

다중경로 페이딩을 고려한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 일량용량 분석

김 항 래(金 抗 來), 김 남(金 男)
충북대학교 정보통신공학과
전화 : (0431) 275-2578 / 팩스 : (0431) 274-6206

Erlang Capacity Analysis For DS/CDMA Cellular System Considering Multipath Fading

Hang Rae Kim and Nam Kim

Dept. of Computer & Communication Eng., Chungbuk National University
E-mail : hrkim@osp.chungbuk.ac.kr
namkim@c Bucc.chungbuk.ac.kr

Abstract

In this paper, it is assumed that a mobile radio channel is a Rayleigh distributed multipath fading channel and Erlang capacity and equivalent channel numbers are calculated for the reverse link of a imperfect power controlled DS/CDMA cellular system considering both shadowing and multipath fading. The DS/CDMA blocking probability is calculated based on a new analysis method that considers Erlang capacity and ICF(interference correction factor) using the median value of $E_{s(i)}/I_0$ corresponding to each reverse link user. It is showed that the effect of multipath fading must not be ignored in Erlang capacity of the IS-95 DS/CDMA cellular system and the Erlang capacity is decreased according to the increase of the deviation of the imperfect power control, to the decrease of the processing gain, to the increase of the voice activity.

1. 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 이론적 용량 분석 연구는 1993년 A. Viterbi가 교환시스템에서 일반적으로 사용하는 일량(Erlang)을 이동통신에 적용하여 용량을 구한 것이었다[3]. 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. 그러나 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량을 계산함에 있어 기지국과 이동국 사이에 완벽한 전력제어를 전제로하여 기지국에 도달하는 이동국들의 수신전력이 모두 동일하다고 가정하였으나, 실제 실험결과 불안정

한 무선채널 때문에 완벽한 전력제어는 불가능한 것으로 보고되고 있다[3, 4]. 또한 수신신호에 음영효과(shadowing)와 다중경로 페이딩(multipath fading)의 특징이 여전히 존재하게 되어 단순히 대수정규(log-normal) 분포로 가정할 수 없게 된다[5]. 이러한 이유로 불완전 전력제어에 의한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량저하와 음영효과와 다중경로 페이딩을 모두 고려하여야만 정확한 용량을 알 수 있게 된다.

본 논문에서는 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 일량용량(Erlang capacity)을 $E_{s(i)}/I_0$ 의 중간값을 이용하여 레일리 다중경로 페이딩(Rayleigh multipath fading) 환경에서 해석적으로 분석한다.

II. 다중경로 해석

역방향 이동 무선채널에서 다중경로 전파로 인하여 i 번째 사용자의 신호가 N 가지의 경로들로 나뉘어진다고 가정하면, $E_{s(i,j)}$ 는 다음과 같이 i 번째 사용자의 비트 에너지와 MIP(Multipath Intensity Profile)로 표현할 수 있다.

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

여기에서 $E_{s(i)}$ 는 i 번째 사용자의 수신 신호에너지이고, f_j 는 정규화된 MIP이며, 다음과 같다[6].

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

i 번째 사용자의 신호가 j 번째 경로로 수신될 때의 비트 에너지 $E_{s(i,j)}$ 에 대한 1차 모멘트와 2차 모멘트를 구하고, N 가지의 다중경로채널이 각각의 경로들에 대해 독립적인 페이딩을 받는다고 가정하면, 전체 수신된 에너지의 1차 모멘트와 2차 모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

여기에서

$$E_{s(i)} \{E_{s(i)}\} = \sum_{j=1}^N f_j \cdot \varepsilon_i = \varepsilon_i \quad (2)$$

$$E_{s(i)} \{E_{s(i)}^2\} = \sum_{j=1}^N 2 \cdot f_j^2 \cdot \varepsilon_i^2 = \delta \cdot \varepsilon_i^2 \quad (3)$$

여기에서 $E_{s(i)} \{ \}$ 는 단구간(short-term) 페이딩에 대한

평균을 나타내고 δ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\delta \equiv \sum_{j=1}^J 2 \cdot f_j^2$$

장구간(long-term)에서, 관측 인터벌 동안 평균함으로 구해지는 수신된 신호 에너지 ϵ_i 의 중간, 평균, 그리고 제곱 평균값은 다음과 같다[3].

$$\text{Median}\{\epsilon_i\} = \epsilon_{i,med} = \exp\{\beta m\} \quad (4)$$

$$E_{long}\{\epsilon_i\} = \epsilon_{i,med} \cdot \exp\left(\frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2\right) \quad (5)$$

$$E_{long}\{\delta \cdot \epsilon_i^2\} = \delta \cdot \epsilon_{i,med}^2 \cdot \exp(2\beta^2 \sigma^2) \quad (6)$$

여기에서 $E_{long}\{\cdot\}$ 는 장구간 페이딩에 대한 평균을 나타낸다.

III. 블럭킹 확률 계산

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

$$P_{total} = \nu_1 P_1 + \nu_2 P_2 + \dots + \nu_K P_K + N_0 W \quad (7)$$

$$= I_0 W$$

여기에서 W 는 CDMA 확산 스펙트럼 대역폭, ν_i 는 음성 활동율, N_0 는 잡음 밀도 함수, I_0 는 간섭 밀도함수이고 P_i 는 i 번째 사용자에 대한 랜덤 신호 전력이다.

식 (7)을 $I_0 R_i$ 로 정규화하고, Z_k 를 다음과 같이 정의하면, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_k \equiv \nu_1 \frac{E_{k(1)}}{I_0} + \nu_2 \frac{E_{k(2)}}{I_0} + \dots + \nu_K \frac{E_{k(K)}}{I_0} \quad (8)$$

$$Z_k = \sum_{i=1}^K \nu_i \epsilon'_i = \frac{W}{R_k} (1 - \eta)$$

여기에서 $\epsilon'_i = E_{k(i)}/I_0$ 이고 $\eta \equiv N_0/I_0$ 로 CDMA 시스템의 부하(load)를 나타내는 파라미터이며, W/R_k 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.

Z_k 가 랜덤변수들의 합이기 때문에, 블럭킹 확률 P_b 의 값을 계산하기 위하여 중앙 극한 정리(central limit theorem)를 사용할 수 있다[3].

$$P_b = Q\left(\frac{Z_{critical} - E\{Z_k\}}{\sqrt{Var\{Z_k\}}}\right) \quad (9)$$

DS/CDMA 셀룰러 시스템에서 각각의 CDMA 셀에 K 명이 통화를 하고 있다고 가정하고, 다중셀을 고려한 랜덤 변수 Z_k 의 평균을 구하면 다음과 같다.

$$E\{Z_k\} = \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot (1 + F_i) \cdot \epsilon_{i,med} \cdot \exp\left(\frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2\right) \quad (10)$$

여기에서 F_i 는 간섭 보정계수(interference correction factor)이다. F_i 의 계산은 전체 다른 셀(other cells)들의 간섭전력과 자신의 셀(home cell) 간섭 전력의 중간값에 대한 비율과 평균값에 대한 비율이 같다고 가정함으로써 구

할 수 있다. 또한 K 가 포아손변수이므로 평균과 분산이 같게 된다. 그러므로, Z_k 의 분산은 다음과 같이 된다.

$$Var\{Z_k\} = \delta \cdot \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i^2 \cdot (1 + F_i) \cdot \epsilon_{i,med}^2 \cdot \exp(2\beta^2 \sigma^2) \quad (11)$$

여기에서 F_i 는 간섭 전력의 제공에 대한 간섭 보정계수이고, F_i 의 계산은 전체 다른 셀들의 간섭 전력의 제공과 자신의 셀 간섭 전력의 제공의 중간값에 대한 비율과 평균값에 대한 비율이 같다고 가정함으로써 구할 수 있다.

IV. 간섭 보정계수에 대한 분석

셀룰러 시스템에서, 각 기지국은 자신의 셀에 있는 이동국으로부터 간섭을 받을 뿐만 아니라(intra-cell interference), 이웃 셀(other cell)들에 있는 단말기로부터도 간섭을 받는다(inter-cell interference).

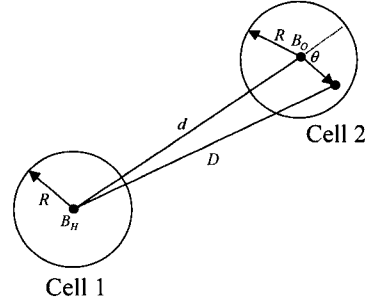


그림 1. 다른셀에 위치한 이동국으로부터의 간섭
Fig. 1. Interference from mobile station in other cell

셀 2 의 이동국으로부터 셀 1 의 기지국에 수신되는 전력은 다음과 같다[4, 7].

$$P_{other} = \frac{P_o r^\beta}{D^\beta} = P_o \left(\frac{r}{D}\right)^\beta \quad (12)$$

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

6 각형 셀룰러 구조를 사용함으로써, 모든 셀들로부터 수신된 전체 간섭 전력을 계산할 수 있다. 그림 2에서, B_H 에서 거리가 d 만큼 떨어져 있는 B_O 에 K 개의 이동국들이 서비스를 받고 있다고 가정할 때, 거리의 β 승 법칙의 전파전파와 파라메타 $d = kR$ 을 가정하면, 간섭 보정계수 F_i 은 다음과 같다[4, 7].

$$F_i = \frac{2KP_o^2}{\pi R^2} \int_0^R r^{\beta+1} dr \int_0^{2\pi} \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^{\beta/2}} d\theta \quad (13)$$

간섭전력의 제공형태인 F_i 는 쉽게 구할 수 있다. 셀 2 의 이동국으로부터 셀 1 의 기지국에 수신된 전력의 제공은 다음과 같다.

$$P_{other}^2 = P_o^2 \left(\frac{r}{D}\right)^{2\beta} \quad (14)$$

그러므로 간섭 전력의 제공에 대한 간섭 보정계수 F_2 는 거리가 D 만큼 떨어져 있는 B_0 안에 K 개의 이동국 들로부터 B_0 에 수신되는 평균 간섭전력으로 다음과 같 이 제공 전력의 형태로 쓸 수 있다[8].

$$F_2 = \frac{2KP_0^2}{\pi R^2} \int_0^{\pi} r^{2\beta-1} dr \int_0^{\pi} \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^\beta} d\theta \quad (15)$$

V. 열량 용량 분석

실제 셀룰라 무선통신 시스템이나 개인통신 시스템에서, 모든 이동국이 전송하는 전력레벨은 서비스를 하는 기지국에 의해 제어된다. 이것은 각각의 이동국이 역방향 채널에서 양질의 링크를 유지하는데 필요로하는 최소한의 전력을 송신하도록 하는 것이다. 현재 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서 사용되고 있는 전력제어는 개루프 전력제어(Open loop power control)와 폐루프 전력제어(Closed loop power control)이다. 개루프 전력제어는 수신 신호강도를 기준으로하는 단순한 전력제어를 하고, 폐루프 전력제어는 1.25ms 마다 전력제어비트를 사용하여 보다 세밀한 전력제어를 한다. 그러나 이러한 전력제어에도 불구하고 실제 측정값은 음영효과와 다중 경로 페이딩에 의한 영향을 같이 받고 있다. 다음의 결과들은 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대해, 음영효과와 다중경로 페이딩을 고려한 열량용량과 등가 채널수를 보여준다.

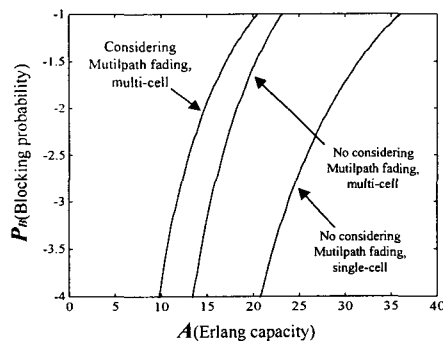


그림 2. 다중경로 페이딩을 고려한 열량용량 ($PG = 128, m_{sc} = 7\text{dB}, \sigma_{sc} = 2.5\text{dB}, \bar{v} = 0.4$)
 Fig. 2. Erlang capacity as a function of multipath fading ($PG = 128, m_{sc} = 7\text{dB}, \sigma_{sc} = 2.5\text{dB}, \bar{v} = 0.4$)

A. Viterbi 는 완벽한 전력제어(perfect power control)를 가정하고 음영효과만을 고려하여 열량용량을 계산하였다[3]. 그림 3 은 다중경로 페이딩을 고려하지 않을 경우 즉, Viterbi 가 구한 열량용량과 A. Viterbi 의 용량 판별식에 다중경로 페이딩까지 고려할 경우의 열량용량을 보인다. 2% 블록킹 확률(blocking probability)을 가정하면 다중경로 페이딩을 고려할 경우, 19.4%의 용량감소를 알 수 있다.

다중경로 페이딩 환경을 고려할 경우, 단일셀과 다중 셀에서의 데이터률에 따른 열량용량을 E_b/I_0 의 중간

값을 이용하여 블록킹 확률을 구한 것이 그림 3 에서 보인다. $R_b = 9.6\text{kbps}$ 일 경우, 2% 블록킹 확률을 가정 하면 열량용량은 19.8% 감소하였고 $R_b = 14.4\text{kbps}$ 일 경우, 2% 블록킹 확률을 가정하면 18.8% 감소하였다. 이러한 용량감소는 이웃셀(other cell)들에 있는 이동국들의 간섭으로 인한 것이다.

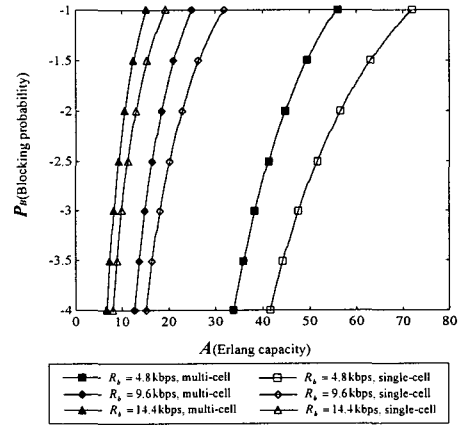


그림 3. 단일셀과 다중셀에서 데이터률에 따른 열량용량 ($m_{sc} = 7\text{dB}, \sigma_{sc} = 2.5\text{dB}, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31$)
 Fig. 3. Erlang capacity as a function of the data rates in single- and multi-cell ($m_{sc} = 7\text{dB}, \sigma_{sc} = 2.5\text{dB}, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31$)

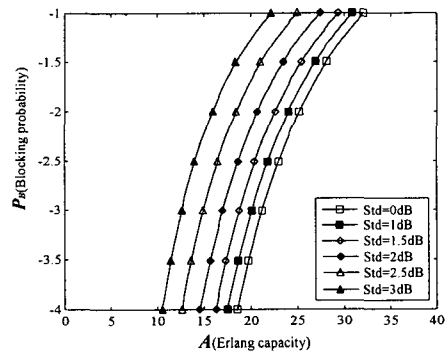


그림 4. 전력제어 오차에 따른 열량 용량 ($PG = 128, m_{sc} = 7\text{dB}, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31$)
 Fig. 4. Erlang capacity as a function of the PCE ($PG = 128, m_{sc} = 7\text{dB}, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31$)

그림 4 는 전력 제어 오차(power control error)에 따른 용량 감소를 나타낸다. 몇몇 전파전파 조건하에서는 요구되는 낮은 오류율을 달성하기 위해 높은 E_b/I_0 값이 요구 될 수 있다. 이 경우, 전체 분포는 역시 대수 정규 분포이지만 표준 편차가 커진다. Viterbi 의 필드 실험 결과[3], 본 논문에서는 2.5 dB 의 표준 편차를 사용하였다. 그림에서는 완전한 전력 제어에서부터 과도한 다중 경

로 페이딩으로 인한 전력 제어 오차(3 dB)까지를 도시하며, 전력 제어 오차가 클수록 현격한 용량 감소를 초래하는 것을 알 수 있다.

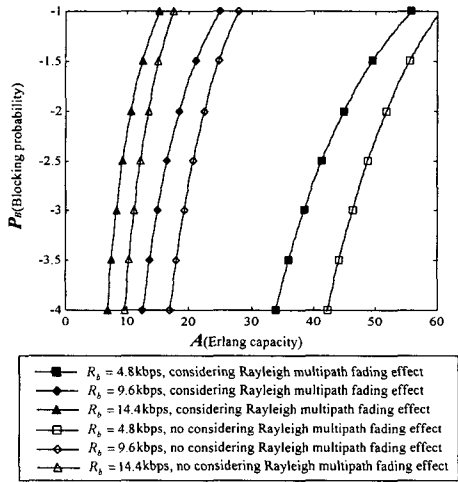


그림 5. 데이터율에 따른 열량 용량
 $(m_{eq} = 7dB, \sigma_{eq} = 2.5dB, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31)$
 Fig. 5. Erlang capacity as a function of the data rates
 $(m_{eq} = 7dB, \sigma_{eq} = 2.5dB, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31)$

그림 5는 다중셀에서 다중경로 페이딩을 고려할 경우와 고려하지 않을 경우의 열량용량 변화를 나타낸다. $R_b=9.6$ kbps 일 경우, 2% 블로킹 확률을 가정하면 열량용량은 16.1% 감소하였고, $R_b=14.4$ kbps 일 경우, 2% 블로킹 확률을 가정하면 열량용량은 19% 감소하였다. 결국 DS/CDMA 셀룰러 시스템에서는 수신신호에 남아있는 다중경로 페이딩의 영향을 무시할 수 없다는 것을 보여준다.

표 1은 블로킹 확률이 1%와 2%일 경우, DS/CDMA 셀룰러 시스템의 데이터율에 따른 열량용량과 그에 상응하는 등가 채널수를 다중경로 페이딩을 고려할 경우와 고려하지 않을 경우로 나누어 나타내었다.

표 1. 데이터율에 따른 열량 용량과 등가 채널수
 Table 1. Erlang capacity and equivalent channel number as a function of the data rates

P_b	데이터율 (kbps)	단일셀		다중셀		비고
		열량용량	채널수	열량용량	채널수	
1%	4.8	66.28	81	51.82	66	다중경로 페이딩 고려안함
	9.6	28.35	39	22.47	32	
	14.4	16.79	25	13.45	21	
	4.8	56.69	71	44.96	55	다중경로 페이딩 고려
	9.6	22.85	33	18.47	26	
	14.4	12.99	21	10.63	17	

2%	4.8	69.28	81	53.96	64	다중경로 페이딩 고려안함
	9.6	30.18	39	23.78	32	
	14.4	18.11	25	14.41	21	
	4.8	60.32	74	47.58	58	다중경로 페이딩 고려
	9.6	24.89	35	19.97	28	
	14.4	14.37	23	11.67	18	

VI. 결론

다중경로 페이딩 채널을 고려할 때의 열량용량과 등가 채널수를 다중경로 페이딩 채널을 고려하지 않았을 경우와 비교 분석하였다. 통화 블로킹은 전체 간섭이 배경 잡음보다 10 dB 초과할 때로 가정하고 열량용량은 블로킹 확률이 2%일 때 해당하는 통화량 부하로 정의하였다. 호 도착률은 포아송분포, 호 서비스 시간은 지수분포로 모델링하고, 대기 이론에서 M/M/∞ 인 충분한 수의 서버를 가정하였다. 또한 레일레이 다중경로 채널을 가정하고, 음성 활동율은 40%, 각 사용자의 수신에 너지 대 간섭밀도비를 대수 정규 분포로 근사화하고 중앙 극한 근사를 이용했으며 평균이 0 이고 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 셀룰러 시스템의 열량 용량과 등가 채널수를 구하였다. 결과들은 수신신호에 남아있는 다중경로 페이딩의 영향을 무시할 수 없다는 것을 보여준다.

[참고 문헌]

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. M. Viterbi and A. J. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 892-900, Aug. 1993.
4. 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.
5. S. Ariyavisitakul and Li. Chang, "Signal and interference statistics of a CDMA system with feedback power control," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 559-569, April. 1993.
6. J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2nd ed., 1989.
7. Kim, "CDMA Cellular Engineering Issues," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 345-350, Aug. 1993.
8. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, Series, and Products* (4th edition), Academic Press, New York, 1965.