
주파수 비선택적 레일리 페이딩 채널에서의 타이밍 복구회로를 고려한 PSA-TC-8PSK의 성능 분석

이병로*

Performance Analysis of Pilot Symbol Assisted Trellis-Coded 8PSK with Timing Recovery Circuits on the Frequency-Nonselective Rayleigh Fading Channel

Byung-ro Lee*

요 약

이동통신에서 다중경로에 의한 페이딩 현상은 시스템의 성능에 영향을 주는 큰 원인 중의 하나이다. 이런 페이딩 채널에서의 성능저하를 개선하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 채널 페이딩을 추정하여 보상하는 방식에서는 파일럿 심벌을 이용하는 PSAM(pilot symbol assisted modulation) 방식이 널리 이용되고 있으며 TCM(trellis-coded modulation)은 전송 대역폭의 증가 없이 현저한 부호화 이득을 얻을 수 있는 부호화와 변조 과정이 결합된 전송 기술이다. 본 논문에서는 주파수 비선택적 레일리 페이딩 채널에서 PSAM과 TCM을 사용하는 PSA-TC-8PSK의 성능을 분석하였다. 페이딩의 추정을 위한 보간 방법에는 오차의 분산을 최소화하는 Wiener 필터를 사용하였으며 필터의 탭수, 파일럿 심벌 주기, 도플러 주파수가 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 완전 디지털 방식의 구현이 가능한 심벌 타이밍 복구 회로를 구성하여 심벌 타이밍 에러가 전체 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

ABSTRACT

In land mobile communications, multipath fading is one of the key factors which affect the system performance. Some extensive studies have been carried out to improve the degraded performance under this fading channels. The PSAM channel compensation method using channel fading estimation is widely used and TCM is a combined coding and modulation technique that has been shown to provide significant coding gain without increasing the transmission bandwidth. In this paper, we analyze the performance of PSA-TC-8PSK which combines PSAM and TCM over frequency nonselective fading channels. To estimate channel fading, Wiener filter which minimizes error variance is used as compensation method and we analyze the affects on the system performance of the number of filter taps, period of the pilot symbol frame, and the Doppler frequency. In addition, we consider the symbol timing recovery circuit which can be implemented in the full-digital method and analyze the effects of symbol timing error on the system performance.

* 진주산업대학교

접수일자 2001.2.28

키워드

PSAM, TCM, Wiener filter, timing recovery circuit

1. 서론

이동통신 시스템에서 다중경로에 의한 페이딩 현상은 시스템의 성능을 저하시키는 가장 큰 원인중의 하나이다. 본 논문에서는 심벌간 간섭의 영향이 크지 않은 주파수 비선택적, 느린속도의 레일리 페이딩 채널에서의 데이터 전송을 고려한다. 이러한 채널은 가시경로가 형성되기 어려운 도심에서의 협대역 데이터 전송의 경우에 해당한다. 이러한 협대역 이동통신 채널에서의 성능개선을 위하여 여러 방면의 연구가 진행되고 있으며 채널 페이딩을 추정하여 보상하는 방식에서는 파일럿 심벌을 이용하는 PSAM 방식이 평균대최대치 전력비, 주파수이용효율, 신호처리의 복잡도 등의 관점에서 보다 유리한 것으로 알려져 있다[1]. 파일럿 심벌을 보간하여 페이딩을 추정하는 방법에는 선형 보간법, 2차 보간법, 저역통과필터 보간법, 최적 Wiener 필터 보간법 등이 있으며 성능과 구현의 복잡도 면에서 장단점을 보이고 있다[2],[3].

채널 부호화 방식으로 이용되고 있는 TCM은 대역 제한된 채널에서 효율적인 디지털 전송을 위하여 부호화와 변조가 결합된 방식으로서 1982년 발표된 이래 지속적인 발전을 해 왔다[4]. 이 부호화된 변조 방식의 가장 큰 장점은 대역폭 효율의 손실 없이 부호화 이득(coding gain)을 달성할 수 있다는 것이다.

파일럿 심벌에 의한 페이딩 추정 및 TCM 복호화에 앞서 수신단에서는 심벌의 검출을 위하여 심벌 타이밍을 정확히 추정해 내는 심벌 타이밍 복구(symbol timing recovery) 회로가 요구된다. 기존의 모델에서는 아날로그 PLL(phase locked loop) 방식 또는 아날로그/디지털 혼성 PLL 방식이 심벌 타이밍 복구 회로에 주로 이용되어 왔다. 최근에는 심벌 전송 속도가 높지 않는 모델의 경우 보간기(interpolator), 타이밍 에

러 검출기(timing error detector), 루프 필터로 구성되어 완전 디지털 회로로 구현이 가능한 방식이 발표되고 있다[5],[6].

본 논문에서는 파일럿 심벌을 이용하여 다중경로 페이딩을 추정하기 위하여 오차의 분산을 최소화하는 Wiener 필터를 사용하는 trellis-coded 8PSK (TC-8PSK) 부호화 변조 방식의 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 분석하였다. 또한 4개의 샘플을 이용하는 보간기, Gardner 검출기 [7], 1차 루프 필터로 심벌 타이밍 복구 회로를 구성하여 심벌 타이밍 에러가 전체 성능에 미치는 영향을 분석해 보았다.

논문의 구성으로 제2절에서는 전체적인 시스템에 대한 모델을 설명하였다. 제3절에서는 파일럿 심벌의 추정에 오차의 분산을 최소화하는 최적 Wiener 필터를 사용하여 필터의 탭수, 파일럿 심벌주기, 도플러 주파수 등이 8PSK의 성능에 미치는 영향을 조사하였으며 전체적인 PSA-TC-8PSK (pilot symbol assisted trellis-coded 8PSK)의 성능을 분석하였다. 제4절에서는 심벌 타이밍 에러가 전체 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 마지막으로 결론에서는 연구 결과를 정리하였다.

II. 시스템 모델

논문에서 고려된 전체적인 시스템 모델을 그림 1에 나타내었다. 먼저 정보 비트는 그림 2와 같이 부호율 2/3인 길쌈부호기(convolutional encoder)에 의해 3비트로 부호화 되어 8PSK 심벌 중 하나에 할당된다. 그 다음 페이딩 채널에서 발생하는 연립 에러(burst error)를 방지하기 위해 블록 인터리버를 거친다. 인터리버 출력은 그림 3에서 처럼 페이딩 추정을 위한 파일럿 심벌과 FL-1 대 1로 섞여진다. FL은 파일럿 심

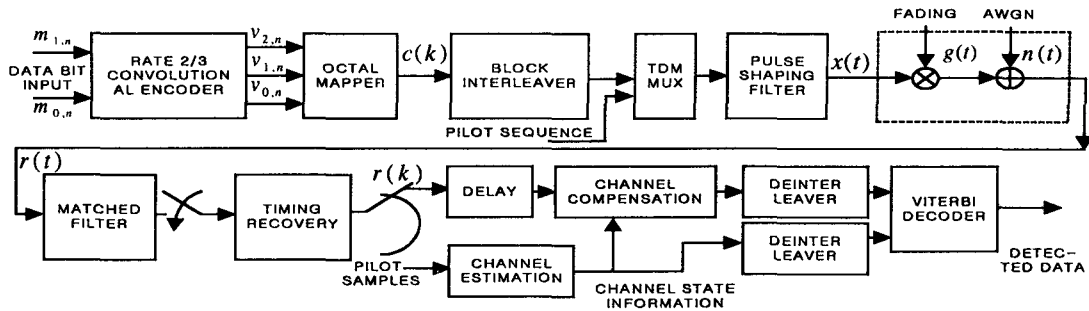


그림 1. PSA-TC-8PSK 시스템의 구성도
Fig. 1. A block diagram of the PSA-TC-8PSK system

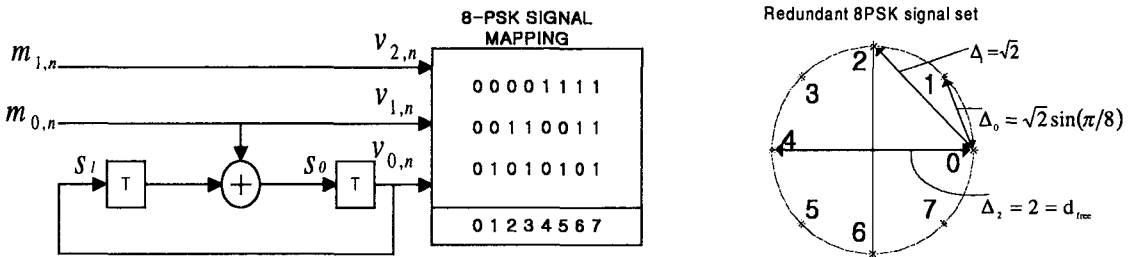


그림 2. Trellis-coded 8PSK 부호기
Fig. 2. Trellis-coded 8PSK encoder

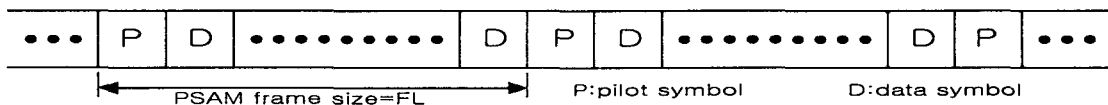


그림 3. PSAM 프레임
Fig. 3. Frame of PSAM

별 주기를 나타내는 것으로 FL-1개의 데이터 심벌 전송 후 1개의 파일럿 심벌이 전송되게 된다. 이 심벌들은 펄스 성형 필터(pulse shaping filter)를 통하여 채널로 전송되게 된다. 채널은 다중경로에 의한 주파수 비선택적 레일리 페이딩 채널 환경을 고려하였다.

수신단에서는 모든 수신 신호를 저주파 등가 신호(baseband equivalent signal)로 변환하여 분석하였다. 모의실험에 사용된 송신단의 펄스 성형 필터와 수신단의 정합필터는 rolloff factor가 0.5인 squared root raised cosine 필터이다. 심벌 타이밍 복구 회로를 통

과한 후 파일럿 심벌은 데이터 심벌로부터 분리된 후 채널 추정 알고리즘에 의하여 처리된다. 채널 추정 알고리즘에서는 먼저 수신된 파일럿 심벌과 이미 알고 있는 파일럿 심벌을 비교함으로써 채널에 대한 정보, 즉 이득과 위상변화를 추정한다. 알고리즘의 출력 즉 채널에 대한 정보는 데이터 심벌의 페이딩 보상 및 비터비 디코더(Viterbi decoder)의 가중치 함수로 적용된다. 페이딩 보상을 위한 Wiener 필터는 채널 페이딩속도가 가장 클 때에 대응되는 대역폭을 가져야 한다. 수신된 데이터 샘플들은 채널 페이딩 추정치를 이용하여

채널보상이 이루어진다. 보상된 데이터 심벌들은 디인 터리버를 거친 후 가중치를 고려한 비터비 디코딩 알고리즘(modified Viterbi algorithm)을 통하여 복호화 된다. 비터비 디코딩 알고리즘에서는 식 (1)의 값을 최소화하는 부호 심벌 $\{c_1, \dots, c_m\}$ 을 결정한다[9].

$$J = \sum_{n=1}^m |\alpha_n|^2 [\zeta_n - c_n]^2 \dots\dots\dots (1)$$

위 식에서 ζ_n 은 보상후의 n번째 부호 샘플이고, α_n 은 n번째 채널 페이딩 추정치이다.

III. PSA-8PSK의 성능 [3]

8PSK의 심벌을 $c(k)$, 단위 에너지를 가지는 펄스 성형 필터를 $p(t)$ 로 표시하면 전송 파형 $x(t)$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k)p(t-kT) \\ c(k) &= e^{(jk\pi/4)}, \quad k=0, 1, \dots, 7 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

위 식에서 T 는 심벌주기를 나타낸다. 주파수 비선택적 페이딩 채널을 통과한 PSA-8PSK 페이딩 신호 $r(t)$ 는 다음 식과 같다.

$$r(t) = g(t)x(t) + n(t) \dots\dots\dots (3)$$

$n(t)$ 는 실수부 및 허수부의 전력밀도함수 (power spectral density)가 $N_0/2$ 인 복소 백색 가우시언 잡음 (white Gaussian noise)이다. 여기서 페이딩 이득 $g(t)$ 는 분산이 1이고 도플러 주파수 f_d 를 갖는 복소 가우시언 프로세스이다. 다중경로 페이딩 현상에 등방향성 산란 (isotropic scattering) 모델을 적용하는 경우 $g(t)$ 의 자기상관함수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_g(\tau) = J_0(2\pi f_d \tau) \dots\dots\dots (4)$$

파일렛 심벌을 $P=1+j0$ 로 설정한 경우 데이터 심벌의 평균 비트 에너지는 식 (5)와 같다.

$$E_b = \frac{FL}{3(FL-1)} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 FL 은 파일렛 심벌의 주기이다. 수신단에서

정합필터를 사용한 후 심벌 주기 T 로 샘플된 정합 필터의 출력 $r(k)$ 는 다음 식 (6)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} r(k) &= g(kT)c(k) + n(k) \dots\dots\dots (6) \\ &= u(k)c(k) + n(k) \end{aligned}$$

여기서 $u(k)$ 는 페이딩 이득을 심벌 주기 T 로 샘플링한 값이며 $n(k)$ 는 실수부 및 허수부의 분산이 $N_0/2$ 인 복소 가우시언 확률변수이다.

$c(0)$ 를 파일렛 심벌이라고 가정할 때 구간 $-\lfloor FL/2 \rfloor \leq k \leq \lfloor (FL-1)/2 \rfloor$ 에서 $c(k)$ 의 검출을 위해 K 개의 인접한 파일렛 심벌을 이용하여 식 (6)에 있는 심벌 이득 $u(k)$ 의 추정치를 구해야 한다.

$$v(k) = \sum_{i=-\lfloor K/2 \rfloor}^{\lfloor K/2 \rfloor} h^*(i, k)r(iFL) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 필터 계수 $h(i, k)$ 는 프레임내의 위치에 따라 변화하는 값을 가진다. 이러한 보간 필터에는 간단한 저역통과 필터 등이 사용될 수 있으며 여기서는 예측 오차의 분산을 최소화하는 Wiener 필터의 계수를 구하는 방법을 간단히 기술한다.

$-\lfloor K/2 \rfloor \leq i \leq \lfloor K/2 \rfloor$ 에서, 파일렛 샘플들 $r(iFL)$ 의 집합을 크기 K 인 열 벡터 \vec{r} 과 프레임내의 k 번째 위치에서 대응되는 페이딩 추정치를 구하기 위한 필터 계수의 집합을 열 벡터 $\vec{h}(k)$ 로 나타내면 추정된 심벌 이득 $v(k)$ 는 식 (8)과 같다.

$$v(k) = \vec{h}^*(k) \vec{r} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\vec{h}^*(k)$ 는 $\vec{h}(k)$ 의 conjugate transpose 이다. $K \times K$ 파일렛 샘플의 자기상관 행렬 R 과 공분산 벡터 $\vec{w}(k)$ 를 식 (9)와 같이 정의하면

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{2} E[\vec{r} \vec{r}^*] \\ \vec{w}(k) &= \frac{1}{2} E[u^*(k) \vec{r}] \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

Wiener 필터의 계수 $\vec{h}(k)$ 는 식 (10)으로부터 구할 수 있다.

$$\vec{R}h(k) = \vec{w}(k) \dots\dots\dots (10)$$

식 (6)과 식 (9)로부터 자기상관 행렬 R 과 공분산 벡터 $\vec{w}(k)$ 는 다음과 같이 주어진다

$$\begin{aligned} R_{ik} &= R_g((i-k)FL \cdot T) + N_0 \delta_{ik} \\ \vec{w}_i(k) &= R_g((i \cdot FL - k)T) \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

여기서 δ_{ik} 는 Kronecker delta이다.

본 논문에서는 Wiener 필터의 계수를 구하여 파일럿 심벌 주기 FL 이 PSA-8PSK의 성능에 미

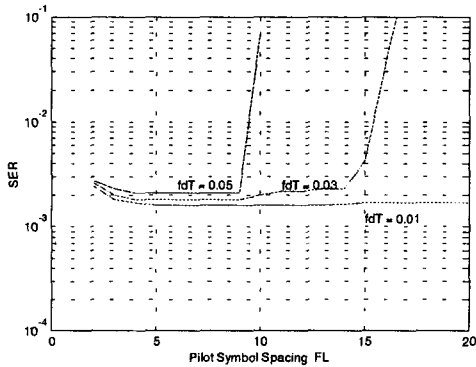


그림 4. 8PSK에서 파일럿 심벌주기 영향
Fig. 4. Effect of frame size (FL) on 8PSK

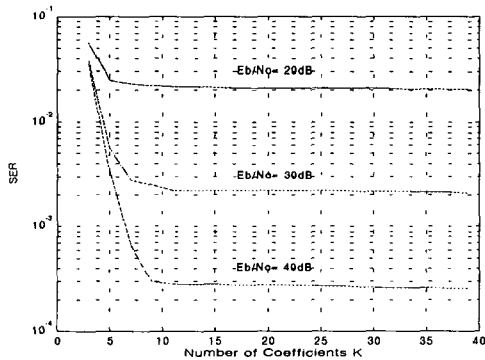


그림 5. 8PSK에서 Wiener 필터 탭수 (K)의 영향 ($FL=7, fdT=0.05$)
Fig. 5. Effect of the number of Wiener filter taps on 8PSK

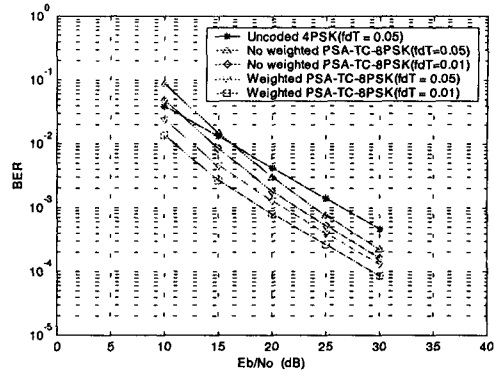


그림 6. PSA-TC-8PSK의 성능 ($FL=7, K=15$, INTERLEAVER : 40×30 심벌)
Fig. 6. Performance of PSA-TC-8PSK

치는 영향을 $E_b/N_0 = 30$ dB, 필터 탭수 $K=15$ 일 때를 분석하여 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 도플러 주파수 f_d 가 커질수록 정확한 페이딩 추정을 위해서는 파일럿 심벌주기 FL 이 감소해야함을 알 수 있다. Wiener 필터의 탭수 K 가 성능에 미치는 영향을 $FL=7$ 일 때를 고려하여 그림 5에 나타내었다. 여기서 신호 대 잡음비에 따라 필터 탭수 K 는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 가중치를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 버터비 디코딩 알고리즘을 사용한 각각의 PSA-TC-8PSK의 성능과 도플러 주파수 f_d 가 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 $fdT=0.01, fdT=0.05$ 일 때의 성능과 부호화되지 않은 PSA-4PSK의 성능을 그림 6에 나타내었다. 여기서 $BER = 10^{-3}$, $fdT=0.05$ 에서 가중치를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 PSA-TC-8PSK의 성능차이는 약 2.8 dB이며, PSA-TC-8PSK는 PSA-4PSK와 비교하여 $BER = 10^{-3}$, $fdT=0.05$ 에서 약 6.2 dB의 부호화 이득을 얻을 수 있으며 신호 대 잡음비가 증가할수록 부호화 되지 않은 PSA-4PSK에 대하여 더 큰 부호화 이득을 달성 할 수 있다.

IV. 심벌 타이밍 에러의 영향

심벌 타이밍 복구 회로는 크게 세 부분으로 그림 7과 같이 구성되어 있다. 먼저 T_s 주기로 샘플된 신호

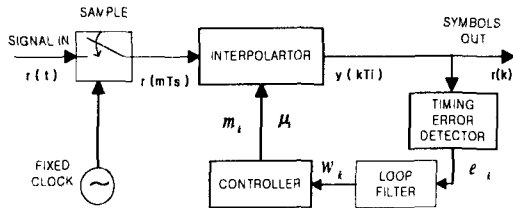


그림 7. 심벌 타이밍 복구회로 구성도
Fig. 7. A block diagram of symbol timing recovery circuits

를 보간 하는 보간기, 보간된 샘플 값으로부터 심벌 타이밍 에러를 검출하는 에러 검출기, 보간기에서 다음 샘플 값을 구하기 위하여 에러를 고려한 타이밍 정보를 제공하는 루프 필터와 제어기로 구성되어 있다. 본 논문에서는 4개의 샘플값을 이용하는 3차 보간기를 사용하였고 타이밍 에러 검출기에는 반송파의 위상 변화에 영향을 받지 않는 가드너 검출기(Gadner detector)를 사용하였다[7]. 송수신단에서의 심벌의 전송속도에 대한 오차가 크지 않을 경우(예를 들어, 0.01% 이하) 루프 필터는 1차로 구현가능 하며 이 경우 성능 저하

는 크게 발생하지 않는다. 그림 7에서 w_k 는 다음 보간값을 구하기 위한 타이밍 정보로 타이밍 에러 e_{k-1} 로부터 식 (12)와 같이 나타나는 1차 루프 필터에 의해 계산된다.

$$w_k = T + \gamma \cdot e_{k-1} \dots\dots\dots (12)$$

여기서 γ 는 1차 루프 필터의 계수이다. 타이밍 에러 검출기 s-curve 특성의 원점에서의 기울기를 A 로, 루프의 잡음 등가 대역폭을 B_L 로 표시하면 γ 는 식 (13)과 같이 주어진다 [8]

$$\gamma = \frac{4B_L T}{A(1+2B_L T)} \dots\dots\dots (13)$$

이와 같은 심벌 타이밍 복구 회로를 이용한 PSA-TC-8PSK의 비트에러율 성능을 도플러 주파수 $f_d T = 0.001, 0.05$ 인 경우 그림 8에 나타내었다. 루프의 정규화된 대역폭 $B_L T = 0.005$ 로 설정하였으며 이상적인 심벌 타이밍이 주어진다고 가정한 경우와 비교하여 거의 성능의 저하가 발생하지 않음을 알 수 있어 심벌 타이밍 복구 회로가 정상적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

V. 결론

주파수 비선택적 페이딩 채널에서 PSAM의 페이딩 추정 성능의 한계치를 구하기 위하여 8PSK 변조 방식에 대하여 오차의 분산을 최소화하는 Wiener 필터를 설계하여 정상적인 페이딩 추정이 가능한 필터의 탭수와 파일럿 심벌 주기의 범위를 분석하였다. 페이딩 채널에서 PSAM과 TCM을 사용하는 PSA-TC-8PSK의 비트에러율을 분석하였으며 부호화 되지 않은 PSA-4PSK와 비교하여 $BER = 10^{-3}, f_d T = 0.05$ 의 조건에서 약 6.2 dB의 부호화 이득을 가짐을 알 수 있었다. 수신단에서는 완전 디지털 방식으로 구현이 가능한 심벌 타이밍 복구 회로를 구성하였으며 루프의 정규화된 대역폭 $B_L T = 0.005$ 로 설정하였을 경우 이상적인 심벌 타이밍이 주어진다고 가정한 경우와 비교하여 비트에러율에서 거의 성능저하가 발생하지 않음

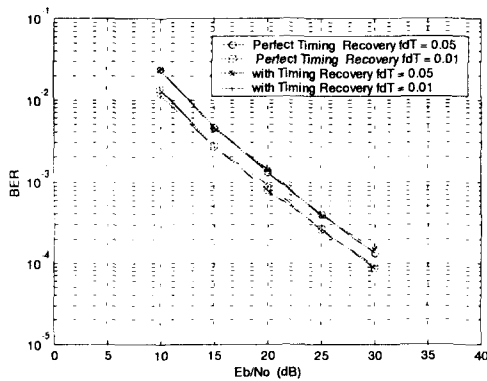


그림 8. 타이밍 복구회로를 고려한 PSA-TC-8PSK의 성능 ($B_L T = 0.005, FL = 7, K = 15,$ INTERLEAVER : 40×30 심벌)
Fig. 8. Performance of PSA-TC-8PSK with timing recovery circuits

을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] J.K. Cavers and M. Liao, "A comparison of pilot tone and pilot symbol techniques for digital mobile communication," Proc. of Globecom'92, pp. 915 - 921., 1992.
- [2] J.M. Torrance and L. Hanzo, "Comparative study of pilot symbol assisted modem schemes," Proc. Radio Receiver and Associated Systems Conference, Bath, UK, pp. 26 - 28, Sept. 1995.
- [3] J.K. Cavers, "An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels," IEEE Trans. Vehi. Tech., vol. VT-40, pp. 686 - 693, Nov. 1991.
- [4] G. Ungerboeck, "Trellis-coded modulation with redundant signal sets, part1: introduction," IEEE Commun. Mag., vol. 25, pp. 5-11, Feb. 1987.
- [5] F. M. Gardner, "Interpolation in digital modems - part 1: fundamentals," IEEE Trans. Commun., vol 41, pp. 501-507, Mar. 1993.
- [6] F. M. Gardner, "Interpolation in digital modems -part II: implementation and performance," IEEE Trans. Commun., vol 41, pp. 998-1008, Jun. 1993.
- [7] F. M. Gardner, "A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers", IEEE Trans. Commun., vol. COM-34, pp. 423-429, May 1986.
- [8] U. Mengali and A. N. D'Andrea, Synchronization Techniques for Digital Receivers, Plenum Press: New York, 1997.
- [9] M. L. Moher and J. H. Lodge, "TCMP-A modulation and coding strategy for Rician fading channels", IEEE Select. Areas Commun., vol. 7, pp. 1347-1355, Dec. 1989.



이 병 로(Byung-Ro Lee)

1989년 2월 아주대학교 전자공학과
(공학사)

1988년~1992년 LG 전자

1995년 2월 동아대학교 전자공학과
(공학석사)

1998년2월 경상대학교 전자학과(공학박사)

2000년 3월~현재 진주산업대학교 전자공학과 전임
강사

※관심분야 : 멀티미디어 이동통신, 적응변조, 멀티캐
리어시스템