

3차원 신호 전송시스템의 성능

권혁찬 · 강석근*

Performance of a 3-Dimensional Signal Transmission System

Hyeock Chan Kwon · Seog Geun Kang*

Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 52828, Korea

요 약

본 논문에서는 3차원 신호의 전송을 위한 시스템 모델을 제시하고 성능을 분석한다. 2차원 신호와는 달리 3차원 신호를 표현할 수 있는 직교형식의 부재로 인하여 여기서는 직교 기저함수를 이용하여 3차원 신호를 전송한다. 초고차레벨 격자형 신호성상도를 이용한 모의실험 결과, 3차원 전송시스템은 2차원 시스템에 비하여 현저히 향상된 오류 성능을 가지는 것으로 확인되었다. 이러한 성능 향상은 3차원 격자형 신호성상도의 심볼간 최소 유클리드 거리가 직교진폭변조 성상도에 비하여 훨씬 증가된 것이 주요 원인인 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위하여 최소 유클리드 거리를 비교한 결과, 3차원 1024진 성상도는 직교진폭변조 성상도에 비하여 약 2.6배 증가된 최소 유클리드 거리를 가지는 것으로 나타났다. 또한 4096진 성상도의 경우 3차원 성상도의 최소 유클리드 거리는 2차원 성상도에 비하여 약 3.2배 증가하였다.

ABSTRACT

In this paper, a system model for transmission of 3-dimensional (3-D) signals is presented and its performance is analyzed. Unlike 2-D signals, no quadrature form expression for the 3-D signals is available. Exploiting a set of orthogonal basis functions, the 3-D signals are transmitted. As a result of computer simulation using very higher-level signal constellations, the 3-D transmission system has significantly improved error performance as compared with the 2-D system. It is considered that the principal reason for such performance improvement is much increased minimum Euclidean distance (MED) of the 3-D lattice constellations compared with the corresponding 2-D ones. When the MEDs of 2-D and 3-D lattice constellation are compared to confirm the analysis, the MED of 3-D 1024-ary constellation is around 2.6 times larger than that of the quadrature amplitude modulation (QAM). Expanding the constellation size to 4096, the MED of 3-D lattice constellation is increased by 3.2 times of the QAM.

키워드 : 디지털통신, 신호성상도, 격자형 성상도, 직교진폭변조, 최소 유클리드 거리

Key word : Digital communications, Signal constellation, Lattice constellation, Quadrature amplitude modulation (QAM), Minimum Euclidean distance (MED)

Received 29 July 2016, Revised 04 August 2016, Accepted 11 August 2016

* 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 <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.11.2021>

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. 서 론

신호성상도(signal constellation)은 디지털 통신시스템의 송신기를 구성하는 주요 요소 가운데 하나이다. 고품질 통신시스템을 구현하기 위한 방법으로 격자형 부호변조(trellis coded modulation, TCM)에 다차원 신호성상도가 적용된 이래 우수한 전송특성을 가지는 다차원 신호성상도의 설계에 대한 연구가 꾸준히 수행되어왔다[1-7]. 특히, 광통신분야에서는 고품질 또는 고속 데이터 전송을 위한 다차원 신호형태에 대한 관심이 고조된 바 있다. 그 결과, [5], [6] 등에서는 8차원 이상 변조형식(modulation format)을 이용한 광통신시스템의 실제적 구현 방법을 소개하였다.

다차원 신호성상도 설계를 위한 대부분의 기존 연구들은 2차원 격자구조(lattice)를 활용한다. 이들은 2차원 격자구조와 시간슬롯(time slot), 주파수슬롯(frequency slot), 펄스위치변조(pulse-position modulation, PPM) 등을 결합하여 성상도의 다차원화를 달성하였다. 이러한 방법에 의하여 구현된 신호성상도는 2의 배수 차원을 가진다. 이에 비하여 [3], [8]에서는 정다면체(regular polyhedron)의 꼭지점을 신호점으로 사용하는 3차원 신호성상도를 제시된 바 있다. 이는 이미 알려진 3차원 정다면체를 이용하므로 성상도 설계를 위한 반복검색 알고리즘이 불필요하여 연산복잡도를 크게 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 심볼간 유클리드 거리(Euclidean distance)가 일정하고, 모든 심볼이 구(sphere)의 표면에 위치하므로 상진폭(constant amplitude) 특성을 가지는 장점도 있다.

정다면체 구조는 불과 5개만 존재하며, 이들 가운데 신호점으로 이용될 꼭지점의 수가 2의 승수인 구조는 정사면체(regular tetrahedron)와 정육면체(regular hexahedron) 밖에 없으므로 고차레벨 성상도의 설계가 어려운 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 8개의 꼭지점을 가지는 정육면체를 기본 구조로 정하고, 이를 3차원의 각 축방향으로 대칭되도록 확장시킴으로써 고차레벨 신호성상도를 설계하는 방법이 제시된 바 있다[3]. 이 방법으로 설계된 3차원 격자형 신호성상도를 직교 주파수분할다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), 무반송파 진폭/위상변조(carrierless amplitude/ phase, CAP) 등 이미 널리 알려진 데이터 전송기술에 적용한 연구도 최근 보고되고

있다[8, 9].

이와 같은 3차원 격자형 신호성상도의 실제적인 응용을 위해서는 성상도의 최소 유클리드 거리(minimum Euclidean distance, MED), 스펙트럼 효율(spectrum efficiency) 등과 같은 주요 파라미터에 대한 구체적인 분석이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 주요 변수들에 따른 3차원 격자형 신호성상도가 적용된 디지털 전송시스템의 성능을 분석한다. 또한 이 결과를 바탕으로 고속 및 고품질 디지털 전송시스템의 설계에서 검토되어야 할 사항에 대하여 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 3차원 격자형 신호성상도의 기본적인 구조에 대하여 간략히 소개한다. 이어 III장에서는 3차원 신호 전송을 위한 시스템 모델을 설명한다. IV장에서는 3차원 격자형 신호성상도에 대한 수치적 분석과 모의실험 결과를 제시하고 분석한다. 마지막으로 결론과 향후 추가 연구 분야를 V장에 제시한다.

II. 3차원 격자형 신호성상도

일반적인 디지털 통신시스템에서 전송되는 신호는 다음과 같이 직교형태(quadrature form)로 표현된다[10].

$$s(t) = x \cos(w_c t) + y \sin(w_c t), \quad (1)$$

여기서 $w_c (= 2\pi f_c)$ 는 전송신호의 반송주파수(carrier frequency)이고, x 와 y 는 2차원 복소평면에서 정보메시지에 대응하는 동상(in-phase)성분과 이상(quadrature phase)성분을 각각 나타낸다. 이와 같이 정보원에서 발생 가능한 모든 메시지를 2차원 복소평면에 시각적으로 표현한 것을 신호성상도라고 한다.

2차원 성상도와는 달리 3차원 신호성상도의 가장 기본적인 형태는 그림 1에 나타난 것처럼 정다면체의 꼭지점을 신호점(또는 심볼)으로 이용한다. 여기서 M 은 성상도 상의 신호점의 수를 나타낸다. 꼭지점의 수가 2의 승수인 정다면체는 그림 1에 나타난 두 가지를 제외하면 존재하지 않는 것으로 알려져 있다. 이로 인하여 16개 이상의 신호점을 가지는 고차레벨 3차원 신호성상도를 설계하기 위한 이전의 연구들에서는 완전 반복

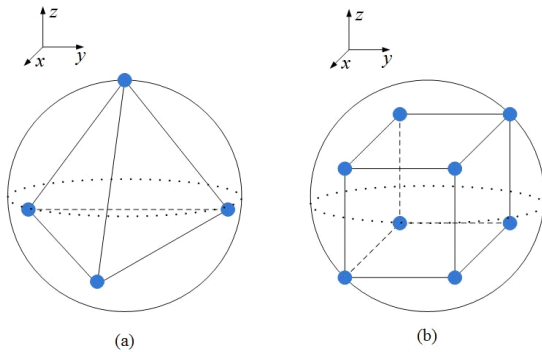


Fig. 1 The basic 3-D signal constellations (a) $M = 4$ (b) $M = 8$

검색(iterative search) 알고리즘이 사용된 바 있다[2]. 하지만 여기서는 심볼수가 증가됨에 따라 연산복잡도가 지수적으로 증가되는 문제점이 발생된다[4]. 이에 따라 [3]에서는 그림 1(b)에 나타난 정육면체를 3차원의 각 축방향으로 대칭적으로 확장시킴으로써 고차레벨 신호 성상도를 직접적이면서도 간단하게 설계할 수 있는 방법이 제안된 바 있다. 이러한 방법으로 설계된 가장 작은 3차원 격자형 신호성상도는 그림 2에 나타난 32진 구조이다.

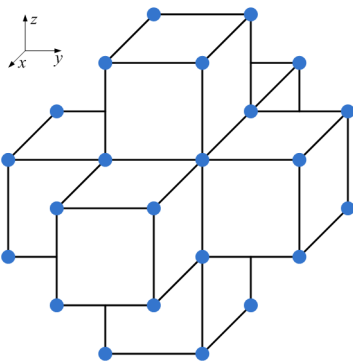


Fig. 2 The smallest structure of 3-D lattice constellations

III. 전송시스템 모델

일반적인 디지털 통신시스템과는 달리 3차원 신호를 (1)차림 직교형식(quadrature form)으로 정확하게 표현할 수 있는 방법은 존재하지 않는다. 따라서 그림 1과

2에 나타난 3차원 신호성상도를 이용하는 시스템에서는 전송신호를 발생시키기 위하여 직교 기저함수(orthogonal basis function)가 이용된다[7, 10]. 이 경우 전송되는 신호의 기저대역(baseband) 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = S_{i,x} \phi_1(t) + S_{i,y} \phi_2(t) + S_{i,z} \phi_3(t). \quad (2)$$

여기서 $S_{i,x}$, $S_{i,y}$, $S_{i,z}$ 는 M 개의 신호점으로 구성된 3차원 신호벡터 S_i , $0 \leq i \leq M-1$,의 각 축방향 성분을 나타낸다. $\phi_k(t)$, $1 \leq k \leq 3$,는 3차원 신호의 전송을 위한 직교 기저함수이며, 본 논문에서는 그림 3에 나타난 기저함수를 사용하였다.

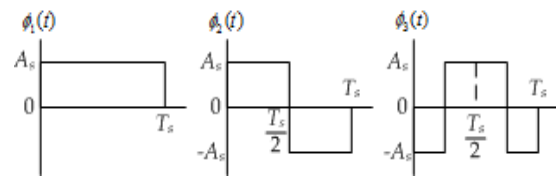


Fig. 3 A set of orthogonal basis functions

여기서 T_s 는 심볼구간을 나타내고 A_s 는 기저함수의 에너지를 1로 정규화시키는 크기이다.

가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN) 채널에서 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad (3)$$

여기서 잡음 $n(t)$ 는 다음과 같이 나타나는 3차원 랜덤 프로세스(random process)이다.

$$n(t) = n_x \phi_1(t) + n_y \phi_2(t) + n_z \phi_3(t) \quad (4)$$

그리고 각 축방향 성분 n_x , n_y , n_z 는 평균이 0이고 전력스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)가 $N_0/2$ (W/Hz)이며, 서로 독립이고 동일한 분포(independent and identically distributed, i.i.d.)를 가지는 랜덤 변수로서 잡음 프로세스 $n(t)$ 와 직교 기저함수의 내적(inner product)에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$n_x = \langle n(t), \phi_1(t) \rangle = \int_0^{T_s} n(t) \phi_1(t) dt. \quad (5)$$

IV. 모의실험 및 성능분석

4.1. 심볼오류 성능

3차원 격자형 신호성상도의 기본 구조인 그림 1(b)와 2차원 8진 위상편이키잉(phase shift keying, PSK) 성상도를 이용하는 디지털 통신시스템의 심볼오류확률(symbol error probability, SEP)를 그림 4에 비교하여 나타내었다. 여기서 전송매체는 평균이 0이고 전력 스펙트럼밀도가 $N_0/2$ (W/Hz)인 가산성 백색 가우시안 잡음채널을 가정하였다. E_s 는 전송심볼의 평균 에너지를 나타낸다.

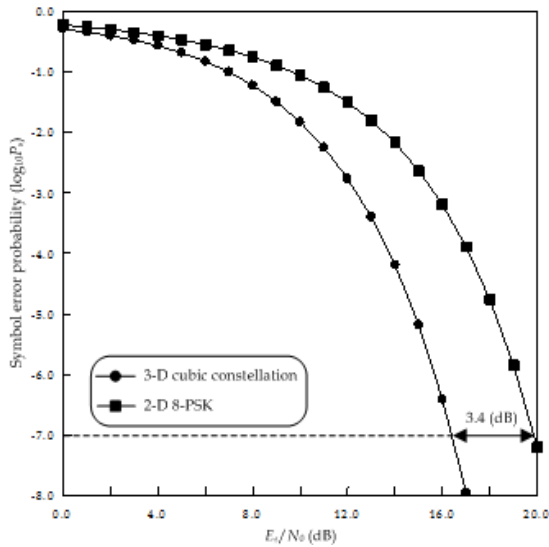


Fig. 4 Symbol error probabilities of 2-D and 3-D 8-ary signal constellations

격자형 성상도를 이용하는 3차원 전송시스템이 8진 위상편이키잉을 이용하는 2차원 시스템에 비하여 모든 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR) 영역에서 우수한 성능을 가지는 것으로 나타났다. 예를 들어, 심볼 오류확률 $P_s = 10^{-7}$ 을 달성하기 위하여 전자의 시스템에서는 약 16.4 (dB) 가량의 신호 대 잡음비가 요구되는데 비하여 후자의 경우에는 19.8 (dB) 가량의 신호 대 잡음

비가 요구되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 심볼오류 성능의 차이는 [4]에서도 예측된 것처럼 3차원 격자형 성상도가 2차원 성상도에 비하여 훨씬 증가된 최소 유클리드 거리를 가지기 때문인 것으로 분석된다.

기본 구조로부터 확장된 초고차레벨 3차원 격자형 신호성상도와 이에 대응하는 2차원 격자형 구조를 가지는 직교진폭변조(quadrature amplitude modulation, QAM)가 적용된 디지털 전송시스템의 오류 성능은 그림 5에 비교하여 나타내었다. 여기서 사용된 3차원 1024진, 2048진, 4096진 격자형 성상도는 그림 6에 제시하였다.

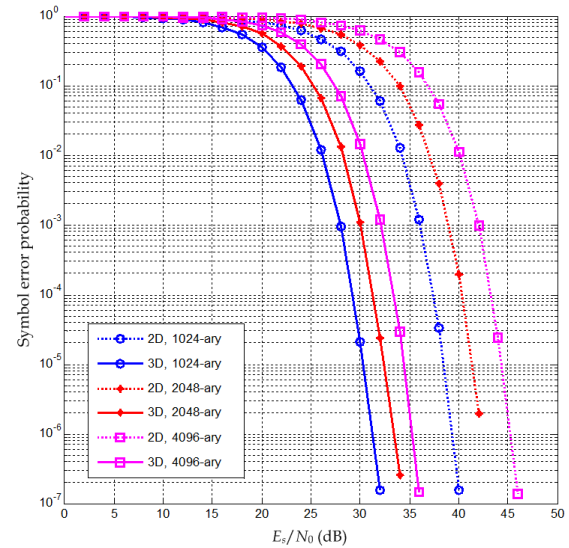


Fig. 5 Comparison of 2-D and 3-D transmission system with much higher-level signal constellations

3차원 전송시스템이 신호성상도의 크기에 상관없이 신호 대 잡음비의 모든 영역에서 2차원 시스템에 비하여 훨씬 우수한 오류 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 성능분석의 편의를 위하여 $P_s = 10^{-6}$ 을 기준 심볼오율(reference error rate)로 정하면, 기준오율을 달성하기 위하여 3차원 1024진 성상도가 적용된 시스템은 직교진폭변조가 적용된 시스템에 비하여 약 8.1 (dB) 낮은 신호 대 잡음비가 요구됨을 알 수 있다. 또한 신호성상도의 크기를 2048과 4096으로 증가시키면 두 시스템에서 기준오율을 달성할 수 있는 신호 대 잡음비의 차이는 약 9 (dB)와 10 (dB)로 증가되는 것으로 나타났다.

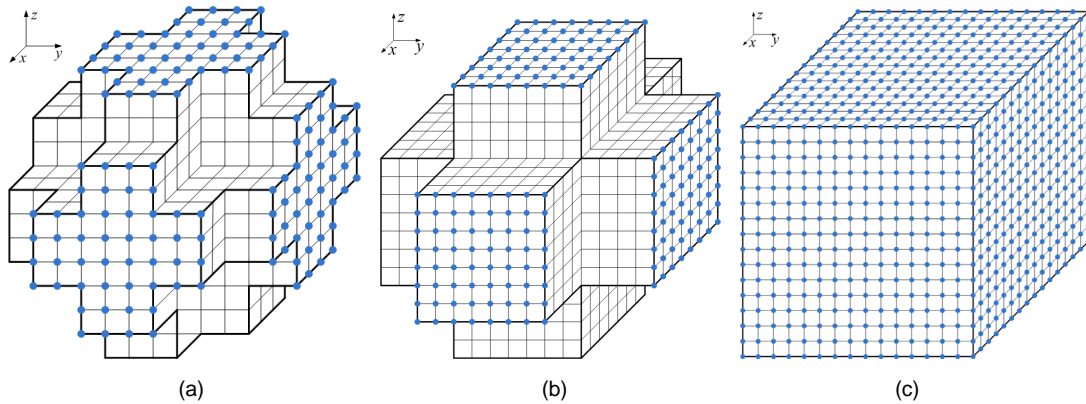


Fig. 6 Much higher-level 3-D lattice signal constellations (a) $M = 1024$ (b) $M = 2048$ (c) $M = 4096$

4.2. 최소 유클리드 거리

심볼오류 분석 결과 3차원 전송시스템이 2차원 시스템에 비하여 현저히 향상된 성능을 가지는 것을 확인하였다. 이와 같은 성능 향상의 원인은 3차원 신호성상도가 2차원 성상도에 비하여 증가된 심볼간 최소 유클리드 거리를 가지기 때문이다. 이를 확인하기 위하여 그림 6에 나타낸 초고차레벨 3차원 격자형 신호성상도와 동일한 심볼수를 가지는 직교진폭변조 성상도의 최소 유클리드 거리를 계산하여 표 1에 나타내었다. 여기서는 공정한 비교를 위하여 모든 성상도가 동일한 평균전력을 가지도록 정규화시켰다.

Table. 1 The minimum Euclidean distances of very higher-level signal constellations

Constellation size	Dimension	
	2-D	3-D
1024	0.0766	0.2004
2048	0.0550	0.1586
4096	0.0390	0.1252

1024진 성상도의 경우 3차원 격자형 구조의 심볼간 최소 유클리드 거리는 직교진폭변조에 비하여 약 2.6배 가량 증가된다. 성상도의 크기를 4096으로 확장하면 3차원 성상도는 2차원 성상도보다 약 3.2배 증가된 최소 유클리드 거리를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 성상도의 크기가 증가됨에 따라 3차원 성상도와 2차원 성상도의 최소 유클리드 거리도 증가되며, 이는 3차원 격자

형 신호성상도가 적용된 디지털 전송시스템이 기존 2차원 성상도 기반 시스템보다 현저히 우수한 성능을 가지는 원인이 되는 것으로 분석된다.

V. 결론

본 논문에서는 3차원 신호를 전송하기 위한 시스템 모델을 제시하고, 3차원 격자형 신호성상도가 적용된 디지털 전송시스템의 성능을 분석하였다. 기존의 2차원 신호나 이를 기반으로 확장된 2의 배수 차원을 가지는 신호는 직교형식으로 표현이 가능하지만 3차원 신호를 정확하게 표현할 수 있는 직교형식은 현재까지는 존재하지 않는다. 따라서 3차원신호를 전송하기 위해서는 직교 기저함수를 이용하여 전송신호를 발생시키는 것이 가장 효과적인 방법이다. 초고차레벨 3차원 격자형 신호성상도를 제시된 시스템 모델에 적용하여 모의실험을 수행한 결과 3차원 전송시스템은 기존의 2차원 시스템에 비하여 현저히 향상된 심볼오류 성능을 가지는 것으로 확인되었다. 이와 같은 성능 향상은 3차원 격자형 성상도의 심볼간 최소 유클리드 거리가 직교진폭변조 성상도에 비하여 훨씬 증가된 것이 주요 원인인 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시된 신호성상도의 최소 유클리드 거리 외에도 전송신호의 스펙트럼 분석을 통한 전송효율, 3차원 격자형 신호성상도의 구형 집적(sphere packing)과 이에 따른 성형이득(shaping gain), 부호화변조

(coded modulation) 기술 등 3차원 신호 전송시스템의 성능에 영향을 미칠 수 있는 요소들에 대한 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이는 향후 고품질 및 초고속 특성이 동시에 요구되는 미래 통신시스템에 3차원 또는 3차원 성상도를 기반으로 하는 다차원 신호 전송기술을 실제적으로 적용하기 위한 기초 연구로서 큰 의미를 가질 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. 2015R1D1 A1A01060057).

REFERENCES

[1] L. F. Wei, "Trellis-coded modulation with multidimensional constellation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 33, no. 4, pp. 483-501, July 1987.

[2] J. E. Porath and T. Aulin, "Design of multidimensional signal constellations," *IEE Proc.-Commun.*, vol. 150, no. 5, pp. 317-323, Oct. 2003.

[3] 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 Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 12, pp. 6267-6273, Dec. 2011.

[4] Z. Chen and S. G. Kang, "Three-dimensional modulation formats with constant power for optical communications," *Opt. Express*, vol. 19, no. 23, pp. 22358-22363, Nov. 2011.

[5] T. Koike Akino, D. S. Millar, K. Kojima, and K. Parsons, "Eight-dimensional modulation for coherent optical communications," *Proc. ECOC*, London, UK, Tu.3.C., pp. 1-3, Sep. 2013.

[6] D. S. Millar, T. Koike Akino, S. O. Arik, K. Kojima, K. Parsons, T. Yoshida, and T. Sugihara, "High-dimensional modulation for coherent optical communication systems," *Opt. Express*, vol. 22, no. 7, pp. 8798-8812, Apr. 2014.

[7] H. G. Batshon, I. Djordjevic, L. Xu, and T. Wang, "Multidimensional LDPC-coded modulation for beyond 400 Gb/s wavelength transmission," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 16, pp. 1139-1141, Aug. 2008.

[8] Z. Chen, E. C. Choi, and S. G. Kang, "Closed-form expressions for the symbol error probability of 3-D OFDM," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 2, pp. 112-114, Feb. 2010.

[9] G. Stepniak, "Comparison of efficiency of N -dimensional CAP modulations," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 14, pp. 2516-2523, July 2014.

[10] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed., McGraw-Hill, Singapore, 2008.



권혁찬(Hyeock Chan Kwon)

2016년 2월: 경상대학교 공과대학 반도체공학과 (공학사)
2016년 3월 ~ 현재: 경상대학교 대학원 반도체공학과, 석사과정
※관심분야: 디지털통신, 디지털 신호처리



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