

레이리 페이딩 채널에서 다이버시티 경로수 L 인 BPSK DS-CDMA 성능 평가

정회원 김 무 삼*

Performance Evaluation of BPSK DS-CDMA with Diversity Order L over Rayleigh Fading Channel

Moo Sam Kim* *Regular Member*

요 약

육상 무선 채널에서 다경로 신호의 진폭은 레이리 (Rayleigh) 분포에 의하여 심하게 영향을 받는다. 다이버시티 (diversity) 경로수 L 인 RAKE 수신기를 사용한 직접 시퀀스 Code Division Multiple Access (DS-CDMA)에 의하여 각 다경로 신호를 분해함으로써 비트 오류 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문은 레이리 페이딩 채널에서 다이버시티 경로수가 L 인 Binary Phase Shift Keying (BPSK) DS-CDMA의 비트 오류 성능을 평가하였다. 레이리 페이딩 채널에서 다이버시티 경로수가 L 인 BPSK DS-CDMA의 평균 비트 오류 확률의 upper bound를 수식적으로 유도하였고, 그 결과를 비트 에너지 대 가우시안 잡음 전력 밀도 비 (E_b/N_0), 사용자수 N , 처리 이득 (processing gain) N_c 및 다이버시티 경로수 L 의 변수를 사용한 곡선으로 보여 주었다. 또한, 위의 결과를 uncoded 비트 오류 확률과 비교 분석하였다.

ABSTRACT

The amplitude of a multipath signal in terrestrial mobile communication is affected severely by Rayleigh distribution. We can improve the performance of bit error rate by resolving each multipath signal by means of DS-CDMA with RAKE receiver of diversity order L .

This paper evaluates the bit error performance of BPSK DS-CDMA over Rayleigh fading channel. The numerical upper bound expression of average bit error probability of BPSK DS-CDMA with diversity order L over Rayleigh fading channel is derived, and the results are shown through curves by using variables of bit energy-to-Gaussian noise power spectral density E_b/N_0 , number of users N , processing gain N_c , and diversity order L . And, the above results are compared with uncoded average bit error probability and analyzed.

I. 서 론

이동통신에서는 다경로 채널에 의하여 페이딩 현상이 발생한다. 채널은 크게 육상 이동 통신에서의 레이리 (Rayleigh) 페이딩 채널과 위성 통신에서의 라이시

안 (Rician) 페이딩 채널로 이루어진다. 다경로 채널에 의한 페이딩 현상은 신호의 대역을 확산시켜 줄일 수 있다. CDMA (Code division multiple Access) 방식은 광 대역으로 신호를 확산시켜 페이딩을 줄일 수 있을 뿐 아니라, 인접 셀과 주파수를 같이 사용하고, pseudo-

* 용인송담대학 정보통신과, 정회원
논문번호: 98004-0828, 접수일자: 1998년 8월 28일

noise (PN)라 불리는 코드를 각 사용자에게 부여하여 한 셀 내에서 통화 할 수 있는 사용자 수를 증가시킨다. 이 넓은 대역폭으로 다경로의 각 신호를 분리 수신하여 다이버시티 (diversity)에 의한 우수한 비트 에러 성능을 얻을 수 있다¹¹⁻¹⁴. CDMA 채널에서는 타사용자에 의한 다원 접속 간섭 (multiple access interference : MAI) 및 다경로에 따른 자체간섭 (self-interference)이 발생하는데, MAI는 CDMA 성능에 크게 영향을 준다. PN 코드를 거의 완전히 동기화시키면 이 간섭을 최소화시킬 수 있다.

본 논문은 레일리 페이딩 채널에서 RAKE 다이버시티 경로수 L 인 BPSK 직접 시퀀스 CDMA (DS-SS)의 비트 오류 성능을 연구하였다. 비트 오류 성능을 비트 에너지 (E_b) 대 가우시안 잡음 전력 밀도 (N_0) 비 E_b/N_0 , 셀 내의 사용자수 N 및 다이버시티 경로수 L 의 변수로 검토하였다.

본 논문 2장에서는 DS-SS의 개요 및 광대역 레일리 페이딩 채널에 대하여 서술하였다. 3장에서는 레일리 페이딩 채널에서 컨볼루션 (convolutional) 코드된 데이터의 BPSK DS-SS 비트 오류 확률의 upper bound를 수식적으로 유도하고, 그 결과를 $L=1, 2, 3$ 일 때 곡선을 통하여 보여 주었고, uncoded 비트 오류 확률 upper bound와 비교하였다. 처리 이득 및 L 이 커질수록, 그리고 트렐리스도 (trellis diagram)의 d_{free} 가 커질수록 비트 오류 성능이 증가하고, 사용자 수 N 이 많아질수록 비트 오류 성능이 감소함을 보여 주었다. 또한, coded BPSK DS-SS의 비트 오류 성능이 uncoded의 경우보다 우수함도 보여 주었다.

II. 시스템 개요

CDMA는 한 셀 안에 있는 모든 사용자에게 전송 대역폭 W 를 공유하도록 하여 용량을 증가시키는 방식으로 원하지 않는 사용자들의 신호 전력은 간섭으로 표시된다.

DS-SS는 대략 다음과 같이 동작한다. k th 사용자의 PN에 의하여 대역 확산된 송신 신호 $s_k(t)$ 는 다경로 채널을 통과하여 수신 신호 $r(t)$ 가 된다. 이때, 다경로 채널에 의하여 진폭의 감쇄 및 위상의 변화와 지연이 일어난다. 수신 신호 $r(t)$ 는 PN에 의하여 역확산되고, RAKE 수신기에 의하여 분해 가능한 신호들로 합성된 후, 선택된다. 한 셀 내의 사용자 수가 N 인 BPSK DS-SS k th 사용자의 송신 신호

는 다음과 같다.

$$s_k(t) = \sqrt{2P} b_k(t) c_k(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_k) \quad (1)$$

여기서 $k=1, 2, \dots, N$, P 는 송신 전력, f_c 는 캐리어 (carrier) 주파수, θ_k 는 캐리어 위상을 각각 나타낸다. 식 (1)에서 데이터 $b_k(t) \in \{-1, 1\}$ 로 지속 시간 T 인 펄스이고, PN $c_k(t) \in \{-1, 1\}$ 으로 지속시간이 T_c 인 펄스이다. 따라서, 처리 이득 $N_c = T/T_c$. 다경로를 통과한 수신 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sqrt{2P} \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^L a_{kn} b_k(t - \tau_{kn}) c_k(t - \tau_{kn}) \times \cos(2\pi f_c t + \theta_{kn}) + n(t) \quad (2)$$

여기서 a_{kn} , τ_{kn} 및 θ_{kn} 은 k th 사용자의 n th 경로에서 진폭, 지연시간 및 위상을 각각 나타낸다. 또한, $n(t)$ 는 two-sided 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 영 평균 잡음을 나타낸다. 다음 $r(t)$ 가 $t=T$ 에서 RAKE 수신기에서 동기 검출 (coherent detection) 출력은 다음과 같다.

$$z_k = \sqrt{2P} \int_0^T r(t) a_{kn} c_k(t - \tau_{kn}) \cos(2\pi f_c t + \theta_{kn}) dt = D_k + I_k + \eta_k \quad (3)$$

여기서 D_k 는 원하는 신호 출력, I_k 는 간섭 및 η_k 는 $n(t)$ 에 의한 출력을 나타낸다. 간섭은 MAI 및 자체 간섭으로 이루어지는데, 자체 간섭은 무시할 정도로 작다. RAKE 수신기에서 분해 가능한 신호들을 L 개 만큼 합성하여 비트 오류 성능을 향상시킬 수 있다. 대역 확산된 채널의 다이버시티 경로수 L 은 다음과 같이 표시된다.

$$L = [T_m W + 1] \quad (4)$$

여기서 T_m 은 다경로 확산을 나타내고, $[x]$ 는 x 보다 같거나 x 보다 작으면서 가장 큰 정수를 의미한다. 또한 $W=1/T_c$ 의 관계가 성립된다.

다음, 신호의 진폭 α_n 은 레일리 분포를 갖고, y 가 다음 관계식과 같으면

$$y = \sum_{n=1}^L a_n^2 \quad (5)$$

y는 n degrees of freedom의 chi-square 분포를 갖고, y의 확률 밀도 함수 (probability density function : pdf) p(y)는 다음과 같이 주어진다^[5].

$$p(y) = \frac{1}{\sigma^n 2^{n/2} \Gamma(\frac{n}{2})} y^{n/2-1} e^{-y/2\sigma^2} \quad (6)$$

여기서 σ는 분산이고,

$$\gamma_b = \frac{E_b}{N_o} \sum_{n=1}^L a_n^2 \quad (7)$$

여기서 γ_b는 비트 당 신호 대 전체 잡음 비 (signal-to-total noise ratio)를 나타내고, N_o'는 다음과 같이 표시된다.

$$N_o' = I_o + N_o \quad (8)$$

여기서 I_o는 간섭 전력 스펙트럴 밀도이다. 또한, 레이리 페이딩 채널에서 채널당 평균 신호 대 전체 잡음비 $\overline{\gamma_c} = \frac{E_b}{N_o}$ 이다. γ_b는 다이버시티 경로수 L인 DS-CDMA 시스템에서 2L degrees of freedom chi-square 분포를 갖는다. 경로 n에 상관없이 E(a_n²)이 같다면, 식 (5)-(7)로부터 다음과 같은 pdf p(γ_b)를 구할 수 있다.

$$p(\gamma_b) = \frac{1}{(L-1)! \overline{\gamma_c}^L} \gamma_b^{L-1} e^{-\gamma_b/\overline{\gamma_c}} \quad (9)$$

III. 비트 오류 성능 평가

평균 비트 오류 확률 P_b는 다음과 같다.

$$P_b = \int_0^{\infty} P_2(\gamma_b) P(\gamma_b) d\gamma_b \quad (10)$$

여기서 P₂(γ_b)는 조건부 (conditional) 비트 오류 확률로 DS-CDMA가 채택하고 있는 컨벌루션 코드에서

는 다음과 같이 주어진다^[5].

$$P_2(\gamma_b) \leq \frac{1}{2} \sum_{d=d_{min}}^{\infty} \beta_d \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma_b R_c d}) \quad (11)$$

여기서 β_d = a_df(d)로서 a_d는 트렐리스도의 all zero 경로로부터 거리가 d인 경로들의 수를 나타내고, f(d)는 입력 비트 "1"에 의하여 일어나는 모든 브랜치 (branch)들의 변이 (transition)와 관계된다. 식 (10)에서 R_c는 컨벌루션 코드의 코드율 (code rate)를 나타내고 d는 트렐리스도에서 all zero 경로와 어떤 노드 (node)와 만나는 지점에서의 경로와 Hamming 거리를 나타낸다. 따라서, 다이버시티 경로수가 L인 레이리 페이딩 채널에서의 평균 비트 오류 확률의 upper bound는 식 (9) 및 (11)을 (10)에 대입하면 다음과 같다.

$$P_b(\gamma_b) \leq \frac{1}{2} \sum_{d=d_{min}}^{\infty} \beta_d \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma_b R_c d}) \times \frac{1}{(L-1)! \overline{\gamma_c}^L} \gamma_b^{L-1} e^{-\gamma_b/\overline{\gamma_c}} d\gamma_b \quad (12)$$

그리고, $\operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma_b R_c d}) \leq e^{-\gamma_b R_c d}$ 이므로 식 (12)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_b(\gamma_b) \leq \frac{1}{2} \sum_{d=d_{min}}^{\infty} \beta_d e^{-\gamma_b R_c d} \times \frac{1}{(L-1)! \overline{\gamma_c}^L} \gamma_b^{L-1} e^{-\gamma_b/\overline{\gamma_c}} d\gamma_b \quad (13) = \frac{1}{2} \sum_{d=d_{min}}^{\infty} \beta_d \frac{1}{(\overline{\gamma_c} R_c d + 1)^L}$$

동기 BPSK 조건부 비트 오류 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) \quad (14)$$

또한, $\operatorname{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$ 이므로, $P_e = Q(\sqrt{2E_b/N_o})$. 논문[6]으로부터 L = 1일 때 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}} = \left(\frac{N-1}{3N_c} + \frac{N_o}{2E_b}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

식 (15)식을 $\frac{E_b}{N_o}$ 에 대하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{\frac{E_b}{N_o}}{1 + \frac{2(N-1)}{3N_c} \frac{E_b}{N_o}} \quad (16)$$

식 (16)을 다이버시티 경로수 L 인 경우에 대하여 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{\frac{E_b}{N_o}}{1 + \frac{2(LN-1)}{3N_c} \frac{E_b}{N_o}} \quad (17)$$

레이리 페이딩 채널의 DS-CDMA에서 관계식 $\bar{\gamma}_c = \frac{E_b}{N_o}$ 및, 식 (17)을 식 (13)에 대입하면, 레이리 페이딩 채널에서 다이버시티 경로수 L 인 BPSK DS-CDMA의 평균 비트 오류 확률의 upper bound를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_b \leq \frac{1}{2} \sum_{d=d_{free}}^{\infty} \beta_d \left(\frac{1}{\frac{\frac{E_b}{N_o}}{1 + \frac{2(LN-1)}{3N_c} \frac{E_b}{N_o}} R_c d + 1} \right)^L \quad (18)$$

Uncoded 비트 오류 성능은 (9) 및 (14)을 식 (10)에 대입하고, 식 (17)를 사용하면 다음과 같다.

$$P_b \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\frac{\frac{E_b}{N_o}}{1 + \frac{2(LN-1)}{3N_c} \frac{E_b}{N_o}} + 1} \right)^L \quad (19)$$

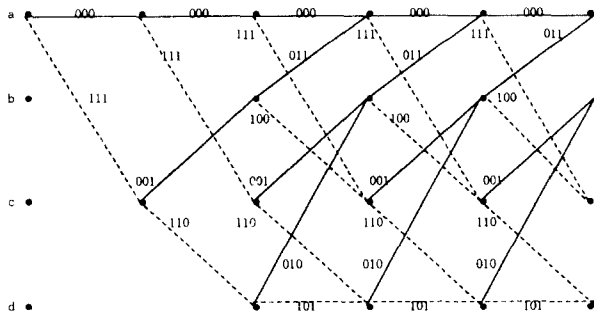


그림 1. $R_c = 1/3, d_{free} = 6$ 트렐리스도
Fig. 1 $R_c = 1/3, d_{free} = 6$ trellis diagram

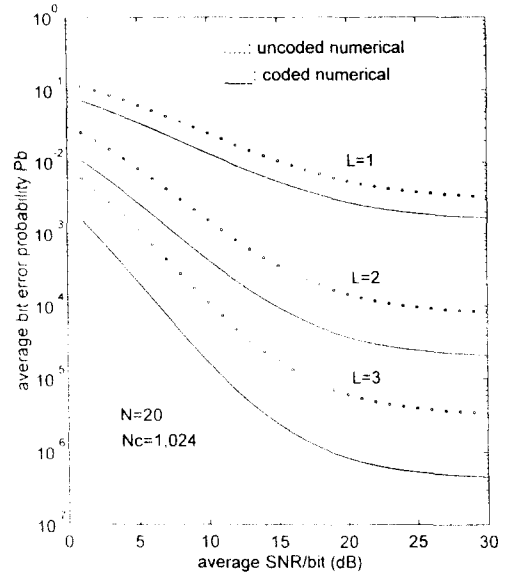


그림 2. 레이리 페이딩 채널에서 다이버시티 경로수 L 인 BPSK DS-CDMA 비트 오류 확률 $R_c = 1/3, d_{free} = 6, L = 1, 2, 3, N_c = 1,024, N = 20$
Fig. 2 Bit error probability of BPSK DS-CDMA with diversity order L over Rayleigh fading channel $R_c = 1/3, d_{free} = 6, L = 1, 2, 3, N_c = 1,024, N = 20$

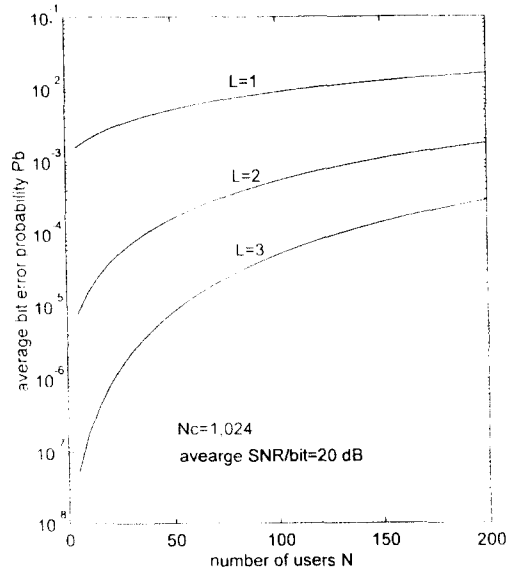


그림 3. 레이리 페이딩 채널에서 사용자 수에 따른 BPSK DS-CDMA 비트 오류 확률 $R_c = 1/3, d_{free} = 6, L = 1, 2, 3, N_c = 1,024, N = 20$
Fig. 3 Bit error probability of BPSK DS-CDMA versus number of users over Rayleigh fading channel $R_c = 1/3, d_{free} = 6, L = 1, 2, 3, N_c = 1,024, N = 20$

그림 1의 트렐리스도에서 비트 오류 성능을 구하여 보자. 여기서 $d_{free} = 6$, $R_c = 1/3$ 이다.

그림 2는 $N_c = 1,024$, $N = 20$ 일 때 E_b/N_o 에 따른 P_b 를 보여준다. 여기서 다이버시티 경로수가 클수록 비트 오류 성능이 향상됨을 볼 수 있다. 또한 uncoded 비트 오류 성능 보다 coded 비트 오류 성능이 우수함을 볼 수 있다.

그림 3은 사용자수 N 에 따른 P_b 를 보여주는데, N 이 증가 할수록 비트 오류 성능이 감소함을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문은 레일리 페이딩 채널에서 RAKE 다이버시티 경로수 L 인 BPSK DS-CDMA의 비트 오류 성능을 분석하였다. DS-CDMA의 평균 비트 오류 확률의 upper bound를 수식적으로 유도하고, 그 결과를 E_b/N_o 의 함수로 보여 주었다. d_{free} , 처리이득, 및 다이버시티 경로수가 클수록 비트 오류 성능이 우수하고, 사용자수가 많을수록 비트 오류 성능이 감소함을 보여 주었다. 또한, 위의 결과를 uncoded 비트 오류 확률과 비교 분석하였다. coded 비트 오류 성능이 uncoded의 경우보다 우수함도 보여 주었다.

참 고 문 헌

1. A. Jalali and P. Mermelstein, "Effects of diversity, power control, and bandwidth on the capacity of microcellular CDMA systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 952-961, June 1994.
2. M. Kavehrad and B. Ramamurthi, "Direct-sequence spread spectrum with DPSK modulation and diversity for indoor wireless communications," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-35, pp. 224-236, Feb. 1987.
3. M. Kavehrad and P. J. McLane, "Performance of low-complexity channel coding and diversity for spread spectrum in indoor wireless communication," *AT & T Technical Journal*, vol. 64, pp. 1927-1965, Oct. 1985.
4. H. S. Abdel-Ghaffar and S. Pasupathy, "Asymptotic performance of M-ray and binary signals over multipath/multichannel Rayleigh and Rician fading."

IEEE Trans. on Commun., vol.43, no. 11, pp. 2721-2731, Nov. 1995.

5. John G. Proakis, "*Digital Communications*," Third, McGraw-Hill, 1995.
6. Michael B. Pursley, "performance Evaluation for Phase-coded Spread-Spectrum Multiple-Access Communication-Part I : System Analysis," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-25 no. 8, pp. 795-799, Aug. 1977.



김 무 삼(Moo Sam Kim) 정회원
1957년 6월 25일생

1980년 2월 : 한양대학교 공과대학
전자공학과 졸업(공학사)

1982년 8월 : 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 졸업
(공학석사)

1993년 9월 ~ 현재 : 한국과학기술원 정보 및 통신공학과 박사과정

1995년 3월 ~ 현재 : 용인송담대학 정보통신과 전임강사