



# 4D-8PSK TCM 위성통신 시스템 시뮬레이터 설계 및 구현

김도욱\*, 김중표\*\*<sup>1</sup>, 김상구\*\*<sup>2</sup>, 윤동원\*\*\*

## Design and Implementation of 4D-8PSK TCM Simulator for Satellite Communication Systems

Dohwook Kim\*, Joongpyo Kim\*\*<sup>1</sup>, Sanggoo Kim\*\*<sup>2</sup>, and Dongweon Yoon\*\*\*

### 요약

본 논문에서는 CCSDS에서 권고하고 있는 대역폭 효율적인 변조 방식 중 채널당 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol의 전송효율을 가지는 4D-8PSK TCM 시스템의 송신부와 수신부를 설계하고 시뮬레이터를 구현하여 AWGN 환경에서 모의시험을 통하여 BER 성능을 분석한다. 송신부는 CCSDS 표준을 준용하여 설계하고, 수신부는 차동 부호화 및 복호화를 일반화하여 차동 복호기를 설계하며, 트렐리스 복호 알고리즘은 보조격자의 정보와 비터비 알고리즘을 적용하여 설계하고, CCSDS 표준에서 주어진 8차원 성상도 맵퍼의 방정식을 가감법으로 풀어 성상도 디맵퍼를 설계한다. 특히, 컴퓨터 모의시험을 통해 비터비 복호기 설계 시 역추적 깊이에 따른 오류 성능을 제시하여 4D-8PSK TCM 시스템의 최적화된 송/수신부를 구현하고 성능을 분석한다.

### Abstract

In this paper, we design and implement the simulator for the transmitter and receiver of 4D-8PSK TCM with 2.0, 2.25, 2.5, and 2.75 bits/symbol-channel transmission efficiency recommended by the CCSDS for satellite communications, and then analyze the BER performance of 4D-8PSK TCM system in AWGN channel. The transmitter of 4D-8PSK TCM is designed in accordance with the recommendation in the CCSDS standard. Meanwhile, for the receiver design of 4D-8PSK TCM, we design the differential decoder generalizing the differential encoder/decoder scheme. The trellis decoding algorithm is designed by applying the auxiliary trellis information and the Viterbi algorithm, and an 8-dimensional constellation mapper equation given in the CCSDS standard is deconstructed to design constellation mapper. Especially, we present the optimized receiver for 4D-8PSK TCM system by investigating the BER performances for the traceback lengths in the Viterbi decoder through computer simulations..

### Keywords

error performance, multidimensional TCM, satellite communications

\* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4590-632X>

\*\* 한국항공우주연구원

- ORCID<sup>1</sup>: <http://orcid.org/0000-0003-2925-3944>

- ORCID<sup>2</sup>: <http://orcid.org/0000-0002-8465-3601>

\*\*\* 한양대학교 융합전자공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9631-3500>

• Received: Nov. 06, 2018, Revised: Jan 17, 2019, Accepted: Jan. 20, 2019

• Corresponding Author: Dongweon Yoon

Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University

222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

Tel.: +82-2-2220-0362, Email: [dwyoon@hanyang.ac.kr](mailto:dwyoon@hanyang.ac.kr)

### 1. 서 론

세계 각국 우주기구의 지구 탐사 위성 업무 및 우주 연구 업무의 끊임없는 증가로 인해 주파수 자원 환경은 간섭에 의해 점점 열악해져 가고 있다. 인접 채널 간섭을 줄이기 위해 우주 주파수 조정 그룹 과 국제통신연합과 같은 스펙트럼 자문 및 규제 기관들이 대역 외(Out-of-band) 방출 권고안을 제정하고 있으며[1], 이에 우주 데이터 시스템 자문 위원회(CCSDS, Consultative Committee for Space Data Systems)에서는 고속 데이터 전송에 적합한 대역폭 효율적인 변조 기술 표준을 권고하고 있다[2].

1980년대 초 Ungerboeck은 대역이 제한된 채널환경에서 부호화와 변조기술을 결합하여 부호화 이득을 얻으며 대역효율을 떨어트리지 않고 전력효율도 향상시킬 수 있는, 컨볼루션 부호화, 매퍼(Mapper) 그리고 변조를 결합한 트렐리스 부호 변조 (Trellis Coded Modulation, TCM)를 제안하였다[3]-[5]. 그 후 80년 후반에 Forney는 다차원 성상도를 도입하였고 [6], Pietrobon은 다차원 부호화 기술을 적용하여 다차원 TCM 방식을 제안하였다[7]. 다차원 TCM 방식은 컨볼루션 부호화와 위상 변조 기술을 결합하여 대역폭을 유지하면서도 전력 이득을 얻을 수 있어, 주어진 정보량에 대하여 전력 및 대역폭 효율적인 변조방식으로 지상국과 원격 위성간 통신에 응용되고 있다[2][10][11].

본 논문에서는 CCSDS 표준으로 권고한 8GHz와 26GHz 대역에서 지구 탐사 위성 업무를 위해 권고된 대역폭 효율적인 변조 방식 중, 채널당 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol 전송효율을 가지는 4D-8PSK TCM 시스템의 송신부와 수신부를 시스템 설계 및 하드웨어 상세 설계하고, 하드웨어 상세설계를 검증

하기 위하여 하드웨어 상세 설계된 시스템 구조와 동일하게 시뮬레이터를 구현하여 성능을 비교 [10,11] 분석함으로써 표준에 준하는 4D-8PSK TCM 시스템의 설계과정과 그 성능을 검증한다. 4D-8PSK TCM 시스템 송신부는 CCSDS 표준을 준용하여 설계하고, 수신부는 차동 부호화 및 복호화 과정을 일반화하여 차동 복호기를 설계하며, 트렐리스 복호 알고리즘은 보조격자의 정보와 비터비 알고리즘을 적용하여 설계한다. 특히, 비터비 알고리즘 설계 시 역추적 깊이에 따른 비트 오류(BER, Bit Error Rate) 성능을 살펴본다. 또한, CCSDS 표준에서 주어진 8차원 성상도 매퍼 방정식을 가감법으로 풀어 성상도 디매퍼를 설계하여 4D-8PSK TCM 시스템의 최적화된 수신부를 제시한다. 매스웍스의 시뮬링크를 이용하여 4D-8PSK TCM 위성통신 시스템을 구현하며, 시뮬레이션을 통해 구현된 4D-8PSK TCM 시스템의 성능을 검증한다.

### II. 4D-8PSK TCM 시스템

#### 2.1 4D-8PSK TCM 시스템 송신부 설계 및 구현

주어진 정보량에 대하여 전력 및 대역폭 효율적인 변조방식으로 CCSDS에서 권고하고 있는 4D-8PSK TCM의 구조 중 전송효율이 채널당 2.0 bits/symbol 일 때의 구조를 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서와 같이 4D-8PSK TCM은 직렬/병렬 변환기, 차동 부호기, 컨볼루션 부호기, 성상도 매퍼 와 8PSK 변조기로 구성된다. 본 논문에서는 CCSDS 표준에서 권고하고 있는 채널당 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol의 전송효율을 갖는 4D-8PSK TCM을 설계하고 시뮬레이터를 구현하여 성능을 분석한다.

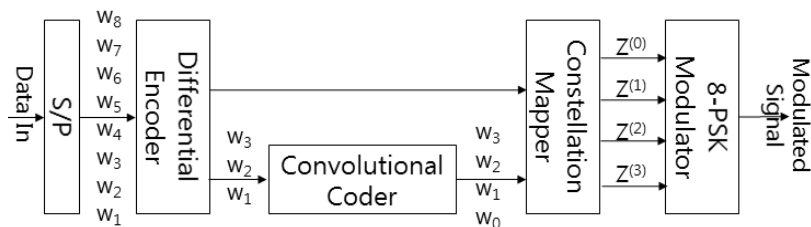


그림 1. 채널당 2.0 bits/symbol 일 때, 4D-8PSK TCM 송신부 구조  
Fig. 1. Block diagram of 4D-8PSK TCM encoder with 2.0 bits/symbol-channel

지면상의 제약으로 구체적인 설계의 예시는 채널 당 2.0 bits/symbol의 전송효율의 경우에 대하여 설명하며, 다른 전송효율의 경우는 이와 유사한 과정으로 설계하고 구현할 수 있다.

표 1에는 CCSDS에서 권고하고 있는 4D-8PSK TCM 시스템 파라미터를 나타내었는데, 본 논문에서는 표 1의 파라미터를 준용하여 설계하고 구현한다.

4D-8PSK TCM 시스템의 송신부 입력신호는 직렬/병렬 변환기에서 전송효율에 따라 각각 8, 9, 10, 11비트 단위로 변환된다. 예를 들어, 전송효율이 채널당 2.0 bits/symbol일 때는 8비트 단위로 변환된다.

표 1. 4D-8PSK TCM 시스템 파라미터  
Table 1. System parameters for 4D-8PSK TCM

Constellation Size(M)	8 (8PSK)
No. of Signal set(L)	4
No. of Trellis State	64
Coding Rate(R)	3/4
TCM Rate(R <sub>m</sub> )	m/(m+1), m=8,9,10,11
Transmission Efficiency(Reff)	R <sub>eff</sub> =2, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol for R <sub>m</sub> =8/9, 9/10, 10/11, 11/12

2.1.1 차동 부호기(Differential Encoder)

직렬/병렬 변환기 다음 단계에 위치한 차동 부호기는 반송파 동기에서 위상 불연속을 제거하기 위하여 사용하며, 성상도 맵퍼와 연동하여 채널당 2.0 bits/symbol의 전송효율을 얻을 수 있게 한다. 차동 부호기는 현재의 입력 데이터와 버퍼에 저장되었던 데이터를 모듈로(Modulo)-8 연산을 수행하는 3비트 지연소자와 3비트 전가산기(Full Adder)로 구성되며, 차동 부호기의 입력 비트 매핑은 CCSDS 표준에서

정의된 표를 참조한다[Table 3-1, 2]. 그림 2에는 모듈로-8 연산을 수행하기 위한 차동 부호기 구조를 나타내었다.

2.1.2 트렐리스 부호기

CCSDS 표준에서 권고하는 트렐리스 부호기는 8PSK에 대하여 다차원 TCM에서 얻을 수 있는 최대 평균 부호이득(약 5.5dB)을 얻을 수 있는 구속장(Constraint Length)이 7인 컨볼루션 부호를 사용하는데, 채널당 2.0 bits/symbol 전송효율의 경우, 컨볼루션 부호기를 통해 1/8의 정보를 감소만으로도 최적의 부호 이득을 얻게 된다.

표 2에는 구속정이 7인 64 상태의 조직적 컨볼루션 부호기의 특성을 나타내었으며, 이에 대한 부호기 구조를 그림 3에 도시하였다. 그림 3의 컨볼루션 부호기는 채널당 2.0, 2.25, 2.50, 2.75 bits/symbol 전송효율에 대하여도 동일하게 적용된다.

표 2. 컨볼루션 부호기 특성  
Table 2. Characteristics of convolutional encoder

No. of States	64
Constraint Length(v)	7
Coding Rate(R)	3/4
Generator Polynomial	$h^3=050, h^2=024, h^1=006, h^0=103$

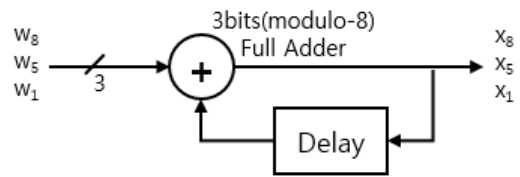


그림 2. 모듈로-8 연산을 위한 차동 부호기  
Fig. 2. Block diagram of modulo-8 differential encoder

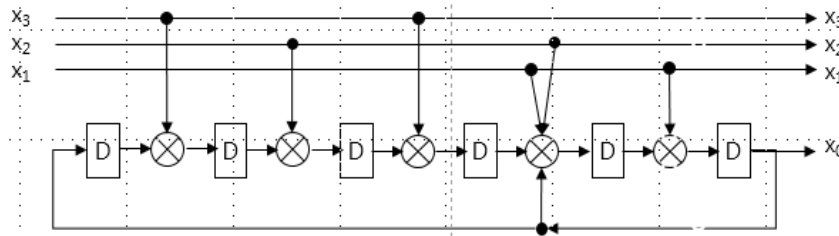


그림 3. 부호율 R=3/4인 컨볼루션 부호기 구조  
Fig. 3. Convolutional encoder with R=3/4 coding rate

2.1.3 성상도 매퍼(Constellation Mapper)

CCSDS에서 권고하는 채널당 전송효율 2.0bits/symbol에 대한 8차원 매퍼는 식 (1)과 같은데[2], 식 (1)은 참고문헌 [7]을 통해서 유도 가능하다.

식 (1)에서  $Z^i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ )와  $x^i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 7$ )는 각각 4개의 심볼과 매퍼에 입력되는 8개의 비트를 나타낸다. 식 (1)에서 오른쪽항의 첫 번째 항인  $(x^8, x^5, x^1)$ 비트는 각 벡터 집합에서 공통적으로  $\pi$

4의 위상 변화에 민감하기 때문에 차동 부호화 되어 입력된다.

식 (1)을 각 심볼에 대하여 풀면, 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 그림 4에는 이를 논리적으로 구현한 성상도 매퍼를 나타내었다. 성상도 매퍼를 통해 매핑된 연속된 4개의 심볼( $Z^i$ )은 변조기를 통해 8PSK 신호로 전송된다. 그림 5에는 전송효율이 2.0 bits/symbol 일 때, 앞에서 구현한 각각의 블록을 통합한 4D-8PSK TCM 시스템의 송신부를 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} Z^0 \\ Z^1 \\ Z^2 \\ Z^3 \end{bmatrix} = \left\{ (4x^8 + 2x^5 + x^1) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 4 \begin{bmatrix} 0 & x^7 \\ x^8 & x^6 \\ x^3 & x^2 + x^0 \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} 0 & x^3 \\ x^8 & x^2 \\ x^3 & x^2 + x^0 \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} Z^{(0)} \\ Z^{(1)} \\ Z^{(2)} \\ Z^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4x^8 + 2x^5 + x^1 \\ 4(x^8 + x^7) + 2(x^5 + x^3) + x^1 \\ 4(x^8 + x^6) + 2(x^5 + x^2) + x^1 \\ 4(x^8 + x^7 + x^6 + x^4) + 2(x^5 + x^3 + x^2 + x^0) + x^1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

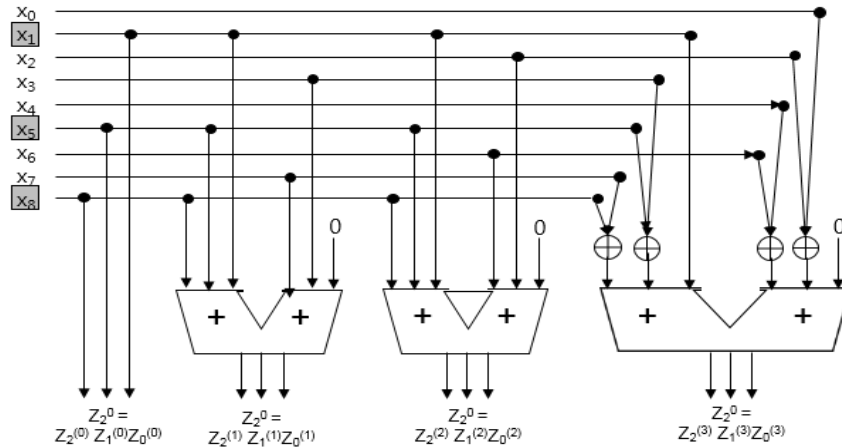


그림 4. 2.0 bits/symbol 일 때, 성상도 매퍼  
Fig. 4. Constellation mapper with 2.0 bits/symbol

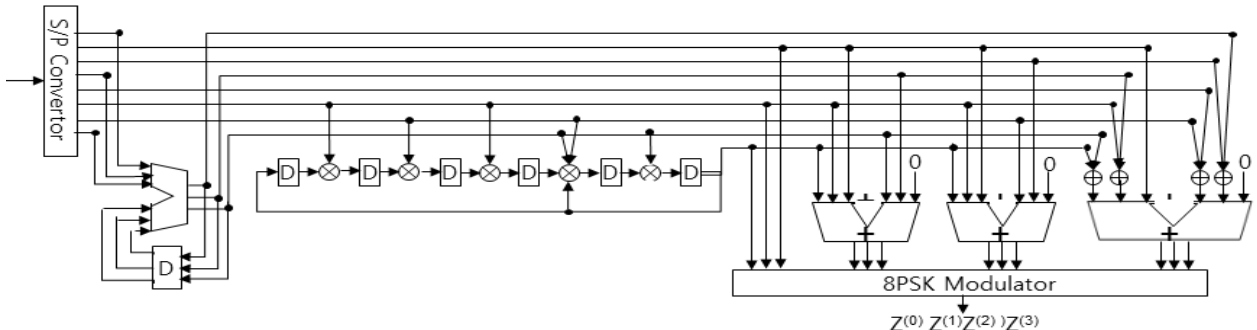


그림 5. 2.0 bits/symbol 일 때, 4D-8PSK TCM 송신부  
Fig. 5. 4D-8PSK TCM encoder with 2.0 bits/symbol

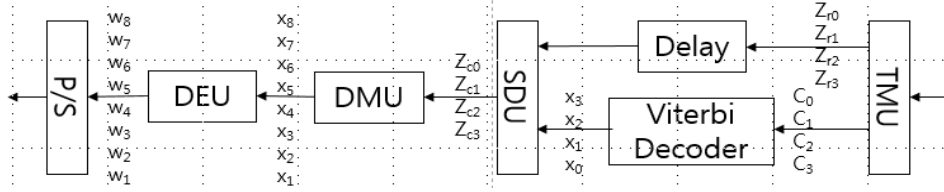


그림 6. 4D-8PSK TCM 수신부의 구조

Fig. 6. Block diagram of 4D-8PSK TCM decoder

## 2.2 4D-8PSK TCM 시스템 수신부 설계 및 구현

CCSDS 표준에 따른 4D-8PSK TCM의 복호기는 전송 메트릭 유닛(TMU, Transmission Metric Unit), 비터비 복호기, 심볼 판정 유닛(SDU, Symbol Decision Unit), 디맵퍼 유닛(DMU, De-mapper Unit), 차동 복호기 및 병렬/직렬 변환기로 구성된다[8][9]. 그림 6에는 4D-8PSK TCM 복호기 구조를 나타내었다.

### 2.2.1 TMU

4D-8PSK TCM 수신기는 연관된 4개의 심볼 ( $Z^0, Z^1, Z^2, Z^3$ )을 수신 받아, 일단 각 서브셋을 최종 결정하지 않고, I/Q 성분으로 수신된 4개의 연속된 심볼( $Z^0, Z^1, Z^2, Z^3$ )과 서브셋( $C^0, C^1, C^2, C^3$ )간의 유클리드 거리(Euclidean Distance)를 계산하여 그 값을 출력한다.

### 2.2.2 트렐리스 복호기(컨볼루션 복호기)

다차원 TCM의 복호 알고리즘은 잘 알려진 비터비 알고리즘을 기본으로 사용한다. 송신부에서 컨볼루션 부호화된 신호는 트렐리스에 의한 복호화 과정이 수행된다. 비터비 알고리즘을 바탕으로 TCM을 복호화 방법으로는 전수 대입 방법(Brute-Force Method)과 간략화 접근(Simpler Approach)방법이 있다. 본 논문에서는 구현상 복잡도를 고려하여 유클리드 거리에 대하여 최적화 되도록 정의된 TCM의 특성을 이용하여 계산량을 현저히 줄일 수 있는 간략화 접근 방식을 적용하여 복호기를 구현한다.

비터비 복호기는 TMU에서 출력된 연속된 4개의 심볼과 서브셋( $C^0, C^1, C^2, C^3$ )간의 유클리드 거리 값을

이용하여 각 심볼에 대하여 16 브랜치 메트릭(BM, Branch Metric)을 구성하고, 16개의 가능한 천이(Transition)중에 최소 값으로 선택된 천이의 서브셋을 결정하여 출력한다. 또한 경로 메트릭(PM, Path Metric)은 이전의 PM과 현재의 BM을 더하여 누적 메트릭 값을 계산하면서 역추적 방식을 이용하여 비터비 알고리즘을 적용한다.

16개의 상태를 가지는 ( $x^3, x^2, x^1, x^0$ )에 대하여 보조격자 정보를 이용하여 BM을 계산하고, 이의 누적 메트릭 값을 계산하여 PM을 만든다. 역추적 방식을 이용하여 코드 셋( $C^0, C^1, C^2, C^3$ )을 결정하고, 모든 가능한 트렐리스 경로(Trellis Path)를 찾아  $x^0$ 을 결정한 후 최종적으로  $x^3, x^2, x^1, x^0$ 을 결정하여 출력한다. 채널당 2.0 bits/symbol의 전송효율을 갖는 경우, 식 (1)의 매핑을 적용하면 8PSK에 대하여 4개의 심볼을 생성하게 되며, 따라서, 보조격자의 최종 상태는 4번째 단 이후에 얻을 수 있게 된다. 따라서  $x^8x^7x^6x^5x^4$ 의 가능한 조합으로 형성된 4개의 심볼 ( $Z^3Z^2Z^1Z^0$ )을 수신하여 PM을 계산함으로써, 트렐리스의 모든 가능한 경로를 찾을 수 있으며, 이를 정리하면 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

보조격자는 마지막 상태 ( $x^3x^2x^1x^0$ )가 (0000)일 때, 표 3에서 보면 경로  $C_0C_0C_0C_0$ 와  $C_2C_2C_2C_2$ 만이 최종 상태 (0000)으로 수렴하게 된다. 모든 보조격자는 모든 16개의 최종 상태에 따라 위와 동일한 과정을 통해 구성 할 수 있으며, 이를 16가지의 최종 상태에 따라 정리하면 보조격자 정보와 보조격자를 얻을 수 있다. 그림 7에는 전송효율이 채널당 2.0 bits/symbol일 때, 보조 격자도를 나타내었다.

단위 심볼당 비트 전송률이 높아질수록 각 상태를 판정하기 위한 후보 가지 수도 증가하게 되며, 다른 전송효율에 대하여도 동일한 방법으로 구할 수 있다.

표 3.  $(x^3x^2x^1x^0)=0000$ 으로 수렴 가능한 모든 경로  
 Table 3. All possible paths for state merging to  $(x^3x^2x^1x^0)=0000$

$x^8x^7x^6x^5x^4$	$z^0z^1z^2z^3$	paths	$x^8x^7x^6x^5x^4$	$z^0z^1z^2z^3$	paths
00000	0000	$C_0C_0C_0C_0$	00010	2222	$C_2C_2C_2C_2$
00001	0004	$C_0C_0C_0C_0$	00011	2226	$C_2C_2C_2C_2$
00100	0044	$C_0C_0C_0C_0$	00110	2266	$C_2C_2C_2C_2$
00101	0040	$C_0C_0C_0C_0$	00111	2262	$C_2C_2C_2C_2$
01000	0404	$C_0C_0C_0C_0$	01010	2626	$C_2C_2C_2C_2$
01001	0400	$C_0C_0C_0C_0$	01011	2622	$C_2C_2C_2C_2$
01100	0440	$C_0C_0C_0C_0$	01110	2662	$C_2C_2C_2C_2$
01101	0444	$C_0C_0C_0C_0$	01111	2666	$C_2C_2C_2C_2$
10000	4440	$C_0C_0C_0C_0$	10010	6662	$C_2C_2C_2C_2$
10001	4444	$C_0C_0C_0C_0$	10011	6666	$C_2C_2C_2C_2$
10100	4404	$C_0C_0C_0C_0$	10110	6626	$C_2C_2C_2C_2$
10101	4400	$C_0C_0C_0C_0$	10111	6622	$C_2C_2C_2C_2$
11000	4044	$C_0C_0C_0C_0$	11010	6266	$C_2C_2C_2C_2$
11001	4040	$C_0C_0C_0C_0$	11011	6262	$C_2C_2C_2C_2$
11100	4000	$C_0C_0C_0C_0$	11110	6222	$C_2C_2C_2C_2$
11101	4004	$C_0C_0C_0C_0$	11111	6226	$C_2C_2C_2C_2$

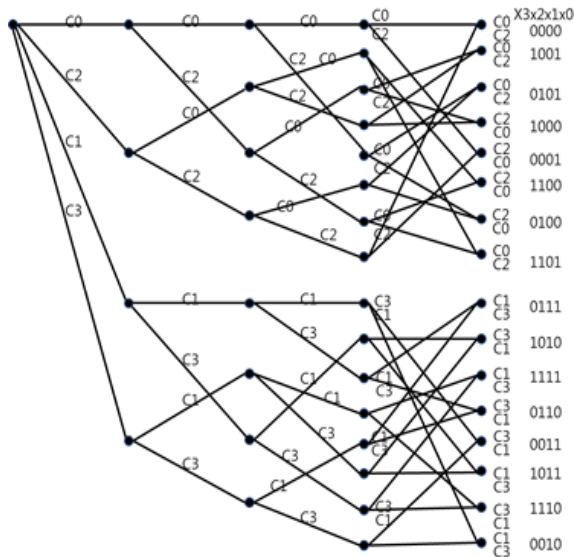


그림 7. 2.0 bits/symbol 일 때, 4D-8PSK TCM의 보조격자도

Fig. 7. Auxillary trellis diagram of 4D-8PSK TCM with 2.0 bits/symbol

표 4에는 이와 같은 과정을 다른 전송효율에 대하여 정리하여 나타내었다. 표 4를 통해, 심볼당 2비트 전송모드에서는 각 상태마다 2개의 보조격자가 존재하며, 2.25비트 전송 모드에서는 4개, 2.5비트 전송모드에서는 8개, 2.75비트 전송모드에서는

16개가 각각 존재함을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 간략화 접근 방법에 적용하면 하드웨어 구현하여 복잡도를 줄일 수 있다.

표 4. 전송효율에 따른 4D-8PSK TCM의 보조격자 정보  
 Table 4. Auxillary trellis information of 4D-8PSK TCM for transmission efficiency

Auxillary trellis $(x^3x^2x^1x^0)$	Parallela Branches			
	2.0	2.25	2.5	2.75
0 (0000)	$C^0-C^0-C^0-C^0$ $C^2-C^2-C^2-C^2$	$C^0-C^0-C^0-C^0$ $C^0-C^2-C^0-C^2$ $C^2-C^2-C^2-C^2$ $C^2-C^0-C^2-C^0$	$C^0-C^0-C^0-C^0$ $C^0-C^0-C^2-C^2$ $C^0-C^2-C^0-C^2$ $C^2-C^2-C^2-C^2$ $C^2-C^2-C^0-C^0$ $C^2-C^0-C^2-C^0$	$C^0-C^0-C^0-C^0$ $C^1-C^1-C^1-C^1$ $C^0-C^0-C^2-C^2$ $C^1-C^1-C^3-C^3$ $C^0-C^2-C^0-C^2$ $C^1-C^3-C^1-C^3$ $C^0-C^2-C^2-C^0$ $C^1-C^3-C^3-C^1$ $C^2-C^2-C^2-C^2$ $C^3-C^3-C^3-C^3$ $C^2-C^2-C^0-C^0$ $C^3-C^3-C^1-C^1$ $C^2-C^0-C^2-C^0$ $C^3-C^3-C^1-C^1$ $C^2-C^0-C^2-C^0$ $C^3-C^1-C^3-C^1$ $C^2-C^0-C^2-C^0$ $C^3-C^1-C^1-C^3$
1 (0001)	$C^0-C^0-C^0-C^2$ $C^2-C^2-C^2-C^0$	$C^0-C^1-C^0-C^1$ $C^0-C^3-C^0-C^3$ $C^0-C^2-C^3-C^1$ $C^2-C^2-C^3-C^3$ $C^2-C^2-C^1-C^1$ $C^2-C^0-C^3-C^1$ $C^2-C^0-C^1-C^3$	$C^0-C^0-C^1-C^1$ $C^0-C^0-C^3-C^3$ $C^0-C^2-C^1-C^3$ $C^0-C^2-C^3-C^1$ $C^2-C^2-C^3-C^3$ $C^2-C^2-C^1-C^1$ $C^2-C^0-C^3-C^1$ $C^2-C^0-C^1-C^3$	$C^0-C^0-C^0-C^1$ $C^1-C^1-C^1-C^2$ $C^0-C^0-C^2-C^3$ $C^1-C^1-C^3-C^0$ $C^0-C^2-C^0-C^3$ $C^1-C^3-C^1-C^0$ $C^0-C^2-C^2-C^1$ $C^1-C^3-C^3-C^2$ $C^2-C^2-C^3-C^0$ $C^3-C^3-C^3-C^0$ $C^2-C^2-C^0-C^1$ $C^3-C^3-C^1-C^2$ $C^2-C^0-C^2-C^1$ $C^3-C^1-C^3-C^2$ $C^2-C^0-C^0-C^3$ $C^3-C^1-C^1-C^0$
2 (0010)	$C^1-C^1-C^1-C^1$ $C^3-C^3-C^3-C^3$	$C^0-C^0-C^0-C^2$ $C^0-C^2-C^0-C^0$ $C^0-C^3-C^0-C^1$ $C^2-C^2-C^2-C^3$ $C^2-C^3-C^0-C^1$ $C^2-C^0-C^2-C^1$ $C^2-C^1-C^2-C^1$	$C^0-C^1-C^0-C^1$ $C^0-C^1-C^2-C^3$ $C^0-C^3-C^0-C^3$ $C^0-C^2-C^2-C^1$ $C^1-C^3-C^0-C^2$ $C^2-C^2-C^3-C^3$ $C^3-C^3-C^0-C^0$ $C^2-C^2-C^1-C^1$ $C^3-C^3-C^2-C^2$ $C^2-C^0-C^3-C^1$ $C^3-C^3-C^2-C^2$ $C^2-C^1-C^0-C^3$ $C^3-C^1-C^2-C^0$	$C^0-C^0-C^1-C^1$ $C^1-C^1-C^2-C^2$ $C^0-C^0-C^3-C^3$ $C^1-C^1-C^0-C^0$ $C^0-C^2-C^1-C^3$ $C^1-C^3-C^2-C^0$ $C^0-C^2-C^3-C^1$ $C^1-C^3-C^3-C^0$ $C^2-C^2-C^1-C^1$ $C^3-C^3-C^0-C^0$ $C^2-C^2-C^1-C^1$ $C^3-C^3-C^2-C^2$ $C^2-C^0-C^3-C^1$ $C^3-C^1-C^0-C^2$ $C^2-C^0-C^1-C^3$ $C^3-C^1-C^2-C^0$

Auxiliary trellis ( $x^3x^2x^1x^0$ )	Parallela Branches			
	2.0	2.25	2.5	2.75
3 (0011)	$C^1-C^1-C^1-C^3$ $C^3-C^3-C^3-C^1$	$C^0-C^1-C^0-C^3$ $C^0-C^3-C^0-C^1$ $C^0-C^3-C^2-C^1$ $C^2-C^1-C^2-C^3$	$C^0-C^1-C^1-C^2$ $C^0-C^1-C^3-C^0$ $C^0-C^3-C^1-C^0$ $C^0-C^3-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^3-C^0$ $C^2-C^3-C^1-C^2$ $C^2-C^1-C^3-C^2$ $C^2-C^1-C^1-C^0$	$C^0-C^0-C^1-C^2$ $C^1-C^1-C^2-C^3$ $C^0-C^0-C^3-C^0$ $C^1-C^1-C^0-C^1$ $C^0-C^2-C^1-C^0$ $C^1-C^3-C^2-C^1$ $C^0-C^2-C^3-C^2$ $C^1-C^3-C^0-C^3$ $C^2-C^2-C^3-C^0$ $C^3-C^3-C^0-C^1$ $C^2-C^2-C^1-C^2$ $C^3-C^3-C^2-C^3$ $C^2-C^2-C^1-C^2$ $C^3-C^3-C^0-C^1$ $C^2-C^2-C^3-C^2$ $C^3-C^3-C^1-C^2$ $C^2-C^1-C^0-C^3$ $C^2-C^0-C^1-C^0$ $C^3-C^1-C^2-C^1$
4 (0100)	$C^0-C^0-C^2-C^2$ $C^2-C^2-C^0-C^0$	$C^1-C^1-C^1-C^1$ $C^1-C^3-C^1-C^3$ $C^3-C^3-C^3-C^3$ $C^3-C^1-C^3-C^1$	$C^0-C^0-C^0-C^2$ $C^0-C^0-C^2-C^0$ $C^1-C^0-C^1-C^0$ $C^0-C^2-C^2-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^2-C^3$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^2-C^0-C^2-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^2-C^1-C^2-C^1$ $C^3-C^2-C^3-C^2$ $C^2-C^1-C^0-C^3$ $C^3-C^2-C^1-C^0$	$C^0-C^1-C^0-C^2$ $C^1-C^2-C^1-C^3$ $C^0-C^1-C^2-C^0$ $C^1-C^2-C^3-C^1$ $C^0-C^3-C^0-C^0$ $C^1-C^0-C^1-C^1$ $C^0-C^3-C^2-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^3-C^2-C^0$ $C^3-C^0-C^3-C^1$ $C^2-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^0-C^1-C^1$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^3-C^1-C^2-C^2$ $C^3-C^2-C^3-C^3$ $C^2-C^1-C^0-C^0$ $C^3-C^2-C^1-C^1$
5 (0101)	$C^0-C^0-C^2-C^0$ $C^2-C^2-C^0-C^2$	$C^1-C^2-C^1-C^2$ $C^1-C^0-C^1-C^0$ $C^0-C^2-C^3-C^3$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^2-C^3-C^2$	$C^0-C^0-C^1-C^3$ $C^0-C^0-C^3-C^1$ $C^1-C^0-C^1-C^1$ $C^0-C^2-C^3-C^3$ $C^1-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^3-C^2-C^0$ $C^3-C^0-C^3-C^1$ $C^2-C^3-C^0-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^3$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^0-C^1-C^1$	$C^0-C^1-C^0-C^2$ $C^1-C^2-C^1-C^3$ $C^0-C^1-C^2-C^0$ $C^1-C^2-C^3-C^1$ $C^0-C^3-C^0-C^0$ $C^1-C^0-C^1-C^1$ $C^0-C^3-C^2-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^3-C^2-C^0$ $C^3-C^0-C^3-C^1$ $C^2-C^3-C^0-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^3$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^2-C^2$ $C^3-C^2-C^3-C^3$ $C^2-C^1-C^0-C^0$ $C^3-C^2-C^1-C^1$
6 (0110)	$C^1-C^1-C^3-C^3$ $C^3-C^3-C^1-C^1$	$C^1-C^1-C^1-C^3$ $C^1-C^3-C^1-C^1$ $C^3-C^3-C^3-C^1$ $C^3-C^1-C^3-C^3$	$C^0-C^1-C^0-C^3$ $C^0-C^1-C^2-C^1$ $C^0-C^3-C^0-C^1$ $C^1-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^3-C^2-C^1$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^0-C^0-C^1$ $C^2-C^1-C^2-C^3$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^3-C^2$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^0-C^0$ $C^3-C^2-C^0-C^3$ $C^2-C^1-C^1-C^0$	$C^0-C^1-C^1-C^2$ $C^1-C^2-C^2-C^3$ $C^0-C^1-C^3-C^0$ $C^1-C^2-C^0-C^1$ $C^0-C^3-C^1-C^0$ $C^1-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^3-C^2-C^1$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^0-C^0-C^1$ $C^2-C^1-C^2-C^3$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^3-C^2$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^0-C^0$ $C^3-C^2-C^0-C^3$ $C^2-C^1-C^1-C^0$

7 (0111)	$C^1-C^1-C^3-C^1$ $C^3-C^3-C^1-C^3$	$C^1-C^2-C^1-C^0$ $C^1-C^0-C^1-C^2$ $C^3-C^0-C^3-C^2$ $C^3-C^2-C^3-C^0$	$C^0-C^1-C^1-C^0$ $C^0-C^1-C^3-C^2$ $C^0-C^3-C^1-C^2$ $C^0-C^3-C^3-C^0$ $C^0-C^3-C^3-C^0$ $C^2-C^2-C^1-C^0$ $C^2-C^1-C^3-C^0$ $C^2-C^1-C^1-C^2$	$C^0-C^1-C^1-C^3$ $C^1-C^2-C^2-C^0$ $C^0-C^1-C^3-C^1$ $C^1-C^2-C^0-C^2$ $C^0-C^3-C^3-C^2$ $C^1-C^0-C^2-C^2$ $C^2-C^3-C^3-C^1$ $C^2-C^0-C^0-C^2$ $C^3-C^0-C^2-C^2$ $C^2-C^3-C^3-C^1$ $C^3-C^2-C^2-C^0$ $C^2-C^1-C^3-C^1$ $C^3-C^1-C^1-C^3$
8 (1000)	$C^0-C^2-C^0-C^2$ $C^2-C^0-C^2-C^0$	$C^0-C^0-C^2-C^2$ $C^0-C^2-C^2-C^0$ $C^2-C^2-C^0-C^0$ $C^2-C^0-C^0-C^2$	$C^1-C^1-C^1-C^1$ $C^1-C^1-C^3-C^3$ $C^1-C^3-C^1-C^3$ $C^0-C^2-C^2-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^2-C^3$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^2-C^0-C^2-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^2-C^1-C^2-C^1$ $C^3-C^2-C^3-C^2$ $C^2-C^1-C^0-C^3$ $C^3-C^2-C^1-C^0$	$C^0-C^0-C^0-C^2$ $C^1-C^1-C^1-C^3$ $C^0-C^0-C^2-C^0$ $C^1-C^1-C^3-C^3$ $C^1-C^3-C^1-C^3$ $C^0-C^2-C^2-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^2-C^3$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^2-C^0-C^2-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^2-C^1-C^2-C^1$ $C^3-C^2-C^3-C^2$ $C^2-C^1-C^0-C^3$ $C^3-C^2-C^1-C^0$
9 (1001)	$C^0-C^2-C^0-C^0$ $C^2-C^0-C^2-C^2$	$C^0-C^1-C^2-C^3$ $C^0-C^3-C^2-C^1$ $C^2-C^3-C^0-C^1$ $C^2-C^1-C^0-C^3$	$C^1-C^1-C^2-C^2$ $C^1-C^1-C^0-C^0$ $C^1-C^3-C^2-C^0$ $C^1-C^3-C^0-C^2$ $C^2-C^3-C^2-C^2$ $C^3-C^1-C^0-C^2$ $C^3-C^1-C^2-C^0$	$C^0-C^0-C^0-C^3$ $C^1-C^1-C^1-C^0$ $C^0-C^0-C^2-C^1$ $C^1-C^1-C^3-C^2$ $C^0-C^2-C^0-C^1$ $C^1-C^3-C^1-C^2$ $C^0-C^3-C^2-C^3$ $C^1-C^2-C^2-C^0$ $C^2-C^3-C^0-C^1$ $C^3-C^2-C^2-C^2$ $C^2-C^1-C^0-C^2$ $C^3-C^1-C^2-C^0$ $C^3-C^1-C^3-C^0$ $C^2-C^0-C^2-C^3$ $C^3-C^1-C^1-C^2$
10 (1010)	$C^1-C^3-C^1-C^3$ $C^3-C^1-C^3-C^1$	$C^0-C^0-C^2-C^0$ $C^0-C^2-C^2-C^2$ $C^2-C^2-C^0-C^2$ $C^2-C^0-C^0-C^0$	$C^1-C^2-C^1-C^2$ $C^1-C^0-C^1-C^0$ $C^0-C^2-C^3-C^3$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^2-C^3-C^2$ $C^2-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^0-C^1-C^1$	$C^0-C^0-C^1-C^3$ $C^1-C^1-C^2-C^0$ $C^0-C^0-C^3-C^1$ $C^1-C^1-C^0-C^2$ $C^0-C^2-C^1-C^1$ $C^0-C^2-C^3-C^3$ $C^1-C^3-C^0-C^2$ $C^2-C^3-C^1-C^2$ $C^3-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^0-C^0-C^1$ $C^2-C^1-C^2-C^3$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^3-C^2$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^0-C^0$ $C^3-C^2-C^0-C^3$ $C^2-C^1-C^1-C^0$

Auxillary trellis ( $x^3x^2x^1x^0$ )	Parallela Branches			
	2.0	2.25	2.5	2.75
11 (1011)	$C^1-C^3-C^1-C^1$ $C^3-C^1-C^3-C^3$	$C^0-C^1-C^2-C^1$ $C^0-C^3-C^2-C^3$ $C^2-C^3-C^0-C^3$ $C^2-C^1-C^0-C^1$	$C^1-C^2-C^2-C^3$ $C^1-C^2-C^0-C^1$ $C^1-C^0-C^2-C^1$ $C^1-C^0-C^0-C^3$ $C^3-C^0-C^0-C^1$ $C^3-C^0-C^2-C^3$ $C^3-C^2-C^0-C^3$ $C^3-C^2-C^2-C^1$	$C^0-C^0-C^1-C^0$ $C^1-C^1-C^2-C^1$ $C^0-C^0-C^3-C^2$ $C^1-C^1-C^0-C^3$ $C^0-C^2-C^1-C^2$ $C^1-C^3-C^2-C^3$ $C^0-C^2-C^3-C^0$ $C^1-C^3-C^0-C^1$ $C^2-C^2-C^3-C^2$ $C^3-C^3-C^0-C^3$ $C^2-C^2-C^1-C^2$ $C^3-C^3-C^2-C^1$ $C^2-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^1-C^0-C^1$ $C^2-C^0-C^1-C^2$ $C^3-C^1-C^2-C^3$
12 (1100)	$C^0-C^2-C^2-C^0$ $C^2-C^0-C^0-C^2$	$C^1-C^1-C^3-C^3$ $C^1-C^3-C^3-C^1$ $C^1-C^3-C^3-C^3$ $C^3-C^3-C^1-C^1$ $C^3-C^3-C^1-C^3$ $C^3-C^1-C^3-C^3$ $C^3-C^1-C^1-C^1$	$C^1-C^1-C^1-C^3$ $C^1-C^1-C^3-C^1$ $C^1-C^3-C^1-C^1$ $C^1-C^3-C^3-C^3$ $C^3-C^3-C^3-C^1$ $C^3-C^3-C^1-C^3$ $C^3-C^1-C^3-C^3$ $C^3-C^1-C^1-C^1$	$C^0-C^1-C^0-C^3$ $C^1-C^2-C^1-C^0$ $C^0-C^1-C^2-C^1$ $C^1-C^2-C^3-C^2$ $C^0-C^3-C^0-C^1$ $C^1-C^0-C^1-C^2$ $C^0-C^3-C^2-C^3$ $C^1-C^0-C^3-C^0$ $C^2-C^3-C^2-C^1$ $C^3-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^0-C^3$ $C^3-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^0-C^3$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^2-C^1-C^2-C^3$ $C^3-C^2-C^3-C^0$ $C^2-C^1-C^0-C^1$ $C^3-C^2-C^1-C^2$
13 (1101)	$C^0-C^2-C^2-C^2$ $C^2-C^0-C^0-C^0$	$C^1-C^2-C^3-C^0$ $C^1-C^0-C^3-C^2$ $C^3-C^0-C^1-C^2$ $C^3-C^2-C^1-C^0$	$C^1-C^1-C^2-C^0$ $C^1-C^1-C^0-C^2$ $C^1-C^3-C^2-C^2$ $C^1-C^3-C^0-C^0$ $C^2-C^3-C^2-C^2$ $C^3-C^3-C^2-C^0$ $C^3-C^3-C^2-C^0$ $C^3-C^1-C^0-C^0$ $C^3-C^1-C^2-C^2$	$C^0-C^1-C^0-C^0$ $C^1-C^2-C^1-C^1$ $C^0-C^1-C^2-C^2$ $C^1-C^2-C^3-C^3$ $C^0-C^3-C^0-C^2$ $C^1-C^0-C^1-C^3$ $C^2-C^3-C^2-C^2$ $C^3-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^3-C^2-C^2$ $C^3-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^3-C^0-C^0$ $C^3-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^3-C^0-C^0$ $C^3-C^0-C^3-C^3$ $C^2-C^3-C^1-C^1$ $C^3-C^2-C^3-C^1$ $C^2-C^1-C^0-C^2$ $C^3-C^2-C^3-C^1$ $C^2-C^1-C^0-C^2$ $C^3-C^2-C^1-C^3$
14 (1110)	$C^1-C^3-C^3-C^1$ $C^3-C^1-C^1-C^3$	$C^1-C^1-C^3-C^1$ $C^1-C^3-C^3-C^3$ $C^1-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^3-C^1-C^0$ $C^3-C^1-C^1-C^1$	$C^1-C^2-C^1-C^0$ $C^1-C^2-C^3-C^2$ $C^1-C^0-C^1-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^0$ $C^1-C^0-C^3-C^0$ $C^1-C^0-C^0-C^1$ $C^1-C^0-C^3-C^0$ $C^2-C^3-C^3-C^2$ $C^3-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^1-C^0$ $C^3-C^0-C^3-C^1$ $C^3-C^2-C^3-C^0$ $C^2-C^3-C^1-C^0$ $C^3-C^2-C^3-C^0$ $C^2-C^1-C^3-C^0$ $C^3-C^2-C^0-C^1$ $C^2-C^1-C^1-C^2$ $C^3-C^2-C^2-C^3$	$C^0-C^1-C^1-C^0$ $C^1-C^2-C^2-C^1$ $C^0-C^1-C^3-C^2$ $C^1-C^2-C^0-C^3$ $C^0-C^3-C^1-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^3-C^3$ $C^0-C^2-C^3-C^0$ $C^1-C^3-C^2-C^3$ $C^2-C^3-C^3-C^2$ $C^3-C^0-C^3-C^2$ $C^2-C^3-C^1-C^0$ $C^3-C^0-C^3-C^1$ $C^2-C^3-C^1-C^0$ $C^3-C^2-C^3-C^0$ $C^2-C^1-C^3-C^0$ $C^3-C^2-C^0-C^1$ $C^2-C^1-C^1-C^2$ $C^3-C^2-C^2-C^3$

15 (1111)	$C^1-C^3-C^3-C^3$ $C^3-C^1-C^1-C^1$	$C^1-C^2-C^3-C^2$ $C^1-C^0-C^3-C^0$ $C^3-C^0-C^1-C^0$ $C^3-C^2-C^1-C^2$	$C^1-C^2-C^2-C^1$ $C^1-C^2-C^0-C^3$ $C^1-C^0-C^2-C^3$ $C^1-C^0-C^0-C^1$ $C^3-C^0-C^0-C^3$ $C^3-C^0-C^2-C^1$ $C^3-C^2-C^0-C^1$ $C^3-C^2-C^2-C^3$	$C^0-C^1-C^1-C^1$ $C^1-C^2-C^2-C^2$ $C^0-C^1-C^3-C^3$ $C^1-C^2-C^0-C^0$ $C^0-C^3-C^1-C^3$ $C^1-C^0-C^2-C^0$ $C^0-C^3-C^3-C^1$ $C^1-C^0-C^0-C^2$ $C^2-C^3-C^3-C^3$ $C^3-C^0-C^0-C^0$ $C^3-C^0-C^2-C^1$ $C^3-C^2-C^0-C^1$ $C^3-C^2-C^2-C^3$ $C^2-C^1-C^3-C^1$ $C^3-C^2-C^0-C^2$ $C^2-C^1-C^1-C^3$ $C^3-C^2-C^2-C^0$
--------------	--	--	--	---

2.2.3 SDU

비터비 복호기에서 판정된  $C^0, C^1, C^2, C^3$ 를 이용하여 수신된 신호와의 유클리드 거리가 가장 작은 서브 셋을 결정하여  $Z_c^0, Z_c^1, Z_c^2, Z_c^3$ 를 결정하고 출력한다. 여기서  $Z_c^i$ 는 SDU를 통해 정정된 심볼을 나타낸다.

2.2.4 DMU

결정된 심볼  $Z_c^0, Z_c^1, Z_c^2, Z_c^3$ 을 가지고 디맵핑을 수행하기 위해, 매핑 식 (2)에 가감법을 적용하여 송신된 비트  $x^8, x^7, x^6, x^5, x^4, x^3, x^2, x^1, x^0$ 에 대하여 풀면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Z_d^0 \\ Z_d^1 \\ Z_d^2 \\ Z_d^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c^0 \\ Z_c^1 - Z_c^0 \\ Z_c^2 - Z_c^0 \\ Z_c^3 - Z_c^0 + (Z_c^0 - Z_c^1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4x^8 + 2x^5 + x^1 \\ 4x^7 + 2x^3 + 0 \\ 4x^6 + 2x^2 + 0 \\ 4x^4 + 2x^0 + 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

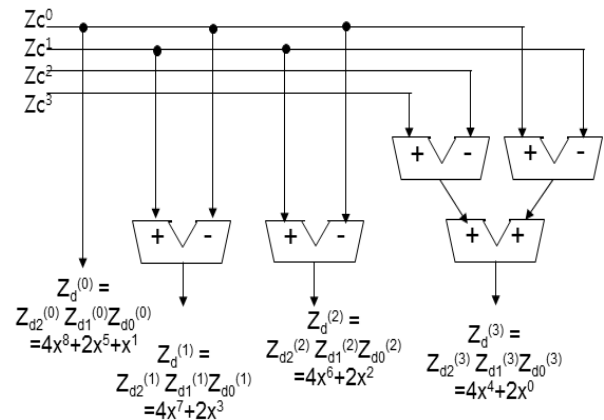


그림 8. 2.0 bits/symbol 일 때, 정상도 De-Mapper  
Fig. 8. Constellation de-mapper with 2.0 bits/symbol



그림 8에는 식 (3)의 결과를 논리회로로 구성한 성상도 디맵퍼를 나타내었다.

### 2.2.5 차동 복호기

차동 복호기는 DMU 다음 단계에 위치하며, 차동 부호기와 동일하게 입력 데이터와 버퍼에 저장되었던 데이터에 대하여 모듈로-8 연산을 수행한다. 차동 복호기 구조는 3비트 지연소자와 3비트 전 감산기(Full Subtractor)로 구성할 수 있으며, 그림 9와 같이 구성 할 수 있다.

성상도 디맵퍼에서 출력된  $x^8, x^7, x^6, x^5, x^4, x^3, x^2, x^1$  중에 채널당 2.0 bits/symbol일 때, 송신부에서 차동 부호화시에 사용하였던  $x^8, x^5, x^1$ 을 가지고 차동 복호를 수행한다. 그림 9에는 이에 대한 차동 복호기 구조를 나타내었다.

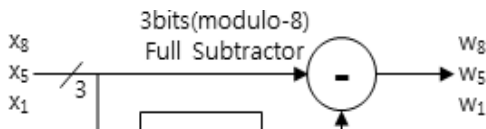


그림 9. 모듈로-8 연산을 위한 차동 복호기  
Fig. 9. Block diagram of modulo-8 differential decoder

차동 복호화된 데이터는 병렬/직렬 변환 장치를 통해 최종 데이터로 출력된다. 그림 10에는 각 부분 별로 구현된 4D-8PSK TCM 시스템의 수신부 구조를 나타내었다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 성능 분석

이 장에서는 시뮬레이터로 구현된 4D-8PSK TCM

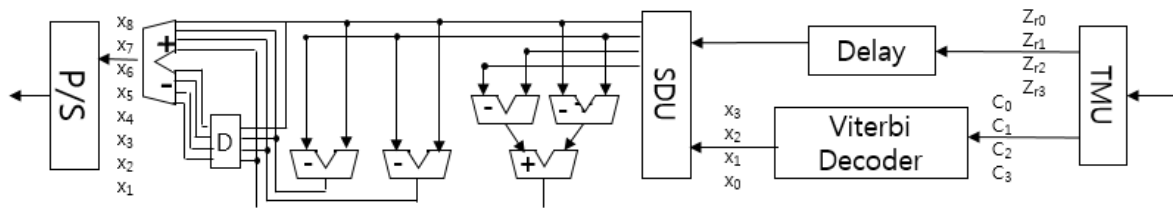


그림 10. 2.0 bits/symbol 일 때, 4D-8PSK TCM 수신부  
Fig. 10. 4D-8PSK TCM decoder with 2.0 bits/symbol

시스템에 대하여 CCSDS 표준에서 권고하는 시스템 파라미터를 준용하여 모의실험을 진행하고 BER 성능을 분석한다. 모의실험을 위해 시뮬링크를 이용하여 시뮬레이터를 구현하였으며, 채널 환경은 위성 채널을 고려하여 AWGN 환경에서 모의실험을 수행하였다. 4D-8PSK TCM 시스템 파라미터는 표 1과 2를 준용하였고, 정현파 필터로는 0, 0.35, 0.5, 1의 roll-off factor를 갖는 SRRC(Square Root Raised Cosine) 필터를 고려하였다.

그림 11에는 구현된 4D-8PSK TCM에 대하여 각 전송효율에 따른 BER 성능을 나타내었다. 4D-8PSK TCM의 성능은 전송효율이 2.0 bits/symbol일 때 EbNo가 증가함에 따라 전송효율 2.25 bits/symbol의 성능에 근접해짐을 알 수 있다. 이는 4D-8PSK TCM의 성능이 8PSK대비 일정한 코딩이득에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

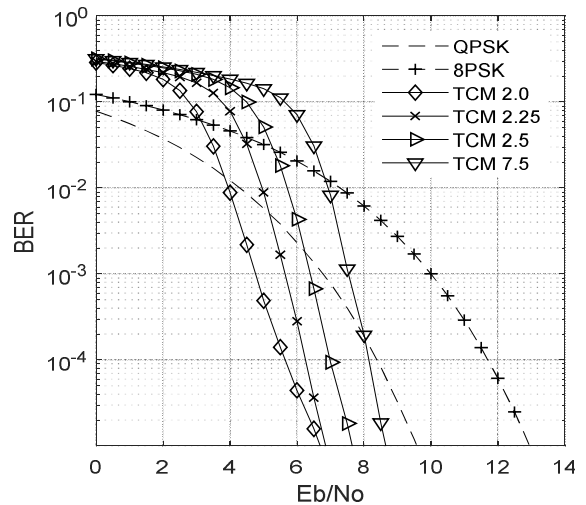


그림 11. 2.0 bits/symbol 일 때, 4D-8PSK TCM BER 성능  
Fig. 11. BER performance for 4D-8PSK TCM with 2.0 bits/symbol

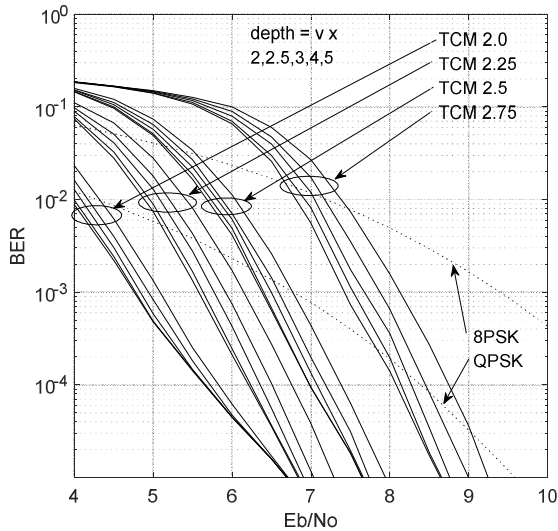


그림 12. 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol 일 때, 비터비 디코더의 역 추적 깊이에 따른 4D-8PSK TCM 시스템 BER 성능

Fig. 12. BER performance of 4D-8PSK TCM system for the depth of viterbi decoder with 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol

또한, 그림 12에는 비터비 복호기의 역추적 깊이에 따른 BER 성능을 나타내었다. 여기서 역추적 깊이는 구속장의 2, 2.5, 3, 4, 5배로 설정하였으며 이때 전송효율 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol에 대한 각각의 BER 성능을 나타내었다. 역추적 깊이에 따라 최대 약 0.8dB의 성능 차이가 발생하며, 전송효율이 클수록 역추적 깊이에 의한 성능의 영향을 많이 받음을 알 수 있으며, 역추적 깊이를 24(구속장 길이의 4배) 정도로 설계하였을 때 복잡도 대비 최적의 성능을 가짐을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 CCSDS에서 권고하고 있는 대역폭 효율적인 변조 방식 중 채널당 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol의 전송효율을 갖는 4D-8PSK TCM 송신부와 수신부를 설계하고 시뮬레이터를 구현한 후 BER 성능을 분석하였다. BER이  $10^{-4}$ 일 때, 채널당 2.0, 2.25, 2.5, 2.75 bits/symbol의 전송효율에 대하여, 4D-8PSK TCM은 각각 5.6, 6.3, 7, 8.1dB가 요구됨을 확인하였다. 이는 TCM를 사용하지 않는 8PSK(BER  $10^{-4}$ 일 때 10.9dB)와 비교했을 때, 채널당 2.0 bits/symbol인 경우 5.3dB, 채널당 2.25 bits/symbol인 경우는 4.6dB의 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있었으며, 다차원 TCM에서 얻을 수 있는 최대 이득 5.5dB에 근접하는 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

#### References

- [1] Unwanted emissions in the out-of-band domain, Recommendation ITU-R SM.1541-6, Aug. 2015.
- [2] Bandwidth-Efficient Modulation, CCSDS 413.0-G-2 Green Book, Oct. 2009.
- [3] G. Ungerboeck, "Trellis-coded modulation with redundant signal sets part I: Introduction", IEEE Commun. Mag., Vol. 25, No. 2, pp. 5-11, Feb. 1987.
- [4] G. Ungerboeck, "Trellis-coded modulation with redundant signal sets part II: State of the art", IEEE Commun. Mag., Vol. 25, No. 2, pp. 12-21, Feb. 1987.
- [5] G. Ungerboeck, "Channel coding with multilevel/phase signals", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 28, No. 1, pp. 55-67, Jan. 1982.
- [6] G. D. Forney and L. F. Wei, "Multidimensional constellations-Part I: Introduction, figures of merit, and generalized cross constellations", IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol. 7, No. 6, pp. 877-892, Aug. 1989.
- [7] S. S. Pietrobon, R. H. Deng, A. Lafanechere, G. Ungerboeck, and D. J. Costello, "Trellis-coded multidimensional phase modulation", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 36, No. 1, pp. 63-89, Jan. 1990.
- [8] J. He, Z. Wang, and H. Liu, "An efficient 4-D 8PSK TCM decoder architecture", IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst., Vol. 18, No. 5, pp. 808-817, May 2010.
- [9] L. Huang, J. Wang, J. Zhu, J. Yang, F. Ren and X. Liu, "Research on 4-D 8PSK TCM decoding algorithm", Proc. 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology, Changchun, China, pp. 1894-1897, Dec. 2012.
- [10] J. H. Lee and Y. J. Song, "Performance Analysis

of TCM Codes in APCO-25 System", Proceedings of KIIT Summer Conference, pp. 305-306, Jun. 2015.

[11] Ik Soo Jin, "Performance of STBC-MTCM/TCM Systems for High Rate Transmissions", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 12, pp. 99-105, Dec. 2016.

저자소개

윤 동 원 (Dongweon Yoon)



1989년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학사)  
1992년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
1995년 8월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학박사)  
2019년 3월 현재 : 한양대학교

융합전자공학부 교수  
관심분야 : 무선통신, 위성 및 우주통신

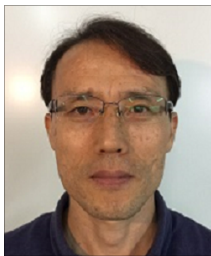
김 도 옥 (Dohwook Kim)



1987년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학사)  
1990년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
2010년 2월 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학(박사수료)  
2017년 2월 ~ 현재 : 한양대학교

전자컴퓨터통신공학 연구위원  
관심분야 : 무선통신, 위성통신, 통신 시스템 설계 및  
디지털 신호처리

김 중 표 (Joongpyo Kim)



1991년 2월 : 경북대학교  
전자공학과(공학사)  
1993년 2월 : 경북대학교  
전자공학과(공학석사)  
2000년 2월 : 경북대학교  
전자공학과(공학박사)  
2000년 3월 ~ 현재 :

한국항공우주연구원 책임연구원  
관심분야 : 무선통신, 디지털통신, 위성통신 시스템 설계

김 상 구 (Sanggoo Kim)



2007년 2월 : 한국외국어대학교  
전자공학과(공학사)  
2009년 2월 : 한양대학교 전자컴  
퓨터통신공학과(공학석사)  
2013년 2월 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학과(공학박사)  
2013년 3월 ~ 12월 : 한양대학교

전기정보통신기술연구소 Post-Doc.  
2014년 1월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원  
관심분야 : 위성통신, 무선통신, 이동통신