

순방향 링크에서 광대역 CDMA 시스템의 성능 분석 및 용량에 관한 연구

正會員 夫秀日*, 金澈成**

On the performance analysis and the capacity of a broadband CDMA system in forward link

Su-Il Boo*, Cheol-Sung Kim** Regular Members

본 논문은 1994년도 과학재단 핵심전문연구과제 지원금에 의하여 이루어진 연구결과와 일부임.

要 約

본 논문에서는 순방향 링크에서 BPSK 변조방식을 이용하는 광대역 CDMA 방식과 협대역 CDMA 방식의 성능 및 용량을 비교 분석한다. 광대역 CDMA 방식의 해석을 위해 사용된 이동 통신 채널은 넓은 대역폭을 갖는 시스템의 채널 특성을 고려하여 수신 신호는 다중경로에 의한 페이딩을 겪지 않는다고 할 수 있기 때문에 Gaussian 채널로 근사화하고, 사용하는 수신기는 단일 상관 수신기를 사용한다고 가정한다. 그리고 협대역 CDMA 방식은 다중경로에 의한 영향을 고려하여 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널로 근사화하고 MRC(Maximal Ratio Combining) 다이버시티 수신기를 사용한다고 가정한다. 이러한 가정하에 두 방식 각각에 대한 평균 에러 확률을 유도하여, 요구되는 평균 에러확률을 만족하는 셀당 사용자 수로 정의되는 용량을 비교한다.

그 결과 요구되는 에러확률이 $Pe=10^{-3}$ 일 경우에, 4차 MRC 다이버시티 수신기를 사용하면서 총 12.5MHz의 대역을 1.25MHz의 대역 10개로 FDMA하여 동시에 사용하는 협대역 CDMA 방식의 용량은 다이버시티 수신기를 사용하지 않고 12.5MHz 대역을 이용하는 광대역 CDMA 방식과 비교해서 94.4% 정도의 용량이었다.

ABSTRACT

In this paper, the forward link capacity of a B-CDMA(broadband CDMA) system with BPSK modulation is compared with that of a N-CDMA(narrowband CDMA) system. The mobile radio channel of the B-CDMA system is modeled approximately Gaussian, because the broadband system does not undergo a severe fading caused by multipath propagation. In contrast to that, the channel for the N-CDMA system is then modeled approximately Rayleigh. Hence, it is assumed that a single correlation receiver

*전남대학교 전기공학과 전자전공

**전남대학교 컴퓨터공학과

論文番號 : 95317-0912

接受日字 : 1995年 9月 12日

is used for the B-CDMA system and a MRC (Maximal Ratio Combining) diversity receiver is used for the N-CDMA system. The average error probability of each system is derived and the capacity defined by the number of users per cell meeting the condition of required average error probability is compared.

The results show that for the required error probability of 10^{-3} , even if the N-CDMA system uses total 12.5 MHz bandwidth by dividing it into 10 subpectra using FDMA technique, and employs 4 branch MRC diversity receiver, it achieves only 94.4% capacity of the B-CDMA system having 12.5MHz bandwidth which is not using diversity receiver.

I. 서 론

현재 이동 통신 시스템에서 사용되고 있는 AMPS, TDMA 방식의 제한적 성능을 극복하기 위해서 개발된 CDMA 방식은 기존의 방식보다 용량 증가와 비밀 보호 측면에서 더욱 향상된 성능을 보인다.⁽¹⁾

그런데 협대역 CDMA 방식은 실내의 환경에서 심각한 페이딩(fading)을 겪을 수 있는 반면에 InterDigital 사 등에서 제안한 광대역 CDMA 방식은 협대역 CDMA 방식에 비해 넓은 대역폭의 영향으로 페이딩에 강하며, 상대적으로 가입자 용량이 크고, ADPCM등을 통한 고 음질의 서비스와 멀티미디어 통신이 가능하며, 기존의 AMPS 나 TDMA 사용자들과의 주파수 공유가 가능하다.⁽²⁾ 여기서 협대역 CDMA는 1.25 MHz 정도의 대역폭을 갖는 CDMA 방식을, 그리고 광대역 CDMA는 10 MHz 이상의 넓은 대역폭을 사용하는 CDMA 방식을 말한다.⁽³⁾

협대역 CDMA 방식의 성능 분석에 관한 많은 연구 결과가 보고된 바 있다. 특히 K. S. Gilhousen 등은 CDMA 시스템의 용량에 관하여 연구하였고,^(1, 4, 5) Wing-Po Yung은 페이딩 채널에서 다이버시티(diversity)를 사용하는 경우의 시스템 성능에 대하여 연구 결과를 발표하였다.⁽⁶⁾

이러한 연구들은 협대역 CDMA 방식에 대한 용량 및 성능 분석에 관한 것으로 광대역 CDMA 방식과의 비교가 어렵다. 한편 Thomas Eng 와 L. B. Milstein은 주파수 선택적 레일리 페이딩(frequency selective Rayleigh fading) 채널에서의 하이브리드 FDMA / CDMA 방식에 대해 비교 연구한 바 있다.⁽⁷⁾ 그런데 이 연구의 결과들은 광대역이나 협대역 CDMA 방식 모두가 채널상에서 다중 경로로 인해 레일리(Rayleigh) 페이딩을 겪는다고 가정하고, 단지 분해

가능한 경로 수와 경로당 전력에만 차이가 있다고 고려하고 있다. 그러나 실제적으로 광대역 CDMA 방식은 넓은 대역폭을 갖고 있기 때문에 수신 신호는 레일리 페이딩을 겪는다고 보다는 오히려 가우시안(Gaussian)에 근접한 확률밀도함수(probability density function)를 갖게 된다.⁽⁸⁾

따라서 본 논문에서는 광대역 CDMA 방식과 협대역 CDMA 방식의 용량을 비교하기 위해서, 채널 모델을 광대역 CDMA 방식은 넓은 대역폭을 갖는 시스템의 채널 특성을 고려하여 대역폭이 코히어런스 대역폭(coherence bandwidth) 보다 훨씬 넓으므로 수신 신호는 다중 경로에 의한 페이딩을 별로 겪지 않는다고 할 수 있기 때문에 가우시안 채널로 근사화 한다. 그리고 협대역 CDMA 방식은 대역폭이 코히어런스 대역폭과 비슷하다고 보고 다중 경로의 영향을 고려하여 레일리 페이딩 채널로 근사화 한다. 이와 같은 채널 모델을 바탕으로 단일 셀의 순방향 채널에서의 두 방식 각각에 대한 평균 에러 확률을 유도한다. 여기서 두 방식 모두 BPSK 변복조 한다고 가정한다. 또한 광대역 CDMA 방식은 단일 상관 수신기를 사용하고, 협대역 CDMA 방식은 이론상 가장 뛰어난 성능을 보인다고 알려진 M차 MRC 다이버시티 수신기를 사용한다고 가정하여 셀 내에서 요구되는 에러확률을 만족하는 가입자 수를 기준으로 두 시스템을 비교 분석한다.

II. 광대역과 협대역 CDMA 방식의 채널 특성

이동 통신 시스템에서 전송신호는 채널을 통과할 때 주파수 선택성(frequency selectivity)과 페이딩(fading)이라는 두가지 서로 다른 형태의 왜곡을 겪게 되는데, 채널 모델을 정의할 때는 이 두가지 특성을 모두 고려하게 된다. 전자는 전송신호 대역폭 W 에 관한

채널의 코히어런스 대역폭($(\Delta f)_c$) 혹은 다중경로 확산(T_m)에 의존하고, 후자는 도플러 확산(B_d) 혹은 coherence time($(\Delta t)_c$)에 의존하게 된다.

이러한 현상들에 근거하여 채널을 구분하여 보면 다음과 같다.⁹⁾

$W < 1/T_m = (\Delta f)_c$ 주파수 비선택적(frequency nonselective) 채널 (1)

$W > 1/T_m = (\Delta f)_c$ 주파수 선택적(frequency selective) 채널 (2)

$T < (\Delta t)_c$ 느린 페이딩(slow fading) 채널 (3)

$T > (\Delta t)_c$ 빠른 페이딩(fast fading) 채널 (4)

광대역 CDMA 방식이나 협대역 CDMA 방식은 모두 식 (2)와 식 (3)을 만족하므로 주파수 선택적 느린(frequency selective slow) 페이딩 채널이라 할 수 있다. 그러나 광대역과 협대역 신호의 페이딩 특성은 현격히 다르다. 광대역 신호는 잠재적인 주파수 다이버시티(frequency diversity) 특성을 갖고 있기 때문에 협대역 신호보다 페이딩의 영향이 덜 하다고 할 수 있다. 실제로 전송신호의 펄스 폭이 $1/B$ 이고, 시간 지연 확산(time delay spread)이 Δ 이면, 다이버시티의 가지(branch) 수 M 은 다음과 같이 근사된다.¹⁰⁾

$$M = \frac{\Delta + 1/B}{1/B} = B \cdot \Delta + 1 \quad (5)$$

이것은 주변 환경에 따라 변화하게 된다. 그 관계를 정리하면 표 1.과 같다.

표 1.을 살펴보면 대역폭이 넓어질수록 다중경로에 의한 페이딩이 줄어들기 때문에, 예를들면 $B=1.25\text{MHz}$ 일때 도심지역에서 수신신호의 페이딩의 영향은 마치 $M=4.75$ 차수의 다이버시티를 사용한 것과 같은 효과를 보인다. 또한 신호의 대역폭(W)에 따라 수신된 신호의 다중경로 요소들은 $1/W$ 의 해상도를 가지고 구분될 수 있기 때문에 다중경로 요소들을 구분할 수 있는 해상도

측면에서도 현격한 차이가 있다고 할 수 있다.

따라서 광대역 CDMA 방식은 보통 수 십 Mcps의 높은 칩 전송율을 갖는 대역확산 코드를 사용함으로써, 수신단에서 확산코드를 동기화 할 때 수신되는 신호에 비해 한 칩간격 이상의 지연시간을 갖는 다경로파 신호의 영향은 무시할 수 있고, 이를 가우시안(Gaussian) 잡음이 약간 더해진 형태로 고려할 수 있다.¹⁸⁾

반면에 협대역 CDMA 방식의 경우에는 대역확산 코드에 의해 구분되지 않는 다중경로파 신호 성분에 의해 수신신호가 페이딩 왜곡을 겪게 되는데 본 논문에서는 협대역 CDMA의 경우 레일리 분포를 갖는 페이딩 현상을 겪는다고 가정한다.

III. 광대역 CDMA 시스템의 성능 분석

1. 광대역 CDMA 시스템

광대역 CDMA 방식은 앞절에서 살펴보았듯이 이동통신 채널상에서 발생하는 다중 경로에 의한 페이딩 현상을 거의 제거할 수 있기 때문에 가우시안 잡음만이 존재하는 채널을 가정한다. 그러므로 단일 셀에서의 이진 DS(Direct Sequence) 시스템에서 그림 1과 같은 구조를 갖는 단일 상관 수신기를 통해 수신된 신호중 DS 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_o(t) = Am(t)c(t)\cos(\omega_0 t + \theta) \quad (6)$$

여기서 A 는 진폭, $m(t)$ 는 데이터 변조 신호, $c(t)$ 는 확산신호 파형(spreading waveform)을 나타낸다. $m(t)$ 는 주기가 T 인 구형 펄스열로서 ± 1 의 값을 갖는다.

그리고 확산신호 $c(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$c(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i \psi(t - iT_c) \quad (7)$$

여기서 c_i 는 PN 시퀀스의 한 칩으로 ± 1 의 값을 갖

표 1. 대역폭과 다이버시티 차수관계
Table 1. Relation between bandwidth and the number of diversity branch

	B=30KHz	B=1.25MHz	B=12.5MHz
$\Delta = 0.5 \mu\text{s}$ suburban	1.1015	1.625	7.25
$\Delta = 3 \mu\text{s}$ urban	1.09	4.75	38.5

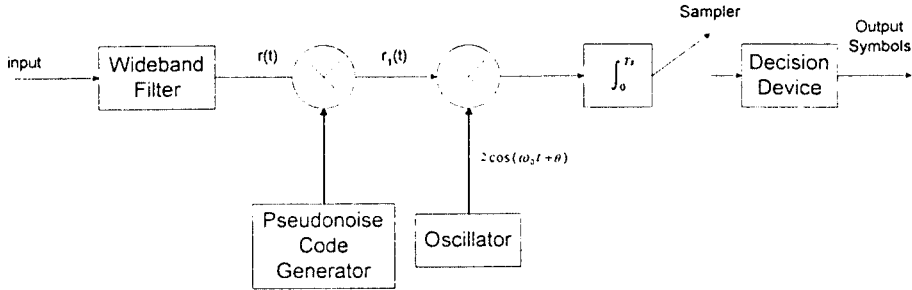


그림 1. DS 시스템의 수신기 기본 구조
Fig. 1. Basic elements of a coherent receiver for DS system

고, $\phi(t)$ 는 칩 파형으로서 T보다 작은 주기 T_c 를 갖는다. 그리고 $c(t)$ 는 긴 주기를 갖는 랜덤시퀀스라고 가정한다.

칩 파형의 에너지를 정규화하여

$$\int_0^{T_c} \phi^2(t) dt = T_c \tag{8}$$

이라 하고, 한 비트 구간내에서의 칩 수, 즉 처리이득(processing gain)은 다음과 같이 정의 한다.

$$G = \frac{T}{T_c} \tag{9}$$

수신기에 수신된 전체 수신 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = n(t) + s_o(t) + s_i(t) \tag{10}$$

여기서 $s_i(t)$ 는 간섭 신호를, 그리고 $n(t)$ 는 평균이 0인 가우시안 잡음을 의미한다. 따라서 그림 1에서의 복조기의 출력 신호는 데이터 비트 $[0, T]$ 에서

$$\begin{aligned} Z &= \int_0^T 2r(t)c(t) \cos(\omega_c t + \theta) dt \\ &= \int_0^T 2s_o(t)c(t) \cos(\omega_c t + \theta) dt \\ &\quad + \int_0^T 2s_i(t)c(t) \cos(\omega_c t + \theta) dt \\ &\quad + \int_0^T 2n(t)c(t) \cos(\omega_c t + \theta) dt \end{aligned} \tag{11}$$

로 표현할 수 있다.

만약 $m(t)$ 가 $[0, T]$ 에서 일정하고 $f_c = \omega_c/2\pi \gg 1/T$ 이라고 가정하면 Z는 다음과 같다.

$$Z = \pm AT + I(t) + N(t) \tag{12}$$

여기서

$$I(t) = \int_0^T 2 s_i(t) c(t) \cos(\omega_c t + \theta) dt \tag{13}$$

$$N(t) = \int_0^T 2 n(t) c(t) \cos(\omega_c t + \theta) dt \tag{14}$$

$s_i(t)$, $m(t)$, $c(t)$, θ 는 서로 통계적으로 독립적이라 가정하고, 랜덤 이진 시퀀스 $\{c_i\}$ 는 동일한 발생 확률로 +1 혹은 -1의 값을 갖는다고 하자. 그러면 $E\{c_i\} = E\{c(t)\} = 0$ 이므로 $E\{I\} = E\{N\} = 0$ 이다. 따라서 $E\{Z\} = \pm AT$ 이다.

식 (7)를 식 (13)에 대입하면

$$I(t) = \sum_{v=0}^{G-1} c_v J_v \tag{15}$$

$$J_v = \int_{vT_c}^{(v+1)T_c} 2s_i(t) \phi(t - vT_c) \cos(\omega_c t + \theta) dt \tag{16}$$

그리고 $n(t)$ 가 백색 가우시안 잡음이라면 식 (14)에 의한 N의 분산은

$$\text{Var}(N) = N_0 T \tag{17}$$

이고, ⁽¹¹⁾ $N_0/2$ 는 양측 잡음 전력 밀도 스펙트럼(two-sided noise power spectral density)이다.

2. 다중 접속에 의한 간섭 모델

(Multiple Access Interference Model)

한 기지국으로부터 동시에 함께 송신되어 어떤 이동국에서 수신되는 K개의 신호는 동일한 경로를 통해 수신되므로 수신신호의 세기는 동일하고, 시스템은 비동시성(asynchronous)을 갖는다고 가정하면, 간섭 신호는

다음과 같이 표현된다.

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^K A q_i(t - \tau_j) \cos(\omega_0 t - \theta_j) \quad 0 \leq t \leq T_c \quad (18)$$

여기서 A는 간섭신호 i에 의한 수신 신호 진폭, K는 간섭하는 확산신호 수, $q_i(t)$ 는 신호 i의 확산신호 파형, τ_j 는 신호 i의 상대적 시간지연, θ_j 는 신호 i의 위상을 나타낸다. 만약 시스템이 동시성(synchronous)을 갖는다고 하면 τ_j ($j=1, 2, \dots, K$)는 모두 동일해진다. 그리고 확산신호 파형 $q_i(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$q_i(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} q_{ij} \psi(t - jT_c) \quad (19)$$

식 (18)과 (19)를 식 (16)에 대입하면

$$J_v = \sum_{i=1}^K A \cos \phi_i \left[q_{i,v-1} \int_{\tau_i}^{vT_c + \tau_i} \psi(t - vT_c) \psi(t - (v-1)T_c - \tau_i) dt + q_{i,v} \int_{vT_c + \tau_i}^{(v+1)T_c} \psi(t - vT_c) \psi(t - vT_c - \tau_i) dt \right] \quad (20)$$

이고 ϕ_i 는 $\phi_j = \theta - \theta_j$ 이다. 칩 파형의 부분 자기상관 함수 $R_\psi(s)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$R_\psi(s) = \int_0^s \psi(t) \psi(t + T_c - s) dt \quad 0 \leq s \leq T_c \quad (21)$$

위의 정의로부터 식 (20)은

$$J_v = \sum_{i=1}^k A \cos \phi_i [q_{i,v-1} R_\psi(\tau_i) + q_{i,v} R_\psi(T_c - \tau_i)] \quad (22)$$

으로 표현할 수 있다. 그런데 식 (15)의 항들은 ϕ 와 τ 가 주어질때 통계적으로 서로 독립적이라고 하면, $c_v^2 = 1$ 이므로 ϕ 와 τ 가 주어질때 분산은 다음과 같다.

$$Var(I|\phi, \tau) = \sum_{v=0}^{L-1} Var(J_v) \quad (23)$$

시퀀스 q_i 는 서로 독립적이고 또한 식 (22)에서 J_v 의 조건부 분산은 v 와 무관하므로

$$Var(I) = \sum_{i=1}^K G A^2 \cos^2 \phi_i [R_\psi^2(\tau_i) + R_\psi^2(T_c - \tau_i)] \quad (24)$$

이다.

3. 광대역 CDMA방식의 성능 분석

ϕ 와 τ 가 주어질때 Z의 분포는 G가 클때 근사적으로 가우시안으로 가정할 수 있다.^{(11),(12)} 또한 N은 가우시안 분포를 갖고 I와는 독립적이기 때문에 (12)식에 의하여 Z는 근사적으로 가우시안 분포를 이룬다. 따라서

$$E[Z] = \pm AT$$

$$VAR(Z) = VAR(I) + VAR(N)$$

이므로 가우시안 근사의 가정하에 ϕ 와 τ 가 주어질때 조건 에리확률은

$$P(e|\phi, \tau) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\left[\frac{E_b T}{VAR[I] + VAR[N]} \right]^{1/2} \right) \quad (25)$$

이다. 여기서 $E_b = 1/2 A^2 T$ 는 수신된 비트당 에너지이다.

따라서 식 (17), (24), (9)을 식 (25)에 대입하면,

$$P_s(e|\phi, \tau) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\left[\frac{E_b}{T_N(\phi, \tau)} \right]^{1/2} \right) \quad (26)$$

여기서

$$T_N(\phi, \tau) = N_o + \sum_{i=1}^K \frac{A^2}{T_c} \cos^2 \phi_i [R_\psi^2(\tau_i) + R_\psi^2(T_c - \tau_i)] \quad (27)$$

그런데 확산신호파형이 구형 펄스이라고 하면, 즉,

$$\psi(t) = 1, \quad 0 \leq t \leq T_c \quad (28)$$

이면 식(21)에 의해서 $R_\psi(s) = s$ 이고,

$$T_N(\phi, \tau) = N_o + \sum_{i=1}^K \frac{A^2}{G} T_c \cos^2 \phi_i \left[1 - 2 \frac{\tau_i}{T_c} + 2 \frac{\tau_i^2}{T_c^2} \right] \quad (29)$$

이다. 이제 각각의 시간 지연들은 서로 독립적이고 $[0, T_c]$ 에서 균일한 분포를 갖고 위상 ϕ_i , $i=1, 2, \dots, K$ 는 $[0, 2\pi]$ 에서 균일한 분포를 갖는다고 하면 비트 에리확률은

$$P_e = \left(\frac{2}{\pi T_c} \right)^K \int_0^{\pi/2} \dots \int_0^{\pi/2} \int_0^{T_c} \dots \int_0^{T_c} P_s(e|\phi, \tau) d\phi d\tau \quad (30)$$

이다. 식 (30)은 다중적분의 형태를 취하고 있기 때문에 이를 간략히 하기 위해서 먼저

$$Y = R^2(\tau) + R^2(T_c - \tau) \quad (31)$$

이라고 하면, $E[Y] = 2/3 T_c^2$ 이고 $E[\cos^2 \phi] = 1/2$ 이므로 이 관계를 이용하여 평균간섭잡음을 구하면,

$$T_N = N_o + KA^2 \frac{T_c}{3G} \quad (32)$$

이다. 따라서 식 (30)의 에리확률은 평균적으로

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{N_o}{E_b} + \frac{2K}{3G} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (33)$$

으로 표현할 수 있다.

IV. 협대역 CDMA 시스템의 성능 분석

1. 협대역 CDMA 시스템

기지국에서 원하는 가입자에게 전송하는 신호는

$$s_o(t) = A m(t) c(t) \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (34)$$

이라면, 원하는 사용자의 수신기에서 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \alpha s_o(t) \quad (35)$$

여기서 α 는 순간적 진폭의 왜곡을 나타낸다.

동일 기지국에서 원하는 사용자에게 전송하는 신호의 에 다른 사용자에게 전송하는 K개의 신호는 모두 동일한 페이딩을 겪게 되며 원하는 사용자의 수신기에서 간섭으로 작용한다. 그 간섭신호는

$$I_i(t) = \sum_{i=1}^K \alpha s_i(t - \tau_i) \quad (36)$$

으로 표현된다. 따라서 수신되는 전체신호는 다음과 같다.

$$r(t) = s(t) + \sum_{i=1}^K \alpha s_i(t - \tau_i) + n(t) \quad (37)$$

여기서 $n(t)$ 는 양측 전력밀도 스펙트럼이 $N_0/2$ 인 가우시안 잡음이다. 따라서 상관 수신기의 출력은 $Z = S + I + N$ 으로 표현할 수 있고 원하는 사용자의 신호 성분 $S = \pm A \alpha T$ 이고 N 은 평균이 0 인 가우시안 으로 분산은 $VAR\{N\} = N_0 T$ 이다.

그리고 다른 사용자들에게 전송되는 신호들에 의한 간섭성분인 I의 평균은 0 이고, α 가 주어지면 조건부 분산은 식(24)의 전개과정과 유사하게

$$VAR\{I | \alpha\} = \sum_{i=1}^K G A^2 \alpha^2 \cos^2 \phi_i [R_p^2(\tau_i) + R_p^2(T_c - \tau_i)] \quad (38)$$

으로 표현된다.

2. 페이딩 채널에서 평균 에러 확률

레일리 페이딩 환경에서 수신 SNR은 다중경로 페이

딩에 의해 변화한다. 이 경우 평균 에러확률은

$$P_e = \int_0^\infty P_e(\gamma) p(\gamma) d\gamma \quad (39)$$

이고 여기서 $p(\gamma)$ 는 레일리 페이딩의 확률밀도 함수를 나타내고 $P_e(\gamma)$ 은 γ 가 주어질때의 에러 확률이다. 그 표현식은 각각 다음과 같다.

$$p(\gamma) = \frac{1}{\Gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma_0}\right) \quad (40)$$

$$P_e(\gamma) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \quad (41)$$

그리고 위의 Γ_0 는 단일 수신기의 평균 SNR이다. 결국 PSK의 경우 평균 에러 확률은

$$P_e = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{\Gamma_0}{\Gamma_0 + 1}} \right] \quad (42)$$

으로 표현된다.^[9]

3. MRC 다이버시티 기법을 사용한 경우의 에러 확률
그림2와 같은 M개의 가지(branch)가 있는 MRC 다이버시티 수신기를 이용하면 결합된 신호 r은

$$r = \sum_{i=1}^M a_i r_i \quad (43)$$

이고, 여기서 r_i 와 a_i 는 각각 가지 i 의 신호와 이득(gain)이다.

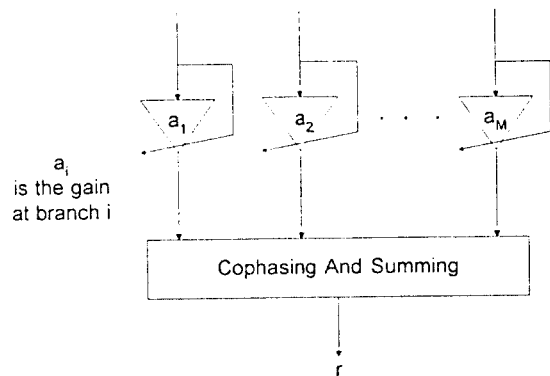


그림 2. MRC 다이버시티 수신기의 블럭도
Fig. 2. Block diagram of MRC diversity receiver

각 가지에서 평균 잡음 전력이 N으로 동일하다면, $a_i = r_i/N$ 일때 SNR이 최대가 되므로, 결국 결합기 출력단의 SNR, Γ 는

$$\Gamma \equiv \sum_{i=1}^M \Gamma_i \quad (44)$$

이다. 따라서 결합기 출력단에서의 SNR은 M개 가지들의 SNR 들의 합임을 알 수 있다. 그런데 윗식은 독립적인 레일리 랜덤 변수들의 제곱의 합을 이루므로, 이것은 2M 자유도(degree of freedom)의 Chi-square 분포를 이룬다. 따라서 Γ 의 확률밀도함수는

$$p(\Gamma) = \frac{\Gamma^{M-1} \exp(-\Gamma/\Gamma_0)}{\Gamma_0^M (M-1)!}, \quad \Gamma \geq 0 \quad (45)$$

이다. 여기서 Γ 는 결합기 출력단의 SNR, Γ_0 는 각 가지에서의 평균 SNR, 그리고 M은 가지 수를 나타낸다. 따라서 결합기 출력단에서의 평균 에러확율은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

$$P_e = \int_0^\infty P_e(\Gamma) p(\Gamma) d\Gamma = \left(\frac{1-\mu}{2}\right)^M \sum_{k=0}^{M-1} \binom{M-1+k}{k} \left(\frac{1+\mu}{2}\right)^k \quad (46)$$

여기서

$$\mu = \sqrt{\frac{\Gamma_0}{1+\Gamma_0}} \quad (47)$$

$$P_e(\Gamma) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\Gamma}) \quad (48)$$

이다. 그런데 각 가지에서의 평균 SNR Γ_0 은 식(38)에

의해서

$$\Gamma_0 = \frac{E_b T E[\alpha^2]}{N_o T + K G A^2 E[\alpha^2]} \frac{T_c^2}{3} \quad (49)$$

이다. 또한 $E[\alpha^2]=2\sigma^2$ 이므로 윗식은 다시

$$\Gamma_0 = \left[\frac{N_o}{2\sigma^2 E_b} + \frac{K}{3G} \right]^{-1} \quad (50)$$

으로 쓸 수 있다. 따라서 M=1 일때 평균 에러율은

$$P_e = \frac{1}{2} \left[1 - \left[1 + \frac{N_o}{2\sigma^2 E_b} + \frac{K}{3G} \right]^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (51)$$

이다. 그리고 M이 1이상일때의 평균 에러 확률은 식(46)을 이용하여 구할 수 있다.

V. 성능 분석 결과 및 검토

광대역 CDMA 방식과 협대역 CDMA 방식의 성능을 각각 그림 3과 그림 4에 도시하였다. 두 경우 모두 $E_b/N_o = 30\text{dB}$ 를 가정하였는데 E_b/N_o 의 변화에 따른 차이는 크지않다. 그리고 광대역 CDMA에서 $G=1250$ 이고, 협대역 CDMA에서는 $G=125$ 로 설정하여, 데이터율은 서로 동일하지만 광대역 방식이 협대역 CDMA 방식보다 확산 대역폭이 10배정도 크다고 가정하였다.

두 그림의 결과를 근거로 CDMA 시스템에서 요구되는 평균 에러 확률이 10^{-3} 인 경우와 10^{-4} 인 경우에 대해서 가입자 수용 용량을 비교 정리하여 표2에 나타내었다.

표 2의 결과를 살펴보면 요구되는 BER이 10^{-3} 일 경

표 2. 광대역 CDMA 시스템과 협대역 CDMA 시스템의 용량비교
Table 2. Capacity comparison of broadband CDMA system and narrowband CDMA system

처리 이득 (Processing Gain)	수신기	Pe=10 ⁻³	Pe=10 ⁻⁴
G = 1250	단일 상관기	392 (100%)	271 (100%)
G = 125	1차 MRC	2 (5.1%)	.
	3차 MRC	28 (71.4%)	12 (44.3%)
	4차 MRC	37 (94.4%)	18 (66.4%)
	5차 MRC	44 (112.2%)	24 (88.6%)
	7차 MRC	57 (145.4%)	31 (114.4%)

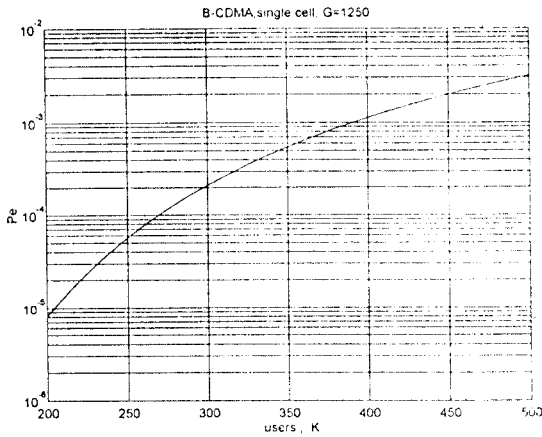


그림 3. 광대역 CDMA 방식의 평균 에러 확률
Fig. 3. Average error probability of a broadband CDMA system

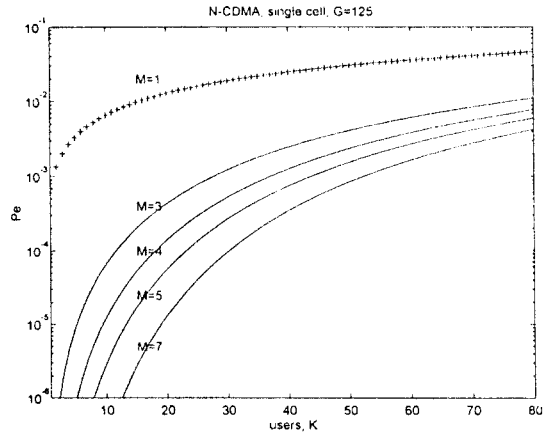


그림 4. 협대역 CDMA 방식의 평균 에러 확률
Fig. 4. Average error probability of a narrowband CDMA system

우에 광대역 CDMA 방식이 4차 MRC 다이버시티 수신기를 사용하는 협대역 CDMA 방식보다 우수함을 알 수 있고, 10^{-4} 의 BER이 요구되는 경우에는 협대역 CDMA 방식이 5차 MRC 다이버시티 수신기를 사용하는 경우보다 단일 상관 수신기를 사용하는 광대역 CDMA 방식이 더 우수함을 볼 수 있다. 즉 10^{-3} 의 BER이 요구되는 경우에 대역폭이 1.25인 협대역 CDMA 방식을 FDMA하여 1.25×10 의 대역을 사용한다고 할지라도 FDMA한 전체 12.5MHz 대역에서 수용할 수 있는 가입자 수는 4차 MRC 수신기를 사용하여도 단일 상관 수신기를 사용하는 광대역 CDMA 방식의 용량에 미치지 못함을 알 수 있고, 이때 용량은 협대역 CDMA 방식이 광대역 CDMA 방식의 94.4%이다.

그런데 이상의 결과들은 광대역 시스템은 가우시안 채널로, 그리고 협대역 시스템은 레일리 페이딩 채널로 근사화 하여 얻은 것이다. 따라서 다중 경로에 의한 채널의 통계적 특성이 각각 가우시안과 레일리 분포이다고 하는 다소 극한적 상황을 가정한 것이므로 실제적인 용량은 광대역 시스템의 경우에는 다소 줄어들 수 있고, 협대역 시스템의 경우에는 다소 증가할 것으로 예상된다.

VI. 결 론

이동통신 시스템에서의 협대역 CDMA 방식과 광대역 CDMA 방식의 성능 및 용량을 비교 분석하였다. 성능 평가를 위해 먼저 두 방식에 대한 이동통신 채널 모델을 광대역은 가우시안 채널로, 그리고 협대역 CDMA 방식은 레일리 페이딩 채널로 가정하여 두 방식 각각에 대한 평균 에러 확률을 유도하고, 이를 바탕으로 요구되는 BER이 10^{-3} 일 경우와 10^{-4} 일 경우에 대한 용량을 비교 검토하였다. 그 결과 요구되는 BER이 10^{-3} 일 경우에 광대역 CDMA 방식은 단일 상관 수신기 만을 사용했을 때, 392명의 가입자를 수용할 수 있음을 보였고, 반면에 협대역 CDMA 방식은 4차 MRC 다이버시티 수신기를 사용하여 37명의 가입자를 수용할 수 있음을 보였다. 이것은 협대역 CDMA 방식의 1.25 MHz의 대역을 FDMA하여 $1.25 \text{ MHz} \times 10$ 의 대역을 사용한다고 했을 때, 가입자 수용 용량은 광대역 CDMA 방식의 94.4% 정도임을 나타낸다.

즉, 다이버시티 수신기를 사용하지 않는 광대역 CDMA 방식이 다이버시티 수신기를 사용하는 협대역 CDMA 방식 보다 더 우수한 성능을 보였다. 따라서 협대역 CDMA 방식은 수신기의 복잡성 때문에 다이버시티 수신기의 가지수(branch)를 무한정 늘릴 수 없고,

도심지역에서 3~4차 정도의 다이버시티가 가능하다는 점을 고려하면, 그 성능이 상당히 제한적임을 알 수 있다. 또한 동일 차수의 다이버시티 수신기를 사용한다면 광대역 CDMA 방식은 협대역 CDMA 방식 보다 더욱 월등한 성능을 보일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 두 방식의 성능 및 용량 비교를 위해 단순히 단일셀에서의 순방향 채널만을 고려하였으나, 실제적 셀룰러(Cellular) CDMA 시스템에서의 정확한 성능 평가를 위해서는, 일반적인 CDMA 시스템의 기본 기술들이 포함되는 다중셀에서의 순방향과 역방향의 성능에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 생각된다.

그러나, 현재의 이동통신 기술 개발이 PCS 사업에 많은 관심을 두고 있다. 그런데 협대역 CDMA 방식은 다중경로 페이딩을 극복하기 위해서 채널 상황에 따라 3-4차의 다이버시티를 사용해야 하고, 최악의 경우 지연확산(delay spread)이 1 μ s 이내인 채널환경에서는 다이버시티 기술마저 사용할 수 없다. 따라서 실내의 채널환경에서 나타나는 협대역 CDMA 방식의 이러한 한계를 극복하고 용량을 증대할 수 있는 방안으로서 광대역 CDMA 방식의 잠재적 가능성을 확인할 수 있었다는 점에서 본 연구의 의의가 크다고 할 수 있다.

참고문헌

1. William C. Y. Lee, "Overview of Cellular CDMA," IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 40, No. 2, pp.291-301, May 1991.
2. Donald L. Schilling, Gray R. Lomp, and Joseph Garodnick, "Broadband CDMA Overlay," 43rd VTC, pp.452-455, 1993.
3. D. L. Schilling, et al., "Broadband CDMA for Personal Communications Systems," IEEE Com. Magazine, pp.86-93, Nov. 1991.
4. K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, A. J. Viterbi, et al., "On the Capacity of a Cellular CDMA Systems," IEEE Trans. on V. T., Vol. 40, No. 2, pp.303-312, May 1991.
5. K. S. Gilhousen, et al., "Increased Capacity Using CDMA for Mobile Satellite Communication," IEEE Journal on selected areas in Com., Vol. 8, No. 4, pp.505-514, May 1990.
6. Wing-Po Yung, "Direct Sequence Spread Spectrum Code Division Multiple Access Cellular Systems in Rayleigh Fading and LogNormal Shadowing Channel," ICC '91, pp.871-876, 1991.
7. Thomas Eng and L. B. Milstein, "Comparison of Hybrid FDMA/CDMA Systems in Frequency Selective Rayleigh Fading," IEEE J-SAC, Vol. 12, No. 5, pp.938-951, June 1994.
8. 신철호, 부수일, 김철성, "다중경로 페이딩 채널에서 광대역 CDMA방식의 성능평가에 관한 연구", JCCI '95, pp.619-623, 1995.
9. John G. Proakis, *Digital Communication*, McGraw-Hill, 1989.
10. William C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*, John Wiley & Sons, 1993.
11. D. J. Torrieri, "Performance of Direct-Sequence Systems with Long Pseudonoise Sequences," IEEE J-SAC, Vol. 10, No. 4, pp.770-781, May 1992.
12. Michael B. Pursley, "Performance Evaluation for Phase-Coded Spread-Spectrum Multiple-Access Communication-Part I : System Analysis," IEEE Trans. Comm., Vol. COM-25, No. 8, pp.795-799, August 1977.
13. L. B. Milstein, T. S. Rappaport, and R. Barghouti, "Performance Evaluation for Cellular CDMA," IEEE J-SAC, Vol. 10, No. 4, pp.680-689, May 1992.
14. Michel D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, 1993.



夫 秀 日(Su-Il Boo) 정희원

1963년 12월 11일생
1986년 2월 : 전남대학교 전기공학과 전자전공 졸업(공학사)
1991년 8월 : 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1992년 3월~현재 : 전남대학교 대학원 전기공학과 박사학위과정중(1996년 2월 졸업예정)

※주관심 분야 : 디지털 이동통신, 디지털 통신시스템, 통신신호처리



金 澈 成(Cheol-Sung Kim) 정희원

1953년 12월 28일생
1977년 2월 : 서울대학교 전자공학과(학사)
1979년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과(석사)

1987년 12월 : Univ. of Arizona(박사)
1979년 2월~1983년 3월 : 국방과학연구소 근무
1983년 3월~1984년 2월 : 대우중공업 기술연구소 근무
1985년 1월~1987년 11월 : Univ. of Arizona(Research Associate)

1987년 11월~1989년 3월 : 한국전자통신연구소(이동통신 연구실장 역임)

1989년 3월~1995년 3월 : 전남대학교 전자공학과 교수

1995년 3월~현재 : 전남대학교 컴퓨터공학과 교수

※주관심 분야 : 디지털 통신 시스템 공학, 이동통신, 위성통신, 통신신호처리, 영상처리 등.