

레이레이 페이딩 채널상에서 Jamming환경을 고려한 DS/MC(MultiCarrier)-CDMA시스템의 성능분석에 관한 연구

정희원 김인겸*, 안성준*

DS/MC-CDMA system performance through Rayleigh fading channel in the presence of partial band interference

Ihn-kyeom Kim*, Seong-Jun Ahn* *Regular Members*

요약

단일대역확산방식은 수십MHz의 광대역 확산을 수행시 기술적 제한을 받지만 다중캐리어 방식의 경우는 이러한 제작상의 문제해결이 가능하고 다중경로 채널환경에서 강한 장점이 있다. 본 논문은 위협상황을 고려한 레이레이 페이딩 환경하에서 DS-CDMA와 MC-CDMA시스템 모델링과 분석을 통해 시스템의 성능 정도 차를 채널환경에 따라 확인하였다. 또한, 일반적인 대역확산 시스템과 리미팅 중계기 시스템간의 일정위협수준에서 시스템 용량을 비교하였다. 연구결과, M-CDMA시스템은 단일대역확산시스템에 비하여 협대역 간섭과 다중 경로페이딩에 견고한 것으로 파악되었다.

ABSTRACT

A Multicarrier system requires a lower speed, parallel-type of signal processing, in contrast to a fast, serial processing in a single carrier CDMA system. For the analysis, we evaluate MC-CDMA system performance over a Rayleigh channel in the presence of partial band interference; we also compared system performance with that of a single-carrier CDMA system and a multi-carrier CDMA system based on the various jamming conditions. Also, we studied to the capacity level against the threat environment through the performance comparison in commercial CDMA system and Limiting repeater system. As a result, we found that M-CDMA system has a robustness to narrowband interference and multipath environments like as a Rayleigh fading.

I. 서론

최근에 다중접속 통신을 위한 직접확산기법에 대한 연구 및 적용이 활발해 지고 있다. 부분적으로는 다중접속능력, 페이딩에 대한 견고성, 항재밍 능력 등 이점이 존재하고 있기 때문이다. 특히 코드분할 다중접속(CDMA, code Division Multiple Access) 기법은 다른 방식에 비해 간섭신호 또는 의도적인 방해신호를 극복할 수 있고, 통신의 비밀 유지를 위한

고도의 비화 통신이 가능한 다수의 장점을 보유하고 있다. 아울러 동일한 주파수 대역에서 동시에 다수의 통신이 용이하다. 현재의 기술수준은 단일 방송파를 이용하여 수십MHz의 광대역 확산을 수행하기에는 하드웨어 구현상의 문제가 존재한다. 따라서 저속 디바이스를 병렬로 사용하여 기술적 제약성을 극복하는 MC-CDMA시스템의 응용이 최선의 방안이다. MC-CDMA기법은 이미 오래 전에 제안되었지만 기술적으로 구현하기 어려운 문제로 인하여

* 국방과학연구소 선임연구원

논문번호: 00050-0207, 접수일자: 2000년 2월 7일

크게 주목받지 못하다가 기술의 발달로 고속의 디바이스 제작이 가능해짐에 따라 요즘 각광받고 있는 영역이다. 특히 이 기법은 다중경로가 존재하는 채널 상에서 우수한 성능을 보인다.^[1,2,5] 일반적으로 무선통신 환경에서는 다중경로에 의해서 발생하는 ISI로 인해 전송속도가 제한되는데 다중반송파 변조 기법을 사용하여 보다 고속의 데이터 전송이 가능하게 된다. 물론 다중캐리어 방식에서는 구현을 위한 시스템의 복잡성이 증가되고 전력증폭기의 비선형성에 의한 상호변조적이 발생하는 등 외적인 문제가 존재한다. 하지만 단일캐리어 확산기법을 적용한 위성통신의 경우는 기술적인 제약과 광대역의 고의적인 저 출력의 방해 및 단일톤 의한 동기 방해 등 통신두절의 문제가 야기 될 수 있고, 통신 용량의 현저한 감소가 예상된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 단일주파수에 의한 확산방식의 기술적 제한사항을 극복하고, 협대역 재밍에 이점이 있는 M-CDMA방식에 대한 시스템분석을 다양한 채널상황을 고려하여 수행하였다. 이를 위한 채널 모의환경은 레이레이 페이딩 채널과 고의적인 협대역 재밍을 포함하여 시스템에 대한 성능분석을 수행하였다. 여기서 적용된 재밍은 Partial Band재밍과 펄스톤 재밍을 기준으로 사용자수, 확산이득, 위협정도, 부캐리어수 등 다수의 변수를 기준으로 다양한 시스템 분석을 하였다. 이와 같은 DS-CDMA와 MC-CDMA방식에 대한 성능분석을 통해 시스템의 성능 정도 차를 채널환경에 따라 파악하였으며, 일정수준에서의 통신가능여부를 확인하게되었다.

II. MC-CDMA시스템 분석

1. Rayleigh fading채널시 성능분석

본 시스템은 신호를 전체 전송대역 중 일부의 대역폭으로 확산한 후 여러 개의 캐리어를 동시에 사용하여 전체 대역으로 전송하는 방식이다. 수신기에서는 각 캐리어별로 수신된 신호를 결합하여 신호를 복조한다. 먼저 첫 번째 사용자 즉, 원하는 사용자 신호의 수신에 대하여 그 성능을 분석한다. 여기서 시스템 성능 분석을 위하여 반송파 주파수 및 코드와 비트 동기화가 정확하게 수행된다는 가정하에 분석한다. 수신기 구조에서 필터특성은 나이퀴스트 이론을 만족한다고 가정한다. 따라서 m번째 반송파에 의한 Chip-matched filter의 수신신호 출력 $y_i(t)$ 는 식(1)과 같다.^[2]

$$y_i(t) = S_{y_i}(t) + I_{y_i}(t) + J_{y_i}(t) + N_{y_i}(t) \quad (1)$$

$$S_{y_i}(t) = \sqrt{E_c} a_{1,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_k^{(1)} c_n^{(1)} x(t - nMT_c) \quad (2)$$

$$I_{y_i}(t) = \sum_{m=2}^K \sqrt{E_c} \zeta_{k,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_k^{(m)} c_n^{(m)} x(t - nMT_c - \tau_k) \quad (3)$$

$$J_{y_i}(t) = L_p [n_{j,i}(t) \sqrt{2} \cos(\omega_j t + \theta_{j,i})] \quad (4)$$

$$N_{y_i}(t) = L_p [n_{w,i}(t) \sqrt{2} \cos(\omega_w t + \theta_{w,i})] \quad (5)$$

여기서, τ_k 는 채널의 지연성분, $\zeta_{k,m} = \alpha_{k,i} \cos \psi_{k,i}$ 로서 채널상의 감쇄성분이며, $\alpha_{k,i}$ 는 레이레이 램던변수, $\psi_{k,i} = \theta_{k,i} - \theta_{1,i}$ 는 위상차로서 수신된 신호의 위상을 기준으로 타경로를 통하여 들어온 자기신호나 타사용자와의 위상차로서 $[0, 2\pi]$ 구간에서 균일한 분포를 갖는다. 식(2)는 검출하려는 신호이며,

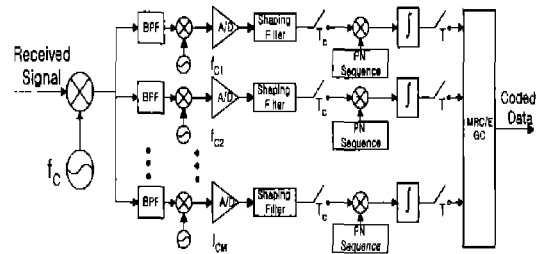


그림 1. 수신기 블록 구조도

식(3)은 MUI(Multiple user interference)로서 타 사용자 간섭현상이고, 식(4)은 PBJ에 의한 협대역 간섭현상이며, 식(5)는 필터링된 AWGN이다. 본식은 완벽한 동기가 이루어졌다는 가정하에 수행된 식이기 에 $\tau=0$ 로 설정된다. $n_{j,m}(t)$ 와 $n_{w,m}(t)$ 는 각각의 $n_j(t)$, $n_w(t)$ 가 m번째 대역통과 필터의 출력 값이다. 또한, $L_p(\cdot)$ 는 저역통과 필터과정을 나타낸다. 이때 m번째 상관기(correlator)의 신호출력의 통계치 Z_m 이라고 할때 이는 다음식과 같이 표현된다.

$$Z_m = S_z + I_z + J_z + N_M \quad (6)$$

$$S_z = \sum_{n=0}^{N-1} c_n^{(1)} S_{y_i}(n MT_c) \quad (7)$$

$$I_z = \sum_{n=0}^{N-1} c_n^{(1)} I_{y_i}(n MT_c) \quad (8)$$

$$J_{Z_i} = \sum_{n=0}^{K-1} c_n^{(i)} J_{y_i}(n' MT_c) \quad (9)$$

$$N_{Z_i} = \sum_{n=0}^{K-1} c_n^{(i)} N_{y_i}(n' MT_c) \quad (10)$$

여기서, $\{d_h^{(k)} c_n^{(k)}, k=2, \dots, K\}$ 는 독립적인 임의 이진열이며, 타사용자 잡음, 협대역간섭, 가우시안잡음도 서로 각각 독립적이라고 가정하면, Z_i 의 분산은 다음식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(Z_i) &\equiv \sigma^2 = \text{Var}(I_{Z_i} + J_{Z_i} + N_{Z_i}) \\ &= \text{Var}(I_{Z_i}) + \text{Var}(J_{Z_i}) + \text{Var}(N_{Z_i}) \end{aligned} \quad (11)$$

먼저, 수신신호 크기의 pdf는 다음과 같이 Rayleigh분포를 갖는다.^[4]

$$f_{z_i}(z_i) = \frac{z_i}{\sigma_{z_i}^2} \exp\left(-\frac{z_i^2}{2\sigma_{z_i}^2}\right), (z_i \geq 0) \quad (12)$$

이때 수신신호 크기가 Rayleigh분포를 갖을 때 수신 전력의 pdf는 식(13)과 같이 지수분포를 이룬다. 여기서 z_i 는 i 번째 신호의 포락선이며, σ_{z_i} 는 분산이다.

$$\begin{aligned} f(r_i) &= f_{z_i}(z_i) \frac{dz_i}{dr_i} = \frac{R_c N_o}{\sigma_{z_i}^2} \exp\left(-\frac{R_c N_o \gamma_i}{\sigma_{z_i}^2}\right) \\ &= \sigma_i \exp(-\sigma_i \cdot \gamma_i) |_{E_i=1} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, $\gamma_i = \frac{z_i^2}{2N_o \cdot R_b}$ 이다. 그러므로, 다중캐리어 확산방식에서 각 부캐리어의 수신 신호 크기의 pdf가 레이레이분포를 따른다고 가정하면 i 번째 캐리어의 수신 전력의 pdf는 다음식(14)와 같다. 이때 K 명의 동시 사용자가 존재하고 i 번째 캐리어에 재밍신호가 존재하지 않는다고 가정하면 열잡음과 타사용자의 의한 간섭만이 시스템에 영향을 미치므로 신호대 잡음비는 식(14)와 같이 정리된다.

$$\gamma_{i, \text{noJammed}} = \frac{E_b}{N_o + \frac{(K-1)E_b}{PG_{1\text{carrier}}}} \quad (14)$$

만일 K 명의 동시 사용자가 존재하고 i 번째 캐리어에 재밍이 존재한다면 열 잡음과 재밍신호가 동시에 영향을 주어 신호대 잡음비는 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_{i, \text{Jammed}} &= \frac{E_b}{N_o + N_J + I_o} \\ &= \left((E_b/N_o)^{-1} + \frac{I}{nR_c E_b} + \frac{(K-1)}{PG_{1\text{carrier}}} \right)^{-1} \\ &= \left((E_b/N_o)^{-1} + \frac{JMR}{SnR_c} + \frac{(K-1)}{PG_{1\text{carrier}}} \right)^{-1} \\ &= \left((E_b/N_o)^{-1} + \frac{JSR}{PG_{1\text{carrier}}} \cdot \frac{M}{n} + \frac{(K-1)}{PG_{1\text{carrier}}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

단, PG 는 처리이득, K 는 사용자수, n 은 협대역 재밍이 걸린 채널수이다, 만일, M 개의 전체 캐리어 수 중 n 개의 재밍이 걸려 있다면 수신된 캐리어들을 결합하여 얻어진 전체의 신호의 S/N비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_b &= \sum_{i=1}^M \gamma_i \\ &= (M-n) \left(\frac{E_b}{N_{\text{Total}}} \right)_{\text{NoJammed}} + n \left(\frac{E_b}{N_{\text{Total}}} \right)_{\text{Jammed}} \\ &= (M-n) \left(\frac{E_b}{N_o + \frac{(K-1)E_b}{PG_{1\text{carrier}}}} \right)_{\text{NoJammed}} \\ &\quad + n \left(\frac{E_b}{N_o} \right)^{-1} + \frac{JSR}{PG_{1\text{carrier}}} \cdot \frac{M}{n} + \frac{(K-1)E_b}{PG_{1\text{carrier}}} \right)^{-1} \\ &= (M-n) \left(\left(\frac{E_b}{MN_o} \right)^{-1} + \frac{(K-1)}{PG_{1\text{carrier}}} \right)^{-1} + \\ &\quad n \left(\frac{E_b}{MN_o} \right)^{-1} + \frac{JSR}{PG} \cdot \frac{M}{n} + \frac{(K-1)}{PG_{1\text{carrier}}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 i 는 램덤변수로서 pdf의 지수분포의 레이 레이 페이딩 채널 모델은 이전에 유도한 식(13)과 동일한 식(17)이며, 식의 특성함수는 라플라스변환을 통하여 식(18)로서 유도된다. 변수 $1/\sigma_i$ 는 평균 E_b/N_o 으로서 상수값을 지닌다.

$$f(\gamma_i) = \sigma_i \exp(-\sigma_i \gamma_i) |_{E_i=1} \quad (17)$$

$$L(f(\gamma_i)) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\sigma_i}} \quad (18)$$

결국, 동시에 수신된 M 개의 캐리어를 MRC한 경우 수신 신호대 잡음비 γ_b 의 평균은 각 γ_i 의 합이고 pdf는 각 부캐리어 신호대 잡음비의 특성함수의 곱으로 표현된다.

$$L(f(\gamma_b)) = \prod \frac{1}{1 + \frac{s}{\sigma_i}} \quad (19)$$

여기서 평균 에러율은 가우시안 잡음 채널에서의 비트 에러율을 위의 pdf에 대해 평균한 결과로 표현이 가능하다. 따라서 각 페이딩의 분포에 따라 서로 다른 에러확률이 나타나게된다. 이와 같은 조건 하에서 페이딩 채널의 에러 확률은 다음과 같다.

$$P_b = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\gamma_b}) \cdot f(\gamma_b) d\gamma_b \quad (20)$$

III. 시뮬레이션 결과 분석

본 연구에서는 Rayleigh채널환경하에서 재밍을 고려한 시스템의 분석과 이에 대한 성능분석을 피하였다. 즉 채널상에 기본적으로 존재하는 AWGN과 MUI와 아울러 협대역 간섭이 존재하는 환경하에서 시스템의 성능분석을 수행하였다. 시스템 성능분석을 위한 전제사항은 다음과 같이 설정하였다. 협대역 간섭 재밍형태는 단일 Partial band재밍, 펄스톤 재밍 등을 적용하였고, 채널환경은 가우시안과 레이레이채널에 대해서 양시스템을 비교분석하였다. 항재밍 요구값은 JSR(10,20,30dB)값을 가정하였다. 양 시스템 모두 동기변복조 방식을 채택하였으며 시스템의 신호획득과 추적은 완전하게 이루어진다는 것을 전제사항으로 하였다. 또한 이에 따른 전력제어는 정확하게 이루어진다는 가정하에 수행하였다.

아울러 MC-CDMA 수신기에서는 각 캐리어별로 수신된 신호를 MRC 결합을 통하여 신호를 복조한다. 확산대역폭은 40MHz를 기본으로 다중캐리어 방식을 위해서는 부캐리어수를 4개로 하여 시스템을 분석하였다.

시스템 성능분석결과는 다음과 같다. 먼저 그림(2)은 협대역 간섭하에서 DS-CDMA시스템의 분석결과로서 처리이득(PG)는 30dB, 가능한 위험수준(JSR)은 20dB로 제한하여 가입자수에 따른 에러율을 살펴 보았다. 분석결과 가우시안 채널환경에서는 수십 가입자만의 통신이 가능할 뿐더러 100가입자 이상에서는 전력에 상관없이 통신이 불가능하였다. 그림(3)와 (4)은 펄스톤 재밍환경에서 DS-CDMA시스템의 분석결과이다. 펄스톤의 시간간격에 따라 약간의 차이는 있지만 0.1의 시간간격시에는 통신이 전체적으로 곤란하였다. 또한 재밍을 하는 시간의 비(ρ)가 0.001인 경우 $E_b/N_0=9dB$ 를 기준으로 일부 음성통신만이 가능하며 일반적인 데이터 통신은 곤란하였다. 재밍의 시간간격을 0.1이상으로 올리면 통신자체가 불가능하였다. 그나마 0.01정도시에는 음성통신만이 가

능할 뿐이었다. 여기서 가입자수는 100명으로 한정하였다. 그림(5)는 레이레이 페이딩 채널상황에서 위협에 따른 성능분석을 수행하였다. 전체적으로 재밍 전력에 상관없이 통신이 어려운 것으로 나타났다. 그림(6)는 가우시안 채널환경에서 높은 재밍전력을 고려한 재밍된 캐리어수(n)에 따른 성능분석을 하였다. 분석결과 재밍된 캐리어수가 증가함에 따라 급격하게 성능 저하를 보였으며 10^{-5} 에러율을 기준시 1-3개 캐리어의 성능차는 약 6dB가 발생하였다. 그림(7)은 다양한 간섭채널에서 양 시스템의 성능분석 결과이다. 협대역 간섭 환경을 전제시 분석결과 재밍신호에 따라 에러확률이 높게 나타나지만 채널환경이 성능을 좌우하는 것으로 도출되었다. 가우시안 채널시 양시스템의 성능차는 현격하여 $E_b/N_0=12dB$ 의 경우 10^{-3} 에러율 차가 발생하였다. 레이레이 채널 환경에서는 단일 캐리어 방식의 통신을 불가능하였고, 다중캐리어 방식의 경우도 항재밍요소 $J/S=20dB$ 적용시 음성통신이 곤란한 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구는 열악한 운용환경을 설정하여 DS-CDMA와 MC-CDMA시스템 분석과 아울러 성능평가를 수행하였다. 전제사항으로 채널환경은 통신채널에 일반적인 가우시안 채널과 다중경로 채널상에서 적용가능한 레이레이 페이딩 채널환경을 고려하여 시스템을 모델링하고 분석하였다. 또한, 다중사용자 잡음 및 협대역 간섭을 추가하여 특수한 환경에서 적용 가능한 시스템을 설정하여 성능분석하였다. 협대역 간섭의 종류는 부분대역 잼밍, 펄스톤 재밍으로 제한하였다. 분석결과 양시스템 모두 재밍신호에 따라 에러확률이 급격하게 증가했지만 적용되는 채널환경에 따라 성능차가 큰것으로 도출되었다. 연구결과 M-CDMA시스템은 단일대역확산시스템에 비하여 협대역 간섭과 다중경로페이딩에 견고한 것으로 파악되었다. 결국 단일 반송파를 사용하여 광대역의 신호를 확산하기 위해서는 빠른 칩속도와 광대역처리소자기술이 필수적이나 기술적인 한계가 따른다. 더구나 협대역 재밍환경과 같은 특수한 환경을 고려할때는 단일캐리어 방식보다 다중캐리어 확산방식의 적용이 유리하다. 하지만 한정된 위성자원의 효율적인 분배와 효과적인 시스템운용을 위해서는 정확한 채널환경분석과 부캐리어수 및 전송속도에 따른 처리이득, 적정한 위험레벨 설정에 신중을 기해야 할 것이다.

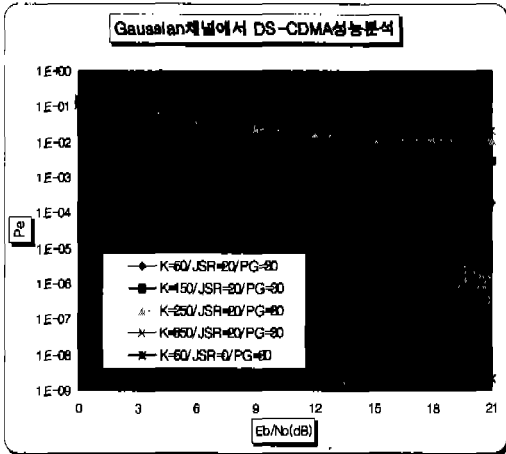


그림 2. 재밍하에서 DS-CDMA 시스템 성능분석도

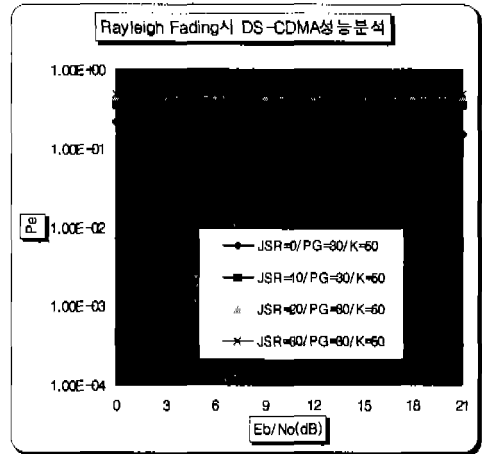


그림 5. 톤재밍하에서 DS-CDMA 시스템 성능분석도

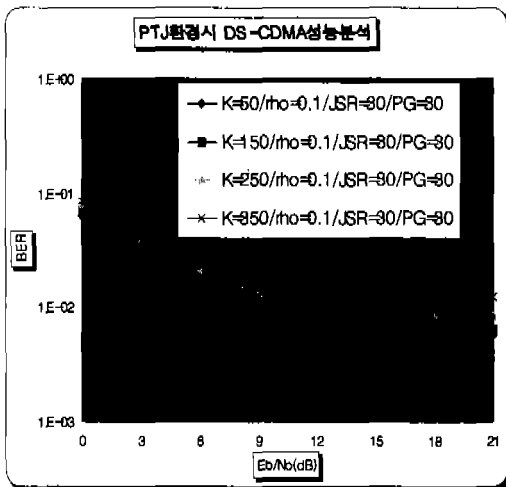


그림 3. 톤재밍하에서 DS-CDMA 시스템 성능분석도

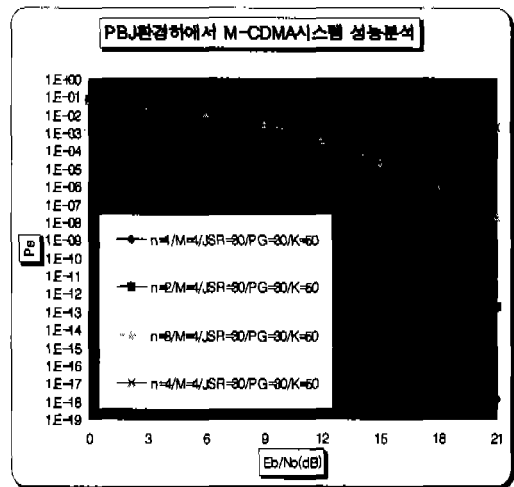


그림 6. 재밍하에서 MC-CDMA 시스템 성능분석도

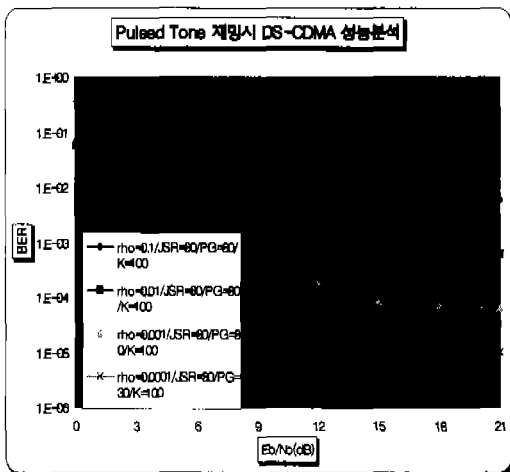


그림 4. 톤재밍하에서 DS-CDMA 시스템 성능분석도

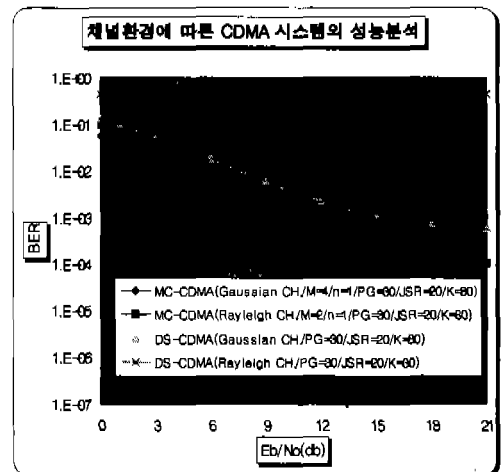


그림 7. 다양한 채널 환경에서 DS-CDMA 시스템 성능 분석도

참 고 문 헌

- [1] Shiro Kondo & Laurence B.Milstein, "Performance of Multicarrier DS CDMA System", IEEE Trans. comm., vol. 44, no. 2, February 1996.
- [2] Shiro Kondo and Laurence B.Milstein, "Multicarrier DS CDMA Systems in the Presence of Partial Band Interference", IEEE MILCOM 1994.
- [3] S. Kondo and L. B. Milstein, "On the use of multicarrier direct sequence spread spectrum system," in Proc. IEEE MILCOM '93, Boston, MA, Oct, 1993, pp. 52-56.
- [4] E. A. Sourour, M. Nakagawa, "Performance of Orthogonal Multicarrier CDMA in a Multipath Fading Channel", IEEE Trans. Commn. Vol. 44 No.3 March 1996, pp356-367.
- [5] Shinsuke Hara, Ramjee Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA", IEEE Comm. Mag., Dec. 1997, pp126-133.
- [6] Bernard Sklar, Digital Communications Fundamentals and Applications, Prentice Hall. 1988.
- [7] Proakis, Digital Communications, New York: McGraw-Hill, 1989.
- [8] R.E. Ziemer, Digital Communications and Spread Spectrum Systems, Macmillan Publish Company, 1985.
- [9] 김인겸, 신관호, 안호성 "Uplink Jamming환경하에서 OBP환경을 고려한 군 위성시스템 성능분석에 관한 연구," 한국통신학회논문집 제24권 6호, 1999.
- [10] 김인겸, "Jamming환경하에서 Ka-band위성링크 설계에 관한 연구," 한국통신학회논문집 제21권 11호, 1996.

김 인 겸(Ihn-Kyeom Kim) 정희원

1988년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 졸업
1990년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 석사
1990년 3월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원
<주관심 분야>정지체도 위성통신, 대전자전분야

안 성 준(Seong-Jun Ahn)

1984년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업
1986년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
1986년 3월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원
<주관심 분야>모뎀, 교환기술, 위성통신분야