

위성 채널에서 평쳐드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬연결 부호 시스템의 성능 분석

正會員 鄭 虎 泳* 正會員 康 昌 彥*

The Performance Analysis of the Concatenated Coding System using Punctured Convolutional Code in the Satellite Channel

Ho Young Cheong*, Chang Eon Kang* *Regular Members*

要 約

본 논문에서는 위성 채널에 효율적인 오류 정정 방식으로 평쳐드 콘볼루션 부호(punctured convolutional code)를 이용한 직렬 연결 부호(concatenated code) 방식을 제안하고 위성 채널을 모델링하여 제안된 오류 정정 방식의 오율 성능을 모의 실험을 통하여 분석하였다. 제안된 직렬 연결 부호 방식은 외부 부호를 (255, 223) RS 부호로 하고 구속장 길이가 7인 2/3 평쳐드 콘볼루션 부호를 내부 부호로 사용하였으며, 일반적으로 위성 부호 채널(satellite coding channel) 모델로 사용되고 있는 광대역 부가 백색 가우시안 잡음 채널의 부정확성을 보완하기 위해 위성 채널 입력 여파기, 고출력 진행파관 증폭기(traveling wave tube amplifier), 위성 채널 출력 여파기 및 하향링크 잡음 등으로 구성되는 위성 부호 채널을 모델링하여 성능 평가 실험에 사용하였다.

ABSTRACT

In this paper, an efficient concatenated coding scheme under the satellite channel is presented. The performance of this scheme in terms of bit error rate versus energy per information bit over white gaussian noise power density E_b/N_0 has been evaluated via computer simulation as a function of various system parameters.

To achieve accuracy in simulation results, the distortions caused from the satellite channel, such as the nonlinearity of the TWTA(traveling wave tube amplifier), signal distortions of the input and

*延世大學校 電子工學科
Dept. of Electronics Engineering, Yonsei University
論文番號 : 9429
接受日字 : 1994年 1月 26日

output filters, has been considered. The simulation results shows that, through using the 2/3 punctured convolutional code as the inner code of the concatenated code system, the coding rate can be improved more over 16%, while maintaining the same system complexity and bit error performance.

I. 서 론

위성 통신은 지상에서 이루어지는 통신에 비해 지상 장애와 무관하게 높은 신뢰도를 가지며 광역성, 동보성이 우수하여 그 이용 범위가 날로 확대 되어가고 있다. 국내에서도 1995년에 무궁화 위성을 발사할 예정에 있으므로 본격적인 위성 통신 시대를 목전에 두고 있고 더우기 위성 통신 기술이 디지털 방식으로 전환되어 감에 따라 차세대 위성 기술의 중요성은 날로 더해가고 있다.

위성 채널에서 신뢰도를 높일 수 있는 가장 효율적인 방법으로 잘 알려져 있는 오류 정정 방식은 디지털 통신 시스템에 있어 필수적인 요소이며, 단순히 잡음 채널 뿐 아니라 전력이 제한된 채널 및 대역폭이 제한된 채널에서도 전송 신뢰도를 높이는 데 큰 역할을 하고 있으며 최근에는 변 복조 시스템과 채널 부호 시스템이 결합되어가는 추세를 보이고 있다⁽¹⁾.

위성 채널에서의 오류 정정 부호는 구축장 길이가 7인 1/2 콘볼루션 부호에 대해 연관정 비터비(Viterbi) 복호기를 적용하는 방식이 가장 많이 사용되고 있으나 최근 위성 채널에서도 높은 주파수 이용 효율이 중요해져감에 따라 동일한 부호 효율을 유지하면서도 부호 효율이 더 높은 오류 정정 방식이 요구되고 있다. 포니(Forney)에 의해 처음 도입된 직렬 연결 부호 방식은 단일 부호 방식으로 이를 수 없는 강력한 오류 정정 능력을 얻을 수 있다는 점 때문에 그동안 여러 통신 환경에서 적용되어 왔다. 그러나 직렬 연결 부호 시스템의 부호 효율은 낮은 것이 일반적이므로 요구되는 오율 성능을 만족하면서도 부호 효율이 좋은 직렬 연결 부호 시스템이 요구된다. 직렬 연결 부호 시스템의 내부 부호로 사용되는 콘볼루션 부호는 부호 이득이 좋은 것이 사실이나 부호 효율이 높을 수록 비터비 복호기의 복잡도가 급격히 증가하므로⁽²⁾ 부호 효율이 높은 콘볼루션 부호를 내부 부호로 사용하는 것은 실제 이를 적용하는데 많은 난점이 있다.

본 논문에서는 기존의 직렬 연결 부호 시스템에 비해 오율 성능을 크게 저하시키지 않으면서 시스템의

복잡도가 거의 동일하고 높은 부호율을 얻을 수 있는 한편 부호율을 다양하게 변화시킬 수 있도록 하는 펄스 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 시스템을 제안하였으며, 이를 위성 채널에 적용하기 위해 위성 채널을 모델링하였다.

또한, 과거에 위성 채널을 단순히 광대역 백색 가우시안 잡음 채널로 모델링하여 오류 정정 부호의 성능을 평가함으로써 초래되었던 부정확성을 극복하기 위해 위성 링크에 존재하는 주요 신호 왜곡 요소를 고려하여 더욱 정확한 성능평가가 수행될 수 있도록 하였고, 모델링된 채널을 이용하여 각 종 파라미터 값에 따른 시스템의 오율 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 분석·고찰하였다.

II. 위성 채널 모델링

본 절에서는 위성 통신 시스템의 구조와 위성 채널의 특성을 고찰하고 이를 통해 위성 채널에서 발생하는 주요 신호 왜곡 요소를 고려한 위성 채널을 모델링함으로써 오류 정정 방식의 오율 성능을 평가하는데 기반이 되도록 한다.

위성 통신 시스템은 대단히 복잡하기 때문에 이를 분석적인 방법만으로 정확히 해석한다는 것은 불가능하며, 특히 위성 채널은 중계기의 진행파관 증폭기(traveling wave tube amplifier) 특성으로 인해 비선형 시스템으로 볼 수 있기 때문에 분석적인 방법으로 해석을 할 경우 수치 해석적인 방법을 동원해야 할 경우가 허다하다. 따라서 위성 통신 시스템의 성능을 평가하는데 있어 컴퓨터를 이용한 모의 실험은 성능 평가 비용에 있어서나 정확도에 있어서 가장 효율적이며 위성 통신 시스템을 설계하기 위해 시스템의 적정 파라미터를 선정하는데 필수적이다⁽³⁾.

위성 채널에 적합한 오류 정정 방식을 선정하기 위한 오율 성능 평가 실험은 위성 채널을 광대역 백색 가우시안 잡음 채널로 모델링하여 수행하고 있으나 이는 위성 채널에서 발생하는 오류의 주요 발생 요소를 배제한 것으로 실제 환경과는 많은 차이가 있다.

위성 채널은 채널 입·출력 여파기에 의한 심볼 간

의 간섭, 증계기 증폭기의 포화점 동작으로 인한 비선형성 및 페이딩 등의 여러가지 신호 왜곡 요소를 가지며 이들에 의해 오류 특성이 달라지므로 시스템 설계 시 특히 유의해야 하며, 오류 정정 방식을 선정하는 경우 고려해야 할 요소들은 설계하고자 하는 특정 통신 시스템의 사양에 따라 크게 좌우되지만 위성 채널에 적용할 오류 정정 방식을 선정하는 경우 지상의 통신 시스템에서는 크게 문제가 되지 않는 것들도 위성 채널에서는 통신 성능을 저하시키는 요소로 작용할 수 있으므로 주의해야 한다⁽⁴⁾. 채널 오류 정정 시스템의 관점에서 본 위성 채널은 채널 입력 여파기, 고출력 진행과관 증폭기, 채널 출력 여파기 및 하향 링크 잡음 등으로 구성되며 위성 채널을 통해 전송되는 신호 파형은 상향링크 보다는 하향링크의 전송 전력이 훨씬 미약하므로 상향링크 잡음은 시스템을 간단히 하기 위해 고려하지 않았다.

위성 통신 시스템에서 주로 사용되는 변조 방식은 아날로그인 경우 FM 및 CFM 방식을 들 수 있으며, 디지털 방식에서는 QPSK 변조 방식이 가장 많이 사용되고 있다. 본 논문에서도 전송 신호의 변조 방식으로 QPSK를 사용하였으며 복조 방식은 동기 복조 방식을 채택하였다. 동기 복조 방식은 비 동기 복조 방식에 비해 수신 신호 파형으로부터 정확한 기준위상 및 클럭 복원이 요구되나 동일 요구 전력에 대해 비트 오류가 더 낮다는 장점을 갖는다. 반송 주파수를 가지고 있는 변조 신호를 컴퓨터 모의 실험에 사용하기 위해서는 등가 저역 통과 신호로 변환해야 하는데 이는 대역 통과 신호의 동 위상 성분을 복소 진폭 신호의 실수부에, 직교 성분을 허수부에 각각 할당함으로써 얻을 수 있다. 등가 저역 통과 신호의 반송 주파수는 0이므로 표본화 주파수에 의해 전송 신호의 대역폭이 정해지며 일반적으로 표본화 주파수는 정보 전송율의 8~16 배로 하는 것이 가장 적합하며⁽⁵⁾ 본 논문에서도 16배로 하였다.

채널 여파기는 인접 채널의 신호 간섭을 제거하기 위한 것으로 차단 대역에 존재하는 원신호의 정보가 유실되므로 신호 왜곡을 유발하기도 한다. 또한, 컴퓨터 모의 실험 과정에서 여파기 부분은 계산량이 가장 많은 부분 중의 하나이므로 효율적인 계산 알고리즘이 요구된다. 본 논문에서는 버터워드 아날로그 여파기를 3 차의 IIR 디지털 여파기로 변환하여 위성 채널의 입·출력 여파기로 사용하였으며, 차단 주파수는 정규화 주파수를 단위로 할 때 0.0625 $[f/f_c]$ 인 데 이는 QPSK 전송 신호의 대역폭에 해당하는 것으로

인접 채널 간섭을 방지하는 한편 차단 주파수 이상의 주파수 스펙트럼에 해당하는 부엽에 실린 정보를 차단함으로써 결과적으로 신호 왜곡을 유발하는 특성을 나타내기도 한다.

그러나, 여파기에 왜곡된 전송 신호는 위성 증계기의 진행과관 증폭기를 통과하면서 더욱 심한 위상 및 진폭 왜곡을 나타내게 되는 바 이는 상향 링크를 통해 받은 신호의 전력이 미약하기 때문에 하향 링크를 통해 신호를 지구국에 전송하기 위해서는 신호 전력을 최대한 증폭시켜야 하는데 이를 위해서는 진행과관 증폭기가 포화 영역에 동작해야하는 반면 진행과관 증폭기의 포화 영역은 위상 및 진폭에 있어 비선형적인 특성을 나타내기 때문이다. 따라서, 입력 여파기에 의해 왜곡된 전송 신호의 위상 성분은 증폭기를 통과하면서 더욱 심한 위상 왜곡을 받게되어 채널 오류를 유발하는 주 요인이 된다.

통신 위성에서 사용되는 위성 증계기용 고출력 증폭기는 크게 진행과관 증폭기(TWTA)와 고체 전력 증폭기(SSPA)로 나눌 수 있는데 통신 위성에 사용되는 고출력 증폭기로 고체 전력 증폭기를 사용하는 것은 현재의 기술 수준 상 한계가 있으며 본 논문에서도 진행과관 증폭기를 사용하였다. 진행과관 증폭기는 AM/AM 및 AM/PM 특성을 갖는 비선형 시스템으로 모델링할 수 있으며 1981년 Saleh에 의해 제시된 근사 식은 간단하면서도 실측 데이터에 거의 근접하므로 이를 이용하여 모델링하였다. 증폭기의 입력 신호와 출력 신호를 다음 두 식과 같이 각각 표시할 경우

$$x(t) = r(t) \cos[\omega_0 t + \psi(t)] \quad (1)$$

$$y(t) = A[r(t)] \cos\{ \omega_0 t + \psi(t) + \Phi[r(t)] \} \quad (2)$$

진폭-위상 식은 다음과 같다.

$$A(\gamma) = \alpha_a \gamma / (1 + \beta_a \gamma^2) \quad (3)$$

$$\Phi(\gamma) = \alpha_\phi \gamma^2 / (1 + \beta_\phi \gamma^2) \quad (4)$$

이때, $A(\gamma)$ 는 γ 에 대한 기함수으로써 진폭-진폭 변환 특성을 나타내며 $\Phi(\gamma)$ 는 진폭-위상 변환 특성을 보이는 γ 의 우함수이다.

그림 1은 본 논문에서 사용한 증폭기의 신호 전달 및 위상의 입출력 전달 특성을 나타낸 것으로 이와같

은 증폭기를 통과한 신호는 증폭기가 포화 영역에서 동작할 경우 AM/AM 특성에 의한 신호 왜곡보다는 AM/PM에 의한 신호 왜곡 현상을 크게 나타낸다.

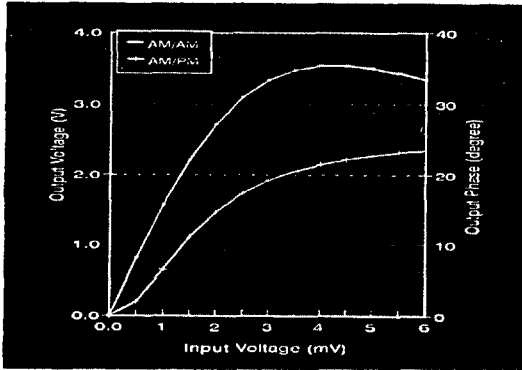


그림 1. 고출력 진행파관 증폭기의 진폭 위상 모델
Fig. 1. Amplitude phase model of TWTA

그림 2와 그림 3은 진행파관 증폭기를 통과한 QPSK 신호의 주파수 스펙트럼과 constellation를 나타낸 것으로 증폭기의 비 선형성으로 인해 부엽(sidelobe)이 재 생성되고 있음을 쉽게 알 수 있다.

그러나, 채널 입력 여파기에 의해 차단되었던 차단 주파수 이상의 주파수 스펙트럼이 다시 생성되었다고 해서 이것이 전송 신호의 부엽에 실린 잡음은 아니며 오히려 전혀 다른 성질을 가진 신호 왜곡 성분으로 볼 수 있다. 그림 3은 증폭기를 통과한 직후의 constellation로 증폭기의 비 선형성을 잘 알 수 있는데 입력 신호의 진폭이 증폭기의 포화점에 이르면서 위상 변화가 20° 이상 심하게 발생함을 알 수 있다. 특히, 내각선 방향의 위상 성분으로 전이를 하는 경우 채널 입력 여파기를 통과한 신호의 constellation와는 크게 다른 모습을 보이는데 진폭이 0에서 최대 진폭 값으로 변화함에 따라 진행파관 증폭기가 가지고 있는 진폭/위상 변환 특성에 의해 본래의 위상으로부터 20° 이상 편이된 형태를 뚜렷하게 나타내고 있다. 따라서 증폭기의 비선형 성에 의한 신호 왜곡은 진폭 성분 보다는 위상 성분 의한 왜곡이 훨씬 심각하며 수신단에서는 이와같은 위상 변화량을 보정해 주어야 한다. 증폭기를 통과한 신호는 채널의 출력 여파기를 통과하면서 부엽 주파수 성분이 차단되고 수신기에 입력되기 전에 하향링크 잡음이 추가된다.

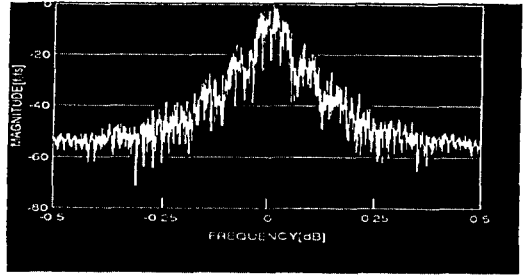


그림 2. 증폭기를 통과한 신호의 주파수 스펙트럼.
Fig. 2. QPSK signal spectrum at the output of TWTA

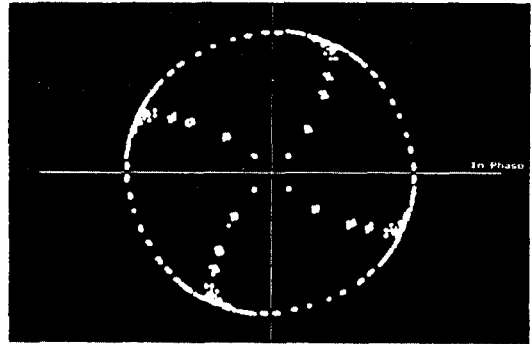


그림 3. 증폭기를 통과한 QPSK 신호의 constellation.
Fig. 3. The constellation of the QPSK signal at the output of TWTA.

III. 평처드 콜볼루션 부호를 이용한 concatenated 부호 방식

현재 위성 채널에 사용되는 오류 정정 기법은 부호율(code rate)이 1/2이고 구조상 길이가 7인 비 체계적 convolution 부호에 8 레벨 연관정 비터비(Viterbi) 복호 방식이 가장 많이 이용되고 있다. 연관정 복호 방식은 정관정 복호 방식에 비해 2~3[dB]의 부호 이득을 갖고 있는데, 블록 부호의 경우 복호기의 복잡도로 인해 거의 적용되지 않고 있는 반면 convolution 부호의 비터비 복호기는 구조적인 특성 상 연관정 방식과 정관정 방식의 복잡도가 큰 차이를 보이지 않기 때문에 대부분 연관정 비터비 복호 방식이 적용되고 있다.

그러나, 최근 위성을 이용한 이동 통신 서비스 등과 같이 위성 통신 수요가 급증하면서 높은 신뢰도와

효율적인 주파수 자원의 이용이 동시에 요구되고 있으며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 1/2 콘볼루션 부호는 비트 오류 성능 면에서나 부호 효율 면에 있어서 차세대 디지털 위성 통신 시스템에서 요구되는 성능을 만족시키지 못한다.

한편, 포니(Forney)에 의해 처음으로 도입된 직렬 연결 부호 시스템의 주 사용 목적은 단일 부호로 이룰 수 없는 강력한 오류 정정 능력을 얻기 위함이며 단일 부호를 직렬로 연결하여 구성한다. 위성 통신 채널 및 우주 통신 채널에 적합한 직렬 연결 부호 방식으로는 그림 4와 같은 직렬 부호 방식이 권고되고 있는데 (255, 223) RS 부호를 외부 부호로 하고 부호율과 구축장 길이가 각각 1/2, 7인 콘볼루션 부호를 내부 부호로 하는 concatenated 부호 방식이 많이 이용되고 있다. 콘볼루션 부호의 복호 방식으로는 양자화 레벨이 8인 연관성 비터비 복호 방식을 사용하고 있다.

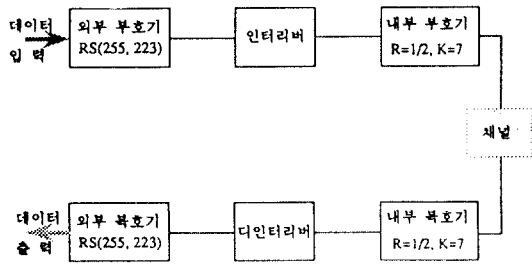


그림 4. 일반적인 직렬 연결 부호 방식 (외부 부호: RS (255, 223), 내부 부호: (2, 1, 7) 콘볼루션 부호).

Fig. 4. Conventional concatenated coding system (outer code: RS(255, 223), inner code: (2, 1, 7) convolutional code).

그러나, 이 방식은 비트 오류 성능이 우수한 반면 잉여 비트가 과다하여 부호 효율이 낮으므로 주파수 효율을 크게 저하시킨다는 단점이 있다. 또한, 콘볼루션 부호의 복호 방식인 비터비 복호기의 특성 상 내부 부호로 사용되는 콘볼루션 부호의 부호율이 증가함에 따라 복호기로 사용하고 있는 비터비 복호기의 복잡도가 급격히 증가하기 때문에 전체 시스템의 부호율을 높이기 위해 고효율의 콘볼루션 부호를 사용하는 것은 실제 구현하는데 있어 난점이 있다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 직렬 부호 방식으로 기존의 직렬 부호 시스템에 비해 오류 성능을 크게

저하시키지 않으면서도 높은 부호율을 얻기 위해 구성된 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 방식의 블럭도를 나타낸 것이다. 평처드 콘볼루션 부호는 부호율이 낮은 일반적인 콘볼루션 부호의 부호기 출력 심볼 중 특정 패턴에 의해 주기적으로 몇 개의 심볼들을 제거함으로써 전체 부호 중에서 잉여 비트의 점유율을 낮추므로써 높은 부호 효율을 얻을 수 있는 반면 복호 과정에서 부호율이 낮은 일반적인 콘볼루션 부호의 트래이스 구조를 그대로 사용하기 때문에 복호기의 복잡도가 증가하지 않는다는 장점을 가진다.

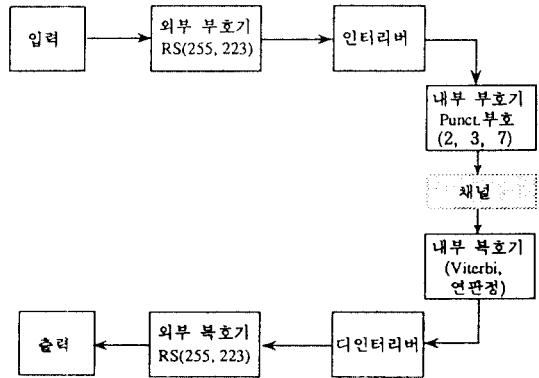


그림 5. 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 방식 (외부 부호: (255, 223) RS, 내부 부호: (3, 2, 7) 평처드 콘볼루션 부호).

Fig. 5. The concatenated coding system using the punctured convolutional code (outer code: (255, 223) RS, inner code: (3, 2, 7) punctured convolutional code).

평처드 부호를 이용한 직렬 연결 부호 시스템은 RS 부/복호기의 관점에서 볼 때 평처드 콘볼루션 부호기, 변조기, 채널, 복조기 및 내부 부호의 복호기를 포함하는 부분을 하나의 채널로 볼 수 있는데 이를 슈퍼 채널(super channel)이라 한다. 슈퍼 채널의 오류 확률을 구하면 전체 시스템의 오류 상한(upper bound)을 구할 수 있는데 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$P_u < \frac{2^{(m-1)}}{2^m - 1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{i+1}{n} \right] \binom{n}{i} P_s^i (1 - P_s)^{n-i} \quad (5)$$

이때 n 은 RS 부호기의 길이이고 m 은 RS 부호기의 출력 심볼 당 차지하는 비트 수를 의미하며, P_s 는 슈퍼 채널의 오류 확률이고 인수 $2^{(m-1)/2^m}-1$ 은 잘못 복호된 하나의 심볼에 포함된 오류 비트의 평균 갯수이다. 결국, 슈퍼 채널의 오류 확률 P_s 를 구함으로써 전체 시스템의 오류 상한을 구할 수 있음을 알 수 있으며 본 시스템의 슈퍼 채널 오류 확률은 펄처드 콘볼루션 부호의 복호 후 오류 확률과 같다.

펄처드 부호는 사실상 부호율이 높은 콘볼루션 부호로 생각할 수 있으며 이에 대한 복호 방식 또한 일반적인 콘볼루션 부호에 대한 비터비 복호 알고리즘과 동일한 과정을 가지므로 펄처드 부호의 상태도로부터 전달함수를 얻어 비트 오류의 성능한계를 구할 수 있다.

송신 정보 열이 모두 0의 열이라 하고 비터비 복호기가 오류 경로를 선택하므로써 최초로 발생하게 되는 오류 확률 P_f 에 대한 상한은

$$P_f < \sum_{d=d_{free}}^{\infty} A_d P_d \quad (6)$$

와 같이 표시되며 이때 A_d 는 경로의 비트 시퀀스 중 "1"의 갯수가 d 인 경로의 수를 말하며 P_d 는 이와 같은 경로가 비터비 복호기에 의해 선정될 확률이다.

펄처드 부호의 전달함수는 부호기의 상태가 천이 되는 과정을 나타낸 상태도를 이용하여 얻을 수 있는데 그림 6은 펄처드 콘볼루션 부호의 전달 함수를 얻기 위해 나타낸 것으로 그림에서 0 상태는 X_a 와 X_b 로

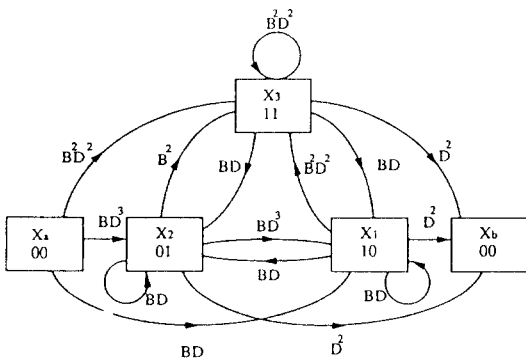


그림 6. 펄처드 콘볼루션 부호의 전달함수를 얻기 위한 상태도 ($R=2/3, K=3$).

Fig. 6. Modified state diagram of the punctured convolutional code ($R=2/3, K=3$)

분리하여 나타냈으며 나머지 상태는 X_1, X_2, X_3 로 표시하였다. B의 지수항은 천이를 발생시키는 정보 비트중 "1"의 수를 의미하며 D의 지수항은 천이과정에서의 해밍 가중치를 나타낸다.

그림을 이용하여 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$T(D, B) = X_b/X_a = G[I-A]^{-1}F \quad (7)$$

$$\text{단, } G = [D^2, D^2, D^2]$$

$$A = \begin{bmatrix} BD & BD^3 & BD \\ BD & BD & BD \\ B^2D^2 & B^2 & B^2D^2 \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} BD \\ BD^3 \\ B^2D^2 \end{bmatrix}$$

역행렬 $[I-A]^{-1}$ 을 무한급수로 전개하면

$$[I-A]^{-1} = I + [A] + [A^2] + [A^3] + \dots \quad (8)$$

이므로 식 (7)을 이용하면 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(D, B) = GF + G[A]F + G[A^2]F + \dots \quad (9)$$

식 (9)에서 $B=1$ 로 하면 A_d 값을 구할 수 있으며 전달함수를 이용하여 이를 나타내면 다음 식과 같다.

$$T(D, B)|_{B=1} = \sum_{d=d_{free}}^{\infty} A_d D^d \quad (10)$$

$$\frac{dT(D, B)}{dT} \Big|_{B=1} = \sum_{j=d_{free}}^{\infty} C_j \cdot D^j \quad (11)$$

이때, C_j 는 올바른 경로와 해밍 거리가 j 인 오류 경로에 포함된 오류 비트의 평균 갯수이다. 이산 무기억 채널의 경우 펄처드 부호에 대한 비터비 복호기의 비트오류 확률의 상한을 P_s 라 하면,

$$P_s \leq \sum_{j=d_{free}}^{\infty} C_j \cdot P_j \quad (12)$$

로 주어지며 P_j 는 비터비 복호기에 의해 해밍 거리가 j 인 오류 경로가 선택되므로써 발생하는 오류 확률로 변분조 방식, 채널 특성 등에 따라 좌우된다.

IV. 모의 실험 및 결과 고찰

본 절에서는 제안된 시스템이 위성 채널에 효율적임을 입증하기 위해 주요 신호 왜곡 요소를 고려하여 모델링한 위성 채널을 이용하여 오율 성능 실험을 수행하고 결과를 분석·고찰하였다. 본 논문에서 수행한 모의 실험 시스템은 직렬 연결 부호 시스템의 내부 부호로 1/2 콘볼루션 부호와 2/3 평처드 콘볼루션 부호를 바꾸어 실험을 수행할 수 있도록 하였으며 오류 정정 방식을 사용하지 않은 시스템의 오율 성능 실험을 위해 인터리버/디인터리버 및 부/복호 방식을 포함하지 않은 실험 시스템이 가능하도록 구성하였다.

변/복조 방식은 부가 백색 가우시안 잡음 채널 하에서의 실험 시스템과 같이 QPSK 변조 방식과 동기 복조 방식을 사용하였으며, 일반적인 콘볼루션 부호와 평처드 콘볼루션 부호의 복호 방식은 공히 8-레벨 연관정 비터비 복호기를 이용하였다. 전술한 바와 같이 경관정 복호 방식은 연관정 복호 방식에 비해 복잡도가 크게 차이나지 않을 뿐만 아니라 부호 이득 면

에서도 2.0[dB] 이상 차이가 나므로 고려하지 않았다. 인터리빙 방식은 비터비 복호기의 출력 심볼이 RS 부호 시스템의 오류 정정 능력을 초과하는 길이의 연접 오류를 포함할 경우 이를 산발화시키기 위한 것이므로 간단한 블록 인터리빙 방식만으로도 충분하다.

그림 7은 오류 정정 방식을 사용하지 않고 순수한 변조 신호만을 모델링한 위성 채널 상에서 전송한 경우 입력 백-오프에 따른 QPSK 신호의 채널 오율 특성을 나타낸 것이다.

하단에 있는 오율 특성은 부가 백색 가우시안 잡음 환경 하에서 QPSK 변조 방식의 오율 특성을 나타낸 것으로 위성 통신 시스템이 포화점에서 동작할 경우 10^{-4} 의 오율에서 비트 에너지 대 잡음 비가 약 2.2 [dB] 정도 차이가 남을 알 수 있다. 또한, 입력 백-오프가 클수록 진행과관 증폭기는 선형 영역에서 동작하므로 부가 백색 가우시안 잡음 채널의 오율 특성에 접근하게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 순수한 부가 백색 가우시안 잡음 채널에서의 오율 성능과 모델링된 위성 채널의 오율 성능이 크게 차이가 나는 것은 위성 채널의 입·출력 여파기에 의한 영향과 증폭기의 비 선형성에 의한 신호 왜곡 등에 기인한 것이며 특히, 입력 신호의 백-오프량을 크게 주어 선형 영역에서 동작하도록 함에도 불구하고 1.5[dB] 이상의 차이를 보이는 것은 증폭기의 비 선형성 뿐만 아니라 위성 채널의 입·출력 여파기 등에 의한 신호 왜곡도 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 8은 입력 백 오프가 0[dB]일 경우 구속장 길이가 3과 7인 경우에 대해 1/2 콘볼루션 부호의 2/3 평처드 콘볼루션 부호의 오율 성능을 대비해 놓은 것이다. 상단에 위치한 오율 곡선은 오류 정정 방식을 사용하지 않을 경우 QPSK 신호의 오율 성능을 나타낸 것이며 일반적인 콘볼루션 부호와 평처드 콘볼루션 부호 사이의 부호 이득 차이는 구속장 길이에 따라 10^{-4} 의 오율에서 약 0.7~0.9[dB] 정도의 이득 차이를 보여주고 있는데 위성 중계기의 증폭기가 포화 영역에서 동작할 경우 부호율이 2/3인 평처드 콘볼루션 부호는 직렬 부호 시스템의 내부 부호로 사용해도 충분함을 알 수 있다. 한편, 비트 에너지 대 잡음 비가 3[dB] 이하인 경우에 오류 정정 방식을 적용하지 않은 시스템의 오율 성능이 오류 정정 방식을 적용한 시스템의 오율 성능보다 오히려 더 좋아지는 것을 볼 수 있는데 이는 비트 에너지 대 잡음비가 낮은 경우 위성 채널의 신호 왜곡에 의해 발생하는 채널 오류가

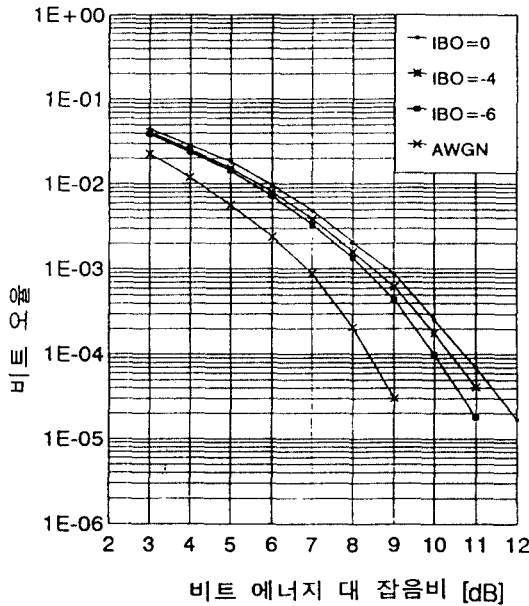


그림 7. 위성 채널에서 오류 정정 방식을 적용하지 않을 경우 QPSK 신호의 오율 특성 (증폭기의 입력 백-오프=0, -4, -6 [dB]).

Fig. 7. Bit error rate versus E_b/N_0 of the QPSK signal over the satellite channel (IBO=0, -4, -6).

오류 정정 시스템의 정정 능력을 초과할 뿐만 아니라 부호기에서 부여한 패리티 비트로 인해 전송 정보 비트에 포함된 실효 에너지가 오류 정정 방식을 사용하지 않은 시스템에 비해 상대적으로 감소되기 때문이다.

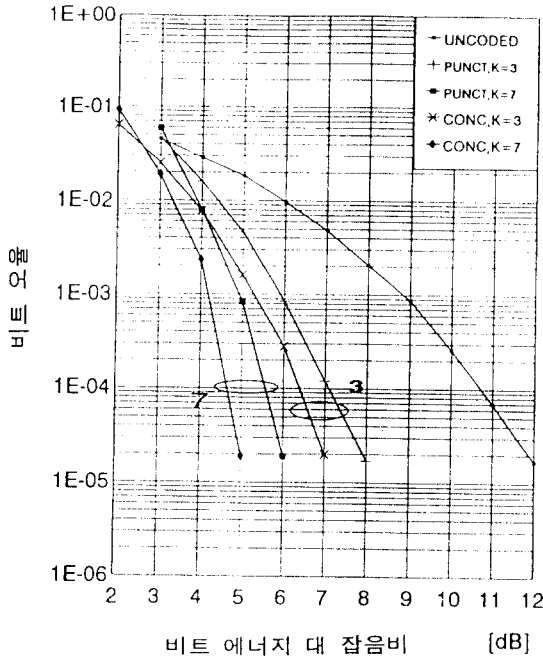


그림 8. 증폭기의 동작점이 포화 영역일 경우 2/3 평쳐드 콘볼루션 부호와 1/2 콘볼루션 부호의 오류 성능 (구속장 길이 = 3, 7).

Fig. 8. Bit error rate versus E_b/N_0 of the 1/2 convolutional code and 2/3 punctured convolutional code in the saturation region.

그림 9는 입력 백-오프량이 -6 [dB]인 경우 1/2 콘볼루션 부호와 2/3 평쳐드 콘볼루션 부호의 오류 특성을 구속장 길이가 3과 7인 경우에 대해 나타낸 것으로 증폭기가 포화 영역에서 동작하는 경우와 유사한 특성을 보여주고 있다. 또한, 일반적인 1/2 콘볼루션 부호와 2/3 평쳐드 콘볼루션 부호는 구속장 길이가 7인 경우에도 여전히 $0.5 \sim 0.7$ [dB]의 부호 이득차를 보여주고 있으므로 위성 중계기의 증폭기가 선형 영역에서 동작하는 위성 채널에서도 평쳐드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템이 오류 특성을 크게 훼손시키지 않으면서도 높은 부호효율을 유지할 수 있음을 예상할 수 있다.

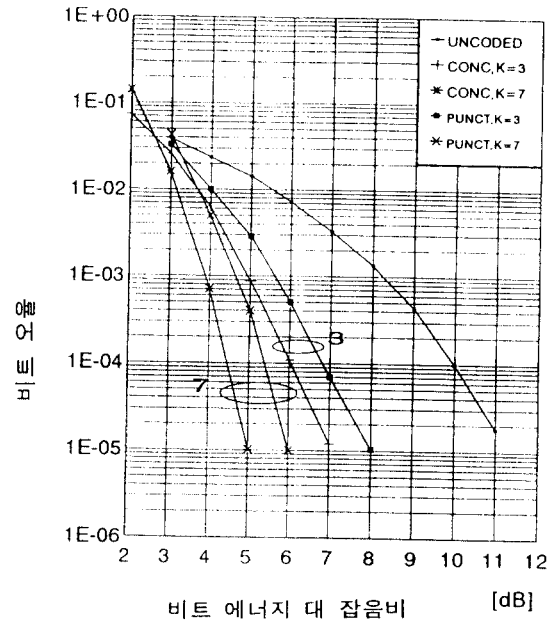


그림 9. 증폭기의 입력 백-오프량이 -6 [dB]일 경우 1/2 콘볼루션 부호와 2/3 평쳐드 부호의 오류 성능 (구속장 길이 = 3, 7).

Fig. 9. Bit error rate versus E_b/N_0 of the 1/2 convolutional code and 2/3 punctured convolutional code ($IBO = -6$ [dB], $K = 3, 7$).

구속장 길이가 3인 경우와 7인 경우에 일반적인 콘볼루션 부호와 평쳐드 콘볼루션 부호 모두 이득차가 심하므로 적절 부호 시스템의 내부 부호로는 구속장 길이가 7인 부호가 적합하며 구속장 길이를 7 이상으로 증가시킬 경우에는 복호기의 복잡도가 너무 커 구현하는 데 난점이 있다.

그림 10은 위성 중계기의 증폭기가 포화점에서 동작할 경우의 위성 채널에 대해 본 논문에서 제안한 평쳐드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템과 외부 부호와 내부 부호를 각각 RS(255, 223) 및 1/2 콘볼루션 부호로 하는 직렬 연결 부호 시스템의 오류 특성을 나타낸 것이다. 특히, 부호 효율이 50%인 1/2 단일 콘볼루션 부호에 대해서도 구속장 길이에 따라 모의 실험을 수행하여 얻은 결과를 같이 나타내어 직렬 부호 시스템과 단일 부호 시스템간의 부호 이득차를 볼 수 있도록 하였다. 단일 부호 시스템은 직렬 연결 부호 시스템에 비해 간단한 복호기를 가지나 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 두 방식 간의 부호 이득차

는 2.5[dB] 이상의 차이를 나타내는 단일 부호 시스템을 구현하기 위해서는 직렬 연결 부호 방식이 훨씬 더 큰 복잡도를 갖게된다.

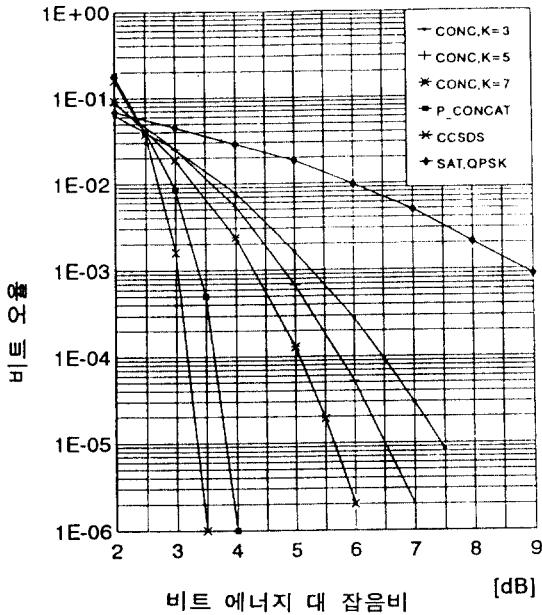


그림 10. 포화 영역에서 동작할 경우의 위성 채널에서 1/2 콘볼루션 부호를 이용한 시스템과 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템의 오율 성능.
Fig. 10. Bit error rate versus E_b/N_0 of the convolutional concatenated coding scheme and concatenated coding system using punctured convolutional code ($IBO = 0$ [dB], $K = 7$).

그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 10^{-3} 의 오율에서 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템은 1/2 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 시스템에 비해 약 0.25[dB], 10^{-4} 의 오율에서 약 0.4[dB] 정도 떨어지나 부호 효율면에서 16% 이상 개선되고 있으므로 부호 이득 면에서 큰 손실을 나타내지 않으면서도 부호 효율면에서 뚜렷한 개선 효과를 볼 수 있다. 한편, 2/3 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템은 이와 유사한 부호 효율(50%)을 갖는 1/2 단일 콘볼루션 부호에 비해 10^{-4} 의 오율에서 약 1.5[dB] 정도의 오율 개선 효과를 거두고 있음을 알 수 있는데 부호 효율면에서는 오히려 약 8% 더 우수한 특성을 보인다.

그림 11과 그림 12는 진행과관 증폭기의 입력 백-오프량이 각각 -4[dB] 및 -6[dB]인 경우 2/3 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 시스템과 1/2 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 시스템에 대해 모델링된 위성 채널에서 모의 실험을 수행하여 얻은 오율 특성 곡선을 나타낸 것으로 두 시스템 간의 부호 이득 차는 증폭기가 포화 영역에서 동작하는 위성 채널 환경과 유사한 특성을 보이고 있다.

10^{-4} 의 오율에서 입력 백-오프량이 -4[dB]인 경우 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 방식은 1/2 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 방식에 비해 약 0.4[dB]의 부호 이득 차이를 보이며 입력 백-오프량이 -6[dB]인 경우에는 0.5[dB] 정도의 부호 이득 차이를 보여 약 0.6[dB]의 부호 이득 차이를 보이는 부가 백색 가우시안 잡음 환경과 근접한 결과를 보이고 있다.

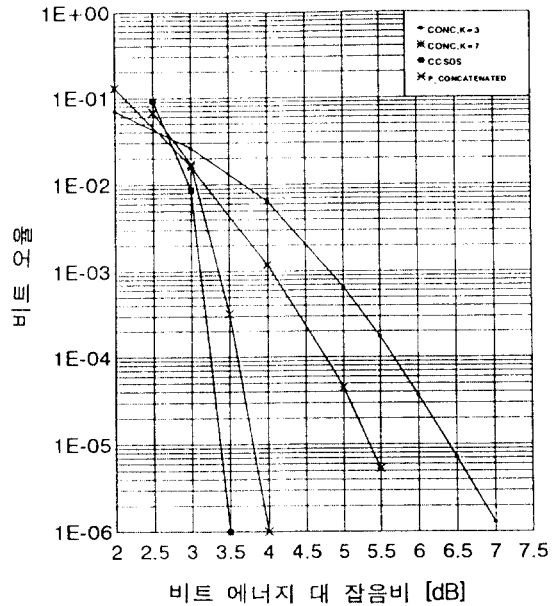


그림 11. 입력 백-오프가 -4[dB]일 경우의 위성 채널에서 1/2 콘볼루션 부호를 이용한 시스템과 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템의 오율 성능.
Fig. 11. Bit error rate versus E_b/N_0 of the convolutional concatenated coding scheme and concatenated coding system using punctured convolutional code ($IBO = -4$ [dB], $K = 7$).

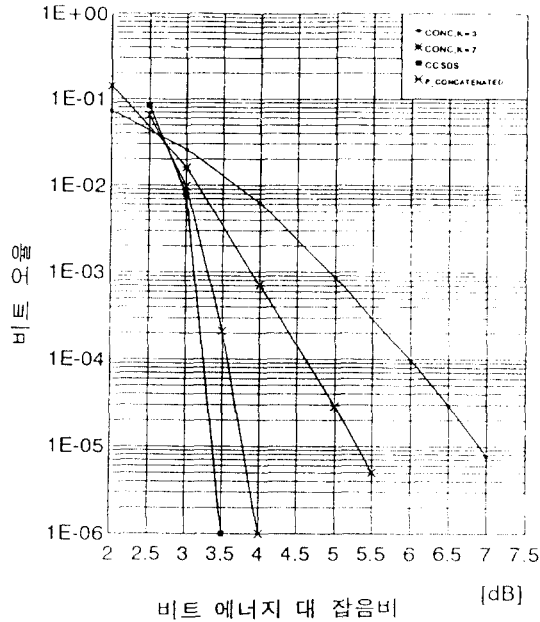


그림 12. 입력 백-오프가 -6 [dB]일 경우의 위성 채널에서 $1/2$ 콘볼루션 부호를 이용한 시스템과 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템의 오율 성능.

Fig. 12. Bit error rate versus E_b/N_0 of the convolutional concatenated coding scheme and concatenated coding system using punctured convolutional code ($I_{BO} = -6$ [dB], $K = 7$).

결국, 모델링된 위성 채널에서 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템은 $1/2$ 콘볼루션 부호를 이용한 시스템에 비해 0.5 [dB] 이상의 오율 성능 저하를 갖지 않으면서도 16% 이상의 부호 효율 개선 효과를 나타내며, 특히 고 효율을 유지하면서도 시스템의 복잡도는 동일하다는 장점을 가지고 있다. 한편, 유사한 부호 효율을 갖는 $1/2$ 단일 콘볼루션 부호와 비교할 때 부호 효율 면에서 8% 정도의 효율 개선을 나타내면서도 부호 이득에서 2 [dB] 이상의 큰 차이를 보이고 있는데 실제 시스템에 적용할 경우에는 두 시스템간의 복잡도가 고려되어야 하며 복잡도가 크게 문제되는 경우에는 오히려 성능이 낮은 단일 부호 방식을 채택하는 것이 적합하다. 그러나, 최근 반도체 기술과 신호 처리 기술의 눈부신 발달로 하드웨어 복잡도 문제는 크게 해소되고 있는 상황이며 이러한 점을 고려할 때 위성 채널에서 높은 부호 효율과 고 신뢰도를 보이는 평처드 콘볼루션 부호를 이용한

직렬 연결 부호 방식이 유리하다.

V. 결 론

본 논문에서는 위성 채널에서 발생하는 오류를 효율적으로 정정하기 위해 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 방식을 제안하고 이의 성능을 분석하기 위해 위성 채널을 모델링하였다. 직렬 연결 부호 시스템의 부호 효율을 높이기 위해 내부 부호로서 일반적인 콘볼루션 부호 대신 $2/3$ 평처드 부호를 사용함으로써 전체 시스템의 부호 효율을 개선하였는 바, 평처드 콘볼루션 부호는 일반적으로 고 효율 콘볼루션 부호가 갖는 복호기의 복잡도에 비해 크게 낮으며 이는 저 효율 부호의 복호기를 그대로 사용할 수 있다는 장점을 갖는다.

본 논문에서 모델링된 위성 채널과 백색 가우시안 잡음 채널과의 차이를 살펴보기 위해 오류 정정 방식을 사용하지 않고 순수한 변조 신호만을 모델링된 위성 채널 상에서 전송하여 QPSK 신호의 오율 성능을 도출하였는 바, 위성 통신 시스템의 중계기 증폭기가 포화점에 동작할 경우 백색 가우시안 잡음 채널에서의 QPSK 시스템과 모델링된 위성 채널에서의 성능 차이는 10^{-1} 의 오율에서 부호 이득이 약 2.2 [dB] 정도 차이가 남을 알 수 있었다.

신행파관 증폭기가 포화점에서 동작할 경우의 위성 채널에 대해 본 논문에서 제안한 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템과 $1/2$ 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 시스템의 오율 특성을 보면, 10^{-3} 의 오율에서 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템은 일반적인 직렬 부호 시스템에 비해 약 0.25 [dB], 10^{-1} 의 오율에서 약 0.4 [dB] 정도 떨어지나 부호 효율면에서 16% 이상 개선되고 있으므로 부호 이득 면에서 큰 손실을 나타내지 않으면서도 부호 효율면에서 뚜렷한 개선 효과를 볼 수 있다.

신행파관 증폭기의 입력 백-오프량이 각각 -4 [dB] 및 -6 [dB]인 경우 $2/3$ 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템과 일반적인 직렬 연결 부호 시스템에 대해 모델링된 위성 채널에서 모의 실험을 수행하여 얻은 결과를 보면 두 시스템 간의 부호 이득 차는 증폭기가 포화 영역에서 동작하는 위성 채널 환경과 유사한 특성을 보이고 있다.

결국, 모델링된 위성 채널에서 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 부호 시스템은 일반적인 직렬 연결 부호 시스템에 비해 0.5 [dB] 이상의 오율 성능 저하

를 갖지 않으면서도 16% 이상의 부호 효율 개선 효과를 나타내며, 특히 고 효율을 유지하면서도 시스템의 복잡도는 동일하다는 장점을 가지고 있다. 한편, 유사한 부호 효율을 갖는 1/2 단일 콘볼루션 부호와 비교할 때 부호 효율 면에서 8% 정도의 효율 개선을 나타내면서도 부호 이득에서 2[dB] 이상의 큰 차이를 보이고 있는데 실제 시스템에 적용할 경우에는 두 시스템간의 복잡도가 고려되어야 하며 복잡도가 크게 문제되는 경우에는 오히려 성능이 낮은 단일 부호 방식을 채택하는 것이 적합하다. 그러나, 최근 반도체 기술과 신호 처리 기술이 눈부신 발달로 하드웨어 복잡도 문제는 크게 해소되고 있는 상황이며 이러한 점을 고려할 때 위성 채널에서 높은 부호 효율과 고 신뢰도를 보이는 평처드 콘볼루션 부호를 이용한 직렬 연결 부호 방식이 유리하다.

참 고 문 헌

1. William W Wu, David Haccoun, Robert Peile, Yasuo Hirata, "Coding for Satellite Communication," IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vol. SAC-5, No. 4, pp. 724-748, May 1987.
2. G. David Forney, JR., "The Viterbi Algorithm," Proceedings of the IEEE, Vol. 61, pp. 268-278, March 1973.
3. Larry C. Palmer, "Computer Modeling and Simulation of Communications Satellite Channels," IEEE Journal on Selected Area in Communications, Vol. SAC-2, No. 1, pp. 89-101, Jan. 1984.
4. William W Wu, Elements of Digital Satellite Communication, Volume II, Computer Science Press, pp. 175-184, 1985.
5. Michel C. Jeruchim, Philip Balaban, and K. Sam Shanmugan, Simulation of Communication Systems, Plenum Press, pp. 268-269, 1992.
6. Jerrold A. Heller, Irwin Mark Jacob, "Viterbi Decoding for Satellite and Space Communication," IEEE Trans. Commun. Technol., Vol. COM-19, pp. 835-848, Oct. 1971.
7. Goerge C. Clark, Jr., J. Bibb Cain, Error Control Coding for Digital Communications, Plenum Press, pp. 331-339, 1981.



鄭 虎 泳(Ho Young Cheong) 正會員
 1962年 7月 6日生
 1986年 2月: 忠南大學校 電子工學
 教育學科(工學士)
 1989年 8月: 延世大學校 大學院 電
 子工學科(工學碩士)
 1994年 2月: 延世大學校 大學院 電
 子工學科(工學博士)

※주관심분야: 위성통신, 오류정정이론, CDMA 등임



康 昌 彦(Chang Eon Kang) 正會員
 1938年 8月 26日生
 1960年: 延世大學校 電氣工學科
 (工學士)
 1965年: 延世大學校 大學院 電氣工
 學科(工學碩士)
 1969年: 美國 미시간주립大學校 大
 學院 電氣工學科(工學碩士)

1973年: 美國 미시간주립大學校 大學院 電氣工學科(工學
 博士)
 1967年~1973年: 美國 미시간주립大學校 工業研究所 先任
 研究員
 1973年~1981年: 美國 노던일리노이大學校 電氣工學科 助
 教授, 副教授
 1982年~現在: 延世大學校 電子工學科 教授
 1987年~1988年: 本學會 副會長
 1989年~1990年: 本學會 會長