

이동위성통신채널에서의 연결부호의 성능분석

정기홍*, 양정철**, 노종선*, 박재홍***

* 건국대학교 전자공학과

** 한양대학교 전자통신공학과

*** 한국전자통신연구소

Performance Analysis of Concatenated Codes in the Mobile Satellite Communication Channels

Kyi-Hong Jeong*, Kyeong-Cheol Yang**, Jong-Seon No*, Jae-Hong Park***

* Dept. of Electronic Engineering, Kon Kuk University

** Dept. of Electronic Communication Engineering, Hanyang University

*** Satellite Communications Services Research Section, ETRI

요 약

본 논문에서는 이동차량에서 고선명 TV 신호를 위성으로부터 수신하고자 할때, 이러한 이동위성채널에서 발생하는 오류들을 적절히 제어하는데 적합한 오류정정방식으로 펑처드길쌈부호(punctured convolutional codes)와 Reed-Solomon 부호를 결합한 연결부호(concatenated codes)의 사용을 고려했다. 연결부호의 외부부호로는 (200, 188) Reed-Solomon 부호를, 내부부호로는 구속장이 7이고 생성다항식이 (133, 171)인 길쌈부호의 펑처드부호인 부호율이 4/5인 펑처드길쌈부호를 각각 사용하였으며, 이동위성통신채널은 Rician 페이딩 채널로 모델링하였다. 차량속도에 따른 도플러주파수를 감안하여 80, 100, 150 [Km/h]의 차량속도에 대해서 시뮬레이션을 통하여 연결부호의 비트오율(BER) 성능을 분석하였다.

1. 서 론

현재 방송중인 NTSC 방식의 TV를 개선하여 35mm 영화 정도의 고화질을 갖게 하는 고선명 TV (HDTV)에 대한 연구는 일본에서 먼저 시작되어 미국, 유럽 등지에서 매우 활발하게 진행되고 있다. 고선명 TV의 전송방식으로는 위성을 이용한 위성전송방식이 우리나라를 비롯한 여러나라에서 고려되고 있다. 이러한 위성통신채널은 수신측이 지상에 고정되어 있다고 가정할 때 일반적으로 AWGN (additive white Gaussian noise) 채널로 모델링되고, AWGN으로 대표되는 잡음들을 극복하여 신뢰도를 높일 수 있는 효율적인 방법으로 오류정정방식을 사용하는 것이 바람직하며 고선명 TV의 전송 특성상 ARQ(automatic repeat request)의 사용보다는 FEC(forward error correcting)의 사용이 적합하다.

그러나 이동중인 차량에서 고선명 TV의 신호를 수신한다고 가정할 때의 이동위성통신채널은 수신측이 고정되어 있을 때에는 달리 직접파성분(direct component)과 산란파성분(scattered component)에 의한 페이딩채널로 간주된다. 즉, 차량속도에 따른 도플러 효과를 감안하여 Rician 페이딩채널로 모델링된다. 이러한 채널에서는 상태가 양호한 경우에는 발생하는 오류가 매우 산발적인 형태를 띠지만, 페이딩 등으로 인해 채널의 상태가 불량할 때는 연결형태(burst type)로 오류가 발생한다.

그러나 위성을 이용한 고선명 TV신호는 고정위성통신채널을 통해 수신되는 경우가 대부분이기 때문에 고선명 TV의 규격이 주로 이러한 수신자에게 촛점을 맞추어 정해지게 된다. 즉, 고정위성통신채널은 앞서 언급한 바와 같이 AWGN 채널이므로 산발오류에 대한 정정능력이 뛰어난 길쌈부호를 내부부호(inner codes)로 하고, 이러한 내부부호의 복호오류(decoding errors)가 대체로 연결오류의 형태를 띠므로 연결오류에 대해 탁월한 정정능력을 갖는 Reed-Solomon 부호를 외부부호(outer codes)로 하는 연결부호(concatenated codes)의 사

용이 규격으로 고려되고 있는데 이러한 연결부호는 매우 낮은 비트오율(BER, bit error rate)이 요구되는 경우에 특히 적합한 것으로 알려져 있다. 따라서 이동위성통신채널에서는 오류의 형태가 일반적으로 연결오류가 되어 연결오류에 대한 정정능력이 뛰어난 RS 부호를 사용하는 것이 바람직하지만, 이미 고선명 TV의 규격으로 고려되고 있는 연결부호를 이동차량에서 수신하는 경우를 가정하여 그의 성능을 분석하는 것도 매우 중요하다고 볼 수 있다.

그리고 내부부호인 길쌈부호의 복호기로 많이 사용되는 Viterbi 복호기의 복호오류가 연결형태로 나타나기 때문에, 외부부호인 RS(Reed-Solomon) 부호의 오류정정능력을 고려하여 인터리빙(interleaving)을 사용해야 전체적으로 비트오율을 낮게 유지할 수 있다.

고선명 TV의 위성전송방식에서 FEC를 사용하고자 할 때 기본적으로 고려해야할 전제조건은 첫째, 전체적인 부호율(code rate)이 75±5%이어야 하고, 둘째로 E_b/N_0 가 7dB일 때 BER은 10^{-9} 이하이어야 하고, 셋째로 MPEG의 영상신호에서 하나의 프레임은 188바이트로 구성되어 있다는 점이다.

이러한 조건들을 고려하여, 본 논문에서는 내부부호로는 구속장이 7이고 부호율이 4/5인 펑처드길쌈부호(punctured convolutional codes), 외부부호로는 (200, 188) RS 부호를 선택하여 연결부호를 구성하고, 차량속도에 따른 도플러 주파수를 감안하여 80, 100, 150 [Km/h]의 차량속도에 대해서 시뮬레이션을 통해 Rician 페이딩채널 하에서 연결부호의 성능을 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 이동위성통신채널을 모델링하고, 3절에서는 길쌈부호와 Reed-Solomon 부호를 결합한 연결부호를 다룬다. 그리고 4절에서는 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과들을 토대로 하여 이동위성통신채널에서의 연결부호의 성능을 분석한다.

2. 이동위성통신채널의 모델링

경지제도에 있는 위성에 의해서 증계되는 고선명 TV신호를 이동 중인 차량에서 수신하는 경우, 수신기에 도착하는 전파는 위성으로부터 직접 도착하는 직접파성분과 멀리 있는 산에 반사되어서 도착하는 산란파성분으로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다. 이와같이 서로 다른 경로를 통하여 도착하는 여러 개의 신호성분들은 서로 간섭을 일으키게 되어, Rician 페이딩채널로 모델링된다. 이러한 Rician 페이딩채널을 모델링한 블럭도가 그림 1에 나타나 있다.

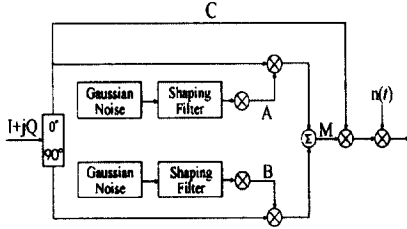


그림 1. Rician 페이딩채널 블럭도

Rician 페이딩채널 모델링에서 가장 중요한 요소는 직접파와 산란파의 전력비(C/M)인데 이는 경우에 따라 달라지게 되는데, 위의 그림에서 사용된 파라미터 K_MULT는 다음과 같이 표현된다.

$$K_MULT = \frac{1}{\sqrt{\frac{C}{M}}}$$

그런데 C/M은 대체로 바다에서는 약 7dB 그리고 지상에서는 약 10dB되는 것으로 알려져 있다. 그리고 산란파를 만들어 내는데 사용되는 펄스 셰이핑필터(shaping filter)는 lowpass 필터로 주파수대역은 이동차량의 속도와 위성 downlink의 반송파주파수에 의해서 결정되게 된다. 즉, 차량이 V [Km/h]로 달린다고 하고 사용하는 downlink의 반송파주파수가 f_c [Hz]라 할 때, 수신되는 신호에서 발생될 수 있는 최대 주파수편이 f_m 은 다음과 같은 식에 의해서 계산될 수 있다.

$$f_m = \frac{V}{\lambda} \text{ [Hz]}$$

여기서 λ 는 반송파의 파장으로 반송파주파수에 의해서 결정된다. 무궁화위성의 경우 방송용 위성중계기에서 사용하는 하향주파수는 11.8GHz인데 이러한 경우 최대주파수 편이와 이동차량의 속도의 관계식은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$f_m = 10.936 \times V \text{ [Hz]}$$

따라서 차량이 80, 100, 150 [Km/h]의 속도로 달린다고 가정하면 최대 주파수 편이는 다음과 같다.

차량의 속도 [Km/h]	최대 주파수 편이[Hz]
80	874.88
100	1093.6
150	1640.4

이러한 최대 주파수편이를 이용하여 셰이핑필터의 전달함수의 amplitude 응답의 계폭은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$|H(f)|^2 = \frac{C}{\sqrt{1 - (\frac{f}{f_m})^2}}$$

그런데 이러한 셰이핑필터의 전달함수는 구현상의 문제점이 있어 그림 2와 같이 근사적인 전달함수를 사용한다.

위에서 주어진 Rician 페이딩채널에 입력으로 $I+jQ$ 인 복소신호가 인가되었다고 가정하면 산란파성분의 출력신호는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$(I+jQ) \cdot (A+jB) \cdot K_MULT$$

여기서 A와 B는 셰이핑 필터 통과후의 출력신호이다. 따라서 직접파성분과 산란파성분의 합한 신호, 즉 Rician 페이딩채널모델의 최종출력신호는 다음과 같다.

$$(I + (A+jB) \cdot K_MULT) \cdot (I+jQ) + n(t)$$

여기서 $n(t)$ 는 가산성백색복소잡음이다.

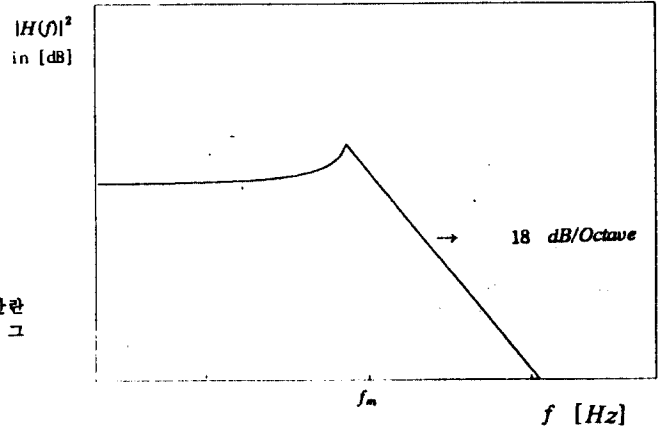


그림 2. 셰이핑 필터

3. 펄스드림쌈부호와 Reed-Solomon 부호를 이용한 연접부호

3.1. Reed-Solomon 부호

RS 부호를 정의하는 방법에는 여러가지가 있으나, 응용의 관점에서 볼때 순회부호(cyclic codes)의 일종으로 규정하는 것이 유리하다. 이것은 순회부호에서 임의의 부호어(codeword)를 생성다항식(generator polynomial)의 배수로 표현할 수 있어서 부호기와 복호기의 구성이 용이하기 때문이다. RS 호는 유한체(finite field) $GF(q)$ 의 원소를 심볼로 사용하는 비이진 부호(nonbinary codes)이며, 일반적으로 q 는 소수의 멱(power)으로 선택할 수 있으나 대부분의 실제 응용에서는 보통 $q = 2^m$ 을 사용한다.

RS 부호를 순회부호로 구성하는 방법은 BCH 부호의 구성방법과 거의 유사하다. α 를 유한체 $GF(q)$ 의 원시원(primitive element)이라 할때, t 개의 오류를 정정할 수 있는 RS 부호는 다음과 같은 생성다항식 $g(x)$ 에 의해 정의된다.

$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2) \dots (x - \alpha^{2t})$$

이러한 RS 부호의 부호길이(code length)는 $n = q-1$ 이고, $g(x)$ 의 차수가 $2t$ 이므로 차원은 $k = (q-1) - 2t$ 된다. 그리고 BCH 한계식에 의해 $n - k + 1 = 2t + 1$ 보다 커질 수가 없으므로 최소거리리는 정확하게 $2t + 1$ 이 된다. 이렇게 Singleton 한계식을 등식으로 만족하기 때문에 RS 부호를 MDS(maximum distance separable) 부호라 부른다.

RS 부호를 실제 응용하고자 할때는 원형보다는 오히려 단축된 부호(shortened codes)를 더 많이 사용한다. 일반적으로 $[n, k]$ RS 부호가 주어질때 최소거리를 일정하게 유지하면서 단축된 $[n-s, k-s]$ RS

부호의 부호어 $c(x)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$c(x) = m(x)g(x)$$

이렇게 단축된 RS 부호는 순회부호의 성질은 잃어버리지만 RS 부호와 마찬가지로 MDS 부호가 되며, 또한 RS 부호에 적용되는 부호화 및 복호화 과정을 그대로 단축된 RS 부호에 이용할 수 있는데 이러한 shortened RS 부호의 복호 알고리즘은 다음과 같은 순서를 가지고 수행된다.

- a) 오증(syndrome) 계산
- b) 오류 위치 다항식(error locator polynomial)을 결정하여 오류 위치 계산
- c) 오류치(error value) 계산
- d) 오류 정정

위의 과정에서 Key equation을 푸는 방법으로 제안되어 있는 것은 많으나 다음의 방법이 가장 많이 사용되는 것이다.

- a) Direct Method
- b) Berlekamp-Massey Algorithm
- c) Euclidean Algorithm
- d) Continued Fraction Algorithm

RS 부호는 특히 연립오류에 대한 정정능력이 뛰어나기 때문에 이러한 오류가 많이 생기는 CD(compact disk) 시스템, DAT (digital audio tape) 시스템, 디지털 VCR, 그리고 장거리 우주 통신(deep-space communications)등에 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 내부 부호인 길쌈부호 및 Viterbi 복호기의 복호 오류가 연립의 형태를 띠게 되므로 이러한 연립오류의 정정을 위해서 외부부호를 RS 부호로 사용하였다

그림 3은 본 논문에서 사용된 RS 부호의 부호화 및 복호화 알고리즘에 대한 흐름도이다.

3.2. 길쌈 부호

0과 1로 이루어진 이진 정보수열을 k 비트 단위의 블록으로 나누어 각각의 블록들을 n 비트의 블록으로 대응시킬때, 현재의 정보블록뿐만 아니라 이전의 정보블록들에 의해 대응관계가 결정됨으로써 만들어지는 부호를 (n,k) 길쌈부호(convolutional code)라 부르며, k/n 을 길쌈부호의 부호율이라 한다. (2,1) 길쌈부호의 부호기는 6단의 쉬프트 레지스터(shift register)를 사용하였기 때문에 (2,1,6) 길쌈부호기라 부른다. 그리고 현재의 입력과 6개의 이전의 입력이 하나의 출력을 결정하기 때문에 구속장(constraint length) K 는 7이 된다. 입력되는 정보수열을 $u(t)$, $t = 0, 1, 2, \dots$ 출력되는 i 번째 수열을 $v_i(t)$, $i = 0, 1, 2, \dots$ 이라 할때 출력과 입력사이의 관계식은 다음과 같다.

$$v_1(t) = u(t) + u(t-2) + u(t-3) + u(t-5) + u(t-6) \pmod{2}$$

$$v_2(t) = u(t) + u(t-1) + u(t-2) + u(t-3) + u(t-6) \pmod{2}$$

일반적으로 덧셈과 같이 시간영역(time domain)에서 표현된 수열들은 멱급수(power series)를 사용하여 합축적으로 표현할 수 있다.

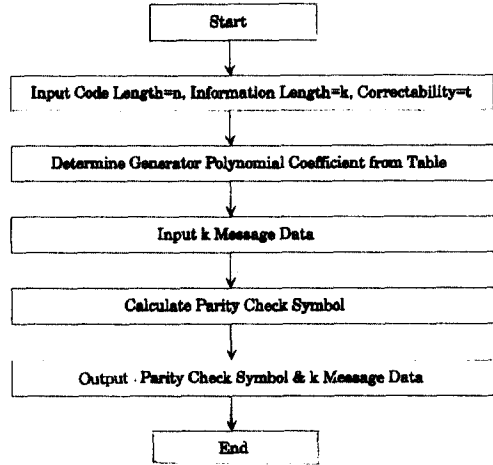
$$U(D) = u(0) + u(1)D + u(2)D^2 + u(3)D^3 + \dots$$

과 같이 $V_i(D)$ 도 정의하면 다음의 관계가 만족됨을 알 수 있다.

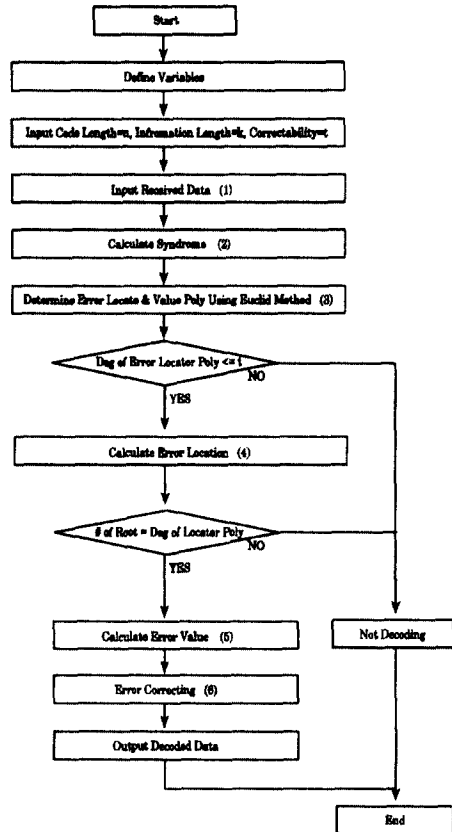
$$V_1(D) = U(D) (1 + D^2 + D^3 + D^5 + D^6)$$

$$V_2(D) = U(D) (1 + D + D^2 + D^3 + D^6),$$

여기서 $g_1(D) = 1 + D^2 + D^3 + D^5 + D^6$, $g_2(D) = 1 + D + D^2 + D^3 + D^6$



(a) RS 부호의 부호화 흐름도



(b) RS 부호의 복호화 흐름도

그림3. Shortened RS 부호의 부호화 및 복호화 흐름도

를 생성다항식이라 부르며 보통 8진수로 표현한다. 이경우의 길쌈부호를 생성다항식이 (133, 171)인 길쌈부호라 한다.

높은 전송율이 요구되는 디지털 위성통신 시스템에 길쌈부호를 사용할 때 높은 부호율을 갖는 길쌈부호가 필요하다. 이를 위해 단순히 k 를 증가시키면, 하나의 상태에서 다음상태로 천이할 때 k 개의 경로가 존재하게 되어 복호기의 복잡성은 지수적으로 증가하게 된다. 이러한 문제를 피하기 위해서 (2,1) 길쌈부호기의 출력 중에서 특정한 위치의 출력값을 전송하지 않음으로써 부호율이 $(n-1)/n$ 인 길쌈부호를 얻을 수 있는데, 이를 평쳐드길쌈부호라 한다.

부호율이 4/5인 평쳐드길쌈부호를 얻는데 사용된 지우기행렬 (deleting matrix)은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

길쌈부호가 가지는 최대의 장점은 최적의 연관정 (soft decision) 복호방법이 존재한다는 것이다. 대부분의 블록부호들의 경우 연관정 복호방법을 구현하는 것이 매우 어려운 반면에 길쌈부호는 Viterbi 복호방법에 의해 최적의 연관정 복호방법을 구현할 수 있다. 따라서 길쌈부호의 부호화이득은 경관정 (hard decision) 복호방법을 이용하는 블록부호의 부호화이득보다 대부분의 관심있는 범위의 BER ($> 10^{-7}$)에서 높게 나타난다. 길쌈부호는 AWGN 채널에서 랜덤오류를 정정하기 위해 많이 사용되는데, 특히 위성통신과 이동통신 분야에서 RS 부호와 함께 활발하게 응용되고 있다.

3.3. 연접부호

일반적으로 부호의 성능을 향상시키고자 할때 부호길이를 증가시켜야 하므로 부호화 및 복호화 과정은 훨씬 복잡해지고 구현하기가 어려워지는 단점이 있다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 Forney 에 의해 처음 도입된 연접부호 (concatenated codes)는 좋은 성능을 가지면서도 비교적 간단한 부호들을 결합함으로써 전체적으로 뛰어난 오류정정능력을 갖는 부호이다.

많은 경우에 연접부호의 내부부호로는 산발오류 정정능력이 뛰어난 이진부호를 사용하고, 내부부호의 복호과정에서 생기는 오류는 연접오류로 나타나기 때문에 연접오류에 적합한 비이진부호를 사용한다. 특히 내부부호로 사용되는 이진부호를 연관정으로 복호할 수 있는 경우는 연접부호의 성능을 더욱 향상시킬 수 있다. 그리고 내부부호의 출력단에서의 산발오류의 길이와 외부부호의 오류정정능력을 비교하여 외부부호와 내부부호 사이에 적당한 인터리빙을 삽입함으로써 성능을 향상시킬 수 있다.

위성을 이용한 고선명 TV신호는 고정위성통신채널을 통해 수신되는 경우가 대부분이기 때문에 고선명 TV의 규격이 주로 이러한 수신자들에게 맞추어 정해지게 된다. 고정위성통신채널은 앞서 언급한 바와 같이 AWGN 채널이므로 산발오류에 대한 정정능력이 뛰어난 길쌈부호를 내부부호로 하는 연접부호의 사용이 규격으로 고려되고 있는데, 이러한 연접부호는 매우 낮은 비트오율이 요구되는 경우에도 연접오류가 되어 연접오류에 대한 정정능력이 뛰어난 RS 부호를 사용하는 것이 바람직하지만, 이동차량에서 수신하는 경우를 가정하여 고선명 TV의 규격으로 고려되는 연접부호의 성능을 분석하는 것은 매우 중요하다고 볼 수 있다.

본 논문에서 연접부호의 사양을 결정하는데 고려한 조건들로는 첫째, 전체적인 부호율이 $75 \pm 5\%$ 이여야 하고, 둘째로 E_b/N_0 가 7dB일때 BER은 10^5 이하이어야 하고, 셋째로 MPEG의 영상신호에서 하나의 프레임은 188바이트로 구성되어 있다는 점이다.

이러한 조건들을 고려하여 그림 4와 같이 전체 시스템을 구성하였다. 연접부호의 내부부호로는 구축장이 7이고 부호율이 4/5인 평쳐드 길쌈부호를 사용하고, 3비트 연관정을 이용한 Viterbi 알고리즘에 의해 복호하였다. 외부부호로는 GF(256) 상의 단축된 (200, 188) RS 부호를 선택하고 복호방법으로는 Euclid 알고리즘을 사용하였다. 또한 길쌈부호의 Viterbi 복호시 연접오류를 분산시키기 위하여 길이가 8인 인터리빙 방식을 사용하였다.

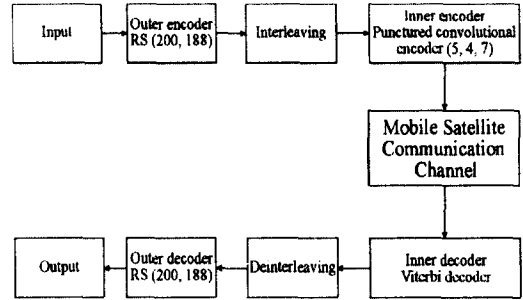


그림 4. 연접 부호 시스템의 블럭도

4. 연접부호의 성능

본 절에서는 이동중인 차량에서 고선명 TV 신호를 수신하는 경우에, 수신기에서 발생되는 Rician 페이딩채널을 모델링하고 시뮬레이션을 통해 오류정정방식의 비트오율 성능을 얻고 결과를 분석하였다. 본 논문에서 수행한 시뮬레이션 시스템은 연접부호의 내부부호로 (5, 4, 7) 길쌈부호와 외부부호로 (200, 188) RS 부호가 사용되었다.

변복조 방식은 QPSK 변조 방식과 동기 복조 방식을 가정하였으며, 3비트 연관정 Viterbi 복호기를 이용하였다.

또한 Viterbi 복호시 발생하는 연접오류를 분산시키기 위하여 인터리빙을 하는데 보통은 symbol-by-symbol 블록 인터리빙 방식을 도입한다. 블록 인터리빙방식이란 가로방향으로 데이터를 심볼단위로 쓰는데 한 행의 버퍼에 데이터가 다차면 다음 행의 첫번째 버퍼부터 가로방향으로 채워나가고 준비된 모든 버퍼가 다차면 세로방향으로 데이터를 읽어 전송한다. 수신단에서는 반대방향으로 쓴후 읽음으로써 디인터리빙을 한다. 본 논문에서는 길이가 8인 인터리빙 방식을 사용하였다.

또한 수신측에서의 신호대 잡음비는 E_s/N_0 로 표현되며 RS 부호의 부호율이 R 일때 부호화하기 전에 정보데이터의 비트에너지 (E_b)와 부호화된 심볼당 신호에너지 (E_s)와의 신호대 잡음비 관계는 아래의 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{E_s}{N_0} = R \frac{E_b}{N_0}$$

여기서, N_0 는 단축과대 잡음전력스펙트럼밀도를 나타낸다. 위의 식을 데시벨(decibel)로 표현하면 다음의 식과 같다.

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \cdot \log_{10}(R) \text{ [dB]}$$

그림 5는 Rician 페이딩 채널하에서의 차량속도가 80, 100, 150 [Km/h]일때 RS 부호와 길쌈부호의 연접부호의 비트오율 성능을 보이고 있다.

이러한 시뮬레이션 결과에서 연접부호의 BER은 10^{-3} 을 기준으로 하여 부호화하지 않는 QPSK의 비트오율과 비교하여 약 5dB의 이득을 얻게되었다. 이는 Rician 페이딩 채널의 특성상 보통의 가산성 백색잡음하에서 보다는 성능이 약간 저하됨을 알 수 있었다.

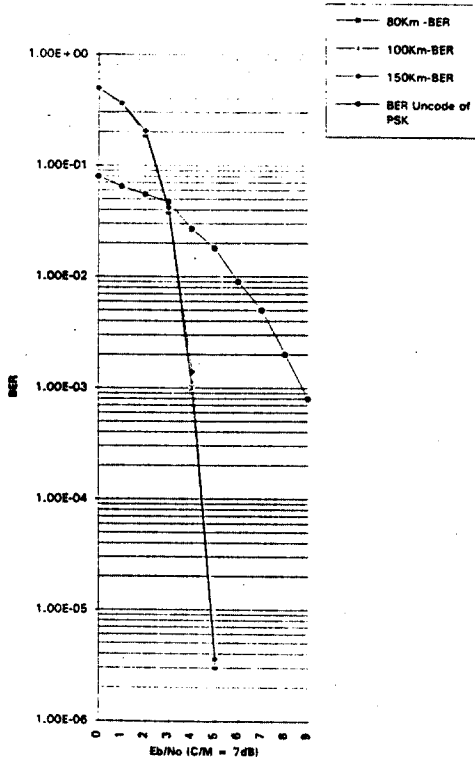


그림 5. 연결부호의 복호 성능

5. 결론

본 논문에서는 이동위성통신채널에서 발생하는 오류를 정정하기 위해 펄스드길쌈부호와 RS 부호를 이용한 연결부호의 사용을 제안하고 이의 성능을 분석하기 위해 이동위성통신채널인 Rician 페이딩채널을 모델링하였다. 이러한 연결부호에서 부호효율을 높이기 위해 내부부호로써 일반적인 길쌈부호 대신 펄스드길쌈부호를 사용하였다.

이러한 고선명 TV 신호의 이동위성통신시스템에서 사용되는 외부부호로 RS 부호와 내부부호로 (5, 4, 7) 길쌈부호를 연결한 연결부호의 부호기와 복호기를 IBM PC-486에서 Borland C를 이용하여 구현하였으며 구현된 소프트웨어를 이용하여 채널로 전송되는 고선명 TV 신호에 대한 연결 부호의 복호성능을 분석하였다.

본 논문에서는 부호화하지 않는 QPSK와 비교하여 연결부호는 약 5dB의 성능 향상을 보였으며 이것은 가산성백색잡음과 비교하면 페이딩채널의 특성상 성능이 약간 저하되었다.

결국 본 논문에서 모델링된 이동위성통신채널에서의 연결부호의 성능분석은 고선명 TV 기술의 발전으로 차량에서 고선명 TV를 수신하는 시기가 되면 이동차량용 고선명 TV 시스템의 성능분석에 유용하리라 생각된다.

<참고 문헌>

- [1] S. Lin and D. J. Costello Jr., Error control coding, fundamentals and applications, Prentice-Hall.
- [2] Y. Yutaka, H. Yasuo, N. Katsuhiko and O. Susumu, "Development of variable-rate Viterbi decoder and its performance characteristics", ICDC-6, Phoenix, AZ,

19-23 Sept. 1983. pp XII-24~XII-31.

- [3] Y. Yasuda, Y. Hirata and A. Ogawa, "Optimum soft decision for Viterbi decoding", 5th International Conference on Digital Satellite Communications, pp 251-258, Genoa, Italy, March 1981.
- [4] J. Viterbi & K. Omura, Principles of digital communication and coding., McGraw-Hill, 1979.
- [5] A. Franchi & R. A. Harris, "On the error burst properties of Viterbi decoding. pp1086-1091, 1993 ICC.
- [6] K. Simon, K. Omura, A. Scholtz, K. Levitt, Spread spectrum communication volume 1, 1985, Computer Science Press. Inc.
- [7] Chi-Chao Chao, Yuh-Lin Yao, "Hidden markov models for the burst error statistics of Viterbi decoding. pp751-755, 1993, ICC.
- [8] W. W. Wu, D. Haccoun, R. Peile, Y. Hirata, "Coding for satellite communication", IEEE Journal on Selected areas in communication, Vol. SAC-5, No. 4, May 1987.
- [9] Richard E. Blahut, Theory and practice of error control codes, 1983, Addison-Wesley publishing Company, Inc.
- [10] F. J. MacWilliams, N. J. A. Sloane, The theory of error correcting codes, 1977, North-Holland Publishing Company.
- [11] E. J. Weldon, Jr. "Reed Solomon Error Correcting Codes", A special tutorial Seminar, 1984.