생한다고 가정하고 성능을 분석하였다. 또한 단말 분포를 조절하여 1번 기지국의 커버리지에 전체 시스템의 사용자들 중 50%의 사용자들이 위치하도록 하였다<sup>2)</sup>. 이 경우 제안한 Load-Balancing 방안을 사용하였을 때 1번 기지국의 전송 파워 변화는 그림 3과 같이 나타났다.

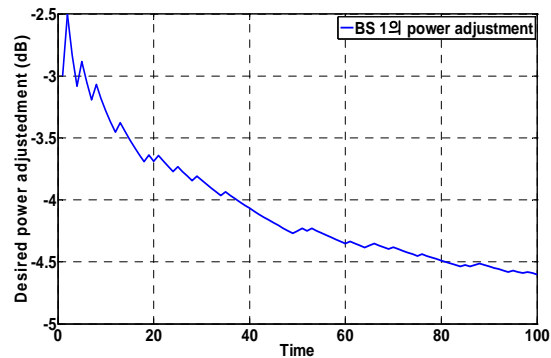


그림 3. BS 1의 전송 파워 변화량 vs. 시간

Fig. 3 Desired Power Adjustment Entity of BS 1 vs. Time

그림 3에서 볼 수 있듯이 1번 기지국의 초기 전송 파워에 비해서 Load-Balancing을 수행한 후의 전송 파워가 줄어든 것을 볼 수 있다. 1번 기지국에 많은 단말들이 몰려 있기 때문에 1번 기지국에 속해있는 단말들이 아웃티지를 겪게 된다. 따라서 아웃티지 확률을 낮추기 위해서는 1번 기지국에 속해있는 단말들을 주변 기지국으로 핸드오버 시켜서 1번 기지국에 속해 있는 단말들의 수를 줄여야 한다. 이를 위해 1번 기지국이 전송 파워를 줄이는 현상이 발생하는 것이다. 전송 파워를 감소시킴으로써 기지국의 커버리지를 줄일 수 있고 셀 경

2) 이를 위해서 50%의 단말들을 전체 면적에 PPP에 따라서 분포시키고 나머지 50%의 단말들을 1번 기지국의 커버리지에 PPP에 따라서 분포시켰다.

계면에 있던 단말들이 주변 기지국으로 핸드오버 하게 됨으로써 기지국에 속한 단말의 수를 줄일 수 있다. 또한 1번 기지국의 전송 파워 변화량이 -4.6 dB 로 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 제안한 Load-Balancing 방안의 수렴성을 확인해 볼 수 있었다. 그림 4에서는 Load-Balancing 방안이 사용되었을 경우와 사용되지 않았을 경우의 아웃티지 확률을 비교해 보았다. 아웃티지 확률은 그림 4와 같이 구할 수 있었다.

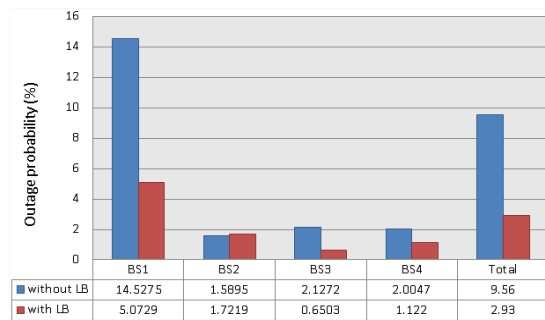


그림 4. 아웃티지 확률 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation Results of Outage Probability

그림 4의 결과에서 볼 수 있듯이 Load balancing을 사용함으로써 혼잡한 기지국(1번 기지국)의 아웃티지 확률이 약 66% 감소한 것을 볼 수 있었다<sup>3)</sup>. 특히 제안한 Load-Balancing 방안의 사용을 통해서 혼잡한 기지국의 아웃티지 확률이 5% 정도로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한 이렇게 Load-Balancing 알고리즘을 사용 하더라도 주변 기지국의 아웃티지 확률도 거의 변하지 않고 몇몇 기지국의 경우에는 오히려 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이는 혼잡한 기지국이 자신의 전송 파워를 줄임으로써 주변 기지국에 미치는 간섭 양이 줄어들기 때문에 발생하는 현상이다. 본 논문에서 고려한 옥내용 모바일 통신 시스템은 기지국들이 매우 밀집한 환경이고 따라서 기지국 간 간섭이 매우 크다. 이러한 인접 기지국 간 간섭은 아웃티지 확률을 높게 되는데, 이 때 혼잡한 기지국이 자신의 전송 파워를 낮추면 주변 기지국에 더 적은 간섭을 미치게 되고, 주변 기지국의 아웃티지 확률을 줄이는데 도움을 줄 수 있다.

특히 혼잡한 기지국에 속해 있다가 해당 기지국이 자신의 아웃티지 확률을 낮추기 위해서 전송 파워를 줄이면서 주변으로 핸드오버하게 되는 단말들의 경우, 옥내용 모바일 통신 시스템 특성상 새로 연결되는 기지국으로부터도 멀리 떨어져 있지 않고 따라서 충분히 큰 신호 세기로 통신을 수행할 수 있고 큰 성능 저하가 일어나지 않는다. 즉 본 연구에서 제안한 Load-Balancing 방안에서는 혼잡한 기지국이 주변 단말들에게 미치는 간섭 양이 줄어들면서 나타나는 성능 향상이 혼잡한 기지국에 속한 단말들이 주변 기지국으로 핸드오버하면서 미치는 성능 저하에 비해서 훨씬 더 크므로 주변 기지국의 아웃티지 확률도 줄어드는 것이다.

좀 더 자세히 살펴보면 2번 기지국의 경우 아웃티지 확률이 약간 늘어나고 3, 4번 기지국의 경우 아웃티지 확률이 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 본 연구에서 고려한 안테나 패턴과 관련이 있다. 또한 3번 기지국의 경우 아웃티지 확률 감소량이 제일 큰 데, 이는 1번 기지국이 자신의 전송 파워를 낮추더라도 3번 기지국으로 핸드오버하게 되는 단말의 수가 거의 없기 때문이다. 하지만 이러한 상황에서 인접 셀 간 간섭이 감소하므로 3번 기지국의 성능 향상이 제일 크게 된다.

더불어 전체 시스템의 아웃티지 확률도 9.5%에서 3%로 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 즉 제안한 Load-Balancing 방안의 사용을 통해서 혼잡한 기지국의 아웃티지를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 전체 시스템 측면에서도 아웃티지 확률을 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 옥내용 모바일 통신 시스템에서 초소형 기지국의 특성을 고려한 시스템 레벨 시뮬레이터를 개발하였고 시뮬레이터를 이용하여 옥내용 모바일 통신 시스템에서 초소형 기지국의 성능을 분석하였다. 또한 혼잡한 기지국의 아웃티지 확률을 낮추기 위한 Load-Balancing 방안을 제안하였다. 본 연구에서는 초소형 기지국 특성을 고려한 링크 레벨 시뮬레이션 결과를 시스템 레벨 시뮬레이터에 반영하였으며, 옥내용 모

3) 아웃티지 확률이 14.53%에서 5%로 줄었다.

바일 통신 시스템에서 Load-Balancing 동작 방안을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 아웃티지 확률을 비교해 보았다. 제안한 Load-Balancing 방안의 사용을 통해 혼잡한 기지국의 아웃티지 확률을 줄이고 전체 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다.

## REFERENCES

- [ 1 ] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2009-2014," Feb. 2010.
- [ 2 ] J. Huh, "An era of mobile-data explosion, how to prepare?," *KT Digieco Focus*, pp. 1-18, Jul. 2011.
- [ 3 ] P. J. Song and S. H. Park, "Trends of wireless access technologies towards future IMT," *ETRI Electron. Telecommun. Trends*, vol. 27, no. 5, pp. 85-94, Oct. 2012.
- [ 4 ] 3GPP, Release 12 and ongoing, workshop, Slovenia, 2012.
- [ 5 ] C. B. Dietrich Jr., K. Dietze et al., "Spatial, polarization, and pattern diversity for wireless handheld terminals," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 9, pp. 1271-1281, 2001.
- [ 6 ] W. Lee, and D. Cho, "Adaptive interference estimation for directional transmission," in *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference 2012*, pp.350-351, Jan. 2012.
- [ 7 ] 3GPP TS 36.104, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (LTE): Base Station (BS) Radio Transmission and Reception," v. 8.2.0, May 2008.
- [ 8 ] Report ITU-R M.2135-1, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, Dec. 2009.
- [ 9 ] K. Valkealahti, A. Hoggund, J. Parkkinen, and A. Hamalainen, "WCDMA common pilot power control for load and coverage balancing," in *Proc. The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2002*, pp. 1412-1416, Sep. 2002.
- [ 10 ] M. Simsek et al, "An LTE-femtocell dynamic system level simulator," in *Proc. IEEE Smart Antennas (WSA) 2010*, pp. 66-71, Feb. 2010.
- [ 11 ] K. C. Beh, A. Doufexi and S. Armour, "Performance evaluation of hybrid ARQ schemes of 3GPP LTE OFDMA system," in *Proc. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2007*, pp. 1-5, Sep. 2007.
- [ 12 ] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge; Cambridge University Press, 2005.
- [ 13 ] M. Haenggi "On distances in uniformly random networks," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 51, no. 10, pp. 3584-3586, Oct. 2005.



**이용섭(Woongsup Lee)**

2012년 전기및전자공학과 박사  
 2012년~2013년 KAIST BK 21 연구원  
 2013년~현재 독일 Friedrich Alexander University 박사후연구원  
 ※ 관심분야 : 차세대 이동통신 시스템, 인지 라디오 시스템, 스마트 그리드



**이호원(Howon Lee)**

2009년 전기및전자공학과 박사  
 2009년~2010년 KAIST IT융합연구소 선임연구원  
 2010년~2012년 KAIST IT융합연구소 팀장/연구조교수  
 2012년~현재 국립환경대학교 전기전자제어공학과 조교수  
 2012년~현재 KAIST IT융합연구소 겸직교수  
 ※ 관심분야 : 차세대 이동통신 시스템, D2D 통신, 최적 CSMA, 지식융합기술 등