

디지털 이동통신 시스템에서 데이터 타이밍 오차와 수신 대역 필터에 의한 성능 열화

正會員 金 南 秀*

Performance Degradation for a Data timing error and a Receiver filtering effect on Digital mobile system

Nam Soo Kim* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 이동통신 시스템을 분석할때 이론적 해석을 간단히 하기위하여 이상적이라고 가정하였던 수신대역 통과 필터의 진폭 및 위상 특성에 의한 신호의 왜곡과 데이터 샘플링 타이밍오차에 의한 성능 저하를 분석하였다. 잘 알려진 심볼간 간섭이론을 이용하면 시스템 오류의 상한(Upper bound)만을 알 수 있다. 따라서, 평균 오류를 계산하기위하여 평균 심볼간 간섭량을 계산하고 이로부터 평균 오류를 계산하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 평균 오류를 계산할 수 있을뿐만 아니라 측정된 간섭량을 대입하여도 오류를 알 수 있으므로 실험실에서 쉽게 이용이 가능하다.

Abstract

In this paper, the performance degradation caused by the band pass filter and the data sampling timing error which are generally considered ideal for the simplicity was analyzed. The well known intersymbol interference theory can be applicable to calculate only the upper bound of a system performance. Therefore to obtain the average error probability, a method average intersymbol interference was proposed. This method can be applicable to obtain average error probability with a computer simulation and with a measured value in test lab, easily.

I. 서 론

급격한 수요증가와 더불어 도입된 디지털 이동통신 방식은 각 방식마다 장단점을 갖고 있으며, 이미 일부 국가에서는 새로운 디지털 이동통신의 시범 서비스를 실시하고 있는 상황이다.

*韓國電子通信研究所
Electronics And Telecommunications Research Institute
論文番號 : 93-161

디지털 통신 방식의 도입과 더불어 적용되는 변조 방식으로는 PSK(Phase Shift Keying) 계열인 $\pi/4$ DQPSK(Differential Quadrature PSK)와 FSK(Frequency Shift Keying) 계열인 GMSK(Gaussian Filtered Minimum Shift Keying) 방식이 대표적이다. 미국 및 일본에서는 스펙트럼 효율에 중점을 두어서 $\pi/4$ DQPSK 방식을 채택하였으며[1], 유럽에서는 유럽 전역의 단일 통화권을 목적으로 전력 효율이 높은 GMSK 방식을 채택하고 있다[2].

각각의 디지털 변조방식의 채택과 더불어 많은 이론적 분석과 실험 결과가 발표되고 있는데 대부분의 해석에서는 이론적 해석을 간단히 하기 위하여 데이터 샘플링 타임이 완벽하고, 수신 대역 통과 필터의 진폭 및 위상특성에 의한 신호의 왜곡을 무시하였다[3,4]. 그러나 실제 시스템을 구현할 때에는 이론을 유도할때 무시한 수신 대역 필터에 대한 영향이 존재하기 때문에 수신 대역 필터의 형태 및 차수에 따른 영향과, 그리고 데이터 샘플링 회로의 불완전성에 의한 심플링 오차가 존재할때의 때의 성능 변화가 얼마나 큰가 하는 것이 항상 의문이었다.

한편 이상적이지 않은 전송로에서의 성능의 변화는 눈모양(Eye pattern)을 측정함으로써 심볼간 간섭을 알 수가 있었는데, 눈모양에서 측정된 심볼간 간섭량은 시스템의 최악의 상황을 알 수 있고 이를 이용하면 시스템 오류의 상한(Upper bound)를 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 심볼간 간섭 이론을 이용하여 평균 간섭값을 계산한 후 데이터 샘플링 타임의 오차와 평균 오류, 그리고 대역 필터의 진폭 및 지연 특성에 의한 영향을 고려한 평균 오류를 계산하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 평균 오류를 계산할 수 있을뿐만 아니라, 시스템 실험시 평균 간섭량을 측정하여 대입하여도 오류를 알 수 있으므로 실험실에서 직접 응용이 가능하다. 제2장에서는 일반적인 디지털 이동통신 시스템 모델을 선정하여 이상적인 조건하에서 Suzuki에 의해 유도된 일반적인 오류식[3]을 소개하고, 제3장에서는 데이터 샘플링 타이밍 오차에 의한 영향과 수신 대역 필터의 진폭 및 지연 특성이 신호왜곡에 미치는 영향을 심볼간 간섭을 이용하여 해석하였다. 그리고 제4장에서는 레일리 페이딩(Rayleigh fading)하에서 시뮬레이션을 통하여 데이터 샘플링 타이밍 오차와 파형 왜곡에 의한 시스템 성능 저하를 비교, 분석하였다.

II. 시스템 모델과 오류

시스템 해석을 위한 모델을 그림1에 나타내었는데, 송신부에서는 NRZ(None Return to Zero) 신호가 입력되며 입력된 신호는 직/병렬(Serial to Parallel) 변환 회로를 거쳐 홀수 비트와 짝수 비트로 I-채널과 Q-채널로 양분된다. 양분된 신호는 각각 송신 스펙트럼을 줄이기 위하여 저역 통과 필터를 거치게 되는데, 심볼간 간섭을 발생시키지 않도록 Raised Cosine 특성을 갖는 필터를 가정하였으며 이때 차단 주파수는 Nyquist 대역폭을 갖도록 설계된다. 이 필터의 skirt 특성은 Roll off factor α 로 나타내며, 이 값은 송신 스펙트럼의 인접 채널 간섭에 영향을 주는 요소가 된다. Raised Cosine 필터의 전달함수 $H(\omega)$ 는 다음과 같다[5].

$$H(\omega) = \begin{cases} T & 0 \leq |\omega| \leq (1-\alpha)W \\ \frac{T}{2} \{1 - \sin[(\pi/2\alpha W)(|\omega| - W)]\} & (1-\alpha)W \leq |\omega| \leq (1+\alpha)W \\ 0 & |\omega| > (1+\alpha)W \end{cases} \quad (1)$$

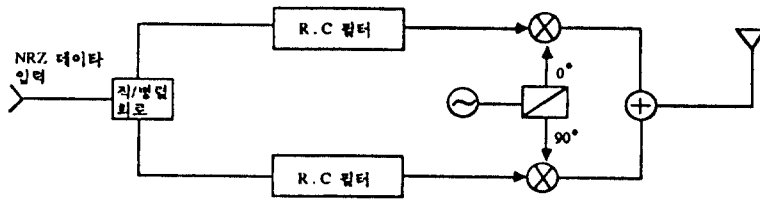
여기서 $W = \pi/T$, T는 비트 주기, ω 는 $2\pi f$, 그리고 α 는 Roll-off factor이다.

변조기를 통하여 송신되는 신호는 다음 식으로 표현될 수 있는데,

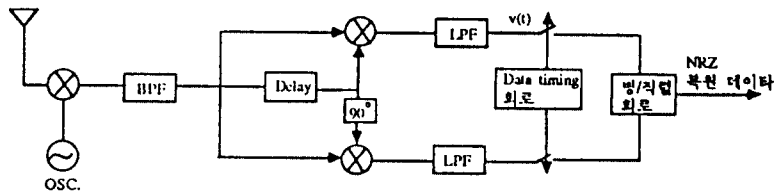
$$S_i(t) = A(t)\cos(\omega_c t + \Theta) \quad (2)$$

여기서 $A(t)$ 는 송신 신호의 복소 포락선(Complex envelope)이며, ω_c 는 송신 각주파수, 그리고 Θ 는 신호의 위상이다.

이동 무선 채널은 매우 불안정하기 때문에 차량의 속도가 빈번히 변하거나 수신 신호강도의 변화가 심할때는 코우히어런트 복조방식은 회로의 구성이 완벽하지 않기 때문에, 실제 이상적으로 가정하여 유도한 오류의 결과와는 상이한 결과를 나타낸다. 따라서 응용면에서는 코우히어런트가 아닌 차동(Differential) 복조방식이나 변별기(Discriminator)복조방식이 많이 응용되고 있다[6,7]. 그림1은 차동 복조방식을 나타내었으며, 수신된 신호는 수신 대역 통과 필터를 지난 후 복조기에 입력 된다. 여기서 복조기의 저역 통과 필터(LPF)는 고주파 성분만 제거하고 신호에는 영향을 주지 않는다고 가정한다. 저역 통과 필터



(a) 송신부
(a) Transmitter



(b) 수신부
(b) Receiver

그림 1. 시스템 모델
Fig 1. System model

를 지난 신호는 가장 적합한 시기 즉, 수신 눈모양이 가장 많이 열린 시간에 데이터를 샘플링 하므로서 데이터를 복구한다. I- 및 Q-채널에서 복구된 데이터는 병/직렬회로를 통과하여 수신 데이터를 얻게된다. 안테나로 유기된 수신 신호 $e(t)$ 는

$$e(t) = \text{Re}[E(t)e^{j\omega_c t}] \quad (3)$$

이며, $\text{Re}(\cdot)$ 는 실수부, $E(t)$ 는 수신된 신호의 복소포락선을 의미하고 ω_c 는 송신 각주 파수이다.

수신 오류는 Suzuki에 의하여 간결하게 유도되었는데[3], 여기서는 수신 오류식을 유도할때에 적용한 가정과 유도 결과식을 다음 장에서 이용하기 위하여 간략히 소개하고자 한다. 그림1에서 저역 통과 필터의 출력 $v(t)$ 는 이상적인 경우 데이터 샘플링 타이밍 회로에 의하여 눈이 가장 많이 열린 시점에서 샘플링된다.

평균 비트 오류율

$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_c \quad (4)$$

인데, 여기서 M 은 PSK인 경우 M -ary 위상을 의미하므로 QPSK인 경우 $M=4$ 이다. 그리고 P_c 는 평균 심볼 오류이며,

$$P_c = 2P_M - P_M^2 \quad (5)$$

이다. 여기서 P_M 은 수신된 신호가 오차를 발생할 확률로서, QPSK인 경우

$$P_M = \frac{1}{2} (1 - F) \quad (6)$$

이다. 여기서 F 는 차동 복조 방식인 경우

$$F = \frac{J_0(2\pi f_D T) \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{\Gamma}\right)^2 - J_0^2(2\pi f_D T) \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right)}} \quad (7)$$

이다. 여기서 $J_0(\cdot)$ 는 0차 제1종 베셀함수(Zeroth order Bessel function)이다. 그리고 Γ 는 평균 신호 잡음비이며, $f_d T$ 는 페이딩 지수로서 f_d 는 최대 도플러 편이 주파수, T 는 비트주기이다.

Ⅲ. 타이밍 오차와 파형 왜곡

제2장에서 언급한 오울의 유도식은 수신시 데이터 샘플링 타이밍 오차와 수신 대역 필터의 영향은 없는 것으로 가정하고 수신 오울을 유도 하였으나, 실제로는 데이터 타이밍 회로의 불완전과 수신 대역 필터의 진폭특성과 위상 특성에 의한 신호 역시 성능 저하의 요인이 된다. 즉, 수신 대역 필터의 통과 대역폭이 좁고 통과 대역내의 진폭의 리플(ripple)이 클수록, 그리고 통과 대역내의 위상 특성의 선형도(linearity)가 떨어질 수록 신호 왜곡의 영향은 크다. 이러한 신호 왜곡은 심볼간 간섭을 증대시키고 결국 수신 오울을 증가시키게 된다. 심볼간 간섭량을 알 수 있는 방법으로는 눈모양이 가장 일반적이다.

눈모양을 계산하기 위하여 그림1의 수신 대역 통과 필터를 통과한 순시적인(instantaneous) 신호대 잡음비[8,9]는

$$\Gamma(t) = \frac{E_b}{N_0} \frac{a^2(t)}{BT} \quad (8)$$

인데, 여기서 E_b 는 비트 에너지로서 신호전력과 비트 주기 T의 곱이며, N_0 는 잡음 전력밀도, 그리고 B는 수신 대역 필터의 등가 잡음 대역폭이다. $a^2(t)$ 는 데이터 샘플링 시간에 데이터 판정레벨(Threshold level)로부터 눈이 열린 시점까지의 정규화 거리이며, 심볼간 간섭이 없을때는 1이고 심볼간 간섭이 클수록 눈의 열린 정도가 작아지므로 이 값은 점차 작아진다. 결국 $a^2(t)$ 의 역수는 심볼간 간섭(ISI; Intersymbol Interference)[4]이 되며 심볼간 간섭이 클수록 신호대 잡음비는 작아진다. 여기서 $a^2(t)$ 의 평균 값을 구하여 대입하면(8)식은 평균 신호대 잡음비가 된다.

실제로 파형 왜곡을 살펴보기 위하여 중심 주파수 근처에서 진폭특성이 가장 평탄하고 위상 선형 특성이 비교적 우수한 Butterworth 필터를 예로서 적용하면, Butterworth 필터의 등가 저역 전달함수[10]는

$$H_B(f) = \sum_{k=0}^{n-1} \left[1 - \frac{f}{f_c} \exp(-j \frac{2k+1}{2n} \pi) \right]^{-1} \quad (9)$$

이다. 여기서 f_c 는 3dB 차단 주파수이다. 그리고 군 지연(Group delay) 특성은

$$\begin{aligned} \tau_g(f) &= -\frac{d}{d\omega} \arg(H_B(f)) \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{df} \sum_{k=0}^{n-1} \arg\left[1 - \frac{f}{f_c} \exp(-j \frac{2k+1}{2n} \pi) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 그림2와 그림3은 Butterworth 필터의 차수에 따른 진폭특성과 군 지연특성을 각각 나타내고 있다. 표1은 Butterworth 필터의 차수에 따른 심볼간 간섭량을 나타내었다.

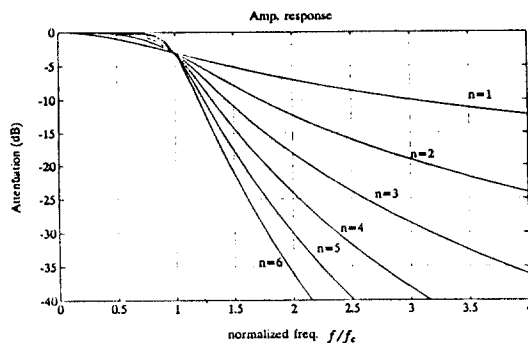


그림 2. Butterworth 필터의 진폭특성
Fig 2. Amplitude characteristics of a Butterworth filter

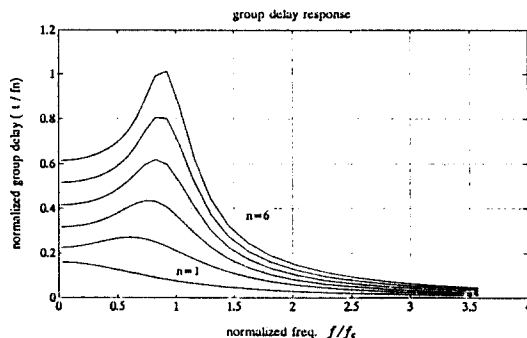
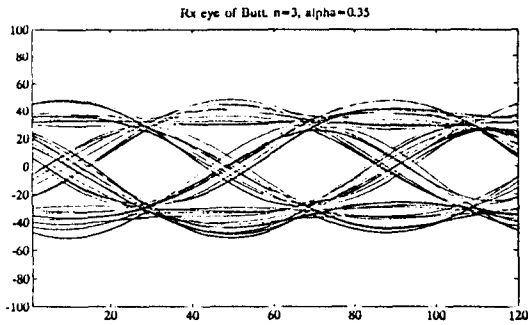
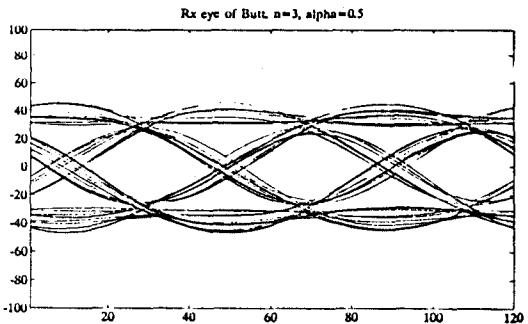


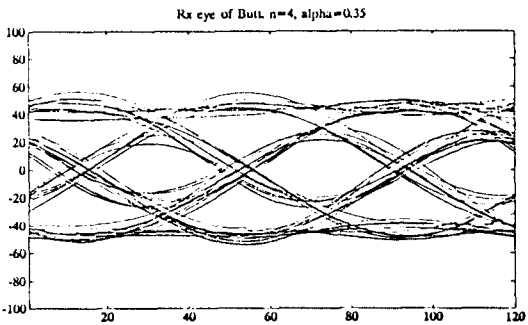
그림 3. Butterworth 필터의 군지연 특성
Fig 3. Group delay characteristics of a Butterworth filter



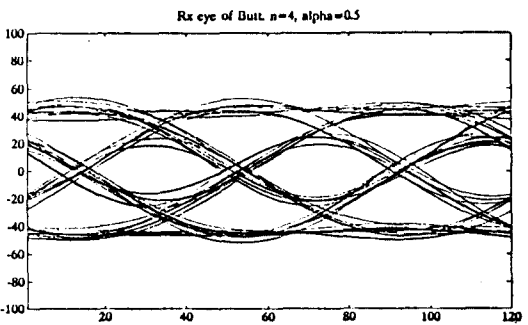
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 필터의 차수에 따른 눈모양

- (a) $n=3, \alpha=0.35$ (b) $n=3, \alpha=0.5$
- (c) $n=4, \alpha=0.35$ (d) $n=4, \alpha=0.5$

Fig 4. Eye pattern for the order of a Butterworth filter

- (a) $n=3, \alpha=0.35$ (b) $n=3, \alpha=0.5$
- (c) $n=4, \alpha=0.35$ (d) $n=4, \alpha=0.5$

표 1. 필터의 차수에 따른 심볼간 간섭량

Table 1. Intersymbol interference for the order of a Butterworth filter

α	간섭량	심볼간 간섭량(dB)	
		3차	4차
0.35		2.199	7.64
0.5		2.51	7.90

한편 그림1의 데이터 샘플링 회로는 매 데이터 주기마다 데이터를 샘플링하는데, 눈모양이 가장 많이 열린 지점에서 데이터를 샘플링해야 시스템 오율을 최소화할 수 있다. 그러나 실제로는 데이터 타이밍 회로가 불완전하기 때문에 데이터 샘플링타임 오차에 의해서 시스템 오류가 증가하게 된다. 표2는 타이밍 오차에 따른 평균 심볼간 간섭량을 나타내었다. 여기서 이상적인 샘플링 타임을 눈이 가장 많이 열린 시점인 $T/2$ 로 가정할 때 타이밍 오차는 $T/2$ 에서부터 $\pm \Delta t$ 만큼 양측으로 편이된 상태를 나타내며, 주기 T 로 정규화 한 값 $\pm \frac{\Delta t}{T}$ 를 정규화 타이밍 오차로 정의하였다.

한편 Butterworth 필터의 등가 잡음 대역폭 B 는 필터의 차수에 따라서 3 dB 통과 대역폭 B_c 와 다음과 같은 관계가 있다[11].

$$B = \frac{\pi B_c}{2n \sin(\pi/2n)} \tag{11}$$

여기서 n 는 Butterworth 필터의 차수이다.

그림4는 수신된 신호가 대역 통과 필터를 지난 후의 눈모양을 나타내었는데 필터의 차수에 따라서 각각 심볼간 간섭량이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 n 은 수신부에 사용한 Butterworth 필터의 차수이며, α 는 송신부 Raised Cosine 필터의 Roll off factor 이다.

표 2. 타이밍 오차에 의한 평균 심볼간 간섭량
Table 1. Average intersymbol interference for a timing error

α	타이밍 오차	평균 심볼간 간섭량(dB)	
		3차	4차
0.35	1/32	0.47	3.03
	1/16	0.52	3.08
	1/8	0.68	3.24
	1/4	1.32	3.81
0.5	1/32	0.40	2.95
	1/16	0.45	2.99
	1/8	0.60	3.13
	1/4	1.20	3.66

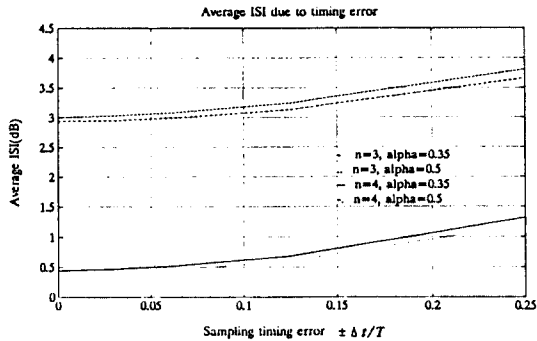


그림 5. 타이밍 오차에 의한 평균 심볼간 간섭량
Fig 5. Average intersymbol interference for a timing error

평균 심볼간 간섭량으로 필터를 지난 후의 신호전력의 변화를 알 수 있고, 잡음 전력의 변화는 수신 대역 필터의 대역폭과 등가 잡음 대역폭과의 관계식 (11)에 의하여 계산할 수 있다. 표3은 이상적인 대역 통과 필터에 대하여 Butterworth 필터를 사용한 경우의 평균 신호대 잡음 전력의 저하를 (8)식에 따라 계산한 값이다. 결국 표3의 결과는 수신 대역 필터에 의한 평균 심볼간 간섭량과 타이밍 오차에 의한 평균

신호대 잡음비의 저하값이 된다. 그러므로 수신 대역 필터의 왜곡을 고려하지 않고, 데이터 샘플링 회로의 오차가 없다고 가정한 평균 신호대 잡음비 대신에 표 3에서 얻은 저하량을 고려한 평균 신호대 잡음비를 (7)식에 대입하면 필터의 왜곡 및 샘플링타임 오차를 고려한 평균 오율이 된다. 심험 값에 의하여 평균 오율을 유도하고자 할때에는 수신 대역 필터를 지난 후의 눈모양을 측정하여 평균 심볼간 간섭량을 구하고 이로부터 평균 신호대 간섭비를 계산한 값을 마찬가지로 (7)식에 대입하면 된다. 다음 장에서는 시뮬레이션에 의해 얻은 평균 오율을 언급한다.

표 3. Butterworth 필터링후 평균 S/N비의 저하
Table 3. Average S/N degradation for a Butterworth filter

α	타이밍 오차	평균 S/N비의 저하(dB)	
		3차	4차
0.35	0	0.655	3.122
	1/32	0.671	3.146
	1/16	0.724	3.193
	1/8	0.890	3.369
	1/4	1.517	3.916
0.5	0	0.588	3.049
	1/32	0.605	3.066
	1/16	0.646	3.103
	1/8	0.799	3.239
	1/4	1.397	3.776

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

수신 대역 통과 필터에 의한 영향을 해석하기 위하여 그림1에서 사용한 저역통과 필터의 Roll-off factor α 는 미국과 일본 TDMA 이동통신 시스템에서 규정한 0.35와 0.5로 각각 정하였다. 수신 대역 필터의 정규화 대역폭 $BT(B: 3 \text{ dB 대역폭}, T: \text{비트 주기})$ 은 1로 정하였다. 그림 6은 페이딩 지수 $fdT(f_d: \text{최대 도플러 주파수 천이}, T: \text{비트 주기})$ 에 따른 오율을 이상적인 필터를 사용하였을때와 Butterworth 필터를 사용하였을때를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이

Raised cosine 필터의 Roll-off factor α 에 의한 시스템 오율 저하보다는 Butterworth 필터의 차수에 따른 오율의 변화가 큰 것을 알 수 있으며, Roll-off factor α 가 0.35인 경우 평균 비트 오율 $1 \cdot 10^{-2}$ 에서 4차 Butterworth 필터는 3차 Butterworth 필터에 비해서 신호대 잡음비가 약 2.47 dB 저하되고, Roll-off factor가 0.5인 경우에는 약 2.46 dB 저하된다. 그리고 페이딩 지수 fdT 가 크고 신호대 잡음비가 높아질수록 평균 오율은 이상적인 수신 대역 통과 필터를 통과 후의 평균 오율값에 접근한다.

그림7은 데이터 샘플링 타임 오차에 의한 영향을 나타 내었는데, 예상하는 바와 같이 샘플링 타임 오차가 클수록 시스템의 성능은 점차 저하되고 있다. 그림 7(a)는 그림6(a)의 경우에 샘플링 타임 오차가 존재할때의 평균 오율의 변화를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 평균오율 $1 \cdot 10^{-2}$ 에서 3장에서 정의한 정규

타이밍 오차 1/4는 1/16에 비해 신호대 잡음비가 약 0.72 dB 저하됨을 알 수 있다. 그리고 그림7(b)은 그림 6(b)의 경우에 타이밍 오차가 존재할때이며, 이때는 신호대 잡음비가 약 0.75 dB 저하되고 있다. 그림6에서와 마찬가지로 페이딩 지수가 크고, 신호대 잡음비가 높아질수록 평균 오율은 타이밍 오차가 존재하지 않는 경우의 값에 접근하고 있다.

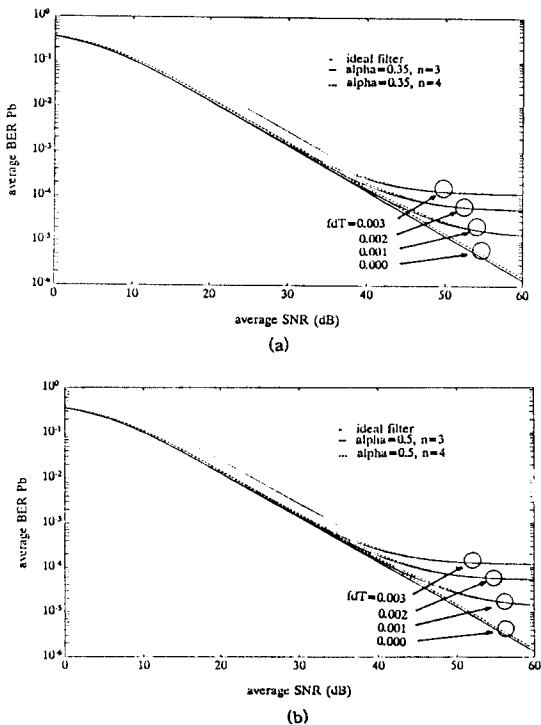


그림 6. 수신 대역 필터의 차수에 따른 평균 오율
 (a) $\alpha = 0.35$ 인 경우 (b) $\alpha = 0.5$ 인 경우
 그림 6. Average probability of error for the order of receiver filter
 (a) $\alpha = 0.35$ (b) $\alpha = 0.5$

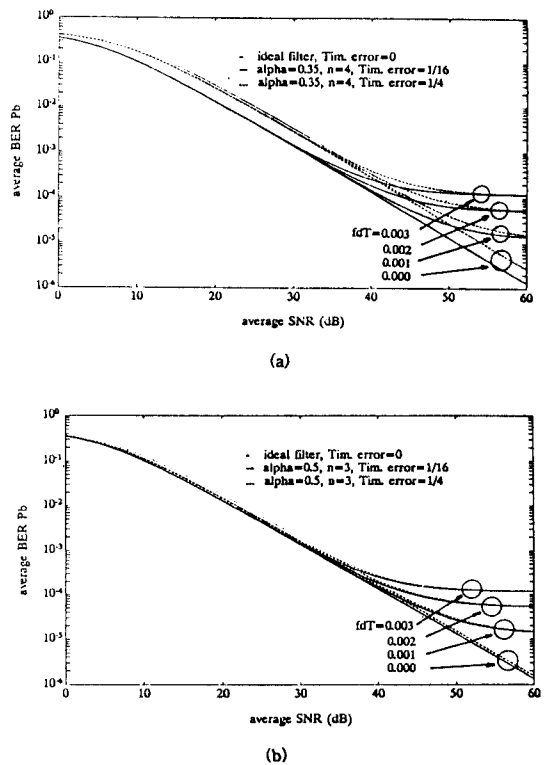


그림 7. 샘플링 타이밍 오차에 평균 오율
 (a) $\alpha = 0.35, n = 4$ 인 경우
 (b) $\alpha = 0.5, n = 3$ 인 경우
 Fig 7. Average probability of error for sampling timing error
 (a) $\alpha = 0.35, n = 4$
 (b) $\alpha = 0.3, n = 3$

V. 결 론

본 논문에서는 디지털 이동통신 시스템의 성능 분석시 대부분 무시한 요소인 수신 대역 필터의 진폭특성 및 지연 특성이 평균 오율에 미치는 영향과 데이

타 샘플링 타임의 오차가 시스템 성능에 미치는 영향을 심볼간 간섭 이론을 이용하여 평균 간섭값으로 계산하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 평균 오율을 계산할 수 있을뿐만 아니라, 시스템 실험시 눈모양 측정값을 대입하여도 오율을 알 수 있으므로 실험실에서 직접 응용이 가능하다.

실제 시뮬레이션에는 중심주파수부근에서 진폭 특성이 가장 평탄하고 위상 선형 특성이 비교적 우수하여 디지털 통신에 가끔씩 적용되는 Butterworth 필터를 선정하여 계산하였다. 시뮬레이션 결과 4차 Butterworth 필터는 3차 Butterworth 필터보다 전반적으로 평균 신호대 간섭비가 약 2.5 dB 저하됨을 알 수 있다.

타이밍 오차는 Roll-off factor가 0.35이고 정규화 타이밍 오차 1/4인 경우는 데이터 샘플링 타임의 오차가 없을때에 비하여 4차 Butterworth 필터는 평균 신호대 잡음비가 약 0.8 dB, 3차 Butterworth 필터는 약 0.86 dB, 그리고 Roll-off factor가 0.5일때는 각각 0.73 dB와 0.81 dB 저하되었다. 이 결과는 Roll-off factor가 작을수록, 필터의 차수가 작을 수록 샘플링 타임 오차에 의한 평균 신호대 잡음비의 저하가 크다는 것을 나타내고 있다.

이상의 결과는 디지털 이동통신 시스템에서 수신 대역 필터 및 데이터 타이밍 오차에 의한 시스템 성능의 영향을 간편하게 유도할 수 있을뿐만 아니라, 최적의 필터를 설계할때에도 응용이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. TIA, Cellular System Dual-Mode Mobile Station-Base Station Compatibility Standard, March 1991.

2. GSM, ETSI-GSM Technical Specifications, Oct.1991.
 3. H. Suzuki, "Canonic Receiver Analysis for M-ary Angle Modulations in Rayleigh Fading Environment," IEEE Trans. on Veh. Tech., vol. VT-31, No.1, pp.7-14, Feb.1982.
 4. K. Feher, Digital Communications, Ch.3, Prentice-Hall, 1983.
 5. F. Stremler, Introduction to Communication Systems, 3rd ed., Ch.7, ADDISON WESLEY, 1990.
 6. K. Ru, et al, "Error Rate Performance of Binary DPSK System with Multiple Co-channel Interference in Land Mobile Radio Channels," IEEE Trans. on Veh. Tech., vol. VT-33, No.1, pp.23-31, Feb.1984.
 7. C. Liu, K. Feher, "Noncoherent Detection of $\pi/4$ -QPSK Systems in a CCI-AWGN Combined Interference Environment," VTC, pp.83-94, 1989.
 8. B. Tan, T. Tjhung, "On Binary DPSK Error Rates Due to Noise and Intersymbol Interference," IEEE Tr. on Communi., vol. COM-31, No.3, pp.463-466, March 1983.
 9. K. Tröndle, G. Söder, Optimization of Digital Transmission Systems, Ch.3, ARTECH HOUSE, 1987.
 10. 桑原守二, デジタルマイクロ波 通信, NTT 1984
 11. A. Carlson, Communication Systems, 3rd ed., Ch.5, McGraw-Hill



金 南 秀 (Nam-Soo Kim) 정회원
 1957년 10월 16일생
 1981년 : 광운대학교 전자공학과 (학사)
 1983년 : 연세대학교 대학원(공학 석사)
 1991년 : 연세대학교 대학원(공학 박사)

1986년~현재 : 전자통신연구소 이동통신기술연구단 선임 연구원

※주관심분야: 디지털 이동통신