

나선 직교진폭변조 신호성상도의 새로운 설계

이상¹ · 강석근^{2*}

A New Design of Signal Constellation of the Spiral Quadrature Amplitude Modulation

Shuang Li¹ · Seog Geun Kang^{2*}

¹Graduate Student, Department of Electrical and Electronic Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 52828 Korea

^{2*}Professor, Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 52828 Korea

요약

본 논문에서는 변형 경사하강검색법을 이용한 새로운 나선 직교진폭변조 신호성상도와 이를 위한 이진사상규칙을 제시한다. 기존 방법과는 달리 새로운 검색법은 반복설계를 위한 파라미터로 최대 반복 횟수와 함께 성상도 최적화 알고리즘을 사용하여 위상잡음에 더욱 강인한 나선 직교진폭변조 성상도를 생성한다. 또한, 제시된 이진사상기법은 신호성상도에서 동일한 경계를 공유하는 필드 수를 조정함으로써 성상도의 평균 해밍거리를 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 그 결과, 제안된 나선 직교진폭변조는 매우 심한 수준의 위상잡음 환경에서도 기존 성상도에 비하여 훨씬 향상된 심볼오류성능을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 제안된 나선 직교진폭변조는 위상잡음의 영향이 크게 나타나는 코히어런트 광통신시스템과 직교 주파수분할다중화 시스템에 유용한 변조방법인 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new design method of signal constellation of the spiral quadrature amplitude modulation (QAM) exploiting a modified gradient descent search algorithm and its binary mapping rule. Unlike the conventional method, the new method, which uses and the constellation optimization algorithm and the maximum number of iterations as a parameter for the iterative design, is more robust to phase noise. And the proposed binary mapping rule significantly reduces the average Hamming distance of the spiral constellation. As a result, the proposed spiral QAM constellation has much improved error performance compared to the conventional ones even in a very severe phase noise environment. It is, therefore, considered that the proposed QAM may be a useful modulation format for coherent optical communication systems and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems.

키워드 : 신호성상도, 직교진폭변조, 경사하강검색법, 광통신시스템, 직교 주파수분할다중화

Keywords : Signal constellation, Quadrature amplitude modulation (QAM), Gradient descent search (GDS), Optical communication, Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)

Received 28 August 2019, Revised 6 September 2019, Accepted 30 September 2019

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

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

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.3.398>

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

신호의 위상과 진폭을 동시에 정보 전송에 사용하는 직교진폭변조(quadrature amplitude modulation, QAM)는 가장 널리 사용되는 디지털 변조방법 중 하나이다[1]. 직교진폭변조 신호성상도의 각 심볼은 일반적으로 Gray 부호를 사용하여 이진단어(binary word)로 사상된다. Gray 부호에서 인접한 심볼의 이진단어는 1 [bit] 차이를 가지므로 신호성상도의 평균 해밍거리는 이론상 최소값인 $d_H^{ave}(C) = 1$ [bit]이다[2]. 이 경우 비트오류확률은 $P_b \approx P_s/N_b$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 P_s 는 심볼오류 확률이고 $N_b(= \log_2 M)$ 는 이진단어의 비트 수, M 은 심볼의 수를 나타낸다.

한편, 위상잡음은 직교진폭변조를 이용하는 디지털 전송시스템의 성능을 열화시키는 주요 원인들 가운데 하나이다[3,4]. 특히, 고차 직교진폭변조 성상도를 신호 사상으로 사용하는 직교 주파수분할다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)나 레이저빔의 선포에 대한 제약이 심한 광통신에서 위상잡음은 성능에 치명적인 영향을 미친다[5,6]. 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로 비균일 직교진폭변조, 진폭-위상편이변조, 나선 직교진폭변조 등이 제안된 바 있다[7]. 특히, 나선 직교진폭변조는 기존 직교진폭변조에 비하여 스펙트럼 효율을 증가시킬 수 있는 것으로 알려지면서 최근 많은 연구가 수행되고 있다[8-10]. 여기서는 단일 나선팔(spiral arm) 궤적방정식을 계산하여 전체 신호점의 1/4개를 배정한 다음, 이를 90°씩 회전시켜 2차원 신호성상도를 완성한다[8].

나선 직교진폭변조 성상도는 나선팔 궤적을 따라 원점에서 멀어질수록 신호점의 판정영역(decision region)이 넓어지므로 인접 심볼의 수가 일정하지 않다[10]. 이는 심볼에 대한 이진사상 방법으로 Gray 부호를 적용하지 못할 수 있음을 의미한다. 따라서 일부 심볼은 이웃하는 심볼과 2 [bit] 이상의 해밍거리를 가질 수 있으므로 나선 직교진폭변조의 평균 해밍거리를 최소화시키기 위한 새로운 이진사상기술이 요구된다.

본 논문에서는 변형된 경사하강검색법(gradient descent search, GDS)을 이용한 새로운 나선 직교진폭변조의 설계방법과 이를 위한 새로운 이진사상규칙을 제시한다. 기존 설계방법과는 달리 새로운 경사하강법은 최대 반복횟수와 함께 신호성상도의 평균 심볼오류가 전역 최

소에 도달하도록 심볼오류의 변화를 반복설계 판정을 위한 변수로 사용한다. 또한, 성상도에 이진단어를 대응시키는 사상규칙은 설계 및 구현의 용이성을 위하여 4분면의 대칭성과 이진논리연산을 이용한다. 그 결과, 변형된 GDS 알고리즘은 성상구조를 최적화하여 심볼 간 최소 유클리드거리를 증가시킴으로써 위상잡음에 대한 허용 오차와 심볼오류 성능을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한, 새로운 이진사상기술은 고차 나선 성상도의 평균 해밍거리를 감소시킴으로써 비트오류를 크게 개선할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 제안된 나선 직교진폭변조는 위상잡음에 대한 강인성이 요구되는 코히어런트 광통신이나 직교 주파수분할다중화를 이용하는 미래 디지털 전송시스템을 위한 유용한 변조형태가 될 것으로 판단된다.

II. 변형 경사하강검색 알고리즘

목표값과 추정치 사이의 편차를 단계적 반복검색을 통하여 최소화시키는 경사하강검색 알고리즘에서 반복식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{k+1} = a_k - \Delta_k s(k), \quad (1)$$

여기서 Δ_k 는 k 번째 반복연산을 위한 스텝크기이고, $s(k)$ 는 경사방향을 나타내며, 손실함수의 미분으로 결정된다. 스텝크기가 지나치게 크면 손실함수가 발산할 수 있고, 너무 작으면 수렴속도가 느려 목표값에 수렴되지 않는 경우도 발생한다.

신호성상도의 최적화는 주어진 조건에서 통신시스템의 심볼오류가 최소가 되는 신호집합 $\mathbf{S} = \{S_R\}$ 을 구하는 것이다[3]. 위상잡음이 있는 영평균 가우시안잡음 채널에서 심볼오류확률은 일반적으로 다음과 같다.

$$P(\mathbf{S}_R | \mathbf{S}_T, \theta) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi} \mathbf{A}} e^{-\mathbf{A}^2/2}, \quad (2)$$

여기서 \mathbf{S}_T 와 \mathbf{S}_R 은 송신과 수신된 심볼을 각각 나타내며, θ 는 위상잡음의 크기이다. 그리고 \mathbf{A} 는 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{A} = \frac{(\mathbf{S}_R - \mathbf{S}_T) \times [\mathbf{S}_R + \mathbf{S}_T(1 - 2e^{j\theta})]}{2\sqrt{N_0} \|\mathbf{S}_R - \mathbf{S}_T\|}, \quad (3)$$

여기서 N_0 는 단측 가우시안 잡음 전력을 나타내고, $\|x\|$ 는 복소수 x 의 크기이다. 신호성상도 상의 모든 심볼이 동일한 사전확률(a priori probability)을 가지는 것으로 가정하면 직교진폭변조 성상도의 평균 심볼오류확률(symbol error probability, SEP)은

$$P_e = \frac{1}{N} \sum_{T=1}^N \sum_{R \neq T} P(S_R | S_T, \theta) \quad (4)$$

이 된다. 여기서 N 은 성상도 상의 심볼수이다.

식(4)를 만족하는 신호성상도를 구하기 위하여 반복 검색법이 자주 사용된다. 특히, 기존 GDS 알고리즘은 가산성 백색 가우시안잡음 채널에서 식(4)를 만족하는 최적 성상도를 구하는 목적으로 사용된다. 본 논문에서는 이를 변형하여 가우시안잡음과 위상잡음이 동시에 존재하는 전송채널에서 나선 직교진폭변조 신호성상도의 최적 구조를 구하는 것으로 확장한다.

m 번째 반복검색을 통하여 얻은 신호집합을 $S_m = (s_1^{(m)} s_2^{(m)} \dots s_N^{(m)})^T$ 라고 하면 식(1)의 갱신을 통한 $(m+1)$ 번째 반복검색 후 새로운 신호집합은

$$S_{m+1}^* = S_m - \Delta \cdot \{\nabla P_e(S_m)\} \quad (5)$$

이 된다. 여기서 $\nabla P_e(S_m)$ 는 S_m 에서 P_e 의 경사벡터를 나타내며, P_e 가 감소되면 음의 값을 가진다. 신호집합의 평균 전력은 $\|S_m\|^2 = \sum_{i=1}^N \|s_i^{(m)}\|^2 = 1$ 로 정규화된다. 새로운 성상도는 다음과 같이 정규화시킨다.

$$S_{m+1} = \frac{S_{m+1}^*}{\|S_{m+1}^*\|} \quad (6)$$

이를 식(4)에 적용함으로써 가우시안잡음과 위상잡음이 동시에 존재하는 전송환경에서 심볼오류확률을 근사적으로 최소화시키는 최적 신호성상도를 구할 수 있다. 이와 같은 성상도 최적화 알고리즘 기반 변형 경사하강법의 수행과정을 그림 1의 흐름도에 나타내었다.

새로운 알고리즘에서는 반복검색이 수행될 때마다 탐색방향 결정을 위하여 목적함수를 점진적으로 감소시키는 음경사하강(negative gradient descent)을 이용한다. 최초 실행을 위하여 6개 파라미터의 초기값과 반복 카운터를 설정하고 식(5)에 따라 새로운 성상도를 구하여 정규화시킨 다음 평균 심볼오류확률을 계산한다. 새로운 심볼오류확률이 이미 저장된 최소값보다 작으면 심볼오류확률을 갱신하여 저장하고 그렇지 않으면

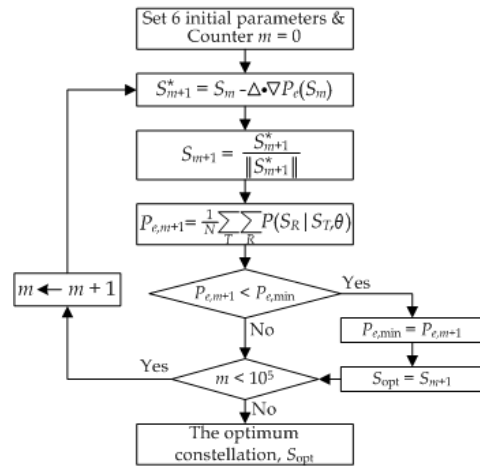


Fig. 1 The flow chart for the modified GDS algorithm

장된 최소값을 유지한 상태로 반복검색을 재수행한다. 이와 같은 과정은 반복검색 회수가 설정된 최대 회수에 도달할 때까지 반복된다.

III. 새로운 이진사상규칙

이진사상규칙은 성상도 상의 심볼에 이진단어를 사상시키는 것으로 인접 심볼 간 해밍거리(Hamming distance)가 1 [bit]가 되는 Gray 부호가 가장 대표적이다. 하지만 나선 직교진폭변조의 경우 독특한 성상구조로 인해 Gray 부호를 이용한 이진사상이 용이하지 않다 [7]. 일례로 나선 64-QAM 신호성상도에 대한 기존 이진사상 결과를 그림 2에 나타내었다. 여기서 x 는 인접 심볼 간 해밍거리가 2 [bit]인 심볼 경계이고 \bullet 는 3 [bit]인 경계를 나타낸다. 따라서 고차 나선 신호성상도의 경우 평균 해밍거리가 최적인 1 [bit]보다 훨씬 커지므로 Gray 부호에 비하여 효율이 크게 저하된다.

기존 이진사상의 문제점 완화를 위한 방법으로 동일한 경계를 공유하는 필드의 수가 최소화되도록 필드 분포를 조정한다. 여기서 필드는 하나 이상의 심볼로 구성된 신호성상도의 특정 영역을 의미한다. 예를 들어, 그림 3은 그림 2에 나타낸 64-QAM에 대한 필드 분포이며, A, B, C, D로 표시된 필드는 4개의 심볼로 구성된다. 필드 A는 필드 B 및 C와 경계를 공유하지만 필드 D와는 공유경계가 없다. 경계를 공유하는 필드의 수가 감소됨

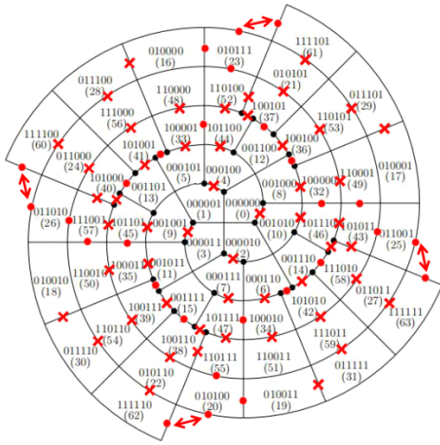


Fig. 2 Conventional binary mapping for the spiral 64-QAM

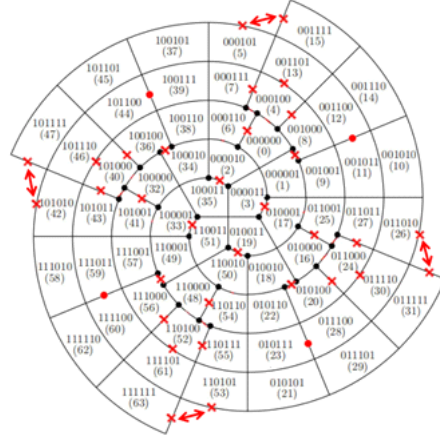


Fig. 4 The new binary mapping for the spiral 64-QAM

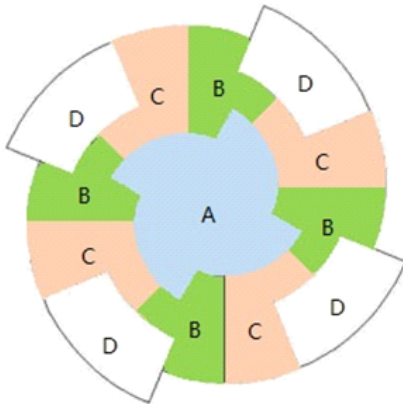


Fig. 3 An example of field distribution of spiral 64-QAM constellation for new mapping rule

에 따라 다중 비트 차이를 가지는 경계가 감소되므로 신호성상도의 평균 해밍거리도 감소된다.

나선 직교진폭변조 성상도는 하나의 나선팔에 위치한 신호점들을 회전하거나 대칭시켜 나머지 신호점의 좌표를 결정할 수 있다. 따라서 신호점에 사상되는 이진 단어도 회전 또는 대칭에 대응하는 간단한 이진연산으로 구현 가능하다. 새로운 성상도에 대한 이진사상 연산을 요약하여 표 1에 나타내었다. 여기서 $(x + yi)$, $x > 0, y > 0$ 는 1사분면에 위치한 신호점의 좌표를 복소수로 나타낸 것이고, $B\{(x + yi)\}$ 는 신호점 $(x + yi)$ 에 대한 이진 단어를 나타낸다. 그리고 OR는 두 개의 이진단어에 대한 비트별 논리합(bitwise logical OR) 연산이다.

예를 들어, 나선 64-QAM 성상도의 1사분면 신호점

Table. 1 The new mapping operation for spiral 64-QAM

Quadrant		Mapping operation
From	To	
1	2	$B\{(-x + yi)\} = B\{(x + yi)\}$ OR '100000'
1	3	$B\{(-x - yi)\} = B\{(x + yi)\}$ OR '110000'
1	4	$B\{(x - yi)\} = B\{(x + yi)\}$ OR '010000'

의 이진단어가 $B\{(x + yi)\} = '001100'$ 으로 가정하면 이에 대응하는 4사분면 심볼의 이진단어는 '001100' OR '010000' = '011100'으로 간단하게 구할 수 있다. 이는 기존 이진사상규칙에서 반시계방향으로만 수행되는 사상연산보다 훨씬 효과적이다. 이와 같은 신호성상도 필드 분포 조정과 사상연산을 적용하여 구한 64진 나선 직교진폭변조 성상도를 그림 4에 나타내었다. 그림 3에 나타난 기존 이진사상규칙에 비하여 2 [bit]와 3[bit] 심볼 경계의 수가 현저히 감소된 것을 확인할 수 있다.

IV. 모의실험 및 분석

4.1. 평균 해밍거리

일반적인 직교진폭변조와는 달리 나선 직교진폭변조 신호성상도는 불균일한 판정영역을 가지므로 해밍거리가 2 [bit] 이상인 심볼쌍이 다수 발생될 수 있다. 이러한 다중 비트 차이를 갖는 심볼 경계를 감소시키기 위하여 성상도의 필드 분포 조정과 새로운 이진사상규칙을 제시하였다. 일반적인 직교진폭변조와 기존 및 새로운 나

선 64-QAM에서 해밍거리가 2 [bit]와 3 [bit]인 인접 심볼쌍의 수와 그에 따른 평균 해밍거리를 계산하여 표 2에 나타내었다. 여기서 $S_{p,2-bit}$ 와 $S_{p,3-bit}$ 는 해밍거리가 2 [bit]와 3 [bit]인 인접 심볼쌍의 수이다.

Table. 2 Average Hamming distance of 64-QAMs

	$S_{p,2-bit}$	$S_{p,3-bit}$	d_H^{ave} , [bit]
64-QAM	0	0	1.0
Conventional spiral 64-QAM	52	24	1.678
Proposed spiral 64-QAM	28	4	1.255

일반적인 균등분포 직교진폭변조는 Gray 부호를 사용하므로 최적 평균 해밍거리인 $d_H^{min} = 1$ [bit]를 보장할 수 있다. 하지만 기존 64진 나선 직교진폭변조 성상도의 평균 해밍거리는 1.678 [bit]로 현저히 증가된다. 이에 비하여 새로운 이진사상규칙을 이용하는 경우 평균 해밍거리는 1.255 [bit]로 25.2% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 이진사상규칙은 기존의 방법에 비하여 훨씬 효과적인 것으로 판단된다.

4.2. 모의실험

제안된 나선 직교진폭변조 신호성상도와 새로운 이진사상규칙의 성능을 확인하기 위해 모의실험이 수행되었다. 변형 GDS 알고리즘을 위한 6개의 초기 파라미터는 표 3과 같이 설정되었다. 전송채널은 그림 5에 나타난 것처럼 백색 가우시안잡음과 위상잡음으로 구성된다. 여기서 위상잡음은 $0, \pi/20, \pi/10$ [rad]로 정하였다. $\theta = 0^\circ$ 는 순수 가산성 백색 가우시안잡음 채널이며, 오류성능에 대한 기준으로 사용된다. $\theta = \pi/20$ [rad]은 비교적 온건한 수준의 위상잡음이고, $\theta = \pi/10$ [rad]는 매우 심한 위상잡음 환경이다. 심볼오율 분석을 위한 모의 실험에는 10^8 개의 심볼을 사용하였다.

기존의 나선 64진 직교진폭변조의 신호성상도와 새로운 신호성상도를 그림 6에 비교하여 나타내었다. 기존 성상도에서 심볼 간 최소 유클리드거리는 0.279로 계산되었으나 새로운 성상도에서는 0.296으로 근소하지만 증가된 것으로 나타났다.

한편, AWGN과 위상잡음에 의하여 왜곡된 수신신호를 이용하여 생성한 신호성상도들을 그림 7에 나타내었다.

Table. 3 The initial parameters for the modified GDS algorithm

Parameter	Description	Initial value
θ	Phase noise	$0, \pi/10, \pi/20$ [rad]
$N_0/2$	Average power of WGN	depending on simulation
S_0	Initial signal set	64-QAM
Δ	Step size for iteration	0.0001
$P_{e,min}$	The minimum SEP	SEP of the 64-QAM
S_{opt}	Optimum signal set having $P_{e,min}$	

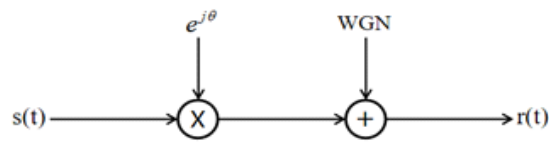


Fig. 5 Transmission channel model

여기서 백색 가우시안잡음의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 40 [dB]이고, 위상잡음은 $\pi/10$ [rad]으로 하였다. 그림을 통하여 나선팔의 내부에 위치한 신호점보다 외곽의 신호점들에서 위상잡음의 영향이 훨씬 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 동일한 조건으로 왜곡된 두 신호성상도의 성능차이를 육안으로 확인하는 것은 매우 어렵다.

백색 가우시안잡음의 신호대 잡음비와 위상잡음의 크기 변화에 따른 심볼오율(symbol error rate, SER) 모의실험 결과를 그림 8에 나타내었다.

균일분포 64-QAM은 위상잡음이 없는 순수 가산성 백색 가우시안잡음 채널에서는 가장 우수한 심볼오류 성능을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 위상잡음이 더해지면 오류성능이 매우 심각하게 열화된다. 특히, 위상잡음이 $\pi/10$ [rad]으로 매우 심한 경우 신호대 잡음비가 증가되어도 $SER = 10^{-1}$ 정도에서 포화되어 더 이상 성능 향상을 기대할 수 없다. 따라서 일반적인 직교진폭변조는 위상잡음에 매우 취약한 것을 확인할 수 있다.

한편, 64진 나선 직교진폭변조의 경우 백색 가우시안잡음과 위상잡음이 동시에 존재하더라도 신호대 잡음비가 증가됨에 따라 심볼오율이 감소되는 것으로 나타났다. 특히, 새로운 나선 직교진폭변조는 기존 방법에 비하여 훨씬 우수한 오류성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 가령, 위상잡음이 $\pi/20$ [rad]일 때, 새로운 성상도

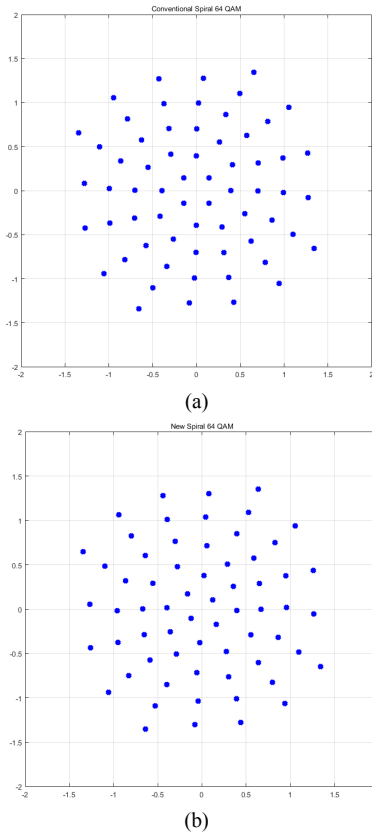


Fig. 6 The original constellations of spiral 64-QAM (a) the conventional (b) the proposed

가 적용된 디지털통신시스템은 $SER = 10^{-3}$ 에서 기존 방법보다 1.68 [dB] 가량 우수한 성능을 보인다. 또한, 위상잡음을 $\pi/10$ [rad]로 증가시키면 제안된 신호성상도는 $SER = 10^{-3}$ 에서 기존 성상도보다 약 2.52 [dB] 개선된 성능을 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 성능개선의 주된 이유는 변형 경사하강검색법의 성상도 최적화 알고리즘과 새로운 이진사상규칙의 적용 때문인 것으로 분석된다.

V. 결론

본 논문에서는 변형 경사하강검색법을 이용한 새로운 나선 직교진폭변조 신호성상도와 이를 위한 새로운 이진사상규칙을 제시하였다. 기존 방법과는 달리 새로운 검색법은 반복설계를 위한 파라미터로 최대 반복 횟

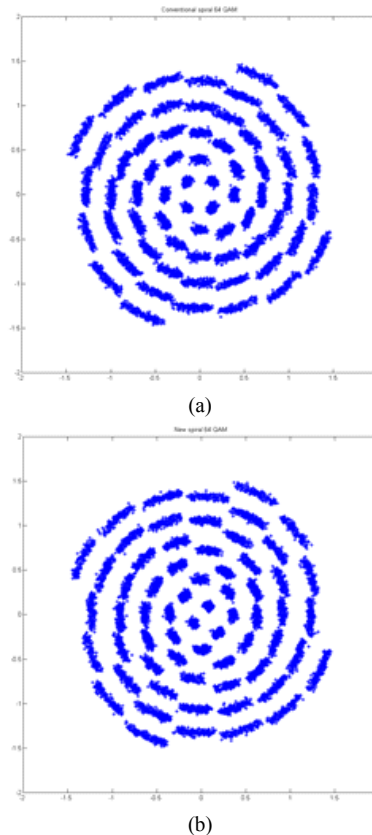


Fig. 7 The received constellations in the presence of AWGN and phase noise (a) the conventional (b) the proposed

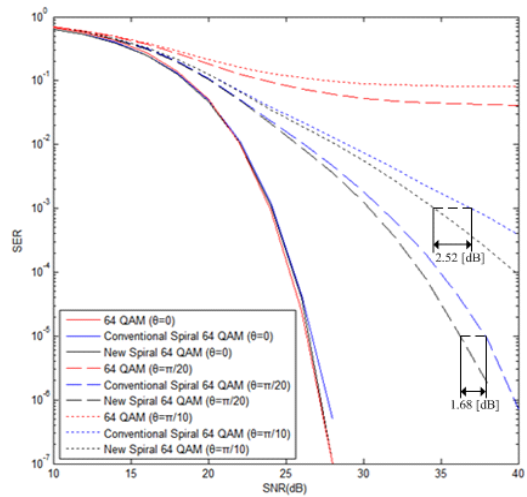


Fig. 8 The SERs of 64-QAMs

수뿐만 아니라 성상도 최적화 알고리즘을 사용하여 위상잡음에 더욱 강인한 특성을 가진다. 또한, 새로운 이진사상기법은 나선 직교진폭변조 성상도에서 동일한 경계를 공유하는 필드 수를 최소화하도록 필드 분포를 조정함으로써 기존 사상 규칙에 비하여 다중 비트 경계의 수를 크게 감소시킨다. 모의실험 결과, 제안된 나선 직교진폭변조는 기존 성상도에 비하여 위상잡음에 대한 강인성이 증가되어 훨씬 향상된 심볼오류성능을 가지는 것으로 확인되었다. 또한, 새로운 이진사상규칙은 고차 나선 직교진폭변조 성상도의 평균 해밍거리를 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 나선 직교진폭변조는 위상잡음이 오류성능에 크게 영향을 미치는 코히어런트 광통신시스템과 직교 주파수분할다중화 시스템을 사용하는 미래 디지털 전송시스템에 유용한 변조방법인 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] J. G. Proakis, and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2008.
- [2] S. Xia, and F. Fu, "On the average Hamming distance for binary codes," *Discrete Applied Mathematics*, vol. 89, no. 1-3, pp. 269-276, Dec. 1998.
- [3] Y. Li, S. Xu, and H. Yang, "Design of signal constellations in the presence of phase noise," in *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference*, Calgary, Canada, pp. 970-974, Sep. 2008.
- [4] R. Krishnan, A. Graell i Amat, T. Eriksson, and G. Colavolpe, "Constellation optimization in the presence of strong phase noise," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 12, pp. 5056-5066, Dec. 2013.
- [5] X. Hong, X. Hong, J. Zhang, and S. He, "Low-complexity linewidth-tolerant time domain sub-symbol optical phase noise suppression in CO-OFDM systems," *Optics Express*, vol. 24, no. 5, pp. 4856-4871, Feb. 2016.
- [6] Y. Li, K. Morgan, W. Li, K. Miller, R. Watkins, and E. G. Johnson, "Multi-dimensional QAM equivalent constellation using coherently coupled orbital angular momentum (OAM) modes in optical communication," *Optics Express*, vol. 26, no. 23, pp. 30969-30977, Nov. 2018.
- [7] P. Larsson, "Golden angle modulation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 1, pp. 98-101, Feb. 2018.
- [8] B. Kwak, N. Song, B. Park, and D. Kwon, "Spiral QAM: A novel modulation scheme robust in the presence of phase noise," in *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference*, Calgary, Canada, pp. 1014-1018, Sep. 2008.
- [9] H. Chu, "Is spiral modulation really useful?," M.S. thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2016.
- [10] S. G. Kang, A Method of Designing Spiral QAM, Korean Patent 10-2081648, Republic of Korea, 2020.



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