

論文98-35S-3-5

# 얼랑 캐패시티를 이용한 CDMA 셀룰라 시스템의 용량 분석

## (Capacity Analysis of CDMA Cellular Systems using Erlang Capacity)

梁正謀\*, 朴鎮秀\*\*

(Jeong-Mo Yang and Jin-Soo Park)

### 요 약

기존의 AMPS와 TDMA 셀룰라 시스템에서 모든 주파수 슬롯이나 시간 슬롯이 이미 다른 사용자들에 의해 사용되고 있을 때 통화 블럭킹이 일어나는 반면, CDMA 셀룰라 시스템에서는 다른 사용자들의 통화로 인한 간섭 레벨이 10dB를 초과할 때 일어난다. CDMA 블럭킹 확률이 보통 1% 또는 2%일 때의 사용자수를 얼랑용량이라 하고 이 사용자수는 AMPS와 TDMA 시스템에서 채널수에 대응된다. 본 논문에서는 간섭전력의 제곱으로 새로운 재사용계수를 구하였고 비트율이 9.6kbps와 14.4kbps인 CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 얼랑용량을 구하였다. 그 결과 AMPS와 TDMA 시스템에서의 얼랑용량보다 CDMA 시스템이 각각 20.7배와 5.5배로 증가되고, Viterbi와 Padovani가 구한 용량보다 1~4얼랑 증가됨을 입증하였다.

### Abstract

In the FDMA and TDMA Cellular Systems, call blocking rise when frequency slots and time slots are used to other users. Otherwise, in the CDMA cellular systems, call blocking arises when interference level is above 10dB according to call of other users. System capacity is defined to be Erlang capacity that is the number of users when CDMA blocking probability is 1% or 2%. Users number corresponded channel number of AMPS and TDMA cellular systems. In this paper, we proposed new reuse-fraction using square of interference power and obtained Erlang capacity for reverse link of CDMA cellular system with bit rate  $R_b$ , 9.6kbps and 14.4kbps. As a result, Erlang capacity of CDMA system have more 20.7 and 5.5 times than AMPS and TDMA system and have more from 1 to 4 Erlang than Viterbi and Padovani obtained.

### I. 서론

1985년 위성통신시스템에서 FDMA와 TDMA가 CDMA보다 용량면에서 우세한 것으로 보고되었으나<sup>[1]</sup>, 1990년 이후 FDMA나 TDMA 시스템 용량이 주로 대역에 의해 제한되고 CDMA 시스템의 용량은 음성 부하율과 안테나에 의한 공간격리로 인해 FDMA와 TDMA에 비하여 시스템의 용량을 크게 증가시킬 수 있음이 입증되었다.<sup>[2, 4]</sup>

중전의 CDMA 용량분석은 주로 위성시스템 이용 면에서 비교해 왔으나, 육상 디지털 셀룰라 시스템에

\* 正會員, 淸州技能大學 電子技術學科

(Dept. of Electronic Technic, Chongju Polytechnic College.)

\*\* 正會員, 淸州大學校 電子情報通信半導體工學部

(School of Electronic, semiconductor, Computer and Communication Engineering, Chongju University)

※ 이 논문은 '98년도 청주대학교 연구비 지원에 의한 결과임.

接受日字: 1997年11月5日, 수정완료일: 1998年3月5日

서 비교하면 기지국간 분리는 전파 경로손실에 의해서 이루어지는데, 극초단파(UHF) 신호의 육상 전파전파 손실은 전파거리의 4승비로 증가한다. 따라서 기존의 아날로그 FDMA와 TDMA 시스템 방식은 인접 기지국들에게 서로 다른 주파수를 배정해야 하는 반면, CDMA 시스템 방식에서는 모든 기지국이 동일 주파수 대역을 재사용 할 수 있으므로 이러한 주파수 재사용 비율의 증가만큼 용량이 증가된다<sup>[4]</sup>.

CDMA 시스템에서의 통화블럭킹 현상은, 주로 다른 사용자들의 통화로 인해 간섭 레벨이 배경잡음(background noise) 레벨보다 정해진 레벨이상이 될 때 일어나는 것으로 정의한다. 이론상으로는 간섭 대 잡음비를 임의로 크게 만들 수 있지만 이 비율이 일정 레벨(약 10dB)이상이 되면 사용자 수의 추가에 따른 간섭증가가 매우 급격하여 수확제감 현상을 낳으며 궁극적으로는 시스템이 불안정하게 된다<sup>[5]</sup>. 결과적으로 CDMA에서 통화블럭킹은 전체간섭대 배경잡음비가  $1/\eta$ 를 초과할 때 일어나며(여기에서 10dB 즉,  $\eta=0.1$ 이다), 이 경우 통화블럭킹을 일으키는 열량용량을 구할 수 있다.

CDMA 블럭킹확률 근사화 방법에 있어서 Prasad는 전체 SNR이 로그노말 랜덤변수들의 합이고 로그노말 변수로 근사화하여 시스템의 용량을 판별 한 반면<sup>[6]</sup>, Viterbi와 Padovani는 가우시안 변수로 근사화하고 대기이론을 이용한 열량용량으로 시스템의 용량을 판별하였다<sup>[6]</sup>. 열량용량을 판별하는데 있어 주파수 재사용 계수는 중요한 파라미터로 작용한다. 이러한 재사용 계수를 구하는 방법에 있어 Kim은 수학적 모델을 이용하여 간단하게 구할 수 있다는 것을 제안하였다<sup>[8]</sup>.

본 논문에서는 CDMA 셀룰라 시스템의 블럭킹확률 유도과정에서 분산값에 적용할 새로운 재사용계수의 계산이 필요하여 Kim이 제안한 계산방법을 이용, 간섭 전력의 제공으로 재사용계수(reuse factor)를 구하는 방법을 제시하였다. 이 새로운 재사용계수를 이용하여 구한 CDMA 역방향 링크에 대한 열량용량을 Viterbi와 Padovani가 구한 용량과 비교하고, AMPS와 TDMA시스템과의 용량을 비교 분석하였다.

## II. 시스템에서의 통화블럭킹

일반적인 통신 시스템의 전화 통화량 이론에서, 교

환국에 설치된 호(call) 요구는 평균 호(call) 도착률  $\lambda$  calls/sec인 포아송(Poisson)분포로 모델화되고, 호의 서비스시간은 평균  $T=1/\mu$  sec/call를 갖는 지수(exponential)분포로 모델화 된다. 일반적인 통화 블럭킹(blocking) 확률은 M/M/S/S 대기이론을 사용하는 고정적인 열량(erlang) 분석을 사용한다.

어떤 호(call)가 도착할때  $N$ 개의 채널들이 사용중이어서 도착한 호가 손실(lost)될 호손율은 Erlang B 공식으로 구할 수 있다.

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

(1)식에서,  $A = \lambda/\mu$ 는 "평균통화량(offered load)"을 나타내고 단위는 열량(Erlang)이다.

이 모델을 FDMA와 TDMA 셀룰라 전화 시스템의 역방향 링크에 적용할 수 있으며 호(call)를 할당하기 위해 사용되는 채널수는 고정된다. 예를들어, AMPS 시스템은 섹터당  $N=19$ 인 채널을 갖고, 2% 블럭킹(blocking)이 일어날 확률( $B=0.02$ )은  $A=12.34$  열량(erlang)일 때 발생한다. 즉, 평균 호(call)의 수가 12.34일 때, 들어오는 호(call)는 어느 특정한 시간에서건 2%의 블럭킹(blocking)이 일어날 수 있음을 말한다. 채널당 3개의 시간슬롯을 갖는 IS-54 TDMA/FDMA 셀룰라 시스템은 섹터당  $3 \times 19=57$ 개의 채널이 있고, 열량(Erlang) B 공식은  $A=46.8$  열량(erlang)에 대해 2% 블럭킹(blocking) 확률을 제공한다. 그러므로 AMPS에 대해 TDMA의 통화용량 증가는 채널수에서의 증가보다 더 증가함을 알 수 있다.

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

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

CDMA 셀룰라 시스템에서는  $K$ 명의 역방향 링크 사용자들을 갖는 단일 셀(cell)을 고려하면,  $K+1$ 번째 사용자에게는  $K$ 명 사용자들의 통화로 인한 전체 전력  $P_{TOT}$ 가 간섭전력이 된다.

$$\begin{aligned} P_{TOT} &= \nu_1 P_1 + \nu_2 P_2 + \dots + \nu_K P_K + N_0 W \\ &= I_0 W \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$W$  = CDMA 확산 스펙트럼 대역폭  
 $\nu_i$  = 음성 활동율(voice activity)  
 $N_0, I_0$  = 각각, 잡음과 전체 간섭스펙트럼 밀도  
 $P_i$  =  $i$ 번째 사용자에게 대한 랜덤 신호 전력  
 $K$ 는 랜덤하기 때문에,  $I_0 R_b$ 로 정규화할 수 있다.  
 여기서  $R_b$ 는 비트율(bit rate)이다.

$$\frac{P_{TOT}}{I_0 R_b} = \nu_1 \frac{E_{b1}}{I_0} + \nu_2 \frac{E_{b2}}{I_0} + \dots + \nu_K \frac{E_{bK}}{I_0} + \frac{N_0}{I_0} \frac{W}{R_b} \quad (4)$$

여기서  $Z_K$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$Z_K = \nu_1 \frac{E_{b1}}{I_0} + \nu_2 \frac{E_{b2}}{I_0} + \dots + \nu_K \frac{E_{bK}}{I_0} \quad (5)$$

그러면 식 (4)는 다음과 같이 전개된다.

$$\frac{P_{TOT}}{I_0 R_b} \triangleq Z_K + \frac{N_0}{I_0} \frac{W}{R_b} = \frac{W}{R_b} = \text{constant} \quad (6)$$

$$Z_K = \sum_{i=1}^K \nu_i \frac{E_{bi}}{I_0} = \sum_{i=1}^K \nu_i \rho_i = \frac{W}{R_b} (1 - \eta) \quad (7)$$

여기서  $\eta \triangleq N_0/I_0$ 는 CDMA 시스템의 부하(load)를 나타내는 파라메타이고  $W/R_b$ 는 확산 스펙트럼 처리 이득이다. [6]에서,  $\eta < 0.1$ 이면 시스템이 과부하(overload) 되었다고 간주한다.  $\eta$  값이 주어지면,  $(K+1)$ 번째 사용자가 사용할 수 있는 채널의 질은 랜덤변수  $Z_K$ 의 분포에 의해 특성화되고,  $Z_K$ 가 임계(threshold)값을 초과하면, 그 채널은  $(K+1)$ 번째 사용자를 블럭킹(blocking)할 것이다.

랜덤 변수  $Z_K$ 의 분포에 대해,  $(K+1)$ 번째 CDMA 사용자가 블럭킹(blocking)될 확률은  $Z_K$ 가 임계값  $Z_{crit}$ 를 초과하는 확률이 된다.

$$\begin{aligned} B_{CDMA} &= P_r \left\{ Z_K > \frac{W}{R_b} (1 - \eta_{crit}) \right\} \\ &= P_r \{ Z_K > Z_{crit} \} \\ &= P_r \left\{ \frac{Z_K - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}} > \frac{Z_{crit} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}} \right\} \\ &= Q_Z \left( \frac{Z_{crit} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $\eta_{crit}$ 는 부하(load)의 임계값을 나타내고,  $Q_Z(\cdot)$ 는 평균이 0 이고 단위 분산을 갖는 랜덤변수  $Z_K$ 의 누적 분포함수에 대한 표현식이다. 이러한 랜덤 변수를 표준 또는 단위 정규 분포(standard or unit normal distribution)를 갖는다고 한다.

$Z_K$ 가 랜덤변수의 합이기 때문에,  $B_{CDMA}$ 의 값을 계산하기 위해 중앙극한정리(central limit theorem)를 사용한다.

$$Q_Z(x) \approx Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \quad (9)$$

즉, 블럭킹(blocking) 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$B_{CDMA} = Q \left( \frac{Z_{crit} - E\{Z_K\}}{\sqrt{Var\{Z_K\}}} \right) \quad (10)$$

다음으로 블럭킹(blocking)확률을 계산하기 위하여  $Z_K$ 의 평균과 분산을 계산한다.

측정값은  $\rho_i \triangleq E_{bi}/I_0$ 가 중앙값  $m_{dB} = 7dB$ 와 표준편차  $\sigma_{dB} = 2.5dB$ 인 가우시안 확률분포와 유사하다. 그러므로, 평균이 0 이고 단위 분산을 갖는 가우시안 랜덤 변수  $G$ 를 사용하면, 로그로말(lognormal) 랜덤 변수  $\rho_i$ 를  $\exp\{\beta \cdot (m_{dB} + \sigma_{dB}G)\}$ 으로 쓸 수 있다. 여기서  $\beta = \ln 10/10$ 이다.  $\rho_i$ 의 중앙, 평균, 그리고 제곱평균값은 다음과 같다.

$$Med\{\rho_i\} = \rho_{med} = \exp\{\beta m_{dB}\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E\{\rho_i\} &= E\{\exp[\beta \cdot (m_{dB} + \sigma_{dB}G)]\} \\ &= \rho_{med} \exp\left\{ \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_{dB}^2 \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

그리고

$$\begin{aligned} E\{\rho_i^2\} &= E\{\exp[2\beta \cdot (m_{dB} + \sigma_{dB}G)]\} \\ &= \rho_{med}^2 \exp\{2\beta^2 \sigma_{dB}^2\} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (11), 식 (12)와 식 (13)를 이용하여 단일 CDMA 셀(cell)에서 랜덤 변수  $Z_K$ 의 평균과 제곱 평균을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E\{Z_K\} &= E_K\{E\{Z_K|K\}\} \\ &= E\{K\}E\{\nu_i\}E\{\rho_i\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} E\{Z_K^2\} &= E_K\{E\{Z_K^2|K\}\} \\ &= E_K\{KE\{\nu_i^2 \rho_i^2\} + K(K-1)[E\{\nu_i \rho_i\}]^2\} \\ &= \bar{K} \cdot Var\{\nu_i \rho_i\} + \bar{K}^2 \cdot [E\{\nu_i \rho_i\}]^2 \end{aligned} \quad (15)$$

$K$ 가 포이손(Poisson) 변수이므로 평균과 분산이 같게 된다. 즉,  $Var\{K\} = \bar{K}$ 이므로,  $Z_K$ 의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Var}\{Z_K\} &= \bar{K} \text{Var}\{\nu_i \rho_i\} + \text{Var}\{K\} [E\{\nu_i \rho_i\}]^2 \\
 &= \bar{K} \{ \text{Var}\{\nu_i \rho_i\} + [E\{\nu_i \rho_i\}]^2 \} \\
 &= \bar{K} \cdot E\{\nu_i^2 \rho_i^2\} \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i^2 \cdot \bar{\rho}_i^2
 \end{aligned} \tag{16}$$

각각의 CDMA 셀(cell)에서  $K$ 명이 통화를 하고 있다면,  $Z_K$ 의 평균은 다음과 같이 자신의 셀(Home cell)과 이웃 셀들로 나누어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E\{Z_K\} &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot 1.18 \left[ \rho_{med}(\text{home cell}) + \rho_{med}(\text{other cells}) \right] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot 1.18 \cdot \rho_{med}(\text{home cell}) \left[ 1 + \frac{\rho_{med}(\text{other cells})}{\rho_{med}(\text{home cell})} \right] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i \cdot 1.18 \cdot \rho_{med}(\text{home cell}) \cdot (1+F)
 \end{aligned} \tag{17}$$

여기서  $1+F$ 는 CDMA “재사용 계수(reuse factor)”이고  $F$ 는 “재사용 요소(reuse fraction)”이다.  $F$ 의 계산은 전체 다른 셀(other cells) 간섭 전력과 자신의 셀(home cell) 간섭 전력의 중앙값에 대한 비율이 평균 비율과 같다고 가정함으로써 성립한다.

유사한 절차를 사용해서,  $Z_K$ 의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Var}\{Z_K\} &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i^2 \cdot 1.94 \left[ \rho_{med}^2(\text{home cell}) + \rho_{med}^2(\text{other cells}) \right] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i^2 \cdot 1.94 \cdot \rho_{med}^2(\text{home cell}) \left[ 1 + \frac{\rho_{med}^2(\text{other cells})}{\rho_{med}^2(\text{home cell})} \right] \\
 &= \bar{K} \cdot \bar{\nu}_i^2 \cdot 1.94 \cdot \rho_{med}^2 \cdot (1+F')
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$F' \triangleq \frac{\rho_{med}^2(\text{other cell})}{\rho_{med}^2(\text{home cell})} \tag{19}$$

여기서  $1+F'$ 는 간섭전력의 제공에 대한 재사용 계수(reuse factor)이고  $F'$ 는 재사용 요소(reuse fraction)이다. [5] 과 [6]에서는,  $F' = F = 0.05$ 의 값을  $F'$ 의 상한치(upper bound)로써 사용한다.

### III. CDMA 재사용 계수에 대한 분석

완벽한 전력 제어와 거리의 4승 법칙의 전파전파를 가정하면, 같은 셀(cell)에서 두 이동국 전송기의 전력  $P_1$ 과  $P_2$ 의 비율은 셀(cell) 위치로부터 그들의 거리  $D_1$ 과  $D_2$ 의 비율의 4승에 정비례한다. 즉, 다음과 같다.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^4 \tag{20}$$

이동국이 속해있는 셀(O)에서가 아니라 다른 셀(H)에서 수신되는 CDMA 이동국 전력을 유도한다. 반지름이  $R$ 인 셀(cell)내에  $K$ 명의 사용자가 균일하게 분포되어 있다고 가정하면, 사용자 밀도는 다음과 같다.

$$\omega = \frac{K}{\pi R^2} \tag{21}$$

여기서  $K$ 는 셀당 사용자수이고  $R$ 은 셀의 반지름이다.

전력제어는 기지국으로부터 거리가  $r$ 에 위치한 단말기는 다음과 같은 전력으로 송신한다.

$$P_T = P_{\max} \left( \frac{r}{R} \right)^\beta = P_0 r^\beta \tag{22}$$

여기서  $r$ 은 이동국과 셀(cell)의 중심까지의 거리이고,  $P_0 = P_{\max}/R^4$ 이다. 또한 기지국에 수신된 전력이 다음과 같음을 의미한다.

$$P_R = P_0 \cdot r^\beta \cdot r^{-\beta} = P_0 \tag{23}$$

여기서  $\beta$ 는 자유공간의 경우는 2이고 이동 시스템의 경우는 3에서 5 사이에 있는 경로 손실 지수이다.

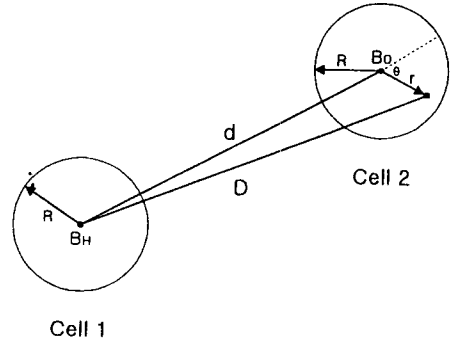


그림 1. 다른 셀에 위치한 단말기로 인한 간섭  
Fig. 1. Interference to terminal sited other cell

다중 셀(cell) CDMA 시스템에서 균일한 전력과 전력 제어를 가정하면, 다른 셀(cell 2)내에 있는 이동국으로부터 하나의 셀(cell 1)에 수신된 전력은 다음과 같다.

$$P_{other} = \frac{P_0 r^4}{D^4} = P_0 \left( \frac{r}{D} \right)^4 \tag{24}$$

여기서

$r$  : 이동국과 셀(cell 2) 수신기사이의 거리 ( $\leq R$ )

$D$  : 이동국과 셀(cell 1) 수신기사이의 거리

그림 1에서 만약 두 셀 (두 셀의 중심) 사이의 거리가  $d$ 라면,  $D$ 은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$D = \sqrt{d^2 + r^2 + 2dr \cos \theta} \quad (25)$$

여기서 ( $r, \theta : 0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi$ )는 셀(cell 2)의 중심을 기준으로 셀(cell 2) 내의 이동국 위치를 나타낸다.

완벽한 전력제어를 가정하면, 각 이동국에 대해 기지국은 같은 전력을 수신하게 될 것이다.  $P_0$ 를 기지국에서 수신된 CDMA 사용자의 전력이라 하고, 전파 전파의 경로손실이 거리의 4승비에 비례한다고 가정하면, 균일하게 분포된  $K$ 개의 이동국을 갖고있는 하나의 셀로부터 거리  $d = kR$  만큼 떨어진 기지국까지의 총 이동국 전력을 구하면 다음과 같다.

$$P(d) = \int P_0 \left(\frac{r}{D}\right)^\beta \omega dA \quad (26)$$

여기서 적분은 하나의 셀 영역에 대해서이다. 그림 1을 참고로 식 (21)과 식 (25)를 식 (26)에 대입하면 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} P(d) &= 2 \int_0^\pi \int_0^R P_0 \left(\frac{r}{D}\right)^\beta \frac{K}{\pi R^2} r dr d\theta \\ &= \frac{2KP_0}{\pi R^2} \int_0^R dr r^{\beta+1} \int_0^\pi d\theta \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^{\beta/2}} \end{aligned} \quad (27)$$

$\beta = 4$ 인 경우를 고려하고, 거리  $d$ 만큼 떨어져 있는 셀(cell)로부터의 평균 간섭 전력은 다음과 같다.

$$P(d) = \frac{2KP_0}{\pi R^2} \int_0^R dr r^5 \int_0^\pi d\theta \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^2} \quad (28)$$

파라미터  $d = kR$  을 사용해서, 적분을 분석적으로 풀 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$P(d = kR) = 2KP_0 \left[ 2k^2 \ln \left( \frac{k^2}{k^2 - 1} \right) - \frac{4k^4 - 6k^2 + 1}{2(k^2 - 1)^2} \right] \quad (29)$$

6각형 셀룰라 구조를 사용함으로써, 모든 셀들로부터 수신된 전체 간섭전력을 계산할 수 있게 된다. 다중 셀로 인한 CDMA 재사용 요소(즉, 간섭 보정 계수)  $F$ 는 다른 셀(O)들로부터 수신된 간섭전력과 자신의 셀(H)에 있는 사용자로 인해 생성되는 간섭전력의 비로 정의된다.

$$F \cong \frac{I_{other}}{I_{home}} = \frac{I_{other}}{KP_0} \quad (30)$$

여기서  $K$ 는 셀당 사용자수이고,  $P_0$ 는 완벽한 전력제어된 사용자로부터의 수신 전력이다.

주어진 셀(cell)에서 수신된 전체 이동국 전력이  $KP_0$ 이기 때문에, 모든 셀(cell)들로부터 수신된 전체 전력과 하나의 셀(cell)로부터 수신된 전력의 비율인 재사용 계수(reuse factor)는 다음과 같다.

$$\text{Reuse factor} \cong 1 + F = \frac{KP_0 + \sum_k P(d = kR)}{KP_0} \quad (31)$$

여기서 재사용 요소(reuse fraction)  $F$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{\sum_k P(kR)}{KP_0} \\ &= 2 \sum_k \left[ 2k^2 \ln \left( \frac{k^2}{k^2 - 1} \right) - \frac{4k^4 - 6k^2 + 1}{2(k^2 - 1)^2} \right] \\ &= \frac{\frac{1}{KI_0 R_b} \sum_k P(d = kR)}{\frac{1}{KI_0 R_b} KP_0} \approx \frac{\rho_{med}(\text{other cell})}{\rho_{med}(\text{home cell})} \end{aligned} \quad (32)$$

식 (32)에서의 근사는 간섭 전력의 평균과 중앙값의 비율이 같다는 가정하에서이다.

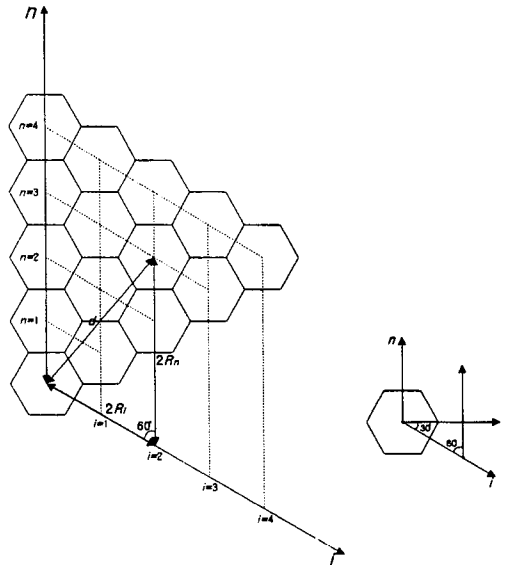


그림 2.  $d = kR$  에 대한 비례상수  $k$ 를 구하는 기하학적 평면

Fig. 2. Geometrical a plane surface to search for constant  $k$  of  $d = kR$ .

그림 2는  $k$ 값을 구하기 위한 알고리즘을 나타낸 것이며,  $n, i$ 의 값에 따라  $k$ 를 구할 수 있다. 반지름이  $R$ 인 균일한 셀룰라에 대해, 첫 번째 링(ring)은  $k=2$ 인 6개의 인접 셀(cell)로 구성되고, 두 번째 링(ring)은  $k=4$ 인 6개의 셀(cell)과  $k=2\sqrt{3}$ 인 6개의 셀(cell)로 구성되며, 세 번째 링(ring)은  $k=6$ 인 6개의 셀(cell)과  $k=2\sqrt{7}$ 인 12개의 셀(cell)로 구성된다. 계속되는 링(ring)에 따라 구성 셀(cell)의  $k$ 값을 구할 수 있다.  $k$  값에 따른 합은 첫 번째 두 링(ring)에 대해  $F=0.3198$  이고 [4]에서는 링(ring)에 대해  $F \approx 0.33$  이다. 즉,

$$F = 6P(2R) + 6P(2R\sqrt{3}) + 6P(4R) + 12P(2R\sqrt{7}) + 6P(6R) + \dots \approx 0.33 \quad (33)$$

[5], [6]에서 테스트와 시뮬레이션은 이 분석과 다른 다른 요소(factor)들 사이에 특별한 상태에서 불완전한 전력 제어와 4승이 아닌 전파 법칙으로 인한 높은 값( $\approx 0.55$ )을 제공한다.

유사하게,  $F'$ 를 구하기 위해서 이동국으로 부터 다른 셀(cell)에 수신된 전력의 제공은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{other}^2 = P_0^2 \left( \frac{r}{D} \right)^8 \quad (34)$$

거리  $d$ 만큼 떨어져 있는 셀(cell)로부터의 평균 간섭 전력은 다음과 같이 “제공된 전력(squared power)”을 사용하여 쓸 수 있다.

$$P_2(d) = \frac{2KP^2}{\pi R^2} \int_0^R dr r^3 \int_0^\pi d\theta \frac{1}{(r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^4} \quad (35)$$

파라미터  $d=kR$ 을 사용해서, 적분을 풀 수 있다.

$$P_2(d=kR) = 2KP_0^2 \left\{ \frac{k^6 + 9k^4 + 9k^2 + 1}{12(k^2 - 1)^6} - \frac{4k^6 + 45k^4 + 54k^2 + 7}{60(k^2 - 1)^5} + \frac{2k^6 + 30k^4 + 45k^2 + 7}{40(k^2 - 1)^4} - \frac{4k^6 + 90k^4 + 180k^2 + 35}{12(k^2 - 1)^3} + \frac{k^6 + 45k^4 + 135k^2 + 35}{60(k^2 - 1)^2} - \frac{3k^4 + 18k^2 + 7}{4(k^2 - 1)} + \frac{11k^2}{15} - \frac{7}{2} + 8k^2 \ln \left( \frac{k^2}{k^2 - 1} \right) \right\} \quad (36)$$

제공된 전력을 사용하여, 재사용 요소(reuse fraction)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F' = \frac{\sum_k P_2(d=kR) / KP_0^2}{\frac{1}{K(I_0 R_b)^2} \sum_k P_2(d=kR)} \approx \frac{\rho_{med}^2(\text{other cell})}{\rho_{med}^2(\text{home cell})} \quad (37)$$

간섭전력의 제공 평균과 중앙값 제공의 비율이 같다는 가정하에서이다. 첫 번째 링(ring)과 두 번째 링(ring)에 대해서 재사용 요소(reuse fraction)를 구하면 다음과 같다.

$$F' = 0.086 \quad (38)$$

#### IV. CDMA 얼량용량의 시뮬레이션과 분석

CDMA 블럭킹(blocking)확률  $B_{CDMA}$ 를 계산하기 위해서 다음의 파라미터값을 사용한다.  $W=1.2288$  MHz,  $\eta_{crit}=0.1$ ,  $\bar{v}_i=0.4$ ,  $\bar{v}_i^2=0.31$ ,  $\rho_{med}=7$  dB=5.01 [6]. IS-95 CDMA 시스템의 블럭킹(blocking) 확률 값은 각각  $R_b=9.6$  kbps,  $R_b=14.4$  kbps의 비트율에 대해  $\bar{K}$ 의 함수로서 아래와 같은 경우에 대하여 각각 그림 3과 그림 4에 그래프로 나타내었다.

- ①  $F=F'=0$ , 단일 셀인 경우;
- ②  $F=F'=0.55$ , [5]과 [6]에서의 값;
- ③  $F=0.55$  [6],  $F'=0.086$  (본 논문);
- ④  $F=0.33$  [7],  $F'=0.086$  (본 논문);

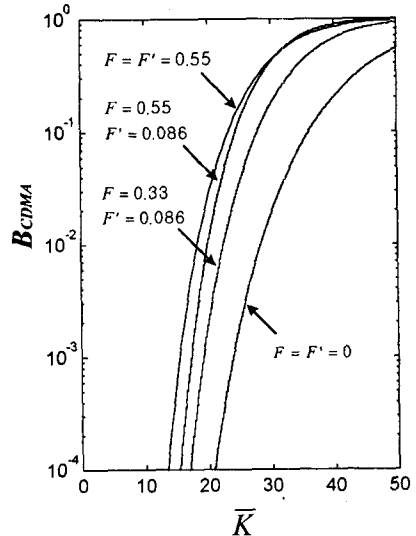


그림 3.  $R_b=9.6$  kbps 일 때 블럭킹 확률  
Fig. 3. Blocking probability when  $R_b=9.6$  kbps.

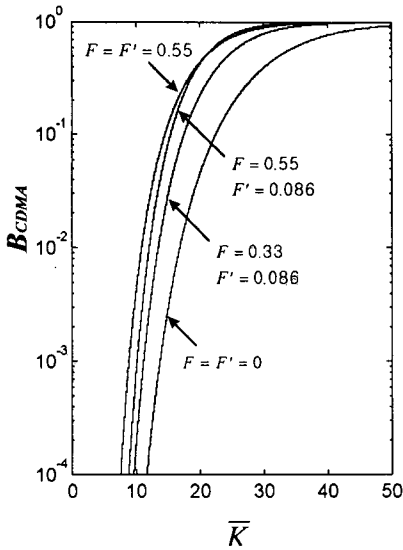


그림 4.  $R_b = 14.4$  kbps 일 때 블럭킹 확률  
Fig. 4. Blocking probability when  $R_b = 14.4$  kbps.

블럭킹(blocking) 확률에 대하여 일량용량(Erlang Capacity)  $\bar{K}$ 를 등가 채널수로 계산할 수 있었다. 표 2와 표 3은 각 경우에 대해서 분석된 일량용량과 채널수를 나타낸다. 이전에 언급한 것과 같이 일량용량과 그에 따른 채널수를 비교하면,  $N > \bar{K}$ 인 관계를 만족한다는 것을 알 수 있다.

표 1.  $R_b = 9.6$  kbps 일 때 일량용량과 채널수  
Table 1. Erlang capacity and channel number when  $R_b = 9.6$  kbps.

경우 $B_{CDMA}$	①	②	③	④
1%	$\bar{K} = 28$	$\bar{K} = 18$	$\bar{K} = 20$	$\bar{K} = 22$
	$N = 39$	$N = 27$	$N = 30$	$N = 32$
2%	$\bar{K} = 30$	$\bar{K} = 20$	$\bar{K} = 22$	$\bar{K} = 24$
	$N = 39$	$N = 28$	$N = 30$	$N = 32$

표 2.  $R_b = 14.4$  kbps 일 때 일량용량과 채널수  
Table 2. Erlang capacity and channel number when  $R_b = 14.4$  kbps.

경우 $B_{CDMA}$	①	②	③	④
1%	$\bar{K} = 16$	$\bar{K} = 11$	$\bar{K} = 12$	$\bar{K} = 13$
	$N = 25$	$N = 19$	$N = 20$	$N = 21$
2%	$\bar{K} = 18$	$\bar{K} = 12$	$\bar{K} = 13$	$\bar{K} = 14$
	$N = 25$	$N = 19$	$N = 20$	$N = 21$

표 2와 표 3의 채널수는 CDMA 시스템에서 1 FA(1.25MHz)에 대한 것이다. CDMA 주파수 분배를 보면, 9개의 CDMA 주파수(Center Frequency)로 구성되어 있기 때문에, 표의  $N$ 값에 9를 곱해 주어야만 한다. 예를들어, AMPS(12.34)와 TDMA (46.8) 셀룰라 시스템과 비교해 보면,  $B_{CDMA} = 2\%$ ,  $R_b = 9.6$  kbps,  $F = 0.55$ ,  $F' = 0.086$ 에 대해서 CDMA의 채널수는  $N = 30 \times 9 = 270$ 이 된다. 그러므로 식 (1)로부터  $A = 256$  일량임을 구할 수 있다. 각각 12.34 일량과 46.8 일량을 가지는 AMPS와 TDMA 시스템에 대하여 비교하면 다음과 같다.

$$\frac{\bar{K}_{CDMA}}{\bar{K}_{AMPS}} = 20.7, \quad \frac{\bar{K}_{CDMA}}{\bar{K}_{TDMA}} = 5.5 \quad (39)$$

즉, CDMA 시스템이 AMPS 시스템에 대하여는 20.7배, TDMA 시스템에 대하여는 5.5배의 용량을 가진다는 것을 알 수 있다.

### V. 결론

FDMA에서 채널 주파수 대역 축소화 및 TDMA에서 시간 슬롯 개수의 증가와 같은 단순한 접근 방법으로 아날로그 시스템과 쉽게 비교할 수 있으나 CDMA 시스템을 다른 디지털 시스템과 비교하는 것은 쉽지가 않다. 그래서 유선 시스템에서 널리 사용되어졌으며 현재 상용중인 시스템의 특성을 잘 나타낼 수 있는 일량-B 공식을 이용하여 블럭킹 확률(blocking probability)을 계산하였다.

통화블럭킹(blocking)을 전체 간섭이 배경잡음보다 10dB만큼 크다는 조건으로 제시하고 일량용량은 2%의 접속 블럭킹(blocking) 확률에 해당하는 통화량 부하(load)로 정의 하였다. 포아송(Poisson) 통화 착신률, 지수분포의 메시지 길이, 충분한 수의 서버를 가정하고(대기이론에서  $M/M/\infty$ ), 음성활동율이 40%, 각 사용자의 수신에너지 대 간섭밀도비가 로그로말 분포(lognormal distribution)이며 역방향 수신신호가 완벽하게 전력제어 되었다고 가정하고, 중앙 극한 근사(central limit theorem)와 평균이 0이고 단위 분산을 갖는 가우시안(Gaussian) 랜덤변수를 사용하여 통화 블럭킹 확률(blocking probability)을 구했다.

본 논문에서 재사용 요소(reuse fraction)를 새로운

방법으로 구한 결과, CDMA 셀룰라 역방향 링크의 얼랑용량(Erlang Capacity)가 [5]와 [6]보다 약간 더 높음을 알 수 있었다. 즉,  $R_b = 9.6$  kbps에 대한 경우, 2% 블럭킹 확률에서 Viterbi가 제안한  $F = F' = 0.55$ 에 대하여  $F = 0.55$ ,  $F' = 0.086$ 의 경우 섹터당 용량이 2얼랑 더 높았고,  $F = 0.33$ ,  $F' = 0.086$ 의 경우 섹터당 용량이 4얼랑 높게 나타났으며,  $R_b = 14.4$  kbps에 대한 경우, 2% 블럭킹 확률에서 Viterbi가 제안한  $F = F' = 0.55$ 에 대하여  $F = 0.55$ ,  $F' = 0.086$ 의 경우 섹터당 용량이 1얼랑 더 높았고,  $F = 0.33$ ,  $F' = 0.086$ 의 경우 섹터당 용량이 2얼랑 높게 나타났다.

그리고 기존의 AMPS와 TDMA시스템과의 용량을 얼랑캐패시터를 이용하여 비교한 결과 CDMA시스템이 AMPS 시스템에 대하여는 20.7배, TDMA 시스템에 대하여는 5.5배의 용량을 가진다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Viterbi. A. J, "When not to Spread Spectrum - A Sequel," *IEEE Communications Mag.*, vol. 23, pp. 12-17, Apr. 1985.  
 [2] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, and L. A. Weaver, "Increased capacity using CDMA for mobile satellite communications," *IEEE Trans. Select. Areas Commun.*, vol. 8, pp. 503-514, May 1990.  
 [3] P. T. Brady, "A statistical analysis of on-off patterns in 16 conversations," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 47, pp. 73-91, Jan. 1968.  
 [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. Technol.*, vol. 40, May. 1991.  
 [5] 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.  
 [6] 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.  
 [7] R. Padovani, "Reverse Link Performance of IS-95 Based Cellular Systems," *IEEE Personal Communications Magazine*, Third Quarter 1994, pp. 28-34.  
 [8] K. I. Kim, "CDMA Cellular Engineering Issues," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 42, no. 3, pp. 345-350, Aug. 1993.  
 [9] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products* (4th edition), Academic Press, New York, 1965.  
 [10] L. F. Fenton, "The Sum of a Log-Normal Probability Distribution in Scattered Transmission Systems," *IRE Trans. Commum. Syst.*, CS-8, 57-67, Mar. 1960.  
 [11] G. R. Cooper and R. W. Nettleton, "A spread spectrum technique for high capacity mobile communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-27, pp. 264-275, Nov. 1978.

저 자 소 개



梁正謨(正會員)

1990년 2월 청주대학교 전자공학과(공학사). 1992년 2월 청주대학교 전자공학과(공학석사). 1997년 2월 청주대학교 전자공학과(박사수료). 현재 청주기능대학 전자기술학과 전

임강사. 주관심분야는 데이터통신, 이동통신, 대역확산 통신, 무선LAN임

朴鎮秀(正會員)

第33卷 A編 第6號 參照

현재 청주대학교 전자정보통신반 도체공학부 교수