

하이브리드 SC/MRC-Lc/L 다이버시티 수신 광대역 DS-CDMA 시스템의 성능 해석

김 영 철, 조 성 준*

한국정보통신기술대학 방송통신설비과

* 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부

Performance Analysis of Wideband DS-CDMA System using Hybrid SC/MRC-Lc/L Diversity Received

Young-Chul Kim, Sung-Joon Cho*

Dept. of Broadcasting & Comm., Korea Inform. & Comm. Polytechnic College

* School of Aviation Electronics & Telecom. Eng., Hankuk Aviation University

E-mail : yckim@icpc.ac.kr

요 약

본 논문에서는 다중경로 페이딩 환경에서의 하이브리드 (Hybrid) SC/MRC- L_c/L 다이버시티 수신 기법과 콘볼루션 부호화 기법을 각각 이용할 때의 광대역 DS-CDMA 시스템의 성능을 구하였다. 다중경로 페이딩으로는 라이시안 페이딩 채널을 가정하였고, 다중사용자간섭의 영향을 함께 분석하였다. 그리고 하이브리드 SC/MRC- L_c/L 다이버시티 기법과 콘볼루션 부호화 기법을 채용하여 성능 개선정도를 비교, 분석하였다. 하이브리드 SC/MRC- L_c/L 수신에서는 각각의 반송파에 대하여 상관을 취하고 상관기 출력들 중에서 가장 큰 신호성분을 L_c 개만큼 선택하여 최대비 합성하며, 콘볼루션 부호화는 다중경로 페이딩 및 다중접속간섭에 의하여 발생된 오류를 정정 및 검출한다.

분석 결과, 콘볼루션 부호화의 경우는 부호이득과 전력제한 시스템의 trade off를 고려한 부호화율의 선택과 하이브리드 SC/MRC- L_c/L 수신인 경우, 다이버시티 가치의 증가는 선택의 폭이 커져 성능개선은 이루어지지만 가치의 배수가 동일할 경우 가치의 수가 적은 것이 시스템의 복잡성과 경제적인 면에서 효율적임을 알 수 있었다.

키워드

Wideband DS-CDMA, Hybrid SC/MRC-Lc/L Diversity, multipath fading, Convolutional Coded

1. 서 론

최근의 이동통신은 각 나라마다의 이해관계에 따라 다양한 시스템이 구축되어 활용되고 있으며, 이제는 제 2.5 세대를 지나 제 3 세대, 그리고 음성과 무선 데이터 서비스 및 영상 등의 방송과 통신이 융합된 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 항간섭성 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 최근에는 다중경로 페이딩과 주파수 선택성 페이딩의 영향을 고려하여 다양하면서 새로운 성

능개선기법을 제안하고 있다[1]-[2].

본 논문에서는 광대역 DS-CDMA 시스템에 기존의 최대비 합성 다이버시티 (MRC : Maximal Ratio Combining) 와 선택 합성 다이버시티 (SC : Selection Combining)의 구조를 더욱 간략화 한 하이브리드 (Hybrid) SC/MRC- L_c/L 수신기를 이용하였고, 다중경로 페이딩 환경에서의 성능 개선을 위하여 구속장이 9이며 부호화율이 각각 1/2과 1/3 그리고 1/4인 콘볼루션 부호기를 채용한다. 시스템의 장점으로는 다중경로 페이딩에 강하며, 열악한 무선 채널에서도 고속의 데이터 전송이 가능하다[3],[4].

본 논문에서는 다중경로 라이시안 페이딩 및 다중접속간섭 환경에서 광대역 DS-CDMA 시스템의 성능과 하이브리드 SC/MRC- L_c/L 다이버시티 수신을 채용한 광대역 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 라이시안 (Rician) 페이딩 채널로 가정한다. 채널 모델 특성은 시간 영역의 채널 모델로 RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템으로 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 저역등가 임펄스 응답은 다음과 같다.

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

여기서, ξ_l 은 평균이 "0"인 복소 가우스 랜덤변수이다.

라이시안 페이딩 채널 모델은 수신 신호 중에 직접파 성분이 존재하며, 반사파 성분을 무시할 수 없다고 가정한다. 예를 들어 실내 무선 환경에서는 근접한 거리에서 통신이 이루어짐으로서 가시거리의 직접파 성분과 장애물에 의한 반사파 성분이 혼재함으로써 라이시안 파라미터 (K_R)의 범위는 6~12[dB] 정도이고, 실외 무선 환경은 다중경로 전파 특성을 실측한 데이터에 의하면 단구간에서 이루어지는 도심의 이동체 통신과는 달리 심각한 페이딩이 수 초 혹은 수 분간 지속된다고 알려져 있다. 따라서 직접파와 반사파로 구성된 수신파의 진폭 (R)은 Rice 분포를 하게 되며 라이시안 페이딩 채널에서 수신 신호 전력 대 잡음 전력비의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

널에서 수신 신호 전력 대 잡음 전력비의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$p_{Rice} = \frac{K_R + 1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{(K_R + 1)\gamma}{\bar{\gamma}} - K_R\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{K_R(K_R + 1)\gamma}{\bar{\gamma}}}\right) \quad (3)$$

단, $\gamma = R^2/(2\eta_0)$: 순시 신호 대 잡음 전력비,
 $\bar{\gamma} = R_0^2/(2\eta_0)$: 평균 신호 대 잡음 전력비,
 $K_R = R_0^2/(2\sigma_r^2)$: 직접파 대 반사파 전력비이며 라이시안 파라미터.

2.2 레일리 페이딩 환경에서 하이브리드 SC/MRC- L_c/L 수신기의 출력

본 논문에서는 실내외의 열악한 무선채널 환경을 레일리 페이딩 환경이라 가정하며, 수신 신호 중에는 반사파 성분만이 존재한다.

하이브리드 SC/MRC- L_c/L 수신기의 광대역 DS-CDMA 시스템에서는 L 개의 입력 가지로 수신된다고 가정하며, 이 중에 최대치의 신호대 잡음 전력비 (SNR)을 갖는 L_c 개의 가지를 선택하도록 고려된다. 각 가지들의 신호 전력 대 잡음 전력 비는 독립적인 랜덤변수로서 모델링 되어진다. 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 (Ω)을 갖는다. 각 채널에 대한 비트 당 순시 신호 전력 대 잡음 전력 비를 정의한다면, $\gamma_l = a_l^2 E_b/\eta_0$, $l = 1, 2, \dots, L$ (E_b/η_0 는 비트 에너지대 잡음 전력비)이다. 각 채널에 포함되는 비트당 평균 신호 전력 대 잡음 전력 비는 $\bar{\gamma}_l = \bar{a}_l^2 E_b/\eta_0 = \Omega E_b/\eta_0$ 이다. 순시 신호 전력 대 잡음 전력 비 (γ)의 최대치 가지 (L_c)의 결합 확률밀도함수는 다음과 같다[3].

$$p_{\gamma_1, \dots, \gamma_L}(\gamma_1, \dots, \gamma_L) = L_c! \binom{L}{L_c} [P_\gamma(\gamma_{L_c})]^{L-L_c} \prod_{l=1}^{L_c} p_\gamma(\gamma_l), \gamma_1 \geq \dots \geq \gamma_{L_c} \geq 0 \quad (4)$$

단, $\binom{L}{L_c} = \frac{L!}{L_c!(L-L_c)!}$.

여기서, $p_\gamma(\gamma)$ 는 γ 의 확률밀도함수이고 $P_\gamma(\gamma) = \int_0^\gamma p_\gamma(y)dy$ 는 조건부 분포함수이다. 이와 같이 $\gamma_1, \dots, \gamma_{L_c}$ 은 식 (4)로부터 독립적이지 않다. 무선 채널에서 각 가지에 대하여 레일리 페이딩의 확률 밀도함수 $p_\gamma(\gamma_l)$ 는 다음과 같다.

$$p_r(\gamma_l) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma_l}{\gamma}\right) \quad (5)$$

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

III. 광대역 DS-CDMA 시스템의 성능 해석

본 논문은 다중경로 채널을 가정한다. 광대역 DS-CDMA 시스템의 k 번째 사용자에게 대한 i 번째 주파수 대역의 전달 함수는 $\zeta_{k,i} \equiv a_{k,i} \exp(j\beta_{k,i})$ 으로 주어지며, $a_{k,i}$ 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 다중반송파 DS-CDMA의 수신된 신호는 다음과 같이 주어진다[3],[5].

$$r(t) = \sum_{k=1}^U \left\{ \sqrt{2E_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(k)} c_n^{(k)} h(t - nT_c - \tau_k) \right. \\ \left. a_{k,i} \cos(\omega t + \theta_{k,i}) \right\} + n_w(t) \quad (6)$$

여기서, $h = \lfloor n/N \rfloor$ 는 칩 파형 형성 필터의 임펄스 응답이다. 위상은 $\theta_k = \theta_k + \beta_k$ 이고, $n_w(t)$ 는 양측파대의 전력인 $\eta_0/2$ 인 AWGN이다. 그리고 U 는 사용자 수이다.

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

$$y_i(t) = S_{y_i}(t) + I_{y_i}(t) + N_{y_i}(t) \quad (7)$$

$$\text{단, } S_{y_i}(t) = \sqrt{E_c} a_{1,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(1)} c_n^{(1)} x(t - nT_c) \quad (8)$$

$$I_{y_i}(t) = \sum_{k=2}^U \left\{ \sqrt{E_c} \zeta_{k,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(k)} c_n^{(k)} x(t - nT_c - \tau_k) \right\} \quad (9)$$

$$N_{y_i}(t) = Lp\{n_w^{(i)}(t)\sqrt{2} \cos(\omega_i t + \theta_{1,i})\} \quad (10)$$

여기서, $\zeta_{k,i} \equiv a_{k,i} \cos \phi_{k,i}$ 와 $\phi_{k,i} = \theta_{k,i} - \theta_{1,i}$ 는 가우스 분포를 하게 되며, $I_{y_i}(t)$ 는 다른 사용자로부터의 간섭을 나타낸다. $N_{y_i}(t)$ 는 필터링 된 가우스 잡음이고, $n_w^{(i)}(t)$ 는 $n_w(t)$ 가 i 번째 대역통과 필터를 거친 신호이다. $Lp(\cdot)$ 는 저역통과 필터를 나타낸다. 또한 여러 명의 사용자를 고려하여 모든 상관기의 신호 출력 (Z)은 다음과 같다.

$$Z = \sum_{l=1}^{L_c} g_l \quad (11)$$

여기서, g_l 는 L_c 의 다이버시티 이득을 갖는 l 번째 경로에서의 이득이며, Z 가 최대가 된다. 하이브리드

SC/MRC 수신기에서는 SC Logic에 의하여 L 개의 가지 중에 L_c 개가 선택된다. 다음으로 g_l 는 다음과 같다.

$$g_l = \frac{E\{Z | a_1\}}{\text{Var}\{Z | a_1\}} \quad (12)$$

여기서, Z 의 조건부 평균과 분산이 추정 가능하다면, 광대역 DS-CDMA 시스템의 조건부 신호대 잡음 전력 비 ($=\rho$)는 다음과 같다.

$$\rho = \frac{NE_b \alpha_1^2}{\frac{(U-1)E_b}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{N\eta_0}{2}} \\ = \left\{ \frac{U-1}{2PG} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{\eta_0}{2E_b} \right\}^{-1} \alpha_1^2 \quad (13)$$

여기서, α_1^2 가 동일한 확률밀도함수가 되어, PG 는 처리이득, 비트 에너지 스펙트럼밀도 E_b 이다.

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

$$P_e = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \text{Erfc}(\sqrt{\gamma}) \cdot p_{n_i, n_j}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma \quad (14)$$

단, $\text{Erfc}(\cdot)$ 는 오류 보함수이다.

IV. 콘볼루션 부호를 이용하는 광대역 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 오류율 10⁻⁶ 이하를 얻어야 한다.

콘볼루션 부호에 대한 우수성은 이미 검증이 되었으며, 부호화 기법으로 콘볼루션 부호와 선형 블록 부호의 차이점은 기억장치의 유·무로 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 오류식은 BSC (Binary symmetric channel)에서 경판정 (Hard Decision)인 경우, 가지이득 D' 를 Chernoff

upperbound 에 의하여 구하면 다음과 같다[4],[6].

$$P_b(e) \leq \frac{1}{k} \frac{\partial T(D, N)}{\partial N} \Big|_{N=1, D=\sqrt{4Pe(1-Pe)}} \quad (15)$$

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 수신과 콘볼루션 부호를 이용하는 광대역 DS-CDMA 시스템의 오율 성능을 사용자 수 (U), 라이시안 파라미터 (K_R), 다중경로의 수 (L), 부호화율 (r)에 따라 분석하였다.

그림 1은 광대역 DS-CDMA 시스템에서 라이시안 파라미터 (K_R)에 따른 변화를 보였다. 사용자

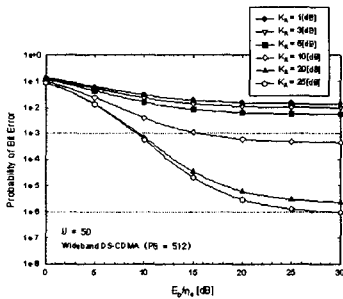


그림 1. 라이시안 페이딩 채널에서 라이시안 파라미터 (K_R)에 의한 광대역 DS-CDMA 시스템의 오율 성능

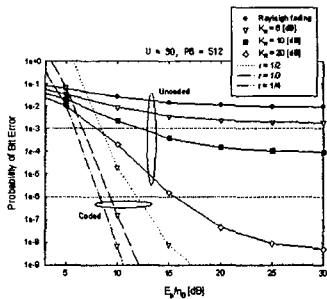


그림 2. 다중경로 페이딩 환경에서 콘볼루션 부호를 이용한 광대역 DS-CDMA 시스템의 오율 성능

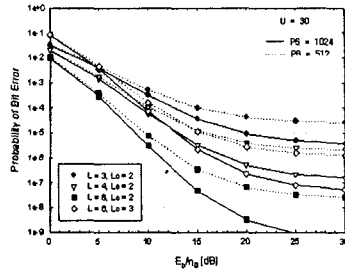


그림 3. 하이브리드 SC/MRC- L_c/L 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템의 오율 성능

수 (U)가 50명으로 제한되었으며, 직접파 전력 대 반사파 전력비인 라이시안 파라미터 (K_R)가 각각 20[dB]와 25[dB]인 경우에 대하여 비트에너지 대 잡음 전력 비 (E_b/η_0)가 약 16.5[dB]와 약 18[dB]에서 오율 10⁻⁵를 도달할 수 있었다. 따라서 페이딩의 영향이 심각한 경우에는 광대역 DS-CDMA 시스템에 RAKE 수신기나 다른 성능개선 기법을 채용하여야 함을 알 수 있었다.

그림 2는 사용자의 수 (U)가 30명, 처리이득 (N)이 512인 광대역 DS-CDMA 시스템에서 라이시안 페이딩 파라미터 (K_R)와 콘볼루션 부호기의 부호화율 (r)에 따른 오율 성능을 나타낸다. 부호화율 하지 않은 광대역 DS-CDMA 시스템에서 라이시안 페이딩 파라미터 (K_R)가 20[dB]인 경우, 오율 10⁻⁶를 달성하기 위하여 E_b/η_0 가 약 15.5[dB] 정도가 필요하다. 그리고 라이시안 페이딩 파라미터가 6[dB]인 채널에서 부호화율이 1/2, 1/3 그리고 1/4 인 콘볼루션 부호화기를 적용한 경우 오율 10⁻⁶이하를 달성하기 위하여 E_b/η_0 가 약 12[dB], 약 9.2[dB] 그리고 약 8.2[dB]가 필요함을 알 수 있다. 이의 결과로부터 전자의 결과는 마이크로 셀이나 피코셀과 같이 셀의 면적이 작아짐으로서 직접파 성분을 얻을 수 있는 환경에서는 부호화 기법이 요구되지 않음을 알 수 있다. 그리고 후자의 결과로서 성능 개선기법으로 부호화 기법이 요구된다면 부호화율이 커지면 커질수록 시스템의 성능에 차가 커짐으로 부호이득과 전력제한 시스템의 trade off를 고려하여 부호화율을 선택하여야함을 알 수 있다.

그림 3은 하이브리드 SC/MRC- L_c/L 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템의 오율 성능으로 다양한 가지 수를 채용한 경우이다. 그림에서 광대역 DS-CDMA 시스템은 처리이득이 커짐으로서 수신기의 가지 이득과 시너지 효과가 있음을 알 수 있다.

결과적으로 부호이득과 전력제한 시스템의

trade off를 고려한 부호화율의 선택과 다이버시티
가지의 증가는 선택의 폭이 커져 성능개선은 이루
어지지만 가지의 배수가 동일할 경우 가지의 수가
적은 것이 시스템의 복잡성과 경제적인 면에서 효
율적임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Harri Holma, WCDMA for UMTS. WILEY, 2000.
- [2] J. Proakis, Digital Communications. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [3] M. K. Simon and M. Alouini, Digital Communication over Fading Channels. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [4] Conan, J., "The weight spectra of some short low-rate convolutional codes," IEEE Trans. on Commun., vol. COM-32, pp. 1050-1053, Sept. 1984
- [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.