

論文2002-39TC-11-2

## 직렬연접 다중레벨 부호변조

## (Serially Concatenated Multilevel Coded Modulation)

裴商宰\*, 李相勳\*, 朱彦旻\*\*

—(Sang Jae Bae, Sang Hoon Lee, and Eon Kyeong Joo)—

## 요약

본 논문에서는 다중레벨 부호변조를 내부구성부호로 사용하고 길쌈부호를 외부구성부호로 사용하는 직렬연접 다중레벨 부호변조가 제안된다. 그리고 제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 세 가지 복호방안에 대한 성능이 비교 및 분석된다. 모의실험 결과 제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조에서 반복복호 횟수의 증가에 따라 그 성능을 향상시키기 위해서는 내부구성부호와 외부구성부호사이의 반복복호가 수행되어야 한다. 그리고 본 논문에서 제시된 세 가지 방안 중에서 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호와 내부구성부호와 외부구성부호사이의 반복복호를 모두 수행하는 Scheme 3의 오류성능이 가장 우수하였다. 또한 Scheme 3과 다른 방안들과의 성능차이는 신호 대 잡음비가 증가할수록 더욱 증가하였다. 그러므로 직렬연접 다중레벨 부호변조의 복호방안으로는 Scheme 3이 적합하리라 사료된다.

## Abstract

Serially concatenated multilevel coded modulation (SCMCM) is proposed in this paper. It is a combined scheme of the outer convolutional code and inner multilevel coded modulation (MCM) which is bandwidth-efficient coded modulation. And the performance of three schemes for decoding of the proposed SCMCM is compared and analyzed. As results of simulations, global iterative decoding with inner and outer code should be performed to improve the error performance as the number of iterations is increased. And the scheme which uses both local iterative multistage decoding in MCM and global iterative decoding with inner and outer code, called Scheme 3 in this paper, shows the best error performance among the three schemes considered in this paper. In addition, performance difference between this scheme and the others is increased as the signal to noise ratio (SNR) is increased. Therefore, Scheme 3 is considered to be the proper decoding scheme of SCMCM.

**Keywords** : SCMCM, MCM, bandwidth-efficient coded modulation, global iterative decoding, local iterative multistage decoding.

\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic and Electrical Engineering,  
Kyungpook National University)

\*\* 平生會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronic and Electrical Engineering,  
Kyungpook National University)

接受日字:2002年4月19日, 수정완료일:2002年10月21日

## I. 서론

Benedetto 등에 의해 제안된 직렬연접 길쌈부호(serial concatenated convolutional code; SCCC)는 높은 신호 대 잡음비 영역에서 병렬연접 길쌈부호(parallel concatenated convolutional code; PCCC)보다 성능이 더 우

수하며 오류마루(error floor)가 발생하지 않는다<sup>[1]</sup>. 직렬연접 길쌈부호의 부호기는 내부구성부호(inner code)와 외부구성부호(outer code)가 인터리버를 사이에 두고 직렬로 연결된 형태로 구성되며, 복호기는 각 구성부호기에 대응되는 MAP(maximum a posteriori)<sup>[1-3]</sup> 복호기가 순환적으로 연결된 형태로 구성된다. 그러므로 복호시 반복복호를 통하여 매우 높은 부호화 이득을 얻을 수 있다. 최근에는 이러한 직렬연접 길쌈부호의 높은 부호화 이득과 함께 대역폭을 효율적으로 사용하기 위하여 직렬연접 길쌈부호와 대역폭 효율적인 부호변조기법을 결합하는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다<sup>[3]</sup>.

대역폭 효율적인 부호변조기법으로는 Ungerboeck이 제안한 격자형 부호변조(trellis coded modulation; TCM)<sup>[4]</sup>와 Imai가 제안한 다중레벨 부호변조(multilevel coded modulation; MCM)<sup>[5]</sup>가 있다. 일반적으로 격자형 부호변조는 길쌈부호를 사용하여 부호기를 구성하며, 최우복호(maximum likelihood decoding)를 이용하여 심벌을 복호한다<sup>[4]</sup>. 그러나 다중레벨 부호변조는 격자형 부호변조와는 달리 각 레벨의 구성부호로 블록부호나 길쌈부호 또는 연접부호 등과 같이 다양한 부호를 사용할 수 있으며, 각 레벨에 서로 다른 부호율의 부호를 적용할 수 있다. 따라서 다중레벨 부호변조는 여러 가지 채널환경에 대하여 격자형 부호변조보다 유연성이 높으며<sup>[6-11]</sup>, 성능이 약간 더 우수한 것으로 알려져 있다<sup>[6]</sup>. 그리고 다중레벨 부호변조의 복호방안인 다단계복호(multistage decoding)에서 연관정을 이용할 경우 반복복호가 가능하다<sup>[6 & 12]</sup>.

현재까지 직렬연접 길쌈부호와 대역폭 효율적인 부호변조기법을 결합한 방안으로는 격자형 부호변조를 사용한 직렬연접 격자형 부호변조(serially concatenated trellis coded modulation; SCTCM)<sup>[3]</sup>가 있다. 직렬연접 격자형 부호변조는 외부구성부호로 길쌈부호를 사용하고 내부구성부호로 격자형 부호변조를 사용한 것이다. 그러나 아직까지 다중레벨 부호변조를 직렬연접 길쌈부호의 내부구성부호로 사용한 구조에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 다중레벨 부호변조를 내부구성부호로 사용하고 길쌈부호를 외부구성부호로 사용하는 직렬연접 다중레벨 부호변조(serially concatenated multilevel coded modulation; SCMCM)를 제안한다. 또한 제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조에 대한 여러 가지 복호방안을 제시하고 그 성능을 모의실험을 통하여 비교 및 분석한다. 그리고 분석된 결과를

통하여 직렬연접 다중레벨 부호변조의 성능을 최대화할 수 있는 복호방안을 제시한다.

## II. 직렬연접 길쌈부호와 다중레벨 부호변조

### 1. 직렬연접 길쌈부호

직렬연접 길쌈부호의 부호기와 복호기 구조는 <그림 1>과 같다. 그림에서  $u$ 와  $c$ 는 각 구성부호의 정보비트와 출력비트를 나타낸다. 그리고  $\pi$ 와  $\pi^{-1}$ 은 인터리버와 역인터리버를 나타내며, 위 첨자  $i$ 와  $o$ 는 내부구성부호와 외부구성부호를 의미한다. 그리고  $L$ 은 신뢰도(log likelihood ratio; LLR)값을 나타내며,  $I$ 와  $O$ 는 각 구성부호기의 입력과 출력관계를 나타낸다.

<그림 1(a)>에서 보는 바와 같이 외부구성부호의 정보비트와 패리티비트가 인터리버를 거쳐 내부구성부호로 입력된다. 그리고 내부구성부호의 출력비트는 채널환경에 적합한 변조방식으로 변조되어 채널로 전송된다.

직렬연접 길쌈부호의 복호기는 각 구성부호에 대응되는 연관정 출력이 가능한 MAP 복호기가 순환적으로 연결된 형태로 구성되므로 복호시 반복복호가 가능하다. 복호기의 복호 과정은 다음과 같다. 먼저 내부복호기(inner MAP decoder)에서 내부구성부호의 정보비트에 대한 부가정보(extrinsic information;  $L_e(u^i; O)$ )를 계산하여 외부복호기(outer MAP decoder)의 사전정보(a priori information;  $L(c^o; I)$ )로 전달한다. 외부복호기에서는 내부복호기로부터 전달받은 사전정보를 이용하여 외부구성부호의 정보비트에 대한 LLR값( $L(u^o; O)$ )을

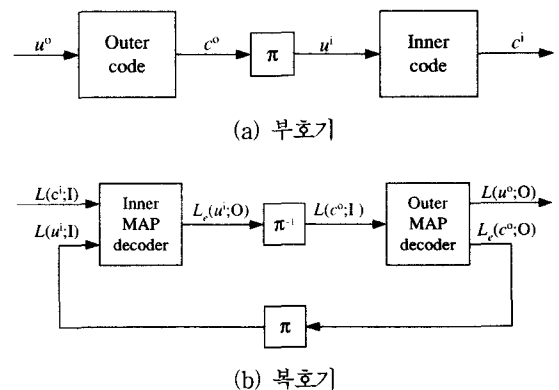


그림 1. 직렬연접 길쌈부호 (a) 부호기 (b) 복호기  
Fig. 1. Serial concatenated convolutional code. (a) Encoder (b) Decoder

계산한다. 그리고 반복복호를 위하여 외부구성부호의 정보비트뿐만 아니라 패리티비트에 대한 부가정보 ( $L(c^0; 0)$ )를 계산하여 내부복호기의 사전정보 ( $L(u^i; 1)$ )로 전달한다. 각 구성복호기의 LLR값은 매번 반복복호를 통하여 갱신되며, 반복복호가 끝나면 외부복호기의 정보비트에 대한 LLR값 ( $L(u^0; 0)$ )을 정판정하여 출력한다.

2. 다중레벨 부호변조

직렬연접 길쌈부호의 내부구성부호로는 블록부호나 길쌈부호, 또는 부호변조 등 여러 가지 부호가 사용될 수 있다. 이러한 여러 가지 부호 중 본 논문에서는 직렬연접 길쌈부호의 우수한 오류성능과 함께 대역폭 사용의 효율성을 동시에 얻기 위하여 다중레벨 부호변조를 직렬연접 길쌈부호의 내부구성부호로 그대로 사용하고 자 한다. 다중레벨 부호변조에서는 채널환경에 적합한 각 구성부호와 변조방법을 선택할 수 있으므로 부호화 이득과 대역폭 사용의 효율성을 동시에 얻을 수 있다. 이러한 다중레벨 부호변조의 부호기는 <그림 2>와 같다. 그림에서  $u$ 와  $c$ 는 정보비트와 출력비트를 나타내며, 아래첨자 1, ...,  $m$ 은 각 레벨을 의미한다. 그리고  $\pi$ 는 인터리버를 나타내며,  $y$ 는 신호사상기(signal mapper)에서 사상된 전송심벌을 나타낸다. 부호기의 부호화과정은 다음과 같다. 먼저 정보비트( $u$ )는 역다중화기(demultiplexer; DEMUX)에서  $m$ -레벨( $u_1, \dots, u_m$ )로 역다중화되어 각 레벨의 구성부호기(Encoder-1, ..., Encoder- $m$ )로 입력된다. 이 때 각 레벨의 구성부호기로는 길쌈부호나 블록부호 또는 연접부호 등이 사용될 수 있다. 인터리버는 다중레벨 부호변조의 다단계복호(multistage decoding)에서 발생하는 오류전파(error propagation) 문제점을 감소시키기 위하여 사용된다. 각 레벨의 출력비트( $c_1, \dots, c_m$ )는 채널환경에 따라 PSK나 QAM 등과 같은 다양한 변조기법에 적합한 집합분할법으로 사상되어 채널로 전송된다.

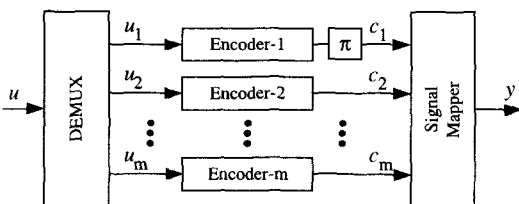


그림 2. 다중레벨 부호변조  
Fig. 2. Multilevel coded modulation.

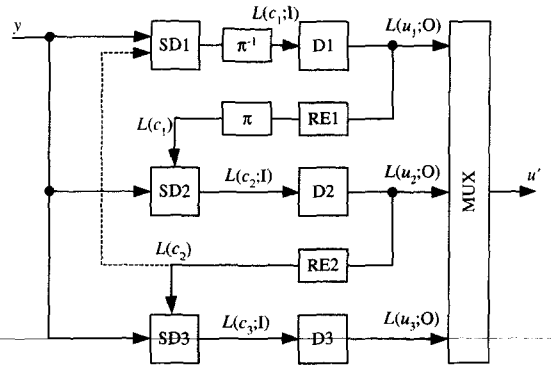


그림 3. 반복적 다단계복호  
Fig. 3. Iterative multistage decoding.

다중레벨 부호변조의 복호방법으로는 최우복호<sup>[4]</sup>보다 간단한 다단계복호<sup>[5]</sup>가 주로 이용된다. 그리고 다단계복호에서 연관정을 이용할 경우 복호기에서 반복적 다단계복호가 가능하다<sup>[6-8, 12]</sup>. 다중레벨 부호변조에서 레벨의 수( $m$ )가 3인 경우, 즉 8-PSK 시스템의 반복적 다단계복호 구조는 <그림 3>과 같다.

그림에서  $y$ 와  $u'$ 는 수신된 심벌과 복호기의 출력을 나타낸다. 그리고 SD1과 SD2 및 SD3는 수신심벌  $y$ 에서  $c_1$ 과  $c_2$  및  $c_3$ 의 연관정 값을 계산하는 연관정 검출기(soft detector; SD)를 나타낸다. 또한 D1과 D2 및 D3는 구성부호기에 대응되는 구성복호기를 나타내며, RE1과 RE2는 구성복호기에서 복호된 정보를 재부호화하는 재부호기(re-encoder)를 나타낸다. 그리고 점선은 반복적 다단계복호를 위하여 제한되는 정보를 나타낸다.

복호기의 반복적 다단계복호 과정은 다음과 같다. 먼저 각 레벨의 연관정 검출기에서 부호어  $c_1$ 과  $c_2$  및  $c_3$ 에 대한 신뢰정보(reliability information)를 다음과 같이 LLR(L)값을 이용하여 계산한다<sup>[7, 8, 13]</sup>.

$$L(c_i|y) = L(c_i; 1) = \ln \left[ \frac{P(c_i = 1|y)}{P(c_i = 0|y)} \right]$$

for  $i = 1, 2, 3.$  (1)

여기서 아래첨자  $i$ 는 각 레벨을 나타내며  $1$ 은 연관정 검출기의 입력을 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 각 레벨에 대한 연관정 검출기의 출력값을 구하면 다음과 같다<sup>[7, 8, 13]</sup>

$$2\sigma^2 L(c_i|y) = 2\sigma^2 L(c_i; 1) \approx \min\{d_0^2, d_2^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_4^2, d_6^2 - L(c_2)2\sigma^2\} - \min\{d_1^2, d_3^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_5^2, d_7^2 - L(c_2)2\sigma^2\}$$

(2)

$$2\sigma^2 L(c_2|y) = 2\sigma^2 L(c_2; I) \approx \min\{d_0^2, d_1^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_4^2, d_5^2 - L(c_1)2\sigma^2\} - \min\{d_2^2, d_3^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_6^2, d_7^2 - L(c_1)2\sigma^2\} \quad (3)$$

$$2\sigma^2 L(c_3|y) = 2\sigma^2 L(c_3; I) \approx \min\{d_0^2, d_1^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_2^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_3^2 - (L(c_1)2\sigma^2 + L(c_2)2\sigma^2)\} - \min\{d_4^2, d_5^2 - L(c_1)2\sigma^2, d_6^2 - L(c_2)2\sigma^2, d_7^2 - (L(c_1)2\sigma^2 + L(c_2)2\sigma^2)\} \quad (4)$$

여기서  $\sigma^2$ 은 잡음의 분산을 나타내고,  $d_0 \sim d_7$ 은 수신된 심벌  $y$ 와 사상된 심벌들 사이의 유클리드 거리를 나타낸다. Ungerboeck의 8-PSK 집합분할법<sup>[4, 14]</sup>으로 사상한 경우,  $d_0 \sim d_7$ 는 <그림 4>와 같다.

식 (2)를 이용하여 구한 SD1의 출력은 역인터리버를 거쳐서 레벨 1의 복호기인 D1으로 입력된다. D1에서  $u_1$ 에 대한 복호가 끝나면 그 출력값은 다음 단계인 레벨 2의 복호를 위하여 RE1과 인터리버를 거쳐서 SD2로 전달된다. SD2에서는 수신된 심벌과 레벨 1로부터 받은  $c_1$ 의 신뢰정보  $L(c_1)$  및 식 (3)을 이용하여  $c_2$ 의 LLR값을 계산하고 그 값을 D2로 전달한다. D2에서는 SD2로부터 받은  $c_2$ 의 LLR값을 이용하여 레벨 2의 정보어  $u_2$ 를 복호한다. 그리고 D2의 출력값은 RE2를 거쳐서 반복적 다단계복호를 위하여 SD1으로 케한됨과 동시에 다음 단계인 레벨 3의 복호를 위하여 SD3로도 전달된다. SD3에서는 수신된 심벌과  $c_1$ 과  $c_2$ 의 신뢰정보  $L(c_1)$ 과  $L(c_2)$  및 식 (4)를 이용하여  $c_3$ 의 LLR값을 계산

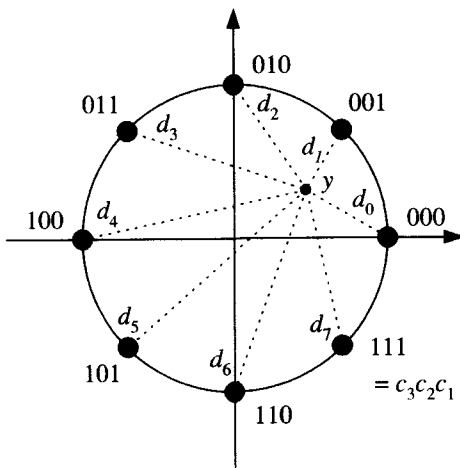


그림 4. 8-PSK 시스템에서 각 레벨의 연관정 검출  
Fig. 4. Soft detection of each level at 8-PSK system.

하고 그 값을 D3으로 전달한다. D3에서는 SD3으로부터 받은  $c_3$ 의 LLR값을 이용하여 레벨 3의 정보어  $u_3$ 를 복호한다. 이러한 복호 과정을 통하여 반복적 다단계복호가 수행된다.

### III. 직렬연접 다중레벨 부호변조와 복호방안

본 논문에서는 기존의 다중레벨 부호변조의 변조방법이나 각 레벨의 구성부호를 변형시키지 않으면서 성능을 향상시키기 위하여 기존의 다중레벨 부호변조를 직렬연접 길쌈부호의 내부구성부호로 그대로 사용하는 직렬연접 다중레벨 부호변조가 제안된다. 직렬연접 다중레벨 부호변조의 부호기는 <그림 5>와 같다. 그림에서 위첨자  $i$ 와  $o$ 는 내부구성부호와 외부구성부호를 나타내며, 아래첨자  $1, \dots, m$ 은 각 레벨을 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 직렬연접 다중레벨 부호변조는 내부구성부호로 기존의 다중레벨 부호변조를 그대로 사용하고 외부구성부호로 길쌈부호를 사용한다. 그러므로 제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 대역폭 효율은 외부구성부호로 인하여 기존의 다중레벨 부호변조보다 조금 떨어진다. 그러나 이와 같이 구성함으로써 직렬연접 길쌈부호의 높은 부호화 이득과 다중레벨 부호변조의 효율적인 대역폭 사용 효과를 모두 얻을 수 있다. 직렬연접 다중레벨 부호변조의 부호화 과정은 다음과 같다. 먼저 정보비트( $u^o$ )가 외부길쌈부호에서 부호화된 후 인터리버를 거쳐 역다중화기에 입력된다. 역다중화기는 내부정보비트( $u^i$ )를  $m$  레벨( $u_1^i, \dots, u_m^i$ )로 역다중화하여 다중레벨 부호변조의 각 구성부호기로 전달한다. 그리고 각 레벨의 출력비트( $c_1^i, \dots, c_m^i$ )는 채널 환경에 따라 PSK나 QAM 등과 같은 다양한 변조기법에 적합한 집합분할법으로 사상되어 채널로 전송된다.

직렬연접 다중레벨 부호변조의 복호방법으로는 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호와 내·외부구성부호사이의 반복복호가 사용된다. 레벨 수가 3인 경

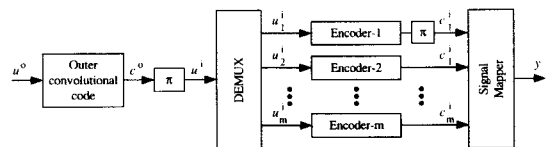


그림 5. 직렬연접 다중레벨 부호변조  
Fig. 5. Serially concatenated multilevel coded modulation.

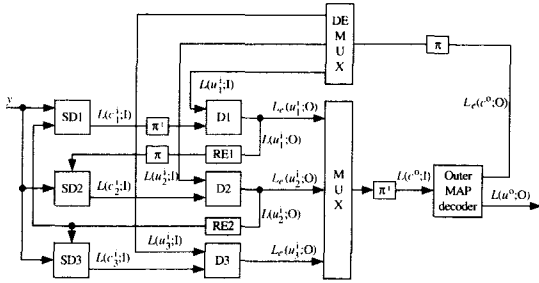


그림 6. 직렬연접 다중레벨 부호변조의 반복복호  
Fig. 6. The iterative decoding scheme of the proposed SCMCM .

우, 즉 8-PSK 직렬연접 다중레벨 부호변조의 반복복호 구조는 <그림 6>과 같다.

그림에서  $y$ 는 수신된 심벌을 나타내며,  $L$ 은 LLR값을 나타낸다. 그리고  $I$ 와  $O$ 는 복호기의 입력과 출력관계를 나타낸다. 제시된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 반복복호 과정은 다음과 같다. 먼저 내부구성부호인 다중레벨 부호변조의 복호 과정은 앞에서 살펴본 반복적 다단계복호 과정과 비슷하다. 그러나 내부구성부호와 외부구성부호사이의 반복복호를 위하여 내부구성복호기의 각 레벨에서 정보어에 대한 LLR값뿐만 아니라 부가정보 ( $L_e(u_k^i; O)$ )도 계산되어야 한다. 내부구성복호기의 각 레벨에서 계산되는 부가정보는 다음과 같다.

$$L_e(u_k^i; O) = L(u_k^i; O) - L(u_k^i; I), \quad (k=1, 2, 3) \quad (7)$$

여기서  $L(u_k^i; I)$ 는 외부구성복호기로 전달받은 사전정보를 나타낸다. 식 (7)에서 계산된 부가정보는 다중화기와 역인터리버를 거쳐 외부구성복호기의 사전정보로 입력된다. 그리고 외부구성복호기에서는 내부구성복호기로부터 전달받은 사전정보를 이용하여 외부구성부호의 정보어에 대한 LLR값을 계산한다. 그리고 반복복호를 위하여 외부구성부호의 부호어에 대한 부가정보를 계산한다. 외부구성복호기에서 계산되는 부가정보는 다음과 같다.

$$L_e(c^o; O) = L(c^o; O) - L(c^o; I) \quad (8)$$

여기서  $L(c^o; I)$ 는 내부구성복호기로부터 전달받은 사전정보를 나타낸다. 식 (8)에서 계산된 부가정보는 인터리버와 역다중화기를 거쳐 내부구성복호기의 사전정보로 전달된다. 이러한 과정을 통하여 내부 다중레벨 부호

변조의 반복적 다단계복호와 내·외부구성부호사이의 반복복호가 수행된다.

본 논문에서 제시된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호(local iterative decoding)와 내·외부구성부호사이의 반복복호(global iterative decoding)가 독립적으로 수행될 수 있다. 즉, 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 수행하면서 내·외부구성부호사이의 반복복호를 수행하지 않거나 내·외부구성부호사이의 반복복호를 수행하면서 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 수행하지 않을 수 있다. 또한 내·외부구성부호사이의 반복복호와 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 모두 수행할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호와 내·외부구성부호사이의 반복복호에서 제한되는 각 신뢰정보의 유·무에 따라 직렬연접 다중레벨 부호변조의 복호방안으로 다음과 같은 세 가지 방안이 제시된다.

Scheme 1은 내·외부구성부호사이의 반복복호를 수행하지 않고 내부 다중레벨 부호변조에서만 반복적 다단계복호를 수행하는 것이다. 즉, <그림 6>의 반복복호 구조에서 외부구성부호에서 내부구성부호로 제한되는 신뢰정보 없이 복호과정을 수행하는 것이다. 그러므로 이 방안은 기존의 다중레벨 부호변조 자체의 반복적 다단계복호한 결과를 외부복호기에서 한번 더 복호하는 것이다. 그리고 Scheme 2는 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 수행하지 않고 내·외부구성부호사이의 반복복호만 수행하는 것이다. 즉, <그림 6>의 반복복호 구조에서 내부구성복호기의 레벨 2에서 레벨 1로 제한되는 신뢰정보 없이 복호과정을 수행하는 것이다. 마지막으로 Scheme 3은 내·외부구성부호사이의 반복복호(global iteration)와 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호(local iteration)를 모두 수행하는 것이다. 즉, 이 방안에서는 내부구성복호기의 레벨 2에서 레벨 1로 제한되는 신뢰정보와 외부구성복호기에서 내부구성복호기로 제한되는 신뢰정보를 모두 이용하여 복호과정을 수행하는 것이다.

#### IV. 모의실험 결과 및 고찰

제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 성능을 분석하기 위하여 AWGN 채널환경에서 모의실험을 하였다. 모의실험에서 외부길쌈부호와 내부 다중레벨 부호변조

의 각 레벨에 사용된 구성부호는 메모리가 3개인 순환 체계적 길쌈부호(recursive systematic convolutional code; RSC code)이며 크기가 3072인 인터리버가 사용되었다. 그리고 외부구성부호의 부호율은 전체 부호율을 거의 감소시키지 않기 위하여 18/19로 하였으며, 내부 다중레벨 부호변조의 레벨 1과 레벨 2 및 레벨 3의 부호율은 각각 1/4과 3/4 및 8/9로 하였다<sup>16, 5-18)</sup>. 즉, 내부 구성부호인 기존의 다중레벨 부호변조의 대역폭 효율은 1.89 bps/Hz이며, 제안한 직렬연접 다중레벨 부호변조의 대역폭 효율은 1.79 bps/Hz이다. 또한 변조방법으로는 Ungerboeck의 8-PSK<sup>14, 16)</sup> 집합분할법을 사용하였으며, 외부 및 내부구성부호기로는 MAP 복호기<sup>11-13)</sup>를 사용하였다.

제시된 세 가지 복호방안의 성능을 비교하기 위한 참고자료로 직렬연접 다중레벨 부호변조의 내부구성부호로 사용되는 기존의 다중레벨 부호변조 자체의 반복적 다단계복호 성능을 <그림 7>에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 기존의 다중레벨 부호변조의 성능은  $E_b/N_0$ 가 5[dB] 이상이 되면 반복적 다단계 복호 횟수가 2회 이상이 되더라도 거의 향상되지 않음을 알 수 있다. 그리고  $E_b/N_0$ 가 약 6[dB]이고 반복적 다단계복호 횟수가 2회일 때  $10^{-5}$ 의 비트오율을 얻을 수 있다. Scheme 1, 즉 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호만 수행하고 내·외부구성부호간의 반복복호를 수행하지 않는 방안의 성능은 <그림 8>과 같다.

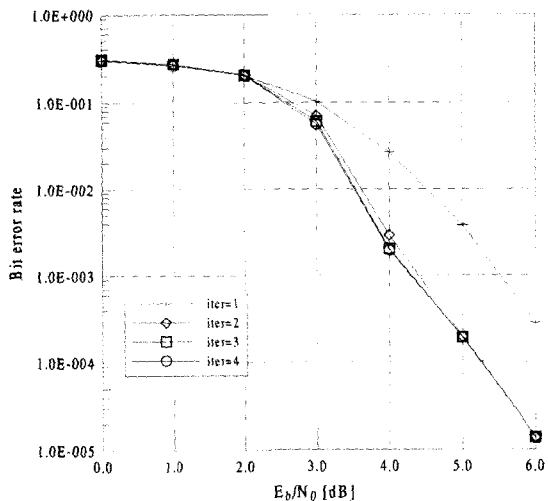


그림 7. 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호 성능  
Fig. 7. Performance of the iterative multistage decoding in MCM.

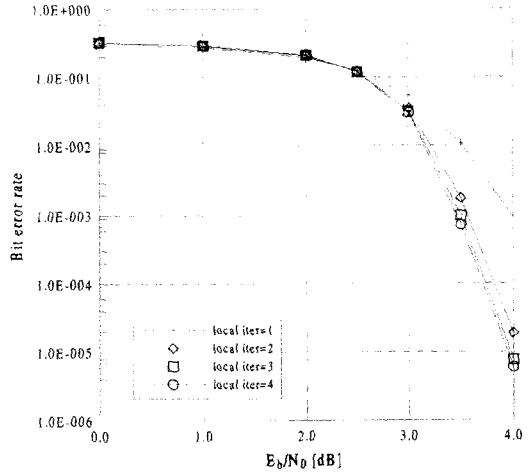


그림 8. Scheme 1의 성능  
Fig. 8. Performance of the Scheme 1.

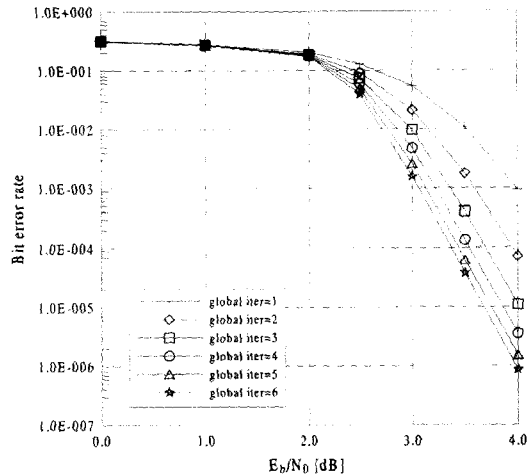


그림 9. Scheme 2의 성능  
Fig. 9. Performance of the Scheme 2.

그림에서 보는 바와 같이 Scheme 1의 성능은 다중레벨 부호변조의 성능처럼 반복적 다단계복호 횟수가 2회 이상이 되면 성능향상이 거의 없음을 알 수 있다. 또한  $E_b/N_0$ 가 약 3.9[dB]일 때 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호 4회에서  $10^{-5}$ 의 비트오율을 얻을 수 있다. 그러므로 Scheme 1의 성능이 다중레벨 부호변조 자체의 성능보다 약 2.1[dB] 정도 더 우수함을 알 수 있다. 또한 이러한 성능차이는 외부길쌈부호와 인터리버의 효과 때문이다<sup>11)</sup>.

내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 수행하지 않고 내·외부구성부호사이의 반복복호만 수행하는 Scheme 2의 성능은 <그림 9>와 같다.

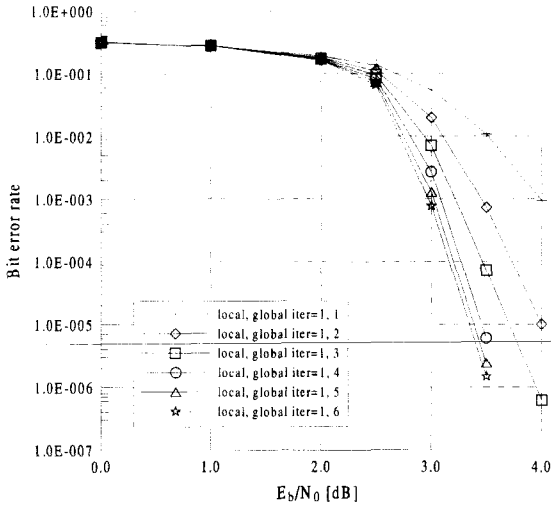


그림 10. Scheme 3의 성능  
Fig. 10. Performance of the Scheme 3.

그림에서 보는 바와 같이 내·외부구성부호사이의 반복복호 횟수가 증가함에 따라 그 성능이 계속 향상됨을 알 수 있다. 그리고 내·외부구성부호사이의 반복복호 횟수가 6회일 때 약 3.6[dB]의  $E_b/N_0$ 에서  $10^{-5}$ 의 비트오율을 얻을 수 있다. 따라서 비트오율이  $10^{-5}$ 인 경우 Scheme 2의 성능이 다중레벨 부호변조의 성능보다는 약 2.4[dB]정도 우수하며, Scheme 1의 성능보다는 약 0.3[dB] 정도 더 우수함을 알 수 있다.

다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호와 내·외부 구성부호간의 반복복호를 모두 수행하는 Scheme 3의 성능은 <그림 10>과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 Scheme 3의 성능은 Scheme 2의 성능처럼 내·외부구성부호간의 반복복호 횟수가 증가함에 따라 그 성능이 계속 향상됨을 알 수 있다. 그리고 반복복호 횟수가 6회일 때 약 3.3[dB]의  $E_b/N_0$ 에서  $10^{-5}$ 의 비트오율을 얻을 수 있다. 따라서 비트오율이  $10^{-5}$ 인 경우 Scheme 3의 성능이 Scheme 1의 성능보다는 약 0.6[dB] 정도 더 우수하며, Scheme 2의 성능보다는 약 0.3[dB] 정도 더 우수함을 알 수 있다. 그리고 이러한 성능의 차이는  $E_b/N_0$ 가 높아질수록 더욱 증가함을 알 수 있다.

세 가지 방안의 성능과 복잡성을 비교하기 위하여 내·외부 구성부호사이의 반복복호(global iteration)횟수와 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호(local iteration)횟수 및 그에 대한 각 성능을 <표 1>과 <그림 11>에 나타내었다.

표 1. 반복복호 횟수  
Table 1. The number of iteration.

	Number of local iterations	Number of global iterations
Scheme 1	4	0
Scheme 2	0	6
Scheme 3	1	6

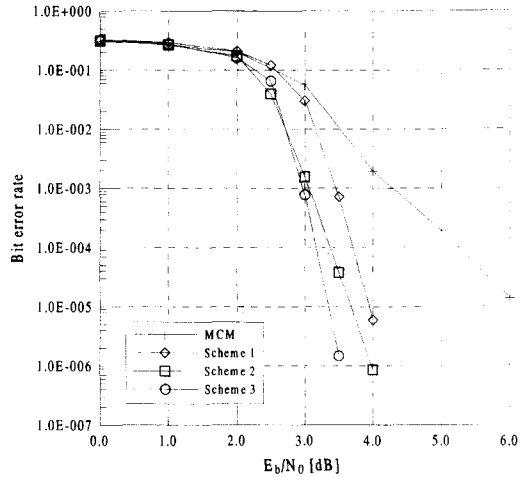


그림 11. 세 가지 방안의 성능  
Fig. 11. Performance of three Schemes.

<표 1>에서 보는 바와 같이 Scheme 1에서는 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호만 수행되므로 내부 다중레벨 부호변조의 레벨 1의 연판정 검출기에서 신뢰정보가 계속 갱신되어 복호과정이 수행된다. 그리고 Scheme 2에서는 내·외부 구성부호사이의 반복복호만 수행되므로 내부 다중레벨 부호변조의 모든 레벨의 구성복호기와 외부 구성복호기에서 신뢰정보가 갱신되어 복호과정이 수행된다. Scheme 3에서는 내부 반복적 다단계 반복복호와 내·외부 구성부호사이의 반복복호가 모두 수행되므로 내부 다중레벨 부호변조의 레벨 1의 연판정 검출기와 모든 레벨의 구성복호기 및 외부 구성복호기 모두에서 신뢰정보가 갱신되어 복호과정이 수행된다. 그러므로 세 가지 방안 중에서 Scheme 1의 계산량이 상대적으로 가장 적고 Scheme 3의 계산량이 상대적으로 가장 많을 것으로 예상된다. 그러나 <그림 11>에서 보는 바와 같이 내·외부구성부호간의 반복복호와 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 동시에 수행하는 Scheme 3의 성능이 가장 우수함을 알

수 있다. 또한 이러한 성능의 차이는  $E_b/N_0$ 가 높아질수록 더욱 증가함을 알 수 있다. 그러므로 제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 성능을 최대화 할 수 있는 복호방안으로는 Scheme 3이 가장 적합하리라 사료된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 직렬연접 길쌈부호의 높은 부호화 이득과 다중레벨 부호변조의 대역폭 효율성을 얻기 위하여 다중레벨 부호변조를 직렬연접 길쌈부호의 내부구성 부호로 사용한 직렬연접 다중레벨 부호변조를 제안하였다. 그리고 제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 여러 가지 복호방안에 대한 성능과 기존의 다중레벨 부호변조의 성능을 비교 및 분석하였다.

모의실험 결과 내·외부구성부호사이의 반복복호를 수행하지 않고 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호만 수행하는 Scheme 1의 성능은 다중레벨 부호변조 자체의 성능보다는 우수하지만 반복적 다단계복호 횟수가 2회 이상이 되면 성능 향상이 거의 일어나지 않았다. 그리고 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 수행하지 않고 내·외부구성부호사이의 반복복호만 수행하는 Scheme 2의 성능은 내·외부구성부호사이의 반복복호 횟수가 증가함에 따라 그 성능이 계속 향상되었으며, Scheme 1보다 더 우수한 성능을 보였다. 반면 내·외부구성부호사이의 반복복호와 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 모두 수행하는 Scheme 3의 성능은 Scheme 2의 성능처럼 내·외부구성부호사이의 반복복호 횟수가 증가함에 따라 그 성능이 계속 향상되었다. 또한 Scheme 3의 성능은 Scheme 1과 Scheme 2보다 더 우수하였으며,  $E_b/N_0$ 가 높아질수록 성능차이는 더욱 증가하였다.

그러므로 직렬연접 다중레벨 부호변조에서 반복복호 횟수의 증가에 따라 성능을 향상시키기 위해서는 Scheme 2와 Scheme 3에서처럼 내·외부구성부호간의 반복복호가 수행되어야 한다. 그리고 내·외부구성부호간의 반복복호와 내부 다중레벨 부호변조의 반복적 다단계복호를 동시에 수행하는 Scheme 3의 성능이 가장 우수하며,  $E_b/N_0$ 가 높아질수록 이러한 성능차이는 더욱 증가하였다. 따라서 제안된 직렬연접 다중레벨 부호변조의 성능을 최대화 할 수 있는 복호방안으로는 Scheme 3이 가장 적합하리라 사료된다.

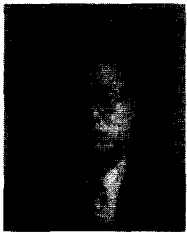
## 참 고 문 헌

- [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] A. Ambroze, G. Wade, and M. Tomlinson, "Iterative MAP decoding for serial concatenated convolutional codes," Proc. IEE Commun., vol. 145, no. 2, pp. 53~59, Apr. 1998.
- [3] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Serial concatenated trellis coded modulation with iterative decoding," Proc. IEEE ISIT'97, Ulm, Germany, pp. 8, June-July 1997.
- [4] G. Ungerboeck, "Trellis coded modulation with redundant signal sets, Part II: State of art," IEEE Commun. Mag., vol. 25, pp. 12~21, Feb. 1987.
- [5] H. Imai and S. Hirakawa, "A New Multilevel coding method using error-correcting codes," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 23, pp. 371~377, May 1977.
- [6] T. Woerz and J. Hagenauer, "Iterative decoding for multilevel codes using reliability information," Proc. IEEE GLOBECOM'92, Orlando, Florida, vol. 3, pp. 1779~1784, Dec. 1992.
- [7] K. Fazel and L. Papke, "Combined multilevel Turbo-code with 8PSK modulation," Proc. IEEE GLOBECOM'95, Singapore, vol. 1, pp. 649~653, Nov. 1995.
- [8] L. Papke and K. Fazel, "Combined multilevel Turbo-code with MR-modulation," Proc. IEEE ICC'95, Seattle, vol. 2, pp. 668~672, 1995.
- [9] P. Schramm, "Multilevel coding with independent decoding on levels for efficient communication on static and interleaved fading channels," Proc. IEEE PIMRC'97, Helsinki, Finland, vol. 3, pp. 1196~1200, Sep. 1997.
- [10] S. Sayegh, "A class of optimum block codes in signal space," IEEE Trans. Commun., vol. 34,



- pp. 1043~1045, Oct. 1986.
- [11] R. F. H. Fischer, J. B. Huber, and U. Wachsmann, "Multilevel coding: aspects from information theory," Proc. IEEE GLOBECOM'96, London, U. K., pp. 26~30, Nov. 1996.
- [12] J. Persson "Multilevel coding with the 8-PSK signal set," Proc. IEEE ISIT'95, Whistler, Canada, pp. 59, Sep. 1995.
- [13] S. T. Brink, J. Speidel, and R. H. Yan, "Iterative demapping for QPSK modulation," IEE Electron. Lett., vol. 34, no. 15, pp. 1459~1460, Jul. 1998.
- [14] G. Ungerboeck, "Channel coding with multilevel/phase signals," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 28, pp. 55~67, Jan. 1982.
- [15] Y. Yasuda, K. Kashiki, and Y. Hirata, "High-rate punctured convolutional codes for soft decision viterbi decoding," IEEE Trans. Commun., vol. 32, no. 3, Mar. 1984.
- [16] M. Penicard, A. Yongacoglu, and J. Chouinard, "Iterative decoding of rate adaptive multilevel coded modulation for mobile satellite communication," Proc. IEEE GLOBECOM'96, London, U. K., vol. 1, pp. 415~419, Nov. 1996.
- [17] U. Wachsmann and R. F. H. Fischer, "Multilevel codes theoretical concepts and practical design rules," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 45, no. 5, Jul. 1999.
- [18] J. F. Cheng, C. H. Chuang, and L. S. Lee, "Complexity-reduced multilevel coding with rate-compatible punctured convolutional codes," Proc. IEEE GLOBECOM'93, Houston, Texas, vol. 2, pp. 814~818, Nov.-Dec. 1993.

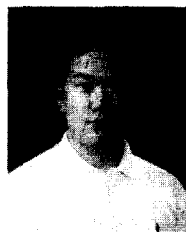
## 저 자 소 개



## 裴商宰(正會員)

1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1995년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(M.S.). 2002년 8월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(Ph.D.). <주 관심분야 : 터보부호, 다중레벨 부호

변조, 이동통신, WCDMA.>



## 李相勳(正會員)

1999년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2001년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(M.S.). 2001년 2월~현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정.

<주 관심분야 : Coded Modulation,

WCDMA, DAB.>



## 朱彦煥(正會員)

1976년 : 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사). 1984년 : 미국 Ohio State University 전기공학과 졸업(M.S.). 1987년 : 미국 Ohio State University 전기공학과 졸업(Ph.D.). 1976년~1979년 : 해군통신

전자 기술장교 1979년~1982년 : 한국과학기술원 연구원. 1987년~현재 : 경북대학교 공과대학 전자전기공학부 재직(교수). <주 관심분야 : Digital Communication Systems, Coding and Decoding, Modulation and Demodulation, Digital Signal Processing for Communications.>