

효율적 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 시스템 설계와 성능 평가

Design and Performance Evaluation of DAPSK System Using Efficient Constellation Assignment

안창영 · 유상범* · 이상규* · 유흥균

Changyoung An · Sang-Burm Ryu* · Sang-Gyu Lee* · Heung-Gyoon Ryu

요 약

위성통신에서는 낮은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio), 높은 전송효율, 낮은 BER(Bit Error Rate)을 갖는 변조 기술이 요구되며, DAPSK(Differential Amplitude and Phase Shift Keying) 변조는 이러한 요구조건을 만족시킬 수 있는 기술로 평가되고 있다. 그러나 기존 DAPSK 변조는 정규적인 성좌도를 사용하기 때문에 성좌도의 안쪽 동심원에 존재하는 심볼들의 유클리디안(Euclidean) 거리가 매우 가까워서 높은 성능을 내기에 적합하지 않다. 본 논문에서는 기존 DAPSK 시스템의 성능을 개선하기 위하여 대조표 기반의 효율적인 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 시스템을 제안하고 성능을 평가한다. 시뮬레이션 결과, 기존 16-DAPSK 시스템과 비교하여 효율적인 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템은 수신 심볼 검출기에 사용되는 심볼의 수 K 가 2일 때, 10^{-4} 의 BER 성능을 만족시키기 위한 SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 약 0.8 dB 개선할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In satellite communications, a modulation technique with a low peak-to-average power ratio, high transmission efficiency, and low bit error rate(BER) is required, and differential amplitude and phase shift keying(DAPSK) modulation technique has been appraised as a technology that meets these requirements. However, because conventional DAPSK modulation uses a regular constellation diagram, the Euclidean distance between the symbols in the inner concentric circles of the constellation are quite short. Such a characteristic degrades the BER. In this paper, we propose a DAPSK system that uses an efficient constellation assignment to improve the performance of existing DAPSK systems and evaluate the performance of the proposed scheme. From the simulation results, we confirm that the proposed 16-DAPSK system achieves a signal-to-noise ratio gain of 0.8 dB over the conventional approach at a BER condition of 10^{-4} when the number of symbols used in the symbol detector of the receiver is 2.

Key words: Efficient Constellation Assignment, DAPSK, APSK, Differential Coding, Asynchronous

I. 서 론

인공위성은 지상국으로부터 수신 받은 신호를 다른 지상국으로 증계하여 주거나, 지구를 공전하면서 위성의 탐

「이 논문은 2018년도 한국항공우주연구원의 지원을 받아 수행된 연구임. 그리고 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University)

*한국항공우주연구원 탑재체전자팀(Payload Electronics Team, Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received August 7, 2018 ; Revised September 7, 2018 ; Accepted September 7, 2018. (ID No. 20180807-079)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cbu.ac.kr)

채체를 통해 다양한 정보를 수집하여 이 정보를 지상국으로 송신해준다^[1]. 위성이 중계하는 멀티미디어 서비스는 고화질로 발전해 나가고 있으며, 탑재체 역시 다기능, 고정밀, 고해상도화 되고 있다. 이러한 흐름으로 인해 위성통신 시스템이 전송해야 하는 데이터양이 급격하게 증가하고 있으며 요구하는 신호품질이 높아지고 있다. 전력이 제한적인 위성통신 시스템에서 이러한 요구 조건을 만족시키기 위해서는 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)이 낮아 전력효율이 높고, 고성능, 고효율 특성을 갖는 변복조 기술이 요구된다. 이러한 조건들을 만족하는 변조 기술 중 하나로 APSK(Amplitude and Phase Shift Keying)가 있다^{[2]-[4]}. APSK는 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)보다는 HPA(High Power Amplifier) 비선형 왜곡에 강인하고, QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)보다는 높은 전송 효율을 달성할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 현재 APSK는 위성통신을 위한 핵심적인 기술로 평가되고 있다. 그러나 일반적인 동기식 APSK는 위상 모호성을 극복하기 위하여 정확한 CSI(Channel State Information)이 요구되며, 이를 위해 파일럿 오버헤드가 사용된다^[5]. 이러한 오버헤드는 전송 효율을 감소시키는 요인이다. 현재 위성통신에 대한 요구조건이 더욱 고도화 되고 있어, 이와 같은 문제점을 갖는 APSK를 개선하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

이러한 연구 중에 하나로 APSK에 차동 부호화 기술을 결합한 DAPSK(Differential APSK) 변조 기술이 있다^[3]. 차동 부호화를 사용하여 비동기식 수신을 할 경우 위상 모호성 문제가 해결되며, 따라서 파일럿 오버헤드로 인한 효율 감소 문제를 해결할 수 있다. 그러나 기존 DAPSK 시스템은 DASK와 DPSK를 결합하여 송수신기가 구성되기 때문에 정규적인 성좌도를 사용하지 못한다. 정규적 성좌도는 심볼간의 유클리디안(Euclidean) 거리가 짧은 부분이 다수 존재하여 일부 성능이 열화되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점은 성좌도를 효율적으로 구성하고 차동 부호화를 함으로써 개선시킬 수 있다. 일반적으로, 각 동심원에 동일한 수의 심볼이 구성된 정규적 성좌도 구성보다 각 동심원에 배치되는 심볼의 수가 균일하지 않은 성좌도 구성이 더욱 우수한 성능을 낼 수 있다. 이러한 특성으로 다양한 표준 문서에서 비균일적인 성좌

도 구성을 갖는 APSK를 채택하고 있다^[6].

본 논문에서는 기존 DAPSK 시스템의 성능을 개선시키기 위하여 효율적인 성좌도 배치법과 대조표 기반의 차동 부호 및 복호화 방법을 사용한 새로운 DAPSK 시스템을 제안하고, 시스템의 성능을 평가한다. 제안하는 시스템의 우수성을 보이기 위하여 정규적인 성좌도를 사용하는 기존 DAPSK 시스템의 성능과 제안하는 DAPSK 시스템의 성능을 비교 분석한다. 본 논문에서는 우선 기존 DAPSK 시스템을 살펴보고, 제안하는 시스템 모델을 설명한다. 그 다음 시뮬레이션을 통하여 각 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능을 평가하고 비교 분석한다.

II. 기존 DAPSK 시스템

2-1 기존 DAPSK 시스템 모델

기존 DAPSK 시스템은 DASK 및 DPSK 변복조기가 결합되어 구성된다. 즉, 기존 DAPSK 송신기에서는 진폭에 대한 차동 부호화와 위상에 대한 차동 부호화가 각각 수행된 후 두 신호가 곱해지며, 수신기에서는 수신된 이전 심볼과 현재 심볼 간의 진폭 정보 및 위상 정보를 이용하여 각각 차동 복호화를 수행한다. 이러한 방법으로 DAPSK 신호를 생성할 경우, 성좌도는 정규적인 형태로 구성된다. 정규적인 형태의 성좌도는 각 동심원마다 같은 수의 심볼로 구성되어 있다.

그림 1은 정규적 성좌도를 사용하는 기존 DAPSK 송신기의 블록도를 나타낸다. 이 시스템을 위해 설정된 진폭 레벨 및 위상 레벨에 따라 비트열은 나누어져 DASK 및 DPSK 변조기로 입력된다. DASK의 진폭 레벨을 M_a 라 하고, DPSK의 위상 레벨을 M_p 라 할 때, 각 변조기로 입력되는 비트 수는 각각 $m_a = \log_2(M_a)$ 와 $m_p = \log_2(M_p)$ 가 된다. 예를 들어 16(2,8)-DAPSK 시스템의 경우 진폭이 2개이며, 위상이 8개이고, 각 변조기에 입력되는 비트의 수는 각각 1개와 3개가 되어 총 하나의 DAPSK 심볼에 4개의 비트가 맵핑되게 된다. DASK 변조기에서는 이전 심볼과 입력되는 비트에 따라 다음 심볼이 결정된다. DPSK 변조기에서는 우선 입력되는 비트가 PSK로 변조된다. 그 다음 이전 심볼과 현재 심볼이 곱해져서 다음 심볼이 생성된다. 마지막으로 두 변조기의 신호는 서로 곱

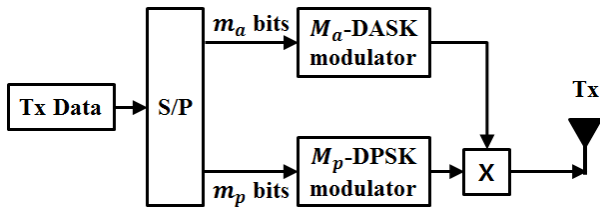


그림 1. 정규적 성좌도를 사용하는 기존 DAPSK 송신기의 블록도

Fig. 1. Block diagram of conventional DAPSK transmitter with regular constellation.

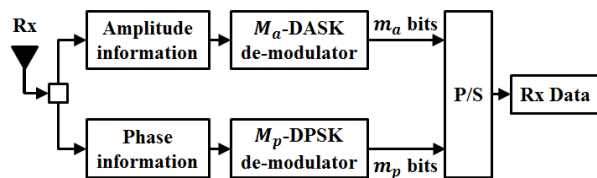


그림 2. 정규적 성좌도를 사용하는 기존 DAPSK 수신기의 블록도

Fig. 2. Block diagram of conventional DAPSK receiver with regular constellation.

해져서 DAPSK 변조 심볼이 생성된다.

그림 2는 정규적 성좌도를 사용하는 기존 DAPSK 수신기의 블록도를 나타낸다. 이 수신기의 처리과정을 살펴보면, 수신 받은 심볼은 진폭 정보와 위상 정보로 나뉘어져서 각 복조기에 입력된다. DASK 복조기에서는 송신기에서 사용한 현재 심볼과 이전 심볼 간의 규칙을 이용하여 비트를 판정하며, DPSK 복조기에서는 현재 심볼에서 이전 심볼을 나눈 뒤 얻어지는 위상정보를 PSK 복조하여 비트를 판정한다.

2-2 Regular 성좌도

기존 DAPSK 시스템은 다양한 진폭 레벨과 위상 레벨을 선택하여 성좌도를 구성할 수 있으며, 각 동심원에는 동일한 수의 심볼이 배치된다. 그림 3은 16(2,8)-DAPSK 성좌도를 나타낸다. 이 성좌도는 진폭 레벨이 2개이고, 위상 레벨이 8개이다. 따라서 2개의 동심원에 8개의 위상을 갖는 심볼이 각각 배치된다. 16(4,4)-DAPSK 성좌도의 경우, 4개의 진폭 레벨을 가지며, 4개의 위상 레벨을 갖는다.

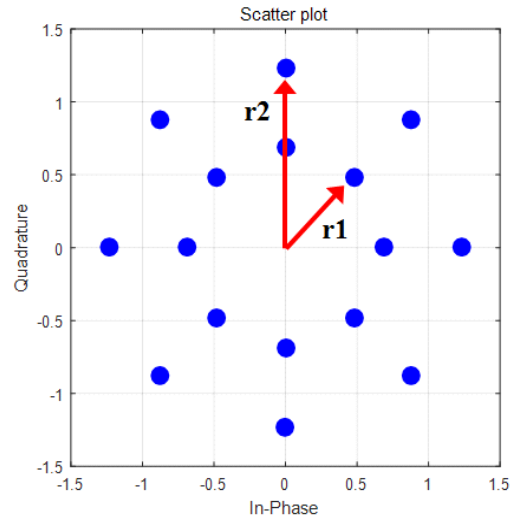


그림 3. 정규적 16-DAPSK 성좌도 구성

Fig. 3. Constellation structure of regular 16-DAPSK.

이 성좌도는 4개의 동심원에 4개의 위상을 갖는 심볼이 배치된다. 이와 같은 정규적인 성좌도 배치 방법에서는 각 동심원이 갖는 진폭의 비율에 따라서 시스템의 성능이 변화될 수 있다. 그림 3의 성좌도는 2개의 동심원이 존재하므로 안쪽 동심원의 진폭을 r_1 이라 하고, 바깥쪽 동심원의 진폭을 r_2 라 할 때, r_2/r_1 의 비율에 따라 시스템의 성능이 변화된다. 따라서 효율적인 r_2/r_1 의 비율을 찾는 것이 중요하다. 이러한 정규적인 성좌도의 구성은 각 동심원 상에 존재하는 심볼의 개수가 같기 때문에 안쪽 동심원의 심볼간 유클리디언 거리가 짧아져서 성능 열화를 야기할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 보다 효율적으로 성좌도를 구성하는 방법을 생각해볼 수 있다.

III. 제안하는 DAPSK 시스템

3-1 시스템 모델

본 논문에서는 기존 DAPSK 시스템의 성능을 개선하기 위하여 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 변조 시스템을 설계한다. 제안하는 시스템은 정규적이지 않은 성좌도 구성을 사용하기 때문에 기존 DAPSK와 같이 DASK와 DPSK로 구성할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 APSK 심볼을 차동 부호화하기 위하여 대조표(Look-Up

Table)를 사용한다.

그림 4는 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 송신기의 블록도를 나타낸다. 이 송신기는 N 개의 심볼로 구성된 성좌도를 사용한다. 송신기의 처리과정을 살펴보면, 비트가 $n = \log_2(N)$ 개 단위로 입력된다. 그 다음 표 1의 대조표의 규칙에 따라 현재 심볼 번호와 입력된 비트에 따라 다음 심볼 번호를 결정한다. 최초의 심볼 번호는 0으로 시작한다. 이러한 과정을 통하여 현재 심볼과 다음 생성되는 심볼 간에 차동 부호화가 이루어진다. 예를 들

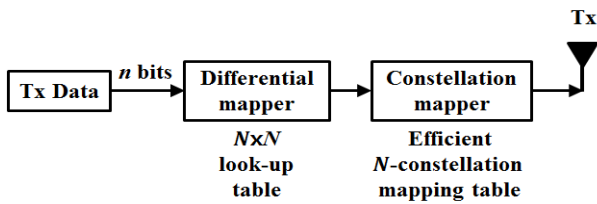


그림 4. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 송신기의 블록도

Fig. 4. Block diagram of DAPSK transmitter with efficient constellation assignment.

어 최초 심볼 번호 0에서 비트 [0, 1, 0, 1]이 입력될 경우 다음 심볼 번호는 5가 되며, 다음 비트 [1, 0, 0, 0]이 입력될 경우, 심볼 번호는 4가 된다. 이러한 방법으로 심볼 번호가 결정된 뒤에 효율적으로 배치된 성좌도에서 각 심볼 번호에 맞는 심볼을 선택하여 송신한다. 심볼 번호는 [0, 1, 2, ..., $N-1$]로 구성된다.

그림 5는 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 수신기의 블록도를 나타낸다. 수신기의 처리과정을 살펴보면, 우선 심볼 검출기를 통해 2개 또는 여러 개의 심볼을 판정한다.

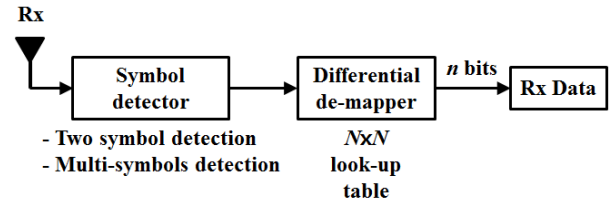


그림 5. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 수신기의 블록도

Fig. 5. Block diagram of DAPSK transmitter with efficient constellation assignment.

표 1. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템에서 차동 부호화를 위한 대조 테이블

Table 1. Look-up table for differential coding in 16-DAPSK system using efficient constellation assignment.

Input bits	Current state															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0 / 0000	0	1	2	0	4	5	6	4	8	9	10	8	12	13	14	12
1 / 0001	1	6	0	1	5	10	4	5	9	14	8	9	13	2	12	13
2 / 0010	4	5	6	4	8	9	10	8	12	13	14	12	0	1	2	0
3 / 0011	6	4	1	6	10	8	5	10	14	12	9	14	2	0	13	2
4 / 0100	7	7	7	7	11	11	11	11	15	15	15	15	3	3	3	3
5 / 0101	11	11	11	11	15	15	15	15	3	3	3	3	7	7	7	7
6 / 0110	5	10	4	5	9	14	8	9	13	2	12	13	1	6	0	1
7 / 0111	10	8	5	10	14	12	9	14	2	0	13	2	6	4	1	6
8 / 1000	2	0	13	2	6	4	1	6	10	8	5	10	14	12	9	14
9 / 1001	13	2	12	13	1	6	0	1	5	10	4	5	9	14	8	9
10 / 1010	14	12	9	14	2	0	13	2	6	4	1	6	10	8	5	10
11 / 1011	12	13	14	12	0	1	2	0	4	5	6	4	8	9	10	8
12 / 1100	3	3	3	3	7	7	7	7	11	11	11	11	15	15	15	15
13 / 1101	15	15	15	15	3	3	3	3	7	7	7	7	11	11	11	11
14 / 1110	9	14	8	9	13	2	12	13	1	6	0	1	5	10	4	5
15 / 1111	8	9	10	8	12	13	14	12	0	1	2	0	4	5	6	4

동기식 APSK 시스템의 경우에는 파일럿 오버헤드를 이용하여 CSI를 추정하고, 위상 모호성을 보상하기 때문에 경관정이 가능하지만, 비동기식 시스템은 위상 모호성이 보상되지 않는다. 따라서 수신 받은 심볼의 성좌도가 회전되어 있게 된다. 이 상태에서 두 심볼을 판정하기 위해서는 2개 또는 여러 개의 수신 심볼을 이용해야 한다. 수신 심볼의 판정이 완료된 후에는 송신기의 차동 부호화에 사용한 대조표의 규칙을 역으로 이용하여 현재 심볼과 이전 심볼을 차동 복호화 한다. 예를 들어, 판정된 현재 심볼과 이전 심볼의 번호가 각각 3, 7일 경우, 표 1에 의해 비트 [1, 1, 0, 1]이 판정된다.

3-2 효율적 성좌도 배치법 및 심볼 맵핑

제안하는 DAPSK 시스템은 성능 개선을 위하여 효율적으로 배치된 성좌도를 사용한다. 그리고 이 성좌도의 심볼을 차동 부호화하기 위하여 대조표를 사용한다. 그림 6은 제안하는 DAPSK 시스템에 사용되는 성좌도 구성을 나타낸다. 기존 DAPSK 시스템에서 사용하는 정규적인 성좌도는 안쪽 동심원 상에 존재하는 심볼들 간의 유클리디안 거리가 가깝기 때문에, 각 심볼 간의 유클리디안 거리가 효율적으로 멀어지도록 하는 성좌도를 사용한다. 그리고 각 심볼에 번호를 맵핑한다. 심볼의 번호는 1사분면으로부터 시작하여 4사분면까지 할당을 하며, 각 사분면 내에 심볼에 번호를 할당할 때에는 Gray 코딩과 같이 가까운 심볼 간에는 비트의 차이가 적게 나도록 할당을 한다.

심볼 번호의 할당이 완료된 후에 수신기에서 위상 모호성이 있는 수신 신호를 차동 복호화를 할 수 있도록 하기 위해 차동 부호화 규칙을 만든다. 차동 부호화 규칙은 현재 심볼 번호에서 입력되는 n 개의 비트에 따라 다음 심볼 번호로 이동하는 규칙이다. 처음에는 0번 심볼로 시작한다. n 개의 비트는 N 개의 경우의 수를 가지며, 각 경우의 수에 대하여 다음 심볼로 이동하는 규칙을 할당한다. 이러한 차동 부호화 규칙을 각 심볼에 대하여 정의한다. 이러한 방법을 통해 인접 심볼을 서로 연결시킬 수 있으며, 이 규칙을 이용하여 수신기에서는 차동 복호를 수행한다. 그림 7은 심볼 0번에서 입력 비트에 따라 다음 심볼로 천이될 수 있는 경우를 보여주며, 같은 방법으로 전체 심볼에 대해 모든 경우를 정의한다. 이 과정이 완료되

면 표 1과 같이 $N \times N$ 크기를 갖는 대조표가 만들어진다. 이와 같은 차동 부호화 규칙을 만드는 방법에는 다양한 경우의 수가 존재하게 된다.

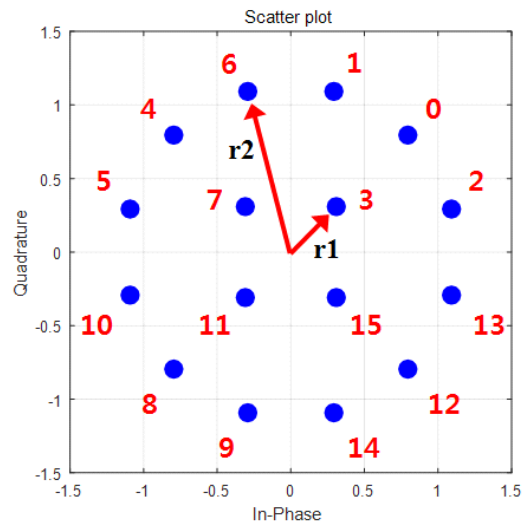


그림 6. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 성좌도 구성

Fig. 6. Constellation structure of 16-DAPSK using efficient constellation assignment.

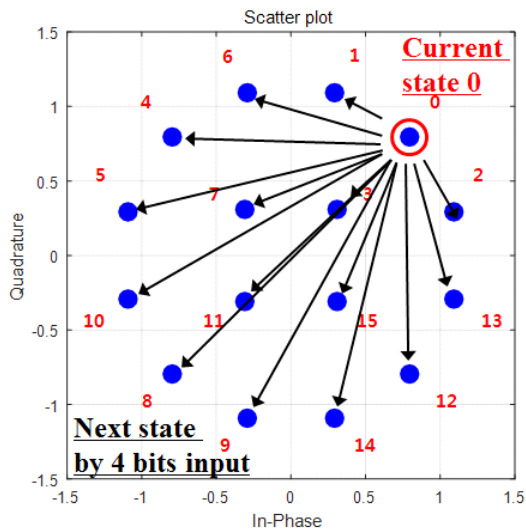


그림 7. 효율적인 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템을 위한 차동 부호화 방법

Fig. 7. Differential coding method for 16-DAPSK system using efficient constellation assignment.

3-3 수신 심볼 검출

효율적인 성좌도 배치법을 사용하는 DAPSK 시스템에서 수신 심볼을 검출하기 위해서는 연속된 2개 또는 여러 개의 심볼을 이용해야 한다. 식 (1)은 2개의 심볼을 이용하는 검출기에 대한 식을 나타내며, 식 (2)는 K 개의 심볼을 이용하는 검출기에 대한 식을 나타낸다⁷⁾.

$$(\hat{x}_{t-1}, \hat{x}_t) = \arg \min_{(x_{t-1} \in Q_1, x_t)} \| \mathbf{c} \|^2 - 2 | \langle \mathbf{r}, \mathbf{c} \rangle | \quad (1)$$

$$(\hat{x}_{t-K+1}, \hat{x}_{t-K+2}, \dots, \hat{x}_{t-1}, \hat{x}_t) = \arg \min_{(x_{t-K+1} \in Q_1, x_{t-K+2}, \dots, x_t)} \| \mathbf{c} \|^2 - 2 | \langle \mathbf{r}, \mathbf{c} \rangle | \quad (2)$$

식 (1)에서 $(\hat{x}_{t-1}, \hat{x}_t)$ 는 2개의 심볼 검출기에 의해 최종적으로 추정된 두 개의 심볼을 나타낸다. $\mathbf{r} = (r_{t-1}, r_t)$ 는 수신 받은 심볼을 나타내고, $\mathbf{c} = (x_{t-1}, x_t)$ 는 기준 성좌도의 심볼을 나타낸다. \langle, \rangle 은 복소 내적 연산을 나타낸다. 수신 받은 심볼 2개와 기준 성좌도에서 2개씩 선택한 심볼을 이용하여 식 (1)을 계산하고, 최소값을 갖는 기준 성좌도의 심볼 2개를 찾는다. 특히, 기준 성좌도에서 1사분면을 90° 단위로 회전할 경우, 각 사분면과 동일한 특성을 가지므로, 기준 심볼 2개를 선택하여 내적을 구할 때 동일한 크기를 갖는 경우의 수가 존재하게 되며, 동일한 경우의 수를 제거하여 심볼을 검출한다. 예를 들어, 수신 심볼을 검출할 때 그림 6의 성좌도에서 기준 심볼을 선택할 경우 3번과 5번 심볼간의 특성은 7번과 9번 심볼간의 특성과 동일하기 때문에, 이전 기준 심볼을 선택할 때에는 1사분면 내에서만 선택한다. 식 (2)에서도 \mathbf{r} 과 \mathbf{c} 는 각각 수신 심볼과 기준 성좌도의 심볼을 나타내며, 각 벡터가 갖는 심볼의 개수는 K 개가 된다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 정규적 성좌도를 사용하는 기존 DAPSK 시스템의 성능을 개선하기 위하여 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 새로운 DAPSK 시스템을 설계하고 성능을 평가한다. 세부적으로 정규적 성좌도 및 효율적으로 배치된 성좌도에 따른 APSK 및 DAPSK 시스템의 BER 성능 평가한다. 특히, 이 성능 평가와 함께 효율적인 r_2/r_1 비율

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Table 2. Simulation parameters.

Parameter	Condition
Modulation	16-DAPSK
Constellation type	Regular constellation(2, 8) Efficient constellation(4+12)
Symbol detection algorithm	Two-symbol detection($K=2$) multiple-symbol detection($K=3, 4$)
r_2/r_1 ratio	1.2~2.6
Channel	AWGN with random phase ambiguity

을 파악한다. 이와 같은 평가를 위한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다.

시뮬레이션에서 기준 및 제안하는 시스템의 변조 레벨은 16으로 구성하였으며, 기존 시스템은 진폭 레벨이 2, 위상 레벨이 8인 정규적인 성좌도를 사용하였고, 제안하는 시스템은 안쪽 동심원에는 4개, 바깥쪽 동심원에는 12개의 심볼을 갖는 효율적인 성좌도 구성을 사용하였으며, r_2/r_1 의 비율은 1.2~2.6까지 고려하였다. 그리고 채널 환경은 랜덤 위상 모호성이 적용된 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 환경을 고려하였다.

그림 8은 정규적 성좌도를 사용하는 APSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. r_2/r_1 의 비율이 1.2일 때 BER 성능이 가장 나쁘고, 비율이 1.8까지 증가하면 성능이 개선되며, 이 때 가장 좋은 BER 성능을 낸다. 그리고 비율이 1.8을 넘어서면 성능이 열화되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 정규적 성좌도를 사용하는 APSK 시스템에서 r_2/r_1 이 1.8일 때 BER 성능이 가장 우수한 것을 확인할 수 있으며, 10^{-4} 의 BER 성능을 만족시키기 위하여 약 13.4 dB의 SNR이 요구되는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 효율적 성좌도 구성을 사용하는 16-APSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. r_2/r_1 의 비율이 1.2일 때 BER 성능이 가장 나쁘며, 비율이 2.6까지 증가할수록 성능이 개선되며, 이 때 가장 좋은 BER 성능을 낸다. 특히, 비율이 2일 때부터 BER 성능의 개선이 크게 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 이 시스템은 r_2/r_1 이 2.6일 때, 10^{-4} 의 BER 성능을 만족시키기 위하여 약 12.8 dB의 SNR이 요구되는 것을 확인할 수 있다.

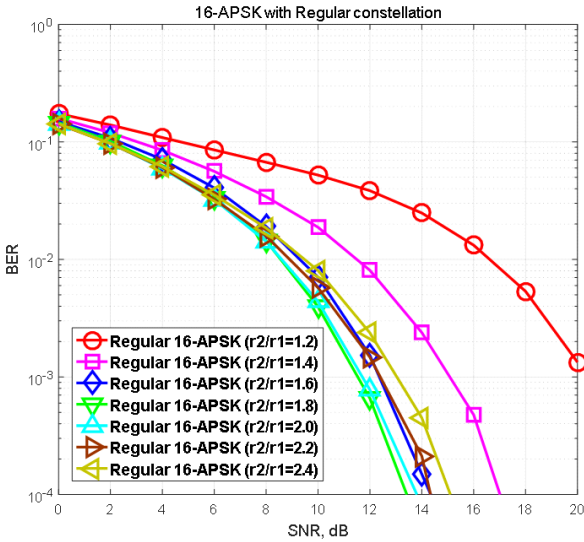


그림 8. 정규적 성좌도를 사용하는 16-APSK 시스템의 BER 성능
 Fig. 8. BER performance of 16-APSK system using regular constellation.

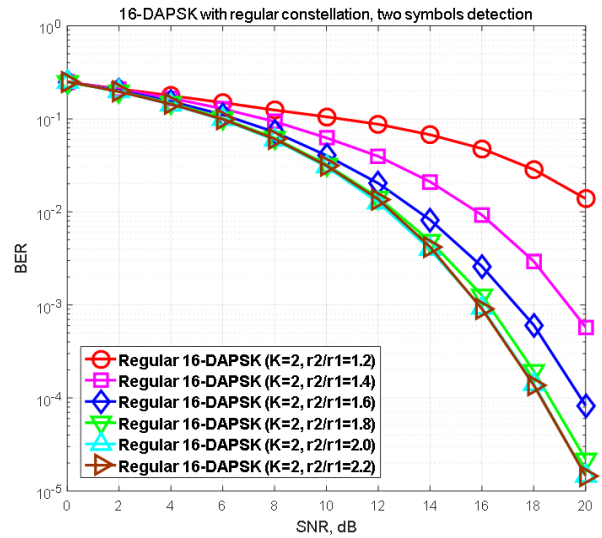


그림 10. 정규적 성좌도를 사용하는 16-DAPSK 시스템의 BER 성능($K=2$)
 Fig. 10. BER performance of 16-DAPSK system using regular constellation($K=2$).

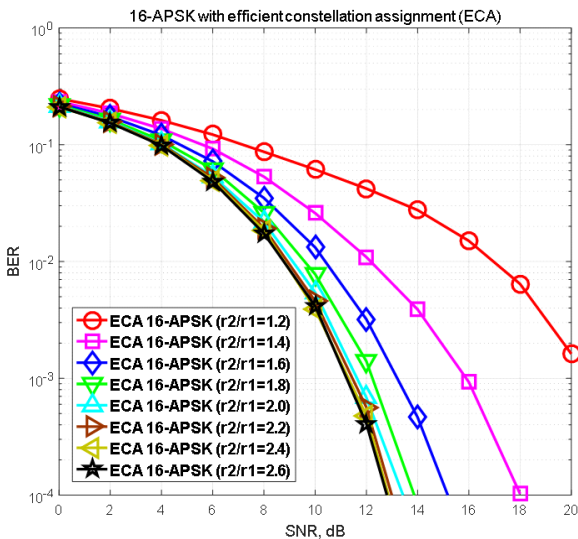


그림 9. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-APSK 시스템의 BER 성능
 Fig. 9. BER performance of 16-APSK system using efficient constellation assignment.

그림 10은 정규적 성좌도를 사용하는 기존 16-DAPSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. r_2/r_1 의 비율이 1.2일 때

BER 성능이 가장 나빠며, 비율이 2.2로 증가할수록 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 비율이 2일 때부터는 성능 개선이 크게 이루어지지 않는다. 기존 16-DAPSK 시스템은 r_2/r_1 의 비율이 2.2일 때, 10^{-4} 의 BER 성능을 만족시키기 위해 18.3 dB의 SNR이 요구됨을 확인할 수 있다.

그림 11, 그림 12, 그림 13은 각각 K 가 2, 3, 4일 때, 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. K 가 2, 3, 4일 때 모두 유사한 성능 변화 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. r_2/r_1 의 비율이 1.2일 때 BER 성능이 가장 나빠며, 비율이 1.6으로 증가함에 따라 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 비율이 1.6을 넘어 2.2로 증가해 갈수록 성능이 열화되어 가는 것을 확인할 수 있다. 즉, 제안하는 효율적인 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템은 r_2/r_1 의 비율이 1.6일 때 가장 우수한 BER 성능을 내며, 이 시스템에서 10^{-4} 의 BER 성능을 만족시키기 위해 K 가 2, 3, 4일 때 각각 17.5 dB, 16.4 dB, 16.2 dB의 SNR이 요구됨을 확인할 수 있다.

그림 8부터 그림 13까지의 시뮬레이션 결과를 정리해보면, 16-APSK 시스템을 구성할 때 정규적인 성좌도를

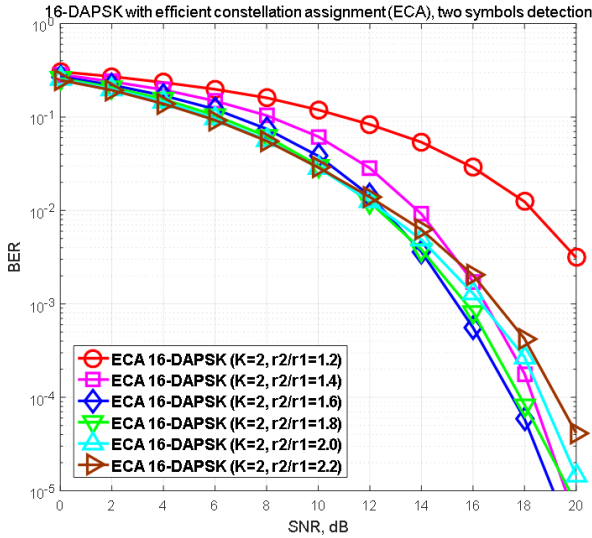


그림 11. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템의 BER 성능($K=2$)
 Fig. 11. BER performance of 16-DAPSK system using efficient constellation assignment($K=2$).

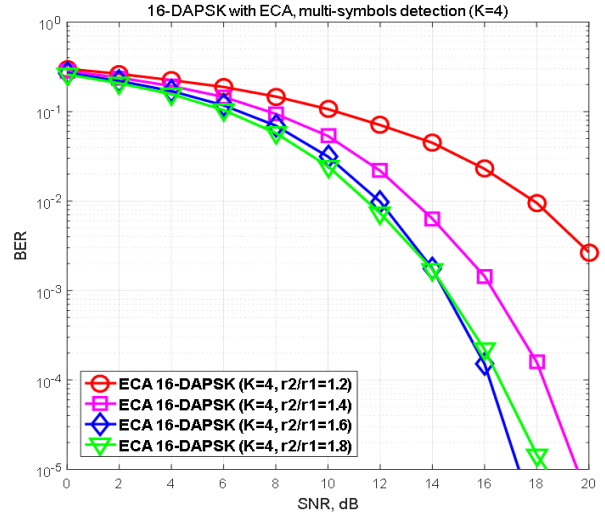


그림 13. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템의 BER 성능($K=4$)
 Fig. 13. BER performance of 16-DAPSK system using efficient constellation assignment($K=4$).

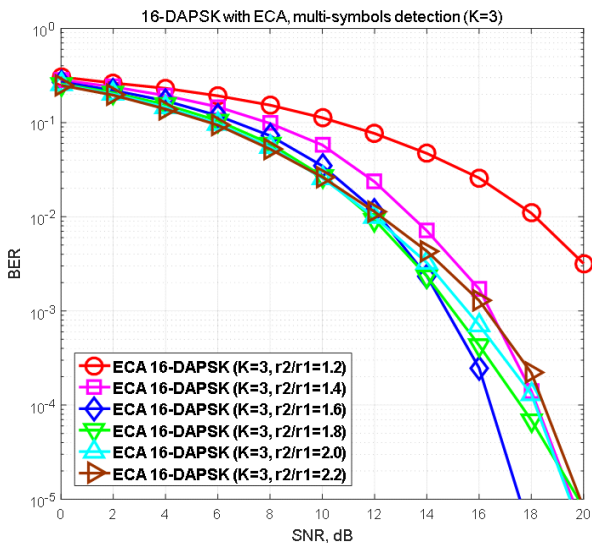


그림 12. 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템의 BER 성능($K=3$)
 Fig. 12. BER performance of 16-DAPSK system using efficient constellation assignment($K=3$).

사용하는 기존 방법과 효율적인 성좌도 구성을 사용하는 방법을 비교해 보면, 10^{-4} 의 BER 성능을 내는데 요구되

는 SNR이 효율적 성좌도 배치법을 사용할 때 0.6 dB 개선됨을 확인할 수 있다. 그리고 16-DAPSK 시스템을 구성할 때에는 효율적인 성좌도 배치법을 사용할 경우 10^{-4} 의 BER 성능을 내는데 요구되는 SNR을 0.8 dB 개선할 수 있음을 확인할 수 있다. 더욱이 기존 16-DAPSK 시스템과 비교하여 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템에서 K 를 증가시킬 경우, 요구 SNR을 더욱 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 효율적 성좌도 배치법을 사용하는 16-DAPSK 시스템을 제안하고 성능을 평가하였다. 제안하는 16-DAPSK 시스템은 차동 부호화 규칙이 포함된 대조표를 이용하여 구성된다. 대조표를 사용할 경우 ROM (Read Only Memory)를 활용하여 저 복잡도로 차동 부호화 및 복호화가 가능한 장점이 있다. 시뮬레이션을 통하여, 기존 및 제안하는 시스템에서 가장 우수한 성능을 내는 r_2/r_1 의 비율을 파악하였다. 성좌도의 배치 방법과 차동 부호화의 유무에 따라 우수한 성능을 내는 r_2/r_1 비율이 달라진다. 이는 APSK 변조 계열에서는 심볼 간 유클리디안

거리가 성능에 영향을 미치며, DAPSK 변조 계열에서는 데이터 정보를 의미하는 인접 심볼 간에 이루어지는 벡터가 성능에 영향을 미치게 되기 때문이다. 더욱이 정규적 성좌도 배치법과 비교하여, 효율적 성좌도 배치법을 사용할 경우 각 심볼 간의 유클리디안 거리가 증가하여, 16-APSK 및 16-DAPSK 시스템의 성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

References

[1] S. D. Feng, H. P. Zhu, and G. X. Li, "Design concepts for multimedia satellite system," in *2008 11th IEEE International Conference on Communication Technology*, Hangzhou, Nov. 2008, pp. 33-36.

[2] D. Yoda, H. Ochiai, "Distortion modeling and analysis for multilevel coded APSK with memoryless nonlinearity," in *2014 IEEE Global Communications Conference*, Austin, TX, 2014, pp. 2874-2879.

[3] D. Yoda, H. Ochiai, "A reduced-complexity multilevel

coded modulation for APSK signaling," in *2013 IEEE International Symposium on Information Theory*, Istanbul, 2013, pp. 1994-1998.

[4] M. Anedda, A. Meloni, and M. Murrioni, "64-APSK constellation and mapping optimization for satellite broadcasting using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 1-9, Mar. 2016.

[5] C. Xu, D. Liang, S. X. Ng, and L. Hanzo, "Reduced-complexity noncoherent soft-decision-aided DAPSK dispensing with channel estimation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 6, pp. 2633-2643, Jul. 2013.

[6] Band-Efficient Modulation, CCSDS 401(3.3.6) Green Book, Apr. 2003.

[7] R. Wei, "Differential encoding by a look-up table for quadrature-amplitude modulation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 1, pp. 84-94, Jan. 2011.

안 창 영 (충북대학교/박사과정)



2013년: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2015년: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2015년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 무선통신 시스템, 신호처리, B5G 이동통신 시스템

이 상 규 (한국항공우주연구원/팀장)



1993년: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1995년: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 2011년: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 1995년~현재: 한국항공우주연구원 위성연구본부 탑재체전자팀 팀장, 책임연구원
 [주 관심분야] 영상코딩, 안테나 및 전자파 전파, EESS 통신시스템, 위성통신

유 상 범 (한국항공우주연구원/선임연구원)



1996년 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2010년 충북대학교 전자공학과 (공학박사)
 2011년~현재: 한국항공우주연구원 선임연구원
 [주 관심분야] 지구관측위성, 마이크로파원 격탐사, 위성통신시스템, 원격측정 명령계

유 흥 균 (충북대학교/교수)



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리