

불완전 전력제어된 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 일랑 용량 분석

정회원 김 항 래*, 박 진 수*

Erlang Capacity Analysis for the Reverse Link of a Imperfect Power Controlled DS/CDMA Cellular System

Hang-Rae Kim*, Jin-Soo Park* *Regular Members*

요 약

DS/CDMA 셀룰라 시스템에서는 다른 역방향 사용자들의 통화로 인한 간섭 레벨(level)이 신호의 질을 유지하기 위해서 이미 정해져 있는 레벨(level) 이상이 되었을 때 통화 블러킹(blocking)이 일어난다고 본다. 따라서, DS/CDMA 블러킹 확률(Blocking Probability)이 어떤 값(보통 1% 또는 2%)과 같게 되는 사용자 수를 시스템의 일랑 용량(Erlang Capacity)이라 정의하고, 이 사용자수는 FDMA와 TDMA 셀룰라 시스템에서의 채널수에 상응한다. 본 논문에서는 각 사용자에게 해당하는 E_{bi}/I_o 의 중간값을 이용하여 간섭보정계수를 구하고, DS/CDMA 블러킹 확률(Blocking Probability)을 구함으로써 새로운 분석 방법을 제시한다. 전력제어가 불완전할수록, 처리이득이 작을수록, 음성 활동율이 클수록 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량은 감소하였다.

ABSTRACT

In a DS/CDMA cellular system, blocking will occur when the reverse link user interference power reaches a predetermined level which is set to maintain acceptable signal quality. The number of users for which the DS/CDMA blocking probability equals a certain value (usually 1% or 2%) is defined to be the "Erlang capacity" of the system and is related to an equivalent number of channels in an FDMA or TDMA cellular system. In the paper, the DS/CDMA blocking probability is calculated based on a new analysis that calculates interference correction factor using the median value of E_{bi}/I_o corresponding to each reverse link user. It is shown that the DS/CDMA "Erlang capacity" is decreased according to the increase of the deviation of the imperfect power control, to decrease the processing gain, to increase the voice activity.

I. 서 론

이동통신 가입자의 급증과 함께 애널로그 시스템의 용량 한계는 새로운 디지털 이동통신 방식의 도입을 가속하였다. 현재 제2세대 통신인 디지털 이동통신 방식으로는 북미에서 사용하는 TDMA(Time Division Multiple Access)방식과 함께 DS/CDMA(Direct Sequ-

ence Code Division Multiple Access)방식이 표준방식으로 결정되었다[1]. 이어서 최근엔 PCS(Personal Communication Service)의 다중화 방식으로 DS/CDMA 방식이 활발하게 연구되고 있다.

DS/CDMA 시스템 방식의 최대 장점인 가입자 용량에 관한 이론적 용량 분석에 관한 연구는 1985년도에 Viterbi가 위성통신용 CDMA 용량을 종래의 FDMA

* 청주대학교 전자공학과(jspak@alpha94.chongju.ac.kr)
논문번호 : 97334-0919, 접수일자 : 1997년 9월 19일

및 TDMA와 단순 비교하여 종래의 두 시스템이 용량 면에서 우세한 것으로 분석한 이래로[2], 1990년도에 Gilhousen이 이동 위성 통신에서 사용된 CDMA 방식의 용량 분석에 관한 연구에서 종래의 FDMA나 TDMA 방식보다 우수한 것으로 정정했고[3], 1991년 Padobani가 음성 활동율(voice activity)은 3/8 정도이므로, 각 통화자가 침묵하고 있는 시간 동안에 전송을 억제(또는 중지)함으로써 이 비율의 역수에 비례하는 용량 증가를 얻을 수 있고, 또한, 다중 빔(beam) 혹은 다중 섹터(sector) 안테나를 이용한 공간 격리를 통해 간섭을 줄일 수 있으며, 결과적으로 이에 비례하는 용량 증가를 또 다시 얻을 수 있음을 입증하였다[4]. 1992년 Holtzman이 가우시안 근사법(Gaussian Approximation)을 적용하여 간단하고 정확한 용량 계산식을 유도하였고[5], 1993년 Viterbi가 교환시스템에서 일반적으로 사용하는 얼랑(Erlang)을 이동통신에 적용하여 용량을 구하였다[6]. 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 불안정한 무선채널 때문에 완벽한 전력제어는 불가능한 것으로 보고되고 있다[6, 7]. 이러한 이유로 불완전 전력제어에 의한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량저하를 고려해야만 한다.

Jansen과 Viterbi의 근사는 개념에서는 유사하지만, 이 두 근사들은 몇몇 중요한 항목들에서는 다르다는 것을 알 수 있다. 예를들어, Jansen은 전체 SNR이 대수정규(lognormal) 랜덤 변수들의 합이 되고, 이를 대수 정규 변수로 근사화 한 반면에, Viterbi는 중앙 극한 정리(central limit theorem)를 이용하여 가우시안 변수로 근사화했다. 양쪽의 분석적인 근사들은 확률로서 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 용량(capacity)을 설명하고 있고, 각각은 다중 셀 시스템에 대한 간섭의 총합을 단일 셀 시스템에 관련시키는 간섭 보정계수의 계산을 필요로 했다. 본 논문에서는 간섭 전력을 제공하여 간섭 보정계수를 구하는 향상된 방법을 제시하고, Jansen과 Viterbi의 근사에서와 다른 방법으로 전체 간섭 전력에 대한 분산을 구했다.

II. 기존 시스템에 대한 얼랑 용량

전화 트래픽 이론에서, 호(call)의 요구는 평균 호 도착률 λ calls/sec인 포아송(poisson)분포로 모델화 되고, 호의 서비스 시간은 평균 $1/\mu$ sec/call를 갖는 지수(exponential)분포로 모델화 되며, 일반적인 통화 블럭킹 확률은 M/M/S/S 대기 이론을 사용하는 고전적인 얼랑(Erlang) 분석을 사용한다.

어떤 호가 도착할 때 N 개의 채널들이 사용중이어서 도착한 호가 손실(lost)될 호손율은 얼랑-B (Erlang-B) 공식으로 구할 수 있다.

$$P_B = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{n=0}^N \frac{A^n}{n!}} \quad (1)$$

여기에서, $A = \lambda/\mu$ 의 양은 "평균 통화량(offered load)"을 나타내고 단위는 얼랑(Erlang)이다.

이 모델을 FDMA와 TDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 적용할 수 있다. FDMA와 TDMA 셀룰라 시스템에서는 호를 할당하기 위해 사용되는 채널수가 고정되어 있다. 예를 들어, AMPS 시스템은 섹터당 $n = 19$ 인 채널을 갖으며, 채널당 3개의 시간 슬롯을 갖는 D-AMPS 시스템은 섹터당 $3 \times 19 = 57$ 인 채널을 가지고 있다. 따라서 얼랑-B 공식인 식 (1)을 사용하여 FDMA와 TDMA 셀룰라 시스템의 얼랑 용량을 구할 수 있다. 따라서 FDMA 셀룰라 시스템인 경우, 2% 블럭킹일때의 얼랑 용량은 $A = 12.34$ 가 된다. 즉, 평균 호의 수가 12.34일 때 들어오는 호는 어느 특정한 시간에서건 2%의 블럭킹이 일어날 수 있음을 말한다. TDMA 셀룰라 시스템인 경우, 2% 블럭킹 확률에 대해 $A = 46.8$ 얼랑이다. 이 결과 AMPS에 대해 D-AMPS 셀룰라 시스템의 통화 용량 증가는 채널수의 증가보다 더 증가함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{A(D-AMPS)}{A(AMPS)} &= \frac{46.8}{12.34} = 3.79 \\ &> \frac{N(D-AMPS)}{N(AMPS)} = \frac{57}{19} = 3 \end{aligned} \quad (2)$$

이 비교를 교환 시스템에서는 중계선 효율(trunking efficiency)이라고 한다.

III. 블럭킹 확률 계산

K 명의 역방향 링크 사용자들을 갖는 단일 셀을 고

려하면, $K+1$ 번째 사용자에게는 K 명 사용자들의 통화로 인한 전체 전력 P_{Total} 이 간섭전력이 된다.

$$P_{total} = v_1 P_1 + v_2 P_2 + \dots + v_K P_K + N_0 W$$

$$= I_0 W \quad (3)$$

여기에서

W = CDMA 확산 스펙트럼 대역폭

v_i = 음성 활동율(voice activity)

E_b = 비트 에너지

N_0, I_0 = 각각 잡음과 간섭 밀도 함수

P_i = i 번째 사용자에게 대한 랜덤 신호 전력

K 가 랜덤 변수이므로, 식 (3)을 $I_0 R_b$ 로 정규화 할 수 있다.

$$\frac{P_{TOT}}{I_0 R_b} \equiv Z_K + \frac{N_0}{I_0} \frac{W}{R_b} = \frac{W}{R_b} = constant \quad (4)$$

여기에서 R_b 는 비트율(bit rate)을 나타내며, Z_K 를 다음과 같이 정의한다.

$$Z_K = v_1 \frac{E_{b1}}{I_0} + v_2 \frac{E_{b2}}{I_0} + \dots + v_K \frac{E_{bK}}{I_0}$$

식(4)를 Z_K 에 대해서 정리하면 다음과 같다[6].

$$Z_K = \sum_{i=1}^K v_i \varepsilon_i = \frac{W}{R_b} (1 - \eta) \quad (5)$$

여기에서 $\varepsilon_i = E_{bi}/I_0$ 이고 $\eta \equiv N_0/I_0$ 로 CDMA 시스템의 부하(load)를 나타내는 파라메타이며, W/R_b 는 확산 스펙트럼 처리이득(processing gain)이다. Padovani는 $\eta < 0.1$ 일 때 시스템이 과부하(overload)되었다고 간주하였다[8]. 따라서 우선 η 값이 주어지면, $K+1$ 번째 사용자가 사용할 수 있는 채널의 질은 랜덤변수 Z_K 의 분포에 의해 결정되고, 이때 Z_K 가 임계(threshold)값을 초과하면, 그 채널은 $K+1$ 번째 사용자를 블리킹할 것이다. 즉 $K+1$ 번째 CDMA 사용자가 블리킹될 확률은 Z_K 가 임계값을 초과하는 확률이 된다.

Z_K 가 랜덤변수들의 합이기 때문에, 블리킹 확률 P_B 의 값을 계산하기 위하여 중앙 극한 정리(central limit theorem)를 사용할 수 있다[6].

$$P_B = Q\left(\frac{Z_{critical} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}}\right) \quad (6)$$

다음으로 블리킹 확률을 계산하기 위하여 Z_K 의 평균과 분산을 계산한다. $\varepsilon_i \equiv E_{bi}/I_0$ 의 측정값은 중앙값 $m_{dB} = 7dB$ 와 표준편차 $\sigma_{dB} = 2.5dB$ 인 가우시안 확률 분포와 유사하다. 그러므로 ε_i 의 중간, 평균, 그리고 제곱 평균값은 다음과 같다[6].

$$Median\{\varepsilon_i\} = \varepsilon_{Med} = \exp\{\beta m_{dB}\} \quad (7)$$

$$E\{\varepsilon_i\} = E\{\exp[\beta \cdot (m_{dB} + \sigma_{dB} G)]\}$$

$$= \varepsilon_{Med} \exp\left\{\frac{1}{2} \beta^2 \sigma_{dB}^2\right\} \quad (8)$$

$$E\{\varepsilon_i^2\} = E\{\exp[2\beta \cdot (m_{dB} + \sigma_{dB} G)]\}$$

$$= \varepsilon_{Med}^2 \exp\{2\beta^2 \sigma_{dB}^2\} \quad (9)$$

식(7), 식(8)과 식(9)를 이용하여 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 단일 셀에 대한 랜덤 변수 Z_K 의 평균과 제곱 평균을 구하면 다음과 같다.

$$E\{Z_K\} = E\{K\}E\{v_i\}E\{\varepsilon_i\}$$

$$= \bar{K} \cdot \bar{v}_i \cdot \varepsilon_{Med} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \beta^2 \sigma_{dB}^2\right\} \quad (10)$$

$$E\{Z_K^2\} = \bar{K} \cdot Var\{v_i \varepsilon_i\} + \bar{K}^2 \cdot [E\{v_i \varepsilon_i\}]^2 \quad (11)$$

여기에서 K 가 포아송 변수이므로 평균과 분산이 같게 된다. 즉, $Var\{K\} = \bar{K}$ 이므로, Z_K 의 분산은 다음과 같이 된다.

$$Var\{Z_K\} = E\{Z_K^2\} - [E\{Z_K\}]^2$$

$$= \bar{K} \cdot (Var\{v_i \varepsilon_i\} + [E\{v_i \varepsilon_i\}]^2)$$

$$= \bar{K} \cdot E\{v_i^2 \varepsilon_i^2\} \quad (12)$$

$$= \bar{K} \cdot \bar{v}_i^2 \cdot \bar{\varepsilon}_i^2$$

다음은 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 다중 셀을 고려한다. 각각의 CDMA 셀에서 K 명이 통화를 하고 있다고 가정하면, Z_K 의 평균은 다음과 같이 자신의 셀(Home cell)과 이웃 셀(Other cells)들로 나누어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E\{Z_K\} &= \bar{K} \cdot \bar{v}_i \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \beta^2 \sigma_{dB}^2\right\} \\
 &\quad \cdot \left[\varepsilon_{Med}\left(\begin{matrix} \text{home} \\ \text{cell} \end{matrix}\right) + \varepsilon_{Med}\left(\begin{matrix} \text{other} \\ \text{cells} \end{matrix}\right) \right] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{v}_i \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \beta^2 \sigma_{dB}^2\right\} \\
 &\quad \cdot \varepsilon_{Med}\left(\begin{matrix} \text{home} \\ \text{cell} \end{matrix}\right) \cdot (1 + F_1) \\
 F_1 &= \frac{\varepsilon_{Med}\left(\begin{matrix} \text{other} \\ \text{cells} \end{matrix}\right)}{\varepsilon_{Med}\left(\begin{matrix} \text{home} \\ \text{cell} \end{matrix}\right)}
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기에서 F_1 는 간섭 보정계수(interference correction factor)이다. F_1 의 계산은 전체 다른 셀(other cells)들의 간섭 전력과 자신의 셀(home cell) 간섭 전력의 중간값에 대한 비율과 평균값에 대한 비율이 같다고 가정함으로써 성립한다.

유사한 절차를 사용해서, 다중 셀을 고려한 Z_K 의 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Var\{Z_K\} &= \bar{K} \cdot \bar{v}_i^2 \cdot \exp\{2\beta^2 \sigma_{dB}^2\} \\
 &\quad \cdot \left[\varepsilon_{Med}^2\left(\begin{matrix} \text{home} \\ \text{cell} \end{matrix}\right) + \varepsilon_{Med}^2\left(\begin{matrix} \text{other} \\ \text{cells} \end{matrix}\right) \right] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{v}_i^2 \cdot \exp\{2\beta^2 \sigma_{dB}^2\} \\
 &\quad \cdot \varepsilon_{Med}^2\left(\begin{matrix} \text{home} \\ \text{cell} \end{matrix}\right) \cdot (1 + F_2) \\
 F_2 &= \frac{\varepsilon_{Med}^2\left(\begin{matrix} \text{other} \\ \text{cells} \end{matrix}\right)}{\varepsilon_{Med}^2\left(\begin{matrix} \text{home} \\ \text{cell} \end{matrix}\right)}
 \end{aligned} \tag{14}$$

여기에서 F_2 는 간섭 전력의 제곱에 대한 간섭 보정 계수(interference correction factor)이고, F_2 의 계산은 전체 다른 셀들의 간섭 전력의 제곱과 자신의 셀 간섭 전력의 제곱의 중간값에 대한 비율과 평균값에 대한 비율이 같다고 가정함으로써 성립한다.

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 셀(home cell)에 있는 기지국에서 받는 이웃 셀(other cell)들의 간섭을 나타낸다.

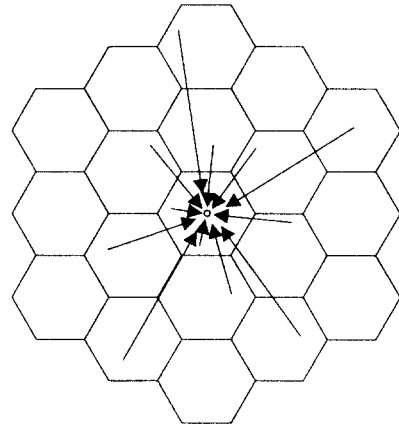


그림 1. 셀룰라 시스템에서 셀간 간섭
Fig. 1 Inter-cell interference in a cellular system

분석의 편의를 위해 반지름이 R 인 원을 6각형 셀 구조로 근사화한다. 자신의 셀(H)과 이웃 셀(O)에 있는 단말기의 전력은 각각 자신의 셀(H)과 이웃 셀(O)에 있는 기지국에 의해 제어된다. 완벽한 전력 제어의 경우에, 각 이동국으로부터 기지국에 수신된 전력은 일정한 상수(constant)가 된다. 이 전력을 P_0 로 나타낸다.

거리의 4승 법칙의 전파 전파를 가정하면, 같은 셀 안에서 두 이동국 송신기의 전력 P_1 과 P_2 의 비율은 기지국으로부터 그들의 거리 D_1 과 D_2 의 비율의 4승에 정비례한다. 즉 다음과 같이 쓸 수 있다.

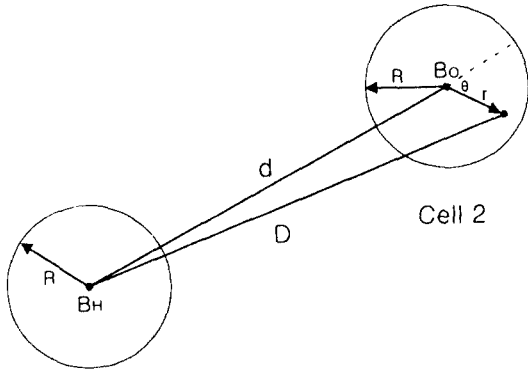
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 \tag{15}$$

다른 셀에 있는 단말기로부터 수신된 간섭을 모델화하기 위하여, 기지국간 거리가 d 인 셀에 있는 단말기로부터 자신의 셀(home cell)에 있는 기지국에 수신된 간섭 전력을 설명한다.

셀 2의 이동국으로부터 셀 1의 기지국에 수신되는 전력은 다음과 같다[7, 9].

$$P_{other} = \frac{P_0 r^4}{D^4} = P_0 \left(\frac{r}{D}\right)^4 \tag{16}$$

여기에서 r 은 셀2의 이동국과 기지국 사이의 거리이고, D 는 셀2의 이동국과 셀1의 기지국 사이의 거리이며, P_0 는 완전한 전력제어인 경우의 이동국 수신전력이다.



Cell 1

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

그림 2에서, B_H 로부터 거리가 d 만큼 떨어져 B_0 로부터 서비스를 받는 K 개의 이동국이 있다고 가정하자. 이 이동국들로부터 B_H 에 수신되는 전력은 다음과 같다.

$$P_1(d) = \frac{2KP_0}{\pi R^2} \int_0^R r^5 dr \int_0^\pi \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^2} d\theta \quad (17)$$

식 (17)에 파라메타 $d = kR$ 를 사용하면, 적분은 다음과 같이 된다[7, 9].

$$P_1(d = kR) = 2KP_0 \left[2k^2 \ln \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \right) - \frac{4k^4 - 6k^2 + 1}{2(k^2 - 1)^2} \right] \quad (18)$$

6각형 셀룰라 구조를 사용함으로써, 모든 셀들로부터 수신된 전체 간섭 전력을 계산할 수 있다. 각각의 셀안에 K 개의 이동국이 있다면, 전체 이동국 전력이 KP_0 가 되기 때문에 다중 셀로 인한 간섭 보정계수 F_1 은 다른 셀(O)들로부터 수신된 간섭 전력과 자신의 셀(H)에 있는 사용자로 인해 생성되는 간섭 전력의 비로 정의된다[7, 9].

$$F_1 \equiv \frac{I_{other}}{I_{home}} = \frac{I_{other}}{KP_0} \quad (19)$$

여기에서 K 는 셀당 사용자수이고, P_0 는 완전한 전

력 제어인 경우, 이동국으로부터 수신된 전력이다. 즉, 간섭 보정계수(interference correction factor) F_1 은 다음과 같다[7, 9].

$$F_1 = \frac{\sum_k P_1(d = kR)}{KP_0} = 2 \sum_k \left[2k^2 \ln \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \right) - \frac{4k^4 - 6k^2 + 1}{2(k^2 - 1)^2} \right] \quad (20)$$

유사하게, F_2 를 구한다. 셀2의 이동국으로부터 셀 1의 기지국에 수신된 전력의 제공은 다음과 같다.

$$P_{other}^2 = P_0^2 \left(\frac{r}{D} \right)^8 \quad (21)$$

거리가 d 만큼 떨어져 있는 셀(B_0)의 K 개의 이동국들로부터 B_H 에 수신되는 평균 간섭 전력은 다음과 같이 제공 전력의 형태로 쓸 수 있다.

$$P_2(d) = \frac{2KP_0^2}{\pi R^2} \int_0^R r^5 dr \int_0^\pi \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^4} d\theta \quad (22)$$

식 (22)에 파라메타 $d = kR$ 를 사용하면 다음과 같다 [10].

$$P_2(d = kR) = 2KP_0^2 \left\{ \frac{k^6 + 9k^4 + 9k^2 + 1}{12(k^2 - 1)^6} - \frac{4k^6 + 45k^4 + 54k^2 + 7}{60(k^2 - 1)^5} + \frac{2k^6 + 30k^4 + 45k^2 + 7}{40(k^2 - 1)} - \frac{4k^6 + 90k^4 + 180k^2 + 35}{120(k^2 - 1)^3} + \frac{k^6 + 45k^4 + 135k^2 + 35}{60(k^2 - 1)} - \frac{3k^4 + 18k^2 + 7}{4(k^2 - 1)} + \frac{11k^2}{15} - \frac{7}{2} + 8k^2 \ln \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \right) \right\} \quad (23)$$

그러므로 간섭 전력의 제공에 대한 간섭 보정계수(interference correction factor) F_2 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_2 = \frac{\sum_k P_2(d = kR)}{KP_0^2} \quad (24)$$

다중 셀 간섭으로 인한 간섭 보정계수(interference correction factor) F_1 과 F_2 의 값은 링(ring)의 수가 증가함에 따라 증가하게 된다. 즉, 간섭하는 셀의 수가

증가하기 때문이다. 표 1은 링(ring)의 수의 증가에 따른 간섭 보정계수값을 나타낸다. F_1 의 값은 링(ring)의 수가 10이상부터, F_2 의 값은 3이상부터 링(ring)이 증가함에 따라 큰 변화를 보이지 않고 거의 일정함을 알 수 있다.

표 1. 링(ring)의 값에 따른 간섭 보정계수

링의 수	간섭 보정계수	
	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

V. 얼랑 용량 분석

그림 3은 불완전 전력제어된 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서 음성 활동율(voice activity)을 고려할 때와 고려하지 않을 때를 비교한 그림이다. 2%의 블럭킹 확률을 가정하여 얼랑 용량을 구하는 경우, 음성 활동을 고려할 때에는 22.5 얼랑, 고려하지 않을 때에는 8.4 얼랑으로 약 14 얼랑이 증가된다. 이상과 같이

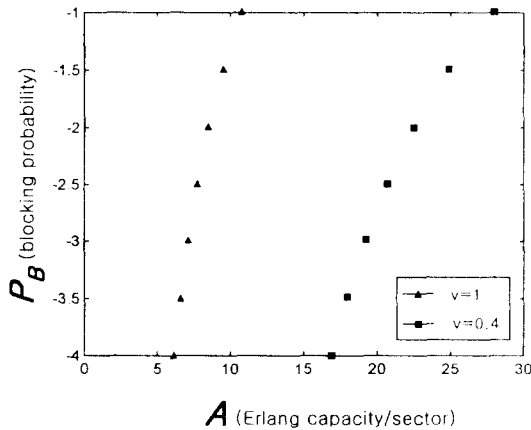


그림 3. 음성 활동율에 따른 얼랑 용량 ($PG = 128, m_{dB} = 7dB, \sigma_{dB} = 2.5dB$)
 Fig. 3 Erlang capacity as a function of the voice activity ($PG = 128, m_{dB} = 7dB, \sigma_{dB} = 2.5dB$)

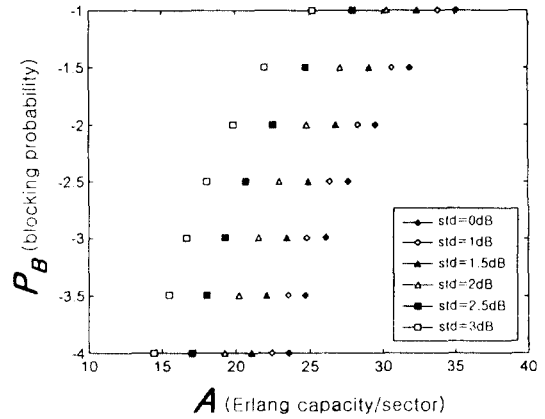


그림 4. 전력제어 오차에 따른 얼랑 용량 ($PG = 128, m_{dB} = 7dB, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31$)
 Fig. 4 Erlang capacity as a function of the PCE ($PG = 128, m_{dB} = 7dB, \bar{v} = 0.4, \bar{v}^2 = 0.31$)

음성 활동율을 고려하면 음성 활동율의 역수에 비례하는 용량 증가를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 4는 전력 제어 오차(power control error)에 따른 용량 감소를 나타낸다. 전력 제어 루프에서의 부정확도는 근사적으로 1에서 2 dB의 표준 편차를 갖는 대수 정규 분포임이 입증되었다[11]. 그러나 몇몇 전파전파 조건하에서는 요구되는 낮은 오류를 달성하기 위해 높은 E_b/I_0 값이 요구 될 수 있다. 이 경우, 전체 분포는 역시 대수 정규 분포이지만 표준 편차가 커진다. Viterbi의 필드 실험 결과[6], 본 논문에서는 2.5 dB의 표준 편차를 사용한다. 그림에서는 완전한 전력 제어에서부터 과도한 다중 경로 페이딩으로 인한 전력 제어 오차(3 dB)까지를 도시하며, 전력 제어 오차가 클수록 현격한 용량 감소를 초래하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 현재 상용중인 IS-95 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 얼랑 용량과 블럭킹 확률의 변화를 각각의 데이터율, 즉 $R_b = 4.8kbps, R_b = 9.6kbps$ 와 $R_b = 14.4kbps$ 에 따라 다중 셀과 단일 셀에 대하여 나타낸 것이다. 또한 임의의 블럭킹 확률에 대한 얼랑 용량(erlang capacity)을 식 (1)을 사용하여 등가 채널수로 계산할 수 있었다. 표 2는 블럭킹 확률이 1%와 2%일 때 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 각 경우에 대한 얼랑 용량과 그에 상응하는 등가 채널수를 나타낸 것이다. 분석된 결과로부터 얼랑 용량과 그에 따른 채널수를

비교해 보면, $N > A$ 인 관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 분석된 열량 용량과 등가 채널수는 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 1FA(1.25MHz)에 해당하는 것이다. 따라서 12.5MHz 대역에 해당하는 전체 열량 용량과 그에 상응하는 등가 채널수를 구해야 한다.

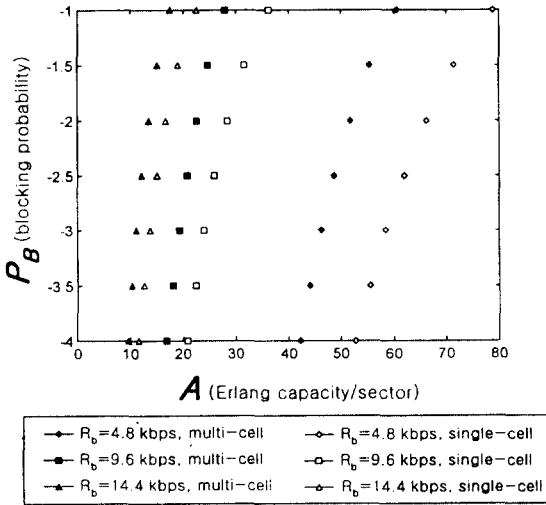


그림 5. 데이터율에 따른 열량 용량 ($m_{dB} = 7\text{dB}$, $\sigma_{dB} = 2.5\text{dB}$, $\bar{v} = 0.4$, $\bar{v}^2 = 0.31$)

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

표 2. 데이터율에 따른 열량 용량과 등가 채널수

데이터율	블러킹 확률				
	1%		2%		
	열량 용량	채널 수	열량 용량	채널 수	
다중셀	4.8 kbps	51.82	66	53.96	64
	9.6 kbps	22.47	32	23.78	32
	14.4 kbps	13.45	21	14.41	21
단일셀	4.8 kbps	66.28	81	69.28	81
	9.6 kbps	28.35	39	30.18	39
	14.4 kbps	16.79	25	18.11	25

DS/CDMA 셀룰라 시스템의 주파수 분배를 보면, 9개의 CDMA 주파수(Center Frequency)로 구성되어 있으므로 분석된 채널수인 N 값에 9를 곱해 주어야 하고, 그에 따른 열량 용량을 구해야 한다. 그러므로 현재 상용중인 IS-95 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 열량

용량과 등가 채널수를 구해보면, $P_B = 2\%$, $R_b = 9.6\text{ kbps}$ 일 때 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 채널수는 $N = 32 \times 9 = 288$ 이 되고 식(1)로부터 열량 용량은 $A = 274$ 열량이 된다.

DS/CDMA 셀룰라 시스템과 AMPS, D-AMPS 셀룰라 시스템과의 열량 용량과 채널수를 각각 비교해 보면 다음과 같다.

$$\frac{N(\text{CDMA})}{N(\text{AMPS})} = 15.2, \quad \frac{N(\text{CDMA})}{N(\text{D-AMPS})} = 5.1$$

$$\frac{A(\text{CDMA})}{A(\text{AMPS})} = 22.2, \quad \frac{A(\text{CDMA})}{A(\text{D-AMPS})} = 5.9$$

즉, DS/CDMA 셀룰라 시스템은 AMPS 셀룰라 시스템에 비하여 채널수는 15.2배, 열량 용량은 22.2배의 증가를 가지며, D-AMPS 셀룰라 시스템에 비하여 채널수는 5.1배, 열량 용량은 5.9배의 증가를 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 채널수가 증가하는 것보다 용량이 더 증가함을 알 수 있다.

이상과 같이 용량은 음성 활동율의 역수에 비례하는 용량 증가와 처리 이득(processing gain)의 증가로 인한 용량 증가를 얻는 반면에 불완전 전력 제어로 인한 용량 감소가 있음을 알 수 있다.

VI. 결 론

전체 간섭이 배경 잡음보다 10 dB 초과할 때 통화 블러킹(blocking)이 발생한다고 가정하고 열량 용량은 블러킹 확률이 2%일 때 해당하는 통화량 부하(load)로 정의하였다. 호 도착률은 포아송(poisson)분포, 호 서비스 시간은 지수분포로 모델링하고, 대기 이론에서 $M/M/\infty$ 인 충분한 수의 서버를 가정하였다. 음성 활동율은 40%, 각 사용자의 수신에너지 대 간섭밀도 비를 대수 정규 분포(log normal distribution)로 근사화하고 중앙 극한 근사(central limit theorem)를 이용했으며 평균이 0이고 단위 분산을 갖는 가우시안 랜덤 변수(Gaussian random variable)를 사용하였다. 또한 유선 시스템에서 널리 사용되어졌고, 현재 상용중인 디지털 시스템의 특성을 잘 나타낼 수 있는 열량-B(Erlang-B) 공식을 사용하여 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 열량 용량과 등가 채널수를 구하였다. 그 결과 DS/CDMA 셀룰라 시스템 방식이 AMPS 셀룰라 시스템 방식에 비해 채널수가 15.2배 증가하고 따라서 열량용량이 22.2배 증가하며 D-AMPS 시스템보다는 채널수가 5.1배, 그리고 열량용량이 5.9배 증가함을

입증하였다. 이와같은 결과로 인하여 DS/CDMA 셀룰라 시스템이 AMPS나 D-AMPS 셀룰라 시스템 방식에 비하여 채널보다는 용량이 더 증가하고 전력제어로 인한 손실을 줄이면 음성활동율의 역수에 비례하는 용량증가와 처리이득의 증가로 인한 용량증가를 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

1. EIA/TIA. IS-95 Mobile station-base station compatibility standard for dualmode wideband spread spectrum cellular system. Feb. 1993.
2. Viterbi. A. J, "When not to Spread Spectrum-A Sequel," *IEEE Communication Mag.*, vol. 23, pp. 12-17, Apr. 1985.
3. K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padobani, and L. A. Weaver, "Increased Capacity Using CDMA for Mobile Satellite Communications," *IEEE Trans. Select. Areas Commun.*, vol. 8, pp. 503-514, May 1990.
4. K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padobani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley, III, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 40, May 1991.
5. 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.
6. A. 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.
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. R. Padovani, "Reverse Link Performance of IS-95 Based Cellular Systems," *IEEE Personal Communications Mag.*, Third Quarter 1994, pp. 28-34.
9. K. I. Kim, "CDMA Cellular Engineering Issues," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 42, no. 3, pp. 345-350, Aug. 1993.
10. I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, Series, and Products* (4th edition), Academic Press, New York, 1965.

11. A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, and E. Zehavi, "Performance of power-controlled wideband terrestrial digital communications," *IEEE Trans. Commun.*, 1993
12. L. F. Fenton, "The Sum of a Log-Normal Probability Distribution in Scattered Transmission Systems," *IRE Trans. Commun. Syst.*, CS-8, 57-67, Mar. 1960.
13. W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Vol. 1, 2nd ed.* New York : Wiley, 1957.



김 항 래(Hang Rae Kim) 정회원
 1995년 2월 : 청주대학교 전자공학과(학사)
 1997년 8월 : 청주대학교 대학원 전자공학과(석사)
 1997년~1997년 : 한국전자통신연구원 위촉연구원
 <연구분야> 이동통신, Multimedia 통신, Spread Spectrum 통신



박 진 수(Jin Soo Park) 정회원
 1948년 8월 30일생
 1975년 2월 : 한양대학교 전자공학과(학사)
 1977년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과(석사)
 1985년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과(박사)
 1987년 2월~1988년 2월 : Univ. Colorado at Colorado Spring(Post Doc.)
 1978년 2월~현재 : 청주대학교 전자공학과 교수
 <연구분야> 디지털 이동통신, 부호이론, Spread Spectrum 통신, 무선 LAN 등임.