
Nakagami-m 페이딩 채널에서 FSMC 모델에 의한 무선 통신시스템의 성능 분석

조용범* · 노재성** · 조성준***

Performance Analysis of Wireless Communication System with FSMC Model in Nakagami-m Fading Channel

Yong-bum Cho* · Jae-sung Roh** · Sung-joon Cho***

이 논문은 2004년 한국항공대학교 인터넷정보검색연구센터의 연구비 지원으로 수행되었음

요 약

본 논문에서는 Nakagami-m 페이딩 채널을 Finite-State Markov Channel (FSMC)로 모델링하고, 채널 상태 변화에 따른 통신 시스템의 성능을 분석하였다. 고려한 FSMC 모델에서는 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비를 유한개의 구간으로 나뉘 각각의 구간을 Markov 체인의 상태로 대응한다. 각 상태는 무기억 이진 대칭 통신론로 가정하고, 한 상태에서 다른 상태로의 천이는 Markov 천이를 따른다고 가정한다. 수치 해석을 통해 각 상태에 있어서의 평균 심볼 오류, 정상 상태 확률 그리고 상태 천이 확률을 구하여 FSMC 모델을 구성하였고, 상태 천이 지수를 변경함으로써 여러 페이딩 환경을 FSMC 모델로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 상태 천이 지수가 클 경우인 빠른 페이딩 채널에서는 채널이 i.i.d. 특성을 나타내게 되며, 상태 천이 지수가 작을 경우인 느린 페이딩 채널은 인접한 상태로의 천이만 발생하는 간단한 FSMC 모델로 표현될 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 제안한 FSMC 모델의 응용 예로써, 여러 채널 환경에서 랜덤 에러 정정 부호의 부호화 이득의 차이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교, 분석하였다.

ABSTRACT

In this paper, we represent Nakagami-m fading channel as Finite-State Markov Channel (FSMC) and analyze the performance of wireless communication system with varying the fading channel condition. In FSMC model, the received signal's SNR is divided into finite intervals and these intervals are formed into Markov chain states. Each state is modeled by a BSC and the transition probability is dependent upon the physical characterization of the channel. The steady state probability and average symbol error rate of each state and transition probability are derived by numerical analysis and FSMC model is formed with these values. We found that various fading channels can be represented with FSMC by changing state transition index. In fast fading environment in which state transition index is large, the channel can be viewed as i.i.d. channel and on the contrary, in slow fading channel where state transition index is small, the channel can be represented by simple FSMC model in which transitions occur between just adjacent states. And we applied the proposed FSMC model to analyze the coding gain of random error correcting code on various fading channels via computer simulation.

키워드

Markov, FSMC, Nakagami, 페이딩 모델, 에러 정정 부호

*한국항공대학교 대학원 정보통신공학과

**서일대학 정보통신 전공

***한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터공학부

접수일자 : 2004. 5. 6

I. 서론

무선 페이딩 채널에서 시스템의 에러 성능을 평가한다는 것은 무선 채널의 변화가 심하기 때문에 일반적으로 복잡한 작업이다. 많은 무선 통신 시스템에서 채널은 페이딩으로 인해 시간 상관성을 가지게 되는데, 이것은 현재의 채널 상태가 이전의 채널 상태에 의존해서 변화한다는 것을 의미한다. 대부분의 시스템들이 시간 상관성이 없는 채널을 가정하고 설계되었기 때문에 이러한 시간 상관성은 버스트(burst)한 에러를 유발함으로써 예기치 않은 시스템의 성능 저하를 가져올 수 있다 [1]. 이런 채널에서 시간 상관성을 대처하기 위해서 통신 시스템에서는 길이가 충분히 긴 인터리버(interleaver)를 채택하는데, 이는 시스템을 복잡하게 만들고 신호 처리에 있어서 시간 지연을 초래하게 된다. 이러한 시간 상관성을 가지는 채널에서 시스템의 성능을 분석하기 위해서는 효과적인 무선 채널의 모델링이 필요하게 된다. 이런 무선 채널을 나타내기 위해서 여러 채널 모델들이 제안되었는데, 그 중 하나가 first-order Markov 모델이다. First-order Markov 모델은 간단함과 구현의 용이함 때문에 복잡한 상위계층 프로토콜들의 성능을 무선 환경에서 분석할 때나 낮은 복잡도를 가지는 시뮬레이터를 구현할 때 많이 사용되고 있다 [2]. 특히 first-order Markov 모델은 상관성을 가지는 페이딩 프로세스를 나타내기 위해 적당하다는 것이 여러 논문들에서 증명되었다 [3]. Markov 체인을 페이딩 채널의 표현에 적용하기 시작한 것은 Gilbert와 Elliott인데, 이들은 Gilbert-Elliott 채널이라고 알려진 two-state Markov 채널 모델을 제안하였다. 이 모델은 상관성을 가지는 페이딩 채널을 간단하게 나타낼 수 있었지만, 채널이 매우 동적으로 변하는 경우 채널의 변화를 충분히 표현할 수 없다는 단점이 있었다. 그래서 그 다음으로 제안된 모델이 Finite-State Markov Channel (FSMC) 모델이다 [4]. FSMC 모델은 페이딩의 상태를 2개가 아닌 유한개로 확장시킨 것으로 빠른 페이딩(fast fading)의 변화를 보다 잘 표현할 수 있다. 여러 논문들에서는 주파수 비선택성 페이딩(frequency non-selective fading)과 느린 페이딩(slow fading)을 가정하여 Markov 채널 모델을 설계하고 성능을 분석하였다. 참고문헌 [5]에서는 레일리(Rayleigh) 페이딩 환경에서 정규화된 도플러 주파수(normalized Doppler frequency)를 사용하여 FSMC 모델을 적용할 수 있는 페이딩 환경과 i.i.d. (independent identically distributed) 채널이 적합한 페이딩 환경을 알아보았다. 본 논문에서는 보다

다양한 무선 페이딩 환경을 표현할 수 있는 Nakagami-m 페이딩을 FSMC 모델로 모델링 하여, 페이딩 환경 조건에 따른 FSMC 모델의 변화에 대해 알아본다. 그리고 FSMC 모델의 응용의 예로 여러 페이딩 환경에서 랜덤 에러 정정 부호(random error correcting code)의 부호화 이득을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교, 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 Nakagami-m 페이딩 채널을 FSMC로 모델링 하는 방법에 대해 기술하고, III 장에서는 FSMC 모델의 파라미터 값을 수치 해석을 통해 구한다. IV 장에서는 III 장에서 얻은 파라미터를 가지고 FSMC 모델을 구성한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 여러 페이딩 환경에서 랜덤 에러 정정 부호의 부호화 이득에 대해 알아본다. 그리고 마지막 V 장에서 결론을 맺는다.

II. Nakagami-m 페이딩의 Markov 채널 모델링

본 논문에서 모델링 하는 페이딩 채널은 주파수 비선택성 페이딩 채널이라고 가정하고 채널에서의 페이딩 프로세스는 Nakagami-m 분포로 모델링 한다. 페이딩 프로세스는 심볼 주기(symbol duration) T 마다 불연속적으로 변한다고 가정한다.

II.1 Nakagami-m 페이딩

Nakagami-m 분포는 일반화된 분포로, 레일리 분포를 특별한 경우로 포함하고, 라이시안(Rician)과 로그노말(lognormal) 분포까지도 나타낼 수 있으므로 보다 실측한 측정값에 잘 맞을 수 있는 유연성을 가지는 페이딩 분포이다. 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 (SNR: Signal to Noise power Ratio) γ 에 대한 Nakagami-m 분포는 다음과 같은 확률 밀도 함수로 나타낼 수 있다.

$$P_{SNR}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\bar{\gamma}^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (1)$$

여기서, γ 는 순시 수신 신호 대 잡음 전력비를, $\bar{\gamma}$ 는 평균 수신 신호 대 잡음 전력비를 나타낸다. 그리고 m 은 페이딩 지수로 페이딩의 심한 정도를 나타낸다.

II.2 First-order Markov Channel 모델

First-order Markov 모델에서 채널의 상태는 매 심볼 주기 T 마다 측정된 수신 신호의 SNR 값을 가지고 그림 1과 같이 유한개의 상태를 가지는 Markov 체인으로 표현된다.

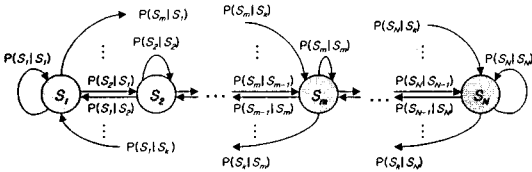


그림 1. FSMC 모델의 상태 천이도.

Fig 1. State transition diagram for FSMC model.

Markov 체인에서의 각 상태는 무기억 채널로 모델링 되는데, 특히 이진 변조 방식을 사용하면 각 상태는 이진 대칭 통신로(BSC: Binary Symmetric Channel)로 모델링 된다. 먼저, Nakagami- m 분포로 표현되는 페이딩 프로세스를 SNR 값에 따라 그림 2와 같이 중복되지 않도록 N 개의 구간으로 나누고, 각각의 구간을 Markov 체인의 S_1, S_2, \dots, S_N 상태에 대응시킨다. 각 상태를 N 개의 구간으로 나눌 때 각 경계치(threshold level) SNR 값 $\gamma_i, i=1, \dots, N-1$ 의 결정은 FSMC 모델로 생성한 페이딩 SNR 값과 페이딩의 실측치와의 오차가 최소화 할 수 있도록 설정되어야 하는데 이는 매우 복잡한 계산이 필요하다. 경계치 SNR 값 γ_i 을 설정하는 방법에는 여러 가지가 제안되었는데 [6], 본 논문에서는 준-최적화 방식인 각 상태에서의 정상 상태 확률이 동일하게 되도록 경계치 SNR 값을 설정하는 방법을 사용하였다. 각 상태 S_1, S_2, \dots, S_N 의 SNR 값의 범위는 각각 $[\gamma_0, \gamma_1), [\gamma_1, \gamma_2), \dots, [\gamma_{N-1}, \gamma_N)$ 가 되는데, 여기서 γ_0 는 0로 γ_N 은 무한대(∞)로 설정하였다.

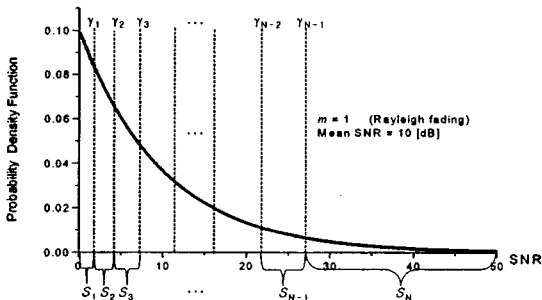


그림 2. FSMC 모델에서 상태를 나누는 방법.

Fig. 2. Illustration of FSMC partitioning.

FSMC 모델은 각 상태에서의 정상 상태 확률, 평균 심볼 오율 그리고 상태 천이 확률을 가지고 정의된다. 각 상태에서의 정상 상태 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_i = P(S_i) = P_{SNR}(\gamma_{i-1} \leq \gamma < \gamma_i) \quad (2)$$

$$= \int_{\gamma_{i-1}}^{\gamma_i} P_{SNR}(\gamma) d\gamma, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

또한 식 (2)으로 구한 정상 상태 확률은 다음 식을 만족해야 한다.

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1 \quad (3)$$

두 상태 S_i 에서 S_j 로의 상태 천이는 심볼 주기 T 시간 전, 후의 순시 SNR 값 α, β 가 각각 $[\gamma_{i-1}, \gamma_i)$ 범위와 $[\gamma_{j-1}, \gamma_j)$ 범위 안에 있게 되었을 때 발생하게 된다. 즉, T 시간 이후에 측정된 순시 SNR 값이 이전에 머무르고 있던 상태의 SNR 값의 범위가 아닐 경우 상태 간 천이가 발생하게 된다. 상태 S_i 에서 S_j 로의 상태 천이 확률 $T_{i,j}$ 는 다음 식으로 표현될 수 있다 [7].

$$T_{i,j} = P(S_j|S_i)$$

$$= P(\gamma_{j-1} \leq \beta < \gamma_j | \gamma_{i-1} \leq \alpha < \gamma_i)$$

$$= \frac{\int_{\gamma_{i-1}}^{\gamma_i} \int_{\gamma_{j-1}}^{\gamma_j} P_{joint}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta}{\int_{\gamma_{i-1}}^{\gamma_i} P_{SNR}(\alpha) d\alpha} \quad (4)$$

여기서, $P_{joint}(\alpha, \beta)$ 는 Nakagami- m 분포를 따르는 두 랜덤 변수 α 와 β 의 결합 확률 밀도 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다 [8].

$$P_{joint}(\alpha, \beta) = \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{m+1} \frac{\alpha^{\frac{m-1}{2}} \beta^{\frac{m-1}{2}}}{\Gamma(m)\rho^{m-1}(1-\rho^2)}$$

$$\cdot \exp\left(-\frac{m(\alpha+\beta)}{\gamma(1-\rho^2)}\right) I_{m-1}\left(\frac{2m\rho\sqrt{\alpha\beta}}{\gamma(1-\rho^2)}\right) \quad (5)$$

$\alpha \geq 0, \beta \geq 0, 0 \leq \rho < 1$

위 식에서 ρ 는 α 과 β 사이의 상관 계수를 나타

낸다. 보통 채널은 페이딩으로 인해 시간 상관성을 가지게 된다. 이로 인하여 페이딩은 독립적으로 변화하는 것이 아니고 이전 채널의 채널 특성과 상관성을 가지면서 변화하게 된다. ρ 는 페이딩의 상관성의 정도를 나타내는데 사용되며, 일반적으로 최대 도플러 주파수 f_D 와 심볼 주기 T 와 같은 파라미터에 따라 변화한다. 참고문헌 [9]을 따라 본 논문에서는 ρ 값을 다음과 같이 설정한다.

$$\rho = J_0(2\pi f_D T) \tag{6}$$

여기서 $J_0(\cdot)$ 는 제1종 0차 베셀 함수이다.

FSMC 모델에서 페이딩의 변화는 Markov 체인에서 상태간의 천이로 표현하게 되는데, 페이딩의 변화 속도는 일반적으로 정규화된 도플러 주파수(normalized Doppler frequency)로 나타내게 된다. 본 논문에서는 정규화된 도플러 주파수를 다음과 같이 상태 천이 지수 $\xi(=f_D T)$ 로 정의하여 FSMC 모델에서의 상태 천이에 적용하도록 한다. 상태 천이 지수 ξ 가 크다는 것은 페이딩의 변화가 빠르다는 것을 의미하며, 작다는 것은 페이딩이 느리게 변화함을 나타내게 된다. 실측한 결과를 바탕으로 ξ 는 0~0.4 사이의 값을 가진다고 알려져 있다. 일반적으로 $\xi < 0.01$ 이면 느린 페이딩이라 하고 $0.01 \leq \xi \leq 0.4$ 이면 중간 페이딩, $\xi > 0.4$ 이면 빠른 페이딩이라 한다 [10].

각 상태에 있어서의 평균 심볼 오류율은 다음 식으로 구해진다.

$$h_i = \frac{\int_{\gamma_{i-1}}^{\gamma_i} P_{err}(\gamma) P_{SNR}(\gamma) d\gamma}{\int_{\gamma_{i-1}}^{\gamma_i} P_{SNR}(\gamma) d\gamma}, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{7}$$

여기서, $P_{err}(\gamma)$ 는 사용되는 디지털 변조 방식에 따른 심볼 에러 확률(SER: Symbol Error Rate)을 나타낸다.

본 논문에서는 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조 방식을 채택해서 각 상태에서의 평균 심볼 오류율을 계산하였다. SNR 값의 크기에 따라 상태를 구분하였기 때문에 평균 심볼 오류율은 S_1 상태에서 가장 나쁘고, 상태가 증가할수록 평균 심볼 오류율은 낮아지며, S_N 에서 가장 좋게 된다.

III. FSMC 모델의 파라미터 평가

이 장에서는 Markov 체인의 상태의 수 N 은 8, 평균 SNR $\bar{\gamma}$ 는 10 dB로 설정하고 FSMC 모델의 파라미터들에 대한 수치 해석을 수행한다. 수치 해석은 페이딩이 변화 속도를 달리하면서 수행한다. 일반적으로 페이딩의 빠르고 느림은 한 심볼 주기 T 동안 페이딩의 특성이 변화하느냐 아니냐에 따라 구분된다. FSMC 모델에서는 페이딩 변화 속도를 상태 천이 지수 ξ 를 가지고 나타낸다.

먼저, 느린 페이딩 상태가 되도록 ξ 를 0.001로 설정하고 수치 해석을 수행한다. 표 1은 페이딩 지수 m 을 1 과 5로 설정했을 경우의 상태 천이 확률을 나타내고 있다. 표 1에서 한 상태에서 바로 인접한 상태가 아닌 다른 상태로의 상태 천이 확률은 매우 작기 때문에 0으로 고려해 표에 추가하지 않았다. 즉,

$$T_{i,j} \approx 0, \quad |i-j| > 1, \quad 1 \leq i, j \leq N \tag{8}$$

이다. $m=1$ 일 때, S_2 상태($k=2$)에서 상태 천이 확률은 $T_{2,1} = 0.00642$, $T_{2,2} = 0.98551$, $T_{2,3} \approx 0.0080$ 으로 계속 S_2 상태에 머무를 확률이 98.5% 이상이 되고, 인접한 상태로의 천이 확률이 각각 1% 미만의 확률을 가지게 된다. 즉, 약 심볼 1000개를 전송 하는 도중에 약 6번, 8번의 확률로 S_1 상태와 S_3 상태로의 상태 천이가 발생하게 된다. 따라서 대부분의 심볼들은 S_2 상태에서 전송 되어지게 되는데, 이것은 페이딩이 느리게 변화하기 때문에 여러 심볼 주기 동안 SNR 값의 변화가 거의 없다는 것을 의미한다. 그리고 표 1에서 살펴볼 수 있듯이 페이딩 지수 m 값은 상태 천이 확률의 변화에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 하지만, m 값은 각 상태에서의 평균 심볼 오류율에 영향을 끼치게 된다. 데이터 변조 방식으로 BPSK를 사용했을 경우, 각 상태에서의 평균 심볼 오류율의 결과를 그림 3에 나타내었다. Nakagami -m 페이딩에서는 m 값이 작을수록 페이딩이 심해짐을 의미하므로, 그림 3에서 볼 수 있듯이 $m=1$ 인 경우가 $m=5$ 의 경우보다 각 상태에서의 평균 심볼 오류율이 평균적으로 더 커짐을 알 수 있다.

표 1. m 의 변화에 따른 상태 천이 확률 ($\xi = 0.001$).

Table 1. Transition probability with m equals to 1 and 5 ($\xi = 0.001$).

state	$m = 1$			$m = 5$		
	$T_{k,k-1}$	$T_{k,k}$	$T_{k,k+1}$	$T_{k,k-1}$	$T_{k,k}$	$T_{k,k+1}$
$k = 1$	-	0.99359	0.00642	-	0.99537	0.00463
$k = 2$	0.00642	0.98551	0.00807	0.00463	0.98857	0.00680
$k = 3$	0.00807	0.98333	0.00860	0.00680	0.98534	0.00786
$k = 4$	0.00860	0.98305	0.00836	0.00786	0.98409	0.00806
$k = 5$	0.00836	0.98419	0.00746	0.00806	0.98447	0.00748
$k = 6$	0.00746	0.98663	0.00592	0.00748	0.98640	0.00612
$k = 7$	0.00592	0.99045	0.00363	0.00612	0.99001	0.00387
$k = 8$	0.00361	0.99639	-	0.00384	0.99616	-

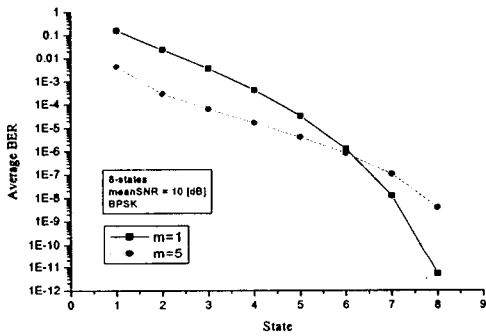


그림 3. m 의 변화에 따른 각 상태에서의 평균 심볼 오율 ($\xi = 0.001$).

Fig. 3. Average SER in each state with m equals to 1 and 5 ($\xi = 0.001$).

표 2는 $m = 1$ 인 상태에서 ξ 의 변화에 따른 상태 천이 확률을 나타낸다. 표 1에서와 마찬가지로 인접하지 않는 상태간의 상태 천이 확률은 거의 0 이므로 표에 나타나지 않았다. 각각 ξ 가 0.0001, 0.001인 경우는 느린 페이딩에, 0.01인 경우는 중간 페이딩의 경우에 해당된다. S_2 상태에서 S_1 상태로의 상태 천이 확률 $T_{k,k-1}$ ($k = 2$)을 살펴보면 $\xi = 0.0001$ 인 경우 0.00064, $\xi = 0.001$ 인 경우 0.00642, $\xi = 0.01$ 인 경우는 0.06410로 ξ 가 10배씩 늘어남에 따라 상태 천이 확률도 10배씩 높아졌다. ξ 가 커진다는 것은 페이딩의 변화가 빨라지는 것을 의미하게 되는데, 페이딩의 변화가 빨라지는 결과 심볼 주기 T 간격으로 측정된 SNR 값의 변화

가 심해지게 되고, 이로 인하여 한 상태에서 다른 상태로의 상태 천이 확률이 높아지게 되는 것이다. 하지만, 인접 상태로의 천이 확률은 높아지지만 인접하지 않는 상태로의 천이는 여전히 0에 가깝기 때문에 느린 페이딩 환경에서는 Markov 체인의 상태 천이 확률은 ξ 가 증가함에 따라 높아지고, 식 (8)에 표현된 것과 같이 바로 인접한 상태로만 천이가 발생한다고 할 수 있다.

다음으로 빠른 페이딩 환경에 해당하는 ξ 가 0.1인 경우에 대한 상태 천이 확률을 구해본다. 표 3은 $\xi = 0.1$ 인 상태에서의 상태 천이 확률을 나타내고 있는데, 바로 인접한 상태뿐만 아니고 다른 상태들로의 천이도 낮지 않은 확률을 가지고 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, S_2 상태에서 다른 상태로의 천이를 나타내는 $k = 2$ 의 경우를 확인해 보면, S_1 상태로의 천이 확률은 0.27429, S_2 상태에 그대로 머무를 확률 0.25035, S_3 상태로의 천이 확률은 0.20156이 된다. 그리고 느린 페이딩이나 중간 페이딩의 경우 상태 천이 확률이 거의 0이었던 인접하지 않는 $S_4 \sim S_8$ 로의 천이 확률도 각각 0.14172, 0.08359, 0.03762, 0.01014, 0.00073과 같이 무시할 수 없는 값을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 4에 상태 천이 확률을 그래프로 나타내었다. 이전 상태에 계속 머무를 확률이 가장 높기는 하지만 다른 $N - 1$ 개 상태들로도 천이할 확률들이 0이 아님을 확인할 수 있다.

$\xi = 1$ 로 매우 빠른 페이딩 환경에서 구한 상태 천이 확률을 표 4와 그림 5로 나타내었다. 한 상태에서 다른 $N - 1$ 개 상태로의 천이 확률이 거의 $1/N$ 값에 가깝게 동일함을 보여주고 있는데, 이는 상태간의 천이가 이전 상태에 독립적으로 발생함을 의미한다. 이것은 이전 무선 채널의 특성이 이후의 페이딩에 영향을 주지 않는 것을 의미하며, i.i.d. 채널 특성을 나타내게 됨을 보여준다. 즉, 페이딩이 매우 빨라지게 되면 채널은 i.i.d. 채널로 나타내짐을 의미한다.

본 논문에서는 심볼 주기 마다 상태 천이가 발생한다고 설정하였다. 만약, ξ 이 커지게 되어 페이딩이 빠른 페이딩 특성을 띠게 되면, 한 심볼 주기 T 사이에 페이딩의 특성이 여러 번 바뀌게 된다. 그 결과 심볼 주기 T 이후 수신 SNR 값을 확인해 보면 T 시간 사이에 페이딩 특성의 변화에 따라 벌써 몇 번의 인접 상태간의 천이가 발생한 것으로 볼 수 있기 때문에 바로 인접 상태뿐만 아니라 다른 상태로의 천이도 발생하게 되는 것이다.

표 2. 느린/중간 페이딩 환경에서 ξ 의 변화에 따른 상태 천이 확률 ($m = 1$).
Table 2. Transition probability with ξ equals to 0.0001, 0.001 and 0.01 ($m = 1$).

state	$\xi = 0.0001$			$\xi = 0.001$			$\xi = 0.01$		
	$T_{k,k-1}$	$T_{k,k}$	$T_{k,k+1}$	$T_{k,k-1}$	$T_{k,k}$	$T_{k,k+1}$	$T_{k,k-1}$	$T_{k,k}$	$T_{k,k+1}$
$k = 1$	-	0.99936	0.00064	-	0.99359	0.00642	-	0.93591	0.06410
$k = 2$	0.00064	0.99855	0.00081	0.00642	0.98551	0.00807	0.06410	0.85522	0.08069
$k = 3$	0.00081	0.99833	0.00086	0.00807	0.98333	0.00860	0.08069	0.83335	0.08597
$k = 4$	0.00086	0.99831	0.00084	0.00860	0.98305	0.00836	0.08597	0.83049	0.08354
$k = 5$	0.00084	0.99842	0.00075	0.00836	0.98419	0.00746	0.08355	0.84189	0.07457
$k = 6$	0.00075	0.99866	0.00059	0.00746	0.98663	0.00592	0.07457	0.86629	0.05915
$k = 7$	0.00059	0.99905	0.00036	0.00592	0.99045	0.00363	0.05915	0.90454	0.03631
$k = 8$	0.00036	0.99964	-	0.00361	0.99639	-	0.03609	0.96391	-

표 3. 빠른 페이딩 환경에서의 상태 천이 확률 ($\xi = 0.1$).
Table 3. Transition probability under fast fading ($\xi = 0.1$).

state	$\xi = 0.1$							
	$T_{k,1}$	$T_{k,2}$	$T_{k,3}$	$T_{k,4}$	$T_{k,5}$	$T_{k,6}$	$T_{k,7}$	$T_{k,8}$
$k = 1$	0.42663	0.27429	0.16200	0.08500	0.03738	0.01229	0.00230	0.00010
$k = 2$	0.27429	0.25035	0.20156	0.14172	0.08359	0.03762	0.01014	0.00073
$k = 3$	0.16200	0.20156	0.20768	0.18315	0.13572	0.07839	0.02848	0.00303
$k = 4$	0.08500	0.14171	0.18315	0.19916	0.18270	0.13360	0.06464	0.01004
$k = 5$	0.03738	0.08359	0.13573	0.18271	0.20870	0.19489	0.12741	0.02960
$k = 6$	0.01229	0.03762	0.07839	0.13360	0.19488	0.23965	0.22118	0.08239
$k = 7$	0.00230	0.01014	0.02848	0.06464	0.12741	0.22119	0.31850	0.22733
$k = 8$	0.00010	0.00072	0.00301	0.00998	0.02941	0.08189	0.22594	0.64895

표 4. 매우 빠른 페이딩 환경에서의 상태 천이 확률 ($\xi = 1$).
Table 4. Transition probability under very fast fading ($\xi = 1$).

state	$\xi = 1$							
	$T_{k,1}$	$T_{k,2}$	$T_{k,3}$	$T_{k,4}$	$T_{k,5}$	$T_{k,6}$	$T_{k,7}$	$T_{k,8}$
$k = 1$	0.13043	0.12955	0.12852	0.12730	0.12578	0.12378	0.12075	0.11388
$k = 2$	0.12955	0.12881	0.12796	0.12694	0.12566	0.12398	0.12143	0.11568
$k = 3$	0.12852	0.12796	0.12730	0.12651	0.12552	0.12421	0.12221	0.11779
$k = 4$	0.12730	0.12693	0.12651	0.12599	0.12534	0.12448	0.12313	0.12032
$k = 5$	0.12578	0.12566	0.12552	0.12534	0.12511	0.12480	0.12428	0.12350
$k = 6$	0.12378	0.12398	0.12421	0.12447	0.12479	0.12521	0.12579	0.12778
$k = 7$	0.12075	0.12143	0.12221	0.12313	0.12428	0.12579	0.12805	0.13437
$k = 8$	0.11318	0.11497	0.11706	0.11958	0.12274	0.12700	0.13355	0.15192

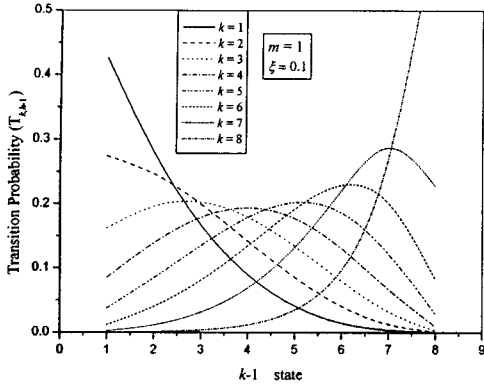


그림 4. 빠른 페이딩 환경에서의 상태 천이 확률 그래프 ($\xi = 0.1$).
 Fig. 4. Transition probability graph under fast fading ($\xi = 0.1$).

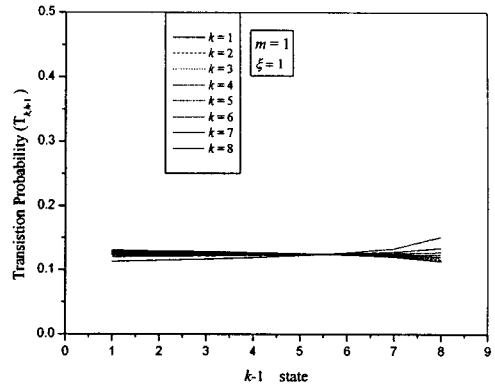


그림 5. 매우 빠른 페이딩 환경에서의 상태 천이 확률 그래프 ($\xi = 1$).
 Fig. 5. Transition probability graph under very fast fading ($\xi = 1$).

최근의 셀룰라 이동 통신 시스템이나 무선 LAN(Local Area Network)과 같은 무선 데이터 통신에서는 수십 kbps 이상의 속도를 가지고 데이터 통신을 수행 한다. 이 때, 심볼 주기는 약 $T = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ 초가 된다. 시속 100km 정도의 속도로 이동할 때 발생하는 최대 도플러 주파수 f_D 가 100Hz 정도인 것을 고려한다면 대부분의 시스템에서 $\xi < 0.01$ 이 되므로 느린 페이딩의 영향 아래 통신을 수행한다고 할 수 있다. 이럴 경우 페이딩 채널은 T 시간마다 바로 인접 채널로만 상태가 천이하게 되는 간단한 FSMC 모델로 표현할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 3장에서 구한 Markov 체인의 파라미터 값들을 FSMC 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하고, 수치 해석으로 구한 결과와 비교, 검토해 본다. 그리고 FSMC 모델의 응용의 예로 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 여러 페이딩 환경에서의 랜덤 에러 정정 부호의 성능을 분석해 본다.

IV.1 시뮬레이션과 수치 해석의 결과 비교

그림 6은 $m = 1$ 인 Nakagami-m 페이딩 환경에서 상태 천이 지수의 변화에 따른 BPSK 시스템의 비트 오류(BER: Bit Error Rate) 성능 그래프이다. k

그래프에서 실선은 수치해석 결과이고, 각 심볼들은 시뮬레이션을 통해 얻은 결과 값들이다. 그림 6에서 ξ 가 커질수록 수치 해석으로 구한 BER 값에 근사함을 확인할 수 있다. 본 논문에서 ξ 는 페이딩의 변화 속도를 나타내는 지표로 사용되는데 ξ 가 크다는 것은 페이딩이 빠르게 변화한다는 것을 의미한다. 따라서, ξ 가 커질수록 페이딩이 빠르게 변하게 되고, 이에 따라 심볼 주기 간격으로 측정된 SNR 값이 큰 폭으로 변할 가능성이 높아지게 된다. 즉, 페이딩이 빨라질수록 심볼 주기 간격으로 측정된 수신 SNR 값들 사이의 상관값이 적어지게 되는데, 빠른 페이딩 상태가 되면 상관값이 거의 0이 되어서 독립적이 된다. 이렇게 페이딩 프로세스가 독립적이면 채널은 i.i.d. 채널이 된다. 수치 해석으로 구한 BER은 i.i.d. 환경에서 구한 오율이라고 생각할 수 있으므로 ξ 가 커져서 채널이 i.i.d. 채널에 가까워질수록 시뮬레이션으로 구한 오율이 수치 해석으로 구한 오율로 근사하게 된다. 반대로, ξ 가 작아질수록 페이딩은 느리게 변화하므로 측정된 수신 SNR 값들 사이의 상관값이 커지게 된다. 이럴 경우 채널은 채널에서 버스트하게 발생하는 채널이 되는데, 이런 채널에서의 시스템 오율 성능은 저하되게 된다. 이런 페이딩의 시간 상관으로 인한 버스트 에러를 대처하기 위해서는 인터리버를 채택하거나 채널 부호화 기법을 사용하게 된다. 따라서 FSMC 모델은 시간 상관성을 가지는 무선 채널에서 이와 같은 인터리버나 부호화 기법의 효과를 확인하는데 사용되기 적합한 무선 채널 모델

로 사용될 수 있다.

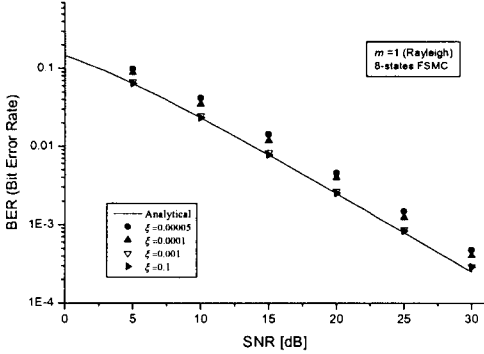


그림 6. 상태 천이 지수 ξ 의 변화에 따른 BPSK 시스템의 BER.

Fig. 6. BER of BPSK system for different values of ξ .

IV.2 FSMC 모델을 이용한 시뮬레이션

현재의 무선 통신 시스템에서 일반적인 단말기의 이동 속도나 데이터 심볼율을 고려할 때, 한 코드워드(codeword) 블록을 전송할 시간 동안에 FSMC 모델에서 상태간의 천이가 발생할 확률은 아주 작게 된다. 이런 경우 코드워드 블록을 전송하는 기간 동안에는 코드워드를 전송하기 시작할 때의 상태에 계속 머무른다고 가정할 수 있다. 이런 가정을 하면 FSMC 모델에서의 평균 코드워드 오류(CER: Codeword Error Rate)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_w = \sum_{i=1}^N P_i P_c(p) \quad (9)$$

여기서, N 은 state 개수, P_i 는 식 (2)으로 구해지는 S_i 상태에서의 정상 상태 확률이고, $P_c(p)$ 는 심볼 오류 p 를 가지는 이진 대칭 통신로에 있어서의 코드워드 오류를 나타낸다.

t 개의 랜덤 에러를 정정 가능한 (n, k) 랜덤 에러 정정 부호를 사용 시 $P_c(p)$ 는 다음과 같은 식으로 구해진다 [11].

$$P_c(p) = 1 - \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} (1-p)^{n-i} p^i \quad (10)$$

그림 7은 $m = 1$ 인 Nakagami-m 페이딩 환경에

서 2개 비트 에러를 정정할 수 있는 (15,7) 랜덤 에러 정정 부호를 사용했을 경우, ξ 의 변화에 따른 P_w 의 변화에 대한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 ξ 가 커질수록 랜덤 에러 정정 부호의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 ξ 가 커질수록 Markov 체인의 파라미터인 상태 천이 확률이 증가하게 되고, 이에 따라 에러들이 보다 산발적으로 발생하기 때문이다. 즉, 이전 상태가 평균 심볼 오류율이 높은 상태(SNR 값이 낮은 상태)였더라도 다음에 측정할 수신 SNR 값은 페이딩이 빨리 변함에 따라 평균 오류율이 낮은 상태(SNR 값이 높은 상태)로 천이할 수 있으므로 버스트 에러가 발생하지 않게 된다. 하지만, 반대로 ξ 가 작은 경우에는 페이딩이 느리게 변하기 때문에, 한번 심볼 오류율이 높은 상태에 들어가면 오랫동안 그 상태에 머무르기 때문에 버스트 에러가 발생하기 쉽게 된다. 블록 부호는 산발적으로 발생한 에러는 효과적으로 오류 정정 능력을 발휘하지만, 버스트 에러에는 효과적으로 대처하지 못하기 때문에, ξ 가 높은 경우가 ξ 가 낮은 경우보다 부호화 이득을 크게 얻을 수 있다.

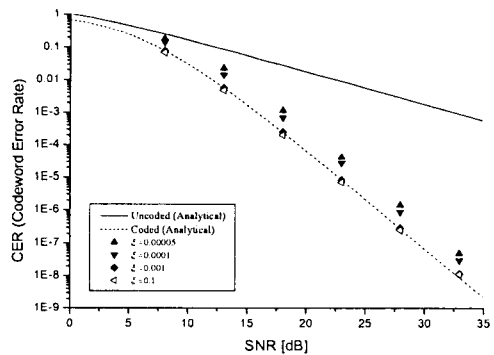


그림 7. (15,7) 랜덤 에러 정정 부호 사용시 평균 SNR에 대한 CER ($m = 1$).

Fig. 7. CER vs. average SNR for the (15,7) random error correcting code ($m = 1$).

V. 결 론

본 논문에서는 Nakagami-m 페이딩 채널을 FSMC로 모델링 하였다. FSMC 모델은 시간 상관성을 가지는 느린 페이딩부터 i.i.d. 채널로 표현되

는 빠른 페이딩까지 상태 천이 확률의 변화를 가지고 여러 페이딩 채널을 효과적으로 표현할 수 있음을 확인하였다. 최근의 데이터 통신에서의 데이터 전송속도가 수백 kbps로 높다는 것을 감안한다면 대부분의 통신 시스템이 느린 페이딩의 영향을 받는다고 할 수 있는데, 이런 느린 페이딩 환경에서는 인접 상태로의 천이만 발생하는 간단한 Markov 체인으로 페이딩 채널을 모델링 할 수 있음을 확인하였다. 시뮬레이션으로 구한 결과는 수치 해석으로 얻은 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었고, 시뮬레이션을 통해 FSMC 모델이 시간 상관성이 존재하는 무선 채널에서의 부호화 이득을 확인하는데 유용하게 사용될 수 있음을 보였다. FSMC 모델을 사용하면 여러 페이딩 채널 환경에서 부호화 효율, 채널 용량 그리고 인터리버의 성능 등을 구하는데 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2004년 과학기술부·한국과학재단 지정 경기도 지역협력연구센터(RRC)인 한국항공대학교 인터넷 정보검색 연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

[1] H. Bai and M. Atiquzzaman, "Error modeling schemes for fading channels in wireless communications: A survey," IEEE Commun. surveys & tutorials, vol. 5, no.2, fourth quarter, 2003.

[2] A. Rameshm, A. Chockalingam and L. B. Milstein, "A first-order Markov model for correlated Nakagami-m fading channels," in Proc. of ICC 2002, vol. 5, pp.3413-3417, May 2002.

[3] M. Zorzi, R. R. Rao, and L. B. Milstein, "On the accuracy of first-order Markov model for data transmission on fading channels," in Proc. IEEE ICUPC'95, pp.211-215, November 1995.

[4] H. S. Wang and N. Moayeri, "Finite-state Markov channel - A useful model for radio communication channels," IEEE Trans. on Veh. Tech., vol. 44, pp.163-171, February 1995.

[5] F. Babich and G. Lombardi, "On verifying first-order Markovian model for the multi-threshold success/failure process for Rayleigh Channel," in Proc. of PIMRC'97, pp.12-16, September 1997.

[6] J. Arauz, P. Krishnamurthy, "A study of different partitioning schemes in first order Markovian models for Rayleigh fading channels," in Proc. of WPMC 2002, vol. 1, pp.277-281, October 2002.

[7] C. H. Snow, "A software-based fading channel simulator," B.E.Sc. thesis, Univ. of Western Ontario, London, Canada, 2003.

[8] M. Nakagami, "The m-distribution-A general formula of intensity distribution of rapid wave propagation," in Statistical Methods in Radio Wave Propagation, ed. W. G. Hoffman, pp. 3-36, Pergamon Press, Oxford, England, 1960.

[9] N. B. Mehta and A. Goldsmith, "Performance analysis of link adaptation in wireless data networks," in Proc. of GLOBECOM 2000, vol. 3, pp.1422-1426, November 2000.

[10] F. Babich, O. E. Kelly, and G. Lombardi, "Generalized Markov Modeling for Flat Fading," IEEE Trans. on Commun., vol.48, pp. 547-551, April 2000.

[11] G. Sharma, A. Dholakia, and A. Hassan, "Simulation of error trapping decoders on a fading channel," in Proc. of VTC'96, pp.1361-1365, May 1996.

저자소개

조용범(Yong-bum Cho)



1996년 2월 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업(공학사)
1998년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 졸업(공학석사)

2003년 9월~현재 한국항공대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정 재학
1996년 3월~2003년 5월 (주)스탠더드텔레콤 연구소 CDMA 개발실
※관심 분야 : Wireless TCP, Mobile IP, Ad-Hoc network



노재성(Jae-sung Roh)

1990년 2월 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업(공학사)
1992년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 졸업(공학석사)

2000년 8월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 졸업(공학박사)
1992년 3월~1997년 5월 한화정보통신(주) 연구소
2000년 9월~현재 서일대학 정보통신 전공 조교수
※관심 분야 : 무선데이터 통신, 모바일 인터넷, 멀티미디어 통신



조성준(Sung-joon Cho)

1969년 2월 한국항공대학 항공통신공학과 졸업(공학사)
1975년 2월 한양대학교 대학원 졸업 (공학석사)
1981년 3월 오사카대학 대학원 통신공학과 졸업(공학박사)

1972년 8월~현재 한국항공대학교 대학원 전자·정보통신·컴퓨터 공학부 교수
※관심 분야 : 무선통신, 이동통신, 환경전자공학