

論文2000-37TC-5-1

다중경로 페이딩 환경에서 불완전 전력제어된 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 얼랑용량

(Erlang capacity for the reverse link of an imperfect power controlled DS/CDMA cellular system in multipath fading environments)

金 抗 來 * , 金 南 *

(Hang Rae Kim and Nam Kim)

요 약

본 논문에서는 이동 무선채널이 레일리(Rayleigh) 분포된 다중경로 페이딩 채널(multipath fading channel)일 경우에 불완전 전력제어된 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대하여, 음영효과와 다중경로 페이딩을 모두 고려한 확장된 DS/CDMA 블럭킹 확률식(blocking probability formula)을 유도한다. 음영효과(shadowing)만을 고려한 경우와 음영효과와 다중경로 페이딩을 모두 고려한 경우에 대하여 각각 얼랑용량과 등가 채널수를 비교 분석한다. DS/CDMA 블럭킹 확률은 각 사용자에게 해당하는 $E_{k(i)}/I_0$ 의 중간값(median value)을 이용하여 얼랑용량과 간섭보정계수를 구하는 분석방법으로 계산한다. 2%의 블럭킹 확률을 가정하면 데이터율 $R_b=9.6$ kbps에서는 19.97 얼랑, $R_b=14.4$ kbps에서는 11.67 얼랑으로 음영효과만을 고려한 경우보다 각각 16%와 19%의 용량이 감소함을 알 수 있다. 또한 다중경로 페이딩의 영향을 무시해서는 안된다는 것을 보이고 DS/CDMA 셀룰라 시스템이 지원할 수 있는 정확한 얼랑용량과 등가채널수를 제공한다.

Abstract

In this paper, for the reverse link of a imperfect power controlled DS/CDMA cellular system when a mobile radio channel is a Rayleigh distributed multipath fading channel, A extended DS/CDMA blocking probability formula considering both shadowing and multipath fading is derived. Erlang capacity and equivalent channel number considering shadowing are analyzed and compared with those considering both shadowing and multipath fading, respectively. The DS/CDMA blocking probability is calculated based on the analysis method that obtains Erlang capacity and ICF(interference correction factor) using the median value of $E_{k(i)}/I_0$ corresponding to each reverse link user. Assuming that the blocking probability set 2%, it is observed that the Erlang capacity is 19.97 Erlang at the data rate $R_b=9.6$ kbps and 11.67 Erlang at the data rate $R_b=14.4$ kbps and then is less 16% and 19% than the Erlang capacity considering shadowing only, respectively. It is also shown that the effect of multipath fading must not be ignored and then exact Erlang capacity and equivalent channel numbers that the DS/CDMA cellular system can support are provided.

* 正會員, 忠北大學校 情報通信工學科

(Dept. of com. and comm. Eng., Chungbuk Nat'l Univ.)

接受日字:1999年11月15日, 수정완료일:2000年4月19日

I. 서 론

이동통신 가입자의 급증과 함께 아날로그 시스템의 용량 한계는 새로운 디지털 이동통신 방식의 도입을

가속하였다. 현재 DS/CDMA 통신방식은 WLL(Wireless Local Loop)과 WLAN(Wireless Local Area Network)에서 활발히 연구되고 있고, 제 3세대 이동통신 시스템인 IMT-2000에서도 표준화와 개발에 박차를 가하고 있으며, 또한 앞으로의 무선통신 시장에서 중요한 기술로 대두되고 있다^[1, 2].

DS/CDMA 시스템 방식의 최대 장점인 가입자 용량에 관한 이론적인 분석연구는 1985년에 Viterbi가 위성통신용 CDMA 용량을 종래의 FDMA 및 TDMA와 단순 비교 분석한 이래로 계속되었다^[3]. 1992년 Holtzman이 가우시안 근사법(Gaussian Approximation)을 적용하여 간단하고 정확한 용량 계산식을 유도하였고^[4], 1993년 Viterbi가 교환시스템에서 일반적으로 사용하는 열량(Erlang)을 이동통신에 적용하여 용량을 구하였다^[5]. 이동통신 용량을 계산하는데 대기이론(Queueing theory)을 적용하는 것은 실제의 시스템에 더욱 가깝게 근사화 할 수 있고 보다 정확한 용량을 얻을 수 있다는 점에서 높게 평가된다. 제안되었던 용량 분석들은 개념에서는 유사하지만, 몇몇 중요한 항목들에서는 다르다는 것을 알 수 있다. 예를들어, Jansen은 전체 SNR이 로그노말(lognormal) 랜덤변수들의 합이 되고, 이를 로그노말 랜덤변수로 근사화한 반면에 Viterbi는 중앙극한정리(central limit theorem)를 이용하여 가우시안(Gaussian) 랜덤변수로 근사화하였다. 또한 Viterbi와 Lee의 근사는 모두 가우시안 랜덤변수로 근사화한 점에서는 동일하지만 큰 차이점은 블록킹 확률의 유도에 있어 중간값의 이용유무이다. 이러한 분석적인 근사들은 확률로서 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량을 설명하고 있고, 각각은 다중셀 시스템에 대한 간섭의 총합을 단일셀 시스템에 관련시키는 간섭 보정계수의 계산을 필요로 하였다^[5, 6, 7].

이동 무선채널을 통과한 신호는 전송경로에 따라서 시간지연과 감쇄특성이 다르게 되며 이러한 다중경로를 통하여 수신된 신호는 페이딩을 받고 결국 시스템의 성능을 열화시키게 된다. 그러므로 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서는 기지국에 수신되는 사용자의 전력을 동일하게 유지시켜 주기 위하여 전력제어(power control)를 한다. 그러나 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량을 계산함에 있어 기지국과 이동국 사이에 완벽한 전력제어를 전제로하여 기지국에 도달하는 이동국들의 수신전력이 모두 동일하다고 가정하였으나 실제 실험 결과 완벽한 전력제어는 기지국과 이동국 사이의 불안

정한 이동 무선채널로 인하여 불가능한 것으로 보고되었다^[5, 8]. 이러한 이유로 불완전 전력제어에 의한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량저하를 고려해야만 한다. 또한 수신신호에 완전한 전력제어가 되지 않으면, 음영효과와 더불어 다중경로 페이딩의 특징이 여전히 존재하게 되어 단순히 로그노말 분포로 가정할 수 없게 됨을 알 수 있다^[9, 10]. 그러므로 음영효과만을 고려하는 기존의 용량 계산과는 달리, 불완전 전력제어 환경에서는 이 두 효과를 모두 고려하여야만 정확한 용량을 산출할 수 있게 된다^[5, 6, 7].

본 논문에서는 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 블록킹 확률을 계산하기 위하여, 레일레이 분포된 다중경로 페이딩 환경을 가정하고 로그노말 랜덤변수인 SNR의 합을 가우시안 랜덤변수로 근사화한 후, 각 사용자의 중간값을 이용하여 블록킹 확률 P_B 와 이에 일치하는 열량용량과 등가채널수를 음영효과와 다중경로 페이딩을 모두 고려하여 해석적으로 분석한다.

II. 채널 모델

신호가 레일레이 분포된 다중경로 페이딩 채널을 통과한다고 가정하고 역방향 이동 무선채널을 단구간(short-term)에서 관찰하면, 기지국에 수신되는 신호는 폐루프 전력제어(CLPC: closed-loop power control)에도 불구하고 여전히 레일레이 분포를 한다^[9, 10]. 장구간(long-term)에서 관찰하면, 레일레이 분포된 수신신호의 평균 전력은 로그노말 분포로 나타난다^[9].

역방향 이동 무선채널에서 다중경로 전파로 인하여 i 번째 사용자의 신호가 L 가지의 경로들로 나뉘어진다 고 가정하면, i 번째 사용자에 의해 j 번째 경로로 기지국에 수신된 신호의 비트 에너지 $E_{b(i,j)}$ ($j=1, 2, \dots, L$)는 다음과 같이 i 번째 사용자의 비트에너지와 MIP(Multipath Intensity Profile)로 쓸 수 있다.

$$E_{b(i,j)} = E_{b(i)} \cdot f_j \quad (1)$$

여기에서 $E_{b(i)}$ 는 i 번째 사용자의 수신 신호에너지이고, f_j 는 정규화된 MIP이며, 다음과 같다^[11].

$$\sum_{j=1}^L f_j = 1$$

수신신호의 포락선이 레일레이 분포를 하므로 수신

신호 에너지는 chi-square 분포가 된다. i 번째 사용자의 신호가 j 번째 경로로 수신될 때의 비트 에너지를 $E_{b(i,j)}$ 라고 할 때 $E_{b(i,j)}$ 에 대한 평균과 제곱평균은 chi-square 분포의 특성으로 인하여 다음과 같이 된다 [1].

$$E_{short}\{E_{b(i,j)}\} = f_j \cdot E_{short}\{E_{b(i)}\} = f_j \cdot \epsilon_i \quad (2)$$

$$E_{short}\{E_{b(i,j)}^2\} = 2 \cdot f_j^2 \cdot [E_{short}\{E_{b(i)}\}]^2 = 2 \cdot f_j^2 \cdot \epsilon_i^2 \quad (3)$$

여기에서 $E_{short}\{E_{b(i)}\} = \epsilon_i$ 이다.

단구간 페이딩을 고려할 때, L 가지의 다중경로채널이 각각의 경로들에 대해 독립적인 페이딩을 받는다고 가정하면, i 번째 사용자의 수신에너지 $E_{b(i)}$ 의 평균과 제곱평균은 다음과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$E_{short}\{E_{b(i)}\} = \sum_{j=1}^L f_j \cdot \epsilon_i = \epsilon_i \quad (4)$$

$$E_{short}\{E_{b(i)}^2\} = \sum_{j=1}^L 2 \cdot f_j^2 \cdot \epsilon_i^2 = \delta \cdot \epsilon_i^2 \quad (5)$$

여기에서 $\delta = \sum_{j=1}^L 2 \cdot f_j^2$ 이고 $E_{short}\{\}$ 는 단구간 페이딩에 대한 평균을 의미한다.

단구간에 대하여 총체적 평균(ensemble average)한 ϵ_i 는 그 자신이 수신된 평균 신호 에너지의 느린 변화로 인한 랜덤변수이다. 이 변화는 로그노말 분포의 음영효과와 페루프 전력제어의 오차와 지연의 결과로 나타난다. 랜덤변수 ϵ_i 는 다음과 같이 로그노말 분포로 근사화될 수 있다[5].

$$\epsilon_i = 10^{x/10}$$

여기에서 x 는 가우시안 랜덤변수이다.

장구간에서, 관측 인터벌 동안 평균함으로 구해지는 수신된 신호 에너지 ϵ_i 의 중간, 평균, 그리고 제곱 평균값은 다음과 같다[5, 6].

$$Median\{\epsilon_i\} = \epsilon_{Med} = \exp\{\beta m\} \quad (6)$$

$$E_{long}\{\epsilon_i\} = E_{long}\{\exp[\beta \cdot (m + \sigma G)]\} = \epsilon_{Med} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2\right\} \quad (7)$$

$$E_{long}\{\delta \cdot \epsilon_i^2\} = E_{long}\{\delta \cdot \exp[2\beta \cdot (m + \sigma G)]\} = \delta \cdot \epsilon_{Med}^2 \cdot \exp(2\beta^2 \sigma^2) \quad (8)$$

여기에서 m 과 σ 는 각각 가우시안 분포의 평균과 분산

이고 $E_{long}\{\}$ 는 장구간 페이딩에 대한 평균, $\beta = \ln 10/10$ 이고 G 는 평균이 0이고 단위 분산을 갖는 가우시안 랜덤변수를 나타낸다.

III. 열량분석과 블럭킹 확률 계산

각각의 셀(또는 섹터)에서, 호(call)의 요구는 평균 호 도착률 λ [calls/sec]인 포아송(Poisson)분포로 모델화 되고, 호의 서비스 시간은 평균 $1/\mu$ [sec/call]를 갖는 지수(exponential)분포로 모델화 되며, 일반적인 통화 블럭킹 확률은 M/M/S/S 대기 이론을 사용하는 고전적인 열량 분석을 사용한다. 그러므로 어떤 호가 도착할 때 N 개의 채널들이 사용중이어서 도착한 호가 손실(lost)될 호손율은 열량-B (Erlang-B) 공식으로 구할 수 있다.

$$P_B = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{n=0}^N \frac{A^n}{n!}} \quad (9)$$

여기에서, $A = \lambda/\mu$ 의 양은 “평균 통화량(offered load)”을 나타내고 단위는 열량이다. 식 (9)를 사용하면 교환 시스템에서 중계선 효율(trunking efficiency)로 인해 서비스 받을 수 있는 사용자수를 정확하게 구할 수 있다.

단일셀에서 K 명의 역방향 링크 사용자들이 통화를 할 경우, $K+1$ 번째 사용자에게는 K 명 사용자들의 통화로 인한 전체 전력, P_{Total} 이 간섭전력이 된다.

$$P_{Total} = \nu_1 P_1 + \nu_2 P_2 + \dots + \nu_K P_K + N_0 W = I_0 W \quad (10)$$

여기에서 ν_i 는 음성 활동율(voice activity), P_i 는 i 번째 사용자에게 대한 랜덤 신호전력, W 는 CDMA 확산 스펙트럼 대역폭, N_0 는 잡음 밀도함수, I_0 는 간섭 밀도 함수이다.

식 (10)을 $I_0 R_b$ 로 정규화하고, Z_K 를 다음과 같이 정의하면, 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_K = \nu_1 \frac{E_{b(1)}}{I_0} + \nu_2 \frac{E_{b(2)}}{I_0} + \dots + \nu_K \frac{E_{b(K)}}{I_0} \quad (11)$$

$$Z_K = \sum_{i=1}^K \nu_i \rho_i = \frac{W}{R_b} (1 - \eta)$$

여기에서 R_b 는 비트율(bit rate), $\rho_i = E_{b(i)}/I_0$ 이고 $\eta = N_0/I_0$ 는 CDMA 시스템의 부하(load)를 나타내는 파

라메타이며, WR_b 는 확산 스펙트럼 처리이득 (processing gain)이다. 우선 η 값이 주어지면, $K+1$ 번째 사용자가 사용할 수 있는 채널의 질은 랜덤변수 Z_K 의 분포에 의해 결정된다. 이때 Z_K 가 임계값을 초과하면, 그 채널은 $K+1$ 번째 사용자를 블러킹할 것이다. 즉 $K+1$ 번째 CDMA 사용자가 블러킹될 확률은 Z_K 가 임계값을 초과하는 확률이 된다. Padovani는 $\eta < 0.1$ 일 때 시스템이 과부하(overload)되었다고 간주하였다^[12].

Z_K 가 랜덤변수들의 합이기 때문에, 블러킹 확률 P_B 의 값을 계산하기 위하여 중앙극한정리를 사용할 수 있다^[5].

$$P_B = Q\left(\frac{Z_{critical} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}}\right) \quad (12)$$

여기에서 $Z_{critical}$ 은 Z_K 의 임계값이고 $E\{Z_K\}$ 와 $Var\{Z_K\}$ 는 각각 Z_K 의 평균과 분산이다.

DS/CDMA 셀룰라 시스템에서 각각의 CDMA 셀에 K 명이 통화를 하고 있다고 가정하고, 다중셀을 고려한 Z_K 의 평균을 구하면 다음과 같다^[5, 6].

$$E\{Z_K\} = E\{K\}E\{v_i\}E\{\rho_i\} = \bar{K} \cdot \bar{v}_i \cdot (1 + F_1) \cdot \rho_{Med} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \beta^2 \sigma_{dB}^2\right\} \quad (13)$$

여기에서 m_{dB} 와 σ_{dB} 는 각각 $m_{dB} = m/I_0$ 과 $\sigma_{dB} = \sigma/I_0$ 이고 $\rho_{Med} = \exp(\beta \sigma_{dB})$ 이며 F_1 은 간섭전력에 대한 간섭 보정계수이다. F_1 의 계산은 전체 이웃 셀 (other cells)들의 간섭 전력과 자신의 셀(home cell) 간섭 전력의 중간값에 대한 비율과 평균값에 대한 비율이 같다고 가정함으로써 구할 수 있다^[6]. 또한 K 가 포아송 변수이므로 평균과 분산이 같게 된다. 그러므로 다중셀을 고려한 Z_K 의 분산은 다음과 같이 쓸 수 있다^[5, 6].

$$Var\{Z_K\} = E\{Z_K^2\} - [E\{Z_K\}]^2 = \delta \cdot \bar{K} \cdot \bar{v}_i^2 \cdot (1 + F_2) \cdot \rho_{Med}^2 \cdot \exp(2\beta^2 \sigma_{dB}^2) \quad (14)$$

여기에서 $\rho_{Med}^2 = \exp(2\beta m_{dB})$ 이고 F_2 는 간섭 전력의 제공에 대한 간섭 보정계수이다. F_2 의 계산은 전체 다른 셀들의 간섭 전력의 제공과 자신의 셀 간섭 전력의 제공의 중간값에 대한 비율과 평균값에 대한 비율이

같다고 가정함으로써 구할 수 있다^[6].

그러므로 다중경로 페이딩과 음영효과를 모두 고려한 블러킹 확률 P_B 는 다음과 같이 유도된다.

$$P_B = Q\left(\frac{Z_{critical} - \bar{K} \cdot \bar{v}_i \cdot (1 + F_1) \cdot \rho_{Med} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \beta^2 \sigma_{dB}^2\right\}}{\sqrt{\delta \cdot \bar{K} \cdot \bar{v}_i^2 \cdot (1 + F_2) \cdot \rho_{Med}^2 \cdot \exp(2\beta^2 \sigma_{dB}^2)}}\right) \quad (15)$$

IV. 간섭 보정계수에 대한 분석

셀룰라 시스템에서, 각 기지국은 자신의 셀(home cell)에 있는 이동국으로부터 간섭을 받을 뿐만 아니라 (intra-cell interference), 이웃 셀(other cell)들에 있는 단말기로부터도 간섭을 받는다(inter-cell interference). 그림 1은 자신의 셀에 있는 기지국에서 받는 이웃 셀들의 간섭을 나타낸다.

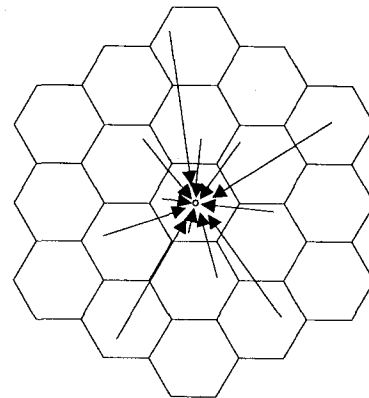


그림 1. 셀룰라 시스템에서 셀간 간섭
Fig. 1. Inter-cell interference in a cellular system.

분석의 편리를 위해 반지름이 R 인 원을 6각형 셀구조로 근사화한다. 자신의 셀과 이웃 셀에 있는 단말기의 전력은 각각 자신의 셀과 이웃 셀에 있는 기지국에 의해 제어된다. 거리의 α 승 법칙의 전파를 가정하면, 같은 셀안에서 두 이동국 송신기의 전력 P_1 과 P_2 의 비율은 기지국으로부터 그들의 거리 D_1 과 D_2 의 비율의 α 승에 정비례한다. 즉 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^\alpha \quad (16)$$

이웃 셀에 있는 단말기로부터 수신된 간섭을 모델화하기 위하여, 기지국간 거리가 d 인 셀에 있는 단말

기로부터 자신의 셀에 있는 기지국에 수신되는 간섭 전력을 설명한다.

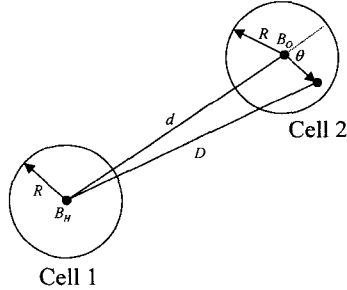


그림 2. 다른셀에 위치한 이동국으로부터의 간섭
Fig. 2. Interference from mobile station in other cell.

셀 2의 이동국으로부터 셀 1의 기지국에 수신되는 전력은 다음과 같다^[6, 7, 13].

$$P_{other} = \frac{P_0 r^\alpha}{D^\alpha} = P_0 \left(\frac{r}{D}\right)^\alpha \quad (17)$$

여기에서 r 은 셀2의 이동국과 기지국 사이의 거리이고, D 는 셀 2의 이동국과 셀 1의 기지국 사이의 거리이며, P_0 는 완전한 전력제어인 경우의 이동국 수신전력이다.

그림 2에서, 기지국 B_H 에서 거리가 d 만큼 떨어져 있는 기지국 B_O 에 의하여 K 명의 이동국들이 서비스를 받고 있고 거리의 α 승 법칙의 전파 전파를 가정하면, 이 이동국들로부터 B_H 에 수신되는 전력은 다음과 같다^[6, 7, 13].

$$P_1(d) = \frac{2KP_0}{\pi R^2} \int_0^R r^{\alpha+1} \int_0^\pi \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^{\alpha/2}} d\theta dr \quad (18)$$

간섭 보정계수는 이웃 셀들로부터 수신된 간섭 전력과 자신의 셀에 있는 사용자로 인해 생성되는 간섭 전력의 비로 정의된다. 그러므로 간섭 보정계수 F_1 은 파라메타 $d=kR$ 을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^[6, 7].

$$F_1 = \frac{\sum_{k=1}^K P_1(d=kR)}{KP_0} \quad (19)$$

간섭전력의 제공형태인 F_2 는 쉽게 구할 수 있다. 셀 2의 이동국으로부터 셀 1의 기지국에 수신된 전력의

제공은 다음과 같다^[6].

$$P_{other}^2 = P_0^2 \left(\frac{r}{D}\right)^{2\alpha} \quad (20)$$

그러므로 기지국 B_O 안에 K 명의 이동국들로부터 기지국 B_H 에 수신되는 평균 간섭전력은 다음과 같이 제공 전력의 형태로 쓸 수 있다^[6, 7].

$$P_2(d) = \frac{2KP_0^2}{\pi R^2} \int_0^R r^{2\alpha+1} \int_0^\pi \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^\alpha} d\theta dr \quad (21)$$

여기에서 간섭 보정계수 F_2 는 F_1 과 마찬가지로 $P_2(d)$ 에 파라메타 $d=kR$ 을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$F_2 = \frac{\sum_{k=1}^K P_2(d=kR)}{KP_0^2} \quad (22)$$

표 1은 거리의 4승 법칙의 전파 전파를 가정할 때, 링(ring)의 수의 증가에 따른 간섭 보정계수값을 나타낸다. 간섭 보정계수는 100번째 링까지 계산하였다.

표 1. 링(ring)의 값에 따른 간섭 보정계수
Table 1. Interference correction factor according to the number of rings.

링의 수	간섭보정계수	
	F_1	F_2
1	0.284146	0.085828
2	0.311559	0.086029
3	0.318923	0.086037
5	0.323441	0.086038
10	0.325658	0.086038
20	0.326274	0.086038
50	0.326457	0.086038
100	0.326484	0.086038

다중셀 간섭으로 인한 간섭 보정계수 F_1 과 F_2 의 값은 링의 수가 증가함에 따라 증가하게 된다. 즉, 간섭하는 셀의 수가 증가하기 때문이다. F_1 의 값은 링의 수가 10이상부터, F_2 의 값은 3이상부터 링이 증가함에 따라 큰 변화를 보이지 않고 거의 일정함을 알 수 있다.

V. 일량용량 분석 및 결과

실제 셀룰라 무선통신 시스템이나 개인 통신 시스템에서, 모든 이동국이 전송하는 전력레벨은 서비스를 하는 기지국에 의해 제어된다. 이것은 각각의 이동국이 역방향 채널에서 양질의 링크를 유지하는데 필요로 하는 최소한의 전력을 송신하도록 하는 것이다. 현재 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서 사용되고 있는 전력제어는 개루프 전력제어와 폐루프 전력제어이다. 개루프 전력제어는 수신 신호강도를 기준으로하는 단순한 전력제어를 하고, 폐루프 전력제어는 1.25ms마다 전력제어 비트를 사용하여 보다 세밀한 전력제어를 한다. 그러나 이러한 전력제어에도 불구하고 실제 측정값은 음영효과와 다중경로 페이딩에 의한 영향을 같이 받고 있다. 다음의 결과들은 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대해, 음영효과와 다중경로 페이딩을 고려한 일량용량과 등가채널수를 보여준다.

Viterbi는 완벽한 전력제어를 가정하고 음영효과만을 고려하여 일량용량을 계산하였다^[5]. 그림 3은 다중경로 페이딩을 고려하지 않을 경우, 즉 Viterbi가 구한 일량용량을 다중셀과 단일셀에 대하여 보이고 또한 다중셀에서 다중경로 페이딩을 고려할 경우, 즉 Viterbi의 용량 판별식에 본 논문에서 제안한 레일레이 분포된 다

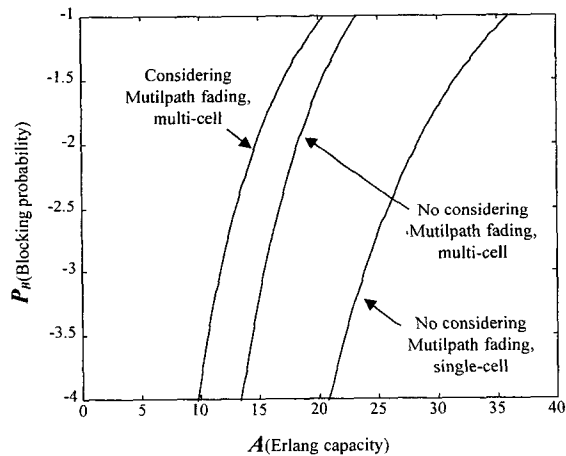


그림 3. 다중경로 페이딩을 고려한 확장된 Viterbi의 일량용량

$$(PG=128, m_{dB}=7dB, \sigma_{dB}=2.5dB, \bar{\nu}=0.4)$$

Fig. 3. extended Erlang capacity of Viterbi considering multipath fading

$$(PG=128, m_{dB}=7dB, \sigma_{dB}=2.5dB, \bar{\nu}=0.4)$$

중경로 페이딩을 고려한 경우의 일량용량을 보인다. 세로축은 블럭킹 확률을 대수로 표시한 것이고 가로축은 일량용량을 나타낸다. 2% 블럭킹 확률을 가정하면 다중셀에서는 19.46 일량이고 단일셀에서는 30.17 일량으로 Viterbi의 결과와 동일한 일량용량을 얻을 수 있다. 다중셀은 단일셀보다 35.5%의 현격한 용량 감소가 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 용량 감소는 이웃 셀들에 있는 이동 사용자들의 간섭으로 인한 것이다. 다중경로 페이딩까지 고려할 경우의 일량용량은 16.06 일량으로 음영효과만을 고려한 경우(19.46 일량)보다 17.5%의 일량용량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 불완전 전력제어로 인하여 신호가 다중경로 페이딩을 겪기 때문이다.

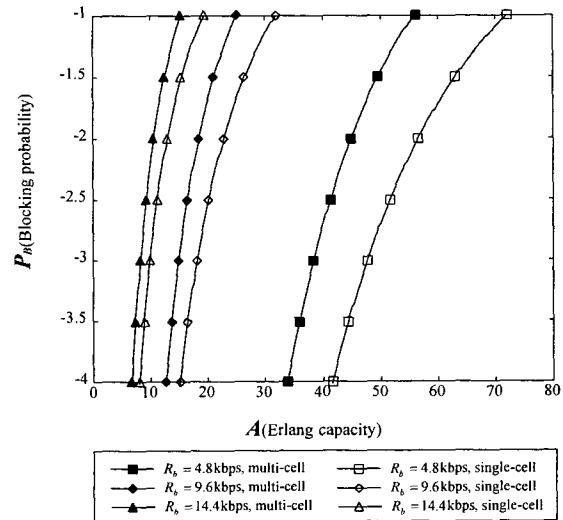


그림 4. 단일셀과 다중셀에서 데이터률에 따른 일량용량

$$(PG=128, m_{dB}=7dB, \sigma_{dB}=2.5dB, \bar{\nu}=0.4, \bar{\nu}^2=0.31)$$

Fig. 4. Erlang capacity as a function of the data rates in single- and multi-cell

$$(PG=128, m_{dB}=7dB, \sigma_{dB}=2.5dB, \bar{\nu}=0.4, \bar{\nu}^2=0.31)$$

그림 4는 다중경로 페이딩 환경을 고려할 경우, 본 논문에서 사용한 E_b/I_0 의 중간값을 이용하여 단일셀과 다중셀에 대한 일량용량을 데이터률에 따라 나타내었다. 데이터률 $R_b=9.6kbps$ 일 경우, 2% 블럭킹 확률을 가정하면 일량용량은 19.97 일량으로 단일셀의 24.89 일량에 비하여 19.8%의 용량이 감소하는 것을 알 수

있다. 데이터률 $R_b = 14.4\text{kbps}$ 일 경우도 마찬가지로 2%의 블럭킹 확률을 가정하면 14.37 얼랑에서 11.67 얼랑으로 18.8%의 용량이 감소하였다. 이러한 용량감소는 이웃셀들에 있는 이동국들의 간섭으로 인한 것이다. 즉 이웃셀들에 있는 이동국들로부터의 간섭을 줄이면 역방향 링크의 용량을 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 전력 제어 오차(power control error)에 따른 용량 감소를 나타낸다. 몇몇 전파전파 조건하에서는 요구되는 낮은 오차를 달성하기 위해 높은 E_b/I_0 값이 요구 될 수 있다. 이 경우, 전체 분포는 역시 로그노말 분포이지만 표준편차가 커진다. Viterbi의 필드 실험 결과^[5], 본 논문에서는 2.5 dB의 표준편차를 사용하였다. 그림에서는 완전한 전력 제어에서부터 과도한 다중경로 페이딩으로 인한 전력 제어 오차(3 dB)까지를 도시하며, 전력 제어 오차가 클수록 현격한 용량 감소를 초래하는 것을 알 수 있다.

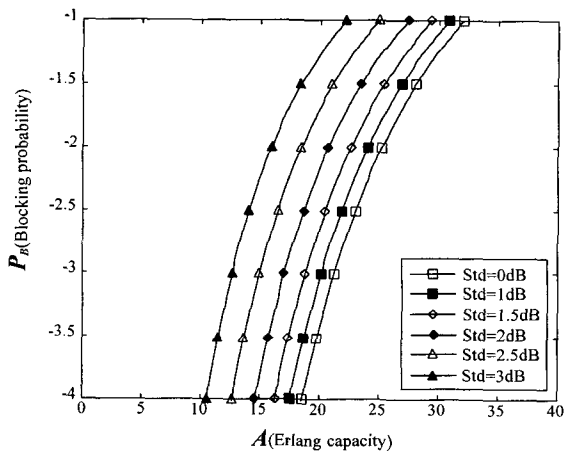


그림 5. 전력제어 오차에 따른 얼랑용량
 $(PG = 128, m_{dB} = 7\text{dB}, \bar{\nu} = 0.4, \bar{\nu}^2 = 0.31)$
 Fig. 5. Erlang capacity as a function of the power control error
 $(PG = 128, m_{dB} = 7\text{dB}, \bar{\nu} = 0.4, \bar{\nu}^2 = 0.31)$

그림 6는 다중셀에서 다중경로 페이딩을 고려할 경우와 고려하지 않을 경우의 얼랑용량 변화를 나타낸다. 데이터률 $R_b = 9.6\text{kbps}$ 일 경우, 2% 블럭킹 확률을 가정하면 다중경로 페이딩을 고려할 경우는 19.97 얼랑으로 고려하지 않을 경우의 23.78 얼랑보다 16%의 얼랑 용량이 감소하였고 데이터률 $R_b = 14.4\text{kbps}$ 일 경우는

14.41 얼랑에서 11.67 얼랑으로 19%의 얼랑용량이 감소하였다. 결국 IS-95 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서는 수신신호에 남아있는 다중경로 페이딩의 영향을 무시할 수 없다는 것을 보여준다.

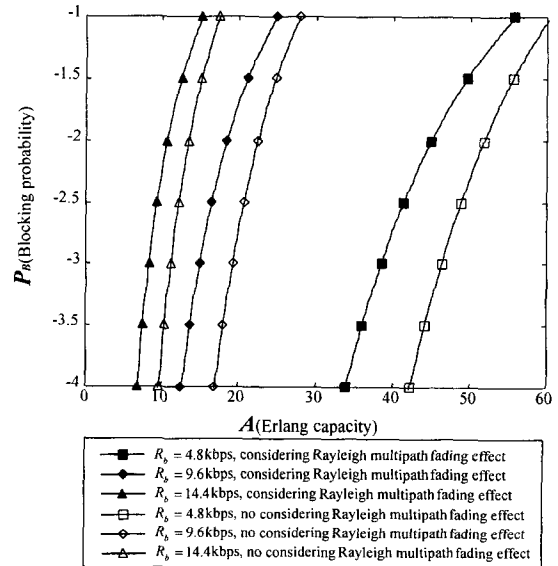


그림 6. 다중경로 페이딩에 따른 얼랑용량
 $(PG = 128, m_{dB} = 7\text{dB}, \sigma_{dB} = 2.5\text{dB}, \bar{\nu} = 0.4, \bar{\nu}^2 = 0.31)$
 Fig. 6. Erlang capacity as a function of multipath fading
 $(PG = 128, m_{dB} = 7\text{dB}, \sigma_{dB} = 2.5\text{dB}, \bar{\nu} = 0.4, \bar{\nu}^2 = 0.31)$

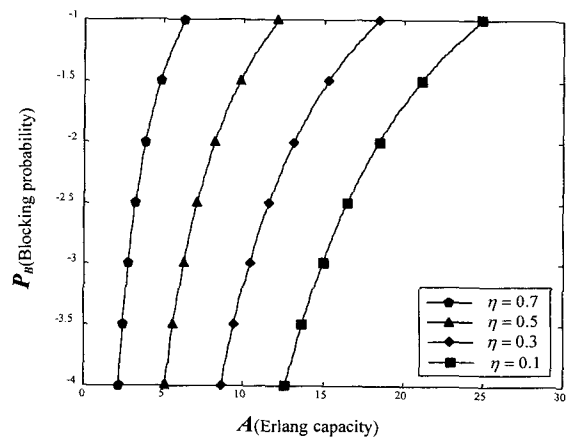


그림 7. η 에 따른 얼랑용량
 $(PG = 128, m_{dB} = 7\text{dB}, \bar{\nu} = 0.4, \bar{\nu}^2 = 0.31)$
 Fig. 7. Erlang capacity as a function of η
 $(PG = 128, m_{dB} = 7\text{dB}, \bar{\nu} = 0.4, \bar{\nu}^2 = 0.31)$

DS/CDMA 셀룰라 시스템은 간섭이 배경잡음보다 10배 클 경우 즉 $\eta < 0.1$ 일 때, 통화 블럭킹이 발생한다고 가정하였다^[12]. 그림 7은 η 에 따른 열량용량을 나타낸다. 2% 블럭킹 확률을 가정하면 $\eta = 0.1$ 일 경우는 19.97 열량, $\eta = 0.3$ 일 경우는 14.35 열량, $\eta = 0.5$ 일 경우는 9.1 열량, $\eta = 0.9$ 일 경우는 4.39 열량으로 $\eta = 0.1$ 일 경우에 비하여 각각 28.14%, 54.43%와 78%까지의 현격한 용량 감소를 알 수 있다. 즉, 시스템이 수용할 수 있는 임계값이 용량을 결정하게 된다.

표 2는 음영효과와 다중경로 페이딩을 모두 고려할 경우, 1%와 2%의 블럭킹 확률에 대하여 IS-95 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 열량용량과 그에 상응하는 등가 채널수를 데이터율에 따라 나타내었다.

표 2. 데이터율에 따른 열량용량과 등가 채널수

Table 2. Erlang capacity and equivalent channel number as a function of the data rates.

블럭킹 확률	데이터율	단일셀		다중셀		비 고
		열량 용량	등가 채널수	열량 용량	등가 채널수	
1%	4.8kbps	66.28	81	51.82	66	음영효과만 고려
	9.6kbps	28.35	39	22.47	32	
	14.4kbps	16.79	25	13.45	21	
	4.8kbps	56.69	71	44.96	55	음영효과와 다중경로 페이딩 고려
	9.6kbps	22.85	33	18.47	26	
	14.4kbps	12.99	21	10.63	17	
2%	4.8kbps	69.28	81	53.96	64	음영효과만 고려
	9.6kbps	30.18	39	23.78	32	
	14.4kbps	18.11	25	14.41	21	
	4.8kbps	60.32	74	47.58	58	음영효과와 다중경로 페이딩 고려
	9.6kbps	24.89	35	19.97	28	
	14.4kbps	14.37	23	11.67	18	

VI. 결 론

다중경로 페이딩 채널을 고려할 경우의 열량용량과 등가 채널수를 다중경로 페이딩 채널을 고려하지 않았을 경우와 비교 분석하였다. 통화 블럭킹은 전체 간섭이 배경 잡음보다 10 dB 초과할 때로 가정하고 열량용량은 블럭킹 확률이 2%일 때 해당하는 통화량 부하(load)로 정의하였다. 호 도착률은 포아손분포, 호 서비스시간은 지수분포로 모델링하고, 대기 이론에서 M/M/

∞ 인 충분한 수의 서버를 가정하였다. 또한 레일레이 다중경로 채널을 가정하고, 음성 활동율은 40%, 각 사용자의 수신에너지 대 간섭밀도비를 로그노말 분포로 근사화하고 중앙극한정리를 이용했으며 평균이 0이고 단위 분산을 갖는 가우시안 랜덤 변수를 사용하였다. 또한 유선 시스템에서 널리 사용되어졌고, 현재 상용중인 디지털 시스템의 특성을 잘 나타낼 수 있는 열량-B 공식을 사용하여 음영효과와 다중경로 페이딩을 모두 고려한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 열량용량과 등가 채널수를 구하였다.

그 결과 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 보다 정확한 열량용량을 계산하기 위해서는 다중경로 페이딩의 영향을 무시해서는 안된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 수신신호에 남아 있는 다중경로 페이딩의 영향을 감소시키기 위해서는 빠른 페루프 전력제어가 필요할 것이고 다중경로를 이용하는 다이버시티 기법을 병행해야만 할 것이다.

이 연구결과는 DS/CDMA 시스템 설치시 음영효과와 다중경로 페이딩의 영향 및 불완전 전력제어에 의한 가입자 용량계산에 이론적인 근거로 사용할 수 있다. 향후에는 빠른 페루프 전력제어와 다이버시티 등을 고려하여 좀더 현실에 근접한 연구를 병행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] EIA/TIA, IS-95 Mobile station-base station compatibility standard for dual-mode wideband spread spectrum cellular system, Feb. 1993.
- [2] ANSI J-STD-008, Personal station-base station compatibility requirement for 1.8 to 2.0 GHz CDMA personal communication systems, Mar. 1995.
- [3] A. J. Viterbi, "When not to spread spectrum-A sequel," IEEE Commun. Mag., vol. 23, pp. 12-17, Apr. 1985.
- [4] J. Holtzman, "A simple, accurate method to calculate spread-spectrum multiple-access error probabilities," IEEE Trans. on Commun., vol. 40, no. 3, pp. 461-464, March 1992.
- [5] A. M. Viterbi and A. J. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system," IEEE J. on Selected Areas in Commun., vol.

- 11, no. 6, pp. 892-900, Aug. 1993.
- [6] J. S. Lee and L. E. Miller, "On the Erlang capacity of CDMA cellular system," in GLOBECOM'95 Conf., Singapore. pp. 1877-1883, November 13-17, 1995.
- [7] M. G. Jansen and R. Prasad, "Capacity, throughput, and delay analysis of a cellular DS CDMA system with imperfect power control and imperfect sectorization," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 44, no. 1, pp. 67-75, Feb. 1995.
- [8] S. Ariyavisitakul and L. Chang, "Signal and interference statistics of a CDMA system with feedback power control," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 41, no. 11, pp. 1626-1634, Nov. 1993.
- [9] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi and E. Zehavi, "Performance of power-controlled wideband terrestrial digital communication," IEEE Trans. on Commun., vol. 41, no. 4, pp. 559-569, April 1993.
- [10] L. F. Chang, F. Ling, D. D. Falconer and N. R. Sollenberger, "Comparison of two conventional orthogonal coding techniques for CDMA radio communications systems," IEEE Trans. on Commun., vol. 43, no. 6, pp. 2028-2037, June 1995.
- [11] J. G. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill, 3rd ed., 1989.
- [12] R. Padovani, "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems" IEEE Personal Commun. Mag., pp. 28-34, Third Quarter 1994.
- [13] K. I. Kim, "CDMA cellular engineering issues," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 42, no. 3, pp. 345-350, Aug. 1993.

저 자 소 개



金 抗 來(正會員)

1995.2 : 청주대학교 전자공학과 (공학학사). 1997.8 : 청주대학교 전자공학과 (공학석사). 1997.3 ~ 1997.12 : 한국전자통신연구원 위촉연구원. 1999. 3 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 박사과정. 주관

심 분야 : 디지털 이동통신, 무선시스템



金 南(正會員)

1981. 2 : 연세대학교 전자공학과 (공학학사). 1983. 2 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사). 1988. 8 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사). 1992. 8 ~ 1993. 8 : 미 Stanford 대학 방문교수. 1989. 2 ~ 현재 : 충북대학교

정보통신공학과 교수. 주관심분야 : Diffractive Optics, WDM Optical Filter & DEMUX, Optical Memory, Holography Application, 디지털 이동통신, 전자파 해석 EMR/EMC