

부분대역 간섭 환경의 주파수도약 대역확산 시스템에서 RS-컨볼루션 연쇄부호의 Erasure 복호방식

정회원 강병무*, 유흥균**

Erasure Decoding Method of RS-Convolutional Concatenated Code in Frequency-Hopping Spread Spectrum of Partial Band Jamming Environment.

Byoung Moo Kang*, Heunggyoon Ryu** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 연쇄부호(concatenated code) 시스템에서 erasure 복호를 적용하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 복호를 수행하여 이전의 복호결과 보다 개선되었으면 현재의 결과를 이용하고 그렇지 않으면 이전의 결과를 이용한다. 본 논문에서 사용한 부호는 RS(63,31), 컨볼루션(4,1/2)이다. 또한 시뮬레이션과 이론적 결과를 비교하여 성능을 확인하였다. 결과적으로 제안된 복호방법은 erasure를 적용하지 않았을 때 보다 $0.5 \leq \rho \leq 1$ 에서 약 2dB의 성능 향상을 얻을 수 있었으며, $\rho \leq 0.3$ 에서 약 4dB의 성능향상이 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new method of erased concatenated code with RS-convolutional code. In the method, we make use of erasure for undecoded information when we have some errors in RS decoding. For decoding with erasure, the method is processed inner decoding and outer decoding again. After the erasure decoding, if the decoding result is better than the previous one, then we use this result. If not, use the previous one. In this paper, we use concatenated RS(63,31)-convolutional(4,1/2) code. Simulation result is compared with calculation result for performance analysis. According to the result, the proposed method has better performance than the others without erasure such that 2dB when $0.5 \leq \rho \leq 1$ and 4dB when $\rho \leq 0.3$.

I. 서론

오류정정 기술은 신호를 전송할 때 신뢰도를 높일 수 있는 중요한 기술로서, 디지털 통신 시스템에서 매우 중요한 부분으로 평가받고 있다. 또한 오류정정 부호는 통신시스템 뿐만 아니라 디지털 신호

저장 분야에서 중요한 역할을 하고 있을 정도로 연구가치가 있는 분야이다. 그에 부응하여 부호 기술 분야는 많은 발전이 있었으며, 특히 한가지 부호 뿐만 아니라 특성이 다른 두 가지 부호를 연속적으로 사용하는 연쇄(concatenated) 부호 기술은 부호율에 비하여 정보 복원능력이 우수하기 때문에 높은 신뢰성이 요구되는 시스템에 사용되고 있다. 여러 가

* 국방과학연구소 1기-3-4(kbmkbm@hgm.net),
논문번호 : 99101-0317, 접수일자 : 1999년 3월 17일

** 충북대학교 전자공학과

지의 연쇄부호 형태가 있지만 RS(Reed Solomon) 부호와 콘볼루션부호(convolutional code)를 널리 사용한다. 본 논문에서는 주파수 도약 대역확산 시스템에서 부분대역 재밍(partial band jamming)이 존재하는 채널환경을 가정하고, BFSK(binary frequency shift keying) 변조방식과, 특히 erasure 방식을 새롭게 구성하는 RS-콘볼루션 부호 기법을 적용하여 제안된 복호 방식의 성능개선을 연구하였다.

제안된 복호 방식은 외부부호인 RS부호의 복호시 에러가 발생되었을 때 잼머(jammer)의 상태를 알 수 있는 부가정보(side information)를 이용하여 에러가 발생된 부분을 erasure 처리하고 복호과정을 다시 수행하여 성능을 향상시킨다. 다른 논문에서 erasure 처리를 이용한 연쇄부호의 성능을 향상시키는 예는 다음과 같다. 부가정보에 의한 복호 방식은 블록-블록 연쇄부호 구조에서 사용되었으며^[1], 또는 RS-콘볼루션 부호의 viterbi 복호 과정에서 erasure를 선언하여 복호기의 내부부호와 외부부호사이에서 erasure를 적용하였다^[2-4]. 본 논문에서는 내부부호(콘볼루션부호) 복호과정과 외부부호(RS부호)의 복호과정 사이에 erasure를 적용하지 않고, 내부부호 복호과정 이전 단계에서 erasure를 적용하는 방법이다. erasure를 적용할 때 기존의 방법에서는 부가정보의 강도에 따라 erasure 처리를 할 것인지 결정하거나 수정된 viterbi 알고리즘을 이용하여 RS 심볼에 대해 erasure를 처리할 것인지 결정한다. 제안된 본 방법에서는 블록부호인 RS부호의 복호과정에서 얻을 수 있는 심볼 오류 발생유무를 이용하고 있다. 블록부호는 복호 후 오류가 발생되었는지 쉽게 알 수 있으므로 별도의 판단 알고리즘 없이 erasure 처리요구를 쉽게 발생할 수 있는 것이 특징이다. 즉 외부부호(RS부호) 복호과정에서 오류가 발생되면 erasure 처리요구가 발생된다. erasure 처리 요구가 발생되면 내부부호 복호과정의 이전 상태로 돌아간다. 그리고 재밍을 받았다고 생각되는 심볼에 대해 erasure 처리를 하여 내부 및 외부 복호를 다시 수행한다. 이때 재밍을 받았다고 판단되는 심볼을 찾기 위하여 부가정보가 사용된다. erasure 복호가 수행된 후 사용자는 RS복호의 오류정보 유무를 다시 이용하여 오류가 발생되지 않았거나 이전의 오류개수 보다 적으면 현재의 복호정보를 이용하고, 그렇지 않으면 이전의 복호정보를 이용하므로 성능 향상을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 내부부호로서 구속장의 길이가 4 이고 부호율이 1/2인 콘볼루션부호 convol(4,1/2)를

사용하였고 외부부호로서 RS(63,31)을 사용하였으며 $E_b/N_0 = 20\text{dB}$ 에서, 재밍 fractional ratio(ρ) 및 E_b/N_0 를 가변하면서 제안된 복호 방식의 성능향상을 분석하였다. 분석방법은 이론적 계산에 의한 방법과 시뮬레이션 방법을 사용하여 성능향상을 비교하였다. 결과에 의하면 제안된 erasure 복호 방법은 erasure의 복호 기법을 사용하지 않았을 때 보다 $0.5 \leq \rho \leq 1$ 에서 약 2dB의 성능 향상을 얻을 수 있었으며, $\rho \leq 0.3$ 에서 약 4dB의 성능향상이 있었다.

II. 시스템 모델

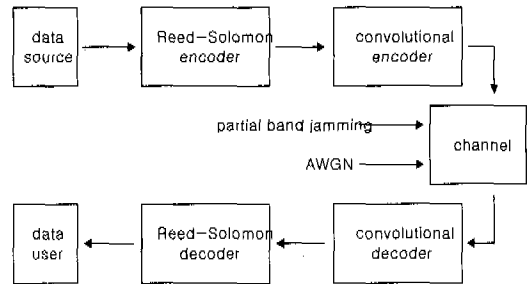


그림 1. 연쇄부호의 구조

그림1은 일반적인 RS-콘볼루션 부호를 사용한 연쇄부호의 구조를 나타낸다. 본 논문에서는 부분대역 재밍이 존재하는 채널환경을 설정하였다. 통신방식은 BFSK 주파수 도약 대역확산 방식을 사용하였다. 그림에서는 표현되지 않았지만 내부부호의 부호화 과정 후 및 복호과정 전 단계에서 비트 인터리버를 적용하였다. 비트 인터리버는 연접오류에 의한 콘볼루션 부호의 성능저하 현상을 감소시키기 위하여 사용되었다. 외부부호 및 내부부호로는 RS(63,31)와 convol(4,1/2)를 사용하였다. 본 논문에서 제안하고 있는 복호방식은 채널에서 복조된 정보에 대해 erasure를 적용한 후 내부부호 및 외부부호 과정을 재시도하는 방법이다. 즉 수신된 정보는 먼저 내부부호 및 외부부호 과정을 수행하고 블록부호인 RS부호의 복호 과정에서 에러가 발생되면 복호과정 이전 정보에 대해 erasure를 적용한다. 이때 부가정보가 사용되며 erasure를 적용하는 단위는 주파수도약 단위와 같다. 이러한 과정 때문에 시스템은 복호 이전의 정보를 저장할 수 있는 메모리가 있어야한다. 그림 2는 본 논문에서 제안된 erasure를 적용한 연쇄부호 복호기의 흐름도이다.

그림 2에서 외부 부호(RS부호)의 복호 과정을 저

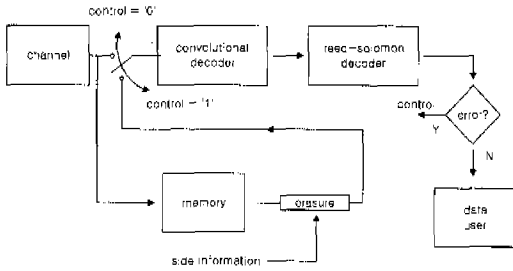


그림 2. 제안된 erasure 연쇄부호의 복호기

천 후 에러가 발생되면 메모리에 저장된 복호이전의 정보를 다시 복호하기 위하여 제어신호를 보낸다. 이때 메모리에 저장된 정보가 복호기에 입력되기 전에 부가정보를 이용하여 erasure 처리를 한다. erasure 처리가 된 정보는 다시 복호화 과정을 거친다. 최종 복호과정 후 결과에서 에러가 정정되었거나 이전의 에러 수보다 적으면 현재의 결과를 이용하고, 그렇지 않으면 이전의 결과를 이용한다. 상태의 좋고 나쁨은 블록부호인 RS부호의 특성을 이용하는 방법으로 에러가 발생한 심볼(RS부호의 심볼) 수를 측정하여 결정하게 된다. 즉 RS부호는 블록부호이기 때문에, t 를 에러의 개수라 하고 부호의 최소거리를 d_{min} 이라 하면 RS부호는 $2t \leq d_{min} - 1$ 를 만족하는 t 개의 심볼 에러를 정정할 수 있으며 $2t$ 개의 에러 심볼을 검출할 수 있다. 그러므로 에러 심볼의 개수를 측정함으로써 현재 상태와 이전 상태의 좋고 나쁨을 판별할 수 있다.

III. Uncoded 시스템의 성능

일반적으로 부호가 적용되지 않은 AWGN(Additive white Gaussian noise) 채널에 대한 M-ary 심볼의 FSK 비트 오류확률은 다음과 같다^[5].

$$P_b = \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} \left\{ \sum_{i=1}^{M-1} (-1)^{(i+1)} \binom{M-1}{i} \frac{1}{i+1} \cdot \exp\left[\frac{-i \cdot k \cdot E_b}{(i+1)N_0}\right] \right\} \quad (1)$$

여기서 P_b 는 비트 오류확률, $M=2^k$ 은 M-ary 심볼 수를 의미하며 k 는 심볼당 비트수를 의미한다. E_b/N_0 는 비트 에너지와 잡음 에너지의 비율로서, E_b 는 평균 신호에너지(S)와 비트지속시간(T_b)의 곱으로 표현할 수 있다.

즉 $E_b = S \cdot T_b$ 이고 N_0 는 AWGN의 단측 파워

밀도(one side power spectral density)이다. 본 논문에서 고려하고 있는 채널은 부분대역 재밍이 존재하는 주파수 도약 대역확산 채널이다. 이러한 채널의 확산 대역폭은 W_s 라하고, 재밍이 점유하는 대역폭을 W_j 라 하면 재밍 fractional ratio $\rho = W_j/W_s$ 로 표현할 수 있다. 이와 같이 재밍밴드의 점유율이 ρ 가 되는 채널의 비트에러 확률은 재밍을 받지 않았을 경우의 비트에러 확률과 재밍을 받았을 경우의 비트에러 확률로 다음 식과 같이 표현할 수 있다^[6].

$$P_b = \rho \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} \left\{ \sum_{i=1}^{M-1} (-1)^{(i+1)} \binom{M-1}{i} \frac{1}{i+1} \cdot \exp\left[\frac{-i \cdot k \cdot E_b}{(i+1)(N_0 + N_j/\rho)}\right] \right\} + (1-\rho) \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} \left\{ \sum_{i=1}^{M-1} (-1)^{(i+1)} \cdot \binom{M-1}{i} \frac{1}{i+1} \exp\left[\frac{-i \cdot k \cdot E_b}{(i+1)N_0}\right] \right\} \quad (2)$$

여기서 N_j 는 재밍 잡음의 단측 파워밀도이다. 재밍을 받았을 경우 비트에러 확률을 P_{bj} 라하고, 재밍을 받지 않았을 경우의 비트에러 확률을 P_{bnj} 라 했을 때 전체 비트에러 확률 P_b 를 나타내는 식(2)는 $\rho \times P_{bj} + (1-\rho) \times P_{bnj}$ 로 표현되었음을 알 수 있다. 그러므로 ρ 는 재밍을 받을 확률로, $(1-\rho)$ 는 재밍을 받지 않을 확률로 볼 수 있다. 즉 부분대역 재밍이 존재하는 주파수 도약 대역확산 통신시스템에서 정보가 재밍을 받을 확률은 ρ 이다.

IV. 연쇄부호를 적용한 시스템의 성능

4.1 RS부호의 성능

본 논문에서 사용된 연쇄부호의 외부부호는 RS(63,31)부호이다. 일반적으로 부호율 측면에서 유리한 RS(255,233)부호를 많이 사용하는 경우가 있지만, 시뮬레이션 시간의 단축을 위하여 RS(63,31)부호를 선택하게 되었다. 일반적인 블록부호의 성능은 부호의 최소거리 d_{min} 에 의하여 결정되며, $d_{min} = N - K + 1$ 로 표현된다. RS(63,31)의 경우 $N=63$, $K=31$ 이므로 $d_{min} = 33$ 이다. 또한 에러 정정가능 개수를 t 라 하면 $2t \leq d_{min} - 1$ 이므로 16개의 에러 심볼을 정정할 수 있다. 일반적으로 채널 심볼에러에 대한 RS부호의 비트에러 성능은 다음과 같다^[7].

$$P_b = \frac{N+1}{2N^2} \left\{ d \sum_{i=7+1}^4 \binom{N}{i} P_c^i (1-P_c)^{N-i} + \sum_{i=2+1}^4 i \binom{N}{i} P_c^i (1-P_c)^{N-i} \right\} \quad (3)$$

여기서 P_c 는 RS복호 이전의 심볼에러 확률이다. RS부호는 비이진(nonbinary) 부호로서 이진(binary) 부호와는 다르게 심볼단위로 정정할 수 있으며 GF (2^k)의 필드(Galois field)로 정의되고 k 비트로 구성되는 심볼을 갖는 블록 부호이다. 이때 $k = \log(N+1)/\log(2)$ 로 정의된다. 그러므로 채널 비트에러 확률이 P_{ch} 인 채널의 심볼에러 확률은 심볼내의 비트가 1개에서 k 개 까지 비트오류가 발생할 수 있는 확률과 같으므로, 확률 P_c 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_c = \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} P_{ch}^i (1-P_{ch})^{k-i} \quad (4)$$

4.2 콘볼루션 부호의 성능

본 논문에서 사용된 콘볼루션 부호는 구속장이 4 이고, 부호율이 1/2인 구조를 갖는다. convol(4,1/2) 부호를 사용하게 된 것은 RS부호에서와 마찬가지로 시플레이션 시간을 단축하기 위해서, 임의로 결정된 것이다. 어떠한 논문[6]에서는 convol(7,1/3)부호를 사용하였지만 구속장이 5이상일 때 시플레이션 시간이 급격히 증가하는 경향이 있었다. 일반적으로 콘볼루션 부호의 성능은 정확한 형태의 표현식으로 나타내기가 힘들어서 upper bound로 표현하게 되는데, 본 논문에서 사용된 convol(4,1/2)부호의 잘 알려진 부호 형태는 발생 시퀀스가 $G^{[15 \ 17]}$ 이고 $d_{free}=6$ 으로 부호의 성능은 다음 식과 같이 표현된다[8].

$$P_b \leq 2D^6 + 7D^7 + 18D^8 + 49D^9 + 130D^{10} \dots \quad (5)$$

식 (5)에서 M-ary 주파수 도약 대역확산 채널에서 하드판별(hard decision)을 할 경우 채널 파라미터 D 는 다음과 같다[9].

$$D = \sqrt{4p(1-p)} \quad (6)$$

여기서 p 는 채널의 비트에러 확률이다.

4.3 연쇄부호의 성능

앞 절에서 언급한 RS부호의 성능 및 콘볼루션 부호의 성능표현식을 이용하여 연쇄부호의 전체 성능을 표현할 수 있다. 일반적으로 임의의 오류정정

부호를 적용하면 부호율에 의해서 정보 비트가 부호율의 역수비 만큼 증가한다. 그러므로 채널상에서 비트에너지 E_b 는 사실상 감소하게 된다. 즉 $E_b = S \cdot T_b = S \cdot 1/R_b$, 여기서 S 는 평균 정보 에너지이고 T_b 는 비트의 지속시간(bit duration), R_b 는 비트레이트(bit rate)이다. 그러므로 부호를 적용하기 이전의 비트 에너지를 E_{bl} 라하고, 부호율 R 로 부호화된 후의 비트 에너지를 E_{bz} 라고 할 때 E_{bl} 와 E_{bz} 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{E_{bz}}{E_{bl}} = \frac{R_{bl}}{R_{bz}} = R \quad (7)$$

$\therefore E_{bz} = E_{bl} \cdot R$

따라서 부호를 사용한 채널의 비트에러 확률은 식 (2)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_b = \rho \frac{2^{k-1}}{2^k-1} \left\{ \sum_{i=1}^{M-1} (-1)^{(i+1)} \binom{M-1}{i} \frac{1}{i+1} \cdot \exp\left[\frac{-i \cdot k \cdot R \cdot E_b}{(i+1)(N_o + N_j/\rho)} \right] \right\} + (1-\rho) \frac{2^{k-1}}{2^k-1} \left\{ \sum_{i=1}^{M-1} (-1)^{(i+1)} \binom{M-1}{i} \cdot \frac{1}{i+1} \exp\left[\frac{-i \cdot k \cdot R \cdot E_b}{(i+1)N_o} \right] \right\} \quad (8)$$

본 논문에서는 BFSK를 사용하였으므로 $M=2, k=1$ 가 되고, 식 (8)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$P_b = \rho \cdot \frac{1}{2} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{R \cdot E_b}{(N_o + N_j/\rho)} \right] + (1-\rho) \cdot \frac{1}{2} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{R \cdot E_b}{N_o} \right] \quad (9)$$

그러므로 식 (3), 식 (4), 식 (5), 식 (9)를 이용하면 최종 연쇄부호의 성능을 계산할 수 있다.

V. 제안된 erasure를 사용한 연쇄부호 복호 방식의 성능 분석

다른 관련 논문들에서는 RS부호의 erasure에 대한 정정 능력이 에러의 정정 능력에 비하여 2배 더 좋은 특성을 이용하여 RS 부호의 심볼에 erasure를 적용한 예가있고, 혹은 내부 부호와 외부 부호로 각각 블록부호를 사용하여 내부 블록부호의 코드워드가 외부 블록부호의 구조와 관련성이 있도록 설계한 후 내부블록 부호의 복호 과정에서 erasure를 적

용하는 경우가 있다. 그러나 본 논문에서는 RS 부호와 콘볼루션 부호의 연쇄부호를 사용하면서 내부 복호 과정과 외부 복호 과정의 사이에 erasure를 적용하지 않고 내부 복호 및 외부 복호를 수행한 후, RS 부호의 복호 결과에서 에러가 발생되면 복조된 정보에 부가정보를 이용하여 주파수 도약시 단위로 사용되었던 심볼에 대하여 erasure를 적용하고 다시 내부 복호 및 외부 복호를 수행하여 수행 결과가 양호한 복호 정보를 사용하는 방법이다.

채널에서 정보를 복조한 경우, 만일 수신된 심볼이 재밍 되었다면 수신된 심볼은 AWGN 에러와 재밍 에러에 의한 에러를 포함하고 있을 것이다. 외부 복호 과정을 통하여 재밍 심볼이 정정되었다면 문제가 되지 않지만 만일 정정 과정에서 실패하게 되면 제안된 알고리즘에 의해서 erasure 처리 요구가 발생될 것이다. 만약 이런 erasure 처리 요구가 발생되면 재밍된 심볼에 대해 erasure 처리를 하게 되는데, 이때 심볼 중에서 재밍에 의한 영향을 받은 블록의 비트수를 m 이라 하고, 정보비트 '0'과 '1'의 개수를 각각 n_0 , n_1 라 하면 송신측의 정보발생 빈도수가 같을 때 (송신단의 심볼당 $E[n_0] = E[n_1]$) 재밍에 의한 영향을 받은 심볼에 대한 정보비트 '0'과 '1'의 평균 비율은 다음과 같이 계산된다.

$$E\left[\frac{n_0}{m}\right] = E\left[\frac{n_1}{m}\right] = \frac{1}{2} \quad (10)$$

만일 수신된 심볼이 erasure로 처리된다면 erasure는 재밍된 부분이 정정되기 유리한 방향으로 '0'혹은 '1'로 erasure로 처리될 것이므로 재밍된 부분의 평균 오류정정 개수는 $m/2$ 이상이 될 것이다. 그러나 심볼내의 재밍되지 않은 부분에 대한 평균 정정 개선은 없다. 그러므로 채널에 대한 erasure 처리를 한 후의 비트 에러 확률식은 식(8)로부터 다음과 같이 바뀔 수 있다.

$$P_b = \frac{\rho}{4} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{R \cdot E_b}{(N_0 + N_j/\rho)}\right] + \frac{(1-\rho)}{2} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{R \cdot E_b}{N_0}\right] \quad (11)$$

그러므로 식 (11)를 이용하여 erasure 처리 후의 비트에러 확률을 구하고 식 (3) 및 식 (5)를 이용하여 전체 비트 오류확률을 구하였다. 다음 그림은 시뮬레이션 결과와 이론값의 결과를 비교해 볼 때 서로 일치하고 있음을 알 수 있다.

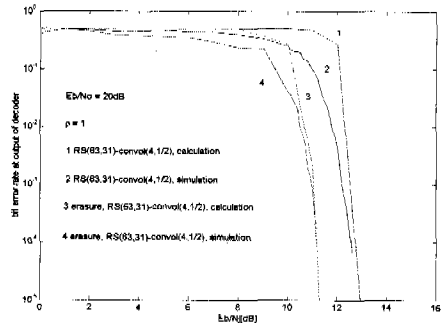


그림 3. 제안된 연쇄부호의 복호성능, $\rho=1$

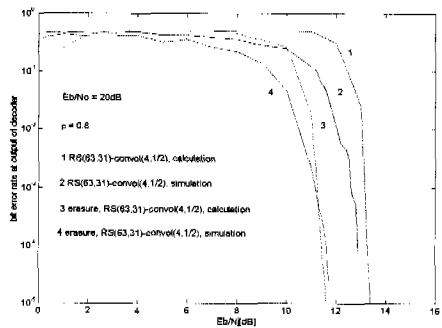


그림 4. 제안된 연쇄부호의 복호성능, $\rho=0.8$

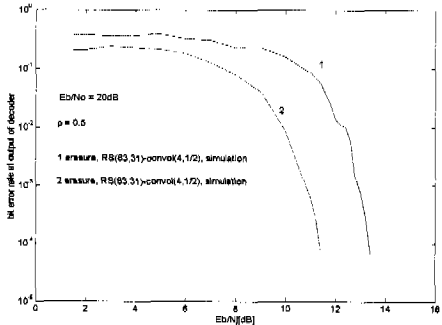


그림 5. 제안된 연쇄부호의 복호성능, $\rho=0.5$

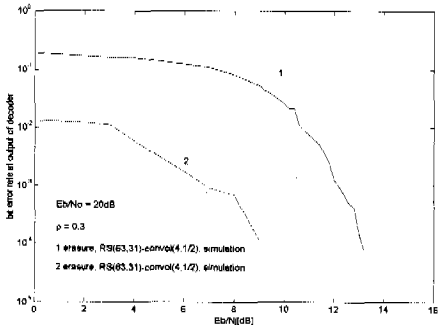


그림 6. 제안된 연쇄부호의 복호성능, $\rho=0.3$

