

# 다중사용자 간섭이 존재하는 라이시안 페이딩 채널에서 No 시퀀스를 사용하는 확산스펙트럼 통신시스템의 성능분석

\*백 인 제, \*이 정 도, \*\*허 준 옥, \*\*\*노 종 선  
\*건국대학교 전자·정보통신공학과, \*\*Van 테크, \*\*\*서울대학교 전기공학부

## Performance Analysis of spread spectrum communication systems using No sequence in Rician fading channel with multiuser interference

\*In-Je Baek, \*Jung-Do Lee, \*\*Jun-Wook Heo, \*\*Jong-Seon No  
\*Dept. of Electronic Engineering, Konkuk University  
\*\*VANTECK Wireless Comm.  
\*\*\*School of Electrical Engineering, Seoul National University

### 요약

다원접속(Multiple Access)으로 확산 스펙트럼 통신방식을 사용하는 경우 시스템 설계자의 목표는 가능한 많은 사용자들이 가능한 적은 상호 간섭을 가지고 주파수 대역을 사용할 수 있는 확산코드를 발견해 내는 것이다. 다른 확산코드를 사용하는 사용자로부터의 간섭의 양은 두 개의 다른 확산코드 사이의 상호상관(cross-correlation) 특성과 관계가 있다.  $m$ -시퀀스, Kasami 시퀀스, Gold 시퀀스 등은 물론 좋은 상관특성을 가지고 있지만 매우 작은 선형스팬을 가지고 있어 균 통신환경과 같은 재밍(jamming) 환경에 매우 취약하다. 그러나 노(No) 시퀀스나 GMW 시퀀스는 매우 큰 선형스팬을 가지며 최적의 상관특성을 가지고 있어 재밍환경에 매우 적합하다. 이에 다른 시퀀스들과 비교해 노 시퀀스의 재밍환경에서의 성능분석과 다중사용자 간섭에 대한 성능 분석의 매우 의미 있는 연구일 것이다. 본 논문에서는 내부부호로 구속장이 7 이고 부호율이 각각 1/2, 3/4 인 길쌈부호를 사용하고 외부부호로  $GF(2^8)$ 상에서 각각 shortened RS 부호 (204,188) 및 (176,160)을 사용하는 연접부호를 프로그램으로 구현하여 이 연접부호에서 확산부호로 최적의 상관특성을 가진 노 시퀀스를 사용했을 때 재밍환경에서의 BER 성능과 다중사용자 간섭에 대한 BER과 FER의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석하였다.

## 1. 서론

위성통신시스템에서 기존의 위성들은 주파수분할다원접속(FDMA) 기법 또는 시분할다원접속(TDMA) 기법을 사용하고 있다. 그러나 새로 개발되는 차세대 위성통신시스템을 위하여 코드분할다원접속(CDMA) 기법이 활발히 논의되고 있다. 주로 보안이 요구되고, 재밍(jamming)에 강한 통신시스템을 요구하는 군용통신시스템을 위하여 개발되고, 적용 되어온 CDMA 기법이 최근 상용통신시스템에 적용되면서 관련 기술개발이 본격적으로 이루어지고 있다. 재밍환경에서 적절한 PN 시퀀스의 결정은 매우 중요한 일이다. 또한 최근 들어 여러 가지 이동통신시스템(셀룰라, PCS, IMT-2000)의 다원접속방식으로 CDMA 방식이 표준으로 채택되어 신호의 스펙트럼을 확산시키며 사용자간의 간섭이 최소화 되도록 서명(signature) 시퀀스를 사용한다. 대역확산다원접속(spread-spectrum multiple access) 통신시스템에서의 서명시퀀스는 낮은 out-of-phase 자기상관(autocorrelation)값, 상호상관(crosscorrelation) 값과 선형스팬이 큰 코드시퀀스가 사용되는 것이 바람직하다. Bent 시퀀스 군과 GMW 시퀀스뿐 아니라, Kasami 시퀀스의 작은 군(small family)과 큰 군(large family)들은 모두 적절한 상관특성을 가지지만 GMW시퀀스 및 bent 시퀀스 이외의 시퀀스들은 작은 선형스팬을 가진다. 노(No) 시퀀스 군들은 GMW 시퀀스를 포함하고, Kasami 시퀀스의 작은 셋(small set)을 포함하고 있으며, Welch 하한식 견지에서 최적의 상관특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 매우 큰 선형스팬을 가지고 많은 family를 생성할 수 있다. 본 논문에서는 이 최적의 상관특성과 매우 큰 선형스팬을 갖는 노 시퀀스를 사용했을 때 재밍환경과 다중사용자환경에서의 성능을 분석했다. 2장에서는 채널환경에 대해 설명하고 3장에서는 연결부호와 노 시퀀스의 개요와 구현방법을 제시했다. 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 노 시퀀스 사용시 재밍 환경에서의 성능 분석과 다중사용자간섭에 대한 비트오율(BER)과 프레임오율(FER)의 성능을 분석했다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

## 2. 채널환경

### 2.1 라이시안 페이딩 채널

라이시안 페이딩 채널 모델은 위성통신시스템과 같이 직접파(line-of-sight)가 존재하고 반사파 성분에 비해 직접파 성분이 지배적인 전파 환경의 채널 모델이다.<sup>[8]</sup>

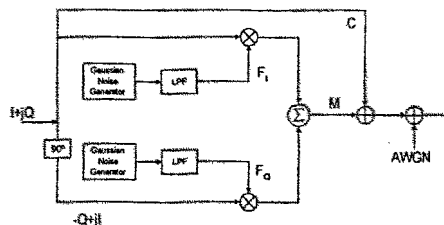


그림 1. 라이시안 페이딩 채널 블럭도

$I+jQ$ 는 복소 입력 신호이고 C와 M은 각각 직접과 성분과 분산된 반사파 성분을 나타낸다. 먼저 Gaussian 잡음 발생기와 필터를 거친 성분  $F_I$  와  $F_Q$ 을 발생시킨다. Impulse invariance method 방식에 의해 설계된 IIR 필터의 임펄스 응답은 그에 해당되는 아날로그 임펄스 응답을 샘플링한 결과와 같아진다. 즉,

$$h(n) = h_a(nT)$$

(T는 샘플링 주기)

임펄스응답이  $h(n) = h_a(nT)$ 되는 디지털 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$H(z) = \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{1 - e^{s_k T} z^{-1}}$$

(단, T: samplig period)

모의 실험을 위하여 사용한 32차 IIR 필터는 다음 식과 같은 선형시불변(linear time-invariant) 시스템으로 표현된다.

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}}$$

## 2.2 Pulsed Noise 재밍 환경

펄스 재밍은 대역 제한된 백색 가우시안 잡음을 펄스의 형태로 전송하는 방법으로 즉, 시간에 따라 전송하고 안하고를 반복하면 평균 재밍 파워가 일정할 때 순간 파워를 높일 수 있으므로 재밍 신호를 전송할 때 재밍 효과가 높아질 수 있다. 평균 재밍 파워가  $J_0$ 이고 재밍을 하는 시간 비가  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ )라면 재밍이 존재할 때의 잡음의 power spectral density가  $N_0$ 에서  $(N_0 + J_0/\rho)$ 로 증가한다. 따라서 BPSK 복조 시스템에서 평균 비트 오류 확률은 다음과 같다.

$$P_B = (1 - \rho)Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) + \rho Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0/\rho}}\right)$$

일반적으로 재밍 신호는 열잡음으로 인해 발생하는 잡음보다 매우 크기 때문에 위의 식은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$P_B \approx \rho Q\left(\sqrt{\frac{2E_b \rho}{J_0}}\right)$$

Q-함수의 특성으로  $P_B$ 는 다음 식을 만족한다.

$$P_B \leq \frac{\rho}{\sqrt{4\pi E_b \rho / J_0}} e^{-E_b \rho / J_0}$$

따라서,  $\rho = J_0 / 2E_b$ 일 때  $P_B$ 를 최대가 되고 이 때  $P_{B,max}$ 는 다음 식과 같다.

$$P_{B,max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{1}{2E_b / J_0}$$

여기서  $E_b / J_0 \geq 0.5$ 인 경우이고,  $E_b / J_0 \leq 0.5$ 인 경우는 위의 식에서  $\rho$ 가 1.0일 때  $P_B$ 를 최대화한다.

모의 실험에서 펄스 재밍 신호는 시간 영역에서 랜덤하게 발생시켜 전체 통신 시간에 대한 펄스 재밍이 존재하는 평균 시간의 비가  $\rho$ 가 되도록 하였다<sup>[1][2]</sup>.

### 3. 연접 부호와 노 시퀀스의 구현 및 적용

#### 3.1 연접 부호

다음 그림은 본 논문에서 고려되는 통신시스템의 전체적인 블록도이다.

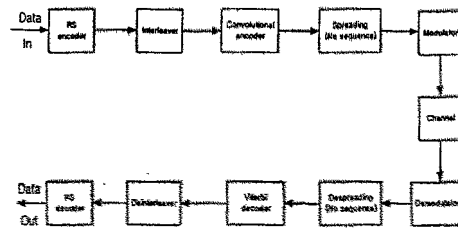


그림 2. 통신시스템의 블록도

위성통신 시스템에서 채널환경은 반사파 성분보다는 직접파 성분이 주가 되는 Rician 페이딩 채널이다. 또, 여러가지 재밍에 의한 신호의 감쇠를 고려하여 오류정정능력이 뛰어난 채널부호인 연접부호(concatenated codes)를 사용해야 한다. Forney에 의해 처음 도입된 연접부호는 좋은 성능을 가지면서도 비교적 간단한 부호들을 결합함으로써 전체적으로 뛰어난 오류정정능력을 갖는 부호이다. 또한, 외부부호와 내부부호 사이에 적당한 인터리버를 삽입함으로써 성능을 향상시킬 수 있다.

외부부호로는 (204,188,8) Shortened RS 부호와(176,160,8) Shortened RS 부호를 사용했다. 원시다항식 (primitive polynomial)은 다음과 같고,

$$f(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

생성 다항식(generator polynomial)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
g(x) &= (x + \alpha^0)(x + \alpha^1) \cdots (x + \alpha^{14})(x + \alpha^{15}) \\
&= x^{16} + \alpha^{120}x^{15} + \alpha^{104}x^{14} + \alpha^{107}x^{13} + \\
&\quad \alpha^{109}x^{12} + \alpha^{102}x^{11} + \alpha^{161}x^{10} + \alpha^{76}x^9 + \\
&\quad \alpha^3x^8 + \alpha^{91}x^7 + \alpha^{191}x^6 + \alpha^{147}x^5 + \alpha^{169}x^4 \\
&\quad + \alpha^{182}x^3 + \alpha^{194}x^2 + \alpha^{225}x + \alpha^{120}
\end{aligned}$$

내부부호로는 구속장이 7이고 부호율이 각각 1/2, 3/4인 길쌈부호를 사용했다. 3-bit 연성판정을 하고 traceback depth는 64이고 인터리빙 깊이(interleaving depth)는 1, 2, 4인 블록 인터리버를 사용했다.

### 3.2 노 시퀀스의 정의

노 시퀀스는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
S &= \{s_i(t) \mid 0 \leq t \leq N-1, 0 \leq i \leq 2^m-1\} \\
s_i(t) &= \text{tr}_1^m\{[\text{tr}_m^n(\alpha^{2^t}) + \gamma_i \cdot \alpha^{T \cdot t}]\}
\end{aligned}$$

여기서  $a$ 는  $GF(2^n)$ 의 원시원이고  $n=2m$ ,  $T = \frac{2^n-1}{2^m-1} = 2^m+1$ ,  $r_i \in GF(2^m)$ 이며  $s_i(t)$ 의 주기는  $N=2^n-1$ 이다. 그리고  $r$ 은  $1 \leq r \leq 2^m-1$ 의 정수 중에  $\text{gcd}(r, 2^m-1)=1$ 이다. 노 시퀀스의 군의 크기는  $2^m$ 이며 선형스팬은 노 시퀀스군 내의 GMW 시퀀스의 선형스팬보다 큰 값을 갖고 Welch 하한식의 견지에서 최적의 상관특성을 갖는다. 노 시퀀스는 군의 크기, 최적의 상관특성 그리고 큰 선형스팬의 견지에서는 bent 시퀀스와 동일하며 짝수  $n$ 값에서의 존재, 군의 크기, 균형특성, 최적의 상관특성 그리고 상관값들의 분포 견지에서는 Kasami 시퀀스와 동일하다. 노 시퀀스에서  $r=1$ 일 때 Kasami 시퀀스가 되고,  $r_i=0$ 일 때 GMW 시퀀스가 되며  $r=1$ 이고  $r_i=0$ 일 때  $m$ -시퀀스이다.

### 3.3 노 시퀀스의 구현

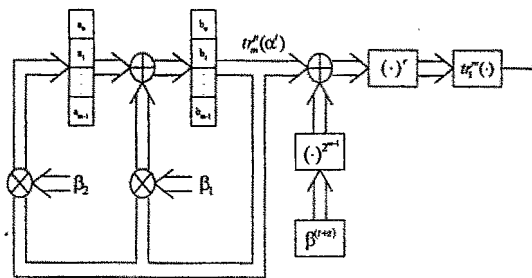


그림 3. Galois 형태의 노 시퀀스 발생기

다음은 주기가  $2^{34}-1$ 이고 ( $n=34$ ,  $m=17$ )이고  $T = 2^{17}+1$  인 노 시퀀스의 발생기 구현이다. 다음 그림에서 두 번째 shift register block의 출력을  $\beta$ 라 한다면, 다음과 같이  $GF(2^m)$ 의 basis를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\beta^t = \sum_{i=0}^{m-1} v_i \cdot \beta^i$$

여기서,  $v_i$ 는  $t$ 의 함수로써,  $GF(2)$ 상에 있는 계수를 갖는다. 앞의 두개의 shift register stage의 입력을 결정하기 위해, 부울 계수 함수를 정의하면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \beta_2 \cdot \beta^t &= \sum_{i=0}^{m-1} f_i(v_0, v_1, \dots, v_{m-1}) \cdot \beta^i \\ \beta_1 \cdot \beta^t &= \sum_{i=0}^{m-1} g_i(v_0, v_1, \dots, v_{m-1}) \cdot \beta^i \end{aligned}$$

여기서,  $f_i(v_0, v_1, \dots, v_{m-1})$ ,  $g_i(v_0, v_1, \dots, v_{m-1})$ 은 부울 계수 함수이다. 그리고  $GF(2)$ 상에서  $m$ -차원인 시퀀스  $\beta^{(t+z)}$ 를 발생하기 위하여  $m$ 개의 shift register로 구성되는 이진  $m$ -시퀀스 생성기가 필요하다.

비선형함수  $(\cdot)^{2^{m-1}}$ 는 다음 식과 같은 계수 함수  $h_{1,i}(v_0, v_1, \dots, v_{m-1})$ 을 생성하는 논리회로가 필요하다.

$$\begin{aligned} (\beta^{(t+z)})^{2^{m-1}} &= \left( \sum_{i=0}^{m-1} v_i \cdot \beta^i \right)^{2^{m-1}} \\ &= \sum_{i=0}^{m-1} h_{1,i}(v_0, v_1, \dots, v_{m-1}) \cdot \beta^i \end{aligned}$$

마지막으로,  $tr_1^m(\cdot)$ 는 여러 개의 계수들 중에 하나를 선택하기 때문에, 비선형 함수  $(\cdot)$ 는 아래 식에 있는  $m$ 개의 계수 함수  $h_{2,i}(v_0, v_1, \dots, v_{m-1})$ 중의 하나를 계산한다.

$$(\beta^t)^r = \sum_{i=0}^{m-1} h_{2,i}(v_0, v_1, \dots, v_{m-1}) \cdot \beta^i$$

첫 번째와 두 번째 shift register block의 주어진 초기 조건에 대해  $\beta^{(t+z)}$ 의 shift register의 초기조건들을 변화시킴으로써 회로상의 변화 없이 또 다른 노 시퀀스를 얻을 수 있다. 따라서,  $3m$ 개의 shift register와 몇몇의 추가 논리회로로 시퀀스군내의 노 시퀀스 중의 하나를 발생시키는 회로를 구현할 수 있다<sup>[11]</sup>.

### 3.4 시스템에 노 시퀀스 적용

각 채널을 통과하기 전에 처리이득이 128가 되도록 노 시퀀스를 각각의 데이터에 곱하면 데이터의 한 비트가 128칩이 되어 주파수 영역에서는 신호가 확산된다. 채널을 통과하기 전에 확산된 신호들은 다음 식과 같이 더해지게 된다.

$$s(t) = d_1(t)c_1(t) + d_2(t)c_2(t) + d_3(t)c_3(t) + \dots$$

여기서,  $d_i(t)$ 는 원하는 신호라 가정하고 나머지는 다른 사용자들의 신호라고 가정한다. 그러면 다른 사용자들의 신호는 원하는 신호의 간섭으로 작용한다. 채널을 통과하면서 위의  $s(t)$ 의 각 칩에 잡음이 더해지거나 페이딩 신호일 경우 곱해서 더해지게 된다.

$$s_n(t) = s(t) + n(t)$$

채널통과 후 수신단에서  $S_n(t)$ 의 신호를 받아 내 신호의 확산시퀀스인  $c_i(t)$ 를 곱해 역 확산을 수행하게 된다. 그러면 내 신호는 역 확산이 되지만 다른 사용자 신호들은 확산이 돼서 필터를 사용하거나 correlation을 취해 원하는 신호를 얻을 수 있다. 이러한 과정을 통해 노시퀀스의 상호 상관특성을 분석할 수 있다.<sup>[2][11]</sup>

#### 4. 컴퓨터 모의실험 결과

본 논문에서는 내부부호로 구속장이 7 이고 부호율이 각각 1/2 및 3/4인 길쌈부호를 사용하고 외부부호로  $GF(2^8)$  상에서 각각 shortened RS 부호 (204,188) 및 (176,160)을 사용하는 연접부호를 소프트웨어로 구현하고 확산부호로 최적의 상관특성을 갖는 노시퀀스를 사용했을 때 재밍환경과 다중사용자간섭에 대한 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석하였다. 특히 재밍환경에서는 확산부호로 주기가  $2^{34}-1$ 이고,  $r=3$ 인 노시퀀스를 사용하였고, 처리이득은 27[dB]이다. 재밍신호의 파워와 데이터 신호의 파워의 비율인 JSR은 각각 21, 20[dB]로 하고  $\rho$ 는 각각에 대하여 1.0, 0.1, 0.01로 하여 모의실험을 수행하였다. 다중사용자간섭 분석에서는 한 프레임의 길이가 1280bit이고 같은 노시퀀스를 사용하였으며, 처리이득은 21[dB]로 하고 사용자 1,2,5,10 명에 대해 각각 AWGN과 Rician 페이딩 채널에서 분석하였다. 재밍환경에서 JSR이 21[dB]일때  $\rho$ 값이 변화함에 따라  $E_b/N_0$ 가 약 12[dB]에서 일반적으로 음성통신에서 요구되는 BER인  $10^{-3}$ 을 만족함을 알 수 있었다. JSR이 20[dB]일 때는  $\rho$ 가 변화함에 따라  $E_b/N_0$ 가 약 7[dB]에서 일반적으로 음성통신에서 요구되는 BER인  $10^{-3}$ 을 만족함을 알 수 있었다. 다중사용자 간섭에서는 AWGN 채널에서 Rician 채널에서 사용자 수가 1명 늘어날 때 마다 약 0.5dB의 BER과 FER의 성능 열화를 나타내었다. 그러나 사용자 수가 5명 10명 늘어날수록 성능의 열화는 감소하는 추세를 보였다. 다중사용자 환경에서도 노시퀀스를 사용하므로써 다중사용자간섭을 최소화 할 수 있었고 큰 선형스팬에 의해 비도를 높일 수 있었다.

#### 5. 결론

본 논문은 보안이 요구되는 군위성통신시스템이 위성이동통신시스템 환경에서 사용될 수 있도록 선형특성이 아주 좋은 노 시퀀스를 확산부호로 사용하여 재밍환경과 다중사용자환경에서 성능을 분석하였다. 대역확산 다원접속(spread spectrum multiple access) 시스템에서의 확산시퀀스는 본문에서 살펴본 바와 같이 여러가지가 있으나 자기상관특성, 상호상관특성, 선형스팬 등을 고려해 볼 때  $m$ -시퀀스, GMW 시퀀스, Gold 시퀀스, Kasami 시퀀스 등은 적절한 자기상관특성, 상호상관특성을 가지지만 제3자가 시퀀스를 복원하기 힘든 정도를 나타내는 선형스팬이 작은 단점이 있다. 그러나 노 시퀀스는 최적의 자기상관특성, 상호상관특성을 가지면서도 선형스팬이 큰 장점을 가지고 있기 때문에 노 시퀀스를 사용한다. 노 시퀀스는  $r$ 값이 커짐에 따라 하드웨어가 복잡해지고 연산량이 많아져 구현이 어려워진다는 단점이 있지만 시뮬레이션 결과에서 보듯이 재밍환경하에서는 물론 다중사용자환경에서도 확산부호로서 아주 적절하게 사용될 수 있다. 그러므로 앞으로 하드웨어의 기술발전과 더불어 상용 이동통신시스템에도 보안이 많이 요구될 것이므로 노 시퀀스의 연구는 유용한 연구가 되리라 생각된다.

\*감사의 글: 본 논문은 국방과학연구소의 지원으로 수행된 산학연구과제 “CDMA 다중접근 방식의 데이터 오류 최소화 기법 구현 및 성능 연구(1998.5.1-2000.12.15, 과제번호 : 98-2-4)” 결과중 일부임.

## 6. 참고문헌

- [1] Benard Sklar, Digital Communications, Prentice-Hall International Edition, 1988.
- [2] R. E. Ziemer and R. L. Peterson, *Digital Communications and Spread Spectrum Systems*, Macmillan, New York, 1985.
- [3] William C. Y. Lee, Mobile Cellular Telecommunications, McGRAW-Hill International Edition. 1995.
- [4] Stephen B. Wicker. Error Control Systems for Digital Communication and Storage, Prentice-Hall, 1995.
- [5] F. J. Mac Williams and N. J. A. Sloane, The Theory of Error-Correcting Codes, North-Holland Publishing Company, 1981.
- [6] Yutaka Yasuda, Yasuo Hirata and Akira ogawa, "Optimum Soft Decision for Viterbi Decoding," 5th International Conference on Digital Satellite Cunnunications, pp 251-258, Genoa, Italy, March 1981.
- [7] Yutaka Yasuda, Kanshiro Kashiki, and Yasuo Hirata, "High-Rate Punctured Convolutional Codes for Soft Decision Viterbi Decoding," IEEE Transactions on Communications, Vol. com-32, No.3, pp 315-318, March 1984
- [8] A. G. Kanatas, E. C. Kanderakis, and P. Constantinou, "Narrowband Land Mobile Satellite Channel Modeling," International Mobile Satellite Conference, Ottawa, -IMSC '95, pp 109-114.



[9] Raymond L. Pickholtz, Donald L. Schilling, and Laurence B. Milstein, "Theory of Spread-Spectrum Communications - A Tutorial," IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-30, No. 5, pp 855-884 May 1982

[10] E. J. Weldon, Jr. "Reed Solomon Error Correcting Codes," A special tutorial Seminar, 1984

[11] Jong-Seon No and P. Vijay Kumar "A New Family of Binary Pseudorandom Sequences Having Optimal Periodic Correlation Properties and Large Linear Span," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 35, No. 2, pp 371-379, March 1989

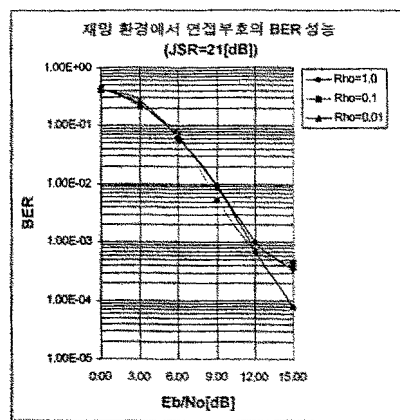


그림 4. 재밍환경에서 연접부호의 BER성능(JSR=21[dB])

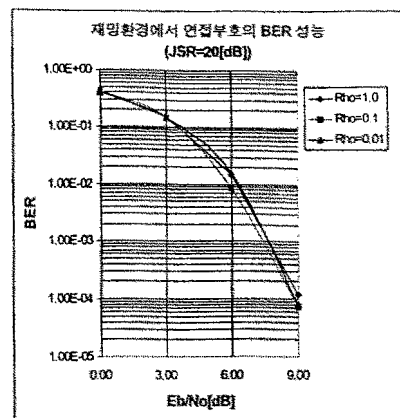


그림 5. 재밍환경에서 연접부호의 BER성능(JSR=20[dB])

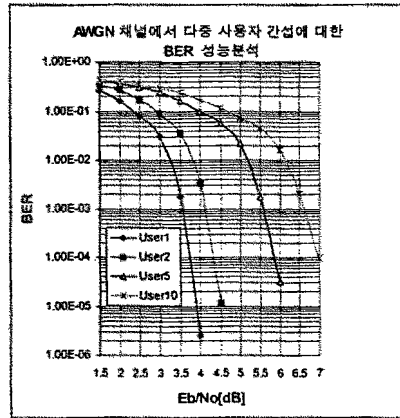


그림 6 AWGN 채널에서 다중 사용자 간섭에 대한 BER 성능

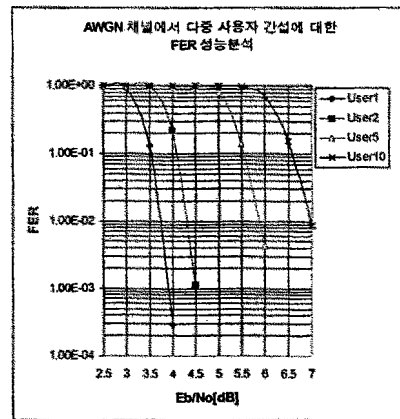


그림 8 AWGN 채널에서 다중 사용자 간섭에 대한 FER 성능

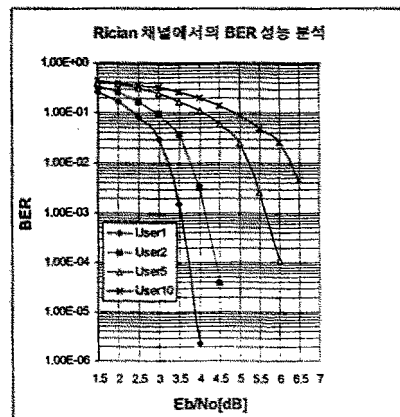


그림 8 Rician 채널에서 다중 사용자 간섭에 대한 BER 성능

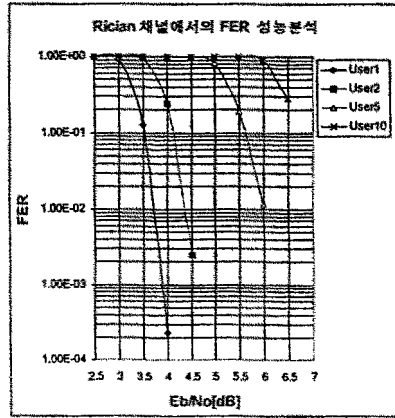


그림 9 Rician 채널에서 다중 사용자 간섭에 대한 FER 성능