

복수개의 캐리어(Carrier)를 가진 CDMA 이동통신시스템의 용량 및 성능 분석을 위한 해석적 모형

백 천 현[†]

동의대학교 공과대학 산업경영공학과

Analytic Capacity and Performance Models for CDMA Mobile Communication Systems with Multiple Carriers

Chun-Hyun Paik

Dept. of Industrial & Management Engineering, Dongeui University

This study addresses the analytic models for estimating the capacity and performance of the multi-carrier CDMA system where several carriers would be assigned to a single cell to accommodate the required traffic demand. Two key features of the multi-carrier CDMA system, carrier selections of new calls and inter-carrier hard handoffs, are accommodated in the models. Computation experiments are conducted to show the effectiveness of the proposed model.

Keywords: Multi-carrier CDMA Systems, Capacity and Performance model, Soft handoff, Hard-handoff

1. 서론

CDMA시스템에서 사용자 정보는 코드로 구분되어 특정 대역폭을 가진 반송파(carrier : CA)대역으로 확산되어 전송된다. 하나의 반송파에 실릴 수 있는 사용자(이동국 : mobile station: MS)의 수는 무선전파(radio propagation) 환경, 사용자 서비스 및 이동 특성 등 다양하고 복잡한 요인에 의해 결정된다. 일정한 서비스품질 수준을 만족시키면서 단일 CA에 실을 수 있는 MS의 수(이를 CA용량이라 부르기로 한다)에 대한 연구는 이동통신시스템 연구분야에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 또한, 여러 가지 시스템 설계 및 운용 파라메타(호접속제어, 전력제어, 핸드오프 등)들이 CA용량에 미치는 영향과 최적 값을 찾아 내려는 연구 역시 활발히 진행되어 왔다. 그러나 이 같은 CDMA시스템에 대한 대부분의 기존 연구는 단일 CA만 있는 경우(단일 CA시스템)를 대상으로 하였다. CDMA시스템은 소프트용량(soft capacity)을 가진 interference-limited 시스템이라고 한다(Holma and Toskala 2002). 그러나 이것이 단일 CA로

모든 서비스 수요를 모두 충족시킬 수 있음을 의미하는 것은 아니며, 실제로 아무리 이상적인 무선전파 환경이라도 코드의 수 등 용량을 제한하는 또 다른 물리적인 요소가 존재한다. 따라서 도심과 같이 트래픽이 밀집된 지역에 소속된 셀(cell)에서는, 서비스 품질을 특정 수준 이상 유지하기 위해, 여러 개의 CA가 단일 셀에 할당되는 복수 CA시스템이 불가피하다(<Figure 1>).

단일 CA시스템에서는 필요없지만 복수 CA시스템에서는 반드시 고려되어야 할 요소는 다음 두 가지로 구분된다. 먼저, CA선택(CA selection)문제이다. 이것은 통화 중인 않지만 "power on" 상태인 MS에게 roaming 중인 셀에 할당된 여러 개의 CA 중에서 어느 CA를 할당해야 하는지를 결정하는 문제이다. MS와 기지국(base station: BS)사이에서 CA선택은 BS에서 CA별로 송신되는 파일럿(pilot) 신호를 MS가 탐색하여 이루어진다.

다음으로 고려해야 하는 문제는 핸드오프이다. CDMA시스템의 가장 큰 특징 중 하나는 소프트 핸드오프(soft handoff: SH)

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-B00169).

[†] 연락저자 : 백천현, 614-714 부산 부산진구 엄광로 995번지 동의대학교 공과대학 산업경영공학과, Tel : 051-890-1660, Fax : 051-890-1619,

E-mail : chpaik@deu.ac.kr

2006년 05월 접수; 2006년 08월 수정본 접수; 2006년 09월 게재 확정.

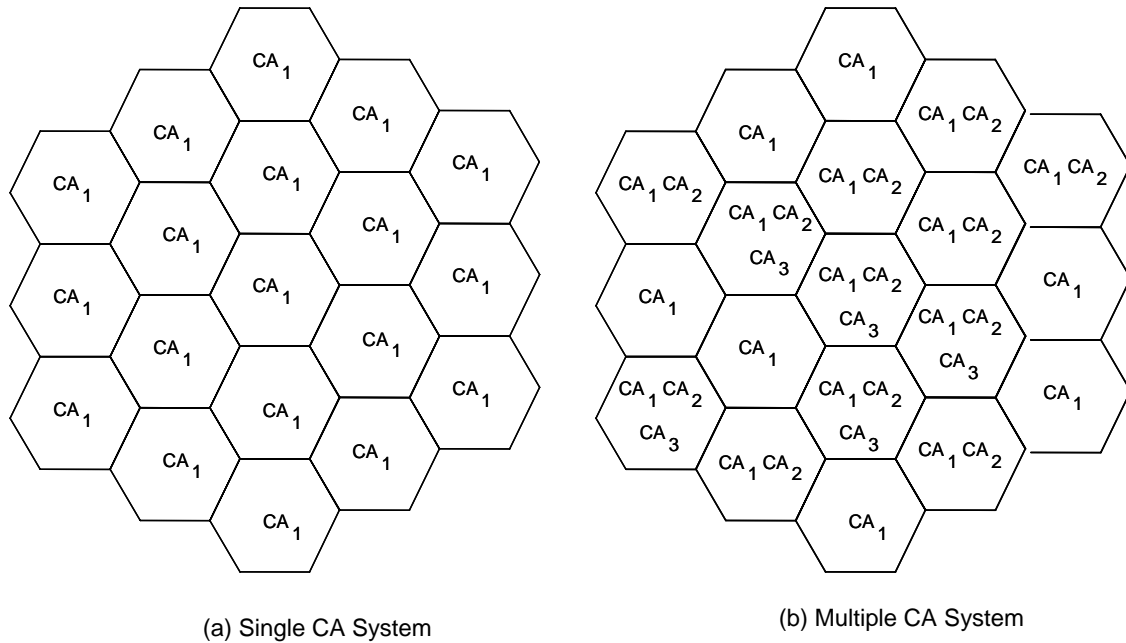


Figure 1. Single CA and multiple CA systems

이다. SH는 동일 CA에서 서비스 중인 MS간에만 이루어 질 있으며, 통화 중 셀 이동으로 발생하는 핸드오프에서 CA가 달라지는 경우 CA간 하드핸드오프(hard handoff: HH)를 수행해야 한다. CA간 HH는 인접한 셀간 할당된 CA의 수가 상이한 경우 필연적으로 발생하게 되는 셀간 CA간(inter-cell inter-CA) HH와 (Tripathi and Sharma 2001; Tcha *et al.* 2003), 특정 셀내에 할당된 CA간에 부하(load)를 균등하게 하기 위해, 현재 서비스를 받고 있는 셀에서 핸드오프를 강제하는 셀내 CA간(intra-cell inter-CA) HH로 구분된다(Kashima and Zhu 2004; Wang *et al.* 2001). 본 연구에서는 셀내 CA간 HH는 다루지 않는다. 따라서 별도의 언급이 없는 한, HH는 단순히 셀간 CA간 HH를 의미한다.

복수 CA환경에서 발생하는 CA선택과 핸드오프문제에 대한 연구는 용량증대, 운용 효율성 제고 및 경제성 확보에 매우 중요한 요소임에도 불구하고, 단일 CA환경에서 이루어지고 있는 방대한 연구에 비해 매우 제한적으로 이루어져 왔다. 본 연구는 복수 CA환경 하의 CDMA 이동통신시스템에서 CA선택과 핸드오프 등 복수 CA시스템 운용특성이 반영된 시스템 용량 및 성능분석을 목적으로 한다. 이동통신시스템에 대한 연구 중에서 본 연구와 밀접한 연관이 있는 분야는 시스템용량(capacity)과 영역(coverage)에 관한 것이다. 음성서비스만을 대상으로 주로 이루어진 연구가 최근에는 성능(QoS) 및 전송속도 면에서 상이한 기준을 요구하는 다양한 멀티미디어 서비스를 포함하는 연구로 확대되고 있다(Valkealahti *et al.* 2002; Siomina and Yusan 2004; Abrardo *et al.* 2003). 복수 CA환경을 전제로 이루어진 연구들이 다른 주제들은 크게 다음 3가지로 구분된다: ① CA간 부하균형 (load balancing) 문제(Tripathi and Sharma 2001; Kashima and Zhu 2004; Fioroni and Bernardi

2003), ② CA간 HH에 대한 절차 및 압축모드(compressed mode)에 대한 연구(Wang *et al.* 2001; Gustafsson *et al.* 1997; Hamalainen *et al.* 2003), ③ 트래픽 열량용량(Erlang capacity) (Dean and Flemin 2002; Zeger and Newbury 1999). 그러나 이러한 기존 선행연구 대부분은 복수 CA하에서 발생하는 CA선택, CA간 HH 등에 대한 이슈를 통합적으로 고려하고 있지 못할 뿐만 아니라, 연구내용 면에서도 규격에 나와 있는 내용 및 절차에 대한 단순 응용만을 다루고 있어, 새로운 아이디어를 제시하고 있지 못하다. 또한 연구방법에 있어서도, 지나친 단순화 또는 시뮬레이션에 의존하는 등 현실응용 및 기반 연구로서의 기여도도 낮은 편이다. 이것은 복수 CA환경 하에서 무선전파특성을 반영하고, 트래픽의 확률적 변동성을 수용할 수 있는 시스템 용량 및 성능 분석이 가능한 확률적 통합모형에 대한 연구가 부재한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

2. 시스템 및 전파간섭 모형

2.1 시스템모형 및 CA운용

본 연구는 CDMA시스템의 하향링크(downlink)만을 대상으로 한다. 따라서 별도의 언급없이 소개되는 모든 용어 및 개념은 하향링크에 관련된 것으로 국한한다. 이동통신시스템 도입 초기에는 대부분의 셀에 하나의 CA(CA₁)만이 운용되다가, 서비스 이용자가 증가함에 따라 차별적으로 셀들에 CA가 추가된다. 결국에는, <Figure 1>과 같이 셀별로 상이한 트래픽밀도(traffic density)에 따라 서로 다른 수의 CA가 각 셀별로 운용된다.

CDMA 이동통신시스템은 BS 또는 MS가 받는 간섭(interfer-

ence)의 양에 의해 시스템용량이 좌우되는 interference-limited 시스템이다. 특정 셀에 소속된 MS의 무선채널(radio channel) 환경에 영향을 미치는 간섭은 크게 셀 내 간섭(intra-cell interference)과 셀 간 간섭(inter-cell interference)으로 구분된다. 본 연구에서는 <Figure 2> (a)에서와 같이 19개의 육각형(hexagonal) 셀로 구성된 시스템에서, 가장 중심에 위치한 셀 0를 대상으로 분석을 수행한다. 각 셀의 BS는 셀의 중심에 위치한다고 가정하며, 셀 $k(k=0,1,\dots,18)$ 의 기지국은 BS_k 로 표기된다. 셀 1에서 셀 6까지는 셀 0의 일차 tier를 구성하고, 셀 7에서 셀 18은 셀 0의 이차 tier를 구성한다. 3차 이상의 tier에 속한 셀로부터 셀 0에 미치는 영향은 무시할 수 있으므로(Holma and Toskala 2002), 셀 0의 무선채널 환경에 영향을 미치는 범위는 이차 tier로 국한한다. 모든 육각형 셀의 크기는 동일하다고 가정한다. 논리의 일반성을 잃지 않으면서도 전개 편의를 위해, CA배치에 관련된 다음과 같은 가정을 도입한다. 시스템에는 두 개의 CA(CA_1, CA_2)만이 있고, 셀 0에는 두 개의 CA 모두가 할당되어 있다. 그리고 일차 및 이차 tier에 속한 18개의 셀에는 CA_1 이 할당되어 있고, CA_2 의 경우 할당되어 있는 셀과 그렇지 않은 셀이 존재할 수 있다. <Figure 2>는 CA배치에 대한 한 예를 보여준다.

셀 0에서 발생하는 신규호(new call)에 대해서는 CA_1 또는 CA_2 가 할당되는데, CA할당을 위한 검색순서가 CA_1 이 먼저이고 또는 CA_2 가 나중인 (이를 단순히 $CA_1 \rightarrow CA_2$ 로 표시한다) 비율을 α 라고 하자. 즉, 셀 0에서 발생하는 신규호에 대해 확률 α 로 CA_1 할당 여부를 먼저 확인 한 뒤, CA_1 할당이 불가능하게 될 때 CA_2 의 할당이 가능한지를 확인한다. 물론, 확률 $1-\alpha$ 로 신규호의 검색순서는 $CA_2 \rightarrow CA_1$ 이 된다. 예를 들어 $\alpha=1(\alpha=0)$ 이면, 발생하는 모든 신규호에 대해 $CA_1(CA_2)$ 할당이 불가능하게 될 때 비로소 $CA_2(CA_1)$ 가 할당되게 된다. CA_1 과 CA_2 모두 할당이 불가능하게 될 때 신규호는 블록킹(또는 손실)된다. 셀 0에서 신규호는 발생률이 λ 인 포아송과정(Poisson process)를 따라 발생된다고 가정한다.

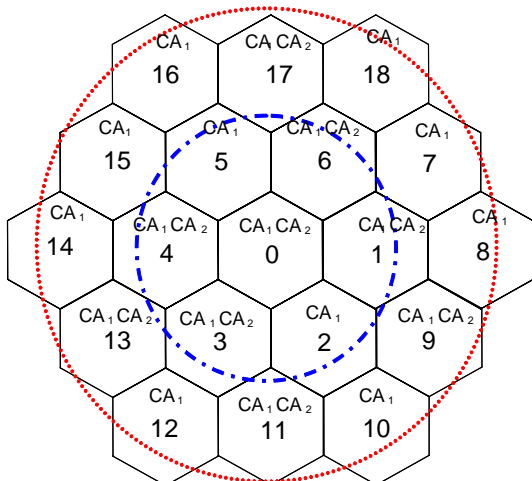


Figure 2. An example for CA allocation

인접셀로부터 셀 0로 이동하는 핸드오프(handof) 과정으로는 다음 두 가지 경우가 있다: 인접셀에서 $CA_k(k=1, 2)$ 를 사용중이던 핸드오프호(이를 단순히 CA_k 핸드오프호라 부르자)에게 셀 0에서 동일한 CA의 할당이 가능하면, SH가 이루어지고, 사용중이던 CA의 할당이 실패하면, 다른 CA로의 HH를 시도하게 된다. HH 역시 실패하면, 핸드오프호는 블록킹된다. 통화가 진행 중인 핸드오프호의 손실은 통화를 시도하는 신규호의 손실에 비해 더욱 바람직하지 않으므로, 핸드오프호를 신규호에 우선하여 보호하려는 여러 가지 방안이 연구되어 왔다. 본 연구에서는 그 중에서도 가장 보편적으로 이용되고 있는 방법으로 핸드오프호에 시스템 자원의 일부를 독점적으로 사용하게 하는 방식(Hong and Rappaport (1986)에서는 이를 가드채널(guard channel) 방식으로 명명)을 채택한다. 이를 모형에 반영하기 위해 CA_k 핸드오프호를 위해 예약된 BS_0 의 CA_k 전력(power)의 비율을 $1-\beta_k$ 라고 하자. 그리고 셀 0의 인접셀로부터 CA_k 핸드오프호의 도착은 도착률이 $\lambda_k(k=1, 2)$ 인 포아송과정을 따른다고 가정한다.

2.2 전파간섭모형

아래에서는 위에서 언급된 시스템환경 하에서, 셀 0의 특정 지점에 위치한 MS의 무선전파 간섭을 모형화하는 내용을 소개한다. 셀 0에 소속되어 있는 MS j 와 기지국 BS_0 사이의 거리 r_{0j} 와 BS_0 와 BS_1 을 연결한 기준축과 MS j 사이의 각도 θ_{1j} 가 주어졌다고 하자(<Figure 3> (a)). 그러면 MS j 와 기지국 BS_k 간의 거리(r_{kj})는 기하학적 분석을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_{kj} = \sqrt{r_{0j}^2 + (\sqrt{3}R)^2 - 2r_{0j}\sqrt{3}R\cos\theta_{kj}},$$

$$k = 1, \dots, 18.$$

식 (1)에서, $\theta_{kj}(k=1, \dots, 18)$ 는 BS_0 와 BS_k 를 연결한 기준축과 MS j 사이의 각도를 나타내고(<Figure 3> (a)), R 은 육각형 셀 0를 외접 하는 원의 반지름을 나타낸다(<Figure 3> (b)). 그런데, $\theta_{kj}(k=2, \dots, 18)$ 는 θ_{1j} 을 기준으로 표현될 수 있기 때문에, r_{0j} 와 θ_{1j} 이 주어지면, MS j 와 인접셀의 기지국과의 거리를 구할 수 있다. 따라서, 표기의 편의를 위해 θ_{1j} 을 단순히 θ_j 표시하기로 한다. 해석적 분석을 용이하게 하기 위해 육각형 모양인 셀 0는 <Figure 3> (b)와 같이 육각형을 외접 하는 원으로 다시 근사화하기로 한다.

무선전파환경에서 신호감쇠(signal attenuation)는 크게 경로 손실(path loss), 음영손실(shadowing loss) 그리고 다중경로페이딩(multipath fading) 등 세가지로 구분된다(Holma and Toskala 2002). 본 연구에서는 다양한 다이버시티(diversity) 기법을 이용해 효과적으로 대처할 수 있는 다중경로페이딩을 제외하고, 경로손실과 음영손실만이 포함된 전파채널 모형을 가정한다.

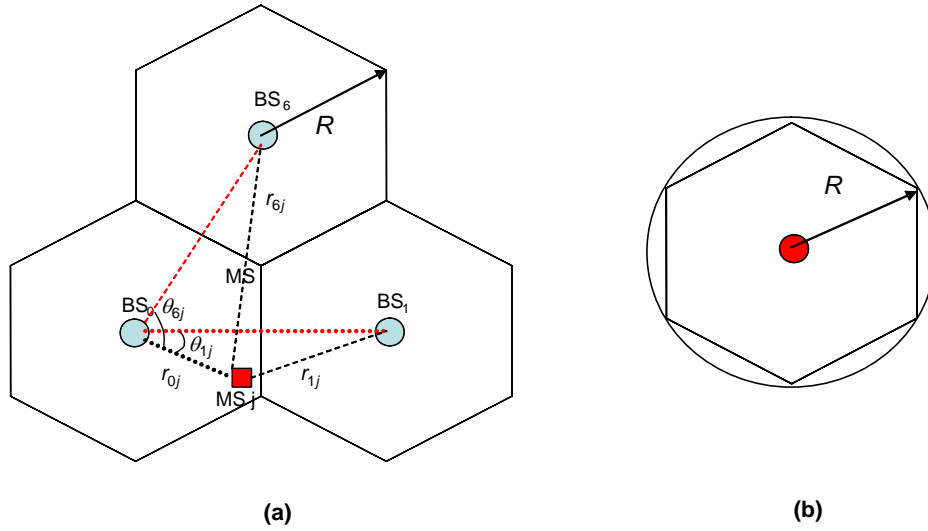


Figure 3. Cell geometry approximation

이 같은 전파채널 모형 하에서 거리가 d 이고 음영손실이 ζ (dB)인 경우 신호감쇠($L(d, \zeta)$)는 다음과 같다(Anderson *et al.* 1995; Cho and Hong 2002).

$$L(d, \zeta) = d^{-\tau} \cdot 10^{\zeta/10} \quad (2)$$

여기서, τ 는 거리급수로, 통상적으로 $\tau=4$ 로 설정한다.

Cho and Hong(2002)와 Zayana and Guisnet(1998)가 지적했듯이, 음영손실의 동태적 특성을 반영하기 위해 음영손실 ζ 는 평균이 0이고 표준편차가 σ (통상적으로, 5-12dB 값을 가짐)인 가우스 분포(Gaussian distribution)를 따르는 확률변수로 일반적으로 표현된다. 2.1절에서 가정한 시스템에서 서로 인접한 기지국간 음영손실 관계는 셀 i 의 음영손실(ζ_i)을 다음과 같이 설정하여 반영할 수 있다(Viterbi 1996).

$$\zeta_i = a\xi + b\xi_i, \quad i = 0, \dots, 18, \quad (3)$$

여기서, $E(\zeta_i) = E(\xi) = E(\xi_i)$, $\text{var}(\zeta_i) = \text{var}(\xi) = \text{var}(\xi_i)$

$$= \sigma^2, \quad E(\xi\xi_i) = 0, \quad i = 0, \dots, 18, \quad E(\xi_i\xi_j) = 0,$$

$$i (\neq j) = 0, \dots, 18. \quad \text{그리고 일반적으로 } a^2 = b^2 = 1/2.$$

셀 0에 소속된 각 MS의 서비스 특성에 따라 목표 E_b/N_0 가 보장되도록 전력자원이 할당되어야 하므로 셀 0에 소속된 j 번째 MS에게 할당되어야 할 하향 송신전력의 양 p_j (watts)는 다음과 같다(Holma and Toskala 2002; Mihailescu *et al.* 1999).

$$p_j = \frac{\nu \Gamma R}{W + \nu \Gamma \cdot R \cdot \varphi}.$$

$$\left[P_0 \varphi + \sum_{k=0}^k P_k \cdot \frac{L_{kj}}{L_{0j}} + W \cdot N_0 \cdot \frac{1}{L_{0j}} \right]. \quad (4)$$

위 식 (4)에서 사용되는 기호는 다음과 같이 요약된다.

W : 시스템 chip rate (Mcps)

N_0 : 열잡음(thermal noise) (dBm)

φ : 하향링크 직교계수 (orthogonal factor)

Γ : MS의 목표(target) E_b/N_0 (dB)

ν : MS의 활동계수(activity factor)

K : 셀 0의 마지막 인접셀 ($K=18$)

L_{kj} : k 번째 기지국 BS_k 에서 셀 0의 j 번째 MS로의 신호감쇠, 즉,

$$L_{kj} = L(r_{kj}, \zeta_k) = r_{kj}^{-\tau} \cdot 10^{\zeta_k/10}, \quad \forall j, k.$$

3. 용량 및 성능모형

본 연구에서는 연구의 목적 및 편의를 위해 용량 및 성능모형을 다음과 같이 구분한다. 우선, 용량모형은 셀 0에 있는 MS의 수가 고정되어 있어, 트래픽의 동태적 발생특성이 반영되지 않는 경우, 셀 0에서 발생하는 신규호 및 핸드오프호의 소프트 블로킹 확률을 구하는 모형을 의미한다. 다음으로, 성능모형에서는 동태적인 전파간섭과 더불어 셀 0에 신규호 및 핸드오프호의 동태적 발생에 따라 MS의 수가 확률적으로 변화하는 경우, 두 종류의 소프트 블로킹을 구하는 모형을 지칭한다. 성능모형은 용량모형을 기반으로 이루어진다. 아래에서는 논문전개의 편의를 위해, 상대적 값(dB 또는 dBm)을 단위로 하는 개념 및 기호는 모두 절대값(또는 선형값(linear value))으로 표현되어 있다고 가정한다. 그리고, 셀 0에 있는 MS들은 지리적으로 균등하게(uniformly) 분포되어 있다고 가정한다.

3.1 용량모형

용량모형은 CA 별로 특정 수의 고정된 MS가 주어진 경우를

전제한다. 아래에서 전개되는 내용은 CA별로 독립적으로 이루어지므로, 특별히 구분히 필요한 경우를 제외하고는 관련 내용 및 기호를 CA별로 구분하지 않기로 한다. 특정 CA를 사용하고 있는 셀 0에 있는 MS의 수를 N 이라고 가정하자. 2.2절의 식 (4)로부터, 셀 0 기지국 BS₀의 해당 CA의 송신전력 P_0 는 다음과 같다.

$$P_0 = \sum_{j=1}^N P_j + P_{\text{control}} = \sum_{j=1}^N \omega \cdot \left[P_0 \varphi + \sum_{k=1}^K P_k \cdot \nu_{kj} + W \cdot N_0 \cdot \nu_{0j} \right] + P_{\text{control}}. \quad (5)$$

여기서, $\omega = \frac{\nu \Gamma R}{W + \nu \Gamma \cdot R \varphi}$, $\nu_{kj} = \frac{L_{kj}}{L_{0j}} = \left[\frac{r_{kj}}{r_{0j}} \right]^{-\alpha} 10^{(\zeta_k - \zeta_0)/10}$, $k = 1, \dots, K$, $\nu_{0j} = \frac{1}{L_{0j}}$, P_{max} 는 기지국 BS₀의 최대 송신전력의 양(watts), 그리고 P_{control} 는 기지국 BS₀의 제어채널(파일럿 포함) 송신전력의 합(watts).

CDMA 시스템에서 이루어지는 호접속제어(call admission control)하에서는 셀 0의 기지국 BS₀의 송신전력(P_0)은 기지국의 최대송신전력(P_{max})보다 작아야 한다. 즉, $P_0 < P_{\text{max}}$ 이 만족되어야 한다. 따라서,

$$\omega \sum_{j=1}^N Z_j < P_{\text{max}} - P_{\text{control}} \quad (6)$$

여기서, $Z_j = \left[P_{\text{max}} \varphi + \sum_{k=1}^K P_k \cdot \nu_{kj} + W \cdot N_0 \cdot \nu_{0j} \right]$.

$Q = \omega \sum_{j=1}^N Z_j$ 라 표시하면, Q 는 전력부하(power load)로 해석될 수 있다. 한편, 수치적 계산상의 현실적인 한계로, $E(\nu_{kj} \nu_{lj}) = E(\nu_{kj}) \cdot E(\nu_{lj})$, $\forall k, l$ 라는 가정을 도입하면, 별첨에 주어진 확률변수 ν_{kj} 와 ν_{lj} 의 일차 및 이차모멘트에 의해 확률변수 Q 의 일차 및 이차 모멘트는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E(Q) = E\left(\omega \sum_{j=1}^N Z_j\right) = \omega \sum_{j=1}^N E(Z_j) = \omega \cdot N \cdot E(Z) \quad (7)$$

셀 0에 있는 MS들이 셀 내에서 균등(uniform)하게 분포되어 있다고 가정하면, MS들을 구분하는 하위첨자를 가진 변수들 (ν_{0j} , ν_{kj} , Z_j) 각각은 별첨에 주어진 바와 같이 MS별로 iid (identical independent distributed)인 확률변수가 된다. 따라서, 식 (7)의 가장 오른쪽에 주어진 기호와 같이 MS를 구분하기 위해 사용되는 하위첨자 (j)가 생략된 기호를 혼란이 없는 한 별도의 언급 없이 사용하기로 한다.

$$E(Q^2) = E\left[\left(\omega \sum_{j=1}^N Z_j\right)^2\right] = \omega^2 \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1, k \neq j}^N E(Z_j Z_k) + \sum_{j=1}^N E[Z_j^2] \right) = \omega^2 \cdot N^2 \cdot E(Z^2) \quad (8)$$

$$E(Z) = \sum_{k=1}^M E(P_k) \cdot E(\nu_{kj}) + WN_0 E(\nu_{0j}) + \varphi P_{\text{max}} = \sum_{k=1}^M E(P_k) \cdot E(\nu_k) + WN_0 E(\nu_o) + \varphi P_{\text{max}} \quad (9)$$

$$E(Z^2) = \varphi^2 P_{\text{max}}^2 + (WN_0)^2 E(\nu_o^2) + 2\varphi P_{\text{max}} WN_0 E(\nu_o) + 2\varphi P_{\text{max}} \sum_{k=1}^K E(P_k) E[\nu_k] + 2WN_0 \sum_{k=1}^K E(P_k) E[\nu_k \nu_o] + \sum_{k_1 \neq k_2} \sum_{k=1}^K E(P_{k_1}) E(P_{k_2}) E[\nu_{k_1} \nu_{k_2}] + \sum_{k=1}^K E(P_k^2) E[\nu_k^2]. \quad (10)$$

이제, 셀 0에서 CA_i에 할당되어 있는 MS의 수가 n 일 때, CA_i의 전력부하를 $Q_i(n)$ 으로 표시하면, 확률변수 $Q_i(n)$ 의 일차 및 이차모멘트는 식 (7) ~ 식 (10)을 통해 구할 수 있다. Staehle and Mäder (2004)와 Schröder and Weller (2002)에서와 같이 확률변수 전력부하가 근사적으로 로그정규분포(lognormal distribution)을 따른다고 가정하면, 셀 0에서, CA_i에 할당된 MS의 수가 n 이고, MS들에게 할당이 가능한 전력량이 Δ 일 때, 캐리어 CA_i의 소프트 블로킹확률 $B_i(n, \Delta)$ 은 다음과 같다.

$$B_i(n, \Delta) = 1 - \Pr(Q_i(n) < \Delta) = 1 - \Phi_{\mu_i(n), \epsilon(n)}(\ln(\Delta)), \quad i = 1, 2. \quad (11)$$

여기서, $\Phi_{\mu_i(n), \epsilon(n)}(\bullet)$ 은 평균이 $\mu_i(n)$ 이고 표준편차가 $\epsilon_i(n)$ 인 정규분포 (normal distribution)의 누적분포함수(cumulative distribution function)이고,

$$\mu_i(n) = \ln(E(Q_i(n))) - 1/2 \ln(1 + (\text{var}(Q_i(n))/E^2(Q_i(n))))$$

$$\epsilon(n) = \sqrt{\ln(1 + (\text{var}(Q_i(n))/E^2(Q_i(n))))}.$$

3.2 성능모형

3.1절의 용량모형에서 제시된 소프트 블로킹확률은 MS의 수가 특정한 값으로 주어진 것을 전제로 구한 것이다. 본 절에

서는 신규호 및 핸드오프호의 도착 및 호완료, CA운용 등의 동태적 특성으로 시스템 내 MS의 수가 변동하는 확률모형을 제시한다. 본 절의 성능모형을 통해 유도되는 소프트 블로킹확률을 용량모형의 그것과 구분하기 위해 용량모형에서 제시한 소프트 블로킹확률을 조건부 소프트 블로킹확률이라고 달리 부르기로 한다.

n_i 를 셀 0에서 CA_i 에 할당된 MS의 수를 나타낸다고 하자. 그리고 신규호 및 핸드오프호가 셀 0에서 채널을 점유하고 있는 채널점유시간(channel holding time)은 모두 평균이 $1/\mu_c$ 인 지수분포(exponential distribution)를 따른다고 가정한다 (Guerin 1987). 이 가정과 더불어 신규호 및 핸드오프호의 도착특성이 포아송분포를 따른다는 앞서의 가정으로부터 확률과정(stochastic process) $X = \{ \bar{n} = (n_1, n_2) | n_1 \geq 0, n_2 \geq 0 \}$ 은 아래와 같은 상태공간 (Ω_δ)을 갖는 마야코비안(Markovian) 시스템이 된다.

$$\Omega_\delta = \{ \bar{n} = (n_1, n_2) | 0 \leq n_i \leq N_i, i = 1, 2 \}, \quad (12)$$

$$\text{여기서 } N_i = \max_n \{ B_i(n, P_{\max} - P_{\text{control}}) \leq \delta \}, \\ i = 1, 2, \text{ for some } \delta (0 < \delta \leq 1).$$

CDMA 시스템에서는 전력제어, 진입제어, 혼잡제어 등을 통해 무선전파 간섭수준을 일정 수준 이하가 되도록 유지하는 것은 현실 시스템의 운용에 있어 매우 기본적인 사항이다. 이러한 현실적 고려가 허용되는 범위내에서, 식 (12)에 주어진 δ 을 가능한 작은 값을 갖도록 설정하여 상태공간을 줄이는 것이 계산시간에 유리하다. 신규호 또는 핸드오프호의 도착에 따른 조건부 소프트블로킹 확률은 새로운 호도착에 따른 시스템 상태변화와 두 종류 호의 가용전력량의 차이를 반영하여 식 (11)을 이용해 다음과 같이 근사화하기로 한다.

$$B_{in}(n_i) = B_i(n_i + 1, (1 - \beta_i) \cdot (P_{\max} - P_{\text{control}})). \quad (13)$$

$$\text{(경우 1)} \quad (n_1, n_2) \xrightarrow{\Lambda[\alpha(1 - B_{1n}(n_1 + 1)) + (1 - \alpha) B_{2n}(n_2 + 1)(1 - B_{1n}(n_1 + 1))]} (n_1 + 1, n_2), \\ 0 \leq n_1 \leq N_1 - 1, 0 \leq n_2 \leq N_2.$$

$$\text{(경우 2)} \quad (n_1, n_2) \xrightarrow{\Lambda[(1 - \alpha)(1 - B_{2n}(n_2 + 1)) + \alpha B_{1n}(n_1 + 1)(1 - B_{2n}(n_2 + 1))]} (n_1, n_2 + 1), \\ 0 \leq n_1 \leq N_1, 0 \leq n_2 \leq N_2 - 1.$$

$$\text{(경우 3)} \quad (n_1, n_2) \xrightarrow{\lambda_1(1 - B_{1h}(n_1 + 1)) + \lambda_2 B_{2h}(n_2 + 1)(1 - B_{1h}(n_1 + 1))} (n_1 + 1, n_2), \\ 0 \leq n_1 \leq N_1 - 1, 0 \leq n_2 \leq N_2.$$

$$\text{(경우 4)} \quad (n_1, n_2) \xrightarrow{\lambda_2(1 - B_{2h}(n_2 + 1)) + \lambda_1 B_{1h}(n_1 + 1)(1 - B_{2h}(n_2 + 1))} (n_1, n_2 + 1), \\ 0 \leq n_1 \leq N_1, 0 \leq n_2 \leq N_2 - 1.$$

$$\text{(경우 5)} \quad (n_1, n_2) \xrightarrow{n_1 \mu_c} (n_1 - 1, n_2), 1 \leq n_1 \leq N_1, 0 \leq n_2 \leq N_2.$$

$$\text{(경우 6)} \quad (n_1, n_2) \xrightarrow{n_2 \mu_c} (n_1, n_2 - 1), 0 \leq n_1 \leq N_1, 1 \leq n_2 \leq N_2.$$

$$B_{ih}(n_i) = B_i(n_i + 1, (P_{\max} - P_{\text{control}})). \quad (14)$$

캐리어 CA_i 에 할당된 MS의 수가 n_i 일 때, 새로이 도착하는 신규호의 조건부 소프트 블로킹확률($B_{in}(n_i)$)의 계산은 신규호의 도착으로 CA_i 에 할당된 MS의 수는 $n_i + 1$, 최대 가용전력 ($P_{\max} - P_{\text{control}}$)에서 핸드오프호를 위한 예약전력 부분이 제외된 가용전력을 가지고 식 (11)을 적용하여 계산되었다. 다음으로, 핸드오프호의 조건부 소프트 블로킹확률($B_{ih}(n_i)$)는 최대 가용전력 모두를 가용전력으로 한다. 한편, 핸드오프호는 항상 그 발생시점이 셀 경계지역이 된다. 따라서 셀 0에서 MS들이 균등하게 분포된 것을 전제로 구해진 식 (11)을 근거한 $B_{in}(n_i)$ 은 실제보다 전파간섭을 과소평가되는 경향이 있다. 그러나, 뒤에서 제시될 실험결과에 의하면, 이러한 근사화를 통해 얻어진 성능요소가 본질적으로 지ניה야 할 특성들을 지니고 있어 근사화에 따른 특성자체의 왜곡은 심하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 근사화에 따른 오류범위에 대한 파악 역시 매우 중요하므로 이와 관련된 연구는 추후 이루어져야 할 것이다. 식 (11) ~ 식 (13)으로부터 신규호 및 핸드오프호의 조건부 소프트 블로킹확률은 다음과 같은 두 가지 성질을 만족한다. 제시된 결과의 증명은 간단하므로 생략한다.

성질 1. $B_{in}(n_i)$ 과 $B_{ih}(n_i)$ 각각은 n_i 에 대해 단조증가 (strictly increasing) 한다, $i = 1, 2$.

성질 2. $B_{in}(n_i) \geq B_{ih}(n_i), \forall n_i (\geq 0), i = 1, 2$.

아래는 확률과정 X 의 가능한 여러 가지 상태전이(state-transition)를 보여준다.

(경우 1)은 새로이 발생된 신규호가 CA_1 에 할당됨으로써 일어나는 상태변화에 해당된다. 신규호는 확률 α 로 CA 탐색 순위가 $CA_1 \rightarrow CA_2$ 가 되어, 먼저 CA_1 에 할당을 시도한다. 이 시도는 확률 $1 - B_{1n}(n_1 + 1)$ 으로 성공하여 CA_1 에 신규호가 할당된다. 한편, CA 탐색 순위가 $CA_2 \rightarrow CA_1$ 이 되어 CA_2 로의 할

당을 먼저 시도했던 신규호가 CA₂에 할당이 실패하여 CA₁으로 다시 시도하고 이 시도가 성공하는 경우 역시 CA₁에 할당된 MS의 수는 증가한다. (경우 2)는 새로이 발생한 신규호가 CA₂에 할당되는 경우로(경우 1)과 비슷하게 설명될 수 있다. CA_i 핸드오프호는 현재 사용하고 있는 동일한 CA에 할당을 먼저 시도한다. 이것이 실패해야 다른 CA에 할당을 시도하게 된다. (경우 3)과 (경우 4)는 핸드오프호에 의한 상태전이 경우를 보여주고 있다. 마지막으로, (경우 5)와 (경우 6)은 통화의 완료 또는 다른 인접셀로의 이동으로 셀 0에서의 채널점유가 완료되어 발생하는 상태전이를 보여주고 있다. <Figure 4>는 상태전이 다이어그램(state-transition diagram)을 보여주고 있다.

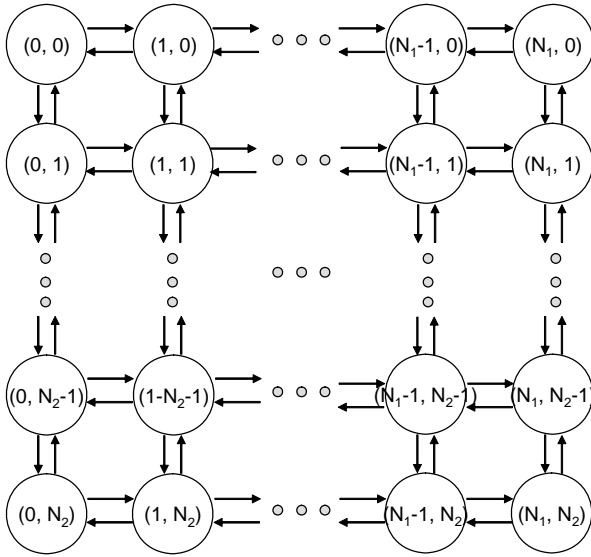


Figure 4. State-transition diagram

$\pi(n_1, n_2)$ 을 확률과정 X 가 상태 (n_1, n_2) 일 안정상태확률(steady state probability)이라고 하자. 그러면, 신규호 블록킹 확률(BP_n) 및 핸드오프호의 블록킹 확률(BP_h)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$BP_n = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \pi(n_1, n_2) B_{1n}(n_1) B_{2n}(n_2) \quad (15)$$

$$BP_h = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \pi(n_1, n_2) B_{1h}(n_1) B_{2h}(n_2) \quad (16)$$

식 (15)에 주어진 소프트 블록킹 확률과 식 (13)에서 주어진 값과의 차이를 다시 한번 구분해 보자. 식 (13)에 주어진 신규호에 대한 조건부 소프트 블록킹 확률 $B_{im}(n_i)$ 은 특정 CA(여기서는 CA_i)에 할당된 MS의 수가 n_i 으로 고정되어 있을 때, 해당 CA의 전파간섭 환경만이 고려된 신규호의 블록킹 확률을 의미한다. 반면에, 식 (15)에 주어진 신규호의 소프트 블록킹 확률(BP_n)은 MS 수에 대한 제약이 완화되어 있고, 복수 CA한

경에서 CA운용 상황이 반영되어 있다(즉, 두 CA모두 할당이 불가능할 때 호는 블록킹된다). 식 (16)은 핸드오프호의 소프트 블록킹 확률로 신규호 경우와 유사하게 식 (14)와의 관계가 설명될 수 있다. 그리고, 신규호 및 핸드오프호의 소프트 블록킹 확률간의 아래에 주어진 결과는 간단히 증명될 수 있다.

성질 3. 핸드오프호의 소프트 블록킹 확률은 신규호의 그것에 비해 같거나 작다.

즉, $BP_n \geq BP_h$.

한편, 셀 0에서의 핸드오프는 소프트 핸드오프와 하드 핸드오프 두 종류로 구분된다. 핸드오프호는 일단 현재 사용중인 CA와 동일 CA로의 소프트 핸드오프를 시도하고, 이것이 실패하면, 다른 CA로의 하드 핸드오프를 시도한다. 이 역시 실패하면, 그 핸드오프호는 블록킹된다. CDMA 이동통신 시스템에서 용량 증대 및 통화 품질 향상을 위해 하드 핸드오프는 가능한 억제되어야 할 성능요소로 인식되고 있다(Tcha *et al.* 2003). 따라서 본 연구에서는 다음 아래와 같은 새로운 성능 측정(performance measure) 요소를 도입한다.

$$PHH_{12} = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \pi(n_1, n_2) B_{1h}(n_1) (1 - B_{2h}(n_2)) \quad (17)$$

$$PHH_{21} = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \pi(n_1, n_2) B_{2h}(n_2) (1 - B_{1h}(n_1)) \quad (18)$$

PHH_{12} 는 CA₁ 핸드오프호가 셀 0에서 CA₁ 할당이 실패하고, CA₂ 할당이 성공하여 CA₁에서 CA₂로의 하드 핸드오프가 일어날 확률을 의미한다. PHH_{21} 은 그 반대의 경우이다. 따라서 단위 시간 당 발생하는 하드 핸드오프호의 수는 $\lambda_1 PHH_{12} + \lambda_2 PHH_{21}$ 이 된다.

4. 실험

제시된 용량 및 성능모형의 유용성을 확인하기 위해 본 연구에서 수행된 실험에서는 다음과 같은 가정을 도입했다. 먼저, 실험을 위한 셀룰러 시스템은 중심 셀 0을 기준으로 일차 및 이차 tier에 포함되는 18개의 셀로 구성된다(<Figure 1>). 셀 0를 포함해 일차 및 이차 tier에 속한 모든 셀에는 CA₁이 할당되어 있다고 가정한다. 셀 0에는 캐리어 CA₂ 역시 할당되어 있다. 그리고 서로 다른 인접셀 간섭 환경을 고려하기 위해, 셀 0의 18개 인접셀에서의 CA₂ 할당에 대해서는 다음과 같은 두 가지 시나리오를 생각한다: 먼저, 두 CA간 동질의(homogeneous) 무선 전파 간섭 환경을 가진 경우 대표하는 것으로, 18개의 모든 인접셀에 CA₂가 할당되어 있는 경우로 이를 시나리오 S₁이라고 부른다. 다음으로, 18개의 인접셀 중 홀수 인덱스를 가진 셀에만 CA₂가 할당되어 있는 두 CA간 비균등(non-homogeneous)

무선전파 간섭환경은 시나리오 S_2 로 부른다. 모든 셀의 반경 (R)은 동일하게 1km로 가정한다. 한편, 시스템 및 전파환경에 관련된 파라메타 값은 <Table 1>과 같이 가정하였다. 인접셀 기지국들의 송신전력량의 평균 및 표준편차는 모두 동일하다고 가정한다. 그리고 음성서비스만을 고려하고 그것의 특성으로는 데이터속도(d)는 12.2kbps, 목표 $E_b/N_0(\Gamma)$ 는 5dB 그리고 음성의 활동계수(ν)는 0.5로 가정하였다.

Table 1. Parameters for system and radio propagation

시스템 chip rate (W)	3.84(Mcps)
배경잡음밀도 (N_0)	-174dBm ($=3.9810^{-18}$ mW/Hz)
직교계수(φ)	0.6
거리급수(τ)	4dB
음영손실(ζ)의 표준편차(τ)	5dB
중심셀 기지국의 최대송신전력 (P_{max})	5000mW
중심셀 기지국의 제어채널 송신전력 ($P_{control}$)	2000mW
인접셀의 기지국의 평균 송신전력(P_k)	5000mW
인접셀 기지국이 송신전력의 표준편차	1000mW
핸드오프호 보호 위한 예약전력 양의 비율	$\beta_1 = 0.1, \beta_2 = 0.1$

<Figure 5>는 CA_2 전파 간섭환경만을 대상으로, CA_2 분포 시나리오가 S_1 인 경우와 S_2 인 경우 각각에 대해 MS의 수의 증가에 따른 신규호 및 핸드오프호의 조건부 소프트블록킹확률의 변화를 보여주고 있다. 그래프는 신규호의 조건부 소프트블록킹확률이 0.2이하까지만을 대상으로 한다. 그림에서 보듯이, 인접셀의 전파간섭이 셀 0의 시스템 용량에 직접적으로 영향을 미치는 사실을 본 연구의 용량모형이 효과적으로 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

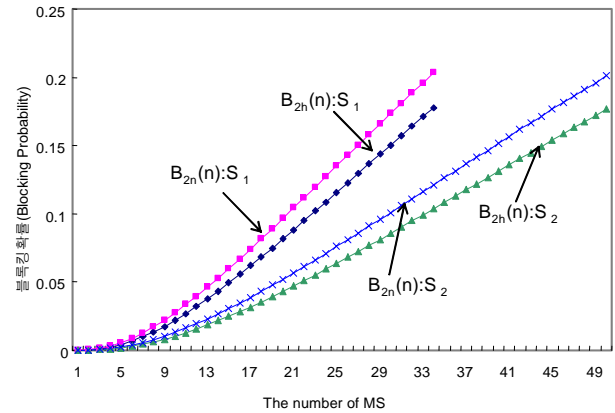


Figure 5. Conditional soft blocking probabilities versus the number of MS

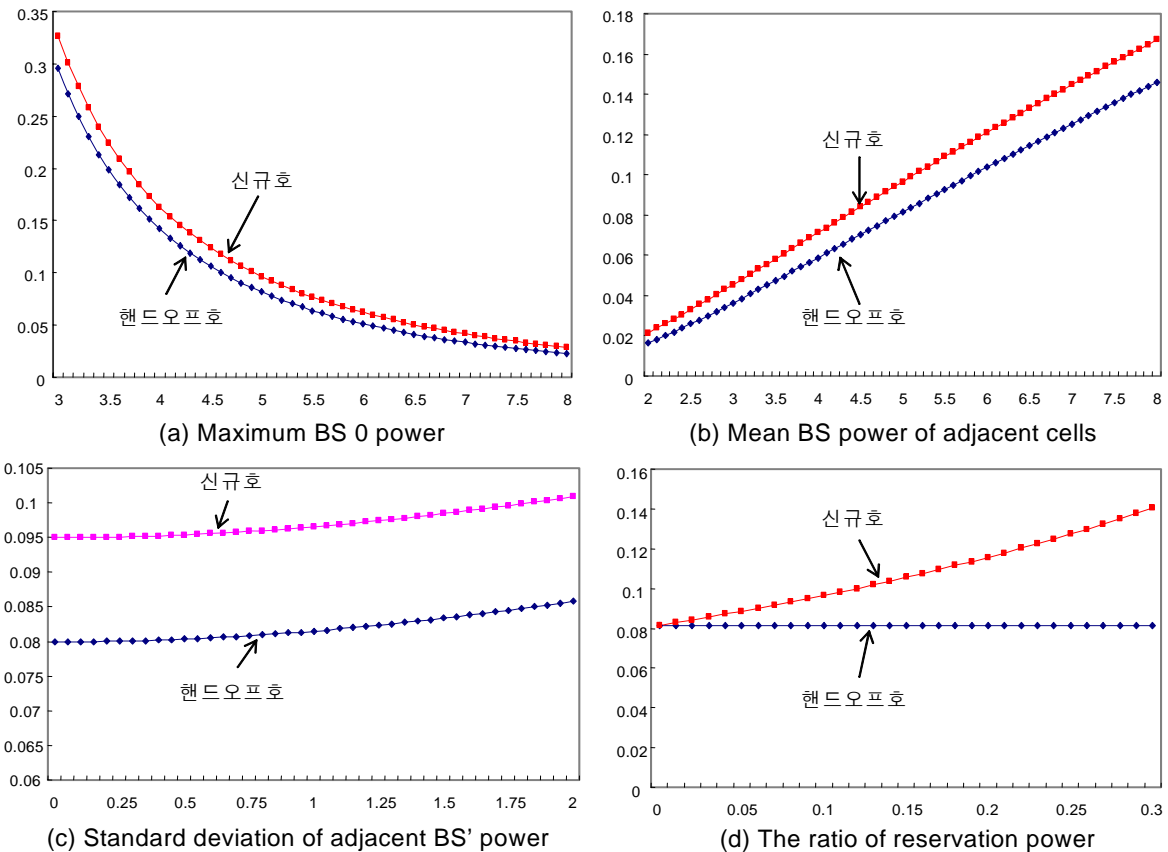


Figure 6. Conditional soft blocking probabilities versus various factors (MS의 수=20)

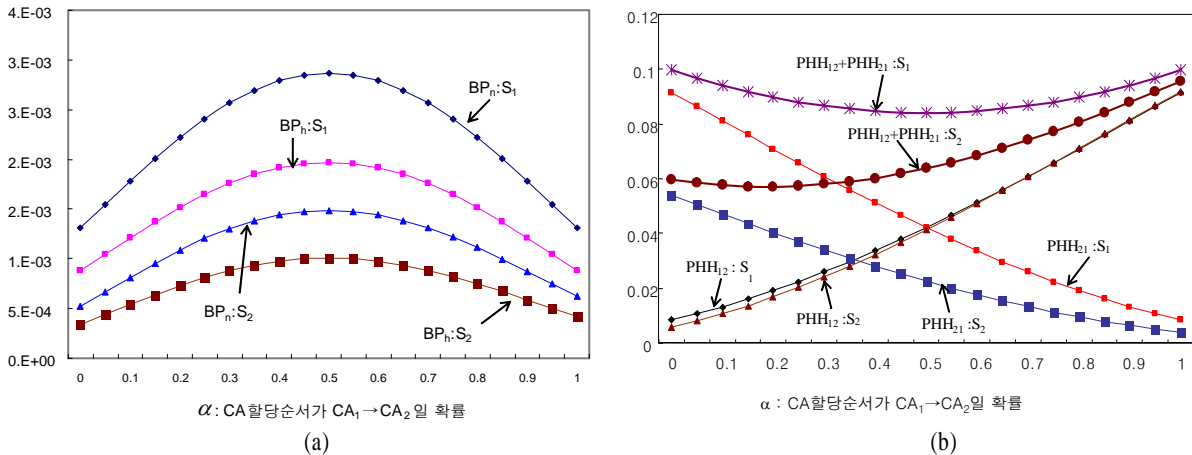


Figure 7. Soft blocking probabilities versus α

Table 2. Parameters for traffic and state-space

신규호의 발생률(λ)	120/hr
CA ₁ 및 CA ₂ 핸드오프호의 도착율(λ_1, λ_2)	20/hr, 20/hr
MS의 최대속도	40km/hr
평균 통화시간(mean call duration)	150초
truncated 상태공간 설정 파라메타(δ)	0.2

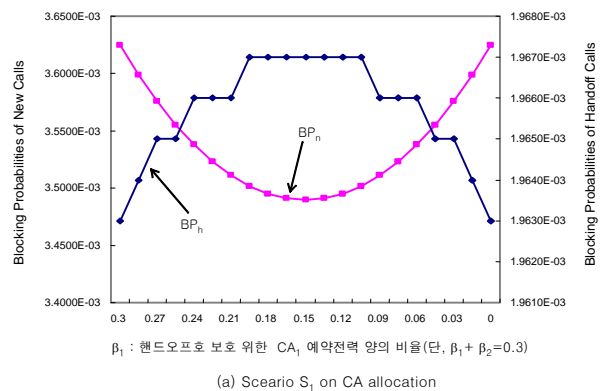
<Figure 6>은 MS의 수를 20으로 고정시키고, CA₁ 전과환경만을 대상으로 신규호 및 핸드오프호의 조건부 소프트 블로킹 확률이 셀 0 기지국의 최대출력(P_{max}) 등 4가지 요소의 변화에 어떻게 영향을 받는지를 보여주고 있다. 각 변동요소 외 다른 요소는 <Table 1>에 주어진 바와 같다. 먼저, <Figure 6> (a)에서 보여 주듯이, 셀 0의 기지국 최대출력이 증가함에 따라 신규호 및 핸드오프호의 조건부 블로킹 확률이 감소함을 확인할 수 있다. 그리고 인접셀 기지국의 송신전력 및 표준편차의 증가는 전과간섭의 증가를 초래해 셀 0의 용량 감소를 가져온다는 것을 <Figure 6>의 (b)~(c)에서 보여준다. 마지막으로, <Figure 6>의 (d)는 핸드오프호를 위한 예약전력 양이 증가함에 따라 신규호의 조건부 소프트 블로킹 확률이 커지고 있음을 보여준다. 핸드오프호는 항상 모든 전력량을 사용할 수 있기 때문에 예비전력량과 관계없이 조건부 블로킹 확률은 항상 일정하다.

MS의 수에 대한 조건화가 완화된 소프트 블로킹 확률(BP_n, BP_h) 및 하드핸드오프 확률 등 본 연구에서 제시된 성능모형에 대한 유효성을 검증하기 위해 요구되는 트래픽 대한 입력자료가 <Table 2>에 주어져 있다.

<Table 2>에서 MS의 최대속력은 연구문헌 Hong and Rappaport(1986)에서 제시된 신규호와 핸드오프호 각각의 셀체류시간(cell-residence time)에 대한 확률밀도함수를 구하는데 사용되었다. 본 연구에서는, 두 종류의 확률밀도함수를 그들의 도착율에 의해 가중 평균화된 확률밀도함수를 구하고, 이를 셀 0에 있는 MS의 셀체류시간으로 설정하였다. 이렇게 가중평균

화하여 셀체류시간을 신규호와 핸드오프호로 구분하지 않은 것은 확률과정 X 의 상태변수가 신규호 및 핸드오프호로 구분되어 있지 않기 때문이다. 가중 평균된 셀체류시간과 <Table 2>에서 주어진 지수분포를 따르는 통화시간(call duration)에 의해 셀 0에 있는 MS의 평균 채널점유시간을 구하였다.

<Figure 7>은 신규호의 CA 할당순서 CA₁ → CA₂일 확률 α 값이 증가함에 따라 복수 CA 시스템에서 셀 0의 신규호 및 핸드오프호의 소프트 블로킹 확률과 하드핸드오프 확률이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. $\alpha = 0$ (또는 $\alpha = 1$)일 때, 모든 신규호의 CA 검색순서는 CA₂ → CA₁ (CA₁ → CA₂)가 되어 CA 자원의 이용효율(utilization)은 가장 크게 되어서 신규호와 핸드오프호의 블로킹 확률이 가장 작게 된다. 그리고 α 가 0 또는 1로부터 멀어짐에 따라 이들의 블로킹 확률이 증가하는 것을 <Figure 7>의 (a)가 보여주고 있다. 한편, <Figure 7>의 (b)는 확률 α 가 증가함에 따라 변화하는 하드핸드오프 확률을 보여주고 있다. α 값이 0 또는 1에 가까울수록 셀 0에 있는 MS들에 대한 CA 할당이 CA 선택순서 최초로 검색되는 CA에 몰리게 되어 해당 CA 자원이 부족하게 되고, 이는 다시 부족한 CA를 사용중인 핸드오프호에 할당 기회가 적어져 다른 CA로의 하드핸드오프 가능성이 높아진다. 즉, α 값이 0 또는 1에 가까울수록 CA 자원이 이용효율 제고로 신규호 및 핸드오프호의 소프트



(a) Scenario S₁, on CA allocation

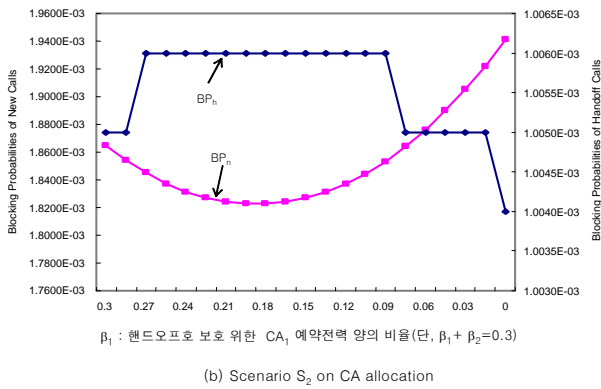


Figure 8. Soft blocking probabilities versus the relative amount of power reservation

블록킹 확률은 감소하지만, 하드핸드오프 확률은 커지는 상쇄(tradeoff)관계가 있음을 알 수 있다.

<Figure 8>은 CA1과 CA2 각각의 핸드오프호를 위한 예약전력량 비율 β_1 과 β_2 값을 그들의 합은 0.3이 되도록 고정하고 (즉, $\beta_1 + \beta_2 = 0.3$), β_1 값이 0.3에서 0으로 (β_2 는 0에서 0.3으로) 변하는 경우, 신규호 및 핸드오프호의 소프트 블록킹 확률의 변화 모습을 보여준다. CA분포가 시나리오 S_1 과 S_2 인 경우 각각이 <Figure 8>의 (a)와 (b)에 주어져 있다. 신규호의 CA할당순서에 관련된 확률 α 는 0.5로 설정하였다. 신규호의 블록킹 확률 관점에서는 예약전력을 특정 CA에 집중시키기 보다는 $(\beta_1 = 0.3$ 또는 $\beta_2 = 0.3$ 인 경우) 전파간섭 양에 의해 결정되는 CA용량에 따라 적절히 두 CA에 나누어 배분하는 유리하는 것으로 나타났다. 그리고, CA분포 시나리오 S_1 과 시나리오 S_2 에서 가장 작은 신규호 블록킹 확률을 가지는 예약전력을 비교하면, 캐리어 CA₂에 대한 전파간섭이 보다 적은 시나리오 S_2 에서의 CA₂ 예약전력량이 적어짐을 확인할 수 있다. 한편, 핸드오프호의 블록킹 확률 입장에서는 신규호의 경우와는 달리 예약전력을 특정 CA에 집중시키는 것이 보다 낮은 블록킹 확률을 가지는 것으로 나타났는데, 핸드오프호가 배타적으로 사용할 수 있는 용량자원을 나누어 사용하는 것보다는 함께 사용

하여 풀(pool)로 사용하는 것이 사용효율 제고에 보다 유리한 것에 그 원인이 있는 것으로 생각된다.

<Figure 8>과 동일한 전제하에, <Figure 9>는 하드핸드오프 확률의 변화를 시나리오 S_1 과 S_2 경우 모두를 동시에 보여주고 있다. 두 시나리오 모두에서, β_1 이 감소함에 따라 (또는 β_2 가 증가함에 따라) PHH_{12} 는 감소하고 PHH_{21} 는 증가한다. 시나리오 S_1 에서는 전체 하드핸드오프 확률($PHH_{12} + PHH_{21}$)은 거

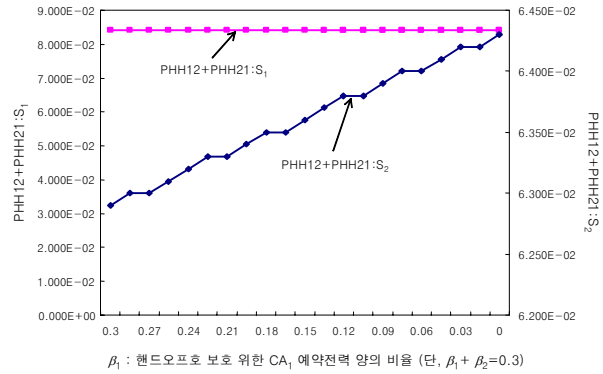


Figure 9. Hard-handoff probabilities versus the relative amount of power reservation

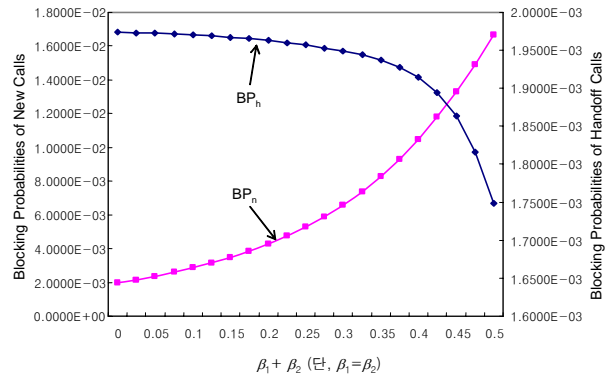


Figure 10. Hard-handoff probabilities versus the amount of power reservation

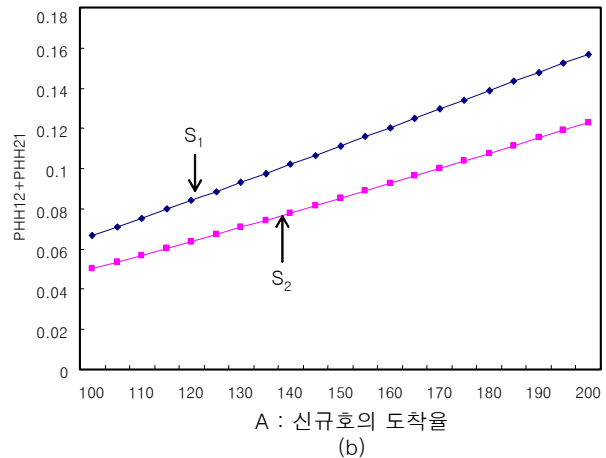
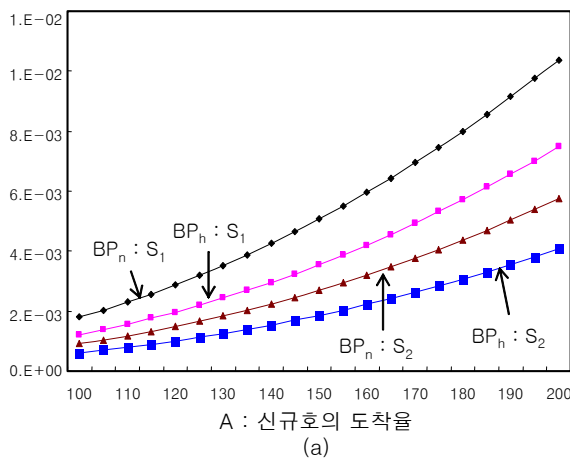


Figure 11. Soft blocking probabilities and hard-handoff probabilities versus the arrival rates of new calls

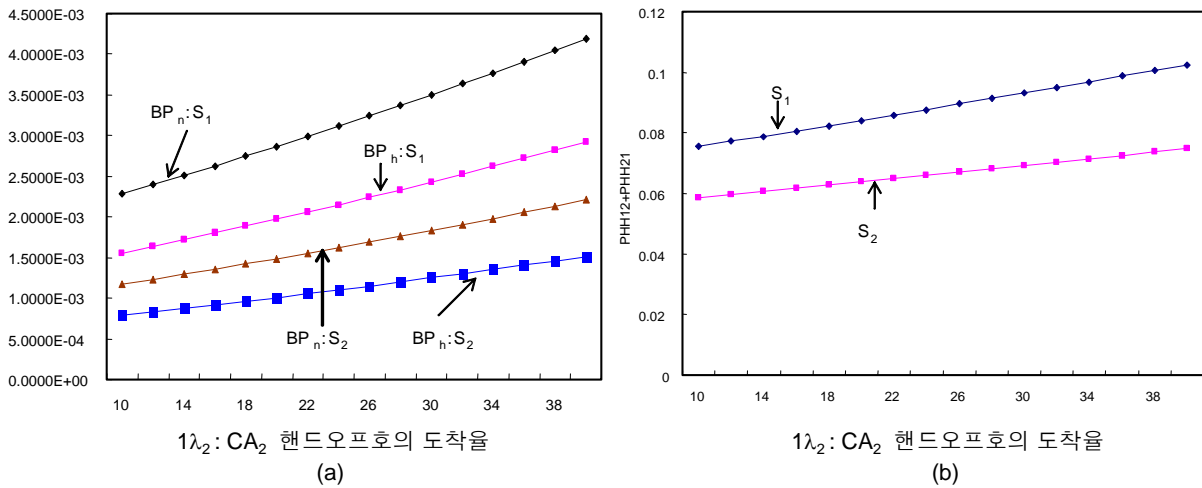


Figure 12. Soft blocking probabilities and hard-handoff probabilities versus the arrival rates of CA₂ handoffs

거의 변동이 없으나, 시나리오 S₂에서는 증가하는데, 이는 PHH₁₂의 감소분 이상으로 PHH₂₁이 증가하고 있음을 나타낸다.

<Figure 10>은 시나리오 S₁만을 대상으로 한다. <Figure 9>와는 다르게, 두 CA의 예약 전력량 비율은 동일하게 유지하면서, 두 CA의 예약전력량을 절대적으로 증가시키는 경우이다. 신규호 및 핸드오프호의 소프트 블록킹확률은 각각 단조증가 및 감소하는 것으로 나타났다. 마지막으로, <Figure 11>과 <Figure 12>는 신규호 및 핸드오프호 (특히 CA₂핸드오프호)의 도착율 λ₁과 λ₂ 각각이 증가할 때 시스템 성능요소가 어떻게 변하는지를 보여준다.

5. 결론

복수 CA환경은 도심을 포함한 트래픽 밀도가 높은 지역에서 보편적으로 존재하는 것으로, 현실 시스템 설계 및 운용에 매우 중요한 위치를 점하고 있음에도 불구하고 단일 CA환경 연구에 비해 매우 제한적으로 이루어져 왔다. 본 연구에서는 복수개의 CA를 운용하는 현실 CDMA시스템의 해석적 용량 및 성능분석에 관한 연구를 수행하였다. 복수 CA시스템의 대표적인 운용 특성인 신규호의 CA선택과 CA간 하드핸드오프 현상을 포함한 시스템 성능분석에 대한 연구로서의 의의와 더불어 본 연구의 결과는 관련 운용 파라메타의 최적화를 위한 해석적 방법론의 기초로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 관련 분야의 초기 연구로서, 다음과 같은 추가 연구가 필요하다. 먼저, 본문에서도 지적했듯이, 신규호 및 핸드오프호의 소프트 블록킹확률은 근사화 과정에서 발생하는 과대 및 과소 평가가 되는 문제점을 가지고 있다. 이를 완화시킬 수 있는 해석적 연구가 필요하다. 다음으로, 보다 정교한 성능 및 용량분석 모형을 위해서는 시스템 상태변수를 영역 또는 신규호와 핸드오프호를 구분하는 등 상태공간 차원이 확장되어야 하는

데, 이 경우 수치계산 시간을 줄일 수 있는 방안이 필요하다. 마지막으로 본 연구에서는 음성서비스만을 대상으로 하였는데, 다양한 멀티미디어서비스를 포함할 수 있는 모형으로 확장되어야 한다. 사실, 본 연구에서 제시된 대부분의 결과(특히, 용량모형)는 여러 개의 서비스가 포함되는 상황에도 거의 수정 없이 적용될 수 있으나, 이 역시 상태변수 차원의 증가를 초래한다.

별첨

(1) E(ν_k)와 E(ν_k²)

MS j의 위치가 (r_{0j}, θ_j)로 주어진 경우, ν_{kj}의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f_{\nu_{kj}}(w) = f_{\zeta}(g^{-1}(w)) \left| \frac{d(g^{-1}(w))}{dw} \right|$$

$$= \frac{1}{w} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{2} \sigma b} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{10 \log w + 10 \log (r_k/r_0)^\alpha}{\sqrt{2} \sigma b} \right]^2 \right\}$$

$$= \frac{1}{w} \frac{k}{2\sigma b \sqrt{\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{k(\ln w + \ln (r_k/r_0)^\alpha)}{\sqrt{2} \sigma b} \right]^2 \right\},$$

여기서, K=10 / ln 10.

$$E(\nu_{kj}) = \int_0^\infty w f_{\nu_{kj}}(w) dw \text{ 이고}$$

$$E(\nu_{kj}^2) = \int_0^\infty w^2 f_{\nu_{kj}}(w) dw.$$

한편, MS j의 위치가 (r_{0j}, θ_j)일 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f_{\nu_{0j}, \theta_j}(r, \theta) = \begin{cases} \frac{2r}{R} \cdot \frac{1}{2\pi}, & 0 < r \leq R, 0 < \theta \leq 2\pi. \end{cases}$$

따라서, 임의의 MS에 대한

$$E[\nu_k] = \int E[\nu_{kj}] f_{r_{0j}, \theta_j}(r, \theta) dr d\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^R E[\nu_{kj}] \frac{2r}{R^2} \cdot \frac{1}{2\pi} dr d\theta, \\ k = 1, \dots, K.$$

(2) $E[\nu_0]$ 는 위와 비슷한 방법으로 유도되므로, ν_{0j} 의 확률밀도함수만을 제시하고 나머지는 생략한다.

$$f_{\nu_{0j}}(w) = \frac{1}{w} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{10 \log r_{0j}^\alpha - 10 \log_{10} w}{\sigma} \right)^2 \right] \\ = \frac{1}{w} \frac{K}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{K(\ln r_{0j}^\alpha - \ln w)}{\sigma} \right)^2 \right], w > 0.$$

참고문헌

- Abrardo A., Giambene G., and Sennati D. (2003), Capacity evaluation of a mixed-traffic WCDMA system in the presence of load control, *IEEE Transaction on Vehicular Technol.*, **52**(3), 490-501.
- Anderson J. B., Rappaport T. S. and S. Yoshida. (1995), Propagation measurements for wireless communication channels, *IEEE Communication Magazine*, **33**, 42-44.
- Cho J. and Hong D. (2002), Statistical model of downlink interference for the performance evaluation of CDMA systems, *IEEE Communication Letters*, **16**, 494-496.
- Dean T and Flemin, P. (2002), Trunking efficiency in multi-carrier CDMA systems, *Proc. of 56th Vehicular Technology Conference*, 156-160.
- Fioroni A., Bernardi R.D. (2003), Load sharing methods in a WCDMA macro multi-carrier scenario, *Proc. of 58th Vehicular Technology Conference*, **2**, 816-820.
- Guerin R. (1987), Channel occupation time distribution in a cellular radio system, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **35**(3), 89-99.
- Gustafsson M, Jamal K, and Dahlman E. (1997), Compressed mode techniques for inter-frequency measurements in wide-band DS-SS-CDMA system, *Proc. of PIMRC 1997*, **1**, 231-235.
- Hamalainen S., Henttonen T., et al. (2003), Network effects of WCDMA compressed mode, *Proc. of 57th Vehicular Technology Conference*, **2**, 881-885.
- Holma H. and Toskala A. (2002), WCDMA for UMTS: *Radio Access for Third Generation Mobile Communications*, 2nd Edition, Wiley.
- Hong D. and Rappaport S.S. (1986), Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **35**, 77-92.
- Kashima T. and Zhu, H. (2004), Load balancing effect of inter-frequency handover with pilot power tuning in UTRAN, *Proc. of 59th Vehicular Technology Conference*, **4**, 1973-1977.
- Mihailescu C., Lagrange X., and Godlewski Ph. (1999), Radio resource management for packet transmission in UMTS WCDMA system, *Proc. of IEEE 51th VTC Fall*, **1**, 573-577.
- Schröder B. and Weller A. (2002), Prediction of the connection stability of UMTS-services in the downlink-an analytical approach, *Proc of IEEE 56th VTC-Fall*, **2**, 1105-1109.
- Siomina I. and Yusan Di (2004), Optimization of pilot power for load balancing in WCDMA networks, *Proc. of Globecom 2004*, 3872-3876.
- Staehele D. and Mäder A. (2004), An analytic modeling for deriving the node-B transmit power in heterogeneous UMTS networks, *Proc. of IEEE VTC 2004*, Spring, Milano, Italy, 2399-2403.
- Tcha, D. W., Jin, G. W. and Paik C. H. (2003), Handoff management without intercell hard handoffs in a multifrequency CDMA system, *IEEE Transaction on Vehicular Technol.*, **52**(2), 357-364.
- Tripathi, N. D. and Sharma S. (2001), Dynamic load balancing in a CDMA system with multiple carriers, *Proc. of 54th Vehicular Technology Conference*, **2**, 1010-1014.
- Valkealahti K, et al. (2002), WCDMA common pilot power control with cost function minimization, *Proc. of 56th Vehicular Technology Conference*, 2244-2247.
- Viterbi A. (1996), CDMA Principles of Spread Spectrum Communication, Addison-Wesley.
- Wang Ying et al. (2001), Performance of power-triggered and Ec/No-triggered inter-frequency handover criteria for UTRA, *Proc. of Second International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, Page(s) : 7-10.
- Zayana K. and Guisnet B. (1998), Measurements and modelization of shadowing cross-correlations between two base stations, *Proc. of ICUPC, Florence, Italy*, 101-105.
- Zeger L. and Newbury M. (1999), CDMA capacity with added carriers in a cellular network, *Bell Labs Technical Journal*, July-September.