

혼합된 셀 크기를 갖는 CDMA 셀룰라 시스템에서 역방향 링크 용량 분석

정회원 전 형 구*, 신 성 문*, 권 수 근**, 강 창 언***

Reverse link analysis of CDMA cellular systems with mixed cell sizes

H.G. Jeon*, S.M. Shin*, S.K. Kwon**, C.E. Kang*** *Regular Members*

ABSTRACT

The demands for mobile communication service are growing rapidly. In heavily populated areas, cell split is unavoidable to increase the capacity of the cellular system. Cell splitting makes a cellular system to have mixed cell sizes. For cell planning, it is necessary to analyze the reverse link capacity of a CDMA cellular system with mixed cell sizes. In this paper, we propose a method to calculate the reverse link capacity of a CDMA cellular system with mixed cell sizes. When a macro cell is split into three micro cells, as an example, we calculate the reverse link capacities for the three micro cells and the neighboring macro cells. The results show that as the radius of a micro cell decreases, the reverse link capacity of the micro cell increases, while those of the neighboring macro cells decrease.

I. 서 론

이동통신 서비스에 대한 수요는 날로 급격히 증가하고 있다. 이러한 이동통신 수요에 대한 해결책으로 시스템 용량이 상대적으로 TDMA나 FDMA보다 큰 CDMA 셀룰라 방식^[1,2]을 선택하게 되었다. CDMA 셀룰라 시스템은 외부 간섭량이나 전파전파 환경등의 외부환경에 따라서 역방향 링크 용량이 달라진다. CDMA 셀룰라 시스템은 순방향 링크보다 역방향 링크 용량이 더욱 열악하다^[3].

셀룰라 시스템에서 셀의 크기는 인구가 밀집한 도시에서 인구 밀도에 따라서 다양하게 설정된다. 인구 밀도가 높아지면 셀룰라 시스템의 용량을 증가시키기 위하여 셀을 작은 여러 개 셀로 나누게 된다. 따라서 셀 설치 초기의 균일한 셀 크기에서 인구 밀도의 변화에 따라서 셀 분할은 불가피하고 셀의 크기는 불균일해진다. 셀의 크기가 불균일한

환경에서 각 셀은 서로 다른 외부 환경을 가지게 된다. 따라서 CDMA 셀룰라 시스템에서 각 셀은 서로 다른 역방향 링크 용량을 가지게 된다. 그러므로 CDMA 셀룰라 시스템에서 셀 설계시에는 그 셀 크기 및 외부 셀 환경을 고려하여 역방향 링크 용량을 분석해야 한다.

지금까지의 연구에서 Gilhousen^[3]은 셀 크기가 균일한 CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크 용량을 구하였다. J. Shapira^[4]는 CDMA 셀룰라 시스템에서 마이크로 셀의 설계 방법에 대하여 논의하였다. 그는 계층화된 셀 구조를 갖는 셀룰라 시스템 환경에서 역방향 링크 용량을 분석하였다. 본 논문에서는 셀 분할에 의하여 대형 매크로 셀과 소형 마이크로 셀이 섞여있는 환경에서 매크로 셀과 마이크로 셀의 역방향 링크 용량을 분석하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 매크로 셀의 기지국에서 측정된 이동국의 수신전력과 마이크로 셀 기지국에서 측정된 이동국의 수신전력의 비를 계산하고 이

* 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소,

*** 연세대학교 공과대학 전기 및 컴퓨터 공학과

논문번호 : 00017-0117, 접수일자 : 2000년 1월 17일

**경주대학교 컴퓨터 전자공학부 정보통신전공,

비에 근거하여 각각의 역방향 링크 용량을 구하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 제 2 장에서는 균일 셀 환경에서 역방향 링크 용량을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구하고 해석적인 방법으로 구한 것과 비교한다. 제 3 장에서는 매크로 셀의 기지국에서 측정한 이동국의 수신전력과 마이크로 셀 기지국에서 측정한 이동국의 수신전력의 비를 계산하고 이 비에 근거하여 각각의 역방향 링크 용량을 구하였다. 그리고 제 4 장에서 결론을 맺었다.

II. 균일 셀 환경에서 역방향 링크 용량

이 장에서는 균일 셀 환경에서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 역방향 링크 용량을 계산하고 해석적 방식으로 구한 용량과 비교하였다. CDMA 셀룰라 시스템에서 외부셀로 둘러싸인 어떤 셀이 있다고 하고 그 시스템은 이상적인 전력제어를 수행한다고 하자. 이때, 그 관심 셀은 주어진 한 사용자로부터 S 의 전력을 수신하고 $N-1$ 명의 다른 사용자들로부터 각각 S 의 간섭 신호를 받으며 또한 다른 셀로부터 I_o 의 간섭 신호를 받는다. 그 셀에서 역방향 링크 용량은 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다^[3].

$$\Pr(BER > 10^{-3}) = \sum_{k=0}^{N-1} \binom{N-1}{k} \alpha^k (1-\alpha)^{N-1-k} Q\left(\frac{\delta - k - E(I_o/S)}{\sqrt{\text{Var}(I_o/S)}}\right) \quad (1)$$

여기서

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad \text{and} \quad \delta = \frac{W/R}{E_b/N_o} - \frac{\eta}{S} \quad (2)$$

그리고 W 는 주파수 대역이고, R 은 비트율, E_b/N_o 는 비트 에너지 대 간섭 밀도 비, 는 background noise를 나타낸다, 는 음성 활동율 factor, 그리고 $E(I_o/S)$ 와 $\text{Var}(I_o/S)$ 는 I_o/S 의 평균과 분산을 각각 나타낸다. 역방향 링크용량 N_c 는 $\Pr(BER > 10^{-3}) < 0.01$ 조건을 만족시키는 최대 정수 N 으로 정의된다. 만약 $E(I_o/S)$ 과 $\text{Var}(I_o/S)$ 가 주어진다면 역방향 링크 용량은 쉽게 구할 수 있다. $E(I_o/S)$ 과 $\text{Var}(I_o/S)$ 를 구하기 위해서는 전송 손실이 먼저 논의되어야 한다. 일반적으로 전송손실은 로그로말 쇠도우잉 손실과 거리의 μ 제곱승으로 모델링된다. 어떤 사용자가 어떤 기지국으로부터 거리

가 r 이라면 전송 손실은 다음 식에 비례한다.

$$p(\mu, \xi) = \gamma^\mu 10^{(\xi/10)} \quad (3)$$

여기서 ξ 는 쇠도우잉 감쇄를 나타내고 평균이 0 이고 표준편차가 σ dB인 Gaussian 랜덤 변수를 나타낸다. 이동국의 전력의 세기가 S 라고 하면 그 사용자가 전송하는 전송 전력 P_m 은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$p_m = S \cdot \gamma^\mu \cdot 10^{\xi/10} \quad (4)$$

이 식을 이용하여 각각의 사용자가 어떤 특정 사용자에게 미치는 간섭량을 계산할 수 있다. 만일 어떤 사용자가 자신의 기지국으로부터 r_m 만큼 떨어져 있고 관심 기지국으로부터 r_o 만큼 떨어져 있다면, 그 사용자가 관심 기지국에 발생시키는 간섭신호량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I(r_o, r_m)}{S} = \left(\frac{10^{\xi_m/10}}{r_o^\mu}\right) \left(\frac{r_m^\mu}{10^{\xi_o/10}}\right) = \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^\mu 10^{(\xi_m - \xi_o)/10} \leq 1 \quad (5)$$

CDMA 셀룰라 시스템이 M 개의 외부 셀과 셀당 N 명의 사용자로 구성되어 있다고 가정하자. 이때 중심 셀의 기지국에서 수신되는 총 간섭 신호 대 관심 사용자로부터 수신되는 신호의 비 I_o/S 는 식 (6)과 같다.

$$\frac{I_o}{S} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \frac{\chi_{i,j} \cdot I_{i,j}(r_o, r_m)}{S} \quad (6)$$

여기서 $I_{i,j}(r_o, r_m)$ 는 셀 j 에서 사용자 i 에 의해서 발생하는 간섭을 의미한다. $\chi_{i,j}$ 는 해당 사용자 음성 활동율을 나타내는 랜덤 변수이며 식 (7)의 확률분포를 갖는다.

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{with prob. } \alpha \\ 0 & \text{with prob. } 1-\alpha \end{cases} \quad (7)$$

이때 평균 $E(I_o/S)$ 와 분산 $\text{Var}(I_o/S)$ 는 식 (8)과 (9)로 쉽게 구할 수 있다.

$$E\left(\frac{I_o}{S}\right) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left(\frac{I_o}{S}\right)_i \quad (8)$$

$$\text{Var}\left(\frac{I_o}{S}\right) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left[\left(\frac{I_o}{S} \right)_i - E\left(\frac{I_o}{S}\right) \right]^2 \quad (9)$$

본 논문에서는 식 (6)을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 총 20,000개의 I_o/S 표본값을 구하였다. 여기에서 사용된 파라미터 값들은 $\mu = 4$, $\sigma = 8$ dB 및 음성 활동율 $\alpha = 3/8$ 이다. 간섭량을 계산할 때 18개 범위를 벗어나는 외부 셀로부터 중심 셀에 수신되는 간섭량은 무시할 수 있으므로 본 논문에서는 중심 셀이 18개의 외부 셀로 둘러싸인다고 가정한다. 얻어진 I_o/S 표본 값들로부터 식 (8)과 (9)를 이용하여 I_o/S 평균과 분산을 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 $E(I_o/S)$ 과 $\text{Var}(I_o/S)$ 값은 각각 $0.250 \times N$ 과 $0.086 \times N$ 이다. 이 값들은 해석적으로 구한³⁾ 값들 $E(I_o/S) = 0.247 \times N$ 및 $\text{Var}(I_o/S) = 0.078 \times N$ 과 거의 일치하는 값이다. $W = 1.25$ MHz, $R = 8$ kbps, 요구된 $E_b/N_o = 7$ dB 그리고 $S/\eta = -1$ dB 이라고 할 때, P_{outage} 는 그림 1과 같다. 두개의 값들이 거의 일치함을 알 수 있다. 이때 구한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구한 역방향 링크 용량 $N_c = 35$ channels 이다.

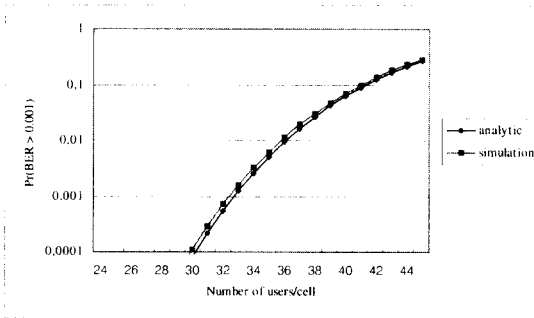


그림 1. 균일 셀 환경에서 Outage 확률

III. 혼합된 셀 크기 환경에서 역방향 링크 용량

제 2장에서서는 균일 셀 환경에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 역방향 링크 용량을 구하였다. 그 순서는 다음과 같이 요약할 수 있다. 1) 먼저 I_o/S 표본 값들을 구한다. 2) 그것들로부터 $E(I_o/S)$ 와 $\text{Var}(I_o/S)$ 를 구한다. 3) 구한 $E(I_o/S)$ 와 $\text{Var}(I_o/S)$ 를 식 (1)에 대입하여 역방향 링크용량을 구한다.

균일 셀 환경에서는 모든 셀에서 $E(I_o/S)$ 와 $\text{Var}(I_o/S)$ 값이 동일하며 각각의 셀은 동일한 역방향 링크 용량을 갖는다. 그러나 혼합된 셀 크기 환경에서는 각 셀마다 외부환경이 다르고 각 셀의 크기가

다르므로 각 셀의 $E(I_o/S)$ 와 $\text{Var}(I_o/S)$ 값들이 서로 다르다. 따라서 각 셀들은 서로 다른 역방향 링크 용량을 갖는다. 본 장에서는 서로 다른 크기의 셀에서 $E(I_o/S)$ 와 $\text{Var}(I_o/S)$ 의 값을 구하는 방법을 제시하였다.

CDMA 셀룰라 시스템에서 기지국은 이동국에서 수신한 신호의 비트 에너지 대 잡음 (간섭) 밀도 비 (E_b/N_o)가 요구되는 일정한 수준으로 유지되도록 전력제어를 수행한다. CDMA 셀룰라 시스템에서 간섭량은 다른 사용자의 수가 증가할수록 증가된다. 따라서 기지국에서 이동국의 수신 전력은 사용자 수가 증가할수록 전력제어에 의하여 증가되어야 한다. 그러나 기지국에서 수신할 수 있는 이동국의 최대 수신 전력은 전송 손실이나 이동국의 최대 송신 전력에 의하여 제한받는다. 어느 이동국이 셀 내에서 최대 전송 손실을 갖을 때 최악조건이 된다. 셀 내에 사용자가 어느 한계까지 증가하면 최대 전송 손실을 갖는 이동국이 최대 전송 전력으로 송신한다고 할지라도 그 이동국의 E_b/N_o 는 시스템에서 요구하는 수준에 이르지 못하여 도중에 끊어질 수 있다.

따라서 기지국은 그 셀내의 최대 전송 손실을 갖는 이동국이 시스템에서 요구하는 E_b/N_o 값을 만족시킬 수 있을 때까지만 새로운 이동국을 수용할 수 있다. 이때 수용된 사용자 수가 동시에 사용할 수 있는 시스템 용량이다.

한편 이동국이 셀 경계에 있다고 하고 최대 전력으로 송신한다고 하면, 기지국에서 수신되는 신호의 전력 S 는 셀의 크기에 따라서 각각 다르게 된다. 각 셀들의 역방향 링크 용량을 구하기 위해서는 각 셀의 기지국에서 최대 전송 손실을 갖는 이동국의 수신 신호 전력을 구해야 하고 그것으로부터 총 간섭 신호 대 수신 신호의 비 I_o/S 를 구하여야 한다.

이동국이 셀 경계에 있을 때 최대 전송 손실을 가진다고 하자. 만일 어떤 이동국이 마이크로 셀의 셀 경계에 위치해 있다고 하면, 기지국에서 측정된 이동국의 수신 신호 전력 S 는 식 (10)과 같다.

$$S = P_t \frac{1}{r_{micro}^\mu} 10^{-\xi_{micro}/10} \quad (10)$$

여기서 P_t 는 이동국의 전송 신호 전력이며 그 범위는 0에서 P_{max} 까지이다. r_{micro} 와 r_{macro} 는 각각 셀 반경과 섀도우잉 factor (0 평균과 σ_{micro} dB 표준편차)를 나타낸다. 식 (10)으로부터

$$10 \log P_t = 10\mu \log r_{micro} + 10 \log S + \xi_{micro} \quad (11)$$

이상적인 전력제어에서 $10 \log S$ 의 표준편차는 0 dB이다⁵⁾. 따라서 식 (11)에서 $10 \log P_t$ 는 평균이 $10 \log r_{micro} + 10 \log S$ 이고 표준 편차가 σ_{micro} dB인 가우시안 랜덤 변수라고 할 수 있다. 사용자가 증가함에 따라서 S 가 증가해야 하므로 $10 \log P_t$ 또한 증가되어야 한다. $10 \log P_{max} < 10 \log P_t$ 인 조건에서 outage가 발생한다. Outage 확률 P_{outage} 가 0.01보다 작아야 한다고 하면

$$\Pr(10 \log P_{max} < 10 \log P_t) = Q \left(\frac{10 \log P_{max} - 10\mu \log r_{micro} - 10 \log S}{\sigma_{micro}} \right) \leq 0.01 \quad (12)$$

이다. 기지국에서 수신 신호 전력 S_{micro} 는 $P_{outage} \leq 0.01$ 조건을 만족하는 최대 S 라고 정의할 수 있다. 즉 S_{micro} 는 마이크로 셀에서 최대 전송 손실을 갖는 사용자가 $P_{outage} \leq 0.01$ 조건을 만족시키면서 이동국의 최대 전력을 송출하였을 때 기지국에서 수신되는 수신 신호 전력을 나타낸다. S_{micro} 는 dB scale에서 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$10 \log S_{micro} = -\sigma_{micro} Q^{-1}(0.01) + 10 \log P_{max} - 10\mu \log r_{micro} \quad (13)$$

사용자 증가로 인하여 S 가 이 S_{micro} 보다 커야 된다면 최대 전송 손실을 갖는 이동국은 $P_{outage} \leq 0.01$ 조건을 만족시키지 못 하므로 이동국의 호는 강제로 종료될 수 있다.

비슷한 방법으로, 매크로 셀 기지국에서 수신신호 전력 S_{macro} 는 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$10 \log S_{macro} = -\sigma_{macro} Q^{-1}(0.01) + 10 \log P_{max} - 10\mu \log r_{macro} \quad (14)$$

CDMA 셀룰라 시스템의 full 용량을 계산하기 위하여 이후부터 매크로 셀과 마이크로 셀은 최대로 부하가 걸렸다고 가정하고 이때 기지국에서 수신되는 이동국들의 수신 신호 전력은 매크로 셀인 경우 S_{macro} 이고 마이크로 셀인 경우 S_{micro} 이라고 하자.

S_{macro} 대 S_{micro} 의 대수적 비는 식 (15)와 같다.

$$10 \log \frac{S_{macro}}{S_{micro}} = (\sigma_{micro} - \sigma_{macro}) Q^{-1}(0.01) + 10\mu \log \frac{r_{micro}}{r_{macro}} \quad (15)$$

식 (15)를 S_{macro}/S_{micro} 에 대해서 풀면,

$$\frac{S_{macro}}{S_{micro}} = \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^\mu 10^{\frac{(\sigma_{micro} - \sigma_{macro}) Q^{-1}(0.01)}{10}} \quad (16)$$

랜덤 변수 ξ_{macro} 과 ξ_{micro} 가 같은 확률분포를 가진다면, S_{macro}/S_{micro} 의 비는

$$\frac{S_{macro}}{S_{micro}} = \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^\mu \quad (17)$$

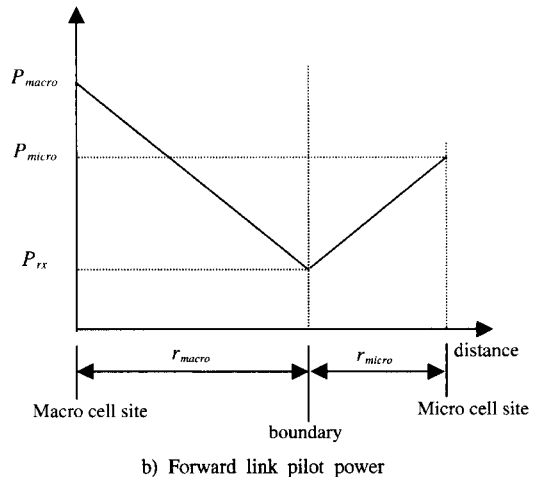
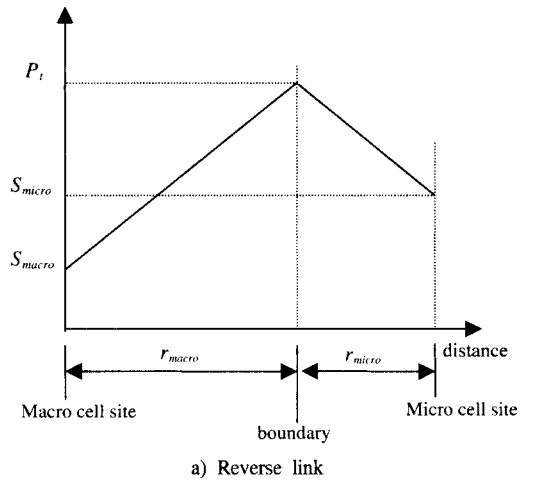


그림 2. 셀 경계 조건과 balancing

CDMA 셀룰라 시스템에서 셀의 크기는 기지국에서 전송된 파일럿 신호의 전력세기와 전송 손실에 의해서 결정된다. 그림 2는 매크로 셀과 마이크로 셀 경계 지역에서 역방향 수신 전력과 순방향 수신 전

력을 보여준다. 이동국이 매크로 셀과 마이크로 셀의 경계에 위치해 있을 때, 양쪽 기지국으로부터 수신한 기지국의 파워렛 신호의 세기는 같고 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{r_{micro}^{\mu}} P_{micro} = \frac{1}{r_{macro}^{\mu}} P_{macro} \quad (18)$$

여기서 P_{macro} 와 P_{micro} 는 매크로 셀과 마이크로 셀에서 전송한 파워렛 신호의 전력을 나타낸다. 식 (18)을 다시 정리하면 P_{micro} 는

$$P_{micro} = \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{\mu} P_{macro} \quad (19)$$

이동국이 마이크로 셀의 기지국으로부터 r_i 만큼 떨어져 있고 매크로 셀의 기지국으로부터 r_j 만큼 떨어져 있다고 가정하자. 만일 식 (20)을 만족하는 경우에 이동국은 매크로 셀을 서비스 기지국으로 선택할 것이다.

$$\text{if } \frac{10^{-\xi_j/10}}{r_i^{\mu}} P_{macro} \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{\mu} < \frac{10^{-\xi_j/10}}{r_j^{\mu}} P_{macro} \quad (20)$$

그렇지 않은 경우, 그 이동국은 마이크로 셀을 서비스 기지국으로 선택하게 된다. 만일 이동국이 매크로 셀을 선택하게 되면 그 이동국은 그 매크로 셀에 의하여 전력제어되고 이때 그 이동국에서 전송한 신호의 전력은

$$P_t = S_{macro} r_j^{\mu} 10^{\xi_j/10} \quad (21)$$

이다. 이 이동국이 주변 마이크로 셀의 기지국에 미치는 간섭 $I(r_i, r_j)$ 는 식 (22)로 나타낼 수 있다.

$$I(r_i, r_j) = S_{macro} \left(\frac{10^{\xi_j/10}}{r_i^{\mu}} \right) \left(\frac{r_j^{\mu}}{10^{\xi_j/10}} \right) \quad (22)$$

S_{macro}/S_{micro} 관계로부터, 마이크로 셀의 기지국에서 그 이동국에 의한 간섭 신호 대 수신 신호의 비는 식 (23)과 같다.

$$\frac{I(r_i, r_j)}{S_{micro}} = \frac{I(r_i, r_j)}{S_{macro}} \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{\mu} = \left(\frac{10^{\xi_j/10}}{r_i^{\mu}} \right) \left(\frac{r_j^{\mu}}{10^{\xi_j/10}} \right) \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{\mu} \quad (23)$$

비슷하게, 이동국이 마이크 셀을 서비스 기지국으로 선택하게 되면, 매크로 셀의 기지국에서 그 이동국에 의한 간섭 신호 대 수신 신호의 비는 식 (24)와 같다.

$$\frac{I(r_j, r_i)}{S_{macro}} = \frac{I(r_j, r_i)}{S_{micro}} \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{-\mu} = \left(\frac{10^{\xi_i/10}}{r_j^{\mu}} \right) \left(\frac{r_i^{\mu}}{10^{\xi_i/10}} \right) \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{-\mu} \quad (24)$$

만일 CDMA 셀룰라 시스템이 M_{macro} 개의 매크로 셀과 M_{micro} 개의 마이크로 셀들로 구성되어 있고 매크로 셀에 N_{macro} 명의 사용자들이 있고 마이크로 셀에 N_{micro} 명의 사용자들이 있다고 가정하자. 이때 주어진 매크로 셀의 기지국에서 총 간섭 신호 대 수신 신호의 비는

$$\begin{aligned} \frac{I_o}{S_{macro}} &= \frac{M_{macro}^{-1} N_{macro} \sum_{j=1}^{M_{macro}} \sum_{i=1}^{N_{macro}} \chi_{i,j} \cdot I_{i,j}(r_o, r_m)}{S_{macro}} \\ &+ \frac{M_{micro}^{-1} N_{micro} \sum_{j=0}^{M_{micro}} \sum_{i=1}^{N_{micro}} \chi_{i,j} \cdot I_{i,j}(r_o, r_m) \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{-\mu}}{S_{micro}} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 r_m 과 r_o 는 간섭 신호를 일으키는 사용자로부터 그것의 기지국까지의 거리와 주어진 매크로 셀의 기지국과의 거리를 각각 나타낸다. 같은 방법으로 주어진 마이크 셀에서 총 간섭 신호 대 수신 신호의 비는

$$\begin{aligned} \frac{I_o}{S_{micro}} &= \frac{M_{micro}^{-1} N_{micro} \sum_{j=1}^{M_{micro}} \sum_{i=1}^{N_{micro}} \chi_{i,j} \cdot I_{i,j}(r_o, r_m)}{S_{micro}} \\ &+ \frac{M_{macro}^{-1} N_{macro} \sum_{j=0}^{M_{macro}} \sum_{i=1}^{N_{macro}} \chi_{i,j} \cdot I_{i,j}(r_o, r_m) \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{\mu}}{S_{macro}} \end{aligned} \quad (26)$$

매크로 셀에 대한 $E(I_o/S_{macro})$ 및 $\text{Var}(I_o/S_{macro})$ 과 마이크로 셀에 대한 $E(I_o/S_{micro})$ 및 $\text{Var}(I_o/S_{micro})$ 는 식 (25), (26), (8) 및 (9)를 이용하여 구할 수 있다. 매크로 셀과 마이크로 셀에 대한 역방향 링크 용량은 식 (1)에서 $E(I_o/S)$ 및 $\text{Var}(I_o/S)$ 대신에 $E(I_o/S_{macro})$ 및 $\text{Var}(I_o/S_{macro})$, $E(I_o/S_{micro})$ 및 $\text{Var}(I_o/S_{micro})$ 를 대입하면 된다.

셀 분할에 대한 예로서, 그림 3의 중심 매크로 셀 BS0가 3개의 마이크로 셀 (BS0₍₁₎, BS0₍₂₎ and BS0₍₃₎)로 분할된다고 하자. 그리고 그림 3에 보인 것과 같이 그 셀들의 새로운 기지국은 그 셀의 중심에 위치한다고 하자.

그 마이크로 셀들을 둘러싸고 있는 첫번째 단 (tier)의 셀들의 역방향 링크 용량은 이 마이크로 셀들에 의해서 심하게 영향 받아 줄어들 것이다. 그러나 둘째 단의 매크로 셀들의 역방향 링크 용량은 별 영향을 받지 않을 것이다. 왜냐하면, 첫째 단의 셀들에서 역방향 링크 용량이 줄었을 뿐만 아니라 둘째 단의 셀들은 그 마이크로 셀들과 멀리 떨어져 있기 때문이다. 본 논문에서는 첫째 단의 매크로 셀과 마이크로 셀들의 역방향 링크 용량을 계산한다.

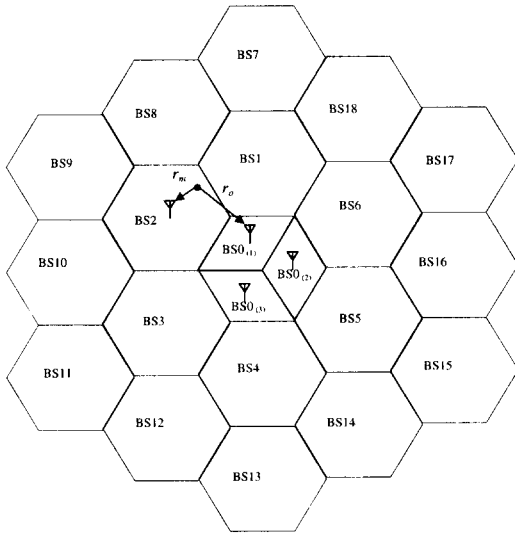


그림 3. 분할된 셀을 갖는 셀룰라 시스템

그림 2에서, 마이크 셀 BS0(1)은 18개의 매크로 외부 셀 뿐만 아니라 인접하는 두개의 마이크 셀 BS0(2)와 BS0(3)로부터도 간섭신호를 받는다. 만일 간섭을 일으키는 외부셀의 사용자가 자신의 셀의 기지국과 r_m 만큼 떨어져 있고 BS0(1)과는 r_o 떨어져 있다면, BS0(1)에서 수신한 총 외부셀 간섭대 수신 신호의 비는 식 (27)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{I_o}{S_{micro}} &= \sum_{j=7}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\chi_{i,BSj} \cdot I_{i,BSj}(r_o, r_m)}{S_{macro}} \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^\mu \\ &+ \sum_{j=2}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} \frac{\chi_{i,BSj} \cdot I_{i,BSj}(r_o, r_m)}{S_{macro}} \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^\mu \\ &+ \sum_{k=2}^3 \sum_{i=1}^{N_{micro}} \frac{\chi_{i,BS0(k)} \cdot I_{i,BS0(k)}(r_o, r_m)}{S_{micro}} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 N_c 는 셀 분할 전에 갖는 셀당 용량을 나타낸다. 비슷하게, 만일 간섭을 일으키는 외부셀

의 사용자가 자신의 셀의 기지국과 r_m 만큼 떨어져 있고 BS1과는 r_o 떨어져 있다면, BS1에서 수신한 총 외부셀 간섭대 수신 신호의 비는 식 (28)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{I_o}{S_{macro}} &= \sum_{j=7}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\chi_{i,BSj} \cdot I_{i,BSj}(r_o, r_m)}{S_{macro}} \\ &+ \sum_{j=2}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} \frac{\chi_{i,BSj} \cdot I_{i,BSj}(r_o, r_m)}{S_{macro}} \\ &+ \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{N_{micro}} \frac{\chi_{i,BS0(k)} \cdot I_{i,BS0(k)}(r_o, r_m)}{S_{micro}} \left(\frac{r_{micro}}{r_{macro}} \right)^{-\mu} \end{aligned} \quad (28)$$

그림 3으로부터, r_{micro}/r_{macro} 는 (square root 3)/2 이고 N_c 는 두번째 단의 매크로 셀의 용량이며 제 2장에서 구하였듯이 35 채널이다. 총 20,000 개의 I_o/S_{macro} 과 I_o/S_{micro} 의 표본 값들이 식 (27)과 (28)을 기반으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻어졌다.

매크로 셀에 대한 $E(I_o/S_{macro})$ 및 $Var(I_o/S_{macro})$ 과 마이크로 셀에 대한 $E(I_o/S_{micro})$ 및 $Var(I_o/S_{micro})$ 은 식 (8)과 (9)를 이용하여 구한다. 표 1에 보였듯이, $E(I_o/S_{macro})$, $Var(I_o/S_{macro})$, $E(I_o/S_{micro})$ 및 $Var(I_o/S_{micro})$ 들은 N_c , N_{macro} 및 N_{micro} 의 함수이다. 매크로 및 마이크로 셀의 역방향 링크 용량은 제 2장에서 사용한 것과 같은 조건 (i.e. W , R , E_b/N_o etc.)을 적용하고 식 (1)에서 $E(I_o/S)$ 및 $Var(I_o/S)$ 대신에 $E(I_o/S_{macro})$ 및 $Var(I_o/S_{macro})$, $E(I_o/S_{micro})$ 및 $Var(I_o/S_{micro})$ 를 대입하여 구한다. 셀 BS1 과 BS0(1)에 대한 역방향 링크 용량은 $Pr(BER > 10^{-3}) < 0.01$ 조건을 만족하는 최대 정수 N_{macro} 와 N_{micro} 이다. 얻어진 역방향 링크 용량은 표 1에 나타내었다. 본 논문에서 셀 분할 이득은 식 (29)로 정의된다.

$$\text{Cell split gain} = \frac{M_{macro} \times N_{macro} + M_{micro} \times N_{micro}}{M_o \times N_c} \quad (29)$$

여기서 N_{macro} 와 N_{micro} 는 첫번째 단의 외부 매크로 셀에 대한 역방향 링크 용량과 셀 분할 후의 마이크로 셀에서 링크 용량을 각각 나타낸다. M_{macro} 와 M_{micro} 는 매크로 셀과 마이크로 셀의 수를 나타내며, M_o 와 N_c 는 셀 분할 전의 셀 수와 역방향 링크 용량을 나타낸다.

위의 예에서 셀이 분할되기 전에, 그 셀룰라 시스템의 BS0 BS6까지의 셀에서 총 역방향 링크 용량

은 $35(\text{channel number})7(\text{cell number})=245$ channels 이었다. 셀 분할 후에 $r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}}=(\text{square root } 3)/2$ 일 때 총 역방향 링크 용량은 $33(\text{channel number})3(\text{micro cell number})+31(\text{channel number})6(\text{the first tired cell number})=285$ channels 이 된다. 따라서 셀 분할 이득은 $r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}}=(\text{square root } 3)/2$ 일 때 $285/245$ 1.18 이고, $r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}}=(\text{square root } 3)/4$ 일 때 $273/245$ 1.11가 된다.

위의 결과로부터 $r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}}$ 이 감소할수록 마이크로 셀의 역방향 링크는 증가함을 알 수 있다. 반면 바로 인접한 매크로 셀에서 역방향 링크 용량은 $r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}}$ 이 감소할수록 감소한다는 것을 알 수 있다. 즉 셀이 분할되면 그 주변에 있는 매크로 셀들은 링크가 감소된다. 마이크로 셀의 반경이 작아지면 전송 손실이 줄어들므로 S_{micro} 가 커질 수 있다. 따라서 외부셀에서 수신되는 간섭신호 대 수신신호 비 I_o/S_{micro} 가 $(r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}})^{\mu}$ 항에 의하여 줄어들게 되므로 마이크로 셀에서 역방향 링크 용량이 증가한다. 반대로 매크로 셀에서는 I_o/S_{macro} 가 $(r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}})^{-\mu}$ 항에 의하여 증가하므로 역방향 링크 용량이 감소한다. 그것은 식 (27)과 (28)의 $(r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}})^{\mu}$ 및 $(r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}})^{-\mu}$ 항들로부터 쉽게 예측되는 결과이다. 이것은 셀 분할된 지역에서 사용자가 증가하므로 증가된 간섭량이 인접 매크로 셀에 영향을 주기 때문이다. FDMA (Frequency Division Multiple Access) 셀룰라 시스템에서, 채널 용량은 셀 분할에 의한 주파수 재사용 만큼 단순히 증가한다. CDMA 셀룰라 시스템에서도 역시 어떤 지역에서 셀 분할에 의하여 역방향 링크 용량이 증가할 수 있다. 위의 예에서 보였듯이 매크로 셀이 3개 셀로 분할되어 $r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}}=(\text{square root } 3)/2$ 이면 그 지역에서 역방향 링크 용량은 36 에서 $333 = 99$ channels로 증가한다. 그러나, 그 용량 증가는 인접 매크로 셀에서 역방향 링크 용량의 감소로 얻어진 것이다.

VI. 결론

고밀도 인구 지역에서 셀 분할이 불가피하고 그것에 따라서 셀룰라 시스템은 불균일한 셀 환경을 갖는다. 본 논문에서는 혼합된 셀 크기를 갖는 CDMA 셀룰라 시스템에서 역방향 링크 용량을 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 마이크로 셀의 반경이 작아질수록 마이크로 셀에서 역방향 링크 용량은 증가하나 인접하는 매크로 셀에 미치는 영향은 커지고 매크로 셀에서 역방향 링크 용량은 줄어드는 것을 보였다. CDMA 셀룰라 시스템에서는 셀이 분할되어도 전체 시스템의 역방향 링크 용량은 분할 전에 비하여 크게 증가하지 않는다. 본 논문의 연구결과는 셀 플랜 및 혼합된 셀에서 역방향 링크 용량의 버짓(budget)을 설계하는 데 도움을 줄 수 있으리라 기대된다.

References

- [1] TIA/EIA Interim Standard (IS-95), Mobile station - base station compatibility standards for dual-mode wideband spread spectrum cellular system, July 1993.
- [2] Qualcomm, *The CDMA Network engineering handbook*, vol, Nov. 1992.
- [3] K.S. Gilhousen, et al, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 40, no.2, pp. 303-312, May 1991.
- [4] J. Shapira, "Micro cell engineering in CDMA cellular networks," *IEEE Trans. On Veh. Tech.*, vol. 43, no.4, pp. 817-3825, Nov. 1994.
- [5] R. Prasad, "Capacity analysis of a cellular direct sequence code division multiple access

표 1. Reverse link capacity and mean and variance for I_o/S_{macro} and I_o/S_{micro}

$r_{\text{micro}}/r_{\text{macro}}$	at macro cell BS1			at micro cell BS0(1)		
	$E(I_o/S_{\text{macro}})$	$\text{Var}(I_o/S_{\text{macro}})$	capacity	$E(I_o/S_{\text{micro}})$	$\text{Var}(I_o/S_{\text{micro}})$	capacity
$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$0.0718N_c$	$0.0173N_c$	31 ch	$0.0497N_c$	$0.0112N_c$	33 ch
	$0.1339N_{\text{macro}}$	$0.0492N_{\text{macro}}$		$0.1248N_{\text{macro}}$	$0.0423N_{\text{macro}}$	
	$0.1138N_{\text{micro}}$	$0.0477N_{\text{micro}}$		$0.1153N_{\text{micro}}$	$0.0509N_{\text{micro}}$	
$\frac{\sqrt{3}}{4}$	$0.0721N_c$	$0.0180N_c$	19 ch	$0.0044N_c$	$0.0004N_c$	43 ch
	$0.1330N_{\text{macro}}$	$0.0505N_{\text{macro}}$		$0.0293N_{\text{macro}}$	$0.0087N_{\text{macro}}$	
	$0.2359N_{\text{micro}}$	$0.1067N_{\text{micro}}$		$0.1158N_{\text{micro}}$	$0.0498N_{\text{micro}}$	

system with imperfect power control," *IEICE Trans. on Communication*, Vol. E76-B, no. 8, pp. 894-904, Aug. 1993.

전 형 구(H.G. Jeon)

1987년 2월 : 인하대학교 전자공학 학사
1992년 2월 : 연세대학교 전자공학 석사
2000년 4월 ~ 현재 : 연세대학교 전기 및 컴퓨터 공학
부 박사과정
1987년 2월 : 한국 전자통신 연구소 입소
2000년 4월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 무선방송 기
술연구소
IMT-2000 개발본부 기지국모뎀연구팀
TDX-10개발, DS-CDMA 셀룰라 시스
템 개발, IMT-2000 시스템 개발 등 참
여.

신 성 문(S.M. Shin)

1980년 2월 : 서울대학교 전자공학 학사
1991년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학 석사
1997년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학 박사
1980년 2월 : 한국 전자통신 연구소 입소
2000년 4월 ~ 현재 : 한국 전자 통신 연구원 무선방송
기술 연구소
무선성능 분석 연구팀장

권 수 근(S.K. Kwon)

1982년 2월 : 경북대학교 전자공학 학사
1984년 2월 : 경북대학교 전자공학 석사
1998년 8월 : 충북대학교 전자공학 박사
1984년 2월 : 한국 전자통신 연구소 입소
1999년 3월 ~ 현재 : 경주대학교 컴퓨터 전자 공학부
교수

강 창 언(C.E. Kang)

1982년 ~ 현재 : 연세대학교 전기 및 컴퓨터 공학과
교수
통신학회 논문지 23권 제4호 참조