

소프트 핸드오프 상황에서 상향링크 송신 전력 제어 성능 분석

김진*, 박수원^oPerformance Analysis of Uplink Transmit Power Control
during Soft HandoffJin Kim*, Suwon Park^o

요약

이동통신시스템의 이동국이 소프트 핸드오프 상황에 놓여 있을 때, 제안되어 실제 시스템에 적용되고 있는 상향 링크 송신 전력 제어 방법의 성능을 다양한 환경에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 분석결과 소프트 핸드오프 중에는 두 기지국이 개별 수신한 데이터의 품질보다 기지국 제어기에서 선택 결합한 후의 데이터 품질이 더 나음을 확인한다. 또한, 목표 프레임 오류율을 달성하기 위한 외부 루프 전력 제어는 각 기지국에서가 아니라 기지국 제어기에서 이뤄져야 단말이 불필요한 송신 에너지를 소비하지 않고 보다 효과적으로 목표 프레임 오류율을 달성할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인한다.

Key Words : Soft Handoff, Power Control, Closed Loop Power Control, Outer Loop Power Control

ABSTRACT

In a mobile communication system, we analyze the performance of uplink transmit power control mechanisms for various environments when a mobile station is during soft handoff. The quality of data frames at the receiver side can be better at a base station controller (BSC) than at its base stations (BSs) if the BSC combines selectively the data frames transmitted from the BSs. And, in order to achieve the target frame error rate (FER), the outer loop power control should be done at the BSC instead of at the BSs. It can save the energy consumption of a mobile station during the soft handoff.

I. 서론

송신 전력 제어는 부호 분할 다중 접속(CDMA: Code Division Multiple Access) 시스템에서 무선 및 이동통신시스템의 성능과 용량 면에서 큰 영향을 미치는 무선 링크 적응 기법중 하나이다. 송신 전력 제어는 제어 대상 링크에 따라 상향 링크 송신 전력 제어와 하향 링크 송신 전력 제어로 구분된다. 제어 방법에 따라 개방 루프 송신 전력 제어

(OLTPC: Open Loop Transmit Power Control)와 폐쇄 루프 송신 전력 제어(CLTPC: Closed Loop Transmit Power Control)로 구분된다.

그림 1에서 장치 A에서 이루어지는 장치 B로의 송신 신호에 대한 OLTPC는 장치 A에서 장치 B로부터 수신된 신호의 품질을 기반으로 장치 A가 장치 B로 송신하려는 신호의 송신 전력을 제어하는 것이다. 장치 A에서 이루어지는 장치 B로의 송신 신호에 대한 CLTPC는 장치 B가 장치 A로부터의

* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 일부 지원을 받아 수행된 연구입니다. (NRF-2011-0027128)

o 이 논문은 2012년도 광운대학교 연구년에 의해 연구되었습니다.

• 주저자: 광운대학교 전자통신공학과 통신기술연구실/NHN 게임IT서비스실, kuriyoon@nhn.com, jkim3056@gmail.com, 정희원

° 교신저자: 광운대학교 전자통신공학과 통신기술연구실, spark@kw.ac.kr, spark@ieee.org, 종신회원

논문번호: KICS2012-03-144, 접수일자: 2012년 3월 28일, 최종논문접수일자: 2012년 7월 10일

수신 신호의 품질을 장치 B에 내장하고 있는 신호 품질 판단 기준값과 비교하여 장치 A에게 송신 전력의 증감을 명령하는 것이다. 상향 링크 전력 제어의 경우 장치 A는 단말, 장치 B는 기지국이고, 하향 링크 전력 제어의 경우 장치 A는 기지국, 장치 B는 단말이다.

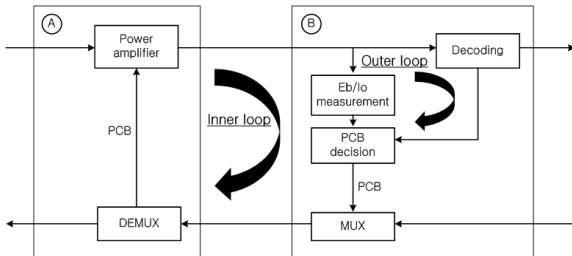


그림 1. 송신 전력 제어
Fig. 1. Transmit Power Control

CLTPC는 제어 대상에 따라 수신 신호의 품질을 대상으로 하는 내부 루프 송신 전력 제어(Inner Loop Transmit Power Control)와 수신 신호 품질 판단 기준값을 대상으로 하는 외부 루프 송신 전력 제어(Outer Loop Transmit Power Control)로 구분된다. 내부 루프 송신 전력 제어는 원하는 통신 품질을 달성하기 위한 원하는 수신 신호의 품질을 수신 신호대 간섭비 (SIR: Signal-to-Interference Ratio) 또는 비트당 수신 에너지 대 간섭 전력 밀도비 (E_b/I_0 : Energy-per-bit to Interference Power Spectral Density Ratio) 목표값 등과 비교하여 판단한다. 수신 신호의 품질이 목표값에 근접할 수 있도록 송신 전력을 증감시키도록 전력제어 명령을 직접적으로 보내는 방법이다. 외부 루프 전력 제어는 수신된 데이터 블록의 오류발생 여부에 근거하여 내부 루프 전력 제어에서 기준값으로 사용하는 E_b/I_0 목표값을 목표 오류율에 기반하여 결정된 변화량만큼 증감함으로써 송신 전력 증가 또는 감소 명령의 생성을 제어하는 방법이다^{1,2)}.

셀룰러 시스템 기반의 이동통신시스템에서 통신 중에 단말은 이동할 수 있기 때문에 통신이 끊어지지 않고 서비스를 받을 수 있게 해야 하고, 그러한 기술중 하나가 핸드오프(Handoff)이다. 핸드오프는 통신중인 단말이 한 기지국이 관장하는 서비스권역인 셀에서 다른 기지국이 관장하는 서비스권역으로 이동하더라도 끊김없는 통신 서비스를 제공받을 수 있도록 통신 서비스 주체인 기지국을 전환하는 방법이다. 핸드오프에는 다른 기지국으로 전환하기 전

에 현재 통신중인 기지국과의 통신을 먼저 끊는 방법인 연결전 차단(break before make,)방식인 하드 핸드오프(Hard Handoff)와 새로운 기지국과 통신을 먼저 연결한 다음에 이전 기지국과의 통신을 끊는 방법인 차단전 연결(make before break, make and break 또는 break after make)방식인 소프트 핸드오프(Soft Handoff)가 있으며, 소프트 핸드오프일 경우 다수의 기지국과 동시에 통신하는 시간이 존재한다.

본 논문에서는 소프트 핸드오프중에 두 개의 기지국과 동시에 통신 중인 단말에서 송신하는 상향 링크 신호에 대한 두 개의 기지국으로부터 내려오는 준독립적인 각 송신 전력 제어 명령에 맞춰 단말의 송신 전력을 제어하는 상향 링크 통신 채널의 성능을 분석하고자 한다. 성능 분석은 CDMA2000 시스템의 링크 레벨 모의실험을 통해 이루어지며, 소프트 핸드오프 상황에서의 상향 링크 전력 제어 기법에 따른 비트오류율(BER: Bit Error Rate)과 프레임오류율(FER: Frame Error Rate)을 성능 평가 지표로 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 성능 평가에 사용된 외부 루프 송신 전력 제어 방법과 모의실험을 위한 소프트 핸드오프 상황에 대한 시스템 모형을 설명한다. III장에서는 모의실험을 통하여 성능 평가 결과를 제시한다. 마지막으로 IV장에서 본 연구 결과에 대한 요약과 향후 연구주제를 제시한다.

II. 본 론

CLTPC의 동작원리는 다음과 같다. 상향링크이기 때문에 단말에서 기지국으로 보내는 신호에 대해서 기지국이 수신 E_b/I_0 을 측정하고 이를 외부 루프 전력제어에서 설정한 수신 E_b/I_0 목표값 $(E_b/I_0)_T$ 와 비교한다. 측정된 E_b/I_0 가 목표값보다 크거나 같다면 “송신 전력 감소”를 명령하기 위하여 전력 제어 비트를 ‘1’로 설정하고, 아니면 “송신 전력 증가”를 명령하기 위하여 전력 제어 비트를 ‘0’으로 설정하여 단말로 송신한다. 단말은 전력 제어 비트에 따라서 송신 전력을 조절하는데, 전력 제어 비트가 ‘1’이면 송신 전력을 현재 송신 전력보다 ΔP [dB] 감소시키고, ‘0’이면 ΔP [dB]만큼 증가시킨다. 통상적으로 $\Delta P = 1$ 이다^{3,4)}.

이동통신시스템에서 기지국에서 전력 제어 비트

를 생성하는 것과 단말에서 그 전력 제어 비트를 적용해서 송신 전력을 조절하는 것에는 얼마간의 시간 지연이 있다. 또한 전력 제어 비트가 기지국에서 단말에 도달하는 도중에 무선 채널의 영향으로 비트 오류가 발생할 수도 있다.

외부 루프 전력 제어에서 E_b/I_0 목표값을 정하는 방법은 규격으로 규정되어 있지 않다. 즉, 시스템을 구현하는 개발자의 몫이다. 본 논문에서는 [1]의 방법을 참고하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

기지국은 수신된 데이터 프레임에 대하여 같이 수신된 순환 중복 검사(CRC: Cyclic Redundancy Check) 비트를 이용하여 수신된 데이터 프레임에 오류가 있는 지 없는 지를 검사한다. 오류가 있다고 판단하면 식 (1)과 같이, 오류가 없다고 판단하면 식 (2)와 같이 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 을 변경한다. 프레임 인덱스 $j = 1, 2, \dots$ 일 때,

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_\tau [j+1] = \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_\tau [j] + k\Delta \quad (1)$$

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_\tau [j+1] = \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_\tau [j] - \Delta \quad (2)$$

Δ 는 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 의 증가 및 감소의 기본 단위이다. 이 방법은 프레임 오류율(FER: Frame Error Rate)을 $1/(k+1)$ 보다 작거나 같게 유지할 수 있게 한다. 따라서 만약 목표 FER(음성통신의 경우 통상적으로 1%)이 FER_τ 라고 하면, k 는 다음과 같이 구해진다.

$$k = \frac{1}{FER_\tau} - 1 \quad (3)$$

목표 FER과 프레임 오류 발생 여부에 따라 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 을 조정하고, 이 목표값을 기준으로 하여 수신 신호로부터 측정된 수신 E_b/I_0 와 비교해서 전력 제어 비트를 생성한다.

그림 2와 같이 기지국 제어기(BSC: Base Station Controller)는 소프트 핸드오프 상황에서는 단말로부터 오는 상향 링크 신호를 선택적 결합(Selective Combining)한다. 단말의 송신 신호를 소프트 핸드오프에 관여하는 모든 기지국이 수신한다. 각 기지국은 수신된 상향 링크 데이터 프레임 신호를 복조

및 채널 복호한 다음 기지국 제어기(BSC)로 보낸다. BSC는 소프트 핸드오프에 관여하는 기지국으로부터 전송받은 데이터 프레임 중 CRC 검사 결과 오류가 없다고 판정된 프레임을 선택함으로써 선택적 다이버시티(Selection diversity)에 의한 향상된 통신 품질을 달성한다^[5].

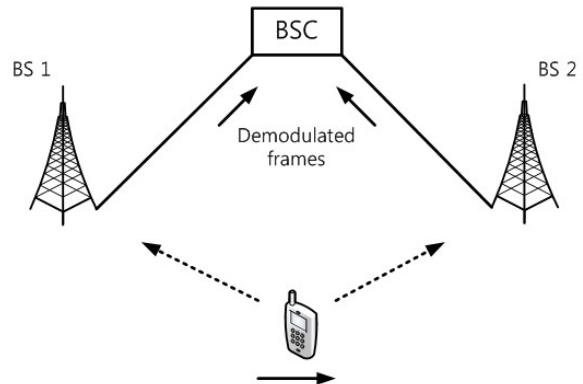


그림 2. 소프트 핸드오프시 상향 링크 신호 전송
Fig. 2. Uplink signal transmission during soft handoff

본 논문에서는 그림 2와 같이 하나의 단말과 같은 거리만큼 떨어져 있는 두 기지국 BS1 및 BS2와의 소프트 핸드오프 상황을 가정한다.

소프트 핸드오프 중에는 단말이 송신하는 상향 링크 신호는 서로 독립적인 무선 채널을 통해 두 기지국 BS1과 BS2에 각각 수신된다. 그리고 두 기지국 BS1과 BS2는 각각 수신한 신호에 대해 수신 E_b/I_0 를 측정한다. BS1과 BS2가 각각 측정한 수신 E_b/I_0 를 $(E_b/I_0)^1$ 과 $(E_b/I_0)^2$ 라고 하자. 이를 각 기지국은 자신의 목표값 $(E_b/I_0)_\tau^1$ 와 $(E_b/I_0)_\tau^2$ 과 비교해서 전력 제어 비트를 생성한다. 단말이 송신한 상향 링크 신호를 두 기지국이 독립적으로 수신하기 때문에, 두 기지국이 독립적으로 생성한 전력 제어 비트가 단말에 그대로 적용될 수는 없다. 왜냐하면 단말이 두 기지국에게 서로 다른 전력으로 각각 송신하는 것이 아니라, 단말이 송신하는 하나의 신호가 독립적인 두 개의 전파 경로를 거쳐 두 기지국에 수신되는 것이기 때문이다. 그래서 단말은 두 기지국으로부터 수신된 독립적인 두 개의 전력 제어 비트를 단말의 송신 신호에 적용하기 위하여 두 기지국으로부터의 전력 제어 명령을 표 1과 같이 결합한다.

표 1. 전력 제어 명령 결합 방법

Table 1. Power control bit combining

기지국으로부터의 전력 제어 명령		결합 전력 제어 명령
BS 1	BS 2	
증가	증가	증가
증가	감소	감소
감소	증가	감소
감소	감소	감소

단말은 두 기지국으로부터의 전력 제어 명령을 결합하여 실제 적용할 전력 제어 명령을 생성하여 송신 전력을 조절한다. 두 기지국의 전력 제어 비트가 모두 증가(비트 '0')일 때, 단말은 송신 전력을 증가시켜 신호를 송신한다. 두 기지국은 각각 수신한 상향 링크 데이터 프레임 신호를 복조 및 채널 복호하여 그 결과를 BSC로 보내서 선택적 결합(Selection Combining)한다.

본 논문은 조건에 따른 두 기지국이 각각 수신한 데이터에 대한 비트 오류율(BER: Bit Error Rate) 및 프레임 오류율(FER: Frame Error Rate)을 분석하고자 한다.

실제 시스템에서는 측정이 쉽지 않은 비트 오류율(BER: Bit Error Rate)을 모의 실험에서는 측정할 수 있기 때문에 다음과 같은 방법으로 BER을 결정하였다. 채널 부호화의 기본 단위인 프레임별로 각 기지국에서의 BER을 측정하여 비교한다. 기지국 1에서 수신한 i 번째 프레임의 BER과 기지국 2에서 수신한 i 번째 프레임의 BER중에서 작은 쪽을 i 번째 프레임의 BER로 한다. 이는 BSC에서 두 기지국으로부터 받은 두 프레임 중 최적의 프레임을 선택하는 것과 같은 원리이다.

프레임 오류율(FER: Frame Error Rate)을 결정하는 방법은 표 2와 같다.

표 2. 소프트웨어 핸드오프중 프레임 오류 판단

Table 2. Frame Error Detection during soft Handoff

각 기지국의 CRC 검사 결과		결합 프레임 오류 여부
BS 1	BS 2	
Good	Good	정상 프레임
Bad	Good	정상 프레임
Good	Bad	정상 프레임
Bad	Bad	오류 프레임

III. 모의실험 결과

소프트 핸드오프 상황에서의 상향 (또는 역방향) 링크 전력 제어 성능 분석을 위한 모의실험 환경은 표 3과 같다. 무선 채널의 경우 제이크스(Jakes) 모형을 사용하여 페이딩 채널을 구현하였다. 모의 실험 대상은 CDMA2000시스템의 역방향 기본 채널(R-FCH: Reverse Fundamental Channel)이다.

표 3. 모의실험 환경

Table 3. Simulation Conditions

반송파 주파수	2 GHz
데이터 속도	9.6 kbps
프레임 길이	20 ms
원천 비트수	172
CRC 비트수	12
꼬리 비트수	8
채널 부호	길쌈 부호
구속장 길이 (K)	9
부호율 (R)	1/4
채널 복호	연관정입력 비터비
부호화 심벌수	768
데이터 변조	QPSK
변조 심벌수	384
단말 이동 속도 (km/h)	3, 30, 60, 120
AWGN 포함여부	포함
AWGN 분산	6dB
두 기지국과 단말간 거리	같음
전파 음영 (shadowing)	미고려

본 논문에서는 모의실험을 간단하게 하기 위해서 기지국에서 생성한 전력 제어 비트는 오류나 시간 지연 없이 단말에 바로 적용되는 것으로 가정한다. 그리고 채널 추정 기법은 완벽한 채널 추정을 가정한다.

그림 3과 그림 4는 외부 루프 전력 제어를 적용하지 않았을 때 목표값 ($(E_b/I_0)_T$)을 0.5 [dB]에서 1[dB]까지 0.05 [dB]단위로 변경하면서 소프트웨어 핸드오프 상황에서의 성능을 모의 실험으로 구한 결과이다.

그림 3은 소프트웨어 핸드오프 상황에서 상향 링크의 비트 오류율(BER: Bit Error Rate) 성능을 단말의 이동 속도별로 도시한 그래프이다. 각 기지국이 수신한 데이터의 BER은 목표값 ($(E_b/I_0)_T$)이 1[dB]에 가까워져도 $0.01(=10^{-2})$ 까지 떨어지지 않는다. 그에

비해 BSC에서 결합한 데이터의 BER은 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 이 0.75[dB]에 미치지도 전에 0.001($=10^{-4}$)까지 떨어진다. 즉, BSC에서 데이터를 결합하면 더 적은 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 으로 더 좋은 BER성능을 얻을 수 있다. 그리고 (a)30km/h부터 (d)120km/h까지의 결과를 비교해보면, 단말의 이동 속도는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

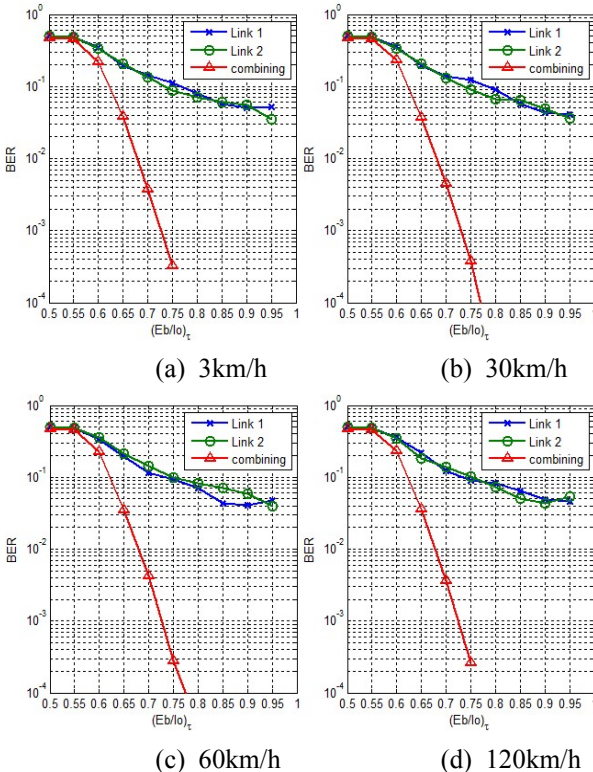


그림 3. 외부 루프 전력 제어 비적용시 BER 성능
Fig. 3. BER vs. $(E_b/I_0)_\tau$ for the case without outer loop power control

그림 4는 소프트 핸드오프 상황에서 상향 링크의 프레임 오류율(FER: Frame Error Rate) 성능을 도시한 그래프이다. 각 기지국이 수신한 데이터의 FER은 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 이 0.95[dB]일 때 0.1($=10^{-1}$)정도이다. 그에 비해 BSC에서 결합한 데이터의 FER은 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 이 0.75[dB]일 때 이미 0.01($=10^{-2}$)보다 적은 값을 가진다. 즉, 그림 2와 같이 BSC에서 데이터를 결합하면 더 적은 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 으로 더 좋은 FER성능을 얻을 수 있다. 그리고 (a)30km/h부터 (d)120km/h까지의 결과를 비교해보면 단말의 이동 속도는 큰 영향을 미치지 않는다.

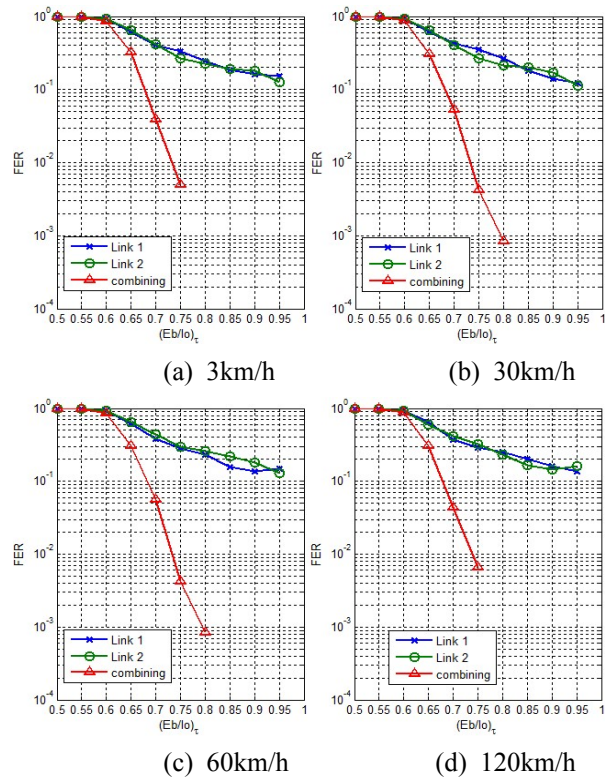


그림 4. 외부 루프 전력 제어 비적용시 FER 성능
Fig. 4. FER vs. $(E_b/I_0)_\tau$ for the case without outer loop power control

그림 3과 그림 4의 결과로부터 각 기지국이 수신한 데이터의 결과보다 BSC에서 결합한 후의 결과가 이동 속도에는 크게 상관없이 눈에 띄게 개선된 것을 확인할 수 있다. 이처럼 소프트 핸드 오프 상황에서 단말이 두 기지국과 동시에 통신하면 결합 이득을 얻을 수 있다.

그림 5와 그림 6은 외부 루프 전력 제어를 적용했을 때, 목표값 $(E_b/I_0)_\tau$ 의 증감을 결정하는 Δ 를 0.01부터 0.11까지 0.01단위로 변경하면서 소프트 핸드오프 상황에서의 성능을 모의 실험으로 구한 결과이다. 모의 실험에서는 시스템이 목표로 하는 FER을 통상적으로 음성데이터에 사용하는 0.01($=10^{-2}=1\%$)로 했다.

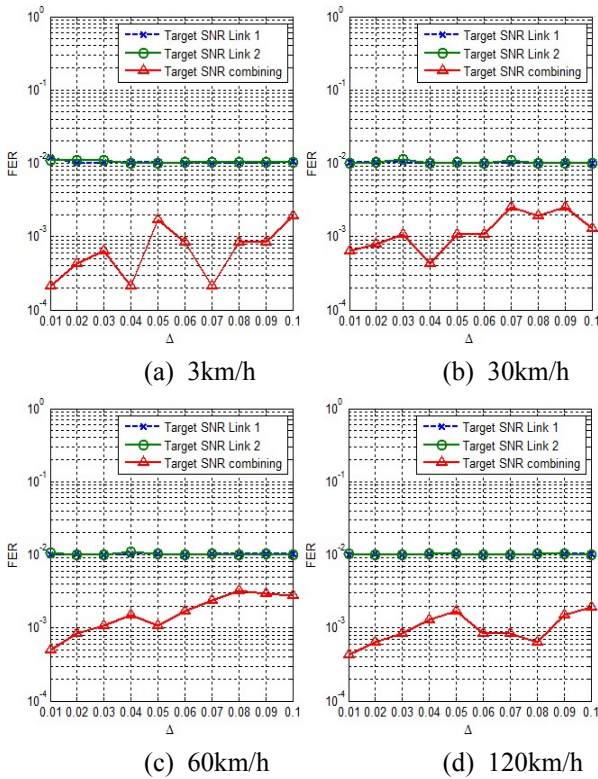


그림 5. 기지국에서 외부 루프 전력 제어 적용시 Δ 에 따른 FER 성능
 Fig. 5. FER vs. Δ for the case with outer loop power control at each base station

그림 5는 소프트 핸드오프에 참여하는 각 기지국에서 외부 루프 전력 제어가 수행될 경우 페루프 전력제어의 목표값 $(E_b/I_0)_T$ 의 증감을 결정하는 Δ 를 변경하면서 얻은 FER에 대한 모의 실험 결과이다. 각 기지국의 FER은 각 기지국에서 수행되는 외부 루프 전력 제어에 의하여 0.01로 유지되는 반면에 BSC에서 결합한 프레임에 대한 FER은 목표 FER=0.01보다 더 낮음을 알 수 있다. 이는 결합 이득이 발생하면서 FER성능이 더욱 개선되기 때문이다. 즉, 단말은 불필요하게 높은 전력으로 송신하고 있다는 것을 알 수 있다. (a)3km/h부터 (d)120km/h까지의 결과를 비교해 보면, 단말 이동 속도에 대해서는 성능에 대한 뚜렷한 경향을 찾아 볼 수 없다.

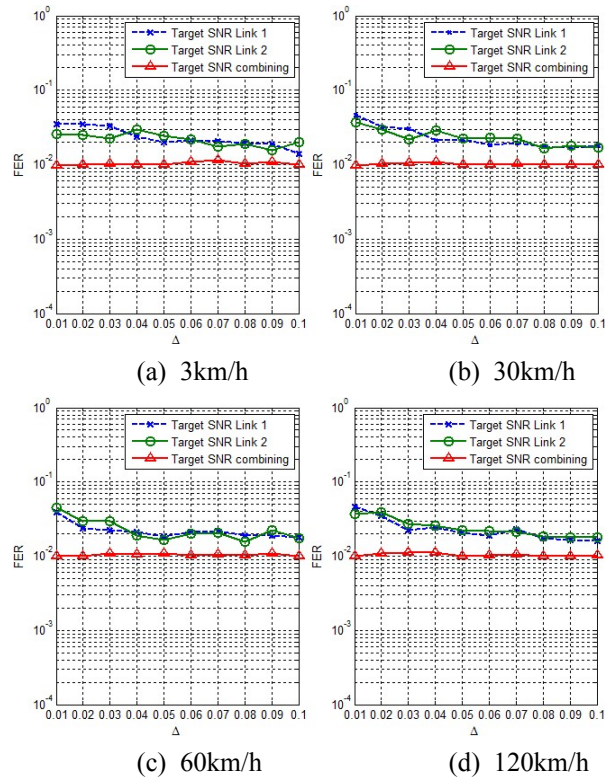


그림 6. 기지국 제어기에서 외부 루프 전력 제어 적용시 Δ 에 따른 FER 성능
 Fig. 6. FER vs. Δ for the case with outer loop power control at base station controller

그림 6은 소프트 핸드오프에 참여하는 각 기지국에서 외부 루프 전력 제어가 수행되지 않고 상위의 BSC에서 수행될 경우 페루프 전력제어의 목표값 $(E_b/I_0)_T$ 의 증감을 결정하는 Δ 를 변경하면서 얻은 FER에 대한 모의 실험 결과이다. 각 기지국의 FER 및 결합 FER이 모두 목표값인 0.01부근으로 유지됨을 알 수 있다. 단말의 이동 속도에는 크게 영향을 받지 않고 (a)3km/h부터 (d)120km/h까지 각 기지국에서의 개별 FER성능은 Δ 값이 커짐에 따라 점점 개선되고 있다.

그림 5와 그림 6의 결과로부터 목표 FER에 기반한 외부 루프 전력 제어는 프레임 오류를 최종적으로 판단하는 BSC에서 이루어져야 효과적임을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 소프트 핸드오프 상황에서 상향 링크 신호의 송신 전력 제어에 대한 성능을 분석하였다.

소프트 핸드오프 중에 두 기지국이 수신한 데이

터의 결과보다 기지국 제어기에서 결합한 후의 결과가 뚜렷하게 개선되었다. 이로써 단말이 두 기지국과 동시에 연결을 맺으면서 결합이득을 얻을 수 있다.

목표 FER을 얻기 위한 외부 루프 전력 제어는 각 기지국보다 기지국 제어기에서 이뤄져야 단말이 불필요한 전력을 소비하지 않고 목표 FER을 얻을 수 있다.

향후에 상향 링크뿐만 아니라 역방향 링크 신호의 송신 전력에 대한 성능 분석도 수행할 계획이다. 더불어 CDMA시스템뿐만 아니라 LTE시스템 및 여러 시스템에 대한 성능 분석 연구를 계획하고 있다.

본 연구에서는 전력 제어 명령의 적용시 지연과 전력 제어 명령의 전달 오류를 반영하지 않았지만 향후 연구에서는 이 부분까지 반영할 계획이다.

참고 문헌

- [1] A. Sampath, P. Sarath Kumar, J. M. Holtzman, "On Setting Reverse Link Target SIR in a CDMA System", 47th IEEE Vehicular Technology Conference, 1997, pp.929-933
- [2] A. Giovanardi, G. Mazzini, V. Tralli, M. Zorzi, "Some results on power control in wideband CDMA cellular networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2000, pp.365-369
- [3] T. Chulajata and H. M. Kwon, "Combinations of Power Controls for cdma2000 Wireless Communications System", 52nd IEEE Vehicular Technology Conference - Fall, 2000, pp.638-645
- [4] C-C. Lee and R. Steele, "Closed-loop power control in CDMA systems", IEE Proceedings - Communications, Vol.143, No.4, Aug. 1996, pp.231-239
- [5] B. Worley and F. Takawira, "Power reduction and Threshold Adjustment for Soft Handoff in CDMA Cellular Systems," IEEE AFRICON, 1999, pp.263-268

김진 (Jin Kim)



시스템

2010년 2월 광운대학교 전자통신공학과 학사
 2010년 9월~현재 광운대학교 전자통신공학과 석사과정
 2012년 9월~현재 NHN 게임IT 서비스실 근무
 <관심분야> 통신공학, 이동통신

박수원 (Suwon Park)



1994년 2월 KAIST 전기및전자공학과 공학사 수학과 (복수전공)
 1996년 2월 KAIST 전기및전자공학과 공학석사
 2003년 2월 KAIST 전자전산학과 공학박사
 1994년 3월~1998년 9월 삼성전자 전임연구원
 1998년 9월~1999년 2월 한국과학기술원 전일제 위촉연구원
 1999년 3월~2002년 5월 한국전자통신연구원 시간제 위촉연구원
 2002년 6월~2006년 2월 삼성전자 통신연구소 책임연구원
 2006년 3월~2007년 2월 광운대학교 전자통신공학과 전임강사
 2007년 3월~2012년 8월 광운대학교 전자통신공학과 조교수
 2011년 9월~현재 광운대학교 전자통신공학과 부교수
 <관심분야> CDMA/OFDM/OCHM/ORHM 무선접속기술, 전력제어, SDR/CR 기술, 군통신, 간섭/공존문제, PAPR완화기술, 부호이론