

DS-CDMA 시스템에서 RAKE 수신기의 탭 간격에 따른 성능분석

正會員 김 기 준*, 권 순 일*, 황 금 찬*

Performance Analysis of DS-CDMA Systems According to the Tap Spacing of RAKE Receiver

Ki-Jun Kim*, Soon-Yil Kwon*, Keum-Chan Whang* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 RAKE 수신기의 탭 간격 및 수의 변화에 따른 DS-CDMA 통신 시스템의 수신 성능을 분석하였다. 이를 위해, 칩 파형, 즉 전송 신호의 스펙트럼에 따라 RAKE 수신기의 탭 간에 자기 신호 및 간섭 신호 그리고 잡음 신호의 상관 관계를 구하였으며, RAKE 수신기의 결정 변수 분포의 특성 함수를 이용하여 오류 확률을 분석하였다. 수치 결과로부터 칩 파형이 싱크 파형인 경우를 제외하고 RAKE 수신기의 탭 간격이 칩 간격보다 작아짐에 따라 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 대표적으로 롤 오프 계수가 1.0인 상승 코사인 파형인 경우에 탭 간격을 칩 간격의 70%로 줄였을 때 수용 용량이 30% 증가됨을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, the performance of DS-CDMA system is analyzed over frequency selective fading channel according to the tap spacing and the number of taps in the RAKE receiver. For the analysis, correlations between desired signals, interference signals and noise signals received at each tap of the RAKE receiver are obtained for various chip waveforms, i.e., signal spectrums. Bit error rate is calculated by using the characteristic function of the decision variable. From the numerical results, it is shown that performance improves as the tap spacing of the RAKE receiver decreases below the chip duration, except for the sinc waveform case. Representatively, for a raised cosine waveform with a roll-off factor of 1.0, if the tap spacing of the RAKE receiver is reduced to 70% of the chip duration, this results in 30% increase in capacity.

*연세대학교 전기공학과
論文番號:97406-1105
接受日字:1997年 11月 5日

I. 서 론

DS-CDMA(Direct Sequence Code Division Multiple Access) 시스템은 이동 통신 시스템 및 개인 휴대 통신 시스템과 같은 셀룰라 환경에 적합한 다중 접속 방식으로 인정받고 있으며 현재 활용중에 있다. 이는 CDMA 시스템이 대역 확산 전송 기술을 이용하여 채널 할당의 유연성과 항 재밍 능력 및 협대역 간섭 제거 능력 등에 의해 주파수 자원을 효율적으로 이용하기 때문이다. 특히, 주파수 선택적 페이딩 채널에서 항 다중 경로 능력으로 심볼간 간섭을 제거할 수 있을 뿐만 아니라, RAKE 수신기를 이용하면 다이버시티 효과로 페이딩 현상을 경감시켜 성능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다[1][2].

이제까지 RAKE 수신기에 대한 많은 연구가 있었으며, 이러한 연구들은 시스템 모델 및 분석 방법에서의 차이뿐만 아니라 채널 환경 및 모델에 따라 차이를 나타낸다. 그 중에서 [3]-[6]에서는 이산 경로 채널 모델을 이용하여 분석하였는데, 다중 경로들이 칩 간격보다 크게 떨어져 있고 RAKE 수신기의 탭들에 수신되는 신호간에 상관 관계는 존재하지 않는다고 가정하였다. 또한 [7]-[9]에서는 전송 신호의 스펙트럼이 칩 간격의 역수인 대역내에 제한되어 있다고 가정하고 탭 지연 채널 모델을 사용하여 분석을 수행하였다. 그러나 전송 신호의 대역폭이 칩 간격의 역수보다 큰 경우와 시간축 제한된 칩 파형을 사용하는 경우에 이 채널 모델은 부정확하게 된다. 이와 달리 [10]에서는 연속 경로 채널 모델을 사용하여 RAKE 수신기의 성능을 탭들에 수신되는 신호간의 상관 관계를 고려하여 분석하였으나, RAKE 수신기의 상관 관계에 의한 성능 저하를 줄이기 위해 탭 간격이 칩 간격의 정수배일 때만을 고려하였다.

본 논문에서는 탭 간격의 연속적인 변화 및 탭 수의 상대적 변화를 고려하여 RAKE 수신기의 탭 간의 상관 관계 및 수신 에너지 변화에 따른 RAKE 수신기의 성능을 분석하고자 한다. 이를 위해 주파수 선택적 채널 모델로서 연속 경로 채널 모델을 사용하였으며, 칩 파형, 즉 전송 신호의 스펙트럼에 따라 RAKE 수신기의 탭 간에 자기 신호 및 간섭 신호 그리고 잡음 신호의 상관 관계를 구하였으며, 랜덤 PN 부호와 가우시안 근사화 기법에 기초하여 RAKE수

신기의 결정 변수 분포의 특성 함수를 이용하여 오류 확률을 분석하였다. 2장에서는 고려되는 DS-CDMA 시스템 모델 및 채널 모델에 대해 설명하고, 3장에서는 RAKE 수신기의 오류 확률 분석 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 구형파(Rectangular pulse) 및 상승 코사인 파형(Raised cosine waveform)에 대해 탭 간격에 따른 BER 및 수용 용량에 대한 분석 결과를 제시하고 마지막으로 5장에서 결론을 서술을 하였다.

II. 시스템 모델

BPSK 및 DPSK 데이터 변조 방식을 이용한 DS-CDMA 시스템에서 k번째 사용자의 신호는 복소수 기저 대역 신호 표기법에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_k(t) = \sqrt{2E_b/N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{k,n} h(t-nT_c). \quad (1)$$

여기서 E_b 는 비트 당 에너지를, N 은 확산율을, T_c 는 칩 간격을 나타내며, $h(t)$ 는 칩 파형으로서 $\int |h(t)|^2 dt = 1$ 이도록 정규화되어져 있다. 그리고 $d_{k,n}$ 은 전송 데이터 변조된 k번째 사용자의 n번째 유사 잡음(PN) 부호로서, 다음과 같이 정의된다.

$$d_{k,n} = b_{k, \lfloor n/N \rfloor} a_{k,n}. \quad (2)$$

여기서 $b_{k,n}$ 는 BPSK 일 경우에 k번째 사용자의 전송 데이터 시퀀스를, DPSK 경우에 차동 부호화된 전송 데이터 시퀀스를 나타내며, $a_{k,n}$ 은 k번째 사용자의 PN 부호 시퀀스를 나타낸다. 그리고 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 작거나 같은 최대 정수를 나타낸다. 즉, N 개의 연속된 PN 부호에 동일한 정보 비트가 곱해짐을 나타낸다.

주파수 선택적 페이딩 채널로서 WSSUS(wide-sense-stationary uncorrelated-scattering) 채널 모델을 고려하여, k번째 사용자의 수신 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$r_k(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_k(\epsilon) S_k(t-\epsilon) d\epsilon = \alpha_k(t) \otimes S_k(t) \quad (3)$$

여기서 \otimes 는 컨볼루션(Convolutional) 연산을 나타내

며, $\alpha_k(t)$ 는 채널의 임펄스 응답으로서 레일리 페이딩 채널에서는 평균 영인 복소수 가우시안 랜덤 프로세스로 모델링되며 다음의 자기 상관 함수를 갖는다.

$$E\{\alpha_k(t_1)\alpha_k^*(t_2)\} = \sigma_k^2 g_k(t_1)\delta(t_1 - t_2) \quad (4)$$

여기서 $\delta(\cdot)$ 는 디랙 델타(Dirac delta) 함수를 나타낸다. 그리고 식 (1)의 E_b 를 비트 당 평균 전체 수신 에너지로 정의하기 위해, 지면 전력 밀도 스펙트럼 $g(t)$ 는 $\int g(t)dt = 1$ 이도록 정규화되어 있다고 가정한다. 또한 $g(t)$ 는 0부터 τ_{max} 사이에서 정의되며 그 밖의 영역에서는 영의 값을 갖는다고 가정한다.

DS-CDMA 시스템에 전체 K 명의 사용자를 고려하여, 전체 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{k=1}^K r_k(t - \tau_k) + n(t) \\ &= \sum_{k=1}^K \alpha_k(t) \otimes S_k(t - \tau_k) + n(t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $n(t)$ 는 단축 스펙트럼 밀도가 N_0 인 복소수 가우시안 잡음 프로세스를 나타낸다. 식 (5)의 수신 신호는 첫번째 사용자의 수신기에서 영번째 전송 데이터의 검출을 위해 영번째 데이터 전송시에 사용된 확산 과정에 정합된 필터에 입력으로 가해진다. 편의상, 필터 응답의 지연 시간을 고려하지 않으며 필터 출력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} X(t) &= \sum_{k=1}^K X_k(t) + X_n(t) \\ &= \sum_{k=1}^K \alpha_k(t) \otimes S_k(t - \tau_k) \otimes v(t) + n(t) \otimes v(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $v(t) = \sqrt{1/N} \sum_{n=0}^{N-1} a_{1,n}^* h^*(-t - nT_c)$ 를 나타낸다. 식 (6)에서 $X_k(t)$ 와 $X_n(t)$ 는 각각 k 번째 사용자 신호와 가우시안 잡음에 의한 필터의 출력을 나타낸다. 첫번째 사용자의 수신기가 영번째 전송 데이터의 수신 시간을 정확히 알고 있다고 보고 $\tau = 0$ 이라고 가정한다. 이 경우에 RAKE 수신기는 필터 출력을 영부터 T , 간격으로 샘플링하여 L 개의 샘플을 얻는다.

BPSK 시스템의 분석을 위하여 수신기가 정확히 채널 응답을 측정할 수 있다고 보고, 다음의 채널 추

정치를 얻을 수 있다고 가정한다.

$$Y(t) = \alpha_1(t) \otimes h(t) \otimes h^*(-t) \quad (7)$$

그리고 DPSK 시스템일 경우에는 채널 추정치로서 다음과 같이 이전 데이터 신호를 사용한다.

$$\begin{aligned} Y(t) &= \sum_{k=1}^K Y_k(t) + Y_n(t) \\ &= \sum_{k=1}^K \alpha_k(t) \otimes S_k(t - \tau_k) \otimes u(t) + n(t) \otimes u(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $u(t) = \sqrt{1/N} \sum_{n=-N}^{-1} a_{1,n}^* h^*(-t - nT_c)$ 를 나타낸다.

두 시스템 모두 RAKE 수신기의 결정 변수는 다음과 같다.

$$Z = \sum_{l=0}^{L-1} X(l \cdot T_r) \cdot Y^*(l \cdot T_r) + X^*(l \cdot T_r) \cdot Y(l \cdot T_r) \quad (9)$$

III. 성능 분석

BPSK 및 DPSK 시스템에서 오류 확률은 전송 데이터가 1일때 식 (9)의 결정 변수가 영보다 작을 확률로 정의된다. 이 확률값을 얻기 위하여 먼저 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 를 중심 극한 이론에 근거하여 복소수 가우시안 프로세스로 근사화한다. 이때 결정 변수 Z 는 복소수 가우시안 랜덤 벡터 $\mathbf{z} = [X(0), Y(0), X(T_r), Y(T_r), \dots, X((L-1) \cdot T_r), Y((L-1) \cdot T_r)]$ 의 허미시안 이차 방정식 형태(Hermitian Quadratic form)인 $Z = \mathbf{z}^* \mathbf{Q} \mathbf{z}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $\mathbf{Q} = [q_{ij}]$ 는 $(2L \times 2L)$ 행렬로서 $q_{2i-1, 2i} = 1$ 그리고 $q_{2i-1, 2i} = 1$ 이며 이밖에 $q_{i,i} = 0$ 이다. 이 경우에 오류 확률은 [10]의 결정 변수의 특성 함수를 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_e = \sum_{a_i < 0} \prod_{l=1}^{2L} \frac{1}{1 - a_l/a_i} \quad (10)$$

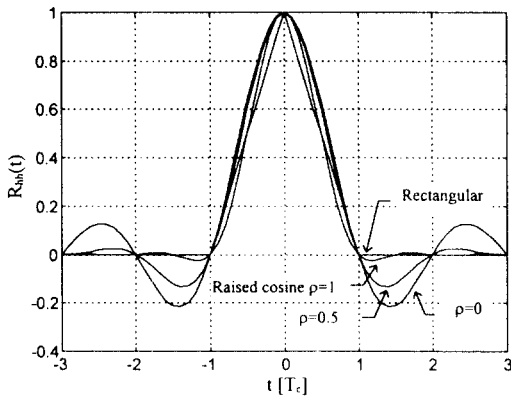
여기서 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, 2L\}$ 는 행렬 $\mathbf{R} \cdot \mathbf{Q}$ 의 아이겐값(eigenvalue)들을 나타내며, $\mathbf{R} = [R_{ij}] = E\{\mathbf{z}^T \cdot \mathbf{z}^*\}$ 은 전송 데이터에 조건화된 벡터 \mathbf{z} 의 자기 상관 행렬을 나타낸다. 행렬 \mathbf{R} 은 \mathbf{z} 의 정의에 의해 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 의 자기 상관 및 상호 상관 함수에 의해 결정되며 이는 부록에 계산되어 있다.

IV. 수치 결과

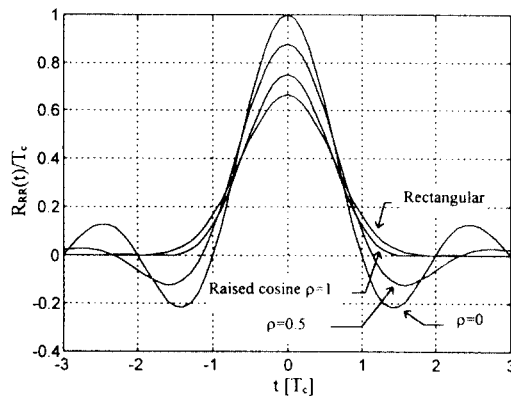
본 장에서는 칩 파형으로 시간 제한되어져 있는 식 (11)의 구형파와 주파수 제한되어져 있는 식 (12)의 상승 코사인 파형을 대표적으로 고려하여 RAKE 수신기의 탭 간격에 따른 수신 성능을 살펴본다.

$$h(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{T_c}, & \text{if } 0 \leq t \leq T_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$h(t) = 4\rho \frac{\cos[(1+\rho)\pi t/T_c] + \sin[(1-\rho)\pi t/T_c]/(4\rho t/T_c)}{\pi\sqrt{T_c}[(4\rho t/T_c)^2 - 1]} \quad (12)$$



(a) 자기상관함수



(b) 자기상관함수의 자기상관함수

그림 1. 칩 파형의 자기상관함수
Fig. 1. Autocorrelation function of chip waveform

상승 코사인파인 경우에 롤오프(Roll-off) 계수 ρ 가 0, 0.5, 1.0일 때를 고려하였다. 식 (A12)에 정의되어 있듯이 t_1 순간과 t_2 순간에 샘플링된 수신 필터의 샘플 출력간의 상관 관계는 자기 신호 및 간섭 신호 그리고 잡음 신호에 의한 성분으로 구성되어진다. 이 때 간섭 신호에 의한 성분은 칩 파형의 자기상관함수의 자기상관함수인 $R_{RR}(t_1 - t_2)$ 에 비례하며, 잡음 신호에 의한 성분은 칩 파형의 자기상관함수 $R_{hh}(t_1 - t_2)$ 에 비례하다. 그림 1에 본 논문에서 고려되는 칩 파형의 $R_{hh}(t_1 - t_2)$ 및 $R_{RR}(t_1 - t_2)$ 를 나타냈다. RAKE 수신기의 탭 간격이 T_c 인 일반적인 경우에 $R_{hh}(nT_c)$ 이 영을 제외한 모든 정수 n 에 대해 영이므로 잡음 신호에 의한 탭간의 상관 관계는 존재하지 않는다. 그러나 $R_{RR}(T_c)$ 는 $\rho=0$ 인 상승 코사인파를 제외하고 모든 경우에 영보다 큰 값을 갖는다. 즉 T_c 만큼 떨어진 인접 탭간에 간섭에 의한 상관 관계가 존재함을 나타낸다. 이는 구형파인 경우에 가장 높은 0.166의 값을 갖는다.

다음으로 식 (10)을 사용하여 BPSK DS-CDMA 시스템의 RAKE 수신기의 오류 확률을 비트당 SNR 즉 E_b/N_0 의 함수로 계산하기 위하여 0부터 τ_{max} 에 일정한 값 $g(t) = 1/\tau_{max}$ 을 갖고 그 밖의 영역에서는 영의 값을 갖는 지연 전력 밀도 스펙트럼을 대표적으로 고

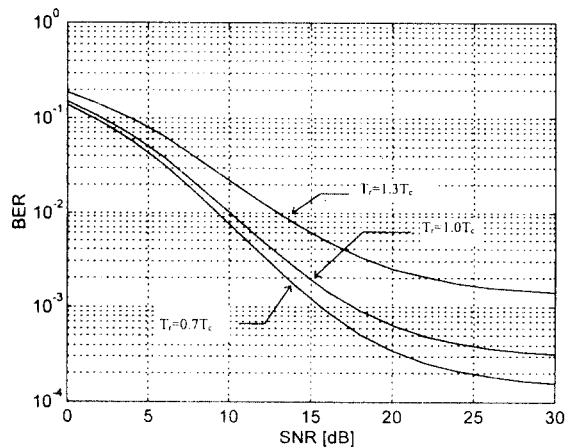


그림 2. RAKE 탭 간격에 따른 BPSK DS-CDMA 시스템의 BER (구형파, $\tau_{max} = 2T_c$, $K = 11$, $N = 256$)
Fig. 2. BER for BPSK DS-CDMA system according to tap spacing of the RAKE receiver (Rectangular chip waveform, $\tau_{max} = 2T_c$, $K = 11$, $N = 256$)

려하였다. 그림 2에 구형파를 사용한 BPSK 시스템에서 탭 간격 T_r 이 0.7, 1.0, 1.3 T_c 일 때 BER을 나타내었다. 이 때 $\tau_{max} = 2T_c$ 이고 $N=256$, $K=11$ 으로 설정하였다. 그러므로 $T_r=0.7$ 일 때에는 0, 0.7, 1.4, 2.1 T_c 에 위치한 4개의 탭을 사용하였으며, $T_r=T_c$ 일 때에는 0, 1, 2 T_c 에 위치한 3개의 탭을, $T_r=1.3T_c$ 일 때에는 0, 1.3, 2.6 T_c 에 위치한 3개의 탭을 사용하였다. 이 경우에 모든 SNR에 있어서 T_r 이 0.7 T_c 일때 가장 좋은 성능을 나타내고 있다. 그림 3은 탭 간격의 변화에 따라 10^{-3} 의 BER을 위해 요구되는 SNR을 나타내었다. 이 때 $\tau_{max} = 2T_c$, $N=256$ 로 설정하였으며, 가우시안 잡음에 의한 효과만을 관찰하기 위해 사용자 수는 한명으로 설정하였다. 또한 이 경우에 RAKE 수신기의 탭 수는 $1 + \lceil \tau_{max}/T_r \rceil$ 로 설정하였다. 여기서 $\lceil x \rceil$ 는 x 보다 크거나 같은 최소 정수를 나타낸다. 다음으로 다중 접속 간섭의 효과만을 관찰하기 위해 SNR이 무한대일 때 10^{-3} 의 BER을 만족하는 최대 수용 용량을 그림 4와 5에 나타냈다. 이는 각각 $\tau_{max} = 2T_c$ 와 $\tau_{max} = 4T_c$ 일 때를 나타내며, $N=256$ 로 설정하였다. 그림 3, 4, 5로부터 칩 파형이 싱크 파형인 경우를 제외하고 탭 간격이 칩 간격보다 작아짐에 따라 성능이 향상됨

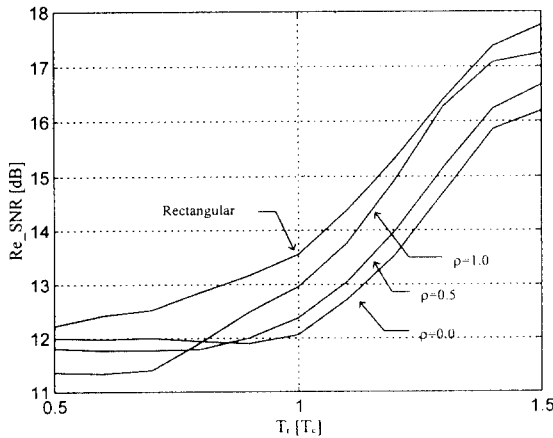


그림 3. RAKE 탭 간격에 따른 BPSK DS-CDMA 시스템의 10^{-3} BER을 위한 요구 SNR ($\tau_{max} = 2T_c$, $K=1$, $N=256$)

Fig. 3. The required SNR for BER of 10^{-3} for BPSK DS-CDMA system according to tap spacing of the RAKE receiver ($\tau_{max} = 2T_c$, $K=1$, $N=256$)

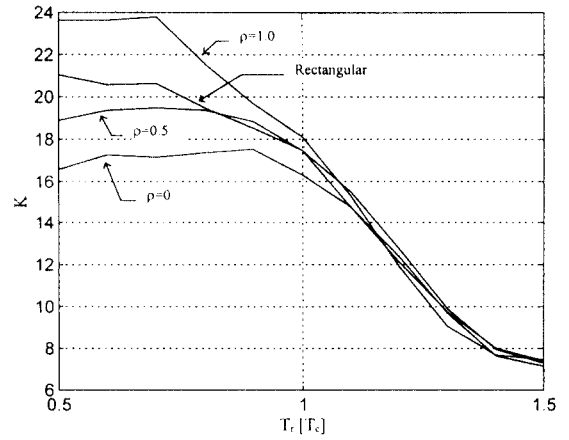


그림 4. RAKE 탭 간격에 따른 BPSK DS-CDMA 시스템의 10^{-3} BER을 위한 수용 능력 ($\tau_{max} = 2T_c$, $N=256$, $SNR = \infty$)

Fig. 4. The capacity of BPSK DS-CDMA system for BER of 10^{-3} according to the tap spacing of the RAKE receiver ($\tau_{max} = 2T_c$, $N=256$, $SNR = \infty$)

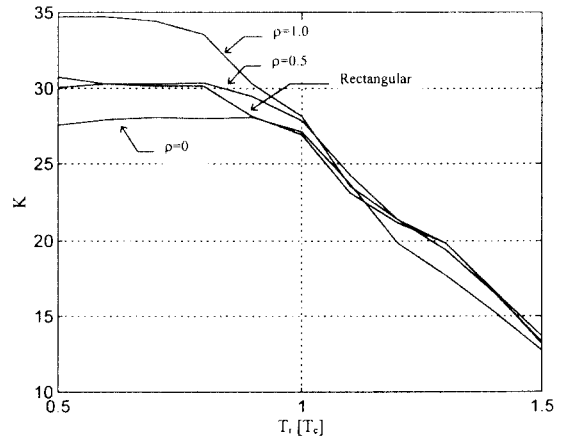


그림 5. RAKE 탭 간격에 따른 BPSK DS-CDMA 시스템의 10^{-3} BER을 위한 수용 능력 ($\tau_{max} = 4T_c$, $N=256$, $SNR = \infty$)

Fig. 5. The capacity of BPSK DS-CDMA system for BER of 10^{-3} according to the tap spacing of the RAKE receiver ($\tau_{max} = 4T_c$, $N=256$, $SNR = \infty$)

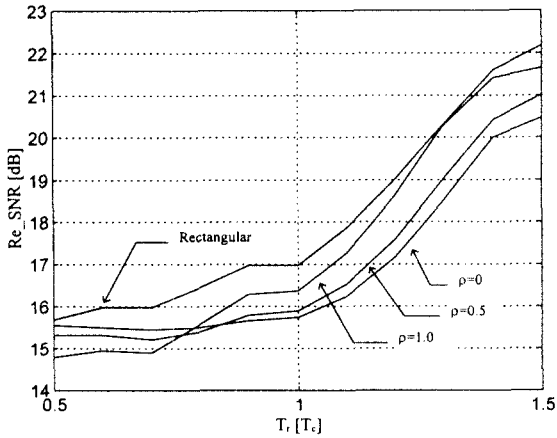


그림 6. RAKE 탭 간격에 따른 DPSK DS-CDMA 시스템의 10^{-3} BER을 위한 요구 SNR ($\tau_{\max} = 2T_c$, $K = 1$, $N = 256$)

Fig. 6. The required SNR for BER of 10^{-3} for BPSK DS-CDMA system according to tap spacing of the RAKE receiver ($\tau_{\max} = 2T_c$, $K = 1$, $N = 256$)

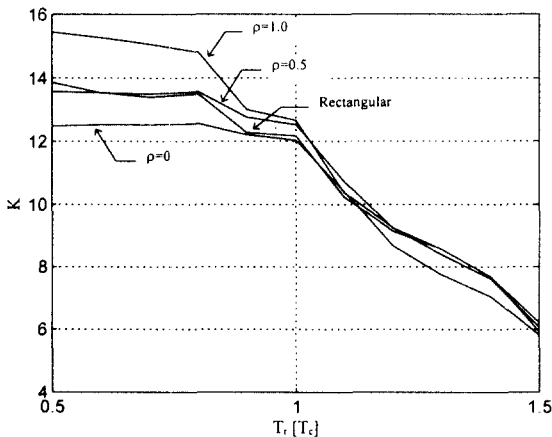


그림 7. RAKE 탭 간격에 따른 DPSK DS-CDMA 시스템의 10^{-3} BER을 위한 수용 능력 ($\tau_{\max} = 4T_c$, $N = 256$, $SNR = \infty$)

Fig. 7. The capacity of DPSK DS-CDMA system for BER of 10^{-3} according to the tap spacing of the RAKE receiver ($\tau_{\max} = 4T_c$, $N = 256$, $SNR = \infty$)

을 알 수 있다. 그리고 탭 간격이 칩 간격보다 커짐에 따라 성능이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 이는 탭 간격이 작아짐에 따라 자기 신호로부터 더 많은 에너지를 얻을 수 있기 때문이며, 또한 전체적으로 더 나은 다이버시티 효과를 얻을 수 있기 때문이다. 결국 이러한 효과는 탭 간격이 작아짐에 따라 높아지는 탭간의 상관 관계를 어느 정도까지는 극복하여 성능 향상을 가져올 수 있음을 의미한다. 대표적으로 롤 오프 계수가 1.0인 상승 코사인파인 경우에 탭 간격이 칩 간격의 70%로 줄었을 때 수용 능력이 30% 증가됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 DPSK DS-CDMA 시스템에서 RAKE 수신기의 탭 간격의 변화에 따라 10-3의 BER을 위해 요구되는 SNR을 나타내었다. 그리고 그림 7은 탭 간격의 변화에 따라 수용 용량을 나타내었다. 그림 3과 5의 BPSK 시스템과 비교해보면 전체적으로 성능이 저하되었을 뿐 탭 간격의 변화에 따른 경향은 동일함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 DS-CDMA 시스템에서 RAKE 수신기의 탭 간격의 변화에 따른 수신 성능을 분석하였다. 이를 위해, 연속 시간 주파수 선택적 채널 모델을 고려하여 칩 파형에 따라 RAKE 수신기의 탭 간에 자기 신호 및 간섭 신호 그리고 잡음 신호의 상관 관계를 구하였으며, RAKE수신기의 결정 변수 분포의 특성 함수를 이용하여 오류 확률을 분석하였다. 수치 결과로부터 칩 파형의 절대 대역폭이 칩 간격의 역수보다 큰 경우에 탭 간격이 칩 간격보다 작아짐에 따라 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 이는 탭 간격이 작아짐에 따라, 탭 간의 잡음 신호의 높은 상관성에 의해 발생하는 성능 저하를 자기 신호의 에너지를 더 많이 얻음으로 가져오는 성능 향상이 이를 극복함을 의미한다. 그러므로 이러한 경우에 칩 간격의 정수배로 탭을 위치시키는 일반적인 방식은 최적의 성능을 얻을 수 없으며, 더욱이 이러한 경우에 성능 분석을 위하여 일반적인 탭 지연 채널 모델의 이용은 부정확한 결과를 가져온다. 대표적으로 롤 오프 계수가 1.0인 상승 코사인파인 경우에 탭 간격을 칩 간격의 70%로 줄였을 때 수용 능력이 30% 증가됨을 확인하였다.

부 록

본 부록에서는 식 (10)의 오류 확률을 계산하기 위해 필요한 $X(t)$ 의 자기상관함수를 구하고 이와 유사한 과정으로 얻을 수 있는 $Y(t)$ 의 자기상관함수 및 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 의 상호상관함수의 결과를 제시한다. 이를 위하여 먼저 식 (6)에서 $v(t)$ 와 $S_k(t)$ 의 컨볼루션을 $C_k(t) = S_k(t) \otimes v(t)$ 로 정의하고 식 (1)과 (6)을 사용하여 정리하면 다음과 같이 간략화 되어질 수 있다.

$$C_k(t) = \sqrt{2E_b/N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{k,n} R_{hh}(t - nT_c) \quad (A1)$$

여기서

$$c_{k,n} = \sum_{m=0}^{N-1} d_{k,m+n} a_{1,m}^* \quad (A2)$$

$$R_{hh}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\epsilon) h^*(\epsilon - t) d\epsilon \quad (A3)$$

으로 정의된다.

식 (A1)에서 $c_{1,n}$ 는 전송 데이터가 1이라는 조건하에서 전송 PN 부호와 수신단에서 참조하는 PN 부호가 일치하므로 $c_{1,0} = N$ 이며, 이 밖의 $c_{1,n}$ 는 사용된 PN 부호의 주기가 확산 이득 N 보다 크고 랜덤 부호에 가까운 성질을 가졌다고 전제하면, 평균이 영이고 다음의 상관 관계를 갖는 이항 분포의 랜덤 변수들로 모델링할 수 있다.

$$E\{c_{1,m} c_{1,n}^*\} = \begin{cases} N, & \text{if } m=n \neq 0 \\ N-|n|, & \text{if } m=-n \neq 0, |n| < N \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (A4)$$

그리고 $c_{k,m}$ ($k \neq 1$)는 평균이 영이고 분산이 N 인 이항 분포를 갖는 독립적인 랜덤 변수들로 모델링할 수 있다.

식 (6)의 구성 요소인 $X_k(t)$ 와 $X_n(t)$ 는 서로 독립적인 근원에 의해 발생되므로 $X(t)$ 의 자기상관함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\{X(t_1) \cdot X^*(t_2)\} = E\{X_1(t_1) \cdot X_1^*(t_2)\} + \sum_{k=2}^K E\{X_k(t_1) \cdot X_k^*(t_2)\} + E\{X_n(t_1) \cdot X_n^*(t_2)\} \quad (A5)$$

여기서 첫번째 성분은 자기 신호에 의한 것으로서 식 (A1)을 이용하고 $\alpha(t)$ 의 통계적 성질을 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\{X(t_1) \cdot X^*(t_2)\} = 2E_b/N^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{n'=-\infty}^{\infty} E\{c_{1,n} \cdot c_{1,n'}^*\} \int_{-\infty}^{\infty} g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon - nT_c) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon - n'T_c) d\epsilon \quad (A6)$$

식 (A6)은 식 (A4)에 정의된 $c_{1,n}$ 의 통계적 성질에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$E\{X_1(t_1) \cdot X_1^*(t_2)\} = 2E_b \int_{-\infty}^{\infty} g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon) d\epsilon + 2E_b/N \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon - nT_c) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon - nT_c) d\epsilon + 2E_b/N \sum_{\substack{n=-N \\ n \neq 0}}^N (N - |n|) \int_{-\infty}^{\infty} g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon + nT_c) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon - nT_c) d\epsilon \quad (A7)$$

다음으로 식 (A5)에서 두번째 성분은 타 사용자의 신호에 의한 것으로서 식 (A1)을 이용하고 $\alpha(t)$ 와 $c_{k,n}$ 그리고 τ_k 에 대한 기대 연산을 수행하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\{X_k(t_1) \cdot X_k^*(t_2)\} = \frac{2E_b}{NT_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^{T_c} \int_{-\infty}^{\infty} g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon - \tau_k - nT_c) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon - \tau_k - nT_c) d\epsilon d\tau_k \quad (A8)$$

위 식에서 $\tau = \tau_k + nT_c$ 로 변수 치환하고 n 에 대한 덧셈과 τ_k 에 대한 적분을 τ 에 대한 단일 적분으로 합치고, 그 결과를 정리하면 다음과 같이 간략히 표현될 수 있다.

$$E\{X_k(t_1) \cdot X_k^*(t_2)\} = \frac{2E_b}{NT_c} R_{RR}(t_1 - t_2) \quad (A9)$$

여기서

$$R_{RR}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{hh}(\epsilon) R_{hh}^*(\epsilon - t) d\epsilon \quad (A10)$$

으로 정의된다.

마지막으로 가우시안 잡음에 의한 성분인 식 (A5)의 세번째 성분은 $n(t)$ 와 $a_{1,n}$ 의 통계적 성질에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\{X_n(t_1) \cdot X_n^*(t_2)\} = 2N_0 R_{hh}(t_1 - t_2) \quad (A11)$$

그러므로 BPSK 및 DPSK 시스템에서 의 자기상관함수를 나타내는 식 (A5)의 결과는 최종적으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E\{X(t_1) \cdot X^*(t_2)\} &= 2E_b \int_{-x}^x g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon) d\epsilon \\ &+ 2E_b/N \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \int_{-x}^x g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon - nT_c) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon - nT_c) d\epsilon \\ &+ 2E_b/N^2 \sum_{\substack{n=-N \\ n \neq 0}}^N (N - |n|) \int_{-x}^x g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon + nT_c) \\ &R_{hh}^*(t_2 - \epsilon - nT_c) d\epsilon \quad (A12) \\ &+ \frac{2E_b}{NT_c} (K-1) R_{RR}(t_1 - t_2) + 2N_0 R_{hh}(t_1 - t_2) \end{aligned}$$

BPSK 시스템인 경우에 $Y(t)$ 의 자기상관함수는 식 (7)의 정의에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$E\{Y(t_1) \cdot Y^*(t_2)\} = \int_{-x}^x g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon) d\epsilon \quad (A13)$$

그리고 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 의 상호상관함수는 다음과 같다.

$$E\{X(t_1) \cdot Y^*(t_2)\} = \sqrt{2E_b} \int_{-x}^x g(\epsilon) R_{hh}(t_1 - \epsilon) R_{hh}^*(t_2 - \epsilon) d\epsilon \quad (A14)$$

DPSK 시스템인 경우에 $E\{Y(t_1) \cdot Y^*(t_2)\}$ 는 식 (8)의 정의와 $u(t)$ 의 통계적 성질이 $v(t)$ 와 동일하므로 식 (A12)과 동일하게 주어진다. 그리고 $E\{X(t_1) \cdot Y^*(t_2)\}$ 는 $u(t)$ 와 $v(t)$ 의 독립성에 의해 식 (A14)과 동일하다.

참 고 문 헌

1. K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, et al., "On the Capacity of a Cellular CDMA System," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 303-312, May 1991.

2. R. Kohno, R. Meidan, L. B. Milstein, "Spread Spectrum Access Methods for Wireless Communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 33, no. 1, pp. 58-67, Jan. 1995.

3. G. L. Turin. "Introduction to Spread-Spectrum Antimultipath Techniques and Their Application to Urban Digital Radio," *Proc. IEEE.*, vol. 68, no. 3, pp. 328-353, Mar. 1980.

4. H. Xiang, "Binary Code-Division Multiple-Access Systems Operating in Multipath Fading, Noisy Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 775-784, Aug. 1985.

5. Mohsen Kavehrad, B. Ramamurthi, "Direct-Sequence Spread Spectrum with DPSK Modulation and Diversity for Indoor Wireless Communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 35, no. 2, pp. 224-236, Feb. 1987.

6. J. E. Salt, S. Kumar, "Effects of Filtering on the Performance of QPSK and MSK modulation in DS Spread Spectrum Systems," *IEEE J. Selct. Areas Commun.*, vol. 12, no. 4, pp. 707-715, May 1994.

7. H. Ochsner, "Direct-Sequence Spread-Spectrum Receiver for Communication on Frequency-Selective Fading Channels," *IEEE J. Selct. Areas Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 188-193, Feb. 1987.

8. T. Eng, L. B. Milstein, "Coherent DS-CDMA Performance in Nakagami Multipath Fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 3, pp. 1134-1143, Mar. 1995.

9. C. Kchao, G. L. Stuber, "Analysis of a Direct-Sequence Spread-Spectrum Cellular Radio System," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 41, no. 10, pp. 1507-1516, Oct. 1993.

10. D. L. Noneaker, M. B. Pursley, "The Effects of Sequence Selection on DS Spread Spectrum with Selective Fading and Rake Reception," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 2, pp. 229-237, Feb. 1996.



金 沂 濤(Ki-Joon Kim) 정희원

1968년 7월 4일생

1991년 2월:연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1993년 2월:연세대학교 분대학원 전기공학과 졸업(석사)

1993년 3월~현재:연세대학교 분대학원 전기공학과 박사과정

※주관심 분야:이동통신시스템, 코딩 이론, 디지털 신호처리



權 純 逸(Soon-Yil Kwon) 정희원

1969년 8월 31일생

1992년 2월:연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1994년 2월:연세대학교 분대학원 전기공학과 졸업(석사)

1994년 3월~현재:연세대학교 분대학원 전기공학과 박사과정

※주관심 분야:CDMA 이동통신시스템, 초기 동기, RAKE 수신기, 디지털 신호처리

黃金燦(Keum-Chan Whang)

정희원

1944년 7월 18일생

1967년 2월:연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1979년 6월:Polytechnic Institute of New York Electrical Eng.(Ph.D)

1980년 9월~현재:연세대학교 전기공학과 교수

※주관심분야:이동부선통신, 대역확산 통신, 무선 패킷망, 광대역 통신망, 탄성표면파 소자 및 그 응용 분야