
CDMA 셀룰라 시스템에서의 역방향 간섭 한계

김호준*

Reverse Link Interference Bounds in CDMA Cellular Systems

Ho-Joon Kim*

요 약

CDMA 셀룰라 시스템의 용량은 간섭의 양에 따라 좌우되는 특성을 갖고 있으므로 이 간섭량을 정확히 계산해야 시스템 성능 평가를 정확히 할 수 있다. 본 논문은 CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 타셀 간섭량을 계산하기 위한 근사식을 제시하였다. 이 근사식은 Riemann-Zeta 함수를 이용하여 임의의 전파 감쇄 지수에도 적용할 수 있는 특징이 있다. 그 효용을 살펴보기 위해 계산 결과와 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 제안된 근사식을 이용해 계산한 시스템 용량은 시뮬레이션을 통해 얻은 용량과 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 타셀 간섭 근사식은 복잡한 전파 환경이 고려되어야 할 계층셀 시스템에서의 간섭 및 용량 계산과 알고리즘 검증에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

ABSTRACT

The capacity of a CDMA cellular system is determined by the amount of interference, therefore the exact estimation of interference is important to evaluate the system performance. In this paper, we propose an approximated equation which calculates reverse link other cell interference in the CDMA cellular systems. The equation using Riemann-Zeta function has a property that it is useful in case of any radio propagation loss exponents. And we compare calculation results with simulation results in other to verify its usefulness. The upper bound of system capacity calculated with the proposed approximated equation gives almost alike result with the simulation. The proposed interference bound is useful to calculate system capacity and to evaluate some algorithm in a hierarchical cellular system which must be considered various propagation exponents.

키워드

CDMA cellular, other cell interference, bound approximation

1. 서 론

CDMA 셀룰라 시스템은 단위 셀당 서비스 가능한 사용자 수 즉, 용량은 FDMA 처럼 주파수 채널 수나 TDMA 처럼 시 구간 채널 수에 의해 제한 되지 않고, 자기 이외의 다른 사용자들의 신호 전력 즉, 간섭의 양에 따라 좌우되는 특성을 갖고 있다[1]. 따라서 이 간섭량을 정확히 평가해야 시스템 용량을 정확히 추정할 수 있고 전력 제어, 핸드오버 처리, 호수락 제어 등의 시스템 운영 알

고리즘이 정확히 동작할 수 있으며, 또한 새로운 알고리즘의 성능을 평가할 때 정확한 결과를 얻을 수 있다. CDMA 시스템 연구 초기에는 접속된 자기 셀을 제외한 모든 타 셀에서의 간섭량을 자기 셀의 간섭량으로 나눈 타 셀 간섭 요소(other cell interference factor)를 사용해 자기 셀의 간섭량만으로 모든 간섭량을 계산하는 단일 셀 모델을 사용하였고, 현재에도 해석적인 연구 접근 방식에서

는 계산의 편의를 위해 단일 셀 모델에 근거한 방식으로 계산하고 있다[2].

셀룰라 시스템은 다수의 타 셀을 고려하여 실제 셀룰라 시스템처럼 운영함으로써 보다 실제적인 결과를 얻을 수 있다[3]. 이 방식은 시뮬레이션을 통해서만 가능하였고 모든 셀을 고려하려면 계산 양이 많아져 소요 시간이 많아지므로 현실적이지 못하여 일부 소수의 주변 셀만 존재하는 것처럼 운영할 수밖에 없었다. 이때 몇 겹(tiers)의 이웃 셀까지를 간섭 계산 시 고려하느냐가 중요하며 흔히 일반적인 경험에 의해 결정하였다. 매크로 셀의 경우 세 겹 셀까지만을 고려하는 것이 일반적이었으나 이는 계산의 편의를 위한 것이었지 정확한 결과라고 볼 수는 없다. 또한 마이크로 및 피코 셀의 경우 셀 반경이 작고 전파 감쇄 정도가 상대적으로 작으므로 더 많은 겹의 이웃 셀까지를 고려해야만 한다. 그리고 타 셀 간섭 요소는 주변 환경에 따라 전파 감쇄 정도가 다른 모든 상황에 맞는 계수가 아니다. 따라서 충분히 큰 유한개의 이웃 셀을 고려한 셀룰라 시스템의 간섭량을 전파 감쇄 계수에 상관 없이 계산할 간편한 방법이 필요하다. 간섭과 용량을 계산하는 해석적인 접근 방식에서는 원형 셀 구조로 단순화하여 계산하거나[4], 특정 전파 감쇄 지수에서만 계산 결과를 얻을 수 있었다[5].

본 논문에서는 무한 복소 수열의 합을 계산하는 Riemann-Zeta 함수[6][7]를 사용하여 전파 감쇄 지수에 관계없이 이상적인 무한개의 타 셀이 존재할 때의 타 셀 간섭량과 임의의 타 셀 겹수에 따른 타셀 간섭량 상한과 하한을 계산할 수 있는 근사식을 제시한다. 또한 wrap-around 기법을 사용하여[7][8] 임의의 타 셀 겹수까지 구성할 수 있는 가변 다중 셀 상에서 시뮬레이션을 수행하고 근사식의 결과와 비교한다.

II장은 셀 모델과 간섭 계산이 전개되고 III장은 최대 간섭 한계식 및 최소간섭 한계식이 계산되고 IV장은 시스템 용량이 전개되고 V장은 수치 계산과 시뮬레이션 결과가 비교되며 VI장에 본 연구의 결론을 맺는다.

II. 셀 모델과 간섭 계산

CDMA 시스템의 용량은 동일 셀 내에서의 간섭량과 동일 셀을 둘러싸고 있는 여러 겹 타 셀에서의 간섭량에 의해 결정된다. 이 타 셀 간섭은 고려하는 겹수에 따라 증가하는 특성을 갖는다. 이 간섭량을 최소화하고 셀 용량을 최대로 하면서 모든 사용자에게 균일한 통화 품질을 제공하기 위해 CDMA 시스템에서는 모든 단말의 전력은 거리나 기타 전파 감쇄 요인에 상관없이 일정한 전력으로 기지국에 수신되도록 하는 전력 제어 방식을 필수적으로 사용하게 된다.

본 논문에서는 모든 셀은 동일한 모양과 크기이며 동일한 수의 사용자가 접속되어 있고 모든 사용자는 셀 전체에 균일하게 분포되어 있는 경우를 고려하며 전파 감쇄 지수에 따라 거리에 반비례하는 전파 전파 모델을 사용한다.

셀룰라 시스템은 정육각형 셀이 규칙적인 격자점에 존재하는 형태로 분석하는 것이 일반적이나 일부 연구에서는 분석이 쉽도록 단순화된 겹 구성을 사용하기도 하였다[4]. 본 논문에서는 그림 1과 같은 일반적인 정육각형 셀 구성 모델을 사용한다. 즉 중점으로부터 꼭지점까지의 거리가 R 인 정육각형 셀이 겹침이나 빈틈이 없이 촘촘히 구성된 형태를 갖는다[10]. 이때 중심 셀의 여섯 면에 접하고 있는 여섯 개의 셀을 첫번째 겹 셀 군이라 하고, 그 다음 열 두개의 셀을 두 번째 겹 셀 군이라 하며 이와 같은 형태로 일반적으로 n 겹 셀 군이 존재한다. 이 셀 구조는 셀 $C_{0,0}$ 의 중심점을 정점으로 60° 마다 기본형 셀 배치가 반복되는 대칭 구조를 가지고 있으며, n 겹 셀 군의 기본형은 n 개의 셀로 구성되므로 n 겹 셀 군에는 총 $6n$ 개의 셀이 존재한다. 한 번이 접하는 인접 두 셀 중심간의 기본 거리를 $2H$, 중심셀 $C_{0,0}$ 과 n 겹 셀 군 중 한 셀과의 중심 거리는 D , 한 셀에 속해있는 임의의 한 단말로부터의 중심 셀 기지국과의 거리는 D_x 로 정의한다. 또한 그 단말로부터 그 셀 기지국까지의 거리를 r_x 라 한다. 이때 n 겹 셀군 중 한 셀과 중심 셀과의 거리는 근사적으로 $D=2Hn=\sqrt{3}Rn$ 이 된다.

각 n 겹 셀 군의 면적은 다음과 같다.

$$A_n = 6n A_0 \quad (1)$$

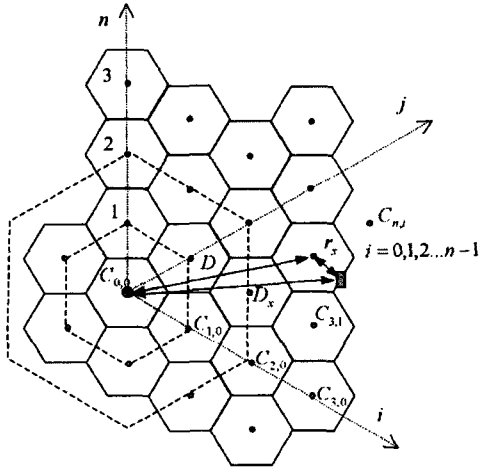


그림 1. 셀 구조와 좌표 체계
Fig. 1 Cell configuration and coordinate system

이때 중심셀의 면적 $A_0 = 3\sqrt{3} R^2/2$ 이고 n 은 자연수다. n 겹에 있는 셀 중 하나를 C_x 라고 정의하고 이 셀에 속해 있으며 중심으로부터 r_x 만큼 떨어져 있는 한 단말이 송신한 전력은 P_x 라 하고 기지국에 수신된 전력을 P_0 라 하면 거리에 상관없이 일정한 전력으로 기지국에 수신되도록 완벽한 전력 제어를 이루었다는 전제 하에 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_x = P_0 r_x^\gamma \quad (2)$$

여기서 γ 는 거리에 따른 전파 감쇄지수로서 전파 환경에 따라 2~4의 값을 일반적으로 사용한다[12]. 식(2)와 같은 각 단말의 전력은 거리가 D_x 인 중심셀 $C_{0,0}$ 의 기지국에 도달하여 다음과 같이 개별 간섭이 된다.

$$I_x = P_0 r_x^\gamma D_x^{-\gamma} \quad (3)$$

전 타 셀 영역에 걸쳐 분포한 모든 단말들에서 이 개별 간섭을 합산하면 총 타셀 간섭량을 구할 수 있다.

중심 셀의 기지국에서 수신되는 역방향 간섭 신호

는 자기 셀 범위 내의 다른 사용자들로부터의 간섭인 자기 셀 간섭과 그 외의 타 셀의 다른 사용자들로부터의 간섭인 타 셀 간섭으로 나누어 생각할 수 있다. 각 셀에 N_0 개의 단말이 동작하고 있을 때 완벽한 전력 제어 상태에서의 자기 셀 간섭은 $P_0(N_0-1)$ 이 되고, 타 셀 간섭은 다음 식과 같이 계산할 수 있다[2].

$$I_{other} = \oint_{other} P_0 r_x^\gamma D_x^{-\gamma} \rho dA$$

$$= \frac{2 N_0 P_0}{3\sqrt{3} R^2} \oint_{other} \left(\frac{r_x}{D_x} \right)^\gamma dA \quad (4)$$

이 타 셀 간섭 계산을 위한 적분은 간단히 해결할 수 없으며 $\gamma=4$ 와 같이 특별한 조건 하에 근사적으로 해결하거나[5] 시뮬레이션을 통해 계산한다[2]. 본 논문에서는 모든 감쇄 정수 γ 에 대해 타 셀 간섭의 최대와 최소값 계산이 가능한 근사식을 제시하고자 한다.

III. 간섭 한계

1. 최대 간섭 상한선

단말들은 정육각형 셀에 고루 분포하는 것이 정상이나 그림 2와 같이 중심셀에 가장 근접한 곳에 집중되거나 가장 먼 곳에 집중되면 최대 간섭과 최소 간섭이 발생한다.

그 거리의 차이는 셀 중점 거리에서 정육각형 변과의 거리인 H 만큼 가깝거나 먼 것으로 단순화할 수 있다. 즉 N_0 개의 단말이 모두 $D-H$ 위치에

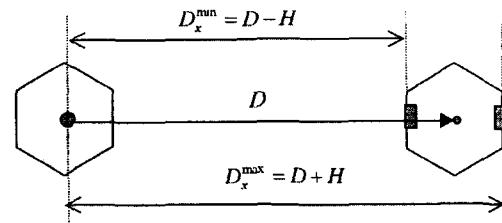


그림 2. 단말의 위치에 따른 간섭의 극한
Fig. 2 Interference bounds at mobile location

있을 때 중심 셀로의 간섭이 최대가 된다. 이때 $H=R\sqrt{3}/2$ 인 관계가 있다.

최대 간섭 상한선을 계산은 다음과 같이 할 수 있다. 식(1)(2)(3)에 $r_x = H, D_x = D-H$ 를 적용하면 n 겹 셀군으로부터의 간섭량 상한은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} I &\leq 6 P_0 N_0 n H^\gamma (D-H)^{-\gamma} \\ &= 6 P_0 N_0 \frac{n H^\gamma}{(\sqrt{3}Rn-H)^\gamma} \\ &= \frac{6 P_0 N_0 H^\gamma}{(\sqrt{3}R)^\gamma} \frac{n}{\left(n-\frac{H}{\sqrt{3}R}\right)^\gamma} \\ &= \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \frac{n}{(n-0.5)^\gamma} = I_{\max}^n \end{aligned} \quad (5)$$

임의의 셀 겹 수 n 까지 간섭의 합은 식(6)과 같은 상한 한계식으로 주어진다.

$$I(n) \leq \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k-0.5)^\gamma} = I_{\max}(n) \quad (6)$$

$m > 1$ 이고 $n > 0$ 일때 수렴하는 Riemann-Zeta 함수식[11]인

$\zeta(m, n) = \sum_{i=0}^{\infty} 1/(i+n)^m$ 를 적용하기 위해 식(6)을 변형하고 n 이 로 접근할 때의 간섭 상한식을 구한 것은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} I(n) &\leq \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=1}^n \frac{k-0.5}{(k-0.5)^\gamma} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^n \frac{0.5}{(k-0.5)^\gamma} \right\} \\ &= \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k+1-0.5)^{\gamma-1}} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{0.5}{(k+1-0.5)^\gamma} \right\} = I_{\max}(n) \\ I(n=\infty) &\leq \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+0.5)^{\gamma-1}} \right. \\ &\quad \left. + 0.5 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+0.5)^\gamma} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \{ \zeta(\gamma-1, 0.5) + 0.5 \zeta(\gamma, 0.5) \} \\ &= I_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

2. 최소 간섭 하한선

그림 2에서 N_0 개의 단말이 모두 $D+H$ 위치에 있을 때 중심 셀로의 간섭이 최소가 된다. 따라서 상한선을 구하는 방식과 같은 방법으로 다음과 같이 최소 간섭 하한선을 계산할 수 있다. 즉, 식(1)(2)(3)에 $r_x = H, D_x = D+H$ 를 적용하면 n 겹 셀군으로부터의 간섭량 하한은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} I &\geq 6 P_0 N_0 n H^\gamma (D+H)^{-\gamma} \\ &= 6 P_0 N_0 \frac{n H^\gamma}{(\sqrt{3}Rn+H)^\gamma} \\ &= \frac{6 P_0 N_0 H^\gamma}{(\sqrt{3}R)^\gamma} \frac{n}{\left(n+\frac{H}{\sqrt{3}R}\right)^\gamma} \\ &= \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \frac{n}{(n+0.5)^\gamma} = I_{\min}^n \end{aligned} \quad (8)$$

임의의 셀 겹 수 n 까지 간섭의 합은 식(9)와 같은 하한 한계식으로 주어진다.

$$I(n) \geq \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k+0.5)^\gamma} = I_{\min}(n) \quad (9)$$

식(9)를 변형하고 n 이 ∞ 로 접근할 때의 간섭 하한식을 구한 것은 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} I(n) &\geq \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=1}^n \frac{k+0.5}{(k+0.5)^\gamma} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^n \frac{-0.5}{(k+0.5)^\gamma} \right\} \\ &= \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k+1+0.5)^{\gamma-1}} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{0.5}{(k+1+0.5)^\gamma} \right\} = I_{\max}(n) \\ I(n=\infty) &\geq \frac{6 P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+1.5)^{\gamma-1}} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -0.5 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+1.5)^{\gamma}} \} \\
 & = \frac{6 P_0 N_0}{2^{\gamma}} \{ \zeta(\gamma-1, 1.5) 10.5 \zeta(\gamma, 1.5) \} \\
 & = I_{\min} \tag{10}
 \end{aligned}$$

IV. 용량 한계

CDMA 시스템에서 요구되는 성능을 내기 위해서는 신호대 간섭비 목표가 설정되며 이는 자기셀 간섭과 타셀 간섭량에 의해 결정된다. 식(7)과 식(10)에서 구한 타셀 간섭량 상한과 하한에 의해 다음과 같이 신호대 간섭비 상한과 하한이 결정된다.

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{S}{I}\right)_{\min} & = \frac{P_0}{P_0(N_0-1) + I_o^{\max}(T=\infty)} \leq \frac{S}{I} \\
 & \leq \frac{P_0}{P_0(N_0-1) + I_o^{\min}(T=\infty)} = \left(\frac{S}{I}\right)_{\max} \tag{11}
 \end{aligned}$$

이는 타셀 겹 수를 무한대까지 고려한 이상적인 셀 구조에서의 결과이며 실제 환경을 고려하거나 계산의 편의를 위해 임의의 겹 수까지만 타셀 간섭량에 고려할 경우 시스템의 셀당 사용자 수는 상한이 식(12-a), 하한이 식(12-b)와 같이 계산된다.

$$N_0(n) \leq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + 6 \frac{1}{2^{\gamma}} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k+0.5)^{\gamma}}} \tag{12-a}$$

$$N_0(n) \geq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + 6 \frac{1}{2^{\gamma}} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k-0.5)^{\gamma}}} \tag{12-b}$$

이상적인 경우로 무한개의 간섭 셀을 고려한 경우의 시스템 용량 하한과 상한은 각각 식(13-a)와 (13-b)로 구할 수 있다.

$$N_0(n=\infty) \geq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \{ \zeta(\gamma-1, 0.5) + 0.5 \zeta(\gamma, 0.5) \}} \tag{13-a}$$

$$N_0(n=\infty) \geq \frac{\frac{I}{S} + 1}{1 + I_{\infty} \{ \zeta(\gamma-1, 1.5) - 0.5 \zeta(\gamma, 1.5) \}} \tag{13-b}$$

V. 수치 및 시뮬레이션 결과

식(7)과 식(10)을 이용하여 이상적인 타셀 간섭의 최대값 I_{\max} 와 I_{\min} 을 구하고 특정 계층까지 타셀 간섭의 합 $I_{\max}(n)$ 과 $I_{\min}(n)$ 을 식(6)과 식(9)를 이용하여 구하면 여러 가지 전파 감쇄 지수에 대해 타셀 겹 수에 따른 간섭의 정규화값 $I_{\max}(n)/I_{\max}$ 및 $I_{\min}(n)/I_{\min}$ 을 계산할 수 있다. 이때 I_{\max} 과 I_{\min} 을 계산할 때 사용하는 Riemann-Zeta 함수는 무한 급수합으로 계산하는 대신 다음과 같은 유한 급수 근사식으로 계산하였다[11].

$$\begin{aligned}
 \zeta(m, n) & = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(n+i)^m} \\
 & = \sum_{i=0}^N \frac{1}{(n+i)^m} + \frac{1}{(m-1)(N+n)^{m-1}} + R_N \tag{14}
 \end{aligned}$$

이때 N 은 유한한 타셀 겹 수로서 충분히 클 경우 R_N 은 앞의 두 항에 비해 무시할 수 있을 만큼 작아진다. 본 연구에서는 $N = 1000$ 으로하여 10^{-10} 이하의 오차가 나도록 계산하였다.

그림 3은 식(6)(7)에 의한 간섭의 상한의 변화를 타셀 겹 수의 함수로 표현한 그림으로 각 전파 감쇄 지수에 대해 최대 간섭 상한값으로 정규화한 것을 표현한 것이다. 이를 통해 전파 감쇄 지수에 따라 타셀 간섭량이 최대값에 어느정도 빠르게 수렴하는 지를 알 수 있다. γ 가 3.0 이상일 경우 타셀이 세 겹 이상이면 최대 간섭의 95% 이상 포함하나 그 이하에서는 20 겹 이상 고려해야 최대 값에 겨우 근접함을 알 수 있다.

그림 4는 식(9)(10)에 의한 간섭의 하한의 변화를 타셀 겹 수의 함수로 표현한 것으로 각 전파 감쇄 지수에 대해 최대 간섭 하한값으로 정규화한 것을 표현한 것이다. 그림3과 달리 γ 가 3.0 이상일 경우 최대 간섭에 수렴하는 겹 수가 10 이상이어야 하고 그 이하일 경우는 20 이상이어야 함을 알 수 있다.

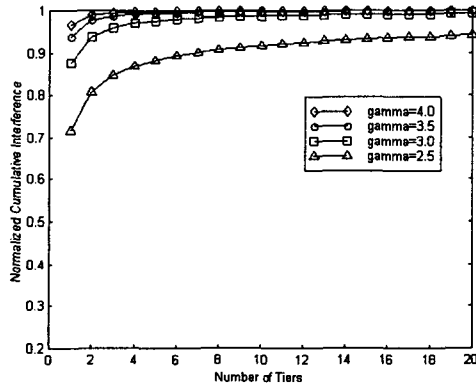


그림 3. 타셀 겹수에 따른 정규화 누적 간섭(상한값)
Fig. 3 Normalized cumulative interference(upper bound) v.s. other cell tier number

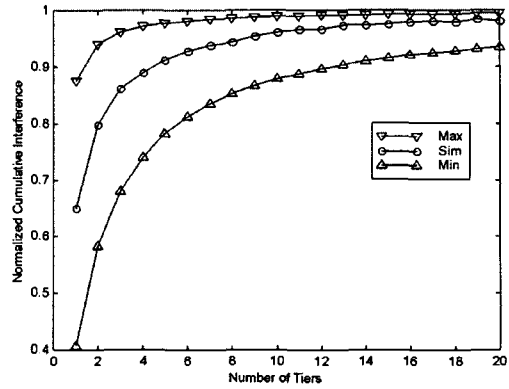


그림 5. 간섭 한계 계산과 시뮬레이션 결과($\gamma=3.0$)
Fig. 5 Calculation of interference bounds and simulation results($\gamma=3.0$)

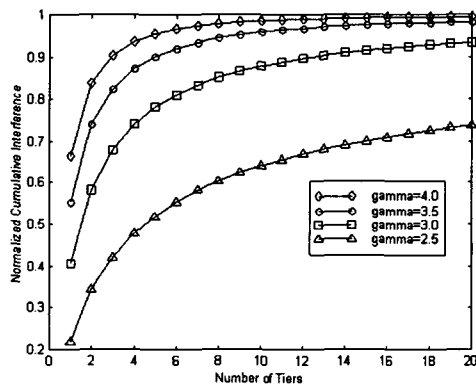


그림 4. 타셀 겹 수에 따른 정규화 누적 간섭(하한값)
Fig. 4 Normalized cumulative interference(lower bound) v.s. other cell tier number

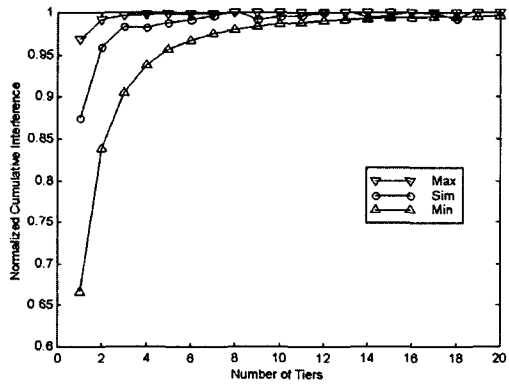


그림 6. 간섭 한계 계산과 시뮬레이션 결과($\gamma=4.0$)
Fig. 6 Calculation of interference bounds and simulation results($\gamma=4.0$)

그림 3과 그림4의 결과를 보면 일반적으로 타셀 간섭 계산시 세 겹까지만을 고려했던 방식은 간섭을 충분히 고려하지 못했음을 알 수 있다. 이는 그림7,8,9에서 살펴볼 용량의 계산 시 고려해야 할 타셀 겹수에서도 확인할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 계산식에 의한 간섭 한계를 확인하기 위해 그림1과 같은 구성의 셀룰라 시스템 모델 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이터는 wrap around 기법을 사용하여 임의의 타셀 겹수를 설정할 수 있으며[9], 이때 각 셀은 중심으로

부터 최외각 꼭지점까지의 거리 $R = 1 \text{ Km}$ 인 동일 크기의 셀로 하였고, 각 셀에는 $N_0 = 70$ 명의 사용자가 전 영역에 균일하게 분포하도록 하였다. $P_0 = -20 \text{ dBm}$ 으로 전력 제어 되도록 하였으며 쇠도우밍 감쇄는 고려하지 않았고 음성 활동도는 1로 설정하였으며 전방향성 안테나 사용을 가정했다. 그림5,6은 각각 $\gamma=3.0$ 일 때와 $\gamma=4.0$ 일 때 계산식에 의한 간섭 상한과 하한 계산 결과 그리고 시뮬레이션에 의한 간섭이 타셀 겹수에 따라 변화한 것을 비교한 그림이다. 시뮬레이션 결과가 계산식 상한 하한의 평균을 따라가며 겹수가 증가함에 따라 상

한에 근접함을 알 수 있다.

그림 7은 식 (12-a,b)에 의해 계산한 셀 용량의 상한과 하한을 타셀 겹 수에 따라 변화하는 것을 그린 것이다. 전파 감쇄 지수가 클수록 용량이 크며, 용량의 하한은 큰 변화가 없으나 상한은 간섭 계산 시 고려하는 타 셀 겹 수가 늘어날수록 감소하는 특성을 보인다. 또한 식(6)(9)(12)에서 보듯이 간섭의 하한은 용량의 상한과 관계가 있고 간섭의 상한은 용량의 하한과 관계가 있으며 시스템의 최

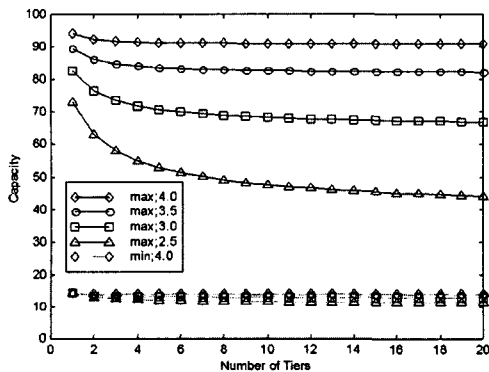


그림 7. 타 셀 겹 수에 따른 용량 한계
Fig. 7 Capacity bounds v.s. other cell tier number

대 용량을 추정할 때 간섭 하한이 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 감쇄 지수가 3.5 이상일 때는 타셀 겹 수를 3 이상 고려하면 최대 용량의 10% 오차 이내로 수렴하나 3.0 이하 일 때는 타셀 겹 수를 10 이상 고려해야 수렴함을 알 수 있다.

그림 8과 9는 각각 $\gamma=3.0$ 일 때와 $\gamma=4.0$ 일 때 계산식에 의한 용량의 상한과 하한 그리고 시뮬레이션에 의한 간섭을 타 셀 겹 수에 따라 변화를 비교한 그림이다. 시뮬레이션은 각 셀에서의 사용자 수를 10명에서 100명까지 증가시키면서 임의의 위치에 분포시키고 완벽한 전력 제어가 이루어지도록 하여 역방향 신호대 간섭비가 -20 dB 이하이면 통화 품질 이탈(outage)로 간주하고 outage 확률이 0.02 일 때의 사용자 수를 셀의 용량으로 결정하였다. 이 시뮬레이션은 snap-shot 방식으로 10000회 실행하였고 중심 셀과 첫 번째 인접 셀을 포함하여 총 7개의 셀을 통계에 포함하였다. 근사식 (9)와 (12-a)의 계산에 의한 용량 상한선이 시뮬레이션

결과와 근접하게 나타났다. 따라서 셀 용량 상한식 (12-a)는 근사 계산에 유용하게 사용할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8.에서 보듯이 γ 가 3.0 이하 일 경우는 10

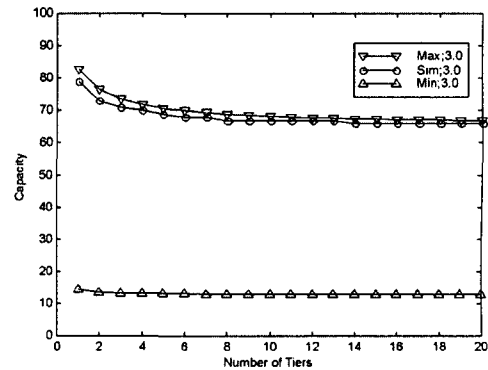


그림 8. 셀 용량의 한계 및 시뮬레이션 결과($\gamma=3.0$)
Fig. 8 Cell capacity bounds and simulation results($\gamma=3.0$)

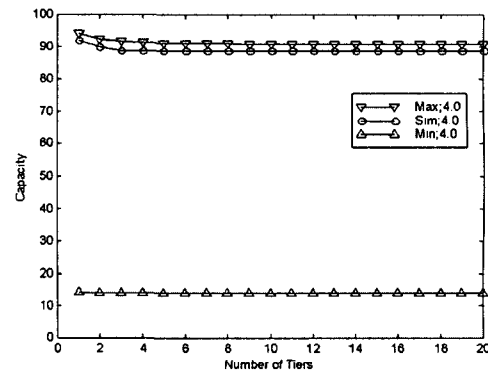


그림 9. 셀 용량의 한계 및 시뮬레이션 결과($\gamma=4.0$)
Fig. 9 Cell capacity bounds and simulation results($\gamma=4.0$)

겹 이상의 타 셀을 간섭에 포함 시켜야 인정할 만한 용량 결과로 여길 수 있으며, 그림 9에서처럼 γ 가 4.0 이상일 때는 간섭으로 고려한 셀 겹 수가 3 이상이면 타셀 간섭이 충분히 고려되어 인정할 만한 용량 결과로 간주할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문은 CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 타셀 간섭량을 Riemann-Zeta 함수를 이용하여 임의의 전파 감쇄 지수에도 적용할 수 있는 근사식을 제시하고 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 효용을 살펴보았다. 제안된 근사식을 이용해 계산한 시스템 용량 상한식은 시뮬레이션을 통해 얻은 용량과 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 간섭 및 용량 계산 결과를 분석하여 전파 감쇄 지수에 따라 계산 및 시뮬레이션에서 고려해야 할 타셀 겹수에 많은 차이가 남을 알 수 있었다. 즉, 전파 감쇄 지수가 3.5 이상일 경우는 3 겹 셀까지, 그리고 3.0 이하 일 경우는 10 겹 셀까지 간섭에 포함 시켜야 인정할 만한 결과가 나옴을 알 수 있었다. 따라서 제안된 타셀 간섭 근사식은 복잡한 전파 환경이 고려되어야 할 계층셀 시스템에서의 간섭 및 용량 계산과 알고리즘 검증에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 향후에는 순방향 타셀 간섭 근사식을 찾는 것과 첫 번째 이웃 겹 셀만 고려하고 나머지 간섭을 보정해서 동일한 결과를 얻을 수 있도록 일반화된 보정 계수를 찾는 것이 필요하다.

참고문헌

[1] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications*, Prentice Hall, ISBN 0-13-461-88-1, U.S.A., 1996.

[2] Viterbi, A.J., Viterbi, A.M., Zehavi, E., "Other-cell interference in cellular power-controlled CDMA," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, Iss. 2, pp.1501-1504, Feb/Mar/Apr 1994.

[3] O. G. Lauro, A.H. Aghvami, *Resource Allocation in Hierarchical Cellular Systems*, Artech House Publishers, pp.51~54, 2000.

[4] David Munoz-Rodriguez, Osca Uribe-Arambula, Cesar Vargas, Hector Maturino, "Interference Bounds in Power Controlled Systems," *IEEE Communications Letters*, Vol.4, No. 12, pp. 398-401, December 2000.

[5] Kyoung Il Kim, "CDMA Cellular Engineering Issues," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 3, pp. 345-350, August, 1993.

[6] J. Miller, V.S. Adamchik, Derivatives of the Hurwitz Zeta function for rational arguments, *J. Computer Appl. Math.*, No.100, pp.201-206, 1999.

[7] <http://mathworld.wolfram.com/HurwitzZetaFunction.html>

[8] Jens Zander, S. L. Kim, *Radio Resource Management for Wireless Networks*, Artech House Publishers, pp.336~337, 2001.

[9] 김호준, 윤상흠, "CDMA 시스템 시뮬레이션을 위한 효율적인 셀 모델에 관한 연구," 17-81. 한국통신학회 하계종합학술발표회, 2002.

[10] David Lee, CeXu, "The Effect of Narrowbeam Antenna and Multiple Tiers on System Capacity in CDMA Wireless Local Loop," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No.9, pp.110-114, September, 1997.

[11] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, p.1101, 5th ed., Academic Press:San Diego, 1994.

[12] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, 2nd Ed., Prentice Hall, p.139, NJ, 2002.

저자소개



김호준(Ho-Joon Kim)

1986년 2월 : 연세대학교 전기공학과 공학사
 1988년 2월 : 연세대학교 전기공학과 공학석사
 1988년 3월~1993년 4월 : 삼성종합기술원 주임연구원
 1998년 8월 : 연세대학교 전기공학과 공학박사
 1999년 2월~2001년 3월 : 삼성전자 통신연구소 수석연구원
 2001년 3월~현재 : 전주대학교 정보기술컴퓨터공학부 조교수
 *관심분야: 통신 시스템, 이동통신, IMT-2000 System and Beyond