

기하적 매개변수에 의한 32-QAM 성상 설계 및 성능 평가

유민희, 김정현, 한민석, 박호성*

전남대학교

minhui0@jnu.ac.kr, jhkim5736@jnu.ac.kr, gksalstjr7@naver.com, *hpark1@jnu.ac.kr

Design of 32-QAM Constellation by Geometric Parameters and Performance Evaluation

Minhee Yu, Junghyun Kim, Minseok Han, Hosung Park*

Chonnam National Univ.

요약

본 논문은 OFDM 시스템에서 높은 스펙트럼 효율을 위한 홀수 비트 32-QAM 성상도와 이에 적합한 연속 제거 복조 기법을 제안한다. 제안하는 성상은 스케일링, 회전 각도, 이동 거리 요소로 설계되었고 채널 코딩은 세 계층을 기반으로 변조 및 복조를 수행한다. 저밀도 패리티 체크 부호를 이용한 모의실험 결과, 동일한 E_b/N_0 구간에서 기존에 사용되고 있는 홀수 비트 성상인 32-QAM과 비교하면 제안하는 성상은 블록 오류율 이득을 가진다.

I. 서론

무선통신 시스템에서 QAM(quadrature amplitude modulation)은 복잡한 신호를 변조하여 정보를 전송하는데 사용되는 디지털 변조 기술이다. 표준으로 채택된 변조 방법에서 대부분 정사각형 SQAM(square QAM)[1]을 사용하며 이는 한 심볼마다 짝수 비트를 전송한다. 짝수 비트의 심볼로 구성된 성상은 각 신호 점들이 균일한 간격으로 배치되어 연판정 복조(soft decision demapping)와 로그 우도비(log-likelihood ratio: LLR)의 복잡도 면에서 유리하다[2]. 반면 홀수 비트의 심볼로 구성된 성상은 비교적 계산 복잡도가 높으나, 가우시안 백색 잡음(additive white gaussian noise: AWGN) 채널에서 가우시안 분포를 따를수록 높은 데이터 전송률과 채널 용량을 달성할 수 있으며 DVB-C(digital video broadcasting-cable)에서는 XQAM(cross QAM)을 표준으로 허용했다[3].

본 논문은 정사각형 QAM을 복제 및 변형한 새로운 홀수 비트 성상과 이에 적합한 연속 제거 복조(successive cancellation demapping) 기법을 제안한다. 성상 설계는 회전 각도, 이동 거리, 스케일링 요소를 적용하고 세 계층에 나누어 데이터 스트림의 전송부터 변조, 복조까지 수행한다. 5G NR(new radio) 저밀도 패리티 체크(low-density parity check: LDPC) 부호를 사용하여 AWGN 채널에서 시뮬레이션 했을 때, 32-QAM보다 블록 오류율(block error rate: BLER) 이득을 가진다.

II. 본론

2.1 제안하는 성상 설계

본 논문에서 제안하는 성상은 QPSK(quadrature phase shift keying)라고 불리는 4-SQAM을 8개 복제하고, 두 개의 복사본끼리 한 그룹을 이룬다. 즉, 한 그룹은 두 개의 QPSK 결합으로 8-QAM이 되는데, 그중에서 하나는 원래 상태의 복사수 값을 유지하고 나머지 하나는 동일 그룹 간의 신호 간격을 최대화하기 위해 45도 회전한 상태에서 스케일링 요소를 곱해

성상의 크기를 확장하며 네 그룹 모두 동일한 과정을 거친다. 이후 각 그룹은 정해진 회전 각도에 따라 상하좌우 대칭을 이루도록 회전하고 원점으로부터 이동 거리만큼 대각선 방향으로 위치를 옮긴다. 이때 변조 차수 $M=2^m$, 비트 인덱스 i , 스케일링 s , 회전 각도 t , 이동 거리 b 라고 한다. 또한 초기 성상 집합은 X_i , 회전된 성상 집합은 X_{rotate} , 최종 성상 집합은 X 라고 가정할 때, $X_{QPSK} = \{\pm 1, \pm j\}$ 이고 네 그룹을 X_A, X_B, X_C, X_D 라고 하면 다음과 같이 비트 매핑을 정의할 수 있다.

$$X_i = \begin{cases} X_{QPSK} & (4k \leq i \leq 4k+3, i = 0, 2, 4, 6) \\ X_{QPSK} \otimes e^{j\frac{\pi}{4}} \otimes s & (4k \leq i \leq 4k+3, i = 1, 3, 5, 7) \end{cases} \quad (1)$$

$$X_{rotate} = X_i \otimes e^{jt} \quad (2)$$

$$X_A = X_{rotate} \oplus (b + bj) \quad (3)$$

$$X_B = X_{rotate} \oplus (-b + bj)$$

$$X_C = X_{rotate} \oplus (b - bj)$$

$$X_D = X_{rotate} \oplus (-b - bj)$$

$$X = \{X_A, X_B, X_C, X_D\} \quad (4)$$

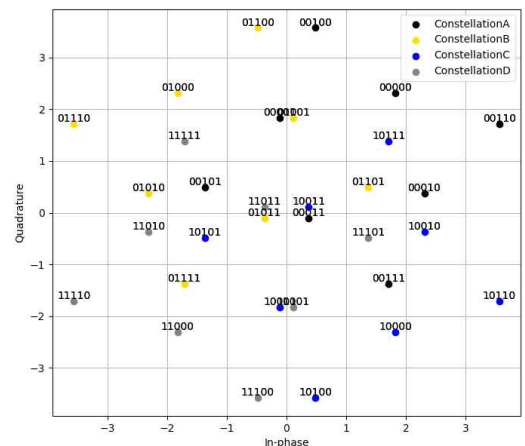


그림 1. scaling=1.8, shift=1.1, angle=14 성상과 비트 매핑 예시

2.2 세 계층 기반의 부호 기법과 연속 제거 복조 기법

QAM은 일반적으로 변조 차수의 증가에 따라 계산 복잡도도 높아지는 문제로 인해 효율적인 변조 및 복조 방식이 필요하며 이는 성상 설계에 따라 가장 효율적인 기법이 다를 수 있다. 제안하는 성상 또한 복잡한 설계로 인해 저복잡도를 위한 복조 기법이 필요하다. 복조 측면에서 MSB(most significant bit)가 추정되면 나머지 비트에서 복조 부담을 줄일 수 있다. 따라서 계층에 따른 부호 및 복조 기법이 필요하다.

제안하는 성상은 세 가지 계층으로 구분한다. 첫 번째 계층은 각 그룹을 구분하는 두 비트(첫 번째와 두 번째 비트), 두 번째 계층은 스케일링 적용 여부를 의미하는 한 비트(세 번째 비트), 세 번째 계층은 QPSK의 그레이 매핑을 따르는 두 비트(네 번째와 다섯 번째 비트)로 구성된다. 세 계층은 동시에 정보 비트를 전송하고 서로 다른 부호율로 채널 코딩을 수행한다.

수신기는 송신기로부터 전송된 부호어를 받으면 연속 제거 복조 기법에 따라 복호를 수행한다. 첫 번째 계층에서는 네 개의 각 그룹에 따라 그레이 매핑에 의해 {00, 01, 10, 11}로 복조되는데, 각 그룹에 속하는 8개 점은 모두 동시에 같은 방향으로 이동과 회전을 하기 때문이다. 그리고 첫 번째 계층의 부호어에 대한 LLR을 계산하고 복호한다. 두 번째 계층에서는 스케일링 적용 여부에 따라 스케일링을 한 경우를 1, 아닌 경우를 0으로 복조한다. 그리고 첫 번째 계층의 복호로부터 얻은 추정 비트들을 바탕으로 복호를 수행한다. 세 번째 계층은 QPSK에 속하는 각 점의 위치에 따라 그레이 매핑 {00, 01, 10, 11}으로 복조되며 마찬가지로 첫 번째와 두 번째 계층으로부터 얻은 추정 비트들을 바탕으로 복호를 수행하여 최종적으로 모든 비트에 대한 복호를 종료한다.

2.3 모의실험 결과

본 모의실험에서는 5G NR LDPC를 기반으로 하고 AWGN 채널에서 제안하는 성상과 32-QAM의 BLER 성능을 비교하였다. E_s/N_0 는 8~12dB, 복호의 최대 반복 횟수는 50회, 전송된 심볼의 수는 1024개, 전체 프레임의 수는 10^4 로 설정하였다.

표 1은 E_s/N_0 별로 제안하는 성상에서 최적화된 세 가지 매개변수를 보여준다. 또한 각각의 세 계층은 서로 다른 부호율로 데이터를 전송할 수 있는데, 표 2는 목표로 하는 BLER 10^{-2} 을 만족하는 조건 아래에서 최적의 부호율을 나타내며 이는 시뮬레이션을 통해 탐색한 결과이다. 표 2에서 R은 전체 부호율을 의미하고 R1, R2, R3는 순서대로 각 계층의 데이터 전송률이며 한 비트 당 오류 없이 데이터를 송수신할 수 있는 능력 및 데이터 속도를 의미한다. 결과적으로 MSB에 해당하는 R1에서 가장 데이터 전송률이 낮은 경향이 있으나, R3에서 보완 가능하다.

표 1. E_s/N_0 구간별 최적화된 세 가지 매개변수 결과

E_s/N_0	scaling	shift	angle
8	1	0.6	21
9	1	0.6	63
10	1	0.6	63
11	1	0.6	63
12	1.8	1.1	14

표 2. E_s/N_0 구간별 세 계층에서 사용된 부호율

E_s/N_0	R	R1	R2	R3
8	2.328	0.186	0.171	0.893
9	2.514	0.210	0.249	0.922
10	2.812	0.259	0.396	0.949
11	3.020	0.308	0.493	0.956
12	3.251	0.356	0.708	0.915

그림 2는 제안하는 성상과 기존의 32-QAM의 BLER 성능을 보여준다. 시뮬레이션은 표 1과 표 2를 기반으로 진행되었으며 비교하고자 하는 두 성상은 공정한 비교를 위해 동일한 부호율로 시뮬레이션을 하였다. 모든 E_s/N_0 구간에서 제안하는 성상의 성능이 우수하다. 이는 높은 데이터 전송률을 달성하기 위한 목적으로 설계된 새로운 홀수 비트 성상에 적합한 부호 기법 및 복조 기법이 적용되었다고 할 수 있다.

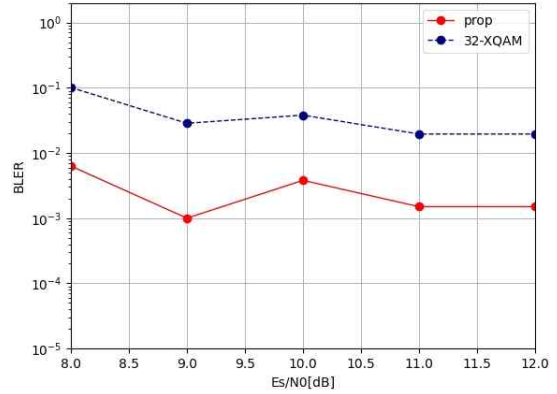


그림 2. 기존의 32-QAM과 제안하는 성상(prop)의 BLER 비교

III. 결론

본 논문에서는 홀수 비트로 구성된 새로운 32-QAM 성상 설계와 이에 적합한 세 계층 기반의 부호화 및 연속 제거 복호 기법을 제안하였다. 제안하는 성상은 스케일링, 회전, 이동 거리를 통해 상하좌우로 대칭을 이루는 균형 있는 형태로 설계되고 세 계층에 따라 서로 다른 부호율을 적용한 부호화 및 복호를 수행한다. LDPC 부호를 사용한 모의실험 결과를 통해 대표적 홀수 비트 성상인 32-QAM보다 제안하는 성상이 동일한 채널과 부호율에서도 BLER 이득을 가진다. 따라서 제안하는 성상과 부호화 및 복조 기법은 높은 데이터를 달성하기 위한 효율적인 설계 방안에 적합하다고 이해할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업(IITP-2024-00156287, 40%)과 학·석사연계ICT핵심인재양성사업(RS-2022-00156385) 및 (No. 2021001016004, 6G/B5G xURLLC를 위한 유연한 신뢰도의 채널코딩)의 연구이자, 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 첨단분야 혁신융합대학사업(차세대통신)의 연구 결과임.

참고 문헌

- [1] Technical Specification Group Radio AccessNetwork; NR; Multiplexing Channel Coding(Relase 15), Dec. 2017.
- [2] F. Tosato and P. Bisaglia, "Simplified softoutput demapper for binary interleavedCOFDM with application to HIPERLAN/2," in Proc. IEEE ICC 2002 (Cat. No.02CH37333), 2002.
- [3] P. K. Singya, P. Shaik, N. Kumar, V. Bhatia, and M.-S. Alouini, "Asurvey on higher-order QAM constellations: Technical challenges, recentadvances, and future trends," IEEE Open J. Commun. Soc., vol. 2, pp. 617 - 655, Mar. 2021.