

論文2003-40TC-9-3

직렬연접 길쌈부호를 사용한 다중레벨 부호변조방식

(Multilevel Coded Modulation with Serial Concatenated Convolutional Code)

李相勳 * , 呂雲東 ** , 朱彦熈 ***

(Sang Hoon Lee, Woon Dong Yeo, and Eon Kyeong Joo)

요약

본 논문에서는 직렬연접 길쌈부호를 사용한 다중레벨 부호변조방식을 제안하고 그 성능을 분석한다. 다중레벨 부호변조의 첫 번째 레벨에서 직렬연접 길쌈부호를 구성부호로 사용할 경우 높은 부호이득과 대역폭효율성을 얻을 수 있다. 모의실험 결과 Ambroze의 길쌈부호를 사용한 다중레벨 부호변조의 성능은 병렬연접 길쌈부호를 사용한 다중레벨 부호변조의 성능과 같이 성능이 포화된다. 그러나 Benedetto의 직렬연접 길쌈부호를 사용한 다중레벨부호변조는 성능포화현상을 보이지 않을 뿐만 아니라 성능도 병렬연접 길쌈부호를 사용한 것과 Ambroze의 직렬연접 길쌈부호를 사용한 것보다 우수하다. 따라서 Benedetto의 직렬연접 길쌈부호를 사용한 다중레벨부호변조는 제한된 대역폭에서 고품질을 요구하는 시스템에 적합하다고 할 수 있다.

Abstract

Multilevel coded modulation(MCM) with serial concatenated convolutional code (SCCC) is proposed and the performance is analyzed in this paper. Both high coding gain and bandwidth efficiency can be obtained if SCCC is adopted as a component code at the first level of MCM. Simulation results show that the performance of MCM with Ambroze's SCCC is saturated like that of MCM with PCCC. But MCM with Benedetto's SCCC shows no performance saturation and better performance than MCM with PCCC or Ambroze's SCCC. Thus MCM with Benedetto's SCCC may be a good choice for high quality system with limited bandwidth.

Keywords : 다중레벨부호변조, 직렬연접길쌈부호, 다단계복호, 반복복호

I. 서론

1996년 Benedetto 등^[1]에 의해 제안된 직렬연접 길쌈

* 學生會員, *** 終身會員, 慶北大學校 電子電氣工學部
(School of Electronic and Electrical Engineering,
Kyungpook National University)

** 正會員, 韓國科學技術情報研究院
(Korea Institute of Science and Technology Infor-
mation)

接受日字:2002年12月20日, 수정완료일:2003年9月9日

부호(serial concatenated convolutional codes; SCCC)는 높은 신호 대 잡음비 영역에서 병렬연접 길쌈부호보다 우수한 성능을 보인다. 직렬연접 길쌈부호는 직렬로 연결된 내외부 길쌈부호 사이에 인터리버를 연결한 구조이며, 복호시에는 내외부 부호 간에 반복 복호를 하여 높은 부호화 이득을 얻는다. 최근 이러한 높은 부호화 이득과 함께 대역폭을 효율적으로 사용하기 위하여 직렬연접 길쌈부호를 대역폭 효율적인 변조 기법에 적용하는 방안이 연구되고 있다^[2].

대역폭 효율적인 부호변조 기법은 Ungerboeck의 격자형 부호변조(trellis coded modulation; TCM)^[3]와 Imai가 제안한 다중레벨 부호변조(multilevel coded modulation; MCM)^[4]로 나뉘어 진다. TCM의 경우 구성부호기로 길쌈부호를 사용하지만 MCM은 TCM과 달리 각 레벨의 구성부호기로 블록 부호, 길쌈부호 등 서로 다른 다양한 부호기를 사용 할 수 있다. 그리고 각 레벨에 임의의 부호율을 적용할 수 있으므로 심볼 당 정보비트의 수를 다양하게 구성할 수 있다. 따라서 MCM은 채널 환경에 따라 TCM보다 높은 유연성을 가진다. 그리고 MCM의 복호 방법인 다단계 복호 방식은 연관성 출력을 이용할 경우 반복적인 다단계 복호가 가능하다.

대역폭의 효율성과 우수한 오류정정을 위해 현재까지 제안된 부호와 변조를 결합한 방식으로는 TCM과 병렬연접 길쌈부호(parallel concatenated convolutional code; PCCC)^[5]를 결합한 TTCM(turbo trellis coded modulation)^[6]구조가 있고 TCM과 SCCC를 결합한 SCTCM(serial concatenated trellis coded modulation)^[2]이 있다. 그리고 TCM에 비해 여러 가지 장점을 지니고 있는 MCM에 PCCC를 사용하는 방안^[7]이 제안되었다. 그러나 MCM에 SCCC를 적용하는 방안에 대해서는 아직 연구되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 PCCC에 비해 높은 신호 대 잡음비에서 우수한 성능을 나타내며 오류 마루현상도 나타나지 않는 SCCC를 MCM의 레벨 1의 구성부호로 사용하는 다중레벨 부호변조를 제안한다. 그리고 MCM의 레벨 1의 구성부호로 길쌈부호와 PCCC 그리고 SCCC를 사용한 방식의 성능을 모의 실험을 통해 비교 분석한다.

II. 직렬연접 길쌈부호

직렬연접 길쌈부호는 여러 가지 구조를 가질 수 있다^[1, 8]. 그 중에서 본 논문에서는 특징적인 두 가지 구조를 사용하여 다중레벨 부호기를 구성하고 그 성능을 비교 분석한다.

1. Ambroze의 직렬연접 길쌈부호

<그림 1>은 Ambroze^[8]가 제안한 직렬연접 길쌈부호의 한 예를 나타낸다. 그림에서 부호기는 생성다항식이 (7,5)이고 부호율이 1/2인 순환 체계적 길쌈부호(recursive systematic convolutional code; RSC code) 2

개가 직렬로 연결되고 그 사이에 인터리버가 연결되어 총부호율이 1/3이 된다. 그리고 복호기는 두 개의 MAP(maximum a posteriori probability) 모듈과 인터리버(I), 역인터리버(DI)로 구성된다.

복호기의 동작은 다음과 같다. 먼저 MAP1에서 계산된 정보비트의 부가정보(extrinsic value)는 MAP2의 입력으로 사용된다. 그리고 MAP2에서는 정보비트에 대한 LLR(log-likelihood ratio)값과 정보비트와 패러티비트에 대한 부가정보를 계산하여 MAP1로 전달한다. 두 복호기의 계산된 부가정보는 서로 다음 구성 복호기의 사전정보(a priori information)로 사용됨으로 반복 복호가 가능하다.

MAP 알고리즘^[8]은 PCCC에서와 거의 동일하지만 외부 부호기에서 직렬연접 부호의 정보비트에 대한 LLR 외에 패러티비트에 대한 LLR도 계산한다는 것이 다르다.

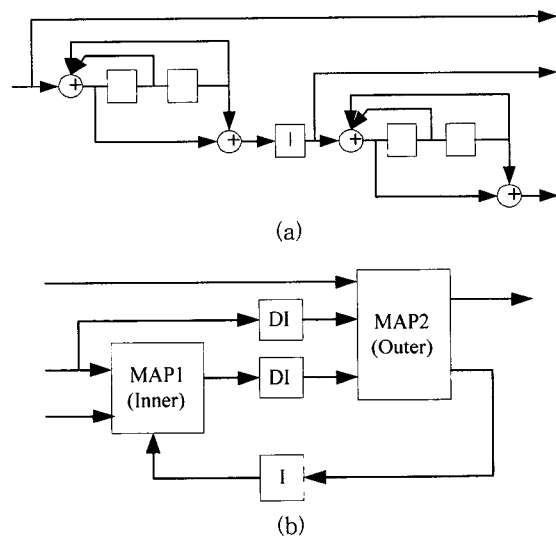


그림 1. Ambroze의 직렬연접 길쌈부호 (a) 부호기 (b) 복호기

Fig. 1. Ambroze's SCCC. (a) Encoder (b) Decoder

2. Benedetto의 직렬연접 길쌈부호

<그림 2>는 Benedetto^[1]가 제안한 직렬연접 길쌈부호를 나타낸다. Ambroze의 것과 달리 인터리버의 입출력에 다중화기(MUX)와 역다중화기(DEMUX)가 사용된다. 그리고 전체 부호율을 1/3로 하기 위해서 내부부호로 2/3-순환 체계적 길쌈부호가 사용된다. 부호율 1/2인 외부부호의 출력을 인터리버의 입력으로 받으므로 인터리

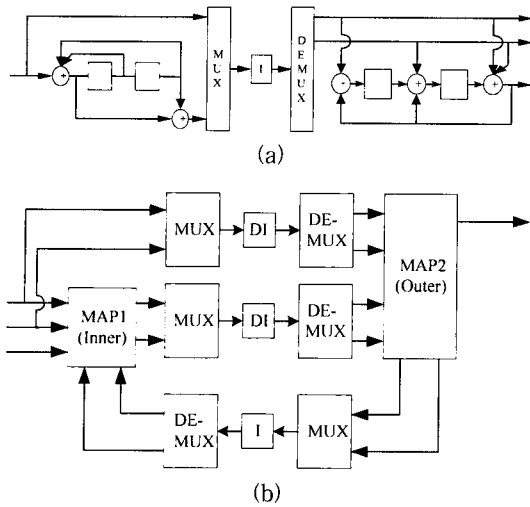


그림 2. Benedetto의 직렬연접 길쌈부호 (a) 부호기 (b) 복호기
Fig. 2. Benedetto's SCCC. (a) Encoder (b) Decoder

버 크기는 입력프레임 크기의 두 배이다. 따라서 Ambroze의 직렬연접 길쌈부호에 비해 인터리버 크기가 증가하여 높은 인터리빙 이득(interleaving gain)을 얻을 수 있다. 다만, 반복 복호시 인터리버를 매번 통과하기 때문에 인터리버에 의한 지연시간이 길어진다는 단점이 있다.

III. 다중레벨 부호변조

1. 다중레벨 부호변조방식

8PSK 변조를 위한 MCM의 구조는 <그림 3>과 같다. 아래첨자 1, 2, 3은 각 레벨을 나타낸다.

입력정보(u)는 역다중화기(demultiplexer; DEMUX)를 통해서 먼저 세 레벨(u_1, u_2, u_3)로 역다중화(demultiplexing)된 후 각 레벨의 부호기(Encoder; En_1, En_2, En_3)에서 c_1, c_2, c_3 로 부호화된다. 그리고 각 레벨간의 상관

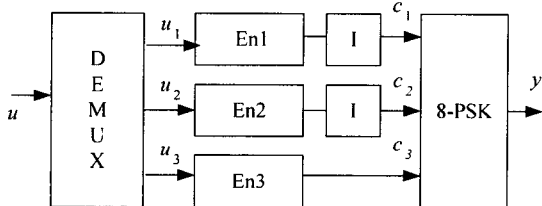


그림 3. 다중레벨 부호변조
Fig. 3. Multilevel coded modulation.

관계를 제거하기 위하여 레벨 1과 레벨 2에 인터리버를 사용한다. 각 레벨의 출력은 8-PSK 심볼(y)로 변조되어 채널로 전송된다.

맵핑 방식으로는 AWGN(additive white Gaussian noise) 채널에서 성능이 가장 우수한 것으로 알려진 <그림 4>와 같은 Ungerboeck 맵핑 방식을 사용한다. <그림 4>에서 $c_1c_2c_3$ 은 각각 레벨 1과 레벨 2 그리고 레벨 3의 송신출력을 나타낸다. $d_0 \sim d_7$ 는 수신된 심볼(r)과 송신 가능한 심볼들 사이의 거리를 나타내며 다중레벨 부호의 복호에 사용되어 진다.

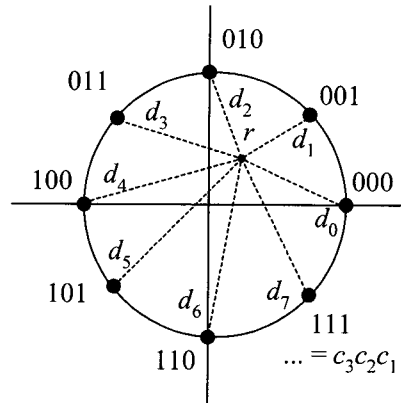


그림 4. Ungerboeck 맵핑
Fig. 4. Ungerboeck mapping.

위와 같은 Ungerboeck의 맵핑법을 사용하게 되면 레벨 1의 부호의 성능이 전체 부호의 성능에 주요한 영향을 준다^[9]. 그러므로 레벨1에 가능한 강력한 오류 정정 능력을 가진 부호를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 성능을 향상시키기 위하여 MCM의 레벨 1에 II장에서 설명한 SCCC를 사용하는 것을 제안한다.

2. 다중레벨 부호변조기의 복호 방법

일반적으로 다중레벨 부호의 복호 방법으로는 다단계 복호(multistage decoding)방법이 사용된다. 다단계 복호 방식의 각 레벨에서 연판정 출력값을 이용하면 반복적인 다단계 복호가 가능하다. 이러한 반복적인 다단계 복호기를 나타내면 <그림 5>와 같다. 그림에서 점선은 반복 복호를 위해 각 레벨에서 쿼환(feedback)되는 신뢰정보를 나타낸다. 그리고 σ^2 은 $(N_0/2)E_s$ 이고 N_0 는 주파수상의 잡음 밀도이며 E_s 는 심볼 에너지이다.

복호기에서는 수신된 심볼에서 심볼을 구성하는 각 비트에 대한 연판정 값을 계산하고^[10], 이 값을 반복적인

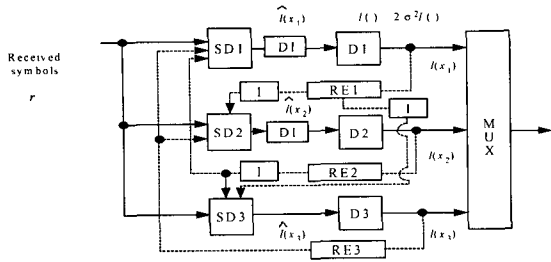


그림 5. 반복적인 다단계 복호
Fig. 5. Iterative multistage decoding.

다단계복호에 사용한다. 먼저 다중레벨 복호기의 SD1 단에서 식 (1)에 의해 c_1 의 연판정 출력(soft output)을 계산한다. 계산된 SD1의 연판정 출력은 역인터리버를 거쳐 레벨 1의 복호기인 D1의 입력으로 들어가서 복호 과정을 수행한다. 각 레벨의 복호 알고리즘으로는 MAP 복호 알고리즘이 사용된다. 레벨 1의 복호가 끝나면 복호된 출력이 RE1(re-encoder)에서 재부호화 된 후 인터리버를 거쳐 SD2단과 SD3단에 들어간다. SD2단에서는 입력으로 들어온 c_1 과 c_3 의 신뢰정보를 이용하여 c_2 의 연판정 출력이 식 (2)와 같이 계산되고, 이 값을 이용하여 D2에서 복호를 한다. SD3단에서는 D1과 D2로부터 받은 c_1 , c_2 의 신뢰정보를 이용하여 식 (3)에 의해 c_3 의 연판정 값을 계산하고 같은 방법으로 D3에서 복호를 수행한다. 이와 같이 세 레벨에서 복호가 모두 끝나면 각 레벨의 복호기 출력으로 나온 연판정 정보는 SD1단으로 귀환되어 위의 과정을 반복함으로써 반복적인 다단계 복호가 가능하다.

$$2\sigma^2 \mathcal{L}(c_1) \approx \min\{d_0^2, d_2^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_4^2 - L(c_3)2\sigma^2, d_6^2 - (L(c_2) + L(c_3))2\sigma^2\} - \min\{d_1^2, d_3^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_5^2 - L(c_3)2\sigma^2, d_7^2 - (L(c_2) + L(c_3))2\sigma^2\} \quad (1)$$

$$2\sigma^2 \mathcal{L}(c_2) \approx \min\{d_0^2, d_1^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_4^2 - L(c_3)2\sigma^2, d_6^2 - (L(c_1) + L(c_3))2\sigma^2\} - \min\{d_2^2, d_3^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_5^2 - L(c_3)2\sigma^2, d_7^2 - (L(c_1) + L(c_3))2\sigma^2\} \quad (2)$$

$$2\sigma^2 \mathcal{L}(c_3) \approx \min\{d_0^2, d_1^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_2^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_4^2 - (L(c_1) + L(c_2))2\sigma^2\} - \min\{d_3^2, d_5^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_6^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_7^2 - (L(c_1) + L(c_2))2\sigma^2\} \quad (3)$$

IV. 모의 실험 결과 및 고찰

CCC를 MCM에 적용한 구조의 성능을 AWGN 환경에서 분석하기 위하여 MCM의 구성부호로 사용되는 CC(convolutional code), PCCC, 그리고 SCCC에 대해 모의 실험을 하였다. 본 논문에서 사용한 모의 실험의 결과와 참고 문헌^[7]에 나타난 모의 실험의 결과를 비교하여 본 논문의 모의 실험 결과를 검증하기 위하여 <표 1>과 같은 모의실험 파라미터를 선택하였다. MCM의 프레임 길이는 6200비트이며 PCCC, SCCC의 프레임 길이는 1200비트이다.

표 1. 모의 실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

	Code rate	Component code			Number of memories
		CC	PCCC	SCCC	
Level 1	1/3	CC	PCCC	SCCC	4
Level 2	1/2	CC	CC	CC	6
Level 3	8/9	CC	CC	CC	6

논문에 사용된 SCCC, PCCC 구조는 MCM에 적용할 경우 높은 SNR에서 반복회수가 3회 이상이 되면 성능 향상이 거의 없다^[5]. 따라서 SCCC와 PCCC 내부의 반복회수에 따른 시간지연을 최소화하기 위하여 반복복호 회수를 3회로 제한하였다.

<그림 6~10>은 각각 레벨 1에 CC, PCCC, Ambroze의 SCCC, Benedetto의 SCCC를 MCM에 사용한 경우에 대한 성능을 나타낸 것이다. 레벨1에 CC를 사용한 경우는 4dB이상부터 반복복호 회수를 증가 시키더라도 BER이 더 이상 개선되지 않는 현상을 보인다. 이로 인해 5.5 dB부터는 반복복호를 2회 이상하여도 성능개선이 나타나지 않는다. 이를 통해 볼 때 다중레벨 부호에서 반복복호에 따른 이득을 얻기 위해서는 레벨 1에 CC보다 더 우수한 부호를 사용하여야 할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

<그림 7>의 PCCC를 사용한 경우와 <그림 8>에서와 같이 Ambroze의 SCCC를 사용한 경우는 둘 다 4dB부터 반복복호에 따른 성능향상이 나타나지 않는 현상을 보인다. 이러한 현상은 PCCC와 Ambroze의 SCCC가 가지는 특성 때문으로 사료된다. PCCC는 높은 신호대 잡음비 영역에서 성능이 포화되는 오류마루현상을 가지고,

Ambroze의 SCCC 또한 내부 인터리버의 크기가 PCCC와 동일할 뿐만 아니라 높은 신호대 잡음비 영역에서 오류마루현상을 보인다고 알려져 있기 때문이다^[11].

<그림 9>에 나타낸 Benedetto의 SCCC를 사용한 경우는 <그림 8>의 Ambroze의 SCCC를 사용한 경우와는 달리 반복복호를 8회 하는 동안 성능이 포화되는 현상을 보이지 않는다. 그로 인해 약 4.1dB에서 반복복호 8회시 10^{-7} 의 BER을 얻을 수 있다. 이러한 성능의 향상이 생기는 이유는 Benedetto의 SCCC 내부의 인터리버 크기가 PCCC나 Ambroze의 SCCC에 사용된 것의 2배이므로 향상된 인터리빙 이득에 의해 반복복호를 수행하면서 지속적인 성능향상을 보이기 때문으로 사료된다.

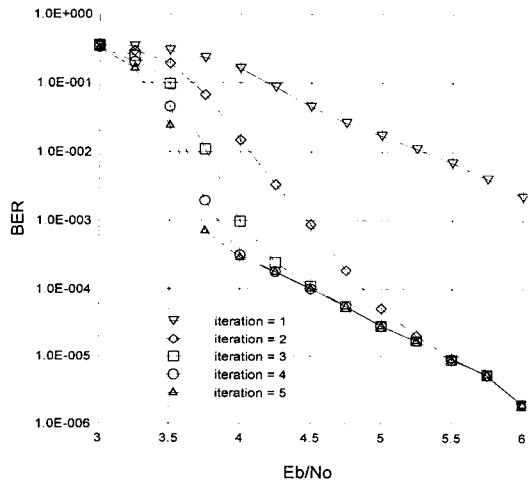


그림 6. 레벨 1에 CC를 사용한 MCM의 성능
Fig. 6. Performance of MCM with CC at level 1.

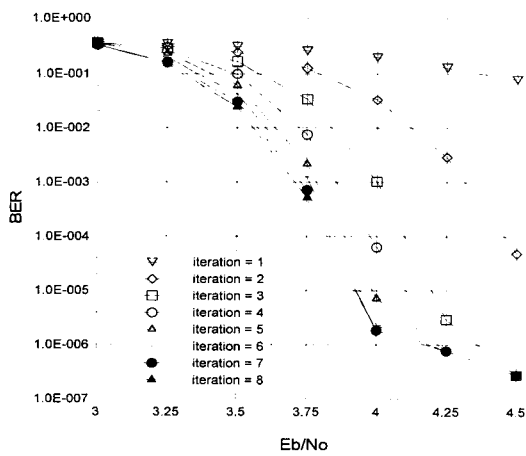


그림 7. 레벨 1에 PCCC를 사용한 MCM의 성능
Fig. 7. Performance of MCM with PCCC at level 1.

<그림 10>은 앞에서 보인 PCCC와 Ambroze, Benedetto의 SCCC를 사용한 MCM의 성능을 반복복호 8회를 기준으로 비교한 것이다. PCCC와 Ambroze의 SCCC를 사용한 경우는 성능이 거의 비슷하게 나타난다. 그러나 Benedetto의 SCCC를 사용한 경우는 약 4.1dB 이후에 PCCC와 Ambroze의 SCCC를 사용한 것의 성능을 능가하여 성능이 더욱 향상됨을 보여준다. 반복복호 8회시 10^{-6} 의 BER을 기준으로 PCCC를 사용한 것은 약 4.21dB가 요구되고 Ambroze의 SCCC를 사용한 것은 약 4.26dB가 요구되지만 Benedetto의 SCCC를 사

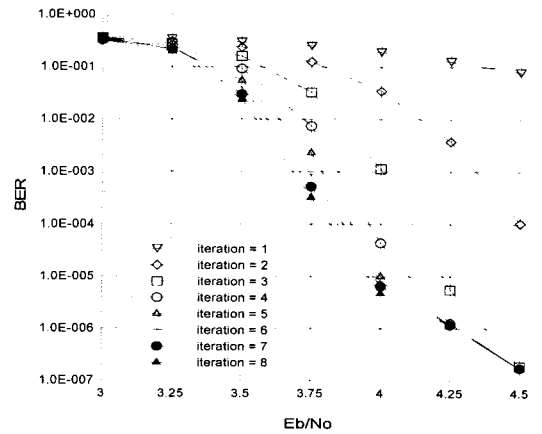


그림 8. 레벨 1에 Ambroze의 SCCC를 사용한 MCM의 성능
Fig. 8. Performance of MCM with Ambroze's SCCC at level 1.

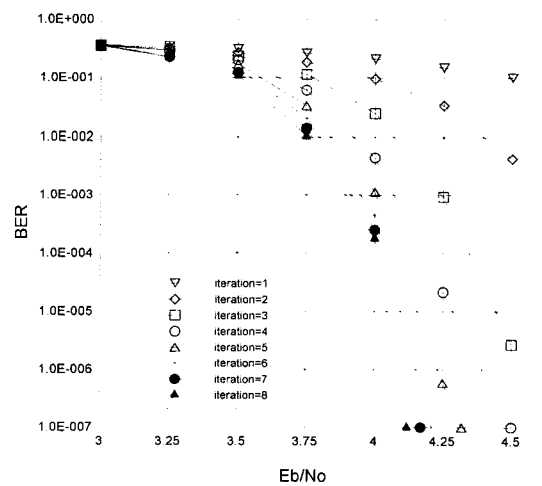


그림 9. 레벨 1에 Benedetto의 SCCC를 사용한 MCM의 성능
Fig. 9. Performance of MCM with Benedetto's SCCC at level 1.

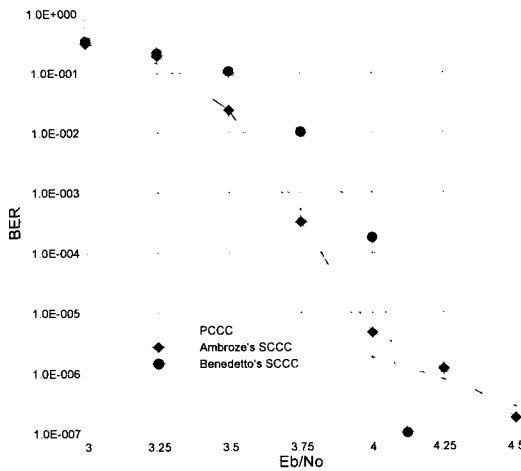


그림 10. 반복복호 8회시의 성능비교
Fig. 10. Performance comparison at the 8th iteration.

용한 것은 약 4.11dB가 요구된다. 그리고 이러한 성능향상은 그림에서 볼 때 BER이 10^{-7} 이하로 내려갈수록 그 성능차가 더욱 벌어질 것으로 예상된다.

이와 같은 모의 실험을 통한 성능비교결과 다중레벨 부호의 반복복호 특성을 얻기 위해서는 길쌈부호보다 우수한 성능을 가지는 PCCC나 SCCC를 다중레벨부호의 레벨 1에 사용하여야 하며 PCCC와 SCCC의 성능특성이 다중레벨부호의 전체 성능에까지 영향을 준다는 것을 확인하였다. 따라서 반복복호에 의해 낮은 BER을 얻기 위해서는 반복복호를 함에 따라 지속적인 성능향상을 보이는 Benedetto의 SCCC를 레벨 1에 사용하는 것이 적합하리라 사료된다.

V. 결 론

본 논문에서는 MCM의 성능을 향상시키기 위하여 SCCC를 MCM의 레벨 1에 적용하는 것을 제안하고 두 가지 형태의 SCCC를 사용해 그 성능을 PCCC와 길쌈부호를 사용한 것과 비교 분석하였다.

MCM의 구성부호의 레벨 1에 PCCC나 SCCC를 사용한 구조가 기존의 길쌈부호를 사용한 것보다 그 성능이 더 우수함을 알 수 있었다. 그리고 Ambroze의 SCCC를 사용한 MCM은 그 성능이 PCCC를 사용한 경우와 비슷하며 두 경우 모두 4.25dB이상에서는 반복회수가 4회 이상이 되면 성능향상이 포화되는 현상을 보였다. 그러나 레벨 1에 Benedetto의 SCCC를 사용한 경우는 PCCC나 Ambroze의 SCCC를 사용한 MCM과 달리 높

은 신호대 잡음비 영역에서 반복회수가 증가하더라도 성능향상이 포화되지 않고 반복복호를 함에 따라 지속적으로 성능이 향상되었다.

따라서 본 논문에서 제안한 MCM에 SCCC를 적용하는 방안은 Benedetto의 SCCC를 사용하는 것이 적절하며, 이는 길쌈부호의 약한 오류정정능력을 보완하여 줄 뿐만 아니라 MCM의 대역폭 효율성도 얻을 수 있으므로 제한된 대역폭에서 낮은 비트오율의 고품질을 요구하는 통신시스템에 응용 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

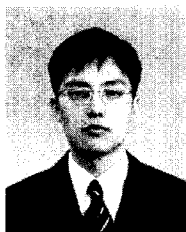
- [1] S. Benedetto, G. Montorsi, D. Divsalar, and F. Pollara, "Serial Concatenation of interleaved codes: Performance analysis, design and iterative decoding," JPL TDA Progress Report, vol. 42, pp. 1-26, Aug. 1996.
- [2] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Serial concatenated trellis coded modulation with iterative decoding: design and performance," Proc. IEEE GLOBECOM'97, Ulm, Germany, pp. 38-43, 1997.
- [3] G. Ungerboeck, "Channel coding with multilevel/phase signals," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 28 pp. 55-67, Jan. 1982.
- [4] H. Imai and S. Hirakawa, "A new multilevel code method using error correcting codes," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-23, pp. 371-377, May 1977.
- [5] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes," IEEE Trans. Commun., vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, Oct. 1996.
- [6] P. Robertson and T. Woerz, "A novel bandwidth efficient coding scheme employing turbo codes," Proc. ICC'96, Dallas, Texas, vol. 2, pp. 962-967, June 1996.
- [7] K. Fazel, L. Papke, "Combined Multilevel Turbo code with 8PSK Modulation," Proc., IEEE GLOBECOM'95, vol. 1, pp. 649-653, Nov. 1995.
- [8] A. Ambroze, G. Wade, and M. Tomlinson, "Iterative MAP decoding for serial concatenated

- convolutional codes," IEE Proc. Commun., vol. 145, no. 2, pp. 53-59, Apr. 1998.
- [9] G. Ungerboeck, "Trellis coded modulation with redundant signal sets, Part Benedetto: State of art," IEEE Commun. Mag., vol. 25, pp. 12-21, Feb. 1987.
- [10] T. Woerz and J. Hagenauer, "Iterative decoding for multilevel codes using reliability information," Proc. IEEE GLOBECOM'92, Orlando, Florida, pp. 1779-1784, 1992.
- [11] Sang Jae Bae, Ho Soon Lee, Dong Won Lee, and Eon Kyeong Joo, "Performance Comparison and Analysis of Serial Concatenated Convolutional Codes," Proc. ICT 2001, Bucuresti, Romania, vol. 2, pp. 185-188, Jun. 2001.

 저 자 소 개

李 相 勳(學生會員) 第39卷 TC編 第11號 參照

朱 彥 熨(宗臣會員) 第39卷 TC編 第11號 參照



呂 靈 東(正會員)

1993년~2000년 : 경북대 전자전기공학부 학사. 2000년~2002년 : 경북대 대학원 전자공학과 석사. 2002년~현재 : 한국과학기술정보연구원 연구원. <주관심분야 : 채널코딩, 변복조, 블루투스>