

이동 통신을 위한 시간선택성 다중경로 페이딩 채널 모델의 특성 평가

정회원 박수진*, 고석준*, 이경하**, 최형진*

Characteristics Analysis of the Time Selective Multipath Fading Channel Model for Mobile Communication

Soo-Jin Park*, Seock-Jun Ko*, Kyung-Ha Lee**, Hyung-Jin Choi* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 시간 선택성 다중경로 이동 무선 채널을 다양한 방법으로 모델링하고 그에 따른 여러 가지 특성 평가를 제시하였다. 모델링 방법에는 Jake's 방식과 시간 영역에서 독립적인 두 개의 가우시안 잡음 발생기와 정형 필터(shaping filter)를 사용하는 방식 및 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 있다. 이 세 가지 모델링 방법의 성능을 진폭의 자기상관함수, 상호상관함수, 누적분포함수(Cumulative Distribution Function), 레벨 교차율(Level Crossing Rate), 평균 페이딩 지속 시간(Average Duration of Fades), 위상차의 확률 밀도, 위상차의 자기상관함수 등의 측면에서 시뮬레이션하고 그 결과치와 이론치간의 특성 비교를 제시하였다. 특히, 확산 대역 시스템을 고려했을 때 이상적인 채널 추정을 가정한 레이크 수신기에서의 BER 성능을 다중경로 갯수에 따라 보임으로써 여러가지 채널 모델링 중에서 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 이동 무선 채널을 모델링 하는데 있어 가장 적합하다는 것을 보였다. 마지막으로 비대칭 도플러(Doppler) 스펙트럼을 모델링 하는 것도 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 편리하다.

핵심단어 : *Time selective multipath fading channel, Channel modeling, CDF, LCR, ADF, Rake receiver*

ABSTRACT

This paper presents various modeling methods of time selective multipath fading channel for mobile radio communication and its characteristics analysis. First modeling methods are Jake's method. Second method is using two independent gaussian random generators and shaping filter in the time domain, Another method is filtering in the frequency domain. Characteristic comparisons between simulation result values of three modeling method and theoretical values for auto-correlation and cross-correlation of envelope, Level Crossing Rate, Average Duration of Fades, auto-correlation of phase difference, probability density of phase difference are presented. In the CDMA system, BER performance according to the number of multipath is presented at RAKE receiver assumed ideal channel estimation and it has been shown that filtering method in the frequency domain is most appropriate modeling method for mobile radio communication. Finally, filtering method in the frequency domain is useful modeling method for asymmetrical Doppler power spectrum.

1. 서론

현재 다각적으로 기술 개발이 진행되고 있는 개

인 휴대 통신에서 채널 모델링에 대한 중요성은 크게 부각되고 있는 실정이다. 무선 이동 채널은 큰 규모의 페이딩(large-scale fading)과 작은 규모의 페

* 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 통신시스템연구실
논문번호: 00413-1023, 접수일자: 2000년 10월 23일

** 삼성전자 무선개발팀

이딩(small-scale fading)으로 구분되어 진다⁸⁾. 큰 규모의 페이딩에는 주로 경로손실과 그늘현상이 포함되며, 작은 규모의 페이딩에는 도플러 쉬프트(Doppler Shift), 도플러 확산(Doppler Spread), 시간확산(Time Spread)과 같은 요소들이 존재한다. 또한, 작은 규모의 페이딩은 주파수 선택성 페이딩과 시간 선택성 페이딩으로 나누어 모델링한다. 무선 이동 채널은 일반적으로 도심 지역에서 기지국과 이동국 사이에 직진 경로(line-of-sight)는 없는 것으로 보며 장애물로 인한 반사, 굴절, 산란 등으로 다중 경로 페이딩 현상을 나타낸다. 시간 선택성 페이딩은 레일리(Rayleigh) 분포를 갖는 진폭과 균일 분포를 갖는 위상으로 구성된다. 페이딩의 진폭과 위상은 도플러 확산에 의해 발생하는 현상으로 시간의 함수로 나타난다. 또한, 직진 경로가 존재하는 경우는 도플러 확산이 도플러 쉬프트와 같이 일정 주파수 값으로 나타난다. 페이딩 채널에서의 시간에 따른 위상 변화는 대부분 도플러 확산에 의한 위상 변화를 일컫는다. 현재까지 많은 시뮬레이션 모델들이 이동 무선 채널의 시간 선택성 레일리 페이딩 특성을 구현하기 위해 제안되었다. 본 논문에서는 다중 경로 채널을 다양한 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 모델링하고 여러 가지 특성 평가를 제시하였다.

Jake는 다른 주파수를 가진 여러 개의 발진기와 증폭기를 이용하여 도심 환경에서 다중경로로 수신된 신호를 생성하는 모델을 구현하였다²⁾. Jake's 모델은 하드웨어 구현이 용이하고 다양한 채널 상태를 묘사할 수 있고 성능도 이론치와 거의 근사하다. 그러므로 오늘날에도 여전히 폭넓게 사용되고 있지만 상호 상관값이 크다는 단점 때문에 독립적인 다중 경로 채널 모델링에 적합하지 않다.

Arredondo등은 두 개의 독립적인 가우시안 잡음 발생기와 비선형 정형 필터를 사용하여 도심환경에서 다중경로로 수신된 신호를 생성시키는 방법을 제안하였다³⁾. 이 방식은 독립적인 가우시안 잡음 발생기에서 신호를 발생시켰으므로 상호상관값이 작다는 장점이 있지만 정확한 페이딩 채널을 만들기 위해서는 고차 필터를 만들어야 하는데 고차 필터를 만들기 위해서는 많은 필터계수가 필요하게 되어 시뮬레이션 수행속도가 느려지게 된다는 단점이 생기게 된다. 그러므로 원하는 도플러 스펙트럼 특성을 구현하기가 쉽지 않다. 또한, Jake's 방식만큼 다양한 채널 상태를 묘사할 수 없다는 단점이 있다. 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 미국 PCS -

JTC 모델을 근거로 시뮬레이션 하였다. JTC 모델은 최대 도플러 주파수의 4배되는 샘플링 주파수를 가지는 32차 IIR 필터 계수를 제시하고 있다.

다른 채널 모델링 방법으로는 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 있다⁴⁾. 이 방식은 주파수 영역에서 발생된 독립적인 가우시안 잡음을 도플러 스펙트럼에 통과시킨 후 IFFT를 이용하여 페이딩 신호를 생성시킨다. IIR 필터를 이용한 방식과 달리 주파수 영역에서 필터링 하는 방식은 파라메타 값을 조절하여 다양한 샘플링 주파수 및 도플러 주파수를 생성할 수 있다. 주파수 영역에서 필터링 하는 방식은 IFFT를 이용하므로 계산량이 조금 많아지고 IFFT 블록간의 연속성을 보장하기 위해서 Windowing이 필요하다. 그러나 주파수 영역에서 필터링 하는 방식은 Jake's 모델의 상호상관값이 크다는 단점을 독립적인 가우시안 잡음을 발생시키므로써 극복할 수 있고, IIR 필터를 이용한 방식에서 원하는 스펙트럼 특성을 구현하기가 어렵고 유연성이 떨어진다는 단점을 주파수 영역에서 도플러 스펙트럼을 직접 이용하므로써 극복할 수 있다. 비대칭 도플러 스펙트럼도 쉽게 모델링할 수 있다. 또한, 현재 컴퓨터의 계산속도가 빨라져서 IFFT 계산량도 그리 큰 문제가 되지 않는다. 본 논문에서는 IFFT 블록간의 연속성을 보장하기 위해서 해밍 윈도우(Hamming Window)를 사용하였다. 본 논문에서는 상기 3가지 방식에 대해 성능 평가하여 비교하므로써 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 채널 모델링으로 가장 적합하다는 것을 보였다. 2장에서는 IIR 필터를 이용한 방식에 대해 간략히 설명하였고 3장에서는 주파수 영역에서의 필터링 방식을 제시하였다. 4장에서는 비대칭 도플러 스펙트럼의 개념을 설명하였고 5장에서는 각각의 경우의 성능 평가를 모의 실험을 통하여 분석하였으며 6장에서 결론을 맺었다.

II. IIR 필터를 이용한 방식

IIR 필터를 이용한 방식은 많이 사용하는 방식으로써 시간 영역에서 두 개의 가우시안 잡음을 이용

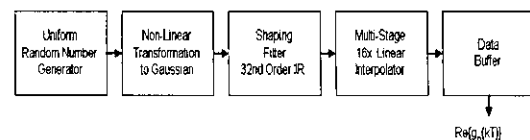


그림 1. IIR 필터를 이용한 채널 모델링 방식의 블럭도

하여 IIR 필터링을 하므로써 독립적인 레일리 페이딩 다중 경로 신호를 생성할 수 있다. 본 논문에서는 미국 PSC-JTC 모델을 근거로 모의 수행을 하였다.

JTC 채널 모델에서는 옥내와 옥외 각각의 경우에 대해서 32차 IIR 필터 계수를 제시하고 있다. 이 모델은 샘플링 주파수가 최대 도플러 주파수의 4배로 정해져 있다. 모델 과정을 살펴보면, 그림 1과 같이 균등하게 분포하는 랜덤 시퀀스를 가우시안 분포로 변형시켜서 최대 도플러 주파수의 4배의 샘플링 주파수를 가지는 32차 IIR 필터를 통과시킨다. 샘플링 주파수를 높이기 위해 반드시 보간기를 사용하여야만 한다. 그림 1은 실수 부분만을 보이고 있으나 허수 부분도 독립적으로 동일하게 생성한다. 또한, IIR 필터를 이용한 JTC 채널 모델은 샘플링 주파수 및 도플러 주파수를 조절하려면 변형된 Yule-Walker 방정식을 사용하여 탭계수를 다시 받아야하는 제약이 있다.

III. 주파수 영역에서 필터링을 이용한 방식

주파수 영역에서 필터링하는 역방향 고속 Fourier 변환을 이용한 채널 모델에 대한 블록도를 그림 2에 나타내었다. 이산 Fourier 변환의 선형 특성에 의해 시간 영역에서 가우시안 분포를 따르면 가우시안 분포의 Fourier 변환은 주파수 영역에서도 가우시안 분포를 가진다. 그러므로 주파수 영역에서 발생된 가우시안 시퀀스와 도플러 스펙트럼을 직접 이용하므로써 Fourier 변환은 생략이 가능하다. 먼저, 2개의 가우시안 분포를 갖는 난수를 발생한다. 각각 I-채널과 Q-채널의 페이딩 신호를 생성하고 이때 가우시안 잡음은 평균이 0이고 동일한 전력 스펙트럼을 가져야만 한다. 정형 필터의 주파수 응답은 $\sqrt{S(f)}$ 이다. 여기서 $S(f)$ 는 다음과 같다.[1]

$$S(f) = \begin{cases} \frac{E^2}{\pi f_D} \left[1 - \left(\frac{f}{f_D} \right)^2 \right]^{-1/2}, & f \leq f_D \\ 0, & f > f_D \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 E^2 은 수신된 페이딩신호의 평균 전력으로서 1로 설정하였고 f_D 는 최대 도플러 주파수이다. 즉, 이 필터의 차단 주파수는 도플러 주파수를 의미한다. 다음단에서, I채널과 Q채널을 역방향 고속 Fourier 변환하므로써 시간 영역에서 시간 선택성 페이딩을 얻을 수 있다. 또한, 시간영역에서 해밍 윈도우를 사용하여 IFFT의 비선형(non-linear)

특성을 제거할 수 있었다

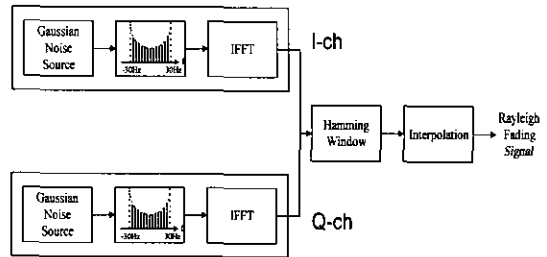


그림 2. 주파수에서 필터링을 이용한 방식의 블록도

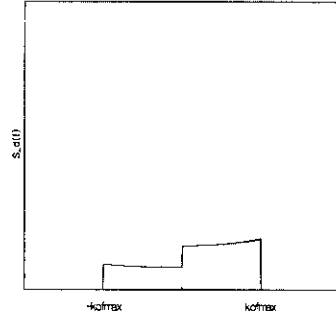
최대 도플러 주파수(f_D) 이후로는 0을 입력하므로써 역방향 고속 Fourier 변환은 보간기의 역할을 한다. 또한, 도플러 전력 스펙트럼 밀도함수를 묘사하는 개수와 최대 도플러 주파수 이후에 대입한 0의 개수를 조절하므로써 다양한 채널 상태를 묘사할 수 있다. 결과적으로, IFFT를 거친 신호는 시간 선택성 페이딩으로써 레일리-분포된 진폭을 가지고 균일하게 분포된 위상 성분을 가진다. 그러므로 가우시안 잡음원의 독립적인 특성과 성형 필터의 주파수 응답을 동시에 만족하는 채널모델을 얻을 수 있다. 주파수 영역에서 필터링 하는 방식으로 생성된 각각의 페이딩 신호들은 독립성을 유지하면서도 JTC 방법에 비해 많은 필터계수를 필요로 하지 않으므로 시뮬레이션 수행 속도를 줄일 수 있으며 특히하게 주파수 영역에서 필터링하므로써 시간 영역에서의 필터링보다 계산이 용이하다는 장점이 있다.

IV. 비대칭 도플러 스펙트럼

현재 무선 이동 페이딩 채널에서 폭넓게 사용되는 도플러 전력밀도 스펙트럼(Doppler Power Spectral Density) 함수는 식 (1)의 Jake PSD이다. 이것은 수신 다중경로 신호의 입사각 θ 가 $[0, 2\pi)$ 구간에서 균일하게 분포되었다고 가정할 때 그림 3(a)처럼 대칭 모양이다. 그림 3(b)는 이동국의 움직임은 방향에 대해 뒤쪽과 앞쪽에 동일한 영역이 막혔을 경우의 도플러 PSD이다. 이러한 제한된 Jake's 도플러 PSD는 $S_b(f) = \text{rect}(f/(x_0 f_{max})) \cdot S_{\text{Jake}}(f)$ 로 나타낸다. 여기서 $0 < x_0 \leq 1$ 이다. 만약 다중경로 신호의 일부분이 물체들에 의해 막히고 흡수된다면 도플러 PSD는 비대칭의 형태가 될 것이다^[6,7]. 비대칭 도플러 PSD의 예가 그림 3(c),(d)에 나타나 있다. 그림 (c)의 도플러 PSD는 $S_c(f) = 2[S_{\text{Jake}}(f) + S_b(f) + \text{sgn}(f) \cdot$

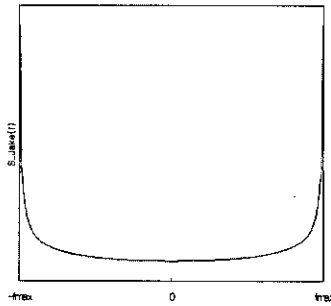
$S_{jake}(F) - \text{sgn}(f) \cdot S_b(f)$ 로 나타낼 수 있다. ($\pi - \alpha$, $\pi + \alpha$)을 제외한 모든 영역에서 균일하게 입사하는 경우에 해당한다. 여기서 α 는 인자 $x_o = f_{\min}/f_{\max}$ ($0 < x_o \leq 1$)에 의존한다. (특히, $x_o = 1$ 에 대해서 $\alpha = 0$) 그림(d)의 도플러 PSD는 $S_d(f) = 2[1 + \text{sgn}(f) \cdot \sin \theta] \cdot S_b(f)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $\theta \in (0, \pi)$ 는 상관인자라고 한다.

Jake's 방식과 JTC 모델은 비대칭 도플러 PSD를 구현하기 위해서는 구조를 변경하거나 필터 계수를 변화시켜야 한다. 그러나 주파수 영역에서 필터링하는 방식은 도플러 PSD를 직접 이용하므로 쉽게 비대칭 도플러 PSD를 구현할 수 있다.

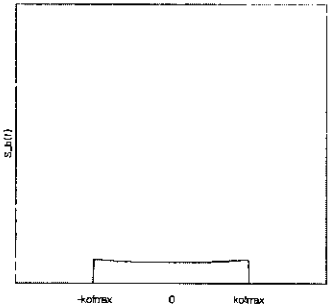


(c) 비대칭 전력밀도 스펙트럼

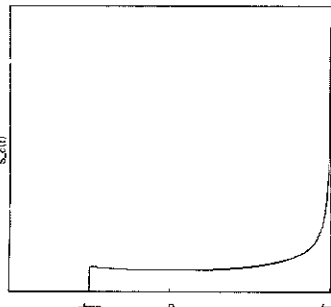
그림 3. 다양한 도플러 전력밀도 스펙트럼 함수



(a) Jake's 전력밀도 스펙트럼



(b) 제한된 Jake's 전력밀도 스펙트럼



(d) 비대칭 전력밀도 스펙트럼

V. 시뮬레이션 결과 및 특성 분석

이동 무선 채널의 임펄스 응답, $h(\tau, t)$ 은 WSSUS(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) 조건을 만족하는 평균이 "0"인 백색 가우시안 프로세스로 모델링 된다^[5]. 등가 저역통과 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h(\tau, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n(t) e^{j\phi_n(t)} \cdot \delta[\tau - \tau_n(t)] \quad (2)$$

여기에서 $\alpha_n(t)$, $\phi_n(t)$, $\tau_n(t)$ 는 각각 n번째 경로 이득, 위상 및 경로 지연을 나타낸다. WSSUS 조건에 따라, 서로 다른 경로 지연과 시간에 대한 등가 저역통과 임펄스 응답의 자기상관함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{hh}(\tau_1, \tau_2; t_1, t_2) = E\{h(\tau_1; t_1)h(\tau_2; t_2)\} = R_{hh}(\tau_1; \Delta t)\delta(\tau_1 - \tau_2) \quad (3)$$

위 식에 알 수 있듯이 이동 무선채널은 상관성이 서로 없는 uncorrelated scattering 조건에 따라 경로 지연이 서로 동일한 경우 ($\tau_1 = \tau_2$)에 대해서만 상관성을 갖는다. 또한 wide-sense stationary process ($\tau = \tau_1(t) = \tau_2(t)$, $t_1 - t_2 = \Delta t$) 조건에 의해 특정 경로 지연에서의 자기 상관값은 시간차에 τ 의해 결정된다. 송신신호가 무변조 단위계단형 신호이면 WSSUS를 통과한 기저대역 수신신호의 수식적 모델은 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n(t) e^{-j\phi_n(t)} \quad (4)$$

또한, 통과대역 수신신호의 수식적 모델은 다음과

같다.

$$x(t) = r_I(t) \cos 2\pi f_m t - r_Q(t) \sin 2\pi f_m t \quad (5)$$

여기서, $r_I(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \cos \phi_n(t)$,

$r_Q(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \sin \phi_n(t)$ 이다. $r_I(t)$ 와 $r_Q(t)$ 는 서로 독립적인 가우시안 랜덤 프로세스이며 각 경로마다 독립적이다.

그림 4은 여러 가지 채널 모델 방식에 대한 진폭의 자기상관함수를 보였다. 입력신호의 입사각 θ 가 $[0, 2\pi)$ 에서 균일하게 분포되어 있다고 가정한다면 자기상관함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{r_{r_I}} &= \frac{\Omega_p}{2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(2\pi f_m \tau \cdot \cos \theta) d\theta \\ &= \frac{\Omega_p}{2} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(2\pi f_m \tau \cdot \cos \theta) d\theta \quad (6) \\ &= \frac{\Omega_p}{2} J_0(2\pi f_m \tau) \end{aligned}$$

여기서, $\frac{\Omega_p}{2}$ 는 모든 다중경로 성분으로부터 수신된 총 평균 전력이고 $J_0(x)$ 는 zero-order Bessel function of the first kind이다.

Jake's 모델은 오실레이터의 개수가 16개의 경우에 대해서 모의 실험하였다. 두 페이딩 신호간의 시간 지연이 커져감에 따라서 이론치와 차이가 커지는 것을 알 수 있다. IIR 필터를 이용한 방식의 자기상관함수는 Jake's 모델보다는 오차가 작지만 이론치와 약간의 차이가 생기는 것을 알 수 있다. 주파수 영역에서의 필터링 방식의 자기상관함수는 다른 두 가지 방식보다 이론치와 근사한 값을 갖음을 알 수 있다. 결과적으로 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 다른 방식에 비해 이론적 채널 특성에 보다 근접함을 확인할 수 있다.

그림 5는 여러 가지 채널 모델 방식에 대한 상호상관함수를 보였다. 자기상관함수와 동일한 가정으로 상호상관함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{r_{r_Q}} &= \frac{\Omega_p}{2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(2\pi f_m \tau \cdot \cos \theta) d\theta \quad (7) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Jake's 모델은 다른 주파수를 가진 여러 개의 발진기와 증폭기를 이용하여 다중경로로 수신된 신호를 생성하므로 상호상관함수의 값이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 그러므로 독립적인 다중 경로 페이딩을 생성하는데 부적합하다^[5]. IIR 필터를 이용한

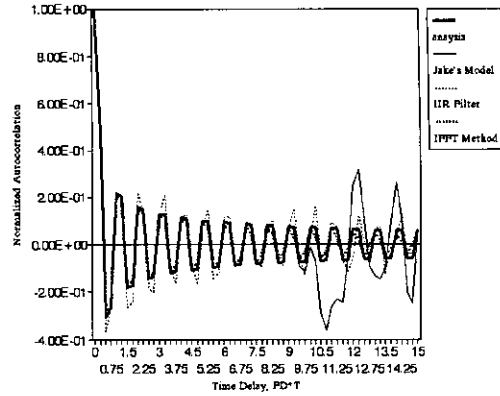


그림 4. 다양한 채널 모델링 방식에서 진폭의 자기상관함수

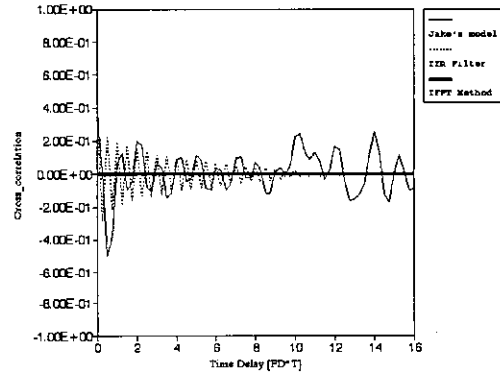


그림 5. 다양한 채널 모델링 방식에서의 상호 상관 함수

방식과 주파수 영역에서 필터링하는 방식의 상호상관함수는 두 방식 모두 독립적인 두 개의 가우시안 잡음 발생기를 이용하므로 Jake's 모델에 비해 상호상관 함수가 이론치인 0값으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서, 주파수 영역에서 필터링 하는 방식은 다중 경로 채널에서 각각의 경로에 대한 독립적인 페이딩을 생성할 수 있고 Jake's 방식의 단점을 보완 할 수 있다.

그림 6는 특성 평가로서 1차 통계특성인 누적 분포 함수(CDF)를 나타내고 있다. 누적 분포 함수는 신호가 특정 신호 레벨보다 아래에 있을 확률($P(R \leq R_s)$)로 정의된다. 이론값은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Prob}\{R \leq R_s\} = \int_0^{R_s} p(R) dR = 1 - \exp\left(-\frac{R_s^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

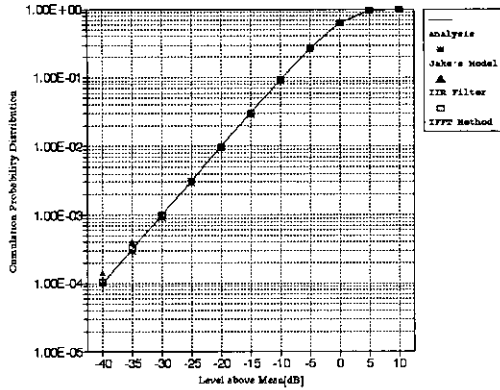


그림 6. 다양한 채널 모델링 방식에서의 누적 분포 함수

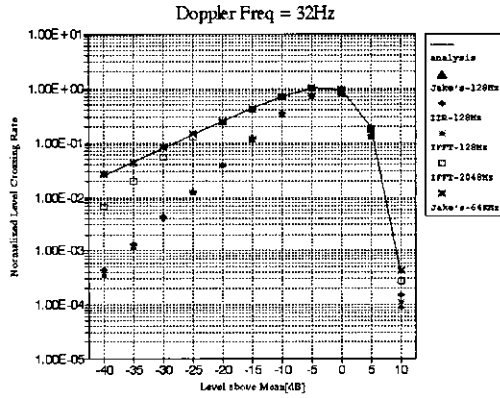


그림 7. 다양한 채널 모델링 방식에서의 레벨 교차율

누적 분포 함수는 채널의 1차 특성으로 3방식 모두 이론치와 근사한 값을 나타내고 있다.

그림 7은 채널의 2차 통계특성 중에서 레벨 교차율(LCR)을 보여주고 있다. 레벨 교차율은 수신신호가 단위 시간당 특정한 신호 레벨과 양의 기울기 방향으로 교차하는 횟수로서 연접에러의 빈도를 나타낸다. 레벨 교차율의 이론적인 값은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{R_s} = \sqrt{2\pi} f_D \left(\frac{R_s}{\sqrt{2}\sigma} \right) \exp\left(-\frac{R_s^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

여기서, R_s 는 특정한 신호 레벨을 나타내며, f_D 는 최대 도플러 주파수를 의미한다. $\sqrt{2\pi} f_D$, σ^2 는 각각 정규화 인자와 수신된 페이딩 신호의 평균 전력을 가리킨다^[1]. 최대 도플러 주파수는 32Hz일 경우에 대해서 모의 수행 하였다. Jake's 모델은 샘플링 주파수에 제약을 받지 않기 때문에 최대 도플러

주파수에 상관없이 모든 영역에서 이론치와 근사한 특성을 나타내고 보간도 필요하지 않다. IIR 필터를 이용한 방식은 최대 도플러 주파수의 4배로 샘플링 주파수가 고정되어 있으므로 샘플링 주파수는 128Hz이다. IFFT를 이용한 주파수 영역에서 필터링하는 방식도 도플러 주파수를 32Hz로 같게 하고 여러 샘플링 주파수에서 레벨 교차율을 보였다. 샘플링 주파수가 128Hz로 동일하다면, 모든 모델링 방식이 거의 동일한 레벨 교차율 특성을 나타낸다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 두 방식 모두 채널 특성이 이론치와 차이를 나타낸다. 위의 결과는 최대 도플러 주파수의 4배인 샘플링 주파수 값이 작 으므로해서 채널을 정확히 묘사하는데 있어서 다소 제약이 있음을 알 수 있다. 주파수영역에서 필터링 하는 방식은 IIR 필터를 이용한 방식의 단점을 IFFT하는 블록의 양의 변화로 유연하게 구현할 수 있으므로 보간하는 양을 줄일 수 있다.

그림 8은 평균 페이딩 지속시간을 나타내고 있다. 평균 페이딩 지속 시간은 수신신호가 특정한 신호 레벨 아래에 있을 평균적인 시간을 말하는 것으로 수신 신호 포락선의 깊은 정도를 나타낸다. 이론적인 값은 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle T_p \rangle &= \frac{1}{N_{R_s}} \text{Prob}\{R \leq R_s\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}(R_s/\sqrt{2}\sigma)f_D} \left[\exp\left(-\frac{R_s^2}{2\sigma^2}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

레벨 교차율과 동일하게 최대 도플러 주파수를 32Hz로 설정하고 샘플링 주파수를 128Hz로 하여 모의 수행 하였다. 모든 방식이 거의 같은 성능을 나타낸다. 그러나 레벨 교차율과 마찬가지로 IIR 필터를 이용한 방식은 최대 도플러 주파수가 설정된

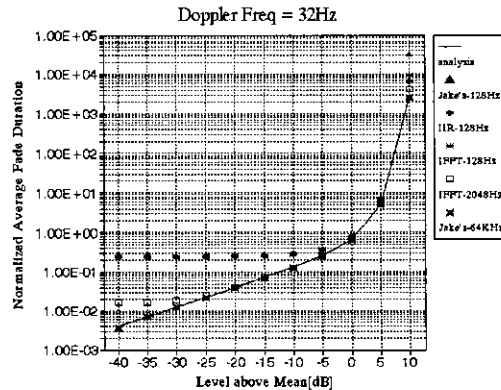


그림 8. 다양한 채널 모델링 방식에서의 평균 페이딩 지속 시간

에 따라 샘플링 주파수가 고정되기 때문에 Jake's 모델과 주파수 영역에서 필터링하는 방식보다 유연성이 떨어진다.

그림 9는 Jake's 모델과 주파수 영역에서 필터링하는 방식에서 위상차의 자기상관함수를 보였다. Jake's 모델이 주파수 영역에서 필터링하는 방식보다 이론치와 차이가 크다.

그림 10은 Jake's 모델과 주파수 영역에서 필터링하는 방식의 위상차에 대한 확률 밀도 함수를 보이고 있다. 이론치는 다음과 같다^[2].

$$p(\Delta\phi) = \frac{|A|^{1/2}}{4\pi^2\sigma_x^2} \left[\frac{(1-\beta^2)^{1/2} + \beta(\pi - \cos^{-1}\beta)}{(1-\beta^2)^{3/2}} \right] \quad (11)$$

$$= 0 \text{ otherwise}$$

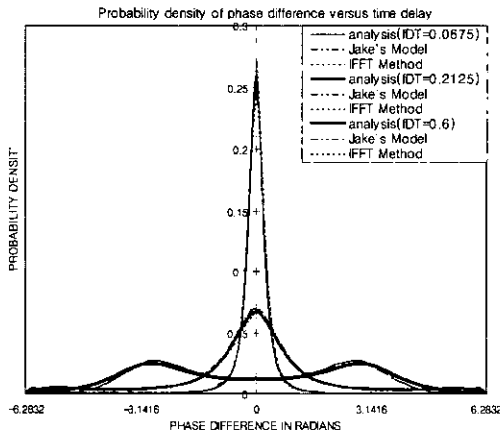


그림 9. 다양한 채널 모델링 방식에서 위상차의 확률 밀도 함수

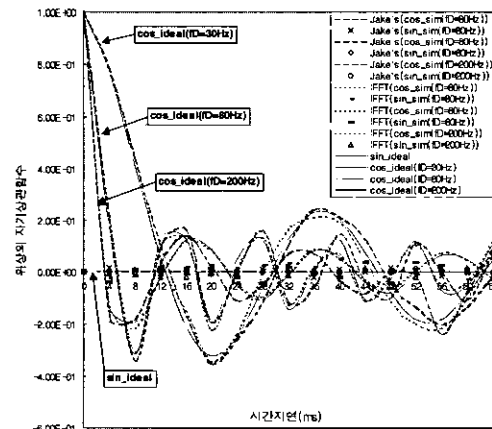


그림 10. 다양한 채널 모델링 방식에서 위상의 자기상관함수

여기서, σ_x^2 은 평균 전력 레벨,

$$|A|^{1/2} = \frac{b_0^2}{4\pi^2} [1 - J_0^2(2\pi f_m \tau)] \text{ 이고}$$

$\beta = J_0(2\pi f_m \tau) \cos \Delta\phi$ 이다. 두 방식 모두 거의 이론치와 근사하다.

그림 11과 12는 비대칭 도플러 PSD의 특성평가를 나타낸다. 채널 모델은 주파수 영역에서 필터링하는 방식을 사용해서 비대칭 도플러 PSD를 구현하였다. 그림 11은 그림 3(c)의 $x_o = f_{min}/f_{max}$ ($0 < x_o \leq 1$)에 따른 레벨 교차율을 보여준다. x_o 가 클수록 레벨 교차율이 크다. 그림 12는 그림 3(d)의 $x_o = 1/2$ 일 때 θ 에 따른 레벨 교차율을 보여준다. θ 가 0° 에 가까울수록 레벨 교차율이 큰 것을 알 수 있다.

CDMA 시스템에서 다중 경로의 페이딩 효과를 극복하기 위해 다기화(Diversity) 기술을 이용한다^[8]. 그림 13은 최대 도플러 주파수가 80Hz일 경우 Jake's 모델과 주파수 영역에서 필터링하는 방식으로 채널 모델링을 하여 이상적인 채널 추정을 가정한 레이저 수신기의 BER 성능 평가를 보인다. 또한, Maximal Ratio Combiner(MRC)에서의 다기화를 사용하였을 경우에 대한 기존 분석에서의 결과와 동일하게 다기화 개수가 증가함에 따라서 성능이 향상되는 것도 보인다. BER의 이론값은 각각 다음과 같다.

(1) 경로가 1개일 경우

$$P_b = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma_b}{1 + \gamma_b}} \right) \quad (12)$$

여기서, $\bar{\gamma}_b$ 는 비트당 SNR이다.

(2) 다중 경로의 개수가 3개일 경우

$$P_b = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \pi_k \left[1 - \sqrt{\frac{\gamma_k(1-\rho_\gamma)}{2 + \gamma_k(1-\rho_\gamma)}} \right] \quad (13)$$

여기서, $\pi_k = \prod_{i=1, i \neq k}^3 \frac{\bar{\gamma}_k}{\bar{\gamma}_k - \bar{\gamma}_i}$, $\bar{\gamma}_k$ 는 k 번째 경로에 대한 평균 SNR을 나타낸다. 다중경로 전력 프로파일은 첫 번째 경로의 전력이 0.4, 두 번째는 0.4, 세 번째는 0.2의 값을 가질때의 BER 결과값들을 나타내고 있다.

이 그림에서 경로의 개수가 1개일 경우는 Jake's 모델과 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 이론치와 거의 같은 성능을 나타내는데 비해 다중 경로의

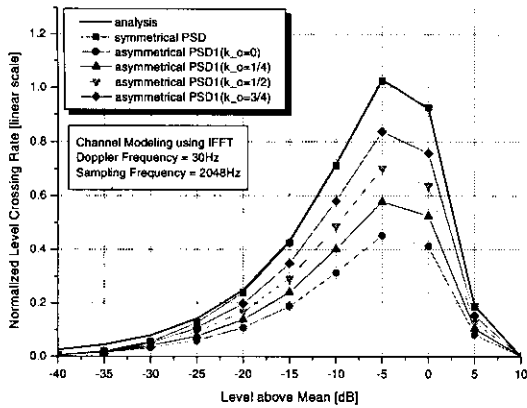


그림 11. 그림 3(c)의 비대칭 도플러 PSD에서 ρ_o 값에 따른 레벨 교차율

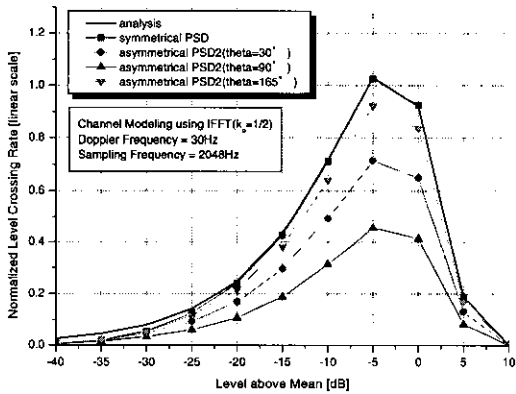


그림 12. 그림 3(d)의 비대칭 도플러 PSD에서 θ 값에 따른 레벨 교차율 >

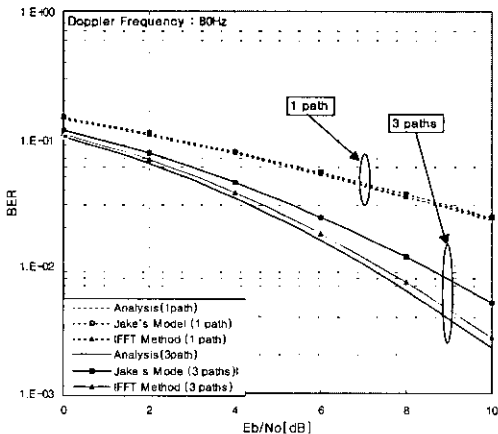


그림 13. 이상적인 채널 추정을 가정한 경우의 다중 경로 갯수에 따른 레이크 수신기의 BER 성능

개수가 3개일 경우에는 Jake's 모델이 이론치와 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 이것은 Jake's 모

델의 심각한 문제인 상호 상관 함수가 크기 때문에 발생하게 된다. 왜냐하면 다중경로가 서로 독립적이지 못하기 때문에 성능의 열화를 가져온다는 것을 잘 보여준다. 그러나 주파수 영역에서 필터링하는 방식은 가우시안 잡음에서 발생시키므로해서 상호 상관 함수가 거의 0으로 우수하기 때문에 BER 성능이 이론치와 근사하게 나타난다.

VI. 결론

본 논문에서는 이동 무선 다중 경로 채널을 모델링하고 이에 따른 특성 평가를 위해 여러 가지 방법으로 모의 수행하였다. 우선, Jake's 방식의 경우 여러 특성 평가에서 우수한 것을 볼 수 있었지만 자기 상관함수의 경우 시간 지연이 클수록, 발진기의 수가 적을수록 이론치와 차이가 생기는 것을 알 수 있었다. 또한, 가장 문제시되는 상호 상관값이 크다는 단점 때문에 다중 경로 채널 모델에는 부적합한 것을 볼 수 있었다. 독립적인 다중경로 채널을 묘사할 수 있는 IIR 필터를 이용한 방식과 주파수 영역에서 필터링하는 방식의 경우, IIR 필터를 이용한 방식에서의 자기 상관 함수는 이론치와 약간의 차이를 보였다. 또한 시간 지연이 작을 때 상호 상관 함수 역시 다소 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 주파수 영역에서 필터링하는 방식은 모든 특성평가에서 정확한 특성을 나타내었다. 특히 상호 상관 함수가 거의 0으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 채널 특성 평가로서 레벨 교차율과 평균 페이딩 주기 시간에서는 채널을 묘사해주는 샘플링 주파수가 성능에 영향을 주는 것을 알았다. IIR 필터를 이용한 JTC의 방식은 샘플링 주파수가 최대 도플러 주파수의 4배로, 채널 묘사가 정확하지 않다. 그러나 주파수 영역에서 필터링하는 방식은 IFFT하는 블록의 양을 변화시켜서 여러 샘플링 주파수를 구현할 수 있다. 그러므로 이론치에 거의 근사하게 된다. 또한, 다양한 채널 모델링 방식에서 위상차의 확률밀도 함수와 위상차의 자기상관 함수를 보였고 비대칭 도플러 전력밀도 스펙트럼 함수의 예를 보였다. 비대칭 도플러 PSD 구현면에 있어서도 Jake's 방식은 구조를 변경시켜야 하며 JTC 모델은 필터 계수를 바꿔야 한다. 그러나 주파수 영역에서 필터링하는 방식은 직접 도플러 PSD를 이용하므로 다른 방식에 비해 쉽게 구현할 수 있다. 앞으로 비대칭 도플러 전력밀도 스펙트럼에 대한 연구가 요구된다. 마지막으로, 본 논문에서는

CDMA 시스템에서 채널 모델링에 따라서 이상적인 채널 추정을 가정했을 때 RAKE 수신기의 BER 성능을 보임으로서 주파수 영역에서 필터링하는 방식이 가장 채널 모델링에 적합하다는 것을 보였다.

참 고 문 헌

[1] Kamilo Feher, *Advanced Digital Communications*. Prentice Hall, 1987.

[2] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Wiley-Interscience Publication, 1974.

[3] G. A. Arredondo, W. H. Chriss, and E. H. Walker, "A Multipath Fading Simulator for Mobile Radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-22, NO. 4, pp. 241-244, November 1973.

[4] John I. Smith, "A Computer Generated Multipath Fading Simulation for Mobile Radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-24, NO. 3, pp 39-40, August 1975.

[5] Gordon L. Stuber, *Principles of Mobile Communication*. KAP, 1996.

[6] Matthias Patzold, Ulrich Killat, Yingchun Li, and Frank Laue, "Modeling, Analysis, and Simulation of Nonfrequency-Selective Mobile Radio Channels with Asymmetrical Doppler Power Spectral Density Shapes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-46, NO. 2, pp 494-507, May 1997.

[7] Matthias Patzold, Ulrich Killat, and Frank Laue, "An Extended Suzuki Model for Land Mobile Satellite Channels and Its Statistical Properties," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-47, NO. 2, pp 617-630, May 1998.

[8] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communication*. IEEE PRESS, 1996.

[9] J. G. Proakis, *Digital Communications* McGraw Hill, 1989.

박 수 진(Soo-jin Park)

준회원

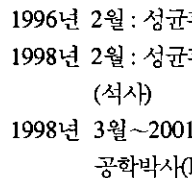


1997년 2월 : 성균관대학교
전자공학과 졸업(학사)
1997년 2월~현재 :
성균관대학교
전기전자 및 컴퓨터공학과
석사과정

<주관심 분야> 디지털통신, 신호처리, 이동 및 무선 통신

고 석 준(Seok-jun Ko)

정회원

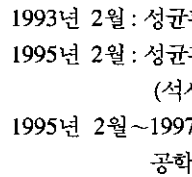


1996년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 졸업(학사)
1998년 2월 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업
(석사)
1998년 3월~2001년 2월 : 성균관대학교 전자공학과
공학박사(Ph.D)
2001년 3월~현재 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공
학부 Post Doctor 과정

<주관심 분야> 이동 및 무선통신, 디지털통신 및 동
기화 기술, IMT-2000 CDMA 시스템 개발
과 신호 처리기술 등임.

이 경 하(Kyung-ha Lee)

정회원



1993년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 졸업(학사)
1995년 2월 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업
(석사)
1995년 2월~1997년 8월 : 성균관대학교 전자공학과
공학박사(Ph.D)

1997년 9월~현재 : 삼성전자 무선개발팀
<주관심 분야> 이동 및 무선통신, 디지털통신 및 동
기화 기술

최 형 진(Hyung-jin Choi)

정회원



1974년 2월 : 서울대학교
전자공학과 졸업
1976년 2월 : 한국과학기술원
전기전자공학과 석사
1976년 3월~1979년 7월 :
(주) 금성사 중앙연구소
연구원

1979년 9월~1982년 12월 : 미국 University of

Southern California 전기공학과 공학
박사(Ph.D)

1982년 10월~1989년 2월: 미국 Lincom Corp. 근무
(연구원)

1989년 3월~현재: 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터
공학부 정교수

<주관심 분야> 디지털통신, 무선통신, 이동통신, 위성
통신 및 동기화 기술을 포함한 MODEM기
술 등임.