

# 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$ 다이버시티 수신시 콘볼루션 부호화 된 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 개선

김영철\*, 노재성\*\*, 조성언\*\*\*, 조성준\*

한국항공대학교 대학원 정보통신공학과\*

서일대학 정보통신과\*\*

순천대학교 정보통신공학과\*\*\*

## Performance Improvement of Convolutional Coded Multi-Carrier DS-CDMA System Using Hybrid SC/MRC- $L_c/L$ Diversity

Young-Chul Kim\*, Jae-Sung Roh\*\*, Sung-Eon Cho\*\*\*, Sung-Joon Cho\*

\* Dept. of Inform. & Telecom. Eng., Graduate School of Hankuk Aviation Univ.

\*\* Dept. of Inform. & Comm. Eng., Seoil College

\*\*\* Dept. of Computer & Comm. Eng., Sunchon National Univ.

### 요 약

본 논문에서는 Hybrid SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신 기법과 콘볼루션 부호화 기법을 각각 또는 함께 이용할 때의 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 개선을 구하였다. 우선 다중경로 페이딩 및 다중접속간섭의 영향을 분석하고, 두 기법에 의한 성능 개선 정도를 구하여 비교, 분석하였다. Hybrid SC/MRC- $L_c/L$  수신에서는 각각의 반송파에 대하여 상관을 취하고 상관기 출력들 중에서 가장 큰 신호성분을  $L_c$ 개 만큼 선택하여 최대비 합성하며, 콘볼루션 부호화는 다중경로 페이딩 및 다중접속간섭에 의하여 발생된 오류를 정정 및 검출한다. 분석 결과, 콘볼루션 부호화 기법을 채용함으로써 성능이 현저하게 개선되는데, 부호이득과 전력제한 사이에 trade off를 고려하여 부호화율( $r$ )을 선택할 필요가 있다는 것과 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신에서는 입력 다이버시티 가지의 수( $L$ )가 많을수록 선택의 폭이 넓어지며, 적절한 숫자의 다이버시티 가지의 선택이 시스템의 복잡성과 성능 대 비용 등을 결정한다는 것을 알 수 있었다.

### I. 서 론

최근의 개인 이동통신은 다양한 서비스와 함께 다양한 시스템이 구축되어 활용되고 있으며, 제 2.5 세대를 지나 제 3 세대, 그리고 음성과 무선 데이터 서비스 및 영상 등의 방송이 혼합된 제 4 세대를 준비하고 있다. 여기서, 제 2.5 세대인 PCS (Personal Communication Service)와 제 3 세대인 IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000)에서는 다중접속에 직접확산 CDMA (DS-CDMA : Direct Sequence-Code Division Multiple Access) 방식이 적극 이용되고 있는데, DS-CDMA 방식은 TDMA (Time Division Multiple Access) 시스템과 비교하여 큰 다중접속 용량, 페이딩에 대한 강인성, 그리고 항 간섭성 등의 특징을 갖고 있음이 검증되었다. 그러나 직접확산 신호는 대역폭이 넓으므로 채널의 동기(coherent) 대역폭을 초과하게 되어, 주파수 선택성 페이딩의 영향을 받게 되는 단점이 있다. 따라서 다중경로 페이딩과 주파수 선택성 페이딩의

영향을 받지 않도록 동기 대역폭( $\Delta f$ )보다 큰 칩 구간( $T_c$ )을 이용하는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템이 제안되었다[1]-[3].

본 논문에서는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템과 이의 구조를 더욱 간략화 한 하이브리드(Hybrid) SC/MRC- $L_c/L$  수신기틀 이용하며, 다중경로 페이딩 환경에서의 성능 개선을 위하여 구속장이 9이며 부호화율이 각각 1/2과 1/3 그리고 1/4인 콘볼루션 부호기를 채용한다. 시스템의 장점으로는 다중경로 페이딩에 강인성과 협대역 간섭 억제 효과를 가지게 되며, 낮은 칩 율의 DS-CDMA 시스템과 구성의 단순화로 인한 비용 절감이 가능하다. 또한, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템과 광대역 DS-CDMA 시스템은 전체 대역폭에 대하여 동일한 대역폭을 갖게 되며, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 전체 대역폭은 반송파의 수( $M$ )에 의하여  $M$ 개의 동일한 주파수 대역으로 나누어지며, 이는 광대

역 DS-CDMA 시스템의 칩 구간 ( $T_c$ )보다  $M$  배가 커진 칩 구간 ( $MT_c$ )으로 확산 열이 변조되는 특징이 있다[4][5].

본 논문에서는 다중경로 레일리 페이딩과 다중접속간섭 환경에서 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능과 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신을 채용한 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능을 비교, 분석한다. 그리고 콘볼루션 부호화 기법에 의한 두 시스템의 성능 개선 정도를 정량적으로 구하여 비교, 분석한다.

## II. 채널 모델

### 2.1 무선 채널 모델

무선 채널은 다중 경로를 통하여 지연 확산이  $T_m$ 인 느린 레일리 페이딩 채널로 가정한다. 채널 모델 특성은 두 가지로 나눌 수 있는데 먼저, 시간 영역의 채널 모델로 RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템에서 다중 경로의 수 ( $L$ )은 다음과 같다.

$$L = \left\lfloor \frac{T_m}{T_c} \right\rfloor + 1 \quad (1)$$

여기서,  $T_m$ 과  $T_c$ 은 각각 지연 확산 시간과 광대역 시스템의 칩 주기이다. 그리고 무선 채널의 복소 저역 통과 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$c(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \xi_l \delta(t - lT_c) \quad (2)$$

여기서,  $\xi_l$ 은 평균이 "0"인 복소 가우스 랜덤 변수이다.

또한, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서 주파수 영역의 채널 모델은 동기 (coherent) 대역폭 ( $\Delta f_c$ )에 의하여 특정 지워지며 다음과 같다.

$$(\Delta f)_c \approx \frac{1}{T_m} \quad (3)$$

위의 조건을 이용하여 다중 반송파의 수 ( $M$ )를 선택하기 위하여 가정한다면 각 반송파의 부 대역은  $T_m/(MT_c) \leq 1$ 이기 때문에 주파수 선택성이 아니어야 하며, 모든 부 대역은  $BW_M \geq (\Delta f)_c$ 으로 독립적인 페이딩을 받는다. 위의 두 조건을 만족하는 반송파의 수 ( $M$ )의 범위는 다음과 같다.

$$\frac{T_m}{T_c} \leq M \leq (1+a)\frac{T_m}{T_c} \quad (4)$$

식 (4)에서 왼쪽 부등식이 만족하면,  $M=L$ 을 선택하고, 오른쪽 부등식이 만족하면  $a \geq T_c/T_m$ 을 선택한다. 여기서  $(\Delta f)_c = 1/T_m$ 인 경우에 무선 채널에 대한 모델은 그림 1과 같다[3],[7],[8].

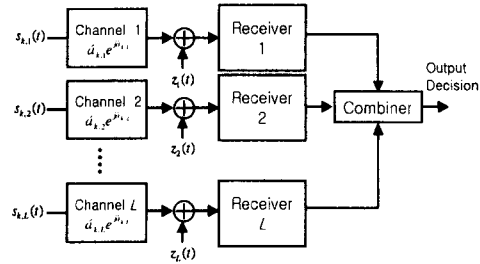


그림 1. 다중 경로 채널을 위한 다이버시티 모델

### 2.2 레일리 페이딩 환경에서 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$

수신기의 출력

본 논문에서는 그림 1에서 가정한 무선채널 환경을 레일리 페이딩 환경이라 가정하며, 수신 신호 중에는 반사파 성분만이 존재한다.

하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신기의 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서  $M$ 개의 반송파는 각각  $L_c$ 개의 입력 가지로 수신된다고 가정하며, 이 중에 최대치의 신호대 잡음 전력비 (SNR)을 갖는  $L_c$ 개의 가지를 선택하도록 고려된다. 각 가지들의 신호대 잡음 전력 비는 독립적인 랜덤변수로서 모델링되어진다. 선택 합성 Logic의 입력치에 할당된 페이딩 진폭은 큰 진폭에서 작은 진폭인  $a_1, a_2, \dots, a_L$ 의 순서로 나열되며 각각에 대한 평균 신호 전력 ( $\Omega$ )을 갖는다. 각 채널에 대한 비트 당 순시 신호대 잡음 전력비는 다음과 같이 정의한다면,  $\gamma_l = a_l^2 E_b / \eta_0$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$  ( $E_b / \eta_0$ 는 비트 에너지대 잡음 전력비)이다. 각 채널에 부합되는 비트당 평균 신호대 잡음 전력비는  $\bar{\gamma}_l = \overline{a_l^2} E_b / \eta_0 = \Omega E_b / \eta_0$ 이다. 순시 신호대 잡음 전력비 ( $\gamma_l$ )의 최대치 가지 ( $L_c$ )의 결합 확률밀도함수는 다음과 같다[9].

$$p_{\gamma_1, \dots, \gamma_L}(\gamma_1, \dots, \gamma_L) = L_c! \binom{L}{L_c} [P_\gamma(\gamma_L)]^{L-L_c} \prod_{l=1}^{L_c} p_\gamma(\gamma_l) \quad (5)$$

$$\gamma_1 \geq \dots \geq \gamma_L \geq 0$$

여기서,  $p_\gamma(\gamma)$ 는  $\gamma$ 의 확률밀도함수이고  $P_\gamma(\gamma) = \int_0^\gamma p_\gamma(y) dy$ 는 조건부 분포함수이다. 이와 같이  $\gamma_1, \dots, \gamma_L$ 은 식 (5)로부터 독립적이지 않다. 무선채널에서 각 가지에 대하여 레일리 페이딩의 확률밀도함수  $p_\gamma(\gamma)$ 는 다음과 같다.

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right) \quad (6)$$

그리고,  $P_\gamma(\gamma) = \int_0^\gamma p_\gamma(y) dy = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right)$  는 조건부 분포함수이다.

### III. Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석

본 논문은 다중경로 채널을 가정하고, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의  $k$ 번째 사용자에 대한  $i$ 번째 주파수 대역의 전달 함수는  $\zeta_{k,i} = \alpha_{k,i} \exp(j\beta_{k,i})$ 으로 주어지며,  $\alpha_{k,i}$ 와  $\beta_{k,i}$ 는 각각 2차 평균 레일리 랜덤 변수인 진폭과  $[0, 2\pi]$ 인 단위 랜덤 변수의 위상이다. AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에서 수신된 Multi-Carrier DS-CDMA의 수신된 신호는 다음과 같이 주어진다[7],[8].

$$r(t) = \sum_{k=1}^U \left\{ \sqrt{2E_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(k)} c_n^{(k)} h(t - nMT_c - \tau_k) \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} \cos(\omega_m t + \theta_{k,m}) \right\} + n_u(t) \quad (7)$$

여기서,  $h = \lfloor n/N \rfloor$ 는 칩 과형 형성 필터의 임펄스 응답이다. 위상은  $\theta_{k,m} = \theta_{k,m} + \beta_{k,m}$ 이고,  $n_u(t)$ 는 양측파대의 전력이  $\eta_0/2$ 인 AWGN이다. 그리고  $U$ 는 사용자 수이고  $M$ 는 반송파의 수이다.

임의의 사용자에 대하여 반송파 동기 및 비트 동기가 이상적으로 이루어졌다고 가정하면,  $i$ 번째 칩 결합 필터기의 출력  $y_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$y_i(t) = S_i(t) + I_y(t) + N_y(t) \quad (8)$$

$$\text{단, } S_i(t) = \sqrt{E_c} \alpha_{i,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(i)} c_n^{(i)} x(t - nMT_c) \quad (9)$$

$$I_y(t) = \sum_{k=1}^U \left\{ \sqrt{2E_c} \zeta_{k,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(k)} c_n^{(k)} x(t - nMT_c - \tau_k) \right\} \quad (10)$$

$$N_y(t) = Lp\{n_u(t)\sqrt{2} \cos(\omega_i t + \theta_{i,i})\} \quad (11)$$

여기서,  $\zeta_{k,i} = \alpha_{k,i} \cos \phi_{k,i}$ 와  $\phi_{k,i} = \theta_{k,i} - \theta_{i,i}$ 는 가우스 분포를 하게되며,  $I_y(t)$ 는 다른 사용자로부터의 간섭을 나타낸다.  $N_y(t)$ 는 필터링 된 가우스 잡음이고,  $n_u(t)$ 는  $n_u(t)$ 가  $i$ 번째 대역통과 필터를 거친 신호이다.  $Lp\{\cdot\}$ 는 저역통과 필터를 나타낸다. 또한 여러 명의 사용자들 고려하여  $c_n^{(i)}$ 이  $M$ 열이면, 모든 상관기의 신호 출력 ( $Z$ )은 다음과 같다[8].

$$Z = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^L g_{l,i} Z_i \quad (12)$$

여기서,  $g_{l,i}$ 는  $L_c$ 의 다이버시티 이득을 갖는  $i$ 번째 경로에서의 이득이며,  $Z$ 가 최대가 된다. 이때 일반적인 수신기 구조에서는  $M$ 개의 열을 얻게 되지만, 하이브리드 SC/MRC 수신기에서는 SC Logic에 의하여  $L$ 개의 가지 중에  $L_c$ 개가 선택된다. 다음으로  $g_{l,i}$ 는 다음과 같다.

$$g_{l,i} = \frac{E\{Z_i | \alpha_{l,i}\}}{\text{Var}\{Z_i | \alpha_{l,i}\}} \quad (13)$$

여기서,  $Z_i$ 의 조건부 평균과 분산이 추정 가능하다면, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 조건부 신호대 잡음 전력 비( $=\rho_m$ )는 다음과 같다.

$$\rho_m = \frac{E^2\{Z | \alpha_i\}}{\text{Var}\{Z | \alpha_i\}} = N^2 E_c \gamma \quad (14)$$

식 (14)를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\rho_m = N^2 E_c \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_{i,i}^2}{\frac{(U-1)NE_c}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{N\eta_0}{2}} \quad (15) \\ = \left\{ \frac{U-1}{2MN} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{\eta_0}{2MNE_c} \right\}^{-1} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \alpha_{i,i}^2$$

식 (15)에서  $M=1$ ,  $L=1$ 인 경우, 단일 반송파 광대역 DS-CDMA 시스템의 조건부 신호대 잡음 전력 비가 되며, 이때는  $(1/M) \sum_{i=1}^M \alpha_{i,i}^2$ 과  $\sum_{i=1}^L \hat{\alpha}_{i,i}^2$ 가 동일한 확률밀도함수가 되어, 비트 에너지 스펙트럼밀도  $E_b$ 는  $M=L$ 이므로  $MN=N_1$ ,  $MNE_c = N_1 E_{c1} = E_b$ 가 된다. 따라서, RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템과 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 차이는 없게 된다.

최종적으로 다중경로 레일리 페이딩과 다중접속 사용자 간섭 채널에서 하이브리드 SC/MRC-Lc/L 수신기의 Multi-Carrier DS-CDMA BPSK (Binary Phase Shift Keying) 신호의 비트 오류율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Pe = \int_0^\infty \frac{1}{2} \text{Erfc}(\sqrt{\gamma}) \cdot p_{\gamma,\gamma}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma \quad (16)$$

단,  $\text{Erfc}(\cdot)$ 는 오류 보함수이다.

### IV. 콘볼루션 부호을 이용하는 Multi-Carrier DS-CDMA BPSK 신호의 오류 성능

제 2 세대와 제 3 세대의 IS-95 계열에서 채용한 순방향과 역방향에 대한 콘볼루션 부호의 구속장은 9이며, 부호화율은 1/2와 1/3 그리고 1/4 인 부호로서 다양한 부호화율을 갖고 있다. 이는 음성이나 데이터뿐만 아니라 동영상, 방송 등과 같이 멀티미디어 서비스를 하는 경우에 오율  $10^{-6}$  이하를 얻어야 한다.

콘볼루션 부호에 대한 우수성은 이미 검증이 되었으며, 부호화 기법으로 콘볼루션 부호와 선형 블록 부호의 차이점은 기억장치의 유무로 블록 부호의 부호기는  $k$  비트의 정보를  $n$ 비트의 부호어로 만들어 내는 무기억 장치인 반면, 콘볼루션 부호의 부호기는 출력 계열에 의해서 결정되므로 기억이 있는 장치로 간주한다.

따라서, 본 논문에서는 페이딩과 다중접속 간섭에 대한 성능 개선 기법으로 구속장이 9이고 부호화율 ( $r = k/n$ )이 각각 1/2, 1/3 그리고 1/4인 콘볼루션 부호화 기법을 사용한다. 부호 오율식은 BSC (Binary symmetric channel)에서 경판정 (Hard Decision)인 경우, 가지이득  $D'$ 를 Chernoff upperbound에 의하여 구하면 다음과 같다[6],[10].

$$P_b(e) \leq \frac{1}{k} \frac{\partial T(D, N)}{\partial N} \Bigg|_{N=1, D=\sqrt{4Pk(1-Pe)}} \quad (17)$$

여기서, 전달함수  $T(D) = WD^j$ 이고,  $W$ 는 해밍 거리( $j$ )의 경로 갯수,  $D$ 는 가지 이득 그리고  $j$ 는 해밍 거리이다.

### V. 수치 해석 및 결론

본 논문에서는 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신 시 콘볼루션 부호를 이용하는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 오율 성능을 사용자 수 ( $U$ ), 반송파의 수 ( $M$ )와 다중경로의 수 ( $L$ ), 부호화율 ( $r$ )에 따라 분석하였다.

그림 2는 다중경로 페이딩을 받는 마이크로 셀이나 피코 셀로 가정하여 반사파 만이 존재하는 열악한 환경인 레일리 페이딩 채널에서 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신 시 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능을 나타낸다. 그림에서 반송파의 수 ( $M$ )가 증가할 수록 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템은 주파수 다이버시티와 같은 성능을 나타내어 성능 개선을 이루었으며, 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신기의 다이버시티 가지의 수가  $L = 3$ 과 4이고,  $L_c = 2$ 가 인 경우에서 반송파의 수 ( $M$ )가 4개이면 무선 데이터 통신에서 요구되는 오율  $10^{-6}$ 을  $E_b/\eta_0$ 에 대하여 각각 14.5 dB와 12 dB에서 얻게 됨을 알 수 있다. 따라서, 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신기의 다이버시티 가지의 수가 한 개 더 많아 짐으로서 다이버시티 가지의 선택의 폭이 넓어져

오율 성능이 더욱 개선된다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 다중경로 레일리 페이딩 채널에서 콘볼루션 부호화 된 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 부호화율 ( $r$ )에 따른 오율 성능을 나타낸다. 반송파의 수 ( $M$ )에 대한 증가는 앞서의 결과와 동일하며, 반송파의 수 ( $M$ )가 4개인 경우에서 부호화 기법을 채용한 것과 채용하지 않은 시스템은 현저하게 차이가 난다. 또한 무선 데이터 통신에서 요구하는 오율  $10^{-6}$ 을 부호화율 ( $r$ )이 각각 1/2, 1/3 그리고 1/4에 대하여  $E_b/\eta_0$ 가 각각 9.5 dB, 8.2 dB 그리고 7.5 dB를 얻게 된다. 따라서, 부호화율 ( $r$ )에 따른 이득은 1~2 dB간의 차이 밖에는 없으므로 부호화율 ( $r$ )과 전력제한 시스템과의 trade off를 고려하여 부호화율 ( $r$ )을 적절히 선택하여야 한다.

그림 4는 열악한 페이딩 환경인 레일리 페이딩 채널에서 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신 시 콘볼루션 부호화 된 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 부호화율 ( $r$ )은 1/2로서 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신기의 다이버시티 가지의 수 ( $L$ )가 클 수록 성능은 더욱 개선되었다. 또한 무선 데이터 통신에서 요구하는 오율  $10^{-6}$ 을  $E_b/\eta_0$ 가 3.5 ~ 6 dB에서 모두 얻을 수 있었다. 따라서, 두 기법을 채용함으로써 성능 개선은 시너지 효과를 얻게 되었으며 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신기보다는 콘볼루션 부호화 기법이 성능 개선면에서 효과적임을 알 수 있었다.

Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서는 콘볼루션 부호화 기법을 채용함으로써 성능이 현저하게 개선되었는데, 부호이득과 전력제한 사이의 trade off를 고려하여 부호화율 ( $r$ )을 선택할 필요가 있다. 하이브리드

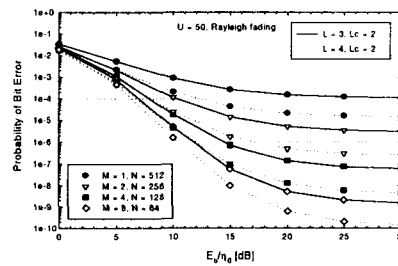


그림 2. 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신 시 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 오율 성능

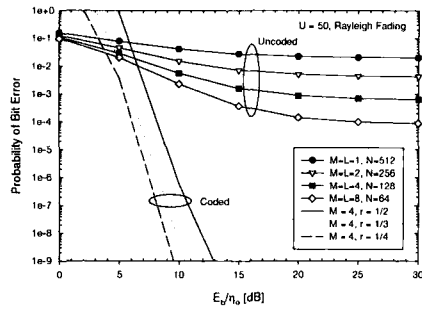


그림 3. 콘볼루션 부호화 된 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 오율 성능

SC/MRC- $L_c/L$  수신에서는 입력 다이버시티 가지의 수 ( $L$ )가 많을수록 선택의 폭이 넓어졌으며 적절한 다이버시티 가지 수의 선택이 시스템의 복잡성과 성능 대 비용 등을 결정한다는 것을 알 수 있었다.

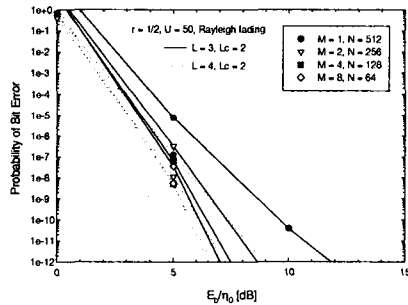


그림 4. 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신시 콘볼루션 부호화 된 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 오율 성능

### 참고문헌

[1] Harri Holma, *WCDMA for UMTS*. WILEY, 2000.  
 [2] Vijay K. Garg, *IS-95 CDMA and CDMA2000*. Prentice Hall PTR, 2000.  
 [3] J. Proakis, *Digital Communications*. New York: McGraw-Hill, 1989.  
 [4] T. Eng and L. B. Milstein, "Coherent DS-CDMA performance in Nakagami multipath fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 1134-1143, Mar. 1995.  
 [5] R. E. Ziemer and R. L. Peterson, *Digital Communications and Spread Spectrum Systems*. New York: Macmillan, 1985.

[6] J. S. Lee and L. E. Miller, *CDMA System Engineering Handbook*. Artech House Pub., 1998.  
 [7] S. Kondo and L. B. Milstein, "Performance of multicarrier DS CDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 2, pp. 238-246, Feb. 1996.  
 [8] 김영철, 다중경로 페이딩 환경에서 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석, 한국항공대학교 대학원, 항공통신정보공학과, 박사학위논문, 2002년 2월  
 [9] M. K. Simon and M. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.  
 [10] Conan, J., "The weight spectra of some short low-rate convolutional codes," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-32, pp. 1050-1053, Sept. 1984.