

성층권 통신시스템(HAPS)을 위한 오류정정부호의 성능분석

정회원 백동철*, 구분준*, 안도섭*, 박광량*

Performance Analysis of Error Correcting Codes for HAPS (High Altitude Platform Station)

Dongcheol Baek*, Bonjun Koo*, Doseob Ahn*, Kwangryang Park* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 차세대 통신 인프라로 부상하고 있는 성층권 통신시스템에 대하여 간략하게 소개하며 이를 통해 고품질의 서비스를 제공하기 위한 방법으로 다양한 형태의 오류정정부호를 제안한다. 성층권 통신시스템은 고주파수 특성에 의한 강우 감쇠, 대기 산란 등으로 인해 신호전력의 저하가 심하므로 부호화 이득이 높은 연접부호의 사용이 바람직하며 이러한 연접부호를 설계하기 위해 본 논문에서는 성층권 통신시스템 국외 개발업체가 제안한 연접부호와 최근의 부호이론 분야에서 각광받고 있는 반복부호법을 사용한 다양한 형태의 연접부호들의 성능을 비교 분석한다.

ABSTRACT

In this paper, we introduce the concept of a HAPS(High Altitude Platform Station) system which is expected to be a next generation communication system and suggest several error correcting codes to provide high quality services. Since a HAPS system encounters serious signal attenuation due to rain and scattering in the air, concatenated codes which have a high coding gain is considered to be a proper error correcting method. In this paper, we provide performance analyses result of two candidate coding schemes for a HAPS. The first one is a conventional concatenated coding scheme, and the second one is an iterative decoding method known as Turbo Codes.

I. 서론

무선통신 시스템은 1890년대의 지상 송전탑 방식을 시작으로 1960년대의 정지궤도 위성통신, 1980년대의 저궤도 위성통신 도입에 이르기까지 지속적인 발전을 거듭해 왔다. 그러나 최근 한정된 위성 궤도 및 주파수 자원의 고갈이라는 문제와 초고속 멀티미디어 서비스에 대한 수요의 증가로 새로운 통신 시스템의 개발이 요구되고 있다. 이에 대한 대안의 하나로 미국, 일본 등 몇몇 통신 선진국을 중

심으로 성층권에 통신중계기를 탑재한 비행선을 채공시켜 고속의 무선 통신 인프라를 구축하려는 방안이 활발히 추진중이다^{[1][2]}. 이러한 배경하에 성층권 통신시스템은 고기능, 고품질의 다양한 통신 용구, 특히 언제 어디에서나 자유로이 접속할 수 있는 무선 방식의 고속 멀티미디어 서비스와 복지통신, 물류통신, 항공관제, 관측서비스 등의 각종 응용 무선 서비스 수요를 제공할 수 있는 새로운 차세대 통신 시스템으로 서서히 부상하고 있다.

성층권 통신시스템이 위와 같은 고품질의 서비스를 제공하기 위해서는 채널상에서 발생하는 오류를

* 한국전자통신연구원 위성통신시스템연구부(dcbaek@etri.re.kr)
논문번호 : 99320-0811, 접수일자 : 1999년 8월 11일

효율적으로 제어해야 한다. 전송 오류를 제어하는 방식으로는 인터리빙(interleaving), 신호 재전송 방식(ARQ: automatic repeat request), 오류정정부호(FEC: forward error correction) 사용 등이 있으며, 성층권 통신시스템 채널 특성(고주파수 사용으로 인한 강우감쇠, 대기에 의한 감쇠 등) 및 운용고도(약 20.6 km) 등을 고려할 때 높은 부호화 이득(coding gain)을 갖는 오류정정부호의 사용이 적합하다. 현재까지의 연구결과 여러 가지의 오류정정부호 중에서 연결부호(concatenated codes)가 성능이 가장 좋은 방식중의 하나로 알려져 있다^[3]. 실제 성층권 통신시스템과 채널환경이 비슷한 위성통신시스템에서 RS 부호(Reed-Solomon codes)와 길썩부호(convolution codes)를 연결한 연결부호를 사용하고 있으며 성층권 통신시스템 개발업체인 미국의 SSI사(Sky-station International, INC.)도 이러한 형태의 연결부호를 제안하고 있다.

성층권 통신시스템에 적용할 수 있는 다른 오류정정부호로는 터보부호(turbo codes)와 같은 반복복호법(iterative decoding algorithm)을 사용한 연결부호이다. 이는 낮은 신호대잡음비(SNR: signal to noise ratio)에서 매우 낮은 비트오율(BER: bit error rate)을 가지지만 반복복호법에 따른 시간지연(time delay)의 문제가 발생하는 단점을 가지고 있다. 그러나 성층권 비행선이 위성에 비해 매우 낮은 고도를 가지므로 짧은 전송 거리로 인해 지상 무선통신 시스템에서와 같이 전송 지연을 거의 무시할 수 있기 때문에 이러한 반복복호법을 사용하는 연결 부

호가 충분히 적용가능 하리라고 판단된다.

본 논문에서는 성층권 통신시스템의 개념에 대해 간략히 소개하고 이를 통해 고품질의 서비스를 제공하기 위한 방법으로 국의 개발업체가 제안한 연결부호, 최근의 부호이론 분야에서 각광받고 있는 반복복호법을 사용한 연결부호 등 다양한 형태의 오류정정부호를 제안한다. 또한 제안된 높은 부호화 이득을 갖는 다양한 형태의 연결부호에 대하여 각 부호의 장단점을 비교 분석하고, 시뮬레이션을 통해 신호대 잡음비에 따른 BER 성능을 비교 분석하였다.

II. 성층권 통신시스템 개념

성층권 통신시스템은 대류권(Troposphere)과 중간권(Mesosphere) 사이의 성층권(Stratosphere, 지상 약 20~80km 상공)에 무선 중계기를 탑재한 비행선을 일정 위치에 유지시키고, 각종 무선통신 서비스를 제공하는 시스템이다. 비행선이 제공할 수 있는 성층권의 주요 특징으로는 비교적 기상 조건이 안정되어 있고, 항공 관제 영역 위쪽에 위치하며 위성에 비해 근거리의 장점을 활용하여 필요할 경우 비행선을 이착륙시킴으로써 유지 보수할 수 있다는 장점을 보유하고 있으며, 제한 사항으로는 환경 오염 방지를 위해 연소에 의한 추진이 금지되어 있다는 점을 들 수 있다.

성층권 비행선은 내부를 헬륨 가스로 채우며, 성층권에서 바람 등의 영향에 대해 전동기로 구동되는 프로펠러를 사용하여 자세 및 위치를 제어한다.

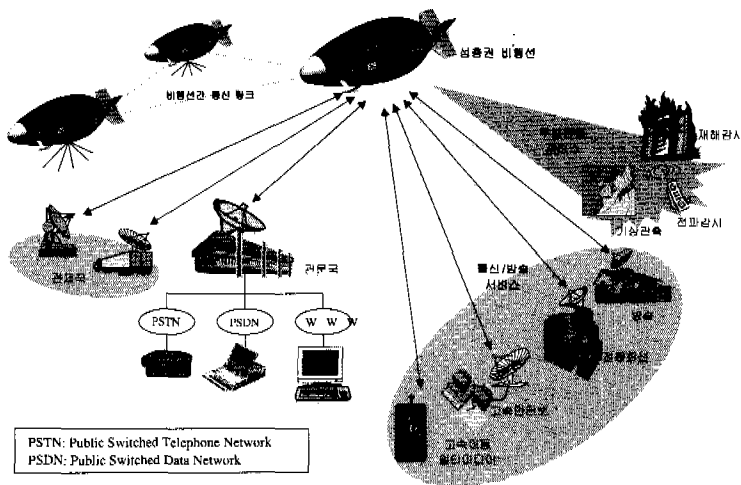


그림 1. 성층권 통신시스템 개념도

성충권 비행선에 요구되는 전력은 낮에는 비행선 표면에 장착된 태양 전지, 밤에는 연료 전지에 의해 공급되어진다.

성충권 통신시스템은 위성 통신망과 지상 이동 통신망의 장점을 동시에 보유한 시스템으로 저 비용 서비스 실현, 고속 서비스 제공, 휴대 단말 통신 가능, 광역성, 짧은 전송 지연, 대용량 회선 등의 장점을 보유하고 있다.

성충권 통신시스템은 기존의 정지위성 및 저궤도 위성에 비해 낮은 전송손실, 짧은 시간지연, 가시거리 확보의 용이 등의 장점으로 인해 다양한 서비스 욕구를 만족시킬 수 있다. 그 서비스 응용분야로는 고정 통신, 이동 통신, 방송 서비스와 관측/탐사/감시/측위 서비스 분야 등으로 구분할 수 있으며 이를 위한 시스템 개념도를 그림 1에 도시하였다.

Ⅲ. 성충권 통신시스템을 위한 오류정정부호

성충권 통신시스템에 대한 연구는 아직 초기 단계로 구체적인 시스템 파라미터에 대한 결과 및 분석은 미진한 상황이다. 오류정정부호에 대한 연구도 마찬가지로, 현재 ITU에서 분배된 성충권 통신시스템용 주파수는 V 대역(47/48 GHz)으로 저주파 대역에 비해 상대적으로 강우감쇠, 대기에 의한 산란 등 신호 전력의 감쇠가 심하기 때문에 고품질의 통신서비스를 제공하기 위해서는 효율적인 오류제어가 필요하다.

이러한 배경에서 강우감쇠 등에 의한 상/하향 링크 페이딩을 보상할 수 있도록 부호화 이득(coding gain)이 높은 연접부호(concatenated codes)의 사용이 미국 SSI사 등에 의해 제안되고 있다^[1]. 그러므로 본 논문에서는 다양한 형태의 연접부호에 대하여 성능을 비교 분석함으로써 성충권 통신시스템에 적용 가능한 효율적인 오류정정부호를 제시하고자 한다.

본 논문에서 성능분석을 위해 제안된 오류정정부호로는 ① 미국 SSI사가 제안한 형태의 연접부호, 즉 RS부호(Reed-Solomon codes)와 길쌈부호(convolution codes)를 사용한 연접부호, ② 터보부호(turbo codes), ③ 블록부호(block codes)를 구성부호(constituent codes)로 갖는 직렬연접부호(serial concatenated codes) 등으로 각각의 세부사항은 표 1에 정리하였다.

제안된 연접부호들의 부호율(code rate)은 미국 SSI사가 성충권 통신시스템을 위해 제안한 연접부

호([225, 209] RS 부호+3/4 길쌈부호)의 부호율(≈ 0.7)과 동일하게 설정하였다^[1]. 또한 성충권 통신시스템은 고양각 서비스 커버리지를 보유하면서 가시경로(LOS, Line-Of-Sight)통신을 하는 시스템이므로 지상무선망이나 저궤도 위성통신망에서 발생하는 다중경로 페이딩(multi-path fading) 효과는 극히 미미하므로 통신링크상의 전송환경으로 고려할수 있는 인자로는 강우, 대기, 지구잡음과 같은 열잡음이 있다. 그러므로 성충권 시스템의 시뮬레이션을 위한 채널환경은 다중경로 페이딩을 고려하지 않은 AWGN 채널(Additive White Gaussian Channel)로 한정하였다.

표 1. 성충권 통신시스템을 위해 제안된 다양한 연접부호의 파라미터

항 목	구 성 부 호		인 터 리 버	부 호 율	복 호 알고리즘
SSI사가 제안한 연접부호	외부 부호	[225,209] RS 부호	-	$3/4 \times 209/225 \approx 0.7$	-
	내부 부호	3/4, K=7 길쌈부호			
RS 부호와 길쌈부호를 사용한 연접부호	외부 부호	[225,209] RS 부호	60×60 심벌단위 블록인터리버	$3/4 \times 209/225 \approx 0.7$	Euclidean 알고리즘, 비터비 알고리즘
	내부 부호	3/4, K=7 길쌈부호			
터보부호	부호 1	K=3 길쌈부호	60×60 비트단위 블록인터리버	7/10	MAP 알고리즘
	부호 2	K=3 길쌈부호			
블록부호를 구성부호로 하는 직렬 연접부호	외부 부호	[31,26] 해밍부호	31×26 비트단위 블록인터리버	$26/31 \times 26/31 \approx 0.7$	MAP 알고리즘
	내부 부호	[31,26] 해밍부호			

1. RS 부호와 길쌈부호를 사용한 연접부호의 성능분석

RS 부호와 길쌈부호를 인터리버(interleaver)를 통해 직렬로 연결한 연접부호는 터보부호의 발견 전까지 가장 일반적인 연접부호 구성으로 간주되어 왔으며, 이의 일반적인 부·복호화 과정을 그림 2에 도시하였다^[3].

연접부호의 부·복호 알고리즘에 대해 살펴보면 내부부호인 길쌈부호의 복호 알고리즘으로는 시퀀스적 복호 알고리즘(sequential decoding algorithm), 문턱 복호 알고리즘(threshold decoding algorithm), 비터비 복호 알고리즘(Viterbi decoding algorithm),

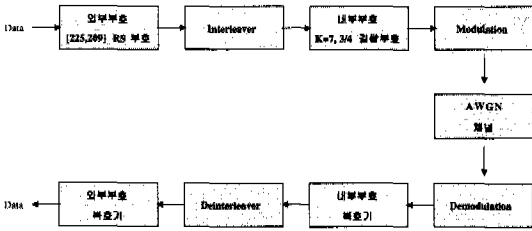


그림 2. RS부호와 길쌈부호를 사용한 연접부호의 부·복호화 과정

MAP 복호 알고리즘(maximum a posteriori probability decoding algorithm) 등이 있으며 이 중 비터비 알고리즘이 가장 효율적인 것으로 알려져 있다[4],[5].

일반적으로 내부부호의 복호후에는 연접오류가 발생하며 이러한 연접오류를 적절히 제어하기 위해 인터리버와 외부부호로 RS 부호를 사용한다. 인터리버는 연접오류를 산발오류형태로 변환시켜주며, RS 부호는 몇 개의 비트를 하나의 심벌로 처리하므로 연접오류에 강한 특성을 나타낸다. RS 부호의 복호 알고리즘으로는 Euclidean, Berlekamp-Massey 알고리즘 등이 있으며 부·복호 과정에 대해서는 이미 많은 연구 결과가 나와 있다[3].

이러한 연접부호에 대해 본 논문에서 성능분석을 위해 제안한 연접부호의 세부 사항은 표 2와 같으며 이를 바탕으로 AWGN 채널상에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 그림 3에 도시하였다. 성능분석 결과 RS 부호와 길쌈부호를 사용한 연접부호는 3dB 이상의 Eb/N0에서 매우 낮은 비트오율을 가짐을 알

표 2. RS 부호와 길쌈부호를 사용한 제안된 연접부호의 세부사항

내부부호		외부부호	
사용부호	길쌈부호	사용부호	RS 부호
부호율	3/4	부호율	209/225
생성다항식	(133, 171)	유한체 GF(255) 생성다항식	$1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8$
구속장	K=7	오류정정능력	8 심벌
절단행렬	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	심벌당비트수	8 비트
복호 알고리즘	비터비 알고리즘	복호알고리즘	Euclidean 알고리즘
인터리버	인터리버 종류	블록 인터리버	
	인터리버 크기	60×60 심벌	

수 있었다.

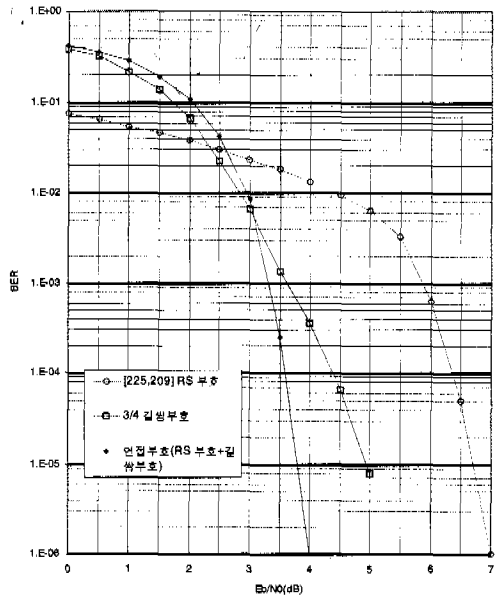


그림 3. RS 부호와 길쌈부호를 사용한 제안된 연접부호의 성능곡선

2. 터보부호의 성능분석

1993년 Berrou, Glavieux와 Thitimajshima가 귀환 형태의 조직적 길쌈부호(recursive systematic convolution codes: RSC 부호)를 사용한 병렬연접부호(parallel concatenated codes: PCC 부호)의 일종인 터보부호(turbo codes)를 발표하면서부터 다양한 형태의 연접부호에 대한 연구가 시도되고 있다 [6],[7],[8],[9],[10].

터보부호는 심벌단위의 최적복호방법인 MAP(maximum a posteriori probability) 복호 알고리즘을 사용하고 반복복호를 하는 부호로서 Shannon의 한계에 근접하는 뛰어난 성능을 보인다. 터보부호에 대한 연구는 현재까지 무수히 진행되고 있으며 특히 IMT-2000의 경우에 데이터 전송을 위한 오류정정부호로 터보부호의 사용이 거의 결정 단계에 와 있다. 그림 4, 5에 일반적인 터보부호의 부·복호기를 도시하였다.

이러한 터보부호의 우수성으로 기존의 연접부호들을 대체해 나가는 속도로 미루어보아 성충권 통신시스템에도 터보부호의 도입이 조만간 이루어질 것으로 예측되며, 이 경우 성충권 통신시스템은 음성뿐만 아니라 고속의 데이터 전송을 목표로 하고 있으므로 반복복호법을 사용하는 터보부호의 경우 시간 지연의 문제점이 발생하기 때문에 적용에 어려움이

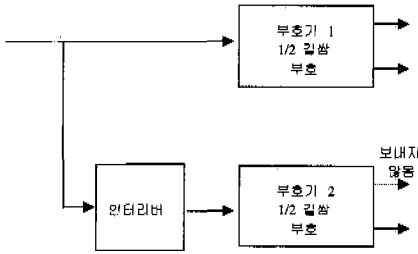


그림 4. 1/3 터보부호 부호기

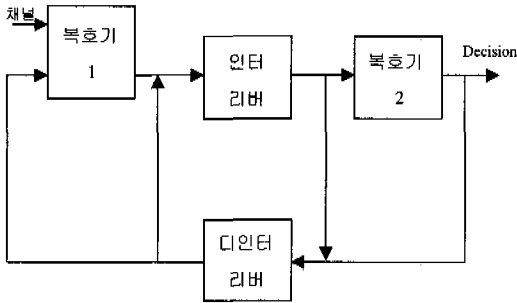


그림 5. 1/3 터보부호 복호기

생길 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 비교적 구현과 시간지연을 작게 하기 위해 구속장 $K=3$ 인 길쌈부호를 사용한 터보부호를 고려하였다. 또한 SSI사가 제안한 연접부호와 동일한 부호율을 갖기 위해 절단 길쌈부호와 같은 방법으로 1/3 터보부호와 절단행렬을 사용해 부호율 7/10의 터보부호를 구성하였다. 부호율 7/10을 얻기 위한 절단행렬은 매우 많은 경우의 수가 존재하지만 본 논문에서는 임의로 몇 가지 행렬을 만들어 성능을 분석하였으며 이중 성능이 좋은 경우를 사용하였다. 그리고 복호 알고리즘으로는 Pietrobon 등이 제안한 Log-MAP 알고리즘을 적용하였다^[11]. 표 3에 성능분석을 위해 구성한 터보부호의 세부사항을 정리하였다.

부호율 7/10인 터보부호에 대한 성능분석은 앞 절의 연접부호와 마찬가지로 AWGN 채널상에서 수행하였으며 최대 6회 반복복호한 결과를 그림 6에 도시하였다.

3. 블록부호를 구성부호로 갖는 직렬연접부호의 성능분석

터보부호의 발전은 다양한 구조의 연접부호에 대한 연구를 활성화시켰다. 즉, 길쌈부호외에 블록부호를 구성부호로 사용하거나 터보부호와 같은 병렬 구조 외에 내부부호와 외부부호를 사용한 직렬연접부호에 대해 반복복호법을 적용하는 연구 등이 진

표 3. 제안된 터보부호의 세부사항

항 목	내 용	
	부호기 종류	조직적 길쌈부호
부호기 1	생성다항식	(7, 5)
	구속장	3
	부호기 1과 동일	
부호기 2	부호기 1과 동일	
인터리버	인터리버 종류	블록인터리버
	인터리버 크기	60 × 60
절단행렬	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	
부호 알고리즘	Log-MAP 알고리즘	

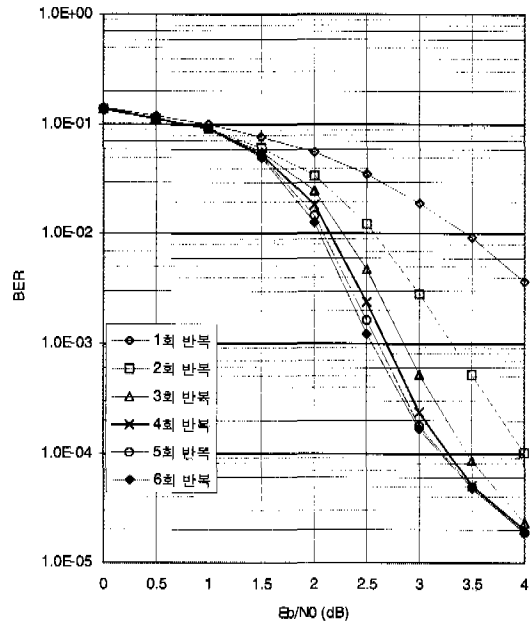


그림 6. 제안된 터보부호의 성능분석

행되었다. 이러한 연구 결과 길쌈부호외에 블록부호를 사용하여 반복복호함으로써 높은 부호화 이득을 얻을 수 있음이 알려져 있다^[10]. 또한 내부부호와 외부부호를 길쌈부호로 사용하여 인터리버를 통해 직렬로 연결한 직렬연접부호의 경우에도 MAP 알고리즘을 사용하여 반복복호함으로써 좋은 성능을 얻을 수 있다^{[6],[7],[8]}. 블록부호의 복호 알고리즘은 경

판정 복호법(hard decoding algorithm)인 대수적 복호알고리즘(algebraic decoding algorithm)이 주로 사용되나 블록부호를 트렐리스상에 표현하면 MAP이나 비터비 알고리즘과 같은 연관정 복호 알고리즘이 가능해진다. 그러므로 이 절에서는 성층권 통신 시스템을 위한 연결부호로 트렐리스상에 표현된 블록부호를 내부부호와 외부부호로 사용한 직렬연접부호를 구성하고 여기에 MAP알고리즘과 반복복호법을 적용한다¹¹⁾.

블록부호의 트렐리스 표현 방법으로는 부호의 생성행렬(generator matrix), 또는 패리티검사행렬(parity check matrix)를 이용한 방법이 있다¹⁵⁾. 블록부호의 트렐리스의 복잡도는 길쌘부호와 마찬가지로 필요한 상태(state)의 수에 의해 결정되며, 이는 이진 $[n, k]$ 블록부호의 경우 2^{n-k} 이하이다⁵⁾. 즉 $n-k$ 가 블록부호의 구속장을 의미한다. 그림 7에 패리티검사행렬을 사용한 $[7, 4]$ 해밍부호의 트렐리스도를 도시하였다.

터보부호와 마찬가지로 블록부호를 사용한 연결부호를 성층권 통신시스템에 적용할 경우에 반복복호법을 이용하므로 시간지연 및 복잡도에 대한 문제가 발생한다. 그러므로 본 논문에서는 복잡도가 작고 부호율 7/10을 만족하는 부호로 $[31, 26]$ 해밍부호(Hamming codes)를 선택하였으며 터보부호와 달리 직렬구조를 선택하였다. 이의 부호기 및 복호기 구성을 그림 8과 그림 9에 도시하였다. 터보부호에 적용된 반복복호법과 같은 복호 알고리즘을 적용하여 AWGN 채널상에서 시뮬레이션을 수행한 결과 그림 10과 같은 성능을 가짐을 알 수 있었다.

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

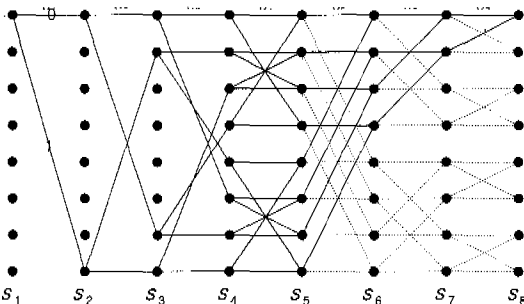


그림 7. 패리티검사행렬을 이용한 $[7, 4]$ 해밍부호의 트렐리스도

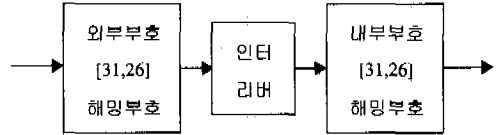


그림 8. 블록부호를 구성부호로 갖는 제안된 직렬연접부호 부호기

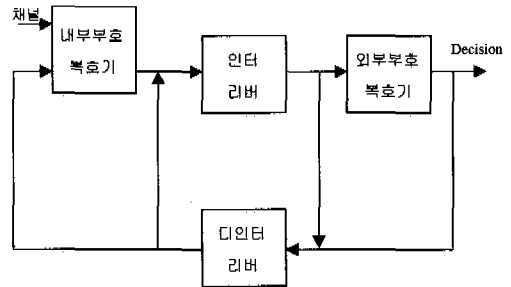


그림 9. 블록부호를 구성부호로 갖는 제안된 직렬연접부호복호기

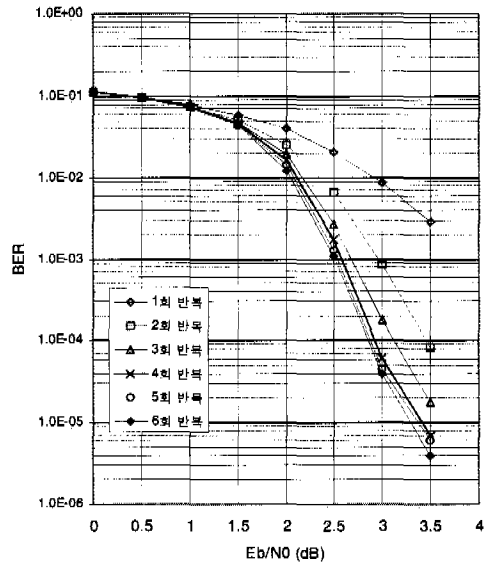


그림 10. 블록부호를 구성부호로 갖는 제안된 직렬연접부호의 성능곡선

4. 성능 비교

본 논문에서는 성층권 통신시스템을 위한 오류정정부호로 다음과 같은 세 가지 종류의 연결부호를 제안하였으며, 이들의 신호대잡음비에 대한 BER 성능을 분석하고, 그 결과를 그림 11에 도시하였다.

- (1) RS 부호와 길쌘부호를 사용한 연결부호(SSS)가 제안한 것과 동일한 방식)

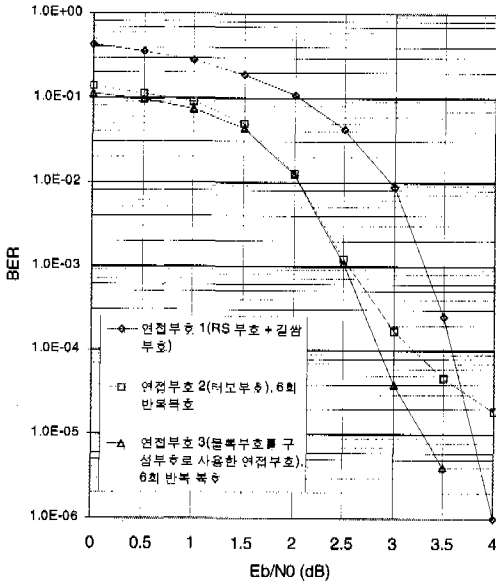


그림 11. 제안된 세 가지 연접부호의 성능비교

(2) 터보부호

(3) 블록부호를 구성부호로 갖는 직렬연접부호

성능분석 결과 세 가지 모두 좋은 성능을 가진 것으로 판단되나 그 중 (2)와 (3)의 경우는 낮은 Eb/N0에서, (1)의 경우는 높은 Eb/N0에서 매우 우수한 성능을 보여준다. 일반적으로 음성신호의 경우 요구되는 비트오율은 약 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 이며, 이는 반복부호법을 사용하는 (2)와 (3)의 적용이 효율적이라 볼 수 있다. 그러나 (2)와 (3)의 경우 반복부호에 따른 시간 지연이 발생하며 비터비 알고리즘에 비해 2배 이상 복잡한 MAP 알고리즘의 복잡도 등의 문제를 가지므로 이에 대한 검토가 필요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 차세대 통신 시스템으로 주목받고 있는 성층권 무선 통신시스템에 대하여 고찰하였으며 이의 세부 시스템 파라미터 중 고품질의 통신서비스를 제공하기 위한 방법인 오류정정부호에 대하여 성능을 분석하였다. 성층권 통신시스템을 위해 본 논문에서 제안한 오류정정부호는 강우감쇠 등의 열악한 채널환경에 대처하기 위해 부호화 이득이 높은 연접부호를 선택하였으며 성층권 통신시스템 개발업체인 미국 SSI사가 제안한 연접부호를 참고로 이와 동일한 형태의 연접부호, 터보부호, 블록부호를 구성부호로 갖는 직렬연접부호 등을 대상으로

성능분석을 시행하였다. 성능분석 결과 위의 세 가지 연접부호 모두 성층권 통신시스템을 위한 오류정정부호로 사용이 가능할 것으로 예측되며, 비교적 낮은 BER이 요구되는 음성서비스($10^{-3} \sim 10^{-5}$) 및 데이터 전송 서비스(10^{-6})에서 동일한 BER 값에 대해서는 부호율이 0.7인 경우 블록부호를 사용한 직렬연접부호가 보다 우수한 성능(낮은 Eb/N0 요구)을 갖는 것으로 분석되었으며 이를 이용할 경우 저가의 통신단말 구현이 가능할 것으로 예측된다. 본 논문에서 제안된 연접부호들은 향후 성층권 통신시스템의 국내 도입시 고품질의 통신 서비스 제공을 위한 오류정정기법 설계에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] M. Piccinni, "Skystation stratospheric telecommunication system payload description", 3rd Ka-Band Utilization Conference, pp.49-56, 1997
- [2] The first Stratospheric Platform Systems Workshop (SPSW99), 1999.5.12 ~ 1999.5.13, Yokosuka, Japan
- [3] Stephen B. Wicker, Error control systems for digital communication and storage, Prentice-Hall.
- [4] Shu Lin and Daniel J. Costello Jr., Error control coding: fundamentals and applications, Prentice-Hall.
- [5] C. Schlegel, Trellis Coding, IEEE Press, New York, 1997.
- [6] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "A soft-input soft-output maximum a posteriori (MAP) module to decode parallel and serial concatenated codes," TDAP Report 42-127, JPL, Pasadena, California, pp. 1-20, November 15, 1996.
- [7] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Serial concatenation of interleaved codes: Performance analysis, design, and iterative decoding," The TDAP Report 42-126, April-june 1996, JPL, Pasadena, California, pp. 1-26, August 15, 1996.
- [8] S. Benedetto and G. Montorsi, "Iterative

