

논문 2006-43TC-11-10

# IEEE 802.16 TDD-OFDMA 하향링크에서의 단순 릴레이 협력 자원 관리와 수율 보장 스케줄러를 이용한 서비스 커버리지 및 섹터 수율에 관한 연구

(Performance Evaluation of Simple-Relay Aided Resource Allocation and Throughput Guarantee Scheduler in IEEE 802.16 TDD-OFDMA Downlink)

기영민\*, 변대욱\*, 김동구\*, 손행선\*\*

(Young Min Ki, Dae Wook Byun, Dong Ku Kim, and Haengseon Son)

## 요약

본 논문은 IEEE 802.16 기반의 TDD-OFDMA 하향링크의 서비스 커버리지 향상을 위한 단순 릴레이 협력 자원 관리 (SRARA, Simple-Relay Aided Resource Allocation) 구조를 제시하고, 채널 스케줄러가 적용되었을 때의 성능 향상을 서비스 커버리지 및 유효 섹터 수율 측면에서 분석하였다. 단순 이동 릴레이는 고정 릴레이와 달리, 송신 전력 수준이 낮고, 기지국으로부터 받은 데이터를 다른 이동 단말로 전달할 수 있는 기능만 가지며, 낮은 송신 전력 수준 때문에 제한된 개수의 부채널만을 사용할 수 있다. 모의실험에서는 PF (Proportional Fair) 및 TGS (Throughput Guarantee Scheduling) 채널 스케줄러가 고려된 SRARA 구조에 대하여, 서비스 커버리지 및 유효 섹터 수율을 평가하였다. 릴레이의 송신 전력은 500 mW와 1 W에 대해서 고려하였고, 릴레이가 사용할 수 있는 부채널의 수는 1개 또는 2개로 제한되었다. 상대적으로 낮은 송신전력인 500 mW에서는, 릴레이가 1개의 부채널로 모든 전력을 다 사용하는 방식이, 2개의 부채널로 전력을 나누어 사용하는 방식보다 커버리지 성능 향상이 우수하였다. 1 W 경우에는, 릴레이가 2개의 부채널을 사용할 때 더 많은 커버리지를 제공하였다. 상대적으로 낮은 QoS 요구조건인 64 kbps에서는 릴레이에 의한 커버리지 향상이 스케줄러 설계에 의한 커버리지 향상보다 많았지만, 128 kbps 요구조건에서는 제한된 자원만을 활용하는 릴레이보다는 TGS에 의한 서비스 영역의 향상이 크게 나타났다.

## Abstract

Simple-relay aided resource allocation (SRARA) schemes are incorporated with throughput guarantee scheduling (TGS) in IEEE 802.16 type TDD-OFDMA downlink to enhance service coverage, where the amount of resources at each relay is limited due to either its available power which is much smaller than base station (BS) power or the required overhead. The performance of SRARA schemes is evaluated with both proportional fair (PF) and TGS schedulers at 64 kbps and 128 kbps user throughput requirements. For SRARA with RSs of relatively lower power, a scheme putting total power into only one subchannel shows larger coverage than when both subchannels are used in a manner of equal power allocation, while the RS with evenly power-allocated two subchannels could provide larger coverage gain for a relatively higher power. In a lower target (64kbps), more improvement comes from relay scheme rather than scheduler design. For a relatively higher level (128 kbps), it comes from scheduler design rather than relay.

**Keywords:** IEEE 802.16 TDD-OFDMA, 단순 릴레이 협력 자원 관리, 수율 보장 스케줄러

\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

\*\* 정회원, 전자부품연구원 SoC센터(SoC Research Center, Korea Electronics Technology Institute)

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (ITA-2006-C1090-0603-0019)

접수일자: 2006년10월10일, 수정완료일: 2006년11월18일

## I. 서 론

다중 반송파 기반의 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 기술은 초고속 데이터 전송률을 요구하는 WLAN (Wireless Local Area Network) 및 3.5G, 4G 시스템의 핵심 전송 기술로서 기대되고 있다<sup>[1]</sup>. 광대역 채널에서는 페이딩의 시변하는 특성과 더불어, 주파수 축에서의 페이딩 변이가 시스템 성능에 영향을 미치게 된다. 광대역의 RF 채널을 수백에서 수천 개의 부채널로 분할하여 데이터를 전송하는 OFDM 시스템에서, 주파수 선택적인 페이딩 채널을 극복하기 위한 기술은 주파수 다이버시티 (frequency diversity)와 부채널에서의 적응적인 변조 및 부호 방식을 사용하는 주파수선택 (frequency selectivity)의 두 가지로 분류할 수 있다<sup>[2]</sup>. 주파수 다이버시티는 여러 부채널에 걸쳐 동일한 변조 및 부호화 방식을 사용함으로써, 특정 대역이 깊은 페이딩에 빠져 시스템 전체가 성능 열화 되는 현상을 막을 수 있는 기술이고, 주파수 선택은 각 주파수 대역에서의 채널 특성을 이용하여 시스템 용량을 향상시키는 방법으로서, 각 부채널에서의 링크 적응 및 채널 스케줄링을 적용하여 구현할 수 있다. OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 셀룰러 시스템에서의 주파수 선택성을 이용한 채널 스케줄링에 대한 연구는 [2-7] 등에서 볼 수 있다. 이와 같은 연구들은 3G 기반의 스케줄링 알고리즘과 전력 제어 알고리즘을 광대역 OFDMA 시스템에 적용함으로써 시스템 수율 향상 및 이에 따른 공평성, 서비스 커버리지에 성능에 대하여 제시하였고, 또한 OFDMA 셀룰러 시스템에서는 셀 외곽 지역 또는 커버리지 홀과 같이 사용자의 C/I (Carrier to Interference Ratio)가 심하게 열화되어 서비스를 받을 수 없는 영역이 존재한다는 것을 보였다.

릴레이를 이용한 셀룰러 시스템은 효율적인 투자비용으로 서비스 커버리지를 확장할 수 있는 방법으로서 널리 알려져 있다<sup>[8-12]</sup>. 또한 2005년에는 IEEE 802.16 MMR (Mobile Multihop Relay) Task Group<sup>[8]</sup>이 결성되어, IEEE 802.16 WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks)<sup>[13]</sup> 및 IEEE 802.16e Mobile WMAN<sup>[14-17]</sup>에서의 릴레이를 이용한 멀티홉 인프라 구조 (Multihop Infrastructure)에 대한 표준화를 진행하고 있다.

본 논문은 IEEE 802.16 기반의 TDD-OFDMA 하향 링크에서의 서비스 커버리지 향상을 위한 단순 릴레이

협력 자원 관리 구조를 제시하고, 채널 스케줄러가 적용되었을 때의 성능 향상을 서비스 커버리지 및 유효 섹터 수율 측면에서 분석하였다. 본 논문에서 가정된 단순 이동 릴레이는 고정 릴레이와 달리, 송신 전력 수준이 낮고, 기지국으로부터 받은 데이터를 다른 이동 단말로 전달할 수 있는 기능만 가지며, 낮은 송신 전력 수준 때문에 매우 적은 수의 부채널만을 릴레이에 사용할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 TDD-FDMA 하향 링크 스케줄링의 시스템 모델 및 수율 보장 스케줄링 (TGS, Throughput Guarantee Scheduling)에 대하여 설명하였다. 제 III장은 본 논문에서 제시하는 단순 릴레이 협력 자원 관리 (SRARA, Simple-Relay Aided Resource Allocation)에 대하여 설명하였다. 제 IV 장은 모의실험을 통한 성능 분석을 수행하였으며, 제 V 장에서는 결론을 논하였다.

## II. 시스템 모델 및 수율 보장 스케줄러

### 1. 시스템 모델

OFDM 전송기술은 페이딩 채널의 지연 확산 (delay spread) 보다 큰 CP (Cyclic Prefix)를 사용하여, 다중 경로 페이딩 및 ISI (Inter-Symbol Interference)에 대하여 효율적인 전송률을 얻을 수 있는 전송 기술이다. OFDMA는 OFDM 전송 기술을 기반으로 한 시간-주파수 분할 다중 접속 기술로서 IEEE 802.16 WMAN<sup>[13]</sup> 및 802.16e Mobile WMAN<sup>[14-17]</sup> 규격에 채택 중이다. 고정된 길이의 OFDMA 프레임은 하향 링크 (DL) 프레임과 상향 링크 (UL) 프레임으로 구성된다. 주파수 측면에서 광대역의 RF 대역폭은 수백에서 수천 개의 부반송파 (Subcarrier)로 나누어지며, 부반송파의 수는 OFDM FFT 크기와 같다. 부채널 (Subchannel)은 여러 개의 부반송파가 모여져서 구성되는데, 이는 스케줄러가 다룰 수 있는 최소 자원단위가 된다. 일반적으로 부채널 크기는 동기 대역폭 (coherence bandwidth)보다 크게 설계된다.

TDD (Time Division Duplexing) 시스템은 연속적인 하향 스트림이나 상향 스트림을 제공하지 않기 때문에, 채널 피드백은 매 프레임 주기마다 전송될 수 있고, 채널 스케줄링은 채널 피드백 주기와 같이 매 프레임마다 수행이 가능하다. OFDM/TDM 전송 시스템에서의 스케줄링은 특정한 시간에 한 사용자에게 전 대역을 할당하는 반면에, OFDMA 시스템은 여러 사용자

가 대역을 분할하여 사용할 수 있다.

OFDMA 하향링크 스케줄링 시스템에서, 시간-주파수 변이 페이딩 채널을 가진 사용자의 각각의 부채널에서의 순간 전송율은 랜덤 프로세스로 생각될 수 있으며 (1)과 같이 표기한다.

$$\{R_{i,n}(t)\} \quad i = 1, \dots, N_U, \quad n = 1, \dots, N_S \quad (1)$$

여기서  $R_{i,n}(t)$ 은  $i$ -번째 사용자의  $n$ -번째 부채널에서의 특정 수준의 BER (Bit Error Rate) 레벨을 만족시킬 수 있는 데이터 전송률로서, 스케줄링 시간  $t$ 에  $i$ -번째 사용자가  $n$ -번째 부채널에서 서비스를 받게 되면 얻을 수 있는 전송률이 된다.  $N_U$ 는 섹터 내의 사용자 수이고,  $N_S$ 는 가용 부채널의 수이다.  $R_{i,n}(t)$ 는 상향 링크 CQI (Channel Quality Indicator) 채널을 이용하여 이동 단말로부터 기지국으로 피드백된 CQI 수치를 기준으로 하여 결정된다.

### 2. 비례 공정 스케줄링 (PF, Proportional Fair)

비례 공정 (PF) 스케줄링 알고리즘은 3G 시스템의 대표적인 채널 스케줄링 알고리즘이다<sup>[17-18]</sup>. PF 알고리즘은 쉽게 TDD-OFDMA 시스템의 부채널로 확장할 수 있으며,  $n$ -번째 부채널에서의 스케줄링 될 사용자  $i_n^*$ 는 (2)과 같이 결정된다.

$$i_n^* = \arg \max_i \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)}, \quad (2)$$

여기서  $R_{i,n}(t)$ 은  $i$ -번째 사용자의  $n$ -번째 부채널에서의 순간 데이터 전송률이고,  $T_{i,n}(t)$ 은 평균 수율이다. PF 알고리즘은 사용자의 평균적인 채널 환경에 비하여, 순시적인 채널 특성 가장 좋은 사용자에게 전송권을 부여해 주는 방식으로, 페이딩 채널의 시간적인 변이를 이용하는 알고리즘이다<sup>[17-18]</sup>.

### 3. 수율보장 스케줄러

(TGS, Throughput Guarantee Scheduling)

네트워크 내의 사용자들은 QoS 클래스에 따라 각기 다른 수율 요구 조건을 가지고 있으며, 수율 요구 조건은 평균 수율뿐만 아니라, 수율 아웃티지로서 정의할 수 있다.  $i$ -번째 사용자의 수율 아웃티지 확률은 사용자 수율이 요구되는 수율 목표치를 만족시키지 못할 확률로 정의되며, QoS 보장을 위해서는 (3)와 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$\Pr_i(T_i < T_{i,req}) \leq \delta_i, \quad (3)$$

여기서  $T_i$ 는  $i$ -번째 사용자의 평균 수율이고  $T_{i,req}$ 는 이 사용자의 최소 수율 요구값 (Minimum Throughput Requirement) 으로서 사용자의 QoS 클래스에 의해 결정된다.  $\delta_i$ 는  $i$ -번째 사용자의 수율 아웃티지 요구값이다. 다시 말해, 사용자에게 대한 수율 요구 조건을 만족하기 위해서, 네트워크는 각 사용자들에게 일정 수준 이하의 아웃티지를 만족시켜야 한다.

[7]은 PF 알고리즘의 수정을 통해, 사용자의 수율 아웃티지를 보장하기 위한 수율 보장 스케줄러 (TGS, Throughput Guarantee Scheduling)를 제안하였다. TGS 알고리즘에서,  $n$ -번째 부채널에서의 스케줄링 될 사용자  $i_n^*$ 는 (4)와 같이 결정된다.

$$i_n^* = \arg \max_i \begin{cases} \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)} \cdot (C_{i,n})^{\min(t,0, T_i/T_{i,req})}, & T_i < T_{i,req} \\ \frac{R_{i,n}(t)}{T_{i,n}(t)}, & T_i \geq T_{i,req} \end{cases}, \quad (4)$$

여기서  $C_{i,n}$ 은  $i$ -번째 사용자의  $n$ -번째 부채널을 위한 추가적인 가중치로서, 최소 수율 요구 조건을 만족시키지 못하였을 때에만 추가적인 가중치를 부여 받게 된다. 추가적인 가중치 함수는 (5)과 같이 정의된다.

$$C_{i,n} = \frac{\max_j (\overline{R_{j,n}(t)})}{R_{i,n}(t)}, \quad (5)$$

이것은 시스템의 최대 가능 전송률 대 사용자의 평균 순간 전송률의 비율로서, 최소 수율을 만족시키지 못한 사용자의 상대적으로 열악한 채널 상태를 보상해 준다.  $T_i/T_{i,req}$ 는  $i$ -번째 사용자의 정규화된 수율이다. 이에 따라 요구 조건을 만족 못한 사용자의 수율이 최소 수율 목표 값과 비슷하게 되면, 추가 가중치의 지수가 1에 가까워지게 된다. 그러므로 이 알고리즘은 실행 불가능한 (unfeasible) 네트워크에서의 모든 사용자의 최소 수율을 만족시킬 수는 없지만, 최소 수율 목표 값에 가까운 수율을 가진 사용자들에 우선순위를 부가하여 최소 수율을 만족시키는 사용자의 수를 증가시킬 수 있다.

### III. TDD-OFDMA 시스템에서의 단순 릴레이 협력 자원 할당 구조

#### 1. 단순 이동 릴레이 (Simple Mobile Relay)

본 논문에서는 IEEE 802.16 기반의 TDD-OFDMA 하향링크에서의 단순 이동 릴레이 (Simple Mobile Relay)를 가정하였다. 단순 이동 릴레이는 기본적으로 일반적인 이동 단말 (Mobile Station)이지만, 필요에 따라 릴레이로 동작하여 기지국으로부터 받은 데이터를 다른 이동 단말로 전달할 수 있다. 이와 같은 단순 릴레이는 송신 전력 레벨이 기지국에 비하여, 1 - 5 % 정도로 극히 낮아, 릴레이를 통해 송신할 수 있는 부채널의 수가 제한되어야 한다. 또한 이와 같은 단순 릴레이는 다기능 고정 릴레이 (Full-Function Fixed Relay Station)와 달리 자원 관리 기능이 없고, 네트워크 내의 모든 자원 관리는 기지국의 스케줄러가 수행하는 것으로 가정하였다<sup>[8-9]</sup>.

#### 2. MMR 디버시티 셋

##### (Mobile Multihop Relay Diversity Set)

하향링크 셀룰러 시스템에 단순 릴레이의 기능이 추가됨으로서, 이동 단말은 모든 패킷 수신을 기지국으로부터 직접 링크 (Direct Link)를 이용하여 하거나, 또는 서로 다른 부채널을 이용하여 일부의 부채널에서는 직접 링크로, 일부의 부채널에서는 릴레이 링크 (Relay Link)를 사용하여 데이터를 수신할 수 있다. 전자의 경우처럼, 모든 데이터를 직접 링크로만 수신하는 이동 단말을 직접 모드 (Direct Mode) 상태에 있다고 정의하며, 후자처럼 직접 링크와 릴레이 링크를 모두 사용하는 이동 단말은 릴레이 협력 모드 (Relay-Aided Mode) 상태에 있다고 정의한다.

이동 단말은 세션을 설정할 때, 직접 모드 또는 릴레이 협력 모드 중 하나의 상태로 선택되어야 하며, 선택된 모드에 따라서, MMR 디버시티 셋 (Mobile Multihop Relay Diversity Set)<sup>[10]</sup>을 다르게 관리한다. MMR 디버시티 셋<sup>[10]</sup>은, 활성화된 기지국 (Active Base Station)과 활성화된 릴레이 (Active Relay Station)들의 집합으로 각각의 이동 단말에 대하여 정의된다. 만약 이동 단말이 셀 간의 핸드오프를 수행하는 상태가 아니라면, 이동 단말들의 MMR 디버시티 셋은 한 개의 활성 기지국과 여러 개의 릴레이로 구성된다. 이 때 MMR 디버시티 셋으로 선택된 릴레이들은 직접 링크에서의 지원 가능한 평균 데이터 전송률 (Average

Supportable Data Rate)보다 더 높은 평균 유효 데이터 전송률 (Average Supportable Effective Data Rate)을 제공하는 릴레이들이다. 그러므로 MMR 디버시티 셋의 크기가 1인 이동 단말은 직접 모드이며, 릴레이 협력 모드 상태의 단말들의 MMR 디버시티 셋의 크기는 1보다 크지만, 그 크기는  $(N_R^{\max} + 1)$ 로 제한된다고 가정하였다. 여기서  $N_R^{\max}$ 은 한 이동 단말이 지원받을 수 있는 최대 릴레이 수로 정의하며, MMR 디버시티 셋이 클수록 이동 단말과 기지국, 릴레이 간의 송수신 오버헤드와 복잡도가 증가하게 되므로 이 값은 반드시 제한되어야 한다.

각 이동 단말의 MMR 디버시티 셋을 결정하기 위해서, 직접 링크와 릴레이 링크들에서의 전 주파수 대역의 평균 C/I를 측정하고 후 양자화하여 기지국으로 전송하여, 이를 기반으로 릴레이 전송채널의 평균 유효 데이터 전송률을 계산할 수 있다고 가정하였다. MMR 디버시티 셋의 결정은 초기 세션 설정이나 핸드오프 과정에서 완료되어야 한다.

#### 3. 단순 릴레이 협력 자원 관리 (SRARA,

##### Simple-Relay Aided Resource Allocation)

기지국 스케줄러는 릴레이 협력 모드의 이동 단말에 대해서, 매 스케줄링 시간마다 각각의 부채널에 대하여, 직접 링크를 사용할 것인지, 릴레이 링크를 사용할 것인지를 결정하게 되며, 각 부채널의 지원 가능한 순간 데이터 전송률 (Instantaneous Supportable Data Rate)을 계산하고, 릴레이 링크를 사용하는 부채널의 경우에는 상응하는 릴레이가 어느 단말인지도 결정하여야 한다. 직접 모드 상태인 단말은 이와 같은 것을 결정할 필요가 없이 모든 부채널에 대하여 직접 링크를 사용한다.

스케줄링 시간  $t$ 에서  $i$ -번째 이동 단말의  $n$ -번째 부채널에서의 지원 가능한 순간 데이터 전송률은 (6)과 같이 정의되며, 직접 링크의 지원 가능한 순간 데이터 전송률과 릴레이 링크의 지원 가능한 유효 순간 데이터 전송률 (Effective Instantaneous Supportable Data Rate)을 비교하여 큰 값으로 결정된다.

$$R_{i,n}(t) = \begin{cases} R_{i,n}^d(t), & \text{if } R_{i,n}^d(t) \geq R_{i,n}^{r,eff}(t) \\ R_{i,n}^{r,eff}(t), & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

여기서  $R_{i,n}^d(t)$ 은 직접 링크의 지원 가능한 순간 전

송률이고,  $R_{i,n}^{r*,eff}(t)$  은 릴레이 링크의 지원 가능한 유효 순간 데이터 전송률로서 (7) 같이 정의된다.

$$R_{i,n}^{r*,eff}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \min(R_{r^*(i,n)}^d(t), R_{i,n}^{r^*(i,n)}(t)), & \text{for worst-link adaptation} \\ \frac{1}{1/R_{r^*(i,n)}^d(t) + 1/R_{i,n}^{r^*(i,n)}(t)}, & \text{for per-link adaptation} \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $r^*(i,n)$ 는  $i$ -번째 이동 단말의  $n$ -번째 부채널에서 가장 높은 유효 전송률을 제공할 수 있는 릴레이를 표시하며, (8)과 같이 결정된다.

$$r^*(i,n) = \arg \max_{r \neq i, r \in DS_i} R_{i,n}^{r*,eff} \quad (8)$$

여기서  $DS_i$ 는  $i$ -번째 이동 단말의 MMR 디버시티 셋이고,  $R_{i,n}^{r*,eff}(t)$ 는  $r$ -번째 릴레이를 사용하는 릴레이 링크의 지원 가능한 유효 순간 데이터 전송률이다.  $R_{r^*(i,n)}^d$ 는 기지국과 릴레이  $r^*(i,n)$  간의 지원 가능한 순간 데이터 전송률이고,  $R_{i,n}^{r^*(i,n)}$ 는 릴레이  $r^*(i,n)$ 와  $i$ -번째 이동 단말 간의 지원 가능한 순간 데이터 전송률이다.

본 논문에서는 최악-링크 적응 (Worst-Link Adaptation)과 링크-당 적응 (Per-Link Adaptation)의 두 가지 링크 적응 형태를 고려하였다. 최악-링크 적응 방식은, 기지국에서 릴레이까지의 데이터 전송률과 릴레이에서 이동 단말까지의 데이터 전송률을 기지국에서 알고 있으며 이들 중에서 더 낮은 전송률을 이용해, 기지국에서 릴레이 그리고 릴레이에서 단말까지 같은 전송률로 전송을 하게 된다. 그러므로 릴레이 링크의 유효 데이터 전송률은 이와 같은 방법으로 결정된 데이터 전송률의 1/2이 되며, 릴레이 링크에 할당된 시간-주파수 자원은 기지국에서 릴레이 간의 링크, 릴레이에서 이동 단말간의 링크에 1/2의 시간 씩 할당된다<sup>[11]</sup>.

링크-당 적응방식은, 기지국에서 릴레이 간의 링크에서의 데이터 전송률과 릴레이에서 이동 단말로의 데이터 전송률을 각각의 C/I 상태에 따라서 서로 독립적으로 결정한다. 두 링크 간의 시간 자원은 각 링크의 데이터 전송률의 역비례하도록 할당되며, 릴레이 링크의 유효 데이터 전송률은 (7)과 같다<sup>[12]</sup>.

#### 4. 기지국 스케줄링 (Centralized BS scheduling)

각 단말의 부채널에서의 지원 가능한 순간 데이터 전송률의 대한 결정이 완료되면, 기지국의 스케줄러는 PF

나 TGS와 같은 스케줄링 함수를 이용하여 각각의 부채널에 할당될 이동 단말들을 결정하게 된다. 제안된 SRARA 시스템에서 각각의 단순 이동 릴레이는 기지국에 비하여 상대적으로 적은 송신 전력을 갖는 것으로 가정하였다. 이에 따라, 릴레이는 최대  $N_{SC}^{max}$  개의 제한된 부채널만을 사용할 수 있다고 가정하였다. 여기서  $N_{SC}^{max}$ 는 릴레이 노드에서 최대 전송 가능한 부채널 수로 정의된다. 그러므로 특정 릴레이에 스케줄링된 부채널의 수가  $N_{SC}^{max}$ 보다 많게 되면, 기지국의 스케줄러는 이 중에서 순간 데이터 전송률이 큰  $N_{SC}^{max}$ 개만 할당하고, 나머지는 할당을 할 수 없다. 본 논문에서는 이와 같이 릴레이의 최대 전송 가능한 부채널의 수가 제한되어, 할당이 불가능한 부채널에 대해서는 차 순위의 스케줄링 우선순위를 갖는 이동 단말을 위해 자원을 할당하는 것으로 가정하였다.

## IV. 모의실험

### 1. 모의실험 환경

본 논문에서는 IEEE 802.16 TDD-OFDMA 구조 중 2,028 FFT를 사용하는 밴드 AMC (Band AMC, Band Adaptive Modulation and Coding) 전송 구조를 가정하였다<sup>[7][13-16]</sup>. 3개 섹터에서 동일한 주파수 할당 (FA, Frequency Allocation)을 사용하는 1 km 반경을 가진 19개 셀의 다중 셀 환경을 가정하였으며, 트래픽 도착 모델은 최선형 모델 (Best-Effort)로 가정하였다. 경로 손실 (Path Loss) 모델은 [19]의 차량 이동 테스트 모델 (Vehicular Test Environment Model)을 사용하였다. 로그 노말 섀도잉 (Log-Normal Shadowing)의 표준 편차는 10 dB로 설정하였다. 단기 페이딩 (Small-Scale Fading)은 89.4 Hz (42 km/Hr)의 도플러 (Doppler) 주파수를 갖는 레일리 (Rayleigh) 페이딩으로 가정하였으며, TU (Typical Urban) 다중 경로 모델 [20]이 적용되었다. 기지국의 송신 전력은 20 W (43 dBm)으로 설정되었고, 릴레이 (이동 단말)의 송신 전력은 500 mW (27 dBm) 또는 1W (30 dBm)으로 설정하였다.  $N_{SC}^{max}$ 는 1개 또는 2개로 설정하였으며,  $N_R^{max}$ 는 1로 설정하였다. 열잡음 밀도 (Thermal Noise Density)는 -174 dBm/Hz로 가정되었다. 각 부채널의 C/I는 EESM (Exponential Effective SINR Mapping)<sup>[21]</sup> 방법을 사용하여 측정되었으며, 표 1은 모의실험에 사용된 변조와

표 1. 변조와 부호 구조 표 [21].

Table 1. Modulation and coding scheme (MCS) table [21].

MCS	C/I 경계값	EESM에 사용할 $\beta_{dB}$	bit/sec/Hz
QPSK, 1/12	-3.0 dB	0.4 dB	0.135
QPSK, 1/6	0.0 dB	0.4 dB	0.269
QPSK, 1/3	3.0 dB	0.4 dB	0.538
QPSK, 1/2	5.0 dB	1.1 dB	0.807
QPSK, 3/4	6.5 dB	2.3 dB	1.211
16-QAM, 1/2	11.0 dB	5.6 dB	1.613
16-QAM, 3/4	14.0 dB	8.1 dB	2.421
64-QAM, 1/2	16.0 dB	10.6 dB	2.421
64-QAM, 2/3	17.5 dB	13.6 dB	3.227
64-QAM, 3/4	19.0 dB	14.3 dB	3.63
64-QAM, 5/6	21.0 dB	15.4 dB	4.035

부호 구조 (MCS, Modulation and Coding Scheme) 및 EESM에 사용할  $\beta_{dB}$  값을 보여준다.

### 2. 서비스 커버리지 성능

최악-링크 적응 및 링크-당 적응 방식의 두 가지 단순 릴레이 협력 자원 관리 (SRARA) 구조가 PF 및 TGS 스케줄러와 연동되었을 때 서비스 커버리지의 개선에 대해서 모의실험을 수행하였다. 최악-링크 적응 방식은 SRARA-W로, 링크-당 적응 방식은 SRARA-P로 각각 표기하였으며, 사용자 수율 요구조건은 5 % 아웃티지 레벨에서의 64 kbps와 128 kbps로 설정하였다. 그림 1과 그림 2는 각각 릴레이의 전송 전력이 500 mW와 1 W로 설정되었을 때, 64 kbps 사용자 수율 요구조건에서의 서비스 커버리지를 보여준다. 그림에서 "1SC"는  $N_{SC}^{max}$ 이 1로 설정되어 릴레이가 모든 송신 전력을 1개의 부채널에만 할당하여 사용하는 구조이고, "2SC"는  $N_{SC}^{max}$ 이 2로 설정되어 릴레이가 송신 전력을 2개의 부채널을 사용해 전송할 수 있는 구조를 의미한다. 서비스 커버리지는 네트워크 내에서 특정 아웃티지 수준의 수율 요구조건을 만족시키는 사용자들의 영역으로 정의되는데, 예를 들어  $x$  %의 서비스 커버리지만, 네트워크 내에 있는 사용자들 중에서  $x$  %의 사용자들의 서비스 수율이, QoS 요구 조건을 특정 아웃티지 (본 논문에서는 5 % 아웃티지로 설정) 이하로 만족시키고 있음을 의미한다<sup>[7][22]</sup>. 그림에서 볼 수 있듯이, SRARA 구조들은 릴레이를 사용하지 않는 구조에 비해, 서비스 커버리지 향상을 보이고 있으며, SRARA-P 구조가 SRARA-W보다 약간 우수한 서비스 커버리지를 보였

다. [22]에 따라, 지연에 민감하지 않은 데이터 서비스에 적절한 평가 기준 중 하나인 95 % 서비스 커버리지를 기준으로 할 때, 릴레이를 사용하지 않은 PF와 TGS는 섹터 내에 약 11 명과 14 명의 서비스 커버리지를 제공하였다. PF 스케줄링된 SRARA 구조는 릴레이의 송신 전력이 500 mW일 때, 약 13 - 15 명의 커버리지를 제공하며, 1 W에 대해서는 약 15 - 17 명의 서비스 커버리지를 제공하였다. TGS 스케줄링된 SRARA 구조는 릴레이의 송신 전력이 500 mW일 때, 약 26 - 30 명의 서비스 커버리지를 보였고, 1 W에 대해서는 약 30 - 34 명의 커버리지를 보였다.

$N_{SC}^{max}$ 에 따라, 그림 1의 500 mW에서는 1개의 부채널에 릴레이의 모든 전력을 사용하는 SRARA 구조가 2개의 부채널로 전력을 나누어 전송하는 SRARA 구조보다 1 - 2 명 정도 큰 서비스 커버리지를 보였다. 그림 2의 1 W에서는 2개의 부채널로 나누어 전송하는 구조가 1 - 4 명 정도 큰 커버리지 결과를 보였다. 다시 말해, 릴레이의 송신 전력이 상대적으로 큰 1 W 환경에서는 전력을 2개의 부채널로 나누어 사용할 때, 더 큰 커버리지 향상을 얻을 수 있지만, 릴레이의 전력이 적은 500 mW 환경에서는 2개의 부채널로 나누어 사용할 때에, 최종 이동 단말에서 수신 신호의 세기가 너무 약하게 수신되어 릴레이를 사용하는 이득이 적게 나타남을 알 수 있었다. 그러므로 릴레이의 송신 전력이 부족한 환경에서는 한 개의 부채널로 모든 전력을 할당하는 구조가 조금 더 많은 커버리지 이득을 얻는다고 할 수 있다.

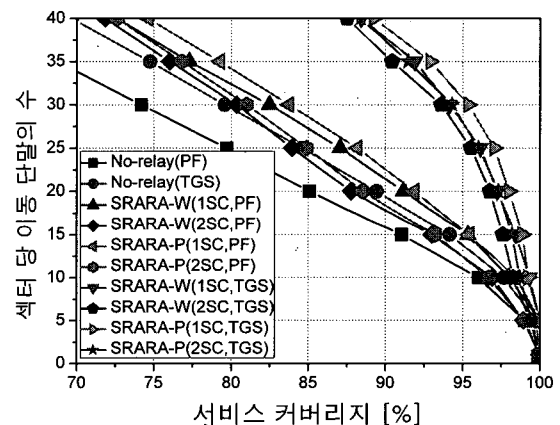


그림 1. 릴레이의 전송 전력이 500 mW (27 dBm)으로 설정되었을 때, 64 kbps 사용자 수율 요구조건에서의 서비스 커버리지.

Fig. 1. Service coverage at 64 kbps throughput requirement level when total RS transmit power is set to 500 mW (27 dBm).

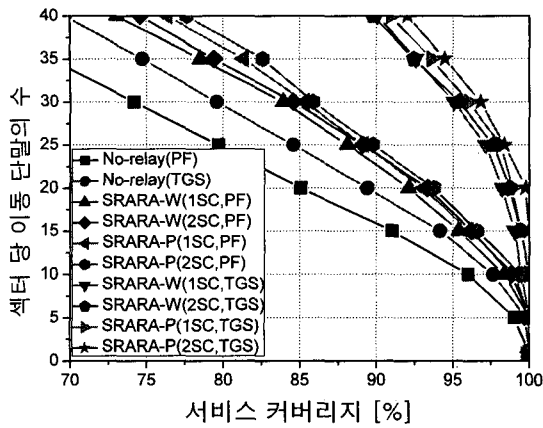


그림 2. 릴레이의 전송 전력이 1 W (30 dBm)으로 설정 되었을 때, 64 kbps 사용자 수율 요구조건에서의 서비스 커버리지.  
Fig. 2. Service coverage at 64 kbps throughput requirement level when total RS transmit power is set to 1 W (30 dBm).

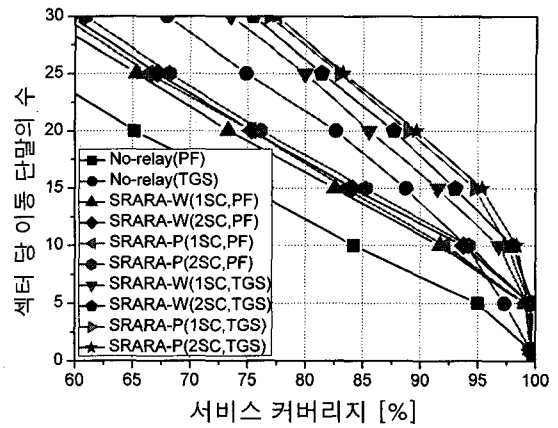


그림 4. 릴레이의 전송 전력이 1 W (30 dBm)으로 설정 되었을 때, 128 kbps 사용자 수율 요구조건에서의 서비스 커버리지.  
Fig. 4. Service coverage at 128 kbps throughput requirement level when total RS transmit power is set to 1 W (30 dBm).

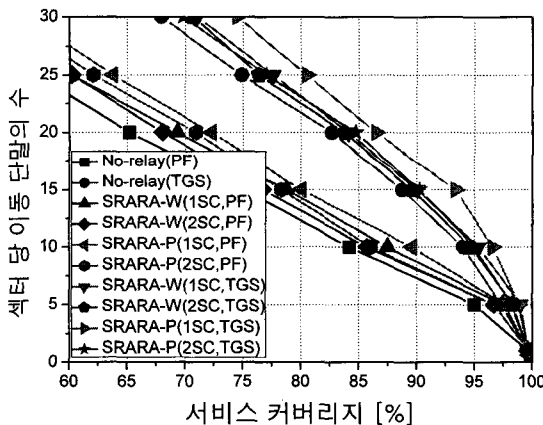


그림 3. 릴레이의 전송 전력이 500 mW (27 dBm)으로 설정되었을 때, 128 kbps 사용자 수율 요구조건에서의 서비스 커버리지.  
Fig. 3. Service coverage at 128 kbps throughput requirement level when total RS transmit power is set to 500 mW (27 dBm).

그림 3과 그림 4는 각각 릴레이의 전송 전력이 500 mW와 1 W로 설정되었을 때, 128 kbps 사용자 수율 요구 조건에서의 서비스 커버리지를 보여준다. 그림 1 과 그림 2의 64 kbps 요구 조건에서는, 릴레이 (SRARA)에 의한 커버리지 이득이, 스케줄러 설계 (TGS)에 의한 커버리지 이득보다 더 많게 나타났다. 다시 말해, 릴레이를 사용하지 않은 TGS 구조에 비해, PF 스케줄링된 SRARA 구조가 더 큰 서비스 커버리지를 제공하였다. 그러나 그림 3과 그림 4의 128

kbps 요구 조건에서는 스케줄러 설계 (TGS)에 의한 이득이 릴레이 (SRARA)보다 크게 나타났다. 다시 말해, 릴레이를 사용하지 않은 TGS가 PF 스케줄링된 SRARA 보다 약 94 % 이하의 모든 서비스 커버리지 구간에서 큰 커버리지를 제공하였다. 이와 같은 결과는, 사용자 수율 요구 조건이 낮은 64 kbps에서는 단순 릴레이에 의한 셀 외곽 사용자들의 C/I 개선이 직접적으로 서비스 커버리지 증대에 많은 영향을 주지만, 128 kbps 정도로 수율 요구조건이 상대적으로 높은 환경에서는 송신 전력이나 사용할 수 있는 부채널의 수가 극히 제한된 단순 릴레이에 의한 커버리지 향상, 스케줄러에 의한 효과보다 상대적으로 적게 나타나는 결과이다. TGS 스케줄러는 릴레이를 사용하지 않을 때에 비해, SRARA 구조에서 약 1.2 - 2.2 배의 커버리지 향상 효과를 보였으며, 릴레이의 송신 전력을 높게 설정할수록 릴레이에 의한 커버리지 향상 이득이 많다는 것을 볼 수 있다.

### 3. 유효 섹터 수율 성능

표 2와 표 3은 각각 릴레이의 전송 전력이 500 mW 와 1 W로 설정되었을 때, 95 % 서비스 커버리지에서의 릴레이를 사용하지 않은 경우에 대비해서 SRARA 구조의 유효 섹터 수율의 이득을 보여 준다. 유효 섹터 수율 (Effective Sector Throughput)은 서비스 커버리지 내에서 특정 아웃티지 레벨의 수율 요구조건을 만족시키는 사용자들만의 수율의 합으로 정의된다<sup>[7]</sup>. PF 스케

표 2. 릴레이의 전송 전력이 500 mW (27 dBm)으로 설정되었을 때, 95 % 서비스 커버리지에서의 릴레이를 사용하지 않은 구조에 대한 SRARA 구조의 유효 섹터 수율 이득.

Table 2. Effective sector throughput gain of different SRARA schemes over no-relay scheme at 95 % service coverage when the transmit power of RS is set to 500 mW (27 dBm).

수율 요구 조건과 스케줄링 방법		$N_{SC}^{max} = 1$		$N_{SC}^{max} = 2$	
		SRARA-	SRARA-	SRARA-	SRARA-
		W	P	W	P
64 kbps	PF	1.10	1.11	1.03	1.03
	TGS	0.77	0.80	0.71	0.73
128 kbps	PF	1.18	1.18	1.05	1.06
	TGS	0.92	0.98	0.85	0.92

표 3. 릴레이의 전송 전력이 1 W (30 dBm)으로 설정되었을 때, 95 % 서비스 커버리지에서의 릴레이를 사용하지 않은 구조에 대한 SRARA 구조의 유효 섹터 수율 이득.

Table 3. Effective sector throughput gain of different SRARA schemes over no-relay scheme at 95 % service coverage when the transmit power of RS is set to 1 mW (30 dBm).

수율 요구 조건과 스케줄링 방법		$N_{SC}^{max} = 1$		$N_{SC}^{max} = 2$	
		SRARA-	SRARA-	SRARA-	SRARA-
		W	P	W	P
64 kbps	PF	1.11	1.11	1.12	1.14
	TGS	0.83	0.85	0.72	0.76
128 kbps	PF	1.09	1.11	1.01	1.01
	TGS	0.92	0.92	0.80	0.81

표 4. 95 % 서비스 커버리지에서의 PF 스케줄링된 구조에 대한 TGS 스케줄링된 구조의 유효 섹터 수율 이득.

Table 4. Effective sector throughput gain of TGS scheduled schemes over PF scheduled schemes at 95 % service coverage.

릴레이 송신 전력과 수율 요구 조건	No relay	$N_{SC}^{max} = 1$		$N_{SC}^{max} = 2$		
		SRARA	SRARA	SRARA	SRARA	
		-W	-P	-W	-P	
500 mW	64 kbps	0.87	0.61	0.63	0.60	0.62
	128 kbps	0.90	0.71	0.75	0.73	0.78
1 W	64 kbps	0.87	0.65	0.67	0.56	0.58
	128 kbps	0.90	0.76	0.75	0.71	0.72

스케줄러가 적용되었을 때에는, SRARA 구조는 릴레이가 없는 구조에 비하여, 릴레이 전송 전력이 500 mW일 때

는 약 3 - 18 %의 유효 섹터 수율 향상을 보였으며, 1 W 환경에서는 약 1 - 14 %의 유효 섹터 수율 증가를 보였다. 그러나 TGS 스케줄러가 적용되었을 때에는, SRARA 구조는 릴레이가 없는 구조에 비하여, 약 2 - 29 %의 유효 섹터 수율 감소를 보였다. 이와 같은 결과는, 릴레이가 적용되었을 때 셀 외곽 또는 커버리지 홀의 사용자들의 C/I 분포가 릴레이가 없을 때보다 전반적으로 향상되었으나, TGS 스케줄러가 셀 외곽의 상대적으로 C/I가 안 좋은 사용자들에게 더 많은 자원을 할당하기 때문에, 서비스 커버리지 측면에서는 약 1.2 - 2.2 배 정도의 이득을 얻지만, 섹터 수율 측면에서는 2 - 29 % 정도의 감소를 보인 결과이다. 다시 말해, 더 많은 사용자에게 QoS 요구 조건의 수율을 제공할 수 있는 환경에서, PF 스케줄러는 일부 단말에게 필요 이상의 자원을 제공함으로써 유효 섹터 수율은 높게 얻었으나, 많은 사용자에게 QoS를 제공하지 못하고, 수율을 낭비했다고 볼 수 있다.

표 4는 95 % 서비스 커버리지에서의 PF 스케줄링에 대비해서 TGS 스케줄러의 유효 섹터 수율 이득을 보여 준다. 릴레이가 없는 구조에서, TGS는 PF에 비해, 64 kbps 요구조건에서는 13 %의 유효 섹터 수율 감소를 보이고, 128 kbps에서는 10 %의 유효 섹터 수율 손실을 보인다. 그러나 SRARA 구조에서는, TGS는 PF에 비해, 64 kbps 요구조건에서는 약 56 - 67 %의 유효 섹터 수율 감소를 보이고, 128 kbps에서는 약 71 - 78 %의 유효 섹터 수율 감소를 보였다. 결과적으로 SRARA 구조에서, TGS 스케줄러는 PF 스케줄러에 비해 상대적으로 더 많은 유효 섹터 수율 감소를 통해 약 1.2 - 2.2 배의 커버리지 증가를 얻었다고 볼 수 있다.

### V. 결 론

본 논문은 IEEE 802.16 기반의 TDD-OFDMA 하향 링크에서의 단순 릴레이 협력 자원 관리 (SRARA, Simple-Relay Aided Resource Allocation) 구조와 채널 스케줄러가 연동되었을 때의 서비스 커버리지 및 유효 섹터 수율 성능을 모의실험을 통하여 분석하였다. 본 논문에서 가정한 단순 이동 릴레이는 송신 전력 및 사용할 수 있는 부채널의 개수가 제한되어 있으며, 모든 자원 관리 기능은 기지국의 스케줄러가 결정한다. SRARA 구조에서 이동 단말들은 세션 접속 시에 직접 모드 또는 릴레이 협력 모드 중 하나의 상태로 결정되며, 이 결과에 따라 각 단말의 MMR 디버시티 셋을 관



리하게 된다. 매 스케줄링 시간마다, 릴레이 협력 모드의 단말은 모든 부채널에 대하여, 지원 가능한 순간 데이터 전송률 및 릴레이 링크 사용 여부와 릴레이에 대한 정보를 계산하게 되는데, 이를 기반으로 기지국에서 PF 또는 TGS와 같은 스케줄링 함수를 사용하여 부채널들을 단말에게 할당하게 되며, 제안된 구조에서는 제한된 전력 때문에 릴레이가 사용할 수 있는 부채널의 수가 1개 또는 2개로 제한되었다. 모의실험에서 릴레이의 송신 전력은 500 mW 또는 1 W로 설정되었는데, 상대적으로 낮은 송신전력인 500 mW에서는, 1개의 부채널로 모든 전력을 다 사용하는 릴레이가, 2개의 부채널로 전력을 나누어 사용하는 릴레이보다 커버리지 성능 향상이 우수하였지만, 1 W 경우에는 2개의 부채널을 사용하는 릴레이가 더 많은 커버리지를 제공하였다. 또한, 사용자의 수를 요구조건에 따라, 상대적으로 낮은 QoS 요구조건인 64 kbps에서는 릴레이에 의한 커버리지 향상이 스케줄러 설계에 의한 커버리지 향상보다 많았지만, 128kbps 요구조건에서는 제한된 자원만을 활용하는 단순 릴레이에 의한 커버리지 향상이 TGS 스케줄러의 역할보다 상대적으로 작았다. 유효 섹터 수를 측면에서, PF 스케줄러는 릴레이 구조를 적용했을 때가 릴레이를 사용하지 않는 구조에 비해, 1 - 18 % 정도의 섹터 수를 증대를 보였다. 그러나 상대적으로 더 많은 자원을 채널 상태가 안 좋은 사용자에게 할당하는 TGS 스케줄러는 릴레이를 사용할 때, 2 - 29 % 정도의 유효 섹터 수를 감소를 통해, 1.2 - 2.2 배 정도 증가된 서비스 커버리지를 제공하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. Shakkottai, and T. S. Rappaport, "Cross-Layer Design for Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 41, Oct. 2003, pp. 74-80.
- [2] B. Classon, P. Sartori, V. Nangia, and K. Baum, "Multi-dimensional Adaptation and Multi-user Scheduling Techniques for Wireless OFDM Systems," *IEEE International Conference on Communications (ICC2003)*, 2003.
- [3] W. Anchun, X. Liang, Z. Shidong, X. Xibin, and Y. Yan, "Dynamic Resource Management in the Forth Generation Wireless Systems," *International Conference on Communication Technology (ICCT2003)*, 2003.
- [4] L. Xiao, A. Wang, S. Zhou, and Y. Yao, "A Dynamic Resource Scheduling Algorithm for OFDM System," *The 9th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2003)*, 2003.
- [5] S. Das, and H. Viswanathan, "Dynamic Power and Sub-carrier Assignment in a Multi-user OFDM System," *IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC 2004)*.
- [6] K. Kim, H. Kim, and Y. Han, "Subcarrier and Power Allocation in OFDMA Systems," *IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC 2004)*.
- [7] Young Min Ki, and Dong Ku Kim, "Packet Scheduling Algorithms for Throughput Fairness and Coverage Enhancement in TDD-OFDMA Downlink Network," *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E88-B, No.11, pp.4402-4405, Nov. 2005.
- [8] <http://www.ieee802.org/16/relay/>
- [9] IEEE C802.16j-06/004r1, Recommendations on IEEE 802.16j, May 2006.
- [10] IEEE C802.16j-06/041, Harmonized Definitions and Terminology for Mobile Multihop Relay, May 2006.
- [11] M. Hu, and J. Zhang, "Opportunistic multi-access: multiuser diversity, relay-aided opportunistic scheduling, and traffic-aided smooth admission control," *Mobile Networks and Applications*, Vol.9, pp.435-444, Aug. 2004.
- [12] Y. Lee, S. Park, S. Yun, Y. Kim, and K. Kim, "Radio Resource Management for Relay-based Cellular Systems with Sectorization," *Wireless World Research Forum (WWRF) 14 Meeting*, July 2005, San Diego, California.
- [13] <http://www.ieee802.org/16/>
- [14] <http://www.ieee802.org/16/tge/>
- [15] Mobile WiMAX - Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, WiMax Forum, Feb. 2006.
- [16] Mobile WiMAX - Part II: A Comparative Analysis, WiMax Forum, Feb. 2006.
- [17] A. Jalali, R. Padovani, and P. Pankaj, "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System," *The 51th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2000-Spring*.
- [18] P. Ameigeiras, J. Wigard, and P. Mogensen, "Performance of Packet Scheduling Methods with Different Degree of Fairness in HSDPA," *IEEE 60th Vehicular Technology Conference, VTC 2004-Fall*.
- [19] Recommendation ITU-R M.1225, Guideline for

Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, 1997.

- [20] IEEE C802.20-03/79, Channel Models for IEEE 802.20 MBWA System Simulations - Rev 02, Sep. 2003.
- [21] IEEE C802.16e-05/141r3, CINR measurements using the EESM method, April 2005.
- [22] G. Senarath, S. Periyalwar, M. Smith, and R. Matyas, "Coverage Evaluation Methodology for Next Generation Wireless Systems," Wireless World Research Forum (WWRF) 12 Meeting, Nov. 2004. Toronto, Canada.

---

저 자 소 개

---



기 영 민(정회원)  
2000년 연세대학교  
기계전자공학부 공학사.  
2002년 연세대학교  
전기전자공학과 공학석사.  
2002년~현재 연세대학교  
전기전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 무선 자원 관리, 채널 스케줄러, WiBro 휴대인터넷 시스템, cdma2000 1xEV-DO, 802.15.4a WPAN, UWB 위치 추적 기술>



변 대 옥(정회원)  
2004년 경희대학교  
전자정보학부 공학사.  
2006년 연세대학교  
전기전자공학과 공학석사.  
2006년~현재 연세대학교  
전기전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 3G, 4G 무선 패킷 스케줄링, WiBro 휴대인터넷 시스템, 802.16e, 802.16j>



김 동 구(정회원)  
1983년 한국항공대학교  
통신공학과 공학사.  
1985년 U.S.C. Dept. of  
Electrical Eng. 공학석사.  
1992년 U.S.C. Dept. of  
Electrical Eng. 공학박사.

1999년~2006년 연세대학교 전기전자공학과  
부교수.

2006년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.  
<주관심분야 : 다중접속 기술, 스케줄링/MAC 기술, 순방향링크 빔성형 기술 및 MIMO 기술, UWB, Binary CDMA>



손 행 선(정회원)  
2000년 한양대학교  
전자전자통신전파공학과 공학사.  
2002년 포항공과대학교  
전자전기공학과 공학석사.  
2002년-2005년 국방과학연구소  
기술연구본부 레이다팀.

2006년~현재 전자부품연구원(Korea Electronics Technology Institute) SoC센터 전임  
연구원.

<주관심분야 : UWB 통신, 레이다 시스템 설계, VLSI 및 SoC 설계>