CDMA 이동통신 시스템의 스펙트럼 이용효율 분석

김 종 호°, 최 상 성, 이 형 수

전파기반연구부
전파방송연구소
한국전자통신연구원
jonghkim@etri.re.kr

Spectrum Usage Efficiency of CDMA System

Jong Ho Kim, Sang Sung Choi, Hyung Soo Lee

Advanced Radio Technology Departments
Radio and Broadcasting Laboratory
ETRI

Abstract

In order to assess the spectrum usage efficiency in mobile radio services, we consider the capacity limits of a CDMA system. The maximum achievable capacity per km^2 is viewed as a meaningful figure of merit for a cellular system and a method is proposed here to estimate the minimum achievable distance between adjacent base stations in the case of CDMA. The probability for entering in soft handover state is used as a limit for densification in a CDMA system. From this criterion, conditions on the minimum possible cell radius are derived.

1. 서론

디지털 이동통신 시스템의 스펙트럼 이용효율을 평가하기 위해서는 모든 적절한 시스템 변수를 포함하는 것이 절대적으로 필요하다. 즉, 변조방식과 다중접속방식에 구애받지 않고 시스템의 효율을 적절하게 나타낼 수 있는 표현방법이 있어야 하며 이것은 다음의 세가지 이유에 의하여 필요성이 명백해진다. 첫째는 기존의 시스템이나 새로 제안되는 시스템에 대하여 스펙트럼 효율 측면에서 서로의 수준을 비교하여 현재의 시스템들은 계속 스펙트럼의 효율적 이용에 대한 요구가 있으며 이를 해결하기 위한 대책으로 스펙트럼 효율에 대한 정확한 정의가 필요하다. 둘째로 스펙트럼 효율 평가의 목적은 서로 다른 디지털 무선 시스템들의 근본적인 용량을 평가하는데 일조하기 위한 것이다. 그러므로 보다 효율적은 변조방식과 다중접속방식을 이용하도록 권장한다. 셋째로 주파수 폭주가 일어나는 도심지역에서 스펙트럼 효율의 정확한 측정은 최소 스펙트럼 효율 표준을 정하는데 사용할 수 있다. 이러한 표준들은 스펙트럼의 낭비를 막아서 낮은 시스템 비용 제작자를 보호하거나 고품질의 서비스를 제공한다.

현재까지 운영되는 통신시스템 중에서 CDMA 방식의 이동통신 시스템이 주파수를 가장 효율적으로 이용하고 있다고 알려져 있으며 이러한 사실은 사용 주파수의 대역에 비해서 가입자의 수가 가장 많고 동시사용 회선수도 다른 방식들에 비해서 월등히 많은 사실로부터 알 수 있다. 그러나 CDMA 시스템의 용량은 셀 배치 및 셀의 크기, 서비스 운영방식 및 서비스 품질 등에 따라서 매우 가변적이기 때문에 하나의 기준으로 표현될 수 없다. 따라서 많은 연구자들은 CDMA 시스템의 용량을 나타내는 방법을 연구하여 왔으며 최근에 단위면적을 기준으로하는 CDMA 시스템의 성능 표현방법을 도입하기 시작하였다.

CDMA 시스템의 단위면적당 용량은 성능을 나타내는데 있어서 셀만 이용하는 것보다 훨씬 낫다. 셀룰러 서비스를 위한 요구가 계속 증가하면 사업자는 최대 제공할 수 있는 용량이 주요 관심사가 된다. 즉 단위면적당 최대 이용 용량이 되며 이것은 셀의 크기를 줄이면 가능하므로 셀의 크기가 시스템이 수용할 수 있는 가장 작은 크기이면 된다. 본 문서에서는 CDMA 시스템의 성능을 단위면적당 용량으로 나타내는 방법을 연구하고 이를 위해 CDMA 시스템의 밀도 한계치에 의하여 정해지는 기지국간 최소거리를 이용하여 최소면적의 기지국을 정한다[1][2].

2. 스펙트럼 이용효율의 평가

스펙트럼 이용효율을 평가하기 위한 방법은 여러가지가 있으며 각각의 방법은 나름대로의 장단점을 가지고 있어서 우열을 가릴 수 없으며 단지 평가하고자 하는 시스템에 가장 적합한 방법을 찾아서 적용하는 것이 타당하다. 이러한 방법들로는 Mobiles/Channel, Users/Cell, Channels/MHz, Erlangs/MHz 등이 있으며 일반적 통신시스템들에 적용할 수 있는 방법들이다[3]. 그러나 셀룰러 시스템에 적용하기에는 여러가지 면에서 적절하지 않다. 셀룰러 시스템에서 스펙트럼 이용 효율을 적절히 표현하기 위해서는 다음의 사항들이 고려되어야 한다. 우선 통화량이 고려되어야 한다. 얼랑은 이런 목적에 부합되는 단위이다. 그리고 통화량을 나타낼 때 단위 주파수당 얼랑으로 표현하는 것이 바람직하다. 그러면 서로 다른 시스템들의 채널 간격을 고려할 수 있다. 또한 공간적 요소를 가미하거나 또는 주파수 재사용 요소를 포함시킨다. 이러한 조건을 충족하는 단위는 Erlangs/MHz/km^2 가 된다.

Erlangs/MHz/km^{2}와 유사한 스펙트럼 이용효율 표현방법은 Voice Channels/MHz/km^2 와 Users/MHz/km^{2}이며 그들의 상관관계는 다음의 그림으로 표현할 수 있다. 보기로 스펙트럼 이용효율이 5 Erlangs/MHz/km^2 이고 사용자당 평균 통화량은 0.05 Erlangs 이면 셀룰러 시스템의 사용자로 나타내는 스펙트럼 이용효율은 100 (= 5/0.05) Erlangs/MHz/km^2 이 된다.

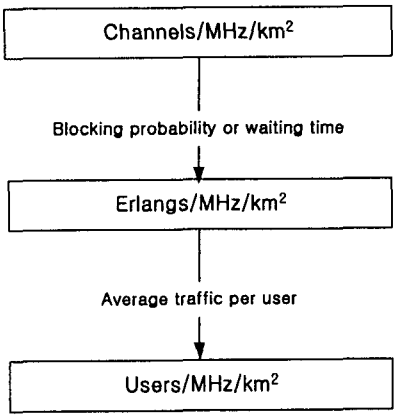

그림 1. 스펙트럼 이용 효율 평가방법의 상관관계

3. CDMA 용량과 커버리지

CDMA 시스템의 용량에 가장 밀접한 영향을 미치는 것는 간섭신호를 포함한 잡음이다. CDMA 시스템은 자기신호와 다른 신호가 같은 주파수 대역내에 있고 단지 서로 다른 코드로 구별하므로 자기 이외의 모든 신호는 잡음이 되며 이들과 자기신호의 크기비에 따라서 용량이 결정된다. 다음의 식은 신호대 잡음비를 보여준다.

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{E_b}{N_0 + I_{0\text{int}} + I_{0ext}} \qquad (1)$$

윗 식에서 E_b는 정보비트당 신호 에너지이고 I_0는 간섭전력이 포함된 전체 잡음이다. 따라서 I_0는 잡음전력 N_0와 사용자와 같은 셀안에 있는 다른 사용자로부터 오는 간섭전력 $I_{0\text{int}}$와 다른셀로부터 오는 간섭전력 I_{0ext}의 합이 된다. 정보비트당 신호에너지는 $E_b = P_u / R$로 표현되며 여기서 P_u는 기지국에 수신되는 원하는 사용자의 신호 전력을 나타내고 R은 정보신호의 등가 대역폭이다. 잡음전력은 $N_0 = NF \cdot k \cdot T$로 나타나며 NF는 잡음지수, k는 볼쯔만 상수, T는 절대온도이다. 기지국에 수신되는 다른 셀의 사용자로부터 오는 간섭 전력은 $P_i = \varepsilon_i P_u$와 같으며 P_u는 기지국에 수신되는 원하는

사용자의 신호 전력을 나타내고 ε_i 는 전력제어의 오류를 나타낸 것이다. 다른 문헌에 의하면 ε_i 는 대수정규분포를 갖는 랜덤변수이다. 더군다나 음성 화율을 고려하여 이진 랜덤변수 ν_i 를 수신 간섭전력에 고려하면 전체 간섭전력은

$$I_{0\text{int}} = \frac{P_u}{W}\sum_{i=2}^{N}\nu_i\varepsilon_i \qquad (2)$$

로 나타나며 여기에서 N 는 셀안에서 전체 사용자 수이고 W 는 CDMA 시스템의 채널 대역폭이다. 같은 셀안에서의 간섭은 외부 셀간섭으로 표현할 수 있으며 다음과 같다.

$$I_{0ext} = fI_{0\text{int}} \qquad (3)$$

여기서 f 는 다른 셀 간섭 요소라고 불린다. 이 값들은 소프트 핸드오버 조건, 경로손실 지수, 전력제어의 표준편차, 대수 정규 음영 등의 파라미터에 의존한다. (2)식과 (3)식을 (1)식에 대입하고 정리하면 다중셀 CDMA 시스템을 위한 E_b/I_0 는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{P_u/R}{N_0 + \frac{P_u}{W}\left(\sum_{i=2}^{N}\nu_i\varepsilon_i + f\sum_{i=1}^{N}\nu_i\varepsilon_i\right)} \qquad (4)$$

(4)식에서 최소 E_b/I_0 ($[E_b/I_0]$로 표기)는 복조후 에러성능을 보장하기 위해서 필요하므로 (4)식을 수신 신호 전력으로 표현하면 다음을 만족해야 한다.

$$P_u \geq \frac{N_0W}{\frac{W/R}{[E_b/I_0]} - \left(\sum_{i=2}^{N}\nu_i\varepsilon_i + f\sum_{i=1}^{N}\nu_i\varepsilon_i\right)} \qquad (5)$$

여기서 W/R 는 프로세싱 이득이라 하고, $[E_b/I_0]$ 는 변조방식이나 코딩방식에 의해 결정된다. 윗식에서 N 이 커지면(사용자가 많아지면) 분모는 작아지게 되므로 시스템에 높은 부하가 걸리면 기지국에서 각 단말기를 위하여 높은 수신전력이 필요하게 된다. 만약 단말기의 최대 송신전력과 링크버짓이 주어지면 기지국과 단말기 사이에 최대 허용 가능한 경로손실을 유도할 수 있으며 이것은 셀의 커버리지가 시스템의 부하와 관련이 있음을 알려준다. 즉, 셀에 걸린 부하가 크면 커버리지는 줄어들게 된다. 만약 시스템의 부하가 어떤 한계치(윗식에서 분모가 0이 되거나 음이 될 때)를 초과하게 되면 요구되는 오류율을 더 이상 보장할 수 없게 된다. 따라서 셀의 용량은 그러한 사건이 일어나는 확률의 상한 경계에 의하여 얻을 수 있다. 따라서 셀당 용량의 한계는 다음처럼 정의된다[2].

$$P_{Block} = \Pr\left\{\sum_{i=2}^{N}\nu_i\varepsilon_i + f\sum_{i=1}^{N}\nu_i\varepsilon_i > \frac{W/R}{[E_b/I_0]}\eta^*\right\} \qquad (6)$$

여기서 P_{Block} 은 허용되는 차단확률이고 η^* 는 부하지수로써 기지국에서 수신되는 전체(잡음+간섭)전력의 제한을 나타낸다. 따라서 셀당 최대 사용자 수는 차단확률과 부하지수만 알면 구할 수 있다.

시스템이 한계치에서 작동된다고 할 때 시스템의 부하는 상위 경계가 된다. 그러면 식(5)에서 등호가 성립되므로 다음처럼 된다.

$$P_u = \frac{N_0W}{\frac{W/R}{[E_b/I_0]}\left(1-\eta^*\right)} \qquad (7)$$

이것은 CDMA 시스템의 부하가 꽉 찼을 경우 셀 크기의 상위 경계를 가리킨다.

4. 용량한계

용량한계의 정의는 CDMA 시스템의 기지국이 갖는 최대 사용자 밀도이며 최대 사용자 밀도는 핸드오버가 일어나는 높은 확률로 정한다. 단말기는 소프트 핸드오버 상태에서 두개의 기지국과 연결되어 있고 만약 새로운 기지국으로부터의 신호 전력이 기존의 기지국에서 오는 신호전력보다 임의의 마진 T 이상으로 크면 기존의 연결을 끊고 새로운 연결

만 유지한다. 그러므로 단말기에서 수신전력은 기지국과 단말기 사이 신호의 경로손실에 역으로 비례하게 된다. 경로손실은 핸드오버를 결정짓는 중요한 요소가 된다.

경로손실 모델은 송수신기 사이의 거리 d 와 경로손실 A_1 및 경로손실 지수 A_2 에 의하며, L 은 최소 결합 손실이라하며 그때의 거리를 d_L 이라한다. 또한 그림자 효과에 의하여 천천히 변하는 것을 고려하여 대수 정규분포이며 표준편차가 σ 인 랜덤 변수 ζ 를 이용한다. 그러면 상관계수는 $1-b^2$ 이 된다. 대수 스케일로 경로손실 $L(d)$를 나타내면

$$\begin{aligned} L(d) &= L+\zeta \qquad for \quad d < d_L \\ L(d) &= A_1 + A_2 \log(d) + \zeta \qquad for \quad d > d_L \end{aligned} \tag{8}$$

가 된다. 소프트 핸드오버는 기존 기지국 BS1으로부터의 경로손실이 새로운 기지국 BS2로부터의 경로손실보다 마진 T 이상으로 크면 발생하고 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_1(d_1) > L_2(d_2) + T \tag{9}$$

여기서 $L_1(d_1)$은 단말기와 BS1 사이의 거리 d_1 에 의한 경로손실이고 $L_2(d_2)$는 단말기와 BS2 사이의 거리 d_2 에 의한 경로손실이며 D를 두 기지국 사이의 거리라고 하면 $d_2 = D - d_1$ 이다. 핸드오버를 위한 확률은 다음의 (10)식처럼 표현된다.

$$P_{HO(1\to1,2)} = \Pr\{L_1(d_1) > L_2(d_2) + T\} \tag{10}$$

핸드오버 확률은 최대 허용치보다 작아야 한다. 두 기지국 사이의 최소거리는 단말기가 BS1에 있을경우 $P_{HO(1\to1,2)}$가 $P^{\max}_{HO(1\to1,2)}$로 될때이다. 따라서 두 기지국 사이의 최소거리는 다음처럼 주어진다[2].

$$\begin{aligned} P^{\max}_{HO(1\to1,2)} &= \Pr\{L+\zeta_1 > A_1 + A_2\log(D) + \zeta_2 + T\} \\ &= Q\left[\frac{A_1 + A_2\log(D) - L + T}{\sqrt{2}b\sigma}\right] \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 오류함수는 다음처럼 정의한다.

$$Q[y] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_y^{\infty}\exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{-y}\exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)dx \tag{12}$$

(11)식에서 구한 두 기지국 사이의 거리 D는 한 셀의 직경이 되며 이를 이용하여 셀면적을 구할 수 있다.

5. 시뮬레이션 결과

900MHz를 사용하는 CDMA 시스템이며 Cost-231 Walfish-Ikegami 전파모델을 이용하면 <표 1>의 변수들을 얻을 수 있으며 이것을 (11)식에 대입하면 그림 2처럼 핸드오버 확률에 따른 인접 기지국 사이의 최소 거리를 구할 수 있다.

<표 1> 핸드오버 확률 변수

A_1	= 101.7 dB	Pathloss constant
A_2	= 26	Pathloss exponent
L	= 60 dB	Minimum coupling loss
T	= 2.5 dB	Handover threshold
σ	= 8 dB	Standard deviation of log normal shadowing
b	= 1	Represents site-to-site correlation

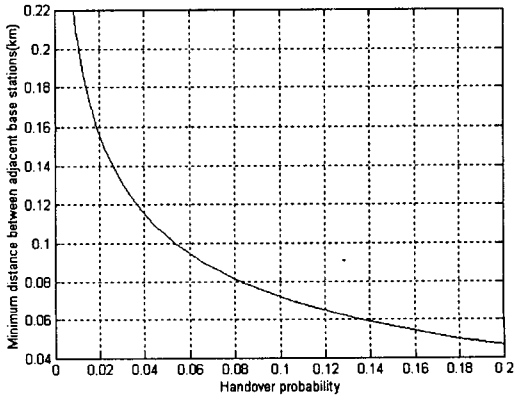

그림 2. 인접 기지국 사이의 최소거리

그림 2로부터 에서 핸드오버확률 $P_{HO(1\to1,2)}^{\max}=0.1$ 에 해당되는 최소 거리는 72m이다. 용량/km^{2}는 용량/셀과 셀/km^{2}의 곱으로 구해진다. 일반적으로 셀의 형태를 6각형으로 했을 경우 각 셀의 면적은 $S=D^2\sqrt{3}/2$이 된다. 이를 이용하여 CDMA 시스템의 용량/km^{2}를 구한다.

<표 2> 단위셀당 CDMA 시스템 사용자 용량 변수

W	= 1.25 MHz	Spreading bandwidth
R	= 9.6 kbps	Data rate
$[E_b/I_0]$	= 7 dB	Required E_b/I_0 ratio
σ_c	= 2.5 dB	Standard deviation of power control error
ρ	= 0.4	Voice activity factor
f	= 0.6	Other-cell-interference factor
η^*	= 0.9	Loading factor
P_{Block}	= 2 %	Tolerated blocking probability

위의 <표 2>처럼 단위셀당 CDMA 시스템 사용자 용량 변수가 주어졌을 경우 셀당 최대 사용자 수는 20명이며 이를 앞서 구한 셀간 거리 72m를 적용하여 단위면적으로 고쳤을 경우 4454명/km^{2}이 된다.

<표 1>에 주어진 변수중에서 Minimum Coupling Loss에 의한 최소거리의 변화를 살펴보기 위해 위와 똑 같은 방법을 이용하여 핸드오버 확률에 따른 최소거리를 산출하였으며 그 결과는 그림 3에 나타내었다. 이 그림에서 살펴보듯이 Minimum Coupling Loss에 의한 최소거리 변동이 커서 Minimum Coupling Loss의 선정에 보다 체계적인 접근이 필요하다.

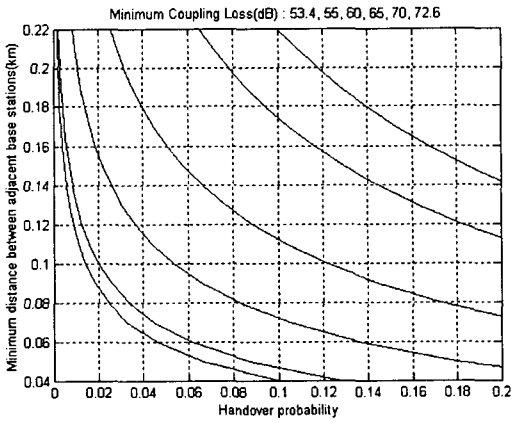

그림 3. Minimum Coupling Loss에 따른 최소거리 변화

6. 결론

CDMA 시스템은 서비스 운영자의 여러가지 상황에 따라 다양하게 운영되므로 하나의 기준으로 단위면적당 최대용량을 산출하기가 불가능하다. 따라서 여기서는 서비스 면적 개념을 도입하여 지금까지 살펴본 것처럼 CDMA 시스템의 단위면적당 최대용량을 산출하였고 이를 위해서는 일차적으로 경로손실을 계산할 수 있는 전파모델이 필요하며 나머지 핸드오버에 관련된 변수들을 구하는 것이 필요하다. 이러한 변수들은 일정하지 않고 서비스 운영자의 상황에 맞게 선정되므로 실제 CDMA 시스템의 단위면적당 최대용량을 산출하기 위해서는 서비스 사업자가 제공하는 자료가 필수적이다.

참고문헌

[1] Viterbi, A.J., CDMA-Principles of spread spectrum communications, Addison-Wesley, 1995

[2] W. Schneider, C. Cordier, Marco Fratti, "On the maximum uplink capacity per km^2 of CDMA system", IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Volume: 3 , 2-4 Sept. 1998.

[3] Husni Hammuda, Cellular mobile radio systems: Designing systems for capacity optimization, John Wiley & Sons Ltd., 1997.