

OFDM 이동 셀룰러 시스템에서 셀간간섭 회피 및 제거의 결합 성능 분석

정회원 권재균*, 이희수**, 안재영**

Performance of Unified Inter-Cell Interference Avoidance and Cancellation in OFDM Mobile Cellular Systems

Jae Kyun Kwon*, Heesoo Lee**, Jae Young Ahn** *Regular Members*

요약

본 논문에서는 OFDM 기반 이동 셀룰러 시스템에서 셀간간섭 관리를 위해 간섭 회피 및 제거를 동시에 이용하는 방법을 설명하고, 그 성능을 모의실험을 통해 분석한다. 셀 안쪽 단말과 두 셀 경계 단말에 대해서는 간섭 회피를 이용하고, 세 셀 경계 단말에 대해서는 간섭 제거를 이용하게 된다. 모의실험은 간략화된 시스템 시뮬레이션으로 수행되며, 이를 위해 링크 시뮬레이션 결과가 이용된다. 비교 대상은 간섭 관리를 하지 않은 방식, 간섭 회피만을 적용한 방식, 간섭 회피와 제거를 적용한 방식의 세 가지이며, 주된 비교 수단은 하위 5% 사용자 데이터율과 평균 데이터율이고, 보조적으로 하위 5% 사용자 신호대간섭잡음비를 이용한다. 비교 결과, 간섭 관리 기법을 적용하면 셀 경계 성능이 대폭 개선되며, 대신 평균 데이터율은 소폭 저하된다. 그리고 간섭 회피와 제거를 동시에 이용하면 간섭 회피만 이용한 경우보다 셀 경계 및 평균 데이터율 측면에서 모두 우수해진다.

Key Words : OFDM, Inter-Cell Interference, Interference Avoidance, Interference Cancellation, Cell Edge Throughput

ABSTRACT

In this paper, we explain the unified inter-cell interference avoidance and cancellation in OFDM mobile cellular systems. Interference avoidance is used for cell-interior or two-cell-edge users, and interference cancellation is applied to three-cell-edge users. The performance of the unified scheme is evaluated by simplified system simulation. Link simulation results are used in the interpretation of system simulation output. We compare three schemes which are "no interference management," "only interference avoidance," "both avoidance and cancellation." Primary performance measures are the data rate of the 5th percentile user and the mean data rate. Simulation results show that interference management schemes greatly improve the cell edge performance, but slightly reduce the mean data rate. Use of both avoidance and cancelation is better than that of only avoidance in terms of the cell edge throughput and the mean data rate.

1. 서론

과거 셀룰러 이동통신 시스템의 주류가 FDMA/

TDMA에서 CDMA로 진화하면서 셀간간섭에 대한 대처는 주파수 재사용 효율이 낮은 간섭 회피 (avoidance)에서 주파수 재사용 효율이 비교적 높은

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(IITA-2008-C1090-0801-0013)과 IT신성장동력핵심기술개발사업[2006-S-001-02, 4세대 이동통신을 위한 적응 무선접속 및 전송기술]의 연구결과로 수행되었음.

* 영남대학교 전자정보공학부(jack@yumail.ac.kr)

** 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부분 이동통신연구본부(heelee@etri.re.kr, jyahn@etri.re.kr)

논문접수 : KICS2008-02-107, 접수일자 : 2008년 2월 28일, 최종논문접수일자 : 2008년 4월 15일

간섭 평균화(averaging)로 변화하였다. 동일한 클래스의 서비스인 음성 서비스의 회선 수를 늘리는 것이 목표인 환경에서는 이와 같이 주파수 재사용 효율만을 높이는 것으로 충분히 시스템 성능을 향상시킬 수 있었다. 최근 셀룰러 이동통신 시스템이 CDMA에서 OFDM으로 다시 진화함과 동시에 서비스 종류가 음성 외에 데이터를 포함하게 됨에 따라 단순히 주파수 재사용 효율을 높이는 것뿐만 아니라 전체 셀 용량(throughput), 셀 경계 용량 등의 값이 중요하게 되었다. OFDM 시스템은 CDMA처럼 심볼 확산이나 도약을 이용한 간섭 평균화를 통해 셀간간섭에 대처할 수도 있으나 더 높은 수준의 용량을 얻기 위해서는 잘 고안된 간섭 회피 기술을 이용해야 한다.

간섭 회피의 시초는 예전 FDMA/TDMA 시스템에서 이용한 배타적인 주파수 재사용으로서 주파수 재사용 효율이 1/3, 1/4, 1/7, 1/12 등으로 매우 낮으며 많은 경우에 신호대간섭비가 필요 이상으로 높게 결정된다. 여기에서 조금 발전한 방향이 단말이 셀의 중심에 있는지 바깥쪽에 있는지를 이용하는 방법이다. 이러한 기술의 부류로서 첫 번째^[1]는 셀 안쪽은 주파수 재사용 계수 1로 모든 셀에서 같은 자원을 이용하고, 셀 바깥쪽은 주파수 재사용 계수 3으로 예전 간섭 회피 방식과 마찬가지로 각 셀이 1/3의 자원만을 이용하는 것이다. 두 번째^[2] 방식은 주파수 재사용 계수가 3인 예전 간섭 회피 방식에서, 원래 할당되어 자유롭게 사용할 수 있는 자원은 마음대로 쓰고, 사용이 금지되었던 자원을 제한된 송신 전력으로 이용하는 것이다. 금지된 자원을 이용하게 하였다라는 측면에서 첫 번째 방식보다 우월한 점이 있다고 볼 수 있다. 이와 같은 방법들을 통해 주파수 재사용 효율을 높일 수 있고 용량(throughput)도 일부 향상시킬 수 있다. 위 방법들은 하향링크, 상향링크에 관계 없이 이용될 수 있는 것들이다. 위와 같이 단말이 중심 기지국에서 먼지 가까운지를 이용하는 방식에서 더 발전된 방식이 단말과 인접 셀들의 간섭 관계를 이용하는 방식이다. 이 방식은 본 논문에서 이용되므로 설명은 II장에서 하기로 한다.

위와 같은 간섭 회피는 논리적인 자원 할당 및 스케줄링 수준에서 셀간간섭에 대처하는 것이고 이와 별도로 신호 처리 수준에서 간섭 제거를 통해 셀간간섭에 대처할 수 있다. 간섭 회피와 제거는 보통 각각 가정되어 성능이 분석되어 왔으나, 본 논문에서는 둘을 결합하여 단말의 통신 조건에 따라 선

택적으로 셀간간섭 관리 기법을 적용함으로써 전체 성능의 향상을 이룩한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 결합된 셀간간섭 회피 및 제거 기법을 설명한다. III장에서는 모의실험을 통해 결합 기법의 성능을 검증하고, 그에 따른 결론을 IV장에서 맺는다.

II. 셀간간섭 회피 및 제거의 결합 기법

본 논문에서는 하향링크 환경에서 셀간간섭 회피 기법과 제거 기법을 모두 이용하여, 단말 환경에 따라 선택적으로 적용하여 성능 향상을 얻는다. 먼저 본 논문에서 이용한 셀간간섭 회피 기법에 대해 설명한다. 하향링크에서 단말은 중심 기지국에서 원하는 신호를 받고, 인접 셀 기지국들에서 원하지 않는 간섭 신호를 받는다. 따라서 신호대간섭비를 향상시키기 위해서는 원하는 신호를 크게 받는 것도 중요하지만 원하지 않는 간섭 신호를 작게 받는 것 또한 중요하다. 그런데 간섭 신호에는 다수 개의 인접 셀 기지국이 관여하고, 그 중에서 특히 큰 영향을 주는 간섭량이 존재하게 된다. 이 간섭량을 줄이면 신호대간섭비가 대폭 향상될 수 있다. 이런 맥락에서 간섭 신호가 가장 크게 오는 인접 기지국의 송신 전력을 줄이면 해당 단말의 신호대간섭비가 매우 좋아진다.

단말 입장에서는 서비스 받는 중심 기지국을 제외하고 채널 상황 상으로 가장 가까운 인접 기지국에게 송신 전력을 줄이라고 하면 문제가 해결된다. 하지만 이러한 방법보다는 미리 각 기지국이 송신 전력을 줄이는 주파수 또는 시간 자원을 정해두고 각 단말이 적절한 곳에 자원 할당되어 서비스를 받으면 된다. 그림을 이용한 자세한 설명은 II장 마지막 부분에서 그림 1을 이용해서 하기로 한다. 여기서 각 기지국별로 송신 전력을 줄이는 자원은 미리 정해두고 고정시킬 수도 있고, 가끔씩 기지국간 시그널링을 통해 변경할 수도 있다. 본 논문에서는 고정 육각형 셀 모델을 이용하므로, 전자인 고정 자원 방식을 가정한다. 이러한 방식에 대한 자세한 정보는 여러 문헌^[3-7]을 참조하여 얻을 수 있다.

다음으로 셀간간섭 제거 기법에 대해 살펴본다. 여기서 사용한 셀간간섭 제거 기법은 조정된 심볼 반복(coordinated symbol repetition)을 통한 간섭 제거^[8,9]이다. 이 방법은 열악한 셀 경계 단말의 경우에 이용되는 것으로, 심볼 하나를 하나의 부캐리어(subcarrier)로 보내지 않고 두 개 이상의 인접한

부캐리어로 복사하여 보낸다. 설명을 위한 예로서 양쪽 기지국에서 하향링크로 두 개의 부캐리어를 통해 각각의 심볼이 단말에 도착하여 더해졌다고 한다면, 단순하게는 양측 심볼을 분리할 더 특별한 방법이 없다. 그러나 심볼을 두 개의 부캐리어로 단순히 복사하지 않고 기지국마다 다른 직교 부호를 씌워서 복사하게 되면, 단말에서 직교 특성에 의해 양측 심볼을 완전하게 분리해낼 수 있게 된다. 실제 본 논문의 환경에서는 세 개의 기지국 심볼이 섞여 들어오게 되고, 위와 같은 직교 부호에 의한 제거 후에 남은 간섭은 다중 안테나에 의한 간섭 역제가 동작하게 되며, 반복 수신기(iterative receiver) 기법도 이용한다.

위에서 서술한 셀간간섭 회피 및 제거 기법을 그림 1을 이용하여 다시 설명한다. 그림 1은 단말의 위치에 따라 셀간간섭 회피가 동작하거나 제거가 동작하는 것을 설명하기 위한 것이다. 그림1은 육각형 오피니 셀 7개가 배치된 것으로, 같은 숫자에 위치하는 단말이 동시에 통신을 수행하게 된다. 그리고 W로 표시된 곳은 기지국 송신 전력이 작아짐을 의미한다. 예를 들어 W1, S1에 대해 살펴보면, 중심 기지국 송신 전력이 작아지므로 인접 셀 단말 입장에서는 중심 셀에서 오는 간섭이 작아진다. 이 영향을 가장 크게 받는 단말들이 S1에 위치한 단말들이므로, 중심 기지국 송신 전력이 작아질 때 S1에 위치한 단말들이 통신을 수행하는 게 좋다. W1에 위치한 단말을 살펴보면 기지국 송신 전력이 작아져서 상황이 나빠지는 측면이 있지만 그래도 기지국에 가까운 단말이므로 어느 정도 통신에 문제가 없을 것임을 예측할 수 있다. 그림1은 자원 숫자가 1~3까지 나와 있어서 자원 할당 패턴이 3이라고 볼 수 있고, 따라서 전체 통신 자원을 3개로 나누어 스케줄링을 해야 한다. 이와 달리 자원 할당

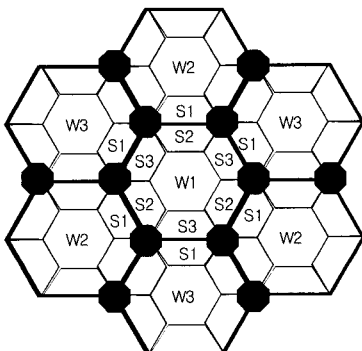


그림 1. 셀간간섭 관리 설명을 위한 개념도

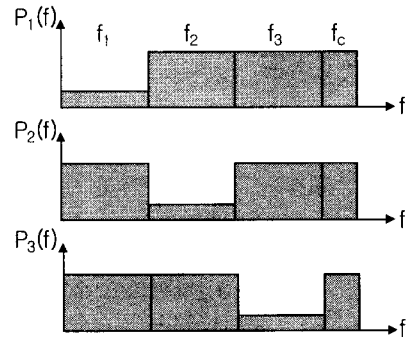


그림 2. 자원 별 기지국 전송 전력

패턴을 7, 4 등의 다른 숫자를 이용할 수도 있다. 그림 1에서는 이해를 돕기 위해 기하학적인 위치를 이용하여 설명했지만 실제 환경에서는 전파 음영(shadowing)에 의해 그림 1과 같이 나뉘지는 않는다. 이상의 설명이 본 논문에서 이용하는 간섭 회피의 내용인데, 그림 1의 진하게 표시된 부분, 즉 세 셀의 경계 부분에서는 성능이 떨어지는 측면이 생길 수 있다. 위의 간섭 회피는 간섭이 가장 큰 인접 기지국을 회피하는 개념인데, 세 셀의 경계에서는 간섭이 큰 인접 기지국이 2개 이상이 된다. 2개 이상 모두 간섭 회피를 할 수도 있겠지만 자원 분할이 복잡해지므로 본 논문에서는 세 셀 경계에 대해 간섭 제거를 이용하기로 한다.

이와 같이 간섭 회피와 간섭 제거를 동시에 이용하게 될 경우, 전체 통신 자원은 간섭 회피를 위한 3개의 자원과 간섭 제거를 위한 1개의 자원, 총 4개의 자원으로 나뉘게 된다. 그림 2는 주파수를 기준으로 4개의 자원으로 나누었을 때의 기지국 전송 전력을 나타낸다. f_1, f_2, f_3 는 그림1에서 1~3번에 해당하는 자원이고, f_c 는 간섭 제거를 위한 자원이다. $P_i(f)$ 는 W_i 를 가진 기지국의 자원별 전송 전력이다. 여기서 간섭 제거의 경우에는 기지국 전송 전력을 일부러 줄이지 않는다. 하향링크 전력 할당(power allocation)에서는 MCS 및 H-ARQ를 고려하여 필요 없는 전력을 줄여서 전송률이 일반적이거나, 본 논문에서는 단순하게 방식의 성능 비교를 위해 기지국 최대 전송 전력으로 전송함을 기본으로 한다.

III. 모의실험 결과

간략한 시스템 시뮬레이션을 통해 셀간간섭 관리 기법의 성능을 검증하였다. 성능 비교를 위해 가정한 시나리오 세 가지이다. 첫 번째는 어떤 간섭

관리 기법도 적용하지 않고 모든 기지국이 최대 전송 전력으로 전송하며 단말을 무작위로 발생시켜서 얻는 결과로, 결과 그래프에서 “Equal Power”로 표시했다. 두 번째는 2장의 간섭 회피 기법만을 적용한 것으로 “Whispering”으로 표시했다. 세 번째는 2장의 간섭 회피와 제거를 동시에 적용한 것으로 “UIIM (Unified Inter-Cell Interference Mitigation)”으로 표시했다. 세 가지가 순서대로 성능이 좋아질 것으로 예상할 수도 있지만, 간섭 회피의 경우에는 셀 안쪽 단말에 불이익을 주는 것이고, 간섭 제거의 경우에는 주파수 자원을 두 배 이상 점유하게 되므로 반드시 성능이 좋아진다고는 단언할 수 없으며, 모의실험을 통해 성능이 향상되는지와 어느 정도 향상되는지를 살펴볼 필요가 있다.

먼저 “Equal Power” 경우와 “Whispering” 경우에 대해 시스템 시뮬레이션 결과로 신호대간섭잡음비(SINR)를 비교했다. 이는 간섭 회피에 의한 이득을 보는 것으로, 누적확률분포함수(cdf) 결과가 그림 3에 나타나 있다. 시뮬레이션 환경에서 거리 감쇠, 전파 음영(shadowing)은 고려하고, 빠른 페이딩은 고려하지 않았으며, 단말은 균일하게 무작위로 발생시켰다. 거리 감쇠는 Suburban Macro 환경 변수^[10]를 이용했다. 그림 3에서 하위 5% 사용자의 신호대간섭잡음비(5th percentile SINR)는 세로축 5×10^{-2} 에서 읽으면 “Equal Power”의 경우에 -2.5dB, “Whispering”의 경우에 0.7dB로, 간섭 회피에 의해 3.2dB가 향상된다. 즉, 간섭 회피는 셀 경계 단말 성능을 향상시켜 열악한 환경의 단말을 대폭 감소시킨다. 다만 오른쪽으로 가면 그래프가 역전되는 것이, 간섭 회피에 의해 신호대간섭잡음비가 매우 우수한 단말의 비율이 감소됨을 알 수 있다. 이는 신호대간섭잡음비가 매우 우수한 기지국 주변 단말에 불이익을 주었기 때문이다.

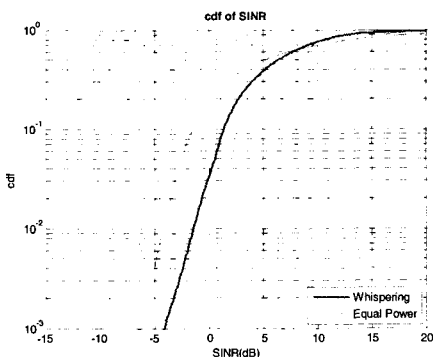


그림 3. 신호대간섭잡음비로 본 간섭 회피에 의한 이득

신호대간섭잡음비가 아니라 데이터율을 비교하기 위해서는 신호대간섭잡음비를 그에 맞는 데이터율 또는 MCS로 매핑하기 위한 링크 시뮬레이션 결과가 필요하다. 그리고 간섭 제거 방식과 나머지 방식은 동일한 신호대간섭잡음비로부터 다른 데이터율이 나오므로 신호대간섭잡음비를 구하는 것만으로는 성능 비교가 거의 어렵다. 그래서 링크 시뮬레이션 결과를 이용하여 세 방식의 성능을 비교하였다. 링크 시뮬레이션도 간섭 제거가 없는 경우와 있는 경우에 대해 참조할 결과가 달라진다. 먼저 간섭 제거가 없는 경우에는 기존에 하듯이 비교적 간단하게, 구해진 신호대간섭잡음비로부터 그보다 요구 신호대간섭잡음비가 바로 아래인 MCS가 선택되었다고 보된다. 이용한 데이터는 수치가 많아서 자세히 적지는 않는데, 64QAM의 부호율 3/4으로부터 QPSK의 부호율 1/3, 반복 6회 (사실상 부호율 1/18)까지 15단계의 MCS 레벨을 이용했고, MIMO 2x2 및 4x4 환경을 가정했다.

다음으로 간섭 제거가 있는 경우의 링크 시뮬레이션 결과 참조는 조금 복잡해진다. 신호대간섭잡음비에서 간섭은 제거가 되고 잡음은 제거가 되지 않으므로 간섭값과 잡음값을 다르게 보아야 한다. 그런데 간섭값 중에서도 일부는 조정된 심볼 반복(coordinated symbol repetition)에 의해 거의 완전히 제거되고, 일부는 다중 안테나 간섭 억제에 의해 불완전하게 제거되므로 링크 시뮬레이션 시 이를 생각해야 한다. 결국 시스템 시뮬레이션에서 신호대간섭잡음비 한 값만을 이용하는 것이 아니라 신호, 간섭, 잡음값을 따로 이용하게 되고, 복잡한 링크 시뮬레이션 결과 테이블로부터 적당한 MCS를 선택해야 한다. 이러한 링크 시뮬레이션 결과는 간단하게 보더라도 신호대잡음비(SNR)와 신호대간섭비(SIR)의 2차원 입력으로부터 MCS가 정해지는 형태이다. 여기에 자세한 데이터 수치는 적지 않으나, 간섭 제거는 셀 경계 단말의 경우에 적용되므로 낮은 MCS가 이용된다고 보아 QPSK의 부호율 1/2부터 QPSK의 부호율 1/3, 반복 6회까지 7단계의 MCS 레벨을 이용하였다.

위와 같은 링크 시뮬레이션 결과를 이용하여 세 가지 방식의 데이터율을 정리한 것이 누적확률분포함수의 형태로 그림 4에 나타나 있다. MCS는 불연속적이므로 그림 4의 그래프도 불연속적이다. 20MHz 대역폭, 2x2 MIMO 환경에서, 먼저 하위 5% 사용자의 데이터율을 보면 “Equal Power”의 경우에 2.79Mbps, “Whispering”의 경우에 5.57Mbps, “UIIM”의 경우

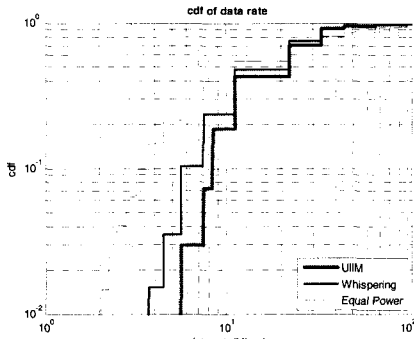


그림 4. 데이터율로 본 간섭 회피, 제거에 의한 이득

에 7.42Mbps로, 간섭 회피만 한 경우에 100% 향상, 간섭 회피 및 제거를 한 경우에 166%의 향상을 알 수 있다. 그리고 평균 데이터율을 계산해보면 “Equal Power”의 경우에 24.4Mbps, “Whispering”의 경우에 21.2Mbps, “UIIM”의 경우에 22.9Mbps로, 간섭 회피만 한 경우에 13%, 간섭 회피 및 제거를 한 경우에 6.1% 저하되었음을 알 수 있다.

결과를 종합해보면, 셀간간섭 관리 기법을 적용한 경우에 셀 경계 단말 성능은 획기적으로 개선되었으며, 대신 평균 데이터율은 소폭 저하되었다. 그리고 간섭 회피만 한 경우보다 간섭 회피 및 제거를 동시에 이용한 경우가 셀 경계 및 평균 데이터율 측면에서 모두 우수했다.

IV. 결 론

본 논문에서는 OFDM 기반 셀룰러 시스템에서 셀간간섭 관리를 위해 간섭 회피 및 제거를 동시에 이용하는 방법을 설명하고 그 성능을 모의실험을 통해 분석하였다. 모의실험 결과, 간섭 관리 기법을 적용하면 셀 경계 성능이 대폭 개선되며, 대신 평균 데이터율은 소폭 저하된다. 그리고 간섭 회피와 제거를 동시에 이용하면 간섭 회피만 이용한 경우보다 셀 경계 및 평균 데이터율 측면에서 모두 우수해진다. IMT-Advanced를 포함한 최근의 셀룰러 이동통신 표준화 동향에서는 평균 데이터율 외에 셀 경계 성능을 따로 정의하여 기준을 제시하여, 셀 전체적인 공정성 (fairness)을 위해 노력하고 있다. 이는 셀 경계 위치의 사용자로부터 불만을 들을 수도 있는 사업자에게는 당연한 측면이기도 하다. 이러한 관점에서 셀간간섭 회피 및 제거의 결합 방식은 셀 경계 성능 문제 해결을 위한 해법이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R1-050476, Siemens, “Evolved UTRA uplink scheduling and frequency reuse,” 3GPP RAN WG1 #41, Athens, Greece, May 2005.
- [2] 김광순, 안재영, “직교주파수 분할 다중 접속 기반 셀룰러 시스템에서의 자원 공간 분할 및 물리 채널 할당 방법,” 대한민국 특허등록번호 0575434(Apr. 2006), Nov. 2003.
- [3] R1-040572, Alcatel, “OFDM with interference control for improved HSDPA coverage,” 3GPP RAN WG1 #37, Montreal, Canada, May 2004.
- [4] R1-050272, Alcatel, “OFDM air interface with QoS at cell edge,” 3GPP RAN WG1 #40bis, Beijing, China, Apr. 2005.
- [5] R1-050896, Qualcomm Europe, “Description and simulations of interference management technique for OFDMA based E-UTRA downlink evaluation,” 3GPP RAN WG1 #42, London, UK, Aug. 2005.
- [6] C802.20-05-59, Qualcomm, “QFDD Technology Overview Presentation,” IEEE 802.20 MBWA #17, Vancouver, Canada, Nov. 2005.
- [7] R1-050808, ETRI, “Inter-cell interference management in practical environments,” 3GPP RAN WG1 #42, London, UK, Aug. 2005.
- [8] R1-050829, Panasonic, “Coordinated Symbol Repetition to Mitigate Downlink Inter Cell Interference,” 3GPP RAN WG1 #42, London, UK, Aug. 2005.
- [9] C802.20-05-72, ETRI, “Technology Overview,” IEEE 802.20 MBWA #17, Vancouver, Canada, Nov. 2005.
- [10] D. S. Baum, et al., “An Interim Channel Model for Beyond-3G Systems: Extending the 3GPP Spatial Channel Model(SCM),” *Proceeding of VTC2005-Spring*, Stockholm, Sweden, pp. 3132-3136, May 2005.

권재균 (Jae Kyun Kwon)

정회원



1996년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 공학사 수학과 부전공

1998년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 공학석사

2003년 8월 한국과학기술원 전자 전산학과 박사

2003년 8월~2006년 8월 한국전자통신연구원 선임연구원

2004년 10월~현재 차세대이동통신포럼 무선접속실무 반 간사

2006년 9월~현재 영남대학교 전자정보공학부 전임강사

2006년 10월~2008년 2월, 2008년 4월~현재 한국전자 통신연구원 초빙연구원

<관심분야> 셀간간섭, OFDM/CDMA 무선접속, 릴레이 기반 셀룰러 시스템, 부호도약 시스템

이희수 (Heesoo Lee)

정회원



1993년 2월 한국과학기술원 학사

1995년 2월 한국과학기술원 석사

2001년 2월 한국과학기술원 박사

2001년 3월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원

<관심분야> IMT-Advanced system, MIMO, 적응전송, 다중접속 릴레이

안재영 (Jae Young Ahn)

정회원



1983년 2월 연세대학교 공과대학 전기공학과 학사

1985년 2월 연세대학교 대학원 전기공학과 석사

1989년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 박사

1989년 8월~현재 한국전자통신

연구원 근무

1994년~1999년 한국전자통신연구원 위성멀티미디어 연구팀 팀장

2000년~2002년 한국전자통신연구원 무선LAN연구팀 팀장

2002년~2006년 한국전자통신연구원 무선전송방식연구팀 팀장

2008년 3월~현재 한국전자통신연구원 차세대이동통신 연구팀 팀장

<관심분야> 이동통신 무선전송 기술, 이동통신 다중접속 기술, 무선통신 시스템