

격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템

이상¹ · 강석근^{2*}

A Trellis-Coded 3-Dimensional OFDM System

Shuang Li¹ · Seog Geun Kang^{2*}¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 52828, Korea²Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 52828, Korea

요 약

본 논문에서는 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템을 제시하고 성능을 분석한다. 여기서는 격자 부호화를 위한 3차원 신호성상도에 대한 집합분할 기법도 제시한다. 부호율이 $R = 1/3$ 과 $2/3$ 인 회귀 체계적 컨볼루션 부호화 3차원 8진 성상도를 이용하여 격자 부호화된 제안된 시스템은 부호화되지 않은 직교 주파수분할다중화 시스템에 비하여 최대 7.8 dB까지 오류성능이 향상될 수 있음을 이론적으로 계산하였다. 또한 컴퓨터 모의실험을 통하여 제시된 이론적 분석과 거의 일치하는 결과를 도출함으로써 이론적 분석이 정확한 것을 확인하였다. 따라서 제안된 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템은 대역폭의 증가 없이 고품질 디지털 전송을 달성할 수 있는 효과적인 방법인 것으로 사료된다.

ABSTRACT

In this paper, a trellis-coded 3-dimensional (3-D) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system is presented and its performance is analyzed. Here, a set-partitioning technique for trellis coding with respect to a 3-D signal constellation is also presented. We show theoretically that the proposed system, which exploits a trellis coding scheme with recursive systematic convolutional codes (RSC) of code rate $R = 1/3$ and $2/3$, can improve symbol error rate (SER) up to 7.8 dB as compared with the uncoded OFDM system in an additive white Gaussian noise (AWGN) channel. Computer simulation confirms that the theoretical analysis of the proposed system is very accurate. It is, therefore, considered that the proposed trellis-coded 3-D OFDM system is well suited for the high quality digital transmission system without increase in the available bandwidth.

키워드 : 디지털통신, 격자 부호화 변조, 직교 주파수분할다중화, 오류제어부호

Key word : Digital communications, Trellis-coded modulation, OFDM, Error control coding

Received 12 July 2017, Revised 13 July 2017, Accepted 24 July 2017

* Corresponding Author Seog Geun Kang(E-mail: sgkang@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-1737),

Department of Semiconductor Engineering and Engineering Research Institute (ERI), Gyeongsang National University, Gyeongnam 52828, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.9.1635>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

주파수대역폭은 디지털 통신시스템에서 매우 제한된 자원이다. 이러한 자원을 효과적으로 활용하는 것은 시스템의 복잡도와도 관련이 있다. 전력과 대역폭의 경우 시스템의 설계단계에서 엄격한 제한요소로 작용하는 반면 시스템의 복잡성은 하드웨어 제조와 구현기술의 발전에 따라 점차적으로 완화되는 경향이 있다 [1]. 격자 부호화 변조(trellis-coded modulation, TCM)는 디지털통신에서 요구되는 주파수대역을 증가시키지 않으면서도 우수한 부호이득을 얻을 수 있는 대표적인 방법으로 알려져 있다 [1, 2].

한편, 직교 주파수분할다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)는 고속 무선통신시스템을 달성하기 위하여 최근 가장 빈번하게 사용되는 기술이다. 여기서는 정보비트에 따라 다중레벨 신호성상도의 신호를 다수의 부대역에 할당하여 전송한다. 최근에는 3차원 신호성상도를 신호사상기(signal mapper)로 사용하는 3차원 직교 주파수분할다중화도 제안된 바 있다 [3]. 특히, 차원수가 증가됨에 따라 신호성상도의 최소 유클리드거리(minimum Euclidean distance, MED)가 증가되므로 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템은 기존 시스템에 비하여 우수한 오류성능을 가지는 것으로 알려져 있다 [3-6]. 이러한 특성을 기반으로 다차원 직교 주파수분할다중화 기술을 초고속 광통신 분야에 적용하기 위한 실험적인 연구도 진행되고 있다 [7, 8].

본 논문에서는 고품질 디지털 전송시스템을 위한 새로운 부호화 변조방식을 소개한다. 여기서는 3차원 신호성상도를 기반으로 하는 격자 부호화 변조를 제시하고, 이를 직교 주파수분할다중화에 적용한 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템을 제시하고, 그 성능을 분석한다. 이를 위하여 3차원 신호성상도에 대한 집합분할사상기(mapping by set-partitioning)과 이에 따른 부호화 이득(coding gain)을 이론적으로 계산한다. 그리고 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN) 채널에서 수행한 모의실험 결과와 이론적으로 달성 가능한 성능을 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 3차원 신호성상도의 기본적인 구조와 집합분할 기법에 대하여 간략히 소개한다. 이어 III장에서는 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템 모델을 설명한다. IV장

에서 제안된 시스템에 대한 이론적 분석과 모의실험 결과를 제시하고, V장에 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 시스템 모델

2.1. 기본적인 3차원 신호성상도

2차원 성상도와는 달리 3차원 신호성상도의 가장 기본적인 형태는 그림 1에 나타난 것처럼 정다면체의 꼭지점을 신호점(또는 심볼)으로 이용한다 [5, 6]. 여기서 M 은 신호성상도 상의 신호점의 수를 나타낸다.

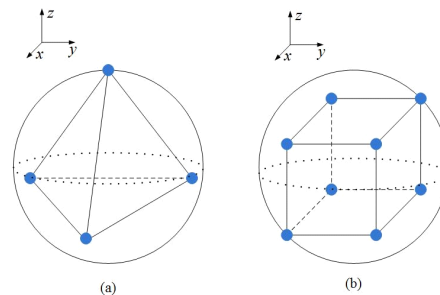


Fig. 1 The basic 3-D signal constellations (a) 4-ary constellation (b) 8-ary constellation.

꼭지점의 수가 2의 자승수인 정다면체는 그림 1에 나타난 두 가지를 제외하면 존재하지 않는 것으로 알려져 있다. 이로 인하여 16개 이상의 신호점을 가지는 3차원 신호성상도를 설계하기 위한 이전의 연구에서는 완전 반복검색알고리즘이 사용된 바 있다. 하지만 이 방법은 심볼수에 따라 연산복잡도가 지수적으로 증가되는 문제점이 있다. 이에 따라 [4]에서는 그림 1(b)에 나타난 정육면체를 3차원의 각 축방향으로 대칭적으로 확장함으로써 고차레벨 신호성상도를 직접적이면서도 간단하게 설계할 수 있는 방법이 제안되었다.

2.2. 3차원 신호성상도의 집합분할

격자 부호화(trellis coding)의 원리는 체계적 컨볼루션부호(systematic convolution code)와 신호성상도의 조합에 있다 [1]. 부호화된 이진비트열을 전송신호로 사상시키기 위하여 잉여비트(redundant bit)의 수에 따라 확장된 신호집합이 필요하다. 부호화된 정보에 따라 적절한 신호점의 집합을 선택적으로 제어함으로써 가용

주파수대역폭을 증가시키지 않으면서도 전송되는 심볼의 자유 유클리드거리(free Euclidean distance)를 증가시킬 수 있다. 따라서 주어진 신호성상도에서 가능한 큰 자유 유클리드거리를 보장할 수 있는 집합분할사상 기법은 격자 부호화기술에서는 필수적이다.

3차원 신호성상도 가운데 가장 널리 알려진 그림 1(b)의 정육면체(regular hexahedron) 구조의 8진 신호성상도에 대한 집합분할을 그림 2에 나타내었다. 여기서 $S_{(i)}$, $0 \leq i \leq 7$,는 8진 성상도의 신호점을 나타내고, x , y , z 는 3차원 축벡터이다.

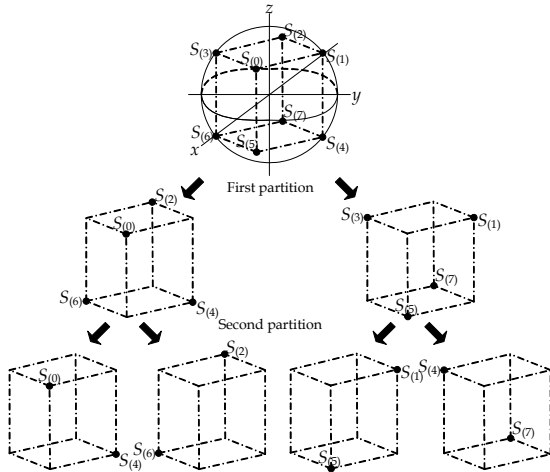


Fig. 2 The set-partitioning of a 3-D 8-ary constellation.

정육면체의 각 꼭지점에 해당하는 8개의 신호점으로 구성된 신호집합은 첫 번째 분할을 통하여 정사면체(regular tetrahedron)의 꼭지점으로 구성된 2개의 신호부집합(signal subset)으로 분할된다. 원신호집합의 평균전력을 1 [W]로 정규화시킨 것으로 가정하면 신호점 간 최소 유클리드거리 $\Delta_0 = 2 \times 1 / \sqrt{3} \approx 1.1547$ 이 된다. 따라서 첫 번째 분할에 의하여 각 신호집합의 최소 유클리드거리는 $\Delta_1 = \sqrt{2} \times \Delta_0 \approx 1.6330$ 으로 증가된다. 두 번째 분할을 통하여 각 부집합들은 2개의 신호점으로 구성된 하위 부집합으로 다시 분할된다. 두 번째 분할에서는 신호점 간 유클리드거리가 더 이상 증가되지 않으므로 $\Delta_2 = \Delta_1$ 이다. 이는 2차원 신호성상도와는 달리 3차원 신호성상도에서는 최소 유클리드거리를 가지는 신호점의 최소수는 3개이고, 이들은 이미 첫 번째 분할에서 서로 다른 부집합에 할당되었기 때문이다.

III. 격자 부호화 3차원 OFDM 시스템

격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템의 기저대역 등가모델을 그림 3에 나타내었다. 여기서 S/P와 P/S는 직병렬변환기(serial-to-parallel converter)와 병직렬변환기(parallel-to-serial converter)를 각각 나타낸다. M 은 직교 주파수분할다중화 심볼의 부대역 수를 나타낸다.

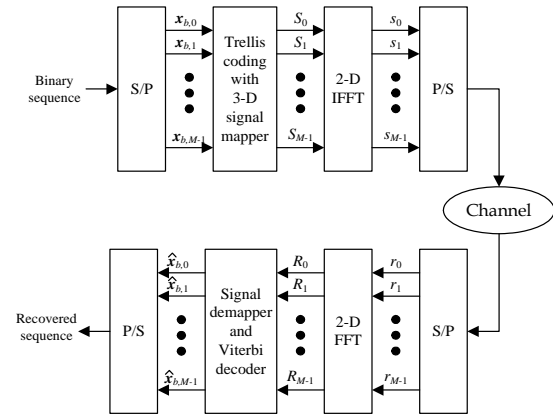


Fig. 3 A low-pass equivalent block diagram of the trellis-coded 3-D OFDM system.

정보원에서 발생된 이진시퀀스는 M 개의 저속(low rate) 비트열 $x_{b,k}$, $0 \leq k \leq M-1$,로 변환되어 3차원 신호사상기 기반 격자 부호화기의 입력으로 사용된다. 격자 부호화기는 부호율이 $R = K/N$ 인 (N , K , m) 컨볼루션 부호기와 2^N 개의 신호점을 가지는 3차원 신호성상도로 구성된다. 여기서 N 과 K 는 임의의 시간 t 에서 컨볼루션 부호기의 출력 비트수와 입력 비트수를 각각 나타내고 m 은 메모리의 수이다.

3차원 신호사상기 기반 격자 부호화된 직교 주파수분할다중화 심볼은 주파수 영역에서 다음과 같은 $3 \times M$ 행렬로 나타낼 수 있다.

$$S = [S_0 S_1 \cdots S_{M-1}], S_k = (x_k y_k z_k)^T, \quad (1)$$

여기서 S_k , $0 \leq k \leq M-1$,는 k 번째 부대역 신호벡터를 나타내고, x_k , y_k , z_k 는 신호점의 x , y , z 축 좌표를 나타내는 계수이다. 그리고 위첨자 T는 전치행렬을 나타낸다. (1)과 같이 표현되는 3차원 직교 주파수분할다중화 심

블은 2차원 이산 역푸리에변환(inverse discrete Fourier transform, IDFT)를 이용하여 다음과 같이 변조된다.

$$s = \frac{1}{3M} W_3^{-1}(S \cdot W_M^{-1}), \quad (2)$$

여기서 W_M^{-1} 는 $M \times M$ 고속 역푸리에변환 행렬(IFFT)이다. 수신기에서는 송신기의 역과정으로 수신된 신호가 복조되고, 컨볼루션 부호의 최우복호법인 비터비복호기(Viterbi decoder)를 이용하여 복호된 다음 병직렬변환기를 통하여 이진 비트열로 재정렬된다.

IV. 모의실험 및 성능분석

제안된 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화의 성능을 평가하기 위하여 부호이득을 이론적으로 계산하고 모의실험을 수행하여 검증하였다. 전송환경은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가산성 백색 가우시안 잡음채널을 이용하였다. 3차원 신호성상도는 그림 1에 나타난 4진 및 8진 성상도를 이용하고, 성능비교를 위한 2차원 성상도는 4진 및 8진-위상편이키잉(phase shift keying, PSK)을 이용하였다. 이에 따라 수신된 신호의 표본은

$$r_k = s_k + n_k \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 $n_k = (n_x, n_y, n_z)$ 는 3차원 가우시안 잡음 벡터를 나타내고, n_x, n_y, n_z 는 서로 독립이고 동일한 분포(independent and identically distributed)를 가지는 랜덤변수(random variable)이다.

3차원 신호사상기 기반 격자 부호기는 그림 2의 확장된 성상도를 활용하기 위하여 그림 4에 나타난 부호율이 각각 $R = 2/3$ 와 $1/3$ 인 회귀 체계적 컨볼루션 부호(recursive systematic code, RSC)를 이용하였다. 여기서 b_0 와 b_1 은 정보비트를 나타내고 m_0, m_1, m_2 는 부호화된 비트열을 나타낸다. $R = 2/3$ 부호의 경우 부호어의 m_0 와 m_1 은 입력 정보비트와 동일하고 m_2 는 3개의 단일 비트 메모리로 구성된 순차논리회로(sequential logic circuit)의 출력이다. 이와 같은 $R = 2/3$ 부호의 생성행렬(generator matrix)는 다음과 같다.

$$G_{2/3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1+D+D^2 \\ 0 & 1 & 1+D+D^2+D^3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

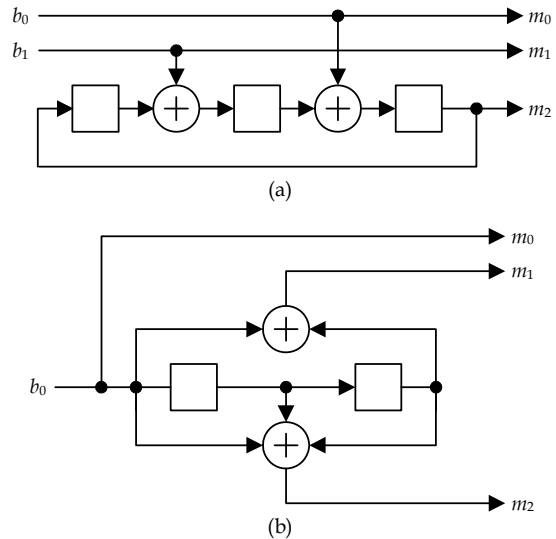


Fig. 4. The RSC encoder for computer simulation (a) $R = 2/3$ (b) $R = 1/3$.

따라서 이 부호기는 8개의 상태를 가지며, 각각의 상태는 4개의 병렬천이(parallel branch)를 가진다. 이를 트렐리스 천이도로 나타내면 그림 5와 같다. 여기에는 부호어가 모두 0인 경로와 이에 대하여 자승 최소 거리(squared minimum distance)를 가지는 오류 사건(error event)경로를 함께 표시하였다. 여기서 $U_k, 0 \leq k \leq 7$,는 메모리의 상태를 나타낸다.

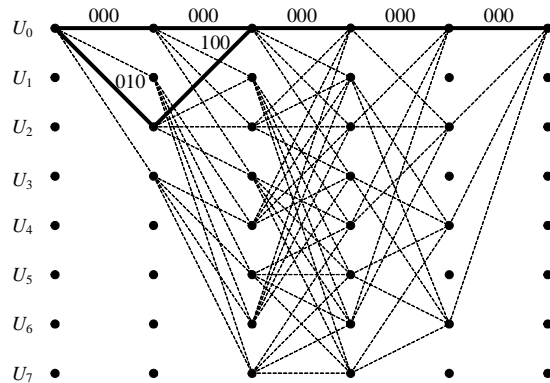


Fig. 5 The trellis diagram of $R = 2/3$ RSC.

부호화되지 않은 시스템의 경우 그림 1에 나타난 3차원 성상도들의 최소 거리는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$d_{\text{ref}(8)} = \Delta_0 = 1.1547, \quad (5)$$

$$d_{\text{ref}(4)} = \Delta_2 = 1.6330. \quad (6)$$

이에 비하여 그림 4(a)에 나타난 부호율이 2/3인 RSC가 적용된 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템의 이론적인 부호이득은 그림 5에 나타난 오류사건의 자승 최소 거리 $d_{m_1}^2$ 에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} G_{\frac{2/3 \text{ coded } 8\text{-ary}}{\text{uncoded } 8\text{-ary}}} &= 10 \log \left(\frac{d_{m_1}^2}{d_{\text{ref}(8)}^2} \right) = 10 \log \left(\frac{2\Delta_2^2}{\Delta_0^2} \right), \quad (7) \\ &= 6.02 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{\frac{2/3 \text{ coded } 8\text{-ary}}{\text{uncoded } 4\text{-ary}}} &= 10 \log \left(\frac{d_{m_1}^2}{d_{\text{ref}(4)}^2} \right) = 10 \log \left(\frac{2\Delta_2^2}{\Delta_2^2} \right), \quad (8) \\ &= 3.01 \text{ dB} \end{aligned}$$

여기서 자승 최소 거리는 부호어 $C_0 = [000 \ 000 \ 000 \ 000 \ 000]$ 과 부호어 $C_1 = [010 \ 100 \ 000 \ 000 \ 000]$ 사이의 유클리드 거리로서 000과 010(=2₍₈₎) 사이의 거리의 제곱인 Δ_1^2 과 000과 100(=4₍₈₎) 사이의 거리의 제곱인 Δ_2^2 의 합이 된다. 즉, $d_{m_1}^2 = \Delta_1^2 + \Delta_2^2 = 2\Delta_2^2 = 5.33$ 이다. 여기서 아래첨자 (8)은 8진수를 나타낸다. 따라서 동일한 3차원 8진 성상도를 이용하더라도 격자 부호화기법이 적용된 시스템은 부호화하지 않은 경우에 비하여 약 6 dB 가량의 성능개선이 가능함을 알 수 있다. 또한 정보 비트의 수가 동일한 4진 성상도를 이용하는 부호화되지 않은 시스템에 비하면 3 dB 가량 성능개선이 가능하다. 한편, 그림 4(b)의 $R = 1/3$ 인 RSC의 트렐리스 천이도와 자승 최소 거리를 가지는 오류 사건은 그림 6과 같다.

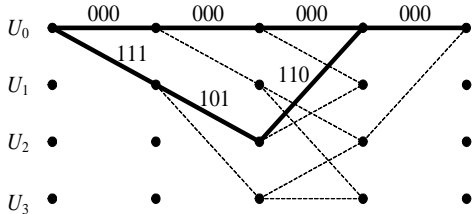


Fig. 6 The trellis diagram of $R = 1/3$ RSC.

이 격자 부호기에서 자승 최소 거리는 부호어 $C_0 = [000 \ 000 \ 000 \ 000]$ 과 부호어 $C_2 = [111 \ 101 \ 110 \ 000]$ 사이의 유클리드 거리로서 000과 111(=7₍₈₎) 사이의 거리의 제곱인 $\Delta_3^2 = 2^2$ 과 000과 101(=5₍₈₎) 사이의 거리의 제곱인 Δ_0^2 , 000과 110(=6₍₈₎) 사이의 거리의 제곱인 Δ_1^2 의 합이 된다. 즉, $d_{m_2}^2 = \Delta_3^2 + \Delta_0^2 + \Delta_1^2 = 8$ 이다. 따라서 그림 4(b)의 $R = 1/3$ 인 RSC가 적용되는 경우 제안된 시스템의 이론적인 부호이득은 다음과 같다.

$$G_{\frac{1/3 \text{ coded } 8\text{-ary}}{\text{uncoded } 8\text{-ary}}} = 10 \log \left(\frac{d_{m_2}^2}{d_{\text{ref}(8)}^2} \right) = 7.78 \text{ dB}, \quad (9)$$

$$G_{\frac{1/3 \text{ coded } 8\text{-ary}}{\text{uncoded } 4\text{-ary}}} = 10 \log \left(\frac{d_{m_2}^2}{d_{\text{ref}(4)}^2} \right) = 4.77 \text{ dB}. \quad (10)$$

그러므로 그림 4(b)에 나타난 부호율이 $R = 1/3$ 인 RSC 부호기를 적용할 경우에는 부호율이 $R = 2/3$ 인 부호기를 사용하는 경우에 비하여 약 1.76 dB 가량 추가적인 부호화 이득을 얻을 수 있다.

이와 같은 이론적 분석을 확인하기 위하여 모의실험 통하여 구한 심볼오류확률(symbol error rate, SER)을 그림 7에 제시하였다. 여기서는 분석의 편의를 위하여 $P_e = 10^{-5.5}$ (또는 $\log_{10} P_e = -5.5$)를 기준 심볼오류확률로 한다.

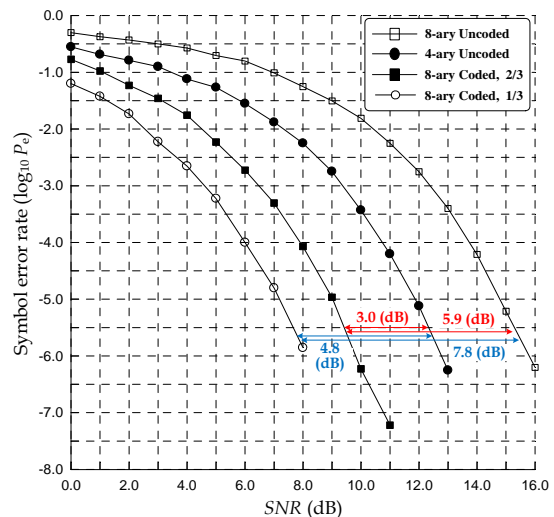


Fig. 7 Symbol error rate of the trellis-coded 3-D OFDM system.

2/3 RSC 부호가 적용된 격자 부호화 직교 주파수분할다중화 시스템은 기준 심볼오류확률에서 4진 성상도를 신호사상기로 사용하면서 부호화기법을 적용하지 않은 시스템에 비하여 약 3 dB 가량 성능향상이 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 8진 성상도를 사용하면서 부호화기법을 적용하지 않은 시스템에 비하여 제안된 시스템은 6 dB 가량 오류성능이 향상되는 것도 확인할 수 있다. 이는 (7)과 (8)의 이론적인 분석과 거의 일치하는 결과이다.

부호율이 $R = 1/3$ 인 RSC 부호를 적용한 경우 제안된 격자 부호화 직교 주파수분할다중화 시스템이 기준 오류확률을 달성하기 위한 SNR은 약 7.6 dB 정도이다. 이에 비하여 $R = 2/3$ 인 부호를 적용한 경우 기준 오류확률을 달성을 위하여 요구되는 SNR은 약 9.3 dB인 것으로 나타났다. 이 결과는 $R = 1/3$ 인 부호를 이용하는 경우 약 1.76 dB 가량 추가적인 성능향상이 가능할 것이라는 이론적인 분석과도 거의 일치한다.

V. 결론

본 논문에서는 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템을 제안하였다. 그리고 제안된 시스템의 이론적 성능을 가산성 백색 가우시안 잡음채널에 수행한 모의실험 결과와의 비교를 통하여 확인하였다. 이를 위하여 여기서는 3차원 신호성상도를 구성하는 신호집합에 대한 집합분할사상 기법을 제시하였다. 부호율이 $R = 1/3$ 과 $2/3$ 인 회귀 체계적 컨볼루션 부호를 이용하여 격자 부호화된 제안된 시스템은 부호화 기법을 적용하지 않은 시스템에 비하여 최대 7.78 dB 가량 심볼오류 성능을 개선시킬 수 있음을 이론적인 분석과 모의실험을 통하여 확인하였다.

따라서 제안된 격자 부호화 3차원 직교 주파수분할다중화 시스템은 대역폭의 증가 없이 고품질 디지털 전송을 달성할 수 있으므로 진보된 무선통신 시스템이나 코히어런트 광통신시스템에의 응용에 적합할 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation (NRF) of Korea funded by the Ministry of Education (MOE) (No. 2015R1D1A1A01060057).

REFERENCES

- [1] C. B. Schlegel and L. C. Perez, *Trellis and Turbo Coding*, Hoboken, NJ: IEEE Press, 2014.
- [2] G. Ungerboeck, "Trellis-coded modulation with redundant signal sets, Part I: Introduction," *IEEE Communication Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 5-11, Feb. 1987.
- [3] Z. Chen, E. C. Choi, and S. G. Kang, "Closed-form expressions for the symbol error probability of 3-D OFDM," *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 2, pp. 112-114, Feb. 2010.
- [4] S. G. Kang, Z. Chen, J. Y. Kim, J. S. Bae, and J.-S. Lim, "Construction of higher-level 3-D signal constellations and their accurate symbol error probabilities in AWGN," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 12, pp. 6267-6273, Dec. 2011.
- [5] S. Li and S. G. Kang, "Design of 3-dimensional cross-lattice signal constellations with increased compactness," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 715-720, Apr. 2016.
- [6] H. C. Kwon and S. G. Kang, "Performance of a 3-dimensional signal transmission system," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 11, pp. 2021-2026, Nov. 2016.
- [7] J. Zhao, "DFT-based offset-QAM OFAM for optical communications," *Optics Express*, vol. 22, no. 1, pp. 1114-1126, Jan. 2014.
- [8] L. Deng, X. Wang, C. Zhou, M. Tang, S. Fu, M. Zhang, P. Ping, and D. Liu, "Experimental demonstration of a 16.27 Gb/s 2-D coherent optical OFDM system with 3-D signal mapper and 2-D IFFT modulator," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 4, pp. 1177-1183, Feb. 2016.



이상(Shuang Li)

2013년 7월: 중국 요녕과학기술대학교 전자계측공학과 학사
2016년 2월: 경상대학교 대학원 반도체공학과 석사
2016년 3월 ~ 현재: 경상대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정
※관심분야: 디지털통신, 통신신호처리, OFDM, 오류정정부호



강석근(Seog Geun Kang)

1999년 8월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교 공과대학 반도체공학과 및 대학원 전기전자공학과, 교수
2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교 공학연구원, 책임연구원
※관심분야: 디지털통신, 무선통신, 오류정정부호, 디지털 신호처리