
상진폭 특성을 가지는 새로운 3차원 16진 신호성상도의 설계

최재철* · 강석근**

Design of a New 3-D 16-ary Signal Constellation with Constant Envelope

Chae Cheol Choe* · Seog Geun Kang**

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업 (NIPA-2011-C1090-1131- 0007)과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2011-0009443)의 결과임.

요 약

본 논문에서는 디지털통신을 위한 새로운 3차원 16진 신호성상도의 설계방법을 제시하고 그 성능을 분석한다. 기존의 성상도와는 달리 새로운 성상도는 모든 신호점들이 구의 표면에 균일하게 분포하므로 상진폭과 대칭적 구조 특성을 동시에 만족한다. 신호성상도의 평균전력을 정규화시킨 경우 제시된 16진 신호성상도는 기존의 비상진폭(non-constant envelope) 성상도들에 비하여 최대 11.4% 가량 증가된 최소 유클리드 거리를 가지는 것으로 나타났다. 이로 인하여 가산성 백색 가우시안 잡음 환경에서 제안된 신호성상도가 적용된 디지털 통신시스템의 심볼오율은 기존 성상도를 이용하는 시스템에 비하여 1.2dB 가량 향상됨을 확인할 수 있다. 유클리드 거리 측면에서 최적화된 기존 상진폭 신호성상도에서는 신호점들이 구의 표면에 균일하게 분포하지 않는 반면 새로운 성상도는 3차원 신호공간에서 완전 대칭인 신호점 분포를 가진다. 이와 함께 기존의 성상도에 비하여 제안된 성상도에서는 설계에 요구되는 연산복잡도가 거의 없는 장점이 있다. 따라서 제안된 3차원 16진 신호성상도는 편광편이키잉과 같이 상진폭 특성이 요구되는 디지털 통신시스템에 적합한 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In this paper, design of a new 3-dimensional (3-D) 16-ary signal constellation with constant envelope is presented and analyzed. Unlike the conventional 16-ary constellations, all signal points of the new constellation are uniformly located on the surface of a sphere so that they have a unique amplitude level and a symmetrical structure. When average power of the constellations is normalized, the presented 16-ary constellation has around 11.4% increased minimum Euclidean distance (MED) as compared to the conventional ones that have non-constant envelope. As a result, a digital communication system which exploits the presented constellation has 1.2dB improved symbol error rate (SER). While signal points of the conventional constant-envelope constellation are not distributed uniformly on the surface of a sphere, those of the proposed constellation has a completely symmetric distribution. In addition, the new signal constellation has much lower computational complexity for practical implementation than the conventional one. Hence, the proposed 3-D 16-ary signal constellation is appropriate for the application to a communication system which strongly requires a constant-envelope characteristic.

키워드

디지털통신, 광통신, 디지털변조, 편광편이키잉, 신호성상도

Key word

Digital communication, Optical communication, Digital modulation, Polarization shift keying, Signal constellation

* 준회원 : 경상대학교 공과대학 공학연구원
** 종신회원 : 경상대학교 반도체공학과 (교신저자)

접수일자 : 2011. 05. 26
심사완료일자 : 2011. 06. 21

I. 서 론

디지털 통신시스템의 변조기는 요구되는 성능과 채널의 특성 등을 고려하여 정보원에서 생성된 이진 데이터를 아날로그 형태의 신호로 변화시키는 장치이다. 이를 위하여 이진 정보를 유한 개의 원소로 구성된 신호집합(signal set)에 대응시킨다.

신호성상도(signal constellation)는 이와 같은 유한한 신호집합의 원소를 신호공간(signal space)의 좌표로 대응시켜 나타낸다. 일반적으로 디지털 통신시스템에서 신호공간은 2차원으로 구성된다. 이 경우 신호성상도를 구성하는 신호점(signal point)들은 서로 독립적인 복소수로 나타낼 수 있으며, 이를 통하여 직교형식(quadrature form)을 가지는 디지털 변조방식에 대한 기술적인 진보들이 이루어져 왔다. 현재 디지털 통신시스템에서 가장 대표적으로 사용되는 변조방식으로는 다중 레벨 위상편이키잉(multi-level phase shift keying, MPSK)과 직교진폭변조(quadrature amplitude modulation, QAM) 등을 들 수 있다.

신호성상도에서 인접한 신호점들 간의 최소 유클리드 거리(minimum Euclidean distance, MED)는 신호점이 분포하는 신호공간의 차원이 커질수록 증가되는 경향이 있다[1]-[3]. 최소 유클리드 거리가 증가되면 잡음여유도(noise margin)가 커지므로 오류성능이 향상된다. 이와 같은 특성을 이용하기 위하여 광통신시스템의 디지털 변조방식으로 편광편이키잉(polarization shift keying)이 광범위하게 연구된 바 있다[4]-[7]. 여기서는 스톱스 파라미터(Stokes' parameter)라고 불리는 신호점들이 포앵카레(Poincare) 구의 표면에 위치하는 3차원 신호성상도를 사용하였다. 최근에는 3차원 신호성상도를 신호사상기로 이용하는 직교 주파수분할다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 시스템이 제안된 바 있다[8], [9]. 이와 함께 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN) 채널에서 신뢰성 있는 통신을 위한 다차원 신호성상도(multidimensional signal constellation)의 설계 알고리즘에 대한 연구도 수행되었다[3]. 또한 Chen 등[9]과 Khabbazian 등[10]은 3차원 신호성상도를 이용하는 무선 통신시스템의 심볼오류확률(symbol error probability, SEP)을 이론적으로 계산한 결과를 제시한 바 있다.

3차원 신호성상도 관련 대부분의 기존 연구들에서는 4진과 8진 성상도를 주로 다루고 있다[3]-[6], [8]-[10]. 이는 3차원 신호공간에서 균등하게 신호점들을 분포시키기 위하여 구에 내접하는 정다면체의 꼭지점을 이용할 수 있는 설계의 편리성 때문이다. 예를 들어, 4진 성상도의 경우 구에 내접하는 정사면체(regular tetrahedron)의 꼭지점들을 신호점으로 사용한다. 하지만 기하학적으로 작도 가능한 정다면체 가운데 꼭지점의 수가 2의 자승수인 것은 정사면체와 정육면체(regular hexahedron)만 있다.

따라서 16개 이상의 신호점으로 구성되는 상진폭(constant envelope) 특성을 가지는 성상도를 설계하는 것은 매우 어렵다[11]. 이에 따라 Betti 등은[7] 반지름이 일정한 구의 표면에 신호점을 하나씩 더하면서 최소 유클리드 거리가 최대가 되도록 검색과 계산을 반복하여 신호점의 좌표를 정하는 방법으로 상진폭 16진 성상도를 구한 바 있다. 이 경우 신호점들 간의 유클리드 거리 면에서 최적인 성상도를 구할 수 있는 장점이 있다. 하지만 신호점이 추가될 때마다 모든 신호점들에 대한 새로운 좌표를 구하기 위한 계산량이 매우 크게 증가될 뿐만 아니라 설계된 성상도에서 신호점들이 균일하게 배열되지 않는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 [11]에서는 정사면체의 꼭지점에 네 개의 정사면체를 연결하는 정사면체 연결형(concatenated tetrahedron, CT)과 두 개의 정육면체를 동심구(concentric sphere)에 내접하도록 설계하는 정육면체 조합형(cube-in-cube, CIC) 성상도가 소개되었다. 또한 [12]에서는 정사면체의 꼭지점들과 정이십면체(regular icosahedron)의 12개 꼭지점을 이용하여 16진 성상도를 구현한 바 있다. 하지만 이러한 성상도는 비상진폭(non-constant envelope) 특성을 가지므로 편광편이키잉과 같이 일정한 신호파형의 진폭이 요구되는 디지털 통신시스템에는 적용할 수 없다.

본 논문에서는 이전 연구들에서 나타나는 문제점들을 해결하여 상진폭 특성을 가지면서도 구의 표면에 균일하게 분포하는 신호점들로 구성된 새로운 3차원 16진 신호성상도의 설계 방법을 제시한다. 그리고 새로운 신호성상도의 최소 유클리드 거리와 가산성 백색 가우시안 잡음 채널에서의 성능을 구하여 기존의 성상도들과 비교/분석한다. 이를 위하여 여기서는 구의 대원(great circle)에 내접하는 정팔각형에서 임의의 두 꼭지점을 이

용하여 대원의 상반구(upper hemisphere)와 하반구(lower hemisphere)에 각각 네 개씩의 정삼각형을 3차원으로 작도함으로써 모든 신호점들이 하나의 구면에 분포하도록 한다. 그 결과, 제안된 신호성상도는 [7]에서 구한 성상도에 비하여 최소 유클리드 거리가 다소 감소되며, 이로 인하여 오류성능이 약 0.8dB 가량 저하되는 것으로 나타났다. 하지만 새로운 성상도에서는 신호점의 좌표를 구하기 위한 반복 검색과 연산이 요구되지 않으므로 연산복잡도가 거의 없을 뿐만 아니라 균일한 신호점 분포로 인하여 신호공간에서의 판정영역(decision region)이 일정하므로 최적 수신기의 이론적 설계와 실제적 구현이 가능한 장점이 있다. 또한 기존의 비상진폭 16진 신호성상도에 비해서는 최소 유클리드 거리와 심볼오율(symbol error rate, SER) 면에서 최대 1.2dB 가량 향상이 있는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 신호성상도는 기존의 고속 광통신을 위한 편광편이키잉뿐만 아니라 향후 필요성이 요구되는 고품질 3차원 무선 통신시스템에의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 대표적인 3차원 신호성상도와 기존의 16진 성상도들에 대하여 기술한다. III장에서는 새로운 상진폭 16진 성상도의 설계 방법을 제시한다. IV장에서는 기존 성상도들과 새로운 성상도의 최소 유클리드 거리 특성과 오류 성능에 대하여 자세히 비교/분석한다. 끝으로 V장에서 제안된 신호성상도에 대한 결론과 향후 응용 가능 분야를 제시한다.

II. 대표적인 3차원 신호성상도

3차원 신호성상도는 서로 직교하는 세 개의 축으로 구성되는 신호공간에 분포하는 신호점들의 집합이다. 가장 기본적인 형태의 3차원 신호성상도는 그림 1에 나타난 바와 같이 반지름이 일정한 구에 내접하는 정다면체의 꼭지점을 신호집합으로 사용하는 것이다. 여기서 $S(i), 0 \leq i \leq NS - 1$,는 성상도 상의 i 번째 신호점을 나타내고 NS 는 신호점의 수이다. 따라서 모든 신호점들은 구의 중심으로부터 동일한 거리에 있으므로 변조된 신호의 진폭이 일정한 상진폭 특성을 갖는다.

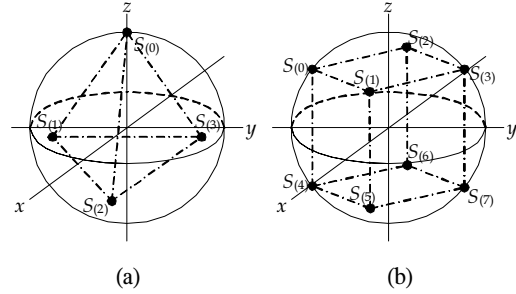


그림 1. 대표적인 상진폭 3차원 신호성상도 (a) NS = 4 (b) NS = 8.

Fig. 1. Typical constant-envelope 3-D signal constellations (a) NS = 4 (b) NS = 8.

구에 내접하는 정다면체는 정사면체, 정육면체, 정팔면체(regular octahedron), 정십이면체(regular dodecahedron), 정이십면체 등 다섯 가지이다. 이들 가운데 꼭지점의 수가 $2N$ 인 것은 그림 1에 나타난 두 종류만 있으므로 신호점의 수가 16개 이상인 상진폭 3차원 성상도는 전술한 방법으로는 설계할 수 없다. 이에 따라 [7]에서는 구의 표면에 최초 한 개 신호점의 좌표를 임의로 정한 다음 새로운 신호점을 하나씩 추가하면서 신호점들 간의 최소 유클리드 거리가 최대가 되도록 모든 신호점들의 좌표를 다시 계산하는 탐색 및 반복계산 알고리즘이 제시되었다. 이 방법에 의하면 임의의 첫 번째 신호점에 이어 두 번째 신호점이 구의 표면에 더해지면 반복계산 알고리즘이 수행됨에 따라 두 신호점은 구의 중심에 대하여 대칭이 되는 좌표를 갖도록 이동한다. 그리고 신호점의 수가 네 개인 경우 이 방법은 그림 1(a)에 나타난 성상도와 동일한 형태의 신호점으로 구성된 신호집합을 출력한다. 이러한 방법으로 설계된 상진폭 특성을 가지는 16진 성상도의 신호점들 간 유클리드 거리를 표 1에 나타내었다.

반지름이 1로 정규화된 구의 표면에 분포하는 신호집합에서 '0'번 신호인 $S_{(0)}$ 와 '1'번 신호인 $S_{(1)}$ 의 거리가 2이므로 이 신호들은 중심점에 대하여 대칭인 위치에 있다. 제시된 신호성상도에서 최소 유클리드 거리는 신호점 $S_{(1)}$ 과 $S_{(12)}$ 사이의 거리로 약 0.861이다. 표 1에서는 계산상의 오차를 고려하여 최소 유클리드 거리보다 2% 가량 큰 거리를 구별하여 표시하였다. $S_{(7)}$ 의 경우 다섯 개의 신호들이 인접하고 있는데 비하여 $S_{(6)}, S_{(11)}, S_{(13)}, S_{(14)}, S_{(15)}$ 는 두 개의 신호점들이 (최소 거리 + 2%) 범위에서 인

표 1. 기존 상진폭 3차원 16진 신호성상도의 거리 행렬[7]
Table 1. Distance matrix of the conventional 3-D 16-ary signal constellation with constant envelope

심볼	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0.000	2.000	1.803	0.869	0.862	0.863	0.865	1.798	1.421	1.433	1.405	1.358	1.807	1.286	1.794	1.786
1	2.000	0.000	0.862	1.799	1.803	1.807	1.805	0.876	1.402	1.400	1.423	1.471	0.861	1.531	0.890	0.895
2	1.803	0.862	0.000	1.561	1.254	1.940	1.561	1.488	0.865	1.574	0.867	1.910	0.904	1.741	1.518	0.989
3	0.869	1.799	1.561	0.000	0.917	1.479	1.499	1.529	0.866	1.896	1.583	1.483	1.944	0.870	1.915	1.219
4	0.862	1.803	1.254	0.917	0.000	1.485	0.951	1.932	0.867	1.607	0.866	1.855	1.561	1.598	1.961	1.560
5	0.863	1.807	1.940	1.479	1.485	0.000	0.893	1.556	1.889	0.866	1.567	0.865	1.559	1.380	1.240	1.923
6	0.865	1.805	1.561	1.499	0.951	0.893	0.000	1.938	1.604	0.874	0.866	1.576	1.258	1.806	1.568	1.959
7	1.798	0.876	1.488	1.529	1.932	1.556	1.938	0.000	1.554	1.564	1.895	0.869	1.493	0.877	0.878	0.868
8	1.421	1.402	0.865	0.866	0.867	1.889	1.604	1.554	0.000	1.915	1.194	1.861	1.574	1.347	1.888	0.867
9	1.433	1.400	1.574	1.896	1.607	0.866	0.874	1.564	1.915	0.000	1.193	1.239	0.864	1.803	0.870	1.889
10	1.405	1.423	0.867	1.583	0.866	1.567	0.866	1.895	1.194	1.193	0.000	1.928	0.866	1.954	1.627	1.626
11	1.358	1.471	1.910	1.483	1.855	0.865	1.576	0.869	1.861	1.239	1.928	0.000	1.654	0.884	0.904	1.517
12	1.807	0.861	0.904	1.944	1.561	1.559	1.258	1.493	1.574	0.864	0.866	1.654	0.000	1.925	0.990	1.519
13	1.286	1.531	1.741	0.870	1.598	1.380	1.806	0.877	1.347	1.803	1.954	0.884	1.925	0.000	1.476	1.040
14	1.794	0.890	1.518	1.915	1.961	1.240	1.568	0.878	1.888	0.870	1.627	0.904	0.990	1.476	0.000	1.468
15	1.786	0.895	0.989	1.219	1.560	1.923	1.959	0.868	0.867	1.889	1.626	1.517	1.519	1.040	1.468	0.000
평균	1.423	1.388	1.389	1.428	1.405	1.421	1.401	1.408	1.408	1.399	1.391	1.425	1.385	1.435	1.399	1.408

접하고 있음을 알 수 있다. 따라서 표 1에 제시된 성상도에서 신호점들은 균일하게 분포하지 않음을 알 수 있다. 이는 각 신호점들이 가지는 평균적인 유클리드 거리를 계산하면 확연히 드러난다.

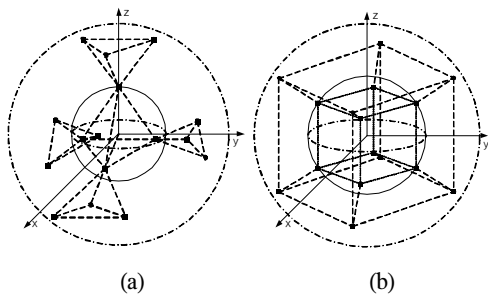


그림 2. 비상진폭 3차원 16진 신호성상도
(a) 정사면체 조합형 (b) 정육면체 조합형.
Fig. 2. 3-D 16-ary constellations with non-constant envelope (a) concatenated tetrahedrons (CT) (b) concatenated hexahedrons (cube-in-cube, CIC).

매우 과중한 연산복잡도를 가지는 Betti 알고리즘과는 달리 연산복잡도가 거의 없는 3차원 16진 신호성상도의 설계 방법이 최근 [11]에서 소개된 바 있다. 여기서는 그림 2에 나타낸 바와 같이 정사면체와 정육면체의 기하학적 조합/확장을 이용하였다. 이와 같은 성상도에서는 신호점들이 반지름이 서로 다른 동심구들의 표면에 분포되며, 표면적이 넓은 외부구에는 내부구보다 더 많은 신호점을 할당할 수 있다. 하지만 이 성상도들은 심볼에 따라 변조된 신호파형의 진폭이 서로 다른 비상진폭 특성을 가진다.

III. 새로운 상진폭 3차원 16진 신호성상도

기존의 상진폭 16진 성상도는 설계에 요구되는 연산량이 지나치게 크다. 또한 균일하지 않은 신호점들의 분포로 인하여 각각의 신호점이 서로 다른 판정영역을 가

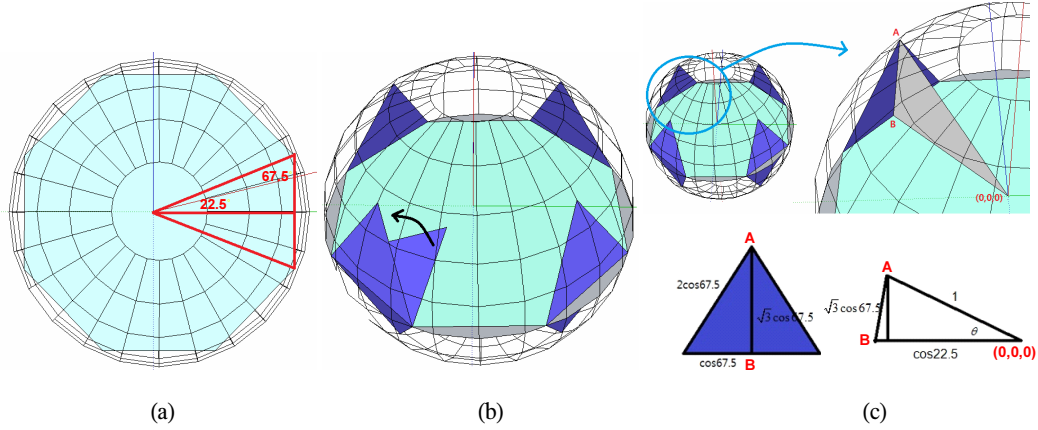


그림 3. 새로운 상진폭 3차원 16진 신호성상도의 설계 (a) 첫 번째 단계 (b) 두 번째 단계 (c) 세 번째 단계.
 Fig. 3. Design of a new 3-D 16-ary signal constellation with constant envelope (a) step 1 (b) step 2 (c) step 3.

지는 문제점이 있다. 이에 비하여 비상진폭 특성을 가지는 신호성상도들은 간단하게 설계할 수 있는 장점은 있으나 두 개의 전력레벨을 가진다. 이로 인하여 편광편이 키잉과 같이 단일모드 광섬유나 상진폭 특성이 요구되는 데이터 전송시스템에의 적용에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여기서는 상진폭 특성을 가지는 새로운 3차원 16진 신호성상도의 설계 방법을 제시한다.

Step 1: 반지름이 r 인 구에서 구의 중심을 포함하는 대면의 원주인 대원에 내접하는 정팔각형을 작도하여 여덟 개의 꼭지점을 신호점으로 정한다. 원의 중심과 두 개의 신호점은 그림 3(a)에 나타낸 것처럼 2등변 삼각형이 되므로 신호점 간의 거리는 다음과 같이 계산된다.

$$d = 2r \sin(22.5^\circ) \text{ 또는 } d = 2r \cos(67.5^\circ) \quad (1)$$

Step 2: 대원을 중심으로 상반구와 하반구의 표면에 각각 네 개씩의 신호점을 동일한 간격으로 배치한다. 이때 새로운 신호점과 대원 상의 인접한 두 신호점들이 정삼각형이 되도록 작도한다. 그러므로 그림 3(b)에 나타낸 것처럼 새로운 16진 성상도에서 모든 신호점들은 x, y, z 축에 대하여 서로 대칭일 뿐만 아니라 구의 중심에 대해서도 대칭인 구조를 가진다. 이는 새로운 성상도가 하나의 반지름을 가지는 3차원 구의 표면에 균등하게 분포

된 신호들의 집합으로 구성됨을 의미한다.

Step 3: 대원 상에 위치한 신호점들과는 달리 상반구와 하반구에 분포하는 신호점들의 경우 z 축 좌표가 정의 되어야 한다. 이는 그림 3(c)에 나타낸 바와 같이 구의 중심과 신호점, 그리고 신호점으로부터 대면에 내린 수선의 발이 이루는 직각 삼각형에 피타고라스 정리를 적용하여 구할 수 있다. 그 결과 대면에 대한 신호점의 z 축 좌표가 이루는 각은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\cos 45^\circ}{\cos 22.5^\circ} \right) \approx 40.06^\circ \quad (2)$$

이와 같은 세 가지 과정으로 설계된 신호성상도에서 신호점들 간의 유클리드 거리 행렬을 구하여 표 2에 나타내었다. 여기서 구의 반지름은 $r=1$ 이 되도록 하였다. 따라서 신호점들 간의 최소 유클리드 거리는 (1)에 의하여 0.765가 된다.

새로운 신호성상도에서 모든 신호점들은 유클리드 거리가 2인 원점 대칭 신호점을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 대원에 위치한 신호점 $S_{(0)} \sim S_{(7)}$ 들은 대원 상에서 인접하는 두 개의 신호점과 상반구와 하반구에 각각 한 개씩의 신호점들과 최소 유클리드 거리에 위치한다. 그리고 상반구와 하반구에 분포하는 신호점들은 대원 상에 위치한 두 개의 신호점들과 최소 거리 관계에 있는 것

표 2. 새로운 3차원 16진 신호성상도의 거리 행렬
Table 2. Distance matrix of the new 3-D 16-ary signal constellation

심볼	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
X	cos22.5°	cos22.5°	-cos22.5°	-cos22.5°	-cos67.5°	cos67.5°	-cos67.5°	cos67.5°	cos40.0°	0	-cos40.0°	0	cos40.0°	0	-cos40.0°	0
Y	cos67.5°	-cos67.5°	-cos67.5°	cos67.5°	cos22.5°	cos22.5°	-cos22.5°	-cos22.5°	0	cos40.0°	0	-cos40.0°	0	cos40.0°	0	-cos40.0°
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	sin40.0°	sin40.0°	sin40.0°	sin40.0°	-sin40.0°	-sin40.0°	-sin40.0°	-sin40.0°
0	0.000	0.765	1.414	1.848	<u>2.000</u>	1.848	1.414	0.765	0.765	1.189	1.848	1.608	0.765	1.189	1.848	1.608
1	0.765	0.000	0.765	1.414	1.848	<u>2.000</u>	1.848	1.414	1.189	0.765	1.608	1.848	1.189	0.765	1.608	1.848
2	1.414	0.765	0.000	0.765	1.414	1.848	<u>2.000</u>	1.848	1.608	0.765	1.189	1.848	1.608	0.765	1.189	1.848
3	1.848	1.414	0.765	0.000	0.765	1.414	1.848	<u>2.000</u>	1.848	1.189	0.765	1.608	1.848	1.189	0.765	1.608
4	<u>2.000</u>	1.848	1.414	0.765	0.000	0.765	1.414	1.848	1.848	1.608	0.765	1.189	1.848	1.608	0.765	1.189
5	1.848	<u>2.000</u>	1.848	1.414	0.765	0.000	0.765	1.414	1.608	1.848	1.189	0.765	1.608	1.848	1.189	0.765
6	1.414	1.848	<u>2.000</u>	1.848	1.414	0.765	0.000	0.765	1.189	1.848	1.608	0.765	1.189	1.848	1.608	0.765
7	0.765	1.414	1.848	<u>2.000</u>	1.848	1.414	0.765	0.000	0.765	1.608	1.848	1.189	0.765	1.608	1.848	1.189
8	0.765	1.189	1.608	1.848	1.848	1.608	1.189	0.765	0.000	1.083	1.532	1.083	1.286	1.681	<u>2.000</u>	1.681
9	1.189	0.765	0.765	1.189	1.608	1.848	1.848	1.608	1.083	0.000	1.083	1.532	1.681	1.286	1.681	<u>2.000</u>
10	1.848	1.608	1.189	0.765	0.765	1.189	1.608	1.848	1.532	1.083	0.000	1.083	<u>2.000</u>	1.681	1.286	1.681
11	1.608	1.848	1.848	1.608	1.189	0.765	0.765	1.189	1.083	1.532	1.083	0.000	1.681	<u>2.000</u>	1.681	1.286
12	0.765	1.189	1.608	1.848	1.848	1.608	1.189	0.765	1.286	1.681	<u>2.000</u>	1.681	0.000	1.083	1.532	1.083
13	1.189	0.765	0.765	1.189	1.608	1.848	1.848	1.608	1.681	1.286	1.681	<u>2.000</u>	1.083	0.000	1.083	1.532
14	1.848	1.608	1.189	0.765	0.765	1.189	1.608	1.848	<u>2.000</u>	1.681	1.286	1.681	1.532	1.083	0.000	1.083
15	1.608	1.848	1.848	1.608	1.189	0.765	0.765	1.189	1.681	<u>2.000</u>	1.681	1.286	1.083	1.532	1.083	0.000
평균	1.392	1.392	1.392	1.392	1.392	1.392	1.392	1.392	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411

도 확인할 수 있다. 따라서 기존 상진폭 성상도와는 달리 새로운 16진 성상도에서는 신호점들이 구면에 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그리고 제시된 상진폭 신호성상도를 설계하기 위한 세 가지 단계에서 요구되는 연산량은 매우 미미한 수준이다.

백색 가우시안 잡음 환경으로 가정한다. 이러한 전송 환경에서 수신신호 표본의 결합 확률밀도함수(joint probability density function)는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 m_x, m_y, m_z 는 수신신호 표본의 3축 방향 평균을 각각 나타낸다.

IV. 모의실험 및 분석

새로운 상진폭 3차원 16진 신호성상도의 성능을 확인하기 위하여 최소 유클리드 거리 분석과 컴퓨터 모의 실험이 수행되었다. 심볼오율을 구하기 위한 실험용 소프트웨어는 가장 일반적으로 이용되고 있는 Matlab을 사용하였으며, 전송심볼의 수는 2.5×10^8 으로 하였다. 그리고 전송채널은 평균이 0이고 분산이 σ^2 이며, 각 축 방향 랜덤변수는 서로 독립이고 동일한 확률분포(independent and identically distributed)를 가지는 가산성

$$P(x,y,z) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)^3}} \times \exp\left[-\frac{(x-m_x)^2 + (y-m_y)^2 + (z-m_z)^2}{2\sigma^2}\right], \tag{3}$$

모의실험에 사용된 모든 신호성상도의 평균전력(average power)을 1로 정규화시킨 경우 제안된 성상도와 기존의 성상도들에서 신호점 간의 최소 유클리드 거리를 계산하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 3차원 16진 신호성상도의 최소 유클리드 거리.
Table 3. The MEDs of 3-D 16-ary signal constellations.

Constellation		MED
Non-constant envelope	CT[11]	0.687
	CIC[11]	0.730
Constant envelope	Conventional[7]	0.861
	Proposed	0.765

새로운 성상도는 최소 유클리드 거리 면에서 최적화된 기존 상진폭 성상도에 비하여 약 11.0% 가량 감소된 최소 거리를 가지는 것으로 나타났다. 하지만 그림 2(a)의 정사면체 조합형(CT)과 그림 2(b)의 정육면체 조합형(CIC) 성상도에 비하여 약 11.4%와 4.8% 가량 최소 유클리드 거리가 증가됨을 알 수 있다. 이로 인하여 제안된 성상도는 기존 상진폭 성상도에 비해서는 약간의 성능 저하가 예상되는 반면 비상진폭 성상도들에 비해서는 향상된 오류 성능을 가질 것으로 예측된다.

신호성상도들의 최소 유클리드 거리 분석을 통하여 예측된 심볼오류 성능을 확인하기 위한 모의실험 결과는 그림 4에 나타내었다. 여기서 분석을 위한 심볼오류의 기준은 $P_s = 10^{-6}$ 으로 한다.

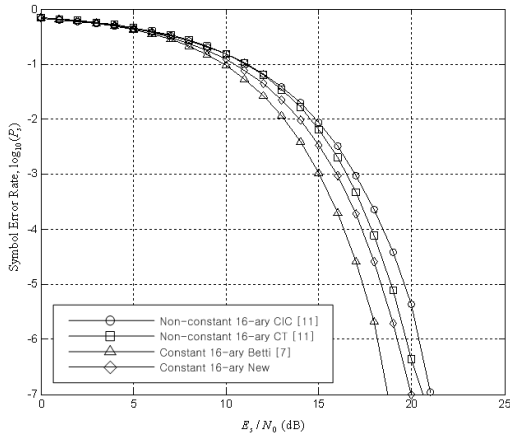


그림 4. 3차원 16진 신호성상도의 심볼오류.
Fig. 4. Symbol error rate of the 3-D 16-ary constellations.

제안된 16진 신호성상도를 이용하는 디지털 통신시스템은 기존의 비상진폭 성상도가 적용된 시스템에 비

하여 모든 신호 대 잡음비(signal-to-noise power ratio, SNR) 영역에서 우수한 심볼오류확률을 가지는 것으로 나타났다. 예를 들어, 기준 심볼오율인 $P_s = 10^{-6}$ 을 얻을 수 있는 신호 대 잡음비를 비교하면 전자의 경우 약 19.3dB 정도인 반면 후자는 정사면체 조합형 성상도의 경우 약 19.8dB와 정육면체 조합형일 경우 약 20.5dB 가량의 E_s/N_0 가 요구된다. 따라서 제안된 상진폭 16진 신호 성상도는 기존의 비상진폭 특성을 가지는 신호성상도에 비하여 최대 1.2dB 가량 오류성능을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다. 이에 비하여 기존 상진폭 성상도의 경우 기준 심볼오율에 도달하는 신호 대 잡음비는 약 18.6dB 가량이다. 따라서 신호점 간 최소 거리 분석에서 예상된 바와 같이 새로운 성상도는 기존 상진폭 성상도에 비하여 0.8dB 가량 성능 저하가 발생된다.

V. 결론

본 논문에서는 상진폭 특성을 가지는 새로운 3차원 16진 신호성상도의 설계방법을 제시하고, 신호성상도가 가지는 최소 유클리드 거리를 분석하였다. 그리고 가산성 백색 가우시안 잡음 채널에서 새로운 성상도가 가지는 오류 성능을 분석하였다. 그 결과, 새로운 성상도는 기존의 비상진폭 특성을 가지는 3차원 성상도에 비하여 최대 11.4% 가량 증가된 최소 유클리드 거리를 가지는 것으로 나타났다. 이로 인하여 디지털 통신시스템의 심볼오율을 약 1.2dB까지 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 반면에 새로운 신호성상도는 기존의 상진폭 16진 성상도에 비해서는 약간의 성능 저하를 초래하는 것으로 나타났다. 하지만 본 논문에서 제안된 상진폭 성상도는 기존의 상진폭 성상도에 비하여 설계 과정에서 요구되는 연산복잡도가 매우 미미한 수준이다. 또한 기존 성상도와는 달리 신호점들이 구의 표면에 균일하게 분포함에 따라 수신기에서 각 신호점에 대한 관정영역이 일정하게 나타나므로 최적 수신기의 설계를 용이하게 하는 장점도 있는 것으로 판단된다. 따라서 제안된 3차원 신호 성상도는 상진폭 특성이 요구되는 단일모드 광통신시스템이나 무선 통신시스템에의 적용에 매우 유리한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] L. Sznecinski and M. Bacic, "Constellations design for multiple transmissions: Maximizing the minimum squared Euclidean distance," *Proc. IEEE WCNC*, New Orleans, LA, pp. 1066-1071, Mar. 2005.
- [2] E. Biglieri and M. Elia, "Multidimensional modulation and coding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 34, no. 4, pp. 803-809, June 1988.
- [3] J.-E. Porath and T. Aulin, "Design of multidimensional signal constellations," *IEE Proc.-Commun.*, vol. 150, no. 5, pp. 317-323, Oct. 2003.
- [4] S. Benedetto and P. Poggiolini, "Theory of polarization shift keying modulation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, no. 4, pp. 708-721, Apr. 1992.
- [5] S. Benedetto and P. Poggiolini, "Multilevel polarization shift keying: Optimum receiver structure and performance evaluation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 2/3/4, pp. 1174-1186, Feb./Mar./Apr. 1994.
- [6] S. Benedetto, R. Gaudino, and P. Poggiolini, "Direct detection of optical digital transmission based on polarization shift keying modulation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 531-542, Apr. 1995.
- [7] S. Betti, G. De Marchis, and E. Iannone, "Polarization modulated direct detection optical transmission systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 12, pp. 1985-1997, Dec. 1992.
- [8] S. G. Kang, "An OFDM with 3-D signal mapper and 2-D IDFT modulator," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 871-873, Dec. 2008.
- [9] 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.
- [10] M. Khabbazzian, Md. J. Hossain, M.-S. Alouini, and V. K. Bhargava, "Exact method for the error probability calculation of three-dimensional signal constellation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 4, pp. 922-925, Apr. 2009.
- [11] Z. Chen, J. S. Bae, S.-K. Chung, J.-W. Koh, and S. G. Kang, "Multi-envelope 3-dimensional constellation for polarization shift keying," *Proc. ICTC 2010*, Jeju, Korea, Nov. 2010.
- [12] S. Benedetto and P. Poggiolini, "Combined amplitude and polarisation shift keying optical coherent modulation" *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 13, pp. 918-919, June 1990.

저자소개

최재철(Chae Cheol Choe)



2011년 8월: 경상대학교 대학원
반도체공학과 (공학석사)
2011년 9월 ~ 현재: 경상대학교
공학연구원, 책임연구원

※ 관심분야: 디지털통신, 디지털신호처리

강석근(Seog Geun Kang)



1999년 8월: 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)
2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교
공과대학 전기전자공학부,
부교수

2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교 공학연구원,
책임연구원

※ 관심분야: 디지털통신, 무선통신, 오류정정부호,
디지털신호처리, 통계적신호처리