

이동위성 무선통신 채널에서 위상추정 에러가 있는 DS-CDMA 시스템의 성능 해석

Performance Analysis of DS-CDMA System of Phase Estimation Error for Mobile Satellite Wireless Communication Channel

강희조*

Heau-Jo Kang*

요 약

본 논문에서는 다중경로 고속페이딩 채널에서 DS-CDMA 시스템의 반송파 회복 신호가 불안전할 때 시스템의 에러성능을 개선한다. 이 경우에 반송파 위상 에러와 이동 무선 페이딩을 극복하기 위하여 위상추정, 다이버시티와 적응형 FEC((Forward Error Correction) 코드 기법을 사용한다. 결과에 의하면 다이버시티와 컨벌루션 부호를 사용하여 위상 에러에 의한 성능을 만족할 만큼의 성능을 개선함을 확인 할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we improve performance for system when the carrier recovery signal is not perfect in the multipath mobile wireless communication fast fading channel based on DS-CDMA system. In the case, we use the phase estimation, diversity and adaptive FEC code technique in order to overcome this carrier phase error and mobile wireless fading.

As a results in DS-CDMA system, we know that the appropriate use of diversity and adaptive FEC code technique reduced considerably performance degradation due to phase error.

Key words : mobile satellite, fast fading, Adaptive FEC, diversity, DS-CDMA

I. 서론

최근에 DS-CDMA 시스템은 간섭 및 다중경로 페이딩에 강하며, 다중접속이 가능하여 이동통신 시스템 및 여러 분야에서 응용되는 시스템이다. 이러한 시스템이 동기 복조 구조를 가지는 이동통신 시스템에서 사용된다고 가정하면, 반송파 동기 문제가 중요하게 된다. 동기 복조기에서 완벽한 반송파 동기가

이루어졌다고 가정할 때의 성능 해석은 많이 발표되어 있다. 그러나, 페이딩 채널 환경에서 수신된 신호는 진폭과 위상이 크게 변화하여 기준 반송파를 정확히 복원하기는 쉽지 않다 [1].

실제 수신기에서는 기준 반송파를 복원하기 위해서 PLL(Phase Lock Loop)이나 Costas Loop와 같은 복원회로가 필요하다. 그러나, 채널상의 페이딩과 국부 발진기의 불안으로 국부발진기에서 발생시킨 기준

* 목원대학교 컴퓨터공학부(Division of Computer Engineering, Mokwon University)

· 제1저자 (First Author) : 강희조

· 접수일자 : 2007년 3월 20일

신호와 수신된 신호와의 위상 에러에 의하여 시스템의 성능 열화가 발생하게 된다.

이러한 위상 오차에 의한 성능 열화는 변조 방식에 따라서 열화의 정도가 다르므로 채널 상황에 적절한 변조 방식을 선택할 수 있다. 이에 대한 연구로써, 라이시안 페이딩에서 BPSK 변조 방식을 사용했을 때의 위상 에러에 의한 성능 분석이 이미 발표되어 있다 [2]. 그러나, BPSK는 다른 변조 방식에 비해 성능은 다소 우수하지만, 전송율면에서 떨어진다. 따라서, 높은 전송율이 요구되는 곳에서는 BPSK 변조 방식은 다소 부적절하므로 QPSK 변조 방식을 고려해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 기준 반송파의 위상을 정확히 복원하지 않았을 때, 이러한 위상 에러와 라이시안 페이딩의 영향을 동시에 받는 DS-CDMA BPSK, QPSK 로 변조된 다중접속 통신 시스템의 오율 분석 및 두 변조방식의 위상에러에 대한 열화 정도를 분석한다. 그리고, 페이딩 및 반송파 위상 에러로 인한 성능 열화를 극복하기 위한 방안으로 MRC 다이버시티 기법과 컨볼루션 부호화 기법을 적용하여 오율 성능을 개선한다.

II. DS-CDMA 시스템 해석 모델

그림 1은 DS-CDMA 시스템의 송신부를 나타낸다.

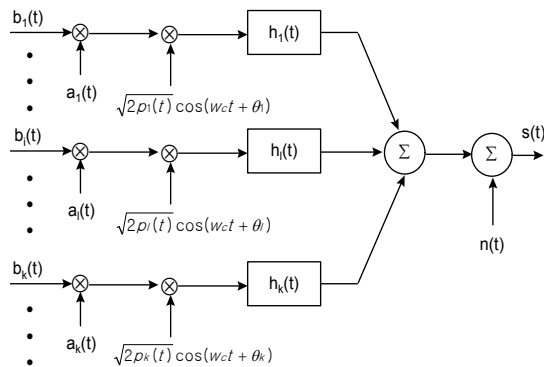


그림 1. DS-CDMA 시스템 블럭도
Fig 1. Block Diagram of DS-CDMA system

각각의 사용자는 DS 대역확산 변조된 BPSK 신호

를 사용하고 있다고 가정한다. 이진 데이터 신호 $b_k(t)$ 와 signature sequence 신호 $a_k(t)$ 는 다음과 같다.

$$b_k(t) = b^{(k)} p_T(t - T) \tag{1}$$

$$a_k(t) = a^{(k)} p_{T_c}(t - T_c) \tag{2}$$

여기서 $p_\tau(t)$ 는 $(0, \tau)$ 구간에서 단위구형펄스(unit rectangular pulse)이고 $b^{(k)}$ 는 k 번째 송신 신호의 심볼을 의미하고, $a^{(k)}$ 는 k 번째 사용자 코드열을 나타낸다. 이들 심볼 값은 $\{-1, 1\}$ 이다. 여기서 T 는 정보 비트 주기이고 T_c 는 chip 길이를 나타낸다 [3]. k 번째 사용자의 송신 신호 $s_k(t)$ 는 다음과 같다.

$$s_k(t) = R_e \{ u_k(t) e^{i2\pi f_c t} \} \tag{3}$$

여기서

$$u_k(t) = \sqrt{2P_k(t)} b_k(t) a_k(t) e^{j\theta^{(k)}} \tag{4}$$

여기서 $P_k(t)$ 는 k 번째 사용자 신호 전력, $f_c = m/T'$ 는 반송파 주파수(m 은 정수), $\theta^{(k)}$ 는 k 번째 사용자를 위한 반송파 위상을 나타낸다 [3].

송신 신호가 다중 경로를 갖는 채널을 경유하고, 라이시안 페이딩 채널이 비트율에 비하여 느린 페이딩을 가진다고 가정하면, 채널의 랜덤 파라미터는 2개의 연속적인 비트 구간 내에서 크게 변화하지 않는다.

다중 경로 채널의 복소 저역통과 등가 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h_k(t) = \sum_{l=1}^{L_p} \beta_l^{(k)} \delta(t - \tau_l^{(k)}) e^{j\gamma_l^{(k)}} \tag{5}$$

여기서, $\beta_l^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 l 번째 경로 이

득, $\tau_l^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 l 번째 경로지연, $\gamma_l^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 l 번째 경로 위상, L_p 는 다중경로의 수를 나타낸다 [3].

k 번째 사용자의 송신 신호는 반송파 위상차이 (phase offset)와 시간 지연 그리고 AWGN이 존재하는 채널을 통과하여 다음과 같은 수신된 신호가 얻어진다 [4].

$$\begin{aligned}
 r(t) &= \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{\infty} h_k(\mu) s_k(t-\mu) d\mu + n(t) \quad (6) \\
 &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_p} \sqrt{2P_k(t)} \beta_l^{(k)} b_k(t-\tau_l^{(k)}) \\
 &\quad \cdot a_k(t-\tau_l^{(k)}) \cdot \cos(\omega_c t + \phi_l^{(k)}) + n(t)
 \end{aligned}$$

여기서 $n(t)$ 는 AWGN 채널에서 단측대 전력 스펙트럼 밀도가 N_o 이고, 수신 신호의 다중경로에 의한 위상은 $\phi_l^{(k)} = \omega_c \tau_l^{(k)} + \gamma_l^{(k)} + \Phi_k$ 로 나타내며 $[0, 2\pi]$ 에서 일양하게 분포하는 독립 랜덤 변수라고 가정한다.

그림 2는 다중경로 페이딩 채널에서 DS-CDMA 다중접속 시스템에서의 수신기 모델을 나타낸다.

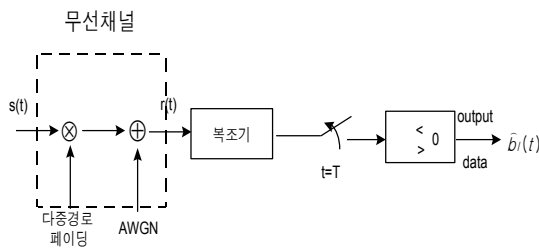


그림 2. 다중경로 채널 수신기 모델
Fig 2. Model of multipath channel receiver

III. 시스템의 오율특성 및 성능개선 기법

3-1. 반송파 복원이 정확하지 않은 환경

동기 복조기의 반송파 복원은 연속적인 전송과 버스트한 전송에 따라서 분류할 수 있다. 전송이 연속

적인 경우, 반송파 복원 신호의 포착 시간이 빠를 필요가 없다. 그러나 버스트한 경우에는 빠른 포착 시간이 요구된다. 후자의 접근은 복잡하므로 본 논문에서는 연속적인 전송인 경우라고 가정한다.

반송파 복원이 완벽하지 않을 때 AWGN 환경에서 BPSK 신호의 조건부 오율 식은 다음과 같다 [5].

$$P_{BPSK}(\gamma, \theta) = Q[\sqrt{2\gamma} \cdot \cos\theta] \quad (7)$$

여기서, γ 는 신호 대 잡음비이고, 함수 $Q(\cdot)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (8)$$

또한 반송파 복원이 완벽하지 않을 때 QPSK 신호의 조건부 오율 식은 다음과 같다 [5].

$$\begin{aligned}
 P_{QPSK}(\gamma, \theta) &= \frac{1}{2} \{ Q[\sqrt{2\gamma}(\cos\theta + \sin\theta)] \\
 &\quad + Q[\sqrt{2\gamma} \cdot (\cos\theta - \sin\theta)] \} \quad (9)
 \end{aligned}$$

그리고, 1차 PLL루프에서 유도된 위상 오차에 대한 확률밀도함수 $p(\theta)$ 는 다음과 같은 통계적 확률밀도함수로 나타낸다 [2], [6].

$$p(\theta) = \frac{\exp(\rho \cdot \cos\theta)}{2\pi \cdot I_0(\rho)} \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \quad (10)$$

식 (10)의 확률밀도함수를 Tikhonov의 확률밀도함수라고 하며, 여기서, $I_0(\cdot)$ 는 변형된 0차의 베셀 함수를 나타낸다. ρ 는 루프 필터의 loop 대역폭에서의 신호 대 잡음비로 다음과 같이 PLL 위상추적오차의 분산과 반비례 관계가 있다 [2].

$$\rho = \frac{A^2}{2N_0 B_L} = \frac{1}{\sigma_\theta^2} \quad (11)$$

여기서, $\frac{A^2}{2}$ 은 반송파 신호전력, N_0 는 단측대 잡음 주파수 밀도, B_L 은 페루프의 단측대 등가 잡음 대역폭, σ_θ^2 은 PLL의 VCO 출력 위상의 분산을 나타낸다. 잡음 환경에서 반송파 복원 잡음에 의한 오율 식은 다음과 같다.

$$P_{e(\text{phase})} = \int_{-\pi}^{\pi} P(\gamma, \theta) \cdot p(\theta) d\theta \quad (12)$$

3-2. 라이시안 페이딩과 반송파 복원 잡음이 동시에 존재하는 환경

본 절에서는 DS-CDMA BPSK/QPSK 시스템에서 라이시안 페이딩 채널과 반송파 위상 추측 에러의 영향에 대하여 알아본다. 라이시안 페이딩과 반송파 재생 잡음이 동시에 존재하는 환경에서의 오율 식은 다음과 같다.

$$P_{e(\text{phase*fade})} = \int_0^{\infty} P_{e(\text{phase})} \cdot p(\gamma | \Gamma) d\gamma \quad (13)$$

라이시안 페이딩 채널에서 수신된 신호의 평균 신호 대 잡음비, 라이시안 페이딩의 파라미터를 함수로 한 채널에서의 확률밀도함수는 다음과 같다 [7].

$$p(\gamma | \Gamma) = \frac{K_r + 1}{\Gamma} \cdot \exp\left(-K_r - \frac{(K_r + 1)\gamma}{\Gamma}\right) \cdot I_0\left[2\sqrt{\frac{\gamma(K_r + 1)K_r}{\Gamma}}\right] \quad (14)$$

여기서 Γ 는 평균 신호 대 잡음비, K_r 은 라이시안 페이딩 파라미터를 의미한다.

DS-CDMA 시스템에서 평균 신호 대 잡음비 (Γ)는 다음과 같다 [4].

$$\Gamma = \frac{1}{\frac{2(L_p \cdot U - 1)}{3PG} + \frac{N_o}{2E_b}} \quad (15)$$

여기서, L_p 는 채널 경로 수, U 는 다중접속 사용자 수, PG 는 처리이득, $\frac{E_b}{N_0}$ 는 순시 신호 대 잡음비를 나타낸다.

IV. 시스템의 성능개선 기법

4-1. 다이버시티의 적용

통신 시스템의 성능을 열화 시키는 주요한 원인 중의 하나인 페이딩에 대한 대책으로 송신 전력을 높이거나 다중경로에 강한 변조방식을 사용하는 등의 여러 가지 방식이 있지만 그 중에서 다이버시티 기법이 널리 쓰이고 있다. 다이버시티 기법은 송신전력을 증가시키지 않으면서도 페이딩의 영향을 효과적으로 경감시킬 수 있는 경제적인 방법으로 알려져 있다 [8].

다이버시티 기법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 최대 합성 다이버시티(MRC) 기법을 사용하며, 이 기법은 다이버시티 가지 입력의 위상을 모두 동상이 되도록 조정함과 더불어 각각의 포락선에 비례하여 가중치를 가하면 SNR이 큰 것일수록 크게 기여하도록 신호를 합성하는 방식이다.

결론적으로 라이시안 페이딩과 반송파 재생 잡음이 존재하는 채널에서 MRC 다이버시티가 적용되었을 경우의 오율 식은 다음과 같다.

$$P_{e(\text{MRC})} = \int_0^{\infty} P_{e(\text{BPSK})} \cdot p(\gamma | \Gamma, L, K_r) d\gamma \quad (16)$$

라이시안 페이딩 채널에서 MRC 다이버시티가 적용되었을 경우, 수신된 신호의 평균 신호 대 잡음비, 다이버시티의 가지 수, 라이시안 페이딩 파라미터를 함수로 한 채널에서의 확률밀도함수는 다음과 같다 [2], [7].

V. 계산결과 및 검토

$$\begin{aligned}
 p(\gamma | \Gamma, L, K_r) &= \frac{K_r + 1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{(K_r + 1)\gamma}{\Gamma}\right) \\
 &\cdot \exp(-K_r L) \left(\frac{(K_r + 1)\gamma}{K_r L \Gamma}\right)^{\frac{L-1}{2}} \\
 &\cdot I_{L-1}\left(2\sqrt{\frac{L K_r (K_r + 1)\gamma}{\Gamma}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

여기서 Γ 는 평균 신호 대 잡음비, L 은 다이버시티의 가지 수, K_r 은 라이시안 페이딩 파라미터를 의미한다.

4-2. 컨볼루션 부호의 적용

컨볼루션 부호는 우수한 에러 정정 능력을 가지고 있기 때문에 위성 통신, 이동통신에서 폭넓게 사용되고 있다.

컨볼루션 부호의 부호율 $R_c = 1/2$, 구속장 $K = 7$ 인 경우의 신호의 오류율은 다음과 같이 근사된다 [7].

$$P_{1/2cc} \leq \frac{1}{2}(36D^{10} + 211D^{12} + 1404D^{14} + \dots)
 \tag{18}$$

여기서 $D = 2\sqrt{p(1-p)}$ 이며 p 는 채널상의 오류율을 의미한다.

구속장 $K = 7$ 인 경우에 컨볼루션 부호의 부호율을 $R_c = 1/3$, $R_c = 1/4$ 로 변화시키면 컨볼루션 부호가 적용된 신호의 근사화된 오류율은 다음과 같다.

$$P_{1/3cc} \leq \frac{1}{2}(D^{14} + 20D^{16} + 53D^{18} + \dots)
 \tag{19}$$

$$P_{1/4cc} \leq \frac{1}{2}(36D^{20} + 211D^{24} + 1404D^{28} + \dots)
 \tag{20}$$

본 논문에서는 DS/CDMA BPSK, QPSK 시스템 성능 해석을 처리이득이 $PG=128$ 이고, 다중경로 수 $L_p = 2$, 다중접속 사용자수 $U=5$, MRC 다이버시티 가지 수 $L=2$, 라이시안 페이딩 심도 $K_r = 6$ [dB]로 고정시킨 상황에서 반송파 위상 추정 에러에 따른 영향을 분석하였다.

그림 3는 라이시안 페이딩 환경에서 위상에러가 없을 때와 위상 에러가 존재할 때 위상 추정 에러의 정도를 분산 값으로 표시하였을 때, BPSK와 QPSK의 오류 성능을 보여준다. 위상 에러가 없는 BPSK와 위상 추정 에러의 영향이 0.01 [rad²]인 BPSK를 비교하면 곡선이 평탄한 지점에서 약 10배정도 차가 있다. 그리고, BPSK의 경우는 QPSK에 비하여 위상에러에 대한 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 그러나, 이러한 오류 성능을 가지고는 만족할만한 QoS를 제공하지 못하므로 보상기법을 사용하여야 만족할만한 서비스 품질을 유지할 수 있다.

이러한 위상 추정 에러에 대한 성능을 보상하기 위해서, 그림 4에서는 가지 수 $L=2$ 인 MRC 다이버시티를 사용하였다. BPSK의 경우는 위상 에러 정도에 거의 영향을 받지 않으면서 성능이 개선됨을 그래프로부터 알 수 있다. 그러나 QPSK의 경우는 위상 추정 에러가 작을 때는 뚜렷한 성능 개선이 보였지만, 위상 추정 에러가 커질수록 개선의 폭이 작아졌다.

그림 5에서는 부호율이 1/2, 구속장이 7인 컨볼루션 부호를 사용하였을 때 성능 개선 정도를 나타낸다. 여기에서도 마찬가지로 QPSK에서는 위상 추정 에러가 커질수록 성능 개선이 급격히 적어졌다.

그림 6은 위상 추정 에러가 0.1 [rad²]인 경우에 컨볼루션 부호의 부호율에 따른 오류 성능을 보여준다. BER=10⁻⁵을 기준으로 할 때, BPSK는 6.5~9.5 [dB]에서 달성할 수 있었으며, QPSK의 경우는 $R_c=1/4$, $1/3$ 인 경우는 각각 8.5 [dB], 9.5[dB]이고, $1/2$ 인 경우는 위의 BER을 달성할 수 없다. 그러므로 QPSK의 경우 컨볼루션 부호를 사용할 때 BER=10⁻⁵을 달성하기 위해 구속장이 7이라면, 부호율이 1/3 이하인 부호를 사용해야 한다.

그림 7은 다이버시티와 컨볼루션 부호를 동시에

사용한 경우이다. 이때 반송파 위상 추정에러가 0.1 [rad²]인 경우, 그림 7에서 Rc=1/4인 경우와 비교했을 때, BPSK의 경우에 BER=10⁻⁵ 을 기준으로 했을 때, 다이버시티로 대략 4.5 [dB] 정도의 개선을 얻을 수 있다.

VI. 결론

본 논문의 분석 결과, 라이시안 페이딩과 기준 반송파 위상 추정 에러의 정도에 따라, 다이버시티와 컨볼루션 부호를 동시에 적용했을 때 상당한 개선 효과를 볼 수 있었으며, BPSK보다 오율 성능 면에서는 뒤떨어지지만 데이터의 전송 용량이 2배 많은 QPSK를 사용하기 위해서는 위에서 보여준 다이버시티 기법과 컨볼루션 부호 기법을 적절히 조화시켜 사용하면 만족할만한 서비스 품질을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] I. Wakaki, T. Ishiguro, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "DS/SS/GMSK with differential detection over multipath Rayleigh fading channels", *IEEE ISSSTA '96*, pp. 309-403, 1996.

[2] 노재성, 이찬주, 조성준, "라이시안 페이딩 채널에서 위상 에러가 DS/CDMA-BPSK 신호의 오율 성능에 미치는 영향," *한국통신학회 논문집*, 1996년 11월.

[3] S. G. Glisic, *Advanced Wireless Communications 4G Technologies*, Wiley, 2004.

[4] K. B. Letaief and M. Hamdi, "Efficient simulation of CDMA system in wireless mobile communications," *IEEE GLOBECO- M-95*, pp. 1799 - 1803, 1995.

[5] V. K. Bhargava, D. Haccoun, R. Matyas, and P. P. Nuspl, *Digital Communications by Satellite*, Krieger Publishing Company, Florida, 1991.

[6] P. Y. Kam, S. K. Teo, Y. K. Some, and T. T. Tjhung, "Approximate results for the bit error probability

of binary phase shift keying with noisy phase reference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-41, pp. 1020- 1022, July 1993.

[7] H. H. Ma and M. A. Poole, "Error correcting code against the worst-case partial-band jammer," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-32, pp.124-133, Feb. 1984.

[8] T. T. Ha, *Digital Satellite Communications*, Macmillan, 1986

강 희 조 (姜熙照)



1994년 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 (공학박사)
 1996년~1997년 일본 오사카대학교 공학부 통신공학과 객원교수
 1990년~2003년 2월 동신대학교 전자정보통신공학부 교수
 2003년~현 재 : 목원대학교 컴퓨터

공학부 교수

관심분야 : 멀티미디어통신, 유비쿼터스, 무선이동통신, 가시광통신, 모바일 컴퓨터, 환경전자공학, RFID, 인지적무선통신, 기술정책

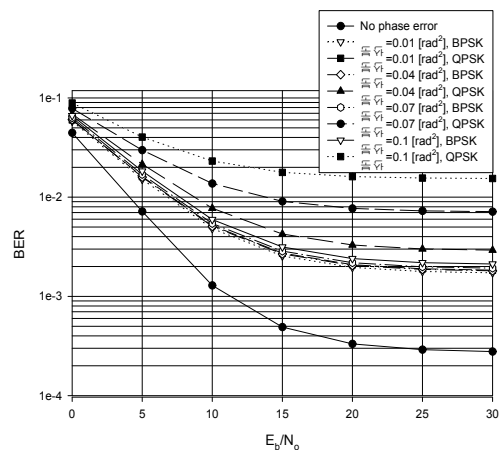


그림 3. 고속페이딩 채널에서 위상에러의 분산값과 변조방식에 따른 DS-CDMA 시스템의 성능
 Fig. 3. Performance of DS-CDMA system with the variation number of phase error and modulation method in fast fading channel

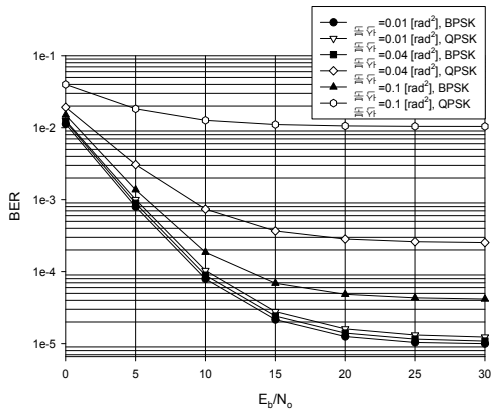


그림 4. 고속페이딩 채널에서 다이버시티기법을 적용한 DS-CDMA 시스템의 오율 특성(L=2)

Fig. 4. Performance of DS-CDMA system with diversity techniques in fast fading channel (L=2)

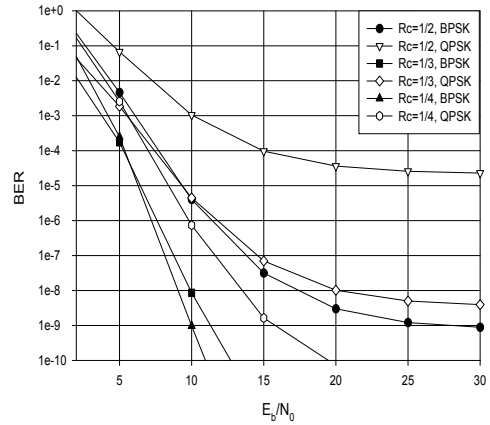


그림 6. 고속페이딩 채널에서 컨볼루션 부호의 적용시 부호율의 변화에 따른 DS-CDMA 시스템의 성능
Fig. 6. Performance of DS-CDMA system adopting convolutional coding techniques with variation of code rate in fast fading channel

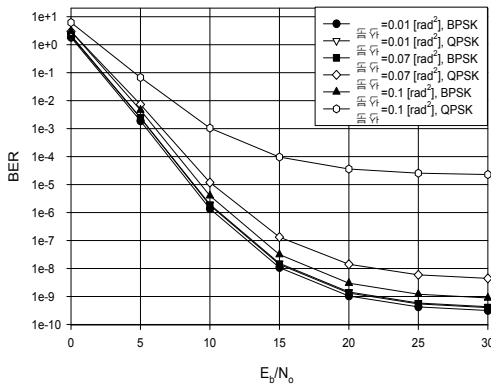


그림 5. 고속페이딩 채널에서 컨볼루션 부호화기법을 채용한 DS-CDMA 시스템의 성능

Fig. 5. Performance of DS-CDMA system adopting convolutional coding techniques in fast fading channel

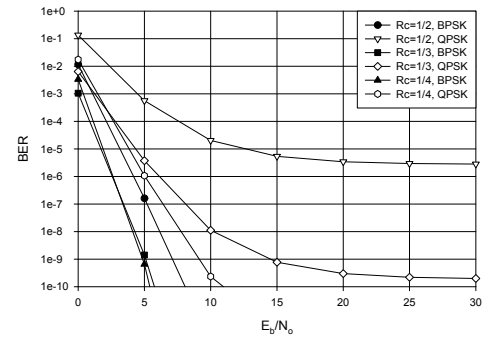


그림 7. 고속페이딩 채널에서 다이버시티와 부호화 기법을 함께 사용했을 때 부호율에 따른 DS-CDMA 시스템의 성능

Fig. 7. Performance of DS-CDMA system adopting diversity and coding techniques with variation of code rate in fast fading channel