광대역 다중경로 실측채널에서 W-CDMA 수신 신호의 확률분포 모델

오동진, 이주석*, 장근영**, 김철성
전남대학교 컴퓨터공학과, *순천제일대학교 전자정보통신학과
**전남대학교 전자공학과
전화 : 062-530-1797/팩스 : 062-530-1809

Probability Distribution Model of Received W-CDMA Signals in the Realistic Wideband Multipath Channel

Dong-Jin Oh, Ju-Suk Lee*, Keun-Young Chang, Cheol-Sung Kim
Dept. of Computer Engineering, RRC, Chonnam National University
*Dept. of Information & Commuication, Sunchon First College
**Dept. of Electronic Engineering, Chonnam National University
email : chskim@chonnam.chonnam.ac.kr

Abstract

This paper presents a mathematical model of the output of Rake receiver of W-CDMA signals for various outdoor channel environment and different bandwidths. This mathematical model is represented as Rayleigh and noncentral chi distribution with 3 degrees of freedom. Those are obtained from the statistics of numerically generated signals. We employ Chi-square test to show how the mathematical model fits signal statistics, and confirmed that this model is appropriate for representing W-CDMA signals.

1. 서론

ITU-R(International Telecommunication Union -Radiocommunication)에서 표준화 작업이 진행중인 IMT-2000은 고품질 뿐만 아니라 제한된 조건에서 2 [Mbps] 정도의 고속 데이터 전송율을 갖는 광대역 서비스도 제공할 수 있도록 논의되고 있다. 이러한 서비스를 제공하기 위한 여러 가지 제안 중에서 W-CDMA (Wideband CDMA)가 가장 유력한 무선접속방식으로 거론되고 있으며[1], 다양한 데이터 전송률을 지원하는 W-CDMA 시스템은 데이터 전송률의 변화에 따라 전송 대역폭도 달라지게 된다. 이러한 상황에 맞추어 다른 대역폭을 갖는 W-CDMA 시스템의 성능분석에 관한 연구가 진행되고 있다[2][3]. 그러나 다양한 대역폭과 그에 따른 채널 모델들의 변화에 대한 W-CDMA 시스템의 성능 분석은 수신 신호 대한 확률분포 식을 유도하고 오류 확률식을 구하는 해석적인 방법이나 몬테카를로 모의실험방식을 사용하여 이루어지고 있다. 이와 같은 방식은 성능 분석 과정이 매우 복잡하거나 많은 시간을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 과정을 줄이기 위한 방법으로 W-CDMA 신호의 확률분포 모델을 제시하고자 한다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 2절에서 광대역 채널 모델링을 살펴보고, 광대역 다중 경로 채널 상에서의 비동기 W-CDMA 신호를 해석한다. 3절에서는 컴퓨터 모의실험을 통해서 채널 환경과 대역폭의 변화에 따른 수신 신호의 확률분포를 구하고, CDMA 수신신호의 통계적 특성을 수학적으로 모델화 한다. 그리고 Chi-square 검사를 통하여 그 적합성을 검증하고 4절에서 결론을 맺는다.

2. 광대역 다중경로 채널 모델

일반적으로 광대역 다중경로 채널은 식(1)과 같이 이산 선형 필터로 표현된다.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta(t-\tau_l) e^{j\theta_l} \qquad (1)$$

여기서 a_l은 경로세기, τ_l은 시간지연, 그리고 θ_l은 위상천이를 나타낸다[4].

본 논문에서 보다 더 실제적인 채널 모델을 공급하기 위해 광대역 다중 경로 채널 모델로 JTC 채널 모델을 선택하였다.

JTC모델은 이산적인 WSSUS(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering)채널 모델이고, 이의 채널 임펄스응답은 임펄스 신호에 대한 지연된 신호 성분들의 합으로 표현된다. 그 식은 식(2)와 같다[5].

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{p_l}\,\alpha_l \delta(t-\tau_l) e^{j\theta_l} \qquad (2)$$

p_l은 JTC 전력 지연 프로파일(power delay profile)의 l번째 요소의 전력이고, α_l과 θ_l은 서로 독립적인 zero-mean 시변 복소 가우시안 프로세스의 크기로부터 얻어진 Rayleigh 분포의 랜덤변수와 위상이다. 식(1)과 (2)의 비교로부터 $\sqrt{p_l}\alpha_l$은 경로세기, τ_l은 시간지연, θ_l은 위상천이라고 말할 수 있다.

여러 경로들의 위상 θ_l은 상호 독립적인 랜덤 변수로써 (0, 2π] 구간에서 uniform 분포를 갖고 α_l은 Rayleigh 분포를 갖는다고 가정하고, $\sqrt{p_l}$과 τ_l은 JTC 전력 지연 프로파일에서 얻을 수 있다[5],[6].

그런데 이러한 프로파일 모델을 이용하여 시스템을 평가할 때 기존의 연구에서는 시스템의 대역폭이 채널의 대역폭보다 작을 때, 한 칩 지속시간 이내의 다중경로 성분의 평균전력을 모두 더하여 한 칩에 하나의 등가적인 전력을 가진 성분으로 표현되는데[2], 본 연구는 한 칩내의 여러 다중경로들의 상대적인 위상차에 의한 영향이나 CDMA에 사용되는 확산코드의 상관함수의 특성을 고려한 방식을[3] 적용하여 각각의 다중경로 성분의 크기에 위상 그리고 CDMA에서 사용되는 상관기의 상관값까지 반영하여 한 칩내에서 다중경로 성분이 동일한 코드 위상에서 더해지도록 한다.

W-CDMA 신호를 해석하기 위해서 수신된 전체 신호는 K 개의 DS신호의 합으로 구성되고 각각은 서로 비동기적이라고 가정한다. 또한 코히어런트 BPSK변조 방식과 완벽한 전력제어와 동기화를 가정한다.

k번째 전송된 신호는 식(3)와 같다.

$$s_k(t) = m_k(t)\,c_k(t)\cos(w_o t) \qquad (3)$$

여기서 $m_k(t)$ 와 $c_k(t)$는 각각 k번째 사용자의 데이터와 확산코드를 나타낸다. 그리고 전체 수신신호 $r(t)$는

$$r(t) = \sum_{k=0}^{K-1}\sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{p_l}\,\alpha_{k,l}\, m_k(t-\tau_{k,l}) c_k(t-\tau_{k,l}) \times \cos\{w_0(t-\tau_{k,l}) + \theta_{k,l}\} + n(t) \qquad (4)$$

와 같고, 여기서 K는 전체 사용자 수이고 L은 다중경로 수이며, $n(t)$는 가산성 가우시안 잡음을 나타낸다.

원하는 사용자로부터의 신호는 k=0, 그리고 k=1, 2, …, K-1 는 그 외 사용자들로부터의 신호를 의미한다. 또한 l=0 은 첫 번째 도착한 신호를 의미하며, l=1, 2, …, L-1 은 그 외의 다중경로 신호들이다. 그리고 $\tau_{k,l}$ 은 사용자 k 의 l 번째 신호의 지연 시간을, $\theta_{k,l}$ 은 사용자 k 의 l 번째 위상천이를 나타낸다.

전형적인 상관기의 출력은 다음 식(5)와 같다.

$$Z(T) = Re\left[\int_0^T 2r(t)\,c_0(t)\cos(w_0 t+\theta_0)\,dt\right]$$

$$= Re\left[\int_0^T 2\{s_0(t)+s_i(t)+n(t)\}\,c_0(t)\cos(w_0 t+\theta_0)\,dt\right]$$

$$\equiv S' + I + N = S + N' \qquad (5)$$

Z(T)의 통계적 특성을 구하기 위해서 Z(T)의 각 성분 S, I, N의 통계적 특성을 분석해야 하는데, 본 논문에서는 편의상 간섭신호 및 가산성 잡음 성분을 합하여 가산성 잡음 성분 N′으로 간주하였다. 먼저 원하는 사용자의 신호 S의 통계적 특성을 살펴보면, S에 관한 식(6)을 유도할 수 있다[3].

$$S = |R| = \left|\sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{p_l}\;\tilde{a}_{0,l}\exp(j\,\tilde{\phi}_{0,l})\,R_c(\tau_{0,l})\right| \qquad (6)$$

식(6)에서 ~는 랜덤 변수의 표기이다.

모든 다중경로 성분을 이용하기 위해서 최대 결합비(MRC) 다이버스티 수신기를 사용한다고 하면 신호 S의 통계적 특성에 대한 식은 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$S = \sum_{i=1}^{M} G_i S_i' \qquad (7)$$

여기서 G_i는 i 번째 가지의 이득으로 신호전압 대 잡음과 간섭 전력의 비로써 다음 식으로 주어진다[7].

$$G_i = K\frac{S_i'}{N'} \qquad (8)$$

보통 MAI는 가우시안으로, 그리고 잡음은 가산성 가우시안 잡음으로 알려져 있다[8][9]. 또한 주어진 S에 대한 에러 확률과 평균 에러 확률은 다음과 같다.

$$P(error|S) = Q\left(\frac{E[Z(T)|S]}{\sqrt{Var[Z(T)|S]}}\right) = Q\left(\frac{S}{\sqrt{Var[N']}}\right) \qquad (9)$$

$$P_e = \int P(error|S)\,p(S)\,dS \qquad (10)$$

식(6)에서 L이 크면, S는 많은 랜덤변수들의 복소합의 절대치가 된다. S의 pdf, p(S)에 대한 이론적인 유도는 매우 복잡하거나 많은 시간을 요구하므로, 대신에 난수 발생기를 이용하여 S를 수치적으로 발생시켜 p(S)를 구하고, 이런 S의 통계적 특성을 이용하여 식(10)의 에러확률을 수치적으로 유도 할 수 있다.

3. 모의실험과 확률분포 모델

광대역 DS-CDMA 수신신호의 수학적 모델을 구하기 위해 JTC 채널모델에서 다른 실외 환경과 네가지의 시스템 대역폭을 갖는 수신신호를 고려한다. 채널환경은 실외 도심(outdooor urban area) 지역과 실외 거주지역(outdoor residential)에서 보행자 환경과 차량 환경이며, 그 파라메터는 아래의 표 1 과 표 2 와 같다.

표 1. JTC 채널 모델에서 실외 도심 지역의 전력 지연 프로파일

Tap	실외 도심지역 보행자환경	
	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)
1	0	0
2	200	-0.9
3	800	-4.9
4	1200	-8.4
5	2300	-7.8
6	3700	-23.9

Tap	실외 도심지역 차량환경	
	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)
1	0	0
2	200	-4.9
3	500	-3.8
4	700	-1.8
5	2100	-21.7
6	2700	-11.5

표 2. JTC 채널 모델에서 실외 주거지역의 전력 지연 프로파일

Tap	실외 주거지역 보행자환경	
	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)
1	0	0
2	200	-1.4
3	500	-2.4
4	700	-4.8
5	1100	-1.0
6	2400	-16.3

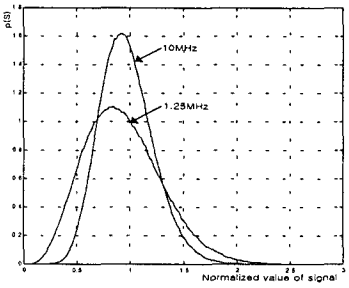
Tap	실외 주거지역 차량환경	
	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)
1	0	-3.8
2	100	0
3	500	-6.6
4	800	-1.2
5	1300	-18.4
6	1700	-23.7

식(6)을 이용하여 각 채널 환경에 대해서 S를 모의 실험으로 발생시키고 CDMA 신호들의 p(S)를 구하여 그 결과를 그림 1 과 그림 2 에 도시하였다.

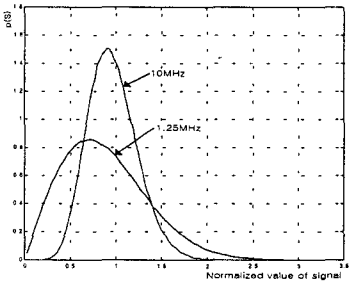
모의실험으로 발생시킨 각각의 수신신호 확률분포는 환경에 따라 변화되므로 일반적인 확률분포 모델을 chi 분포로 모델화 하였는데 1.25MHz 도심 차량환경에서 레일리 분포를 갖는 경우를 제외하고는 자유도가 3인 noncentral chi 분포로 모델화 하였다.

자유도가 3인 noncentral chi분포는 식 (11)와 같이 표현된다[6],[10].

$$f_R(r) = \frac{r^{3/2}}{\sigma^2 s^{1/2}} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_{1/2}\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \qquad (11)$$

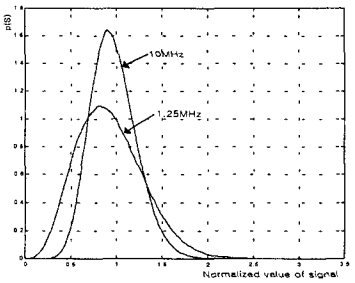


(a)

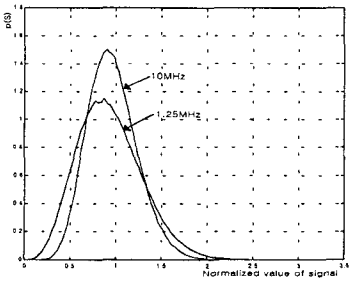


(b)

그림 1. 실외 도심 지역에서 대역폭에 따른 수신신호의 pdf (a)보행자환경 (b) 차량환경.



(a)



(b)

그림 2. 실외 주거 지역에서 대역폭에 따른 수신신호의 pdf (a)보행자환경 (b) 차량환경.

표3. 실외 도심지역에서 수신신호의 확률분포

실외 도심 보행자 환경					
대역폭	확률분포	편이	S^2	평균	분산
1.25MHz	Offset non-central Chi 분포(자유도3)	0.05	2.0	0.94	0.12
2.5MHz		0.15	3.0	0.95	0.09
5MHz		0.26	3.1	0.93	0.07
10MHz		0.28	3.6	0.97	0.06

실외 도심 차량 환경					
대역폭	확률분포	편이	S^2	평균	분산
1.25MHz	Rayleigh	·	·	0.89	0.22
2.5MHz	Offset noncentral Chi 분포 (자유도 3)	0.05	0.80	0.93	0.13
5 MHz		0.24	3.02	0.96	0.07
10MHz		0.24	3.16	0.96	0.07

표 4. 실외 주거지역에서 수신신호의 확률분포

실외 주거지역 보행자 환경					
대역폭	확률분포	편이	S^2	평균	분산
1.25MHz	Offset noncentral Chi 분포 (자유도3)	0.06	1.1	0.93	0.13
2.5MHz		0.15	0.5	0.94	0.11
5 MHz		0.26	3.7	0.97	0.06
10MHz		0.28	3.6	0.97	0.06

실외 주거지역 차량 환경					
대역폭	확률분포	편이	S^2	평균	분산
1.25MHz	Offset noncentral Chi 분포 (자유도3)	0.02	0.20	0.93	0.14
2.5 MHz		0.05	2.05	0.94	0.12
5 MHz		0.16	2.30	0.95	0.09
10 MHz		0.18	2.30	0.95	0.09

이 수학적 모델의 타당성을 검증하기 위해 유의수준 1%의 Chi-square 테스트를 이용한다. Chi-square 검사는 가설 검증 테스트중의 하나로써 식(12)과 같이 정의된다[9].

$$q = \sum_{i=1}^{M} \frac{(k_i - m_i)^2}{m_i} \qquad (12)$$

식(12)에서 q 가 1% 유의수준의 기준값보다 작으면 비교하는 두 분포가 동일한 분포라는 가설이 받아들여지게 된다.

4. 결론

수신 신호에 대한 해석을 바탕으로 모의실험을 통해 수신신호의 크기 분포를 구하고, 이로부터 수신 신호의 수학적 모델을 제시하였다.

이러한 수학적 pdf 모델은 서로 다른 두 개의 JTC 채널 환경에서 네 개의 다른 대역폭을 갖는 시스템에 대해서 만들어졌으며, 이것을 Rayleigh 분포와 noncentral chi 분포로 표현하였다. 이 확률모델은 Chi-square 테스트를 통해 유의수준 1%로 검증하였다.

이러한 검증을 통해 수신 신호의 확률분포 모델이 타당함을 보였고, 이러한 확률모델은 W-CDMA 시스템 성능 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

따라서 제안된 JTC 광대역 채널모델 환경에서의 수학적 모델은 보다 실제적인 광대역 CDMA 신호들의 통계적 특성을 적절히 표현할 수 있으며, 복잡한 수치적 계산과 시간을 효율적으로 줄여 간편하게 CDMA 시스템의 성능을 평가할 수 있는 환경을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Tero Ojanpera and Ramjee Prasad, *Wideband CDMA for third generation mobile communications*, Artech House Boston London, 1998 .

[2] T. Eng and L. B. Milstein, Comparison of hybrid FDMA/CDMA Systems in frequency selective Rayleigh Fading , *IEEE J. Select, Areas Commun.* Vol. SAC-12, No.5, p938-951, June, 1994.

[3] Cheol-Sung Kim, Dongjin Oh, and Hoon Jeong, "Comparison W-CDMA and N-CDMA systems over wideband Rayleigh channel," in *Proc. of PIMRC99*, Osaka, Japan, Sep. 1999, pp.1007-1011.

[4] G. L. Turin et at., "A statistical model of urban multipath propagation," *IEEE Trans. on Vehic. Technol.*, vol. VT-21, No.1, pp. 1-9, Feb., 1972.

[5] Deployment/Testion Ad Hoc Group, Joint Technical Committee(AIR) Standards Contribution, September 23, 1994. [1994 revision 6].

[6] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw Hill, third Edition. 1995.

[7] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications principles & practice*, Prentice Hall, 1996

[8] M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread spectrum multiple access communication -Part I : System Analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, pp. 795-799, Aug. 1977.

[9] R. L. Pickholtz, D. L. Schilling, and L. B. Milstein, "Theory of spread spectrum communications - A Tutorial," *IEEE Trans. on Common.*, vol. COM-30, pp. 855-884, May 1982.

[10] Athanasios Papoulis, Probability, *Random Variables, and Stochastic Processes*, Third Edition, Addison-Wesley, 1994.

본 논문은 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구 지원사업으로 수행된 결과의 일부임.