

# CDMA 셀룰라 시스템에서의 역방향 간섭 한계

김호준<sup>0</sup> 윤상흠  
 전주대학교  
 {junekim<sup>0</sup>, shy}@jeonju.ac.kr

## Reverse Link Interference Bounds in CDMA Cellular Systems

Hojoon Kim<sup>0</sup> Sangheum Yoon  
 School of Information Technology and Computer Engineering  
 Jeonju University

### 요약

CDMA 셀룰라 시스템의 용량은 간섭의 양에 따라 결정되므로 이 간섭량을 정확히 계산해야 시스템 성능 평가를 정확히 할 수 있다. 본 논문은 CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 타셀 간섭량을 계산하기 위해 Riemann-Zeta 함수를 이용하여 임의의 전파 감쇄 지수에도 적용할 수 있는 근사식을 제시하고 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 효용을 살펴 보았다. 제안된 근사식을 이용해 계산한 시스템 용량 상한식은 시뮬레이션을 통해 얻은 용량과 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 타셀 간섭 근사식은 복잡한 전파 환경이 고려되어야 할 계층 셀 시스템에서의 간섭 및 용량 계산과 알고리즘 검증에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 1. 서론

CDMA 셀룰라 시스템은 용량이 간섭량에 의해 좌우되므로 시스템 성능을 평가 할 때 간단하고 정확한 간섭량 계산이 필요하다<sup>[1]</sup>. CDMA 시스템 연구 초기에는 이웃 셀에서의 간섭량을 자기셀의 간섭량으로부터 비례상수만큼 더해주는 방식으로 단일 셀 모델을 사용하여 계산하였고, 현재에도 해석적인 연구에서는 이 단일 셀 모델에 타셀 간섭율(other cell interference factor)을 고려하는 단순한 방식으로 계산하고 있다<sup>[2]</sup>. 타셀 간섭율은 주변 환경에 따라 전파 감쇄 정도가 다른 모든 상황에 맞는 계수가 아니다. 시뮬레이션은 다수의 주변 셀을 고려하여 실제 시스템 처럼 운영해야 보다 현실적인 결과를 얻을 수 있다<sup>[3]</sup>. 그러나 계산 시간의 제한으로 일부 소수의 주변 셀 만 존재하는 것처럼 운영할 수 밖에 없다. 이 때 몇 겹(tiers) 셀까지를 고려해야 할지를 경험에 의해 결정하였다. 이는 계산의 편의를 위한 것이었지 정확한 결과라고 볼 수는 없다. 충분히 큰 유한개의 이웃 셀을 고려한 셀룰라 시스템의 간섭량을 계산할 간편한 방법이 필요하다. 해석적인 접근 방식에서는 원형 셀 구조로 제한하거나<sup>[4]</sup>, 특정 파라미터에서 만 적용 가능한 결과를 얻을 수 있었다<sup>[5]</sup>.

본 논문은 Riemann-Zeta 함수<sup>[6][7]</sup>를 사용하여 전파 감쇄 지수와 셀 반경에 따른 타셀 간섭량 및 셀 용량을 계산할 수 있는 근사식을 제공하고 시뮬레이션<sup>[8][9]</sup> 결과와 비교를 통해 그 유용성을 살펴본다.

### 2. 셀 모델과 간섭 계산

CDMA 시스템의 용량은 동일 셀 내에서의 간섭량과 동일 셀을 둘러 싸고 있는 여러 겹 타 셀에서의 간섭량에 의해 결정된다. 이 타 셀 간섭은 고려하는 겹 수에 따라 증가하는 특성을 갖는다. 셀룰라 시스템은 정육각형 셀이 규칙적인 격자점에 존재하는 형태로 분석하는 것이 일반적이나 일부 연구에서는 분석이 쉽도록 단순화된 겹 구성을 사용하기도 하였다<sup>[4]</sup>. 본 논문에서는 그림 1과 같은 일반적인 정육각형 셀 구성 모델을 사용한다.

꼭 중점으로부터 꼭지점까지의 거리가  $R$ 인 정육각형 셀이 겹침이나 빈틈이 없이 총총히 구성된 형태를 갖는다. 이때 중심 셀의 여섯 면에 접하고 있는 여섯 개의 셀을 첫번째 겹 셀군이라고 하고, 그 다음 열 두개의 셀을 두번째 겹 셀군이라고 하며 이와 같은 형태로  $n$ 겹 셀군이 존재한다. 이 셀 구조는  $60^\circ$  마다 기본형 셀 배치가 반복되는 대칭 구조를 가지고 있으며,  $n$ 겹 셀군의 기본형 셀은  $n$ 개의 셀로 구성되므로  $n$ 겹 셀군에는 총  $6n$  개의 셀이 존재한다. 가장 근접한 셀 중심간의 거리를  $2R$ , 중심셀  $C_{0,0}$  과  $n$ 겹 셀과의 중심 거리는  $D$ , 한 셀에 속해있는 임의의 한 단말로부터의 중심셀 기지국과의 거리는  $D_x$  가 된다. 또한 그 단말로부터 그 셀 기지국까지의 거리를  $r_x$ 라 한다. 이때  $n$ 겹 셀과 중심 셀과의 거리는 근사적으로  $D = 2Rn = \sqrt{3}Rn$  이 된다.

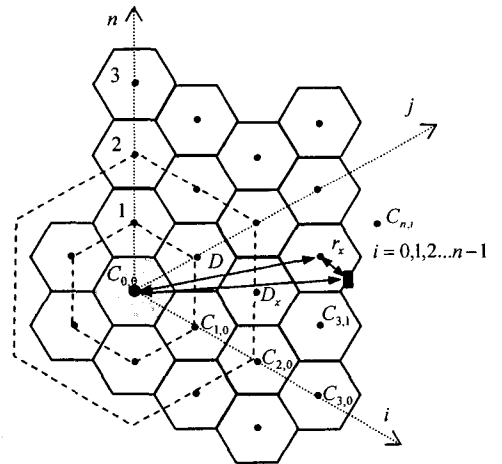


그림 1. 셀 구조와 좌표체계

각  $n$ 겹 셀 군의 면적은  $A_n = 6nA_0$  이며, 이때 중심셀의 면적은  $A_0 = 3\sqrt{3}R^2/2$  이고  $n$ 은 자연수이다.  $n$  겹에 있는 셀 중 하나를  $C_k$  라고 정의하고 이 셀에 속해 있으며 중심으로부터  $r_k$  만큼 떨어져 있는 한 단말이 송신한 전력은  $P_k$ 라 하고 기지국에 수신된 전력을  $P_0$ 라 하면 거리에 상관없이 일정한 전력으로 기지국에 수신되도록 완벽한 전력 제어를 이루었다는 전제 하에  $P_x = P_0 r_x^\gamma$  관계가 있다. 여기서  $\gamma$ 는 거리에 따른 전파 감쇄 지수로서 2~4의 값을 일반적으로 사용한다. 각 단말의 전력은 중심 셀  $C_{0,0}$ 의 기지국에 도달하여 다음과 같은 간섭이 된다.

$$I_x = P_0 r_x^\gamma \cdot D_x^{-\gamma} \quad (1)$$

중심 셀의 기지국에서 수신되는 간섭신호는 자기 셀 범위 내의 간섭과 그 외의 타 셀로부터의 간섭으로 나누어 생각할 수 있다. 각 셀에  $N_0$  개의 단말이 동작하고 있을 때 자기 셀 간섭은  $P_0(N_0 - 1)$  이고, 타셀 간섭은 식(2)와 같이 계산할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$I_{other} = \iint_{other} P_0 r_x^\gamma D_x^{-\gamma} \rho dA = \frac{2N_0 P_0}{3\sqrt{3}R^2} \iint_{other} \left(\frac{r_x}{D_x}\right)^\gamma dA \quad (2)$$

이 타셀 간섭 계산은 간단히 해결할 수 없으며  $\gamma=4$ 와 같이 특별한 조건 하에 근사식으로 해결하거나<sup>[5]</sup> 시뮬레이션을 통해 계산한다. 본 논문에서는 모든 감쇄 정수  $\gamma$ 에 대해 계산이 가능한 근사식을 제시하고자 한다.

### 3. 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 중심 거리에서 정육각형 변과의 거리인  $H/2$ 만큼 가깝거나 먼 것으로 단순화 할 수 있다. 즉  $N_0$ 개의 단말이 모두  $D-H$  위치에 있을 때 중심 셀로의 간섭이 최대가 된다. 따라서 다음과 같이 최대 간섭 상한선을 계산할 수 있다.

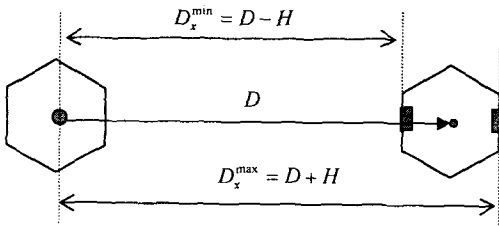


그림 2. 단말의 위치에 따른 간섭의 극한

식(1)에  $r_x = H$ ,  $D_x = D-H$ 를 적용하면  $n$  겹 셀군으로 부터의 간섭량 상한은 식(3)과 같다.

$$I \leq 6P_0 N_0 n H^\gamma (D-H)^{-\gamma} = 6P_0 N_0 \frac{n H^\gamma}{(\sqrt{3}Rn-H)^\gamma} \quad (3)$$

$$= \frac{6P_0 N_0 H^\gamma}{(\sqrt{3}R)^\gamma} \frac{n}{\left(n - \frac{H}{\sqrt{3}R}\right)^\gamma}$$

$$= \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \frac{n}{(n-0.5)^\gamma} = I_{max}^n$$

$$I(n) \leq \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k-0.5)^\gamma} = I_{max}(n) \quad (4)$$

임의의 셀 겹 수  $n$  까지 간섭의 합은 식(4)과 같은 상한 한계 식으로 주어진다.  $m > 1$  이고  $n > 0$  일때 수렴하는 Riemann-Zeta 함수식의  $\zeta(m, n) = \sum_{i=0}^{\infty} 1/(i+n)^m$  를 적용하기 위해 식(4)를 변형하고  $n$ 이  $\infty$ 로 접근할 때의 간섭 상한식을 구한 것은 식(5)과 같다.

$$I(n) \leq \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=1}^n \frac{k-0.5}{(k-0.5)^\gamma} + \sum_{k=1}^n \frac{0.5}{(k-0.5)^\gamma} \right\}$$

$$= \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k+1-0.5)^{\gamma-1}} + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{0.5}{(k+1-0.5)^\gamma} \right\} = I_{max}(n)$$

$$I(n=\infty) \leq \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k+0.5)^{\gamma-1}} + 0.5 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k+0.5)^\gamma} \right\} \quad (5)$$

$$= \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \{ \zeta(\gamma-1, 0.5) + 0.5 \zeta(\gamma, 0.5) \} = I_{max}$$

### 4. 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)에  $r_x = H$ ,  $D_x = D+H$ 를 적용하면  $n$  겹 셀군으로 부터의 간섭량 하한은 식(6)과 같다.

$$I \geq 6P_0 N_0 n H^\gamma (D+H)^{-\gamma} = 6P_0 N_0 \frac{n H^\gamma}{(\sqrt{3}Rn+H)^\gamma}$$

$$= \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \frac{n}{(n+0.5)^\gamma} = I_{min}^n \quad (6)$$

임의의 셀 겹 수  $n$  까지 간섭의 합은 식(7)과 같은 하한 한계 식으로 주어진다.

$$I(n) \geq \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k+0.5)^\gamma} = I_{min}(n) \quad (7)$$

식(9)를 변형하고  $n$ 이  $\infty$ 로 접근할 때의 간섭 하한식을 구한 것은 식(8)과 같다.

$$I(n=\infty) \geq \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k+1.5)^{\gamma-1}} - 0.5 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k+1.5)^\gamma} \right\}$$

$$= \frac{6P_0 N_0}{2^\gamma} \{ \zeta(\gamma-1, 1.5) - 0.5 \zeta(\gamma, 1.5) \} = I_{min} \quad (8)$$

### 4. 용량 한계

CDMA 시스템에서 요구되는 성능을 내기 위해서는 신호대 간섭비 목표가 설정되며 이는 자기셀 간섭과 타셀 간섭량의해 결정된다. 식(5)와 식(8)에서 구한 타셀 간섭량 상한과 하한에 의해 다음과 같이 신호대 간섭비 상한과 하한이 결정된다.

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{min} = \frac{P_0}{P_0(N_0-1)+I_{max}(\infty)} \leq \frac{S}{I} \leq \frac{P_0}{P_0(N_0-1)+I_{min}(\infty)} = \left(\frac{S}{I}\right)_{max} \quad (9)$$

임의의 겹수까지 만 타셀 간섭량에 고려할 경우 시스템의 셀당 사용자 수는 식(10)와 같은 한계식으로 계산된다.

$$\frac{I/S+1}{1+6 \frac{1}{2^\gamma} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k-0.5)^\gamma}} \leq N_0(n) \leq \frac{I/S+1}{1+6 \frac{1}{2^\gamma} \sum_{k=1}^n \frac{k}{(k+0.5)^\gamma}} \quad (10)$$

5. 수치 및 시뮬레이션 결과

그림 3. 은 식(4)(6)에 의한 간섭의 상한의 변화를 타셀 겹수의 함수로 표현한 것으로 각 전파 감쇄 지수에 대해 최대 간섭 하한값으로 정규화 한 것을 표현한 것이다.  $\gamma$  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.

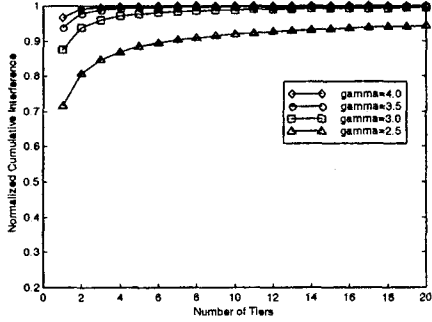


그림 3. 타셀 겹수에 따른 정규화 누적 간섭(상한값)

계산식에 의한 간섭 한계를 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 임의의 타셀 겹수를 설정할 수 있으며, 각 셀은 중심으로 부터 최외곽 꼭지점까지의 거리  $R = 1$  Km인 균일 셀로 하였고, 각 셀에는  $N_b = 70$  명의 사용자가 전 영역에 균일하게 분포하도록 하였다.  $P_b = -20$  dBm 으로 전력 제어 되도록 하였으며 채널무엇 감쇄는 고려하지 않았고 음성 활동도는 1로 설정하였다. 그림4는  $\gamma=3.0$ 일 때 계산 식에 의한 간섭 상한과 하한 그리고 시뮬레이션에 의한 간섭을 타셀 겹수에 따라 변화를 비교한 그림이다. 시뮬레이션 결과가 계산식 상한 하한의 평균을 따라가며 겹수가 증가함에 따라 상한에 근접함을 알 수 있다.

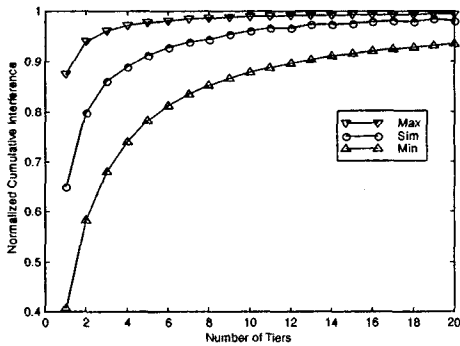


그림 4. 간섭 한계와 시뮬레이션 결과( $\gamma=3.0$ )

그림 5는  $\gamma=3.0$ 일 때 계산 식에 의한 용량의 상한과 하한 그리고 시뮬레이션에 의한 간섭을 타셀 겹수에 따라 변화한 것을 비교한 그림이다. 시뮬레이션은 각 셀에서의 사용자 수를 10명에서 100명 까지 증가 시키면서 임의의 위치에 분포 시키고 완벽한 전력 제어가 이루어 지도록 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 1000회 실행 하였고 중심 셀과 첫 번째 인접 셀을 포함 총 7개의 셀을 통계에 포함하였다. 계산에 의한 용량 상한선이 시뮬레이션 결과와 근접하게 나타났다.

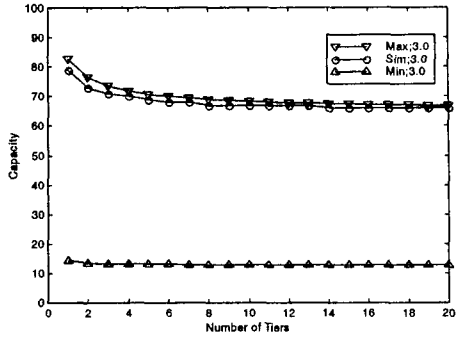


그림 5. 셀 용량의 한계 및 시뮬레이션 결과( $\gamma=3.0$ )

6. 결론

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 살펴 보았다. 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 고려 해야 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 나올 수 있었다. 따라서 제안된 타셀 간섭 근사식은 복합적인 전파 환경이 고려되어야 할 계층별 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.

참고 문헌

- [1] T. S. Rappaport, Wireless Communications, Prentice Hall, U.S.A., ISBN 0-13-461-88-1, 1996.
- [2] Viterbi, A.J., Viterbi, A.M., " Other-cell interference in cellular power-controlled CDMA," IEEE Trans. on Comm., Vol. 42, Iss. 2, pp.1501 - 1504, Feb/Mar/Apr 1994.
- [3] O. G. Lauro, A.H. Aghvami, " Resource Allocation in Hierarchical Cellular Systems," pp.51~54, Artech House Publishers, 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, Agust, 1993.
- [6] J. Miller, V.S. Adamchik, " Derivatives of the Hurwitz Zeta function for ratioanal 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," pp.336~337, Artech House Publishers, 2001.
- [9] 김호준, 윤상홍, " CDMA 시스템 시뮬레이션을 위한 효율적인 셀 모델에 관한 연구," 17-81. 한국통신학회 하계종합학술 발표회, 2002.