

## 정진폭 다중부호 트랜스직교변조

홍대기<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>상명대학교 정보통신공학과

# Constant-Amplitude Multi-Code Trans-Orthogonal Modulation

Dae-Ki Hong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Information and Telecommunication Eng., SangMyung University

**요 약** 기존의 직교변조 (Orthogonal Modulation)는 그 효율성에 비해 대역폭 효율이 지나치게 떨어져 이를 개선하기 위한 다중부호 트랜스직교변조 (MCTO: Multi-Code Trans-Orthogonal Modulation)가 제안되었다. 그러나 MCTO 변조는 송신신호의 진폭이 일정하게 유지되지 않아 RF (Radio Frequency) 단에 포함되어 있는 전력 증폭기 (Power Amplifier)의 부담이 커지게 되는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 다중부호 신호를 정진폭으로 부호화하는 방식을 이용한 정진폭 다중부호 트랜스직교변조 (CAMCTO: Constant-Amplitude Multi-Code Trans-Orthogonal Modulation)를 제안한다. 또한 제안된 CAMCTO 변조의 성능을 실험을 통해 제시하고 기존의 직교변조 및 MCTO 변조와 비교한다. 실험 결과에 의하면 제안된 CAMCTO 변조는 기존의 직교변조에 비해 대역폭 효율은 매우 증가하며 MCTO 변조에 비해 RF의 부담을 매우 경감시킬 수 있음을 알 수 있다.

**Abstract** To improve the bandwidth efficiency of conventional orthogonal modulation, the MCTO(Multi-Code Trans-Orthogonal) modulation, which is modified orthogonal modulation, was proposed. However, the RF(Radio Frequency) power amplifier for the MCTO modulation is too complex to reject the amplitude distortion due to the non-constant amplitude property of the MCTO. Therefore, in this paper, CAMCTO(constant-amplitude multi-code trans-orthogonal) modulation is proposed by using the constant-amplitude encoding algorithm for multi-code signal. Additionally, the performance of the proposed CAMCTO modulation is compared with those of the orthogonal modulation and the MCTO modulation by using the computer simulation. The computer simulations show that the bandwidth efficiency of the proposed CAMCTO modulation is better than that of the conventional orthogonal modulation.

**Key Words** : MCTO, CAMCTO, Bandwidth Efficiency, modulation, RF, Power Amplifier

### 1. 서론

직교변조(OM: Orthogonal Modulation)는 간단한 수신기 구성이 가능하기 때문에 대표적인 표준 통신시스템의 요소 기술로 활용되고 있다[1]. 그러나 직교변조는 제공할 수 있는 데이터율에 비해 과도한 대역폭을 점유함으로써 고속데이터전송을 제공하지 못하는 치명적인 단점이 있다. 이에 따라 최근에 직교변조의 특성을 유지하면서 고속데이터전송을 제공하는 직교변조에 대한 연구가 진행되어 왔다[2-6].

이중에서 다중부호(MC: Multi-Code) 변조[2]를 이용

하는 다중부호 트랜스직교변조(MCTO: Multi-Code Trans-Orthogonal Modulation)가 가장 주목할 만한 방식이다[3]. MCTO 변조는 대역폭 효율(Bandwidth Efficiency)을 높이기 위해 다중부호를 사용하였을 뿐만 아니라 사용할 수 있는 부호의 개수를 늘리기 위해 트랜스 직교부호를 이용하였다.

그러나 MCTO 변조는 높은 대역폭 효율을 얻을 수는 있지만 다중레벨 신호의 증폭을 위한 고가의 선형 전력 증폭기를 필요로 한다는 문제점이 있다[4]. 반대로 말하면 충분히 넓지 않은 선형 영역을 갖는 전력증폭기를 사용할 경우에는 증폭기의 비 선형성으로 인해 전체 시스

본 논문은 상명대학교 2009학년도 교내 융·복합 집적화 연구과제에 의하여 수행되었음

\*교신저자 : 홍대기(hongdk@smu.ac.kr)

접수일 10년 11월 22일

수정일 11년 01월 05일

게재확정일 11년 01월 13일

템의 성능에 악영향을 끼치게 된다. 따라서 선형 영역이 좁은 전력증폭기를 사용하기 위해서는 다중부호 신호가 정진폭을 가져야 한다. 정진폭 신호를 클리핑으로 해결하기 위한 방식이 연구되기도 하였으나 이 방식은 신호에 원천적으로 왜곡이 가해지므로 좋은 변조라고 볼 수 없다[5].

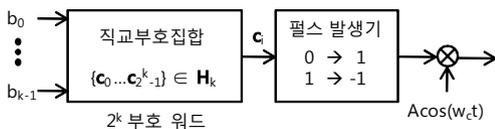
본 논문에서는 두 가지 기준을 가지고 새로운 시스템을 개발한다. 첫 번째는 다중부호를 이용한 대역폭 효율의 증가이고 두 번째는 전력증폭기를 위한 정진폭 신호의 완성이다. 본 논문에서는 이러한 두 가지 조건을 만족하는 정진폭 다중부호 트랜스직교 변조(CAMCTO: Conatant-Amplitude Multi-Code Trans-Orthogonal Modulation)를 제안한다. 본 논문에서는 제안된 CAMCTO 변조의 성능을 실험을 통해 제시하고 기존의 직교변조 및 MCTO 변조와 그 성능을 비교한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 방식인 단순 직교변조 방식의 원리에 대해 설명하고, 3장에서는 MCTO 변조를 설명한다. 먼저 트랜스 직교 부호의 원리에 대해 설명하고 이어서 이 부호를 사용하는 MCTO 변조에 대해 논의한다. 4장에서는 본 논문의 주제인 CAMCTO 변조에 대해 제안한다. 5장에서는 앞서 제시한 세 가지 변조 방식의 차이점에 대해 비교하고 6장에서는 모의실험결과를 통하여 성능을 비교해 보도록 한다. 마지막으로 7장에서는 결론을 맺도록 한다.

## 2. 직교변조

직교변조에서는 Walsh 부호가 직교 부호로 사용된다. Walsh 부호를 사용하는 변조기에서는  $2^k \times 2^k$  크기의 Hadamard 행렬에서  $k$ 비트의 입력 정보 비트에 의하여 한 개의 행이 선택되게 된다.  $2^k \times 2^k$  크기의 Hadamard 행렬은 아래 식과 같이  $2^k \times 2^k$  Hadamard 행렬로부터 반복 연산을 수행하여 발생시킬 수 있다.

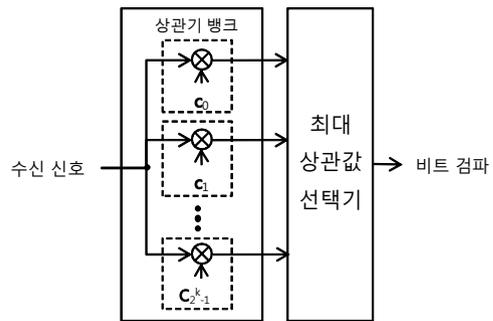
$$\mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{k-1} & \mathbf{H}_{k-1} \\ \mathbf{H}_{k-1} & \mathbf{H}_{k-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$



[그림 1] 직교변조기의 구조

그림 1에 직교변조를 사용한 시스템의 송신기 구조를 보인다. 직교변조에서는  $k$ 비트의 정보비트( $b_0, b_1, \dots, b_{k-1}$ )에 의해  $2^k$ 개의, 길이  $2^k$ 비트인 부호워드( $c_0, c_1, \dots, c_{2^k-1}$ ) 중 한 개가 선택되어 펄스발생기를 거쳐 반송파에 실려서 전송된다. 따라서 대역폭 효율을 하나의 비트의 데이터를 전송하는데 필요한 최소 대역폭으로 정의하면, 직교변조의 경우 대역폭 효율  $[Hz/bit/sec]$ 은 다음과 같아진다.

$$\eta_{OM} = k/2^k \quad (2)$$



[그림 2] 직교변조 신호의 수신기 구조

직교변조를 사용하는 시스템의 수신기는 그림 2와 같은 형태로 나타나게 된다. 그림에서는 수신신호와 부호워드( $c_0, c_1, \dots, c_{2^k-1}$ )를 상관시켜 얻은  $2^k$ 개의 상관 값을 구한 후 이 중에서 최대 값을 갖는 것을 선택하면 된다.

수신기 구조에 의하면 수신단에 필요한 상관기의 개수는 총  $2^k$ 개가 되며 비교를 위해 식을 세우면 다음과 같다.

$$\beta_{OM} = 2^k \quad (3)$$

직교변조 방식을 사용하고 상관 검출기를 사용하여 복조하는 통신시스템의 비트 오류(BER: Bit Error Rate)에 대한 상한 값은 식 (4)과 같이 주어진다[7].

$$P_b \leq (2^{k-1})Q\left(\sqrt{\frac{kE_b}{N_0}}\right) \quad (4)$$

직교변조의 비트 오류 성능은  $k$ 값의 증가에 따라 개선되지만 신호의 대역폭은  $2^k/k$ 의 인수로 지수적으로 증가하여 대역폭 효율이 크게 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 대역폭 효율을 개선시킬 수 있는 새로운 변조 방식

의 개발이 필요하다.

### 3. 다중부호 트랜스직교 변조

본 장에서는 먼저 트랜스직교변조의 원리에 대해 설명하고 이어서 대역폭 효율을 개선시키기 위한 MCTO를 설명한다.

#### 3.1 트랜스직교 변조

Hadamard 행렬에 의해 생성된 직교부호 단어에서 첫 번째 비트 열(Column)을 삭제하여 얻은 부호를 트랜스직교부호(Trans-Orthogonal Code), 또는 심플렉스부호(Simplex Code)라 한다[8]. 트랜스직교변조에서는  $k$ 비트의 정보 데이터에 의하여 생성된  $2^k - 1$  비트 길이의 부호 단어를 반송파에 실어서 전송한다. 따라서 트랜스직교(TO: Trans-Orthogonal) 변조의 경우 대역폭 효율은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\eta_{TO} = k / (2^k - 1) \quad (5)$$

따라서 직교변조에 비해 약간의 대역폭 효율 증가를 얻을 수 있다. 그러나  $k$ 가 커지면 부호의 길이가 지수적으로 증가하여 대역폭 효율의 개선 효과는 매우 작다. 즉 트랜스직교변조의 효율이 더 높지만  $k$ 가 클 때는 대역폭 효율은 매우 나쁘다는 것을 알 수 있다.

참고로 트랜스직교 부호의 상호 상관 계수(Crosscorrelation Coefficient)는 식 (6)과 같다[7-8].

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } i = j \\ \frac{-1}{M-1} & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

#### 3.2 다중부호 트랜스직교(MCTO) 변조

MCTO에서는 트랜스직교 부호 워드 집합(Codeword Set)을 4개의 그룹으로 분할하고, 정보 데이터 비트열에 의해 각 그룹에서 부호 단어가 선택되도록 하고 다중의 부호 단어를 합산하여 전송하는 방식을 고려한다. 부호의 생성에서는  $4 \times 3$  트랜스직교 부호 행렬을 기본으로 하고 부호 단어 개수가 2의 지수가 되도록 블록 단위로 확장한다. 이와 같은 방법으로 블록 확장 트랜스직교 부호를 발생시키면, 서로 다른 그룹의 부호 단어들은 서로 직교하는 특성을 갖게 된다. 따라서 다중 부호를 더해서 전

송하더라도 수신기에서 상관을 취하면 각각의 부호를 구별할 수 있게 된다.

예를 들어 MCTO 변조를 위한 부호 생성방법은 다음과 같다. 먼저  $k=2$ 인  $4 \times 4$  Hadamard 행렬에서 첫 번째 열을 제거하여 만들어지는  $4 \times 3$  트랜스 직교 부호 행렬은 다음의 식과 같다.

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

위의 4개 부호 단어 간 상호상관계수는 다음과 같이 된다.

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } i = j \\ -\frac{1}{3} & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

식 (7)의 기본 행렬을 식 (9)와 같이 확장시킨 부호를 살펴보자.

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{k-1} & \mathbf{H}_{k-1} \\ \mathbf{H}_{k-1} & \mathbf{H}_{k-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

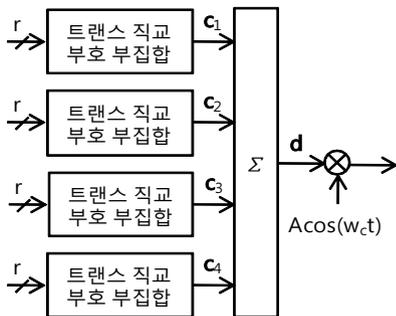
아래 식에  $16 \times 12$ 로 확장시킨 블록 확장 트랜스 직교 부호 행렬의 예를 보인다.

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_0 \\ \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{c}_3 \\ \mathbf{c}_4 \\ \mathbf{c}_5 \\ \mathbf{c}_6 \\ \mathbf{c}_7 \\ \mathbf{c}_8 \\ \mathbf{c}_9 \\ \mathbf{c}_{10} \\ \mathbf{c}_{11} \\ \mathbf{c}_{12} \\ \mathbf{c}_{13} \\ \mathbf{c}_{14} \\ \mathbf{c}_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)과 같은  $16 \times 12$ 로 행렬을 4개의  $4 \times 12$  부 행렬로 분할한다고 하자. 이 경우 4 개의 부 행렬로 부터 만들어지는 부호 단어 집합은  $\{c_0, \dots, c_3\}$ ,  $\{c_4, \dots, c_7\}$ ,  $\{c_8, \dots, c_{11}\}$ ,  $\{c_{12}, \dots, c_{15}\}$ 가 된다. 이와 같은 부호 단어 그룹에 있는 부호 단어들 간의 상호 상관 계수는 식 (6)에 의해 식 (11)과 같은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } i = j \\ \frac{1}{3} & \text{for } i \neq j, i, j \in \text{same group} \\ 0 & \text{for } i \neq j, i, j \notin \text{same group} \end{cases} \quad (11)$$

그러므로 그림 3에서와 같이 4개의 블록을 가진 다중 부호 방식의 송신기를 구성하고 각 블록에서는 앞서 기술한 블록 확산 트랜스 직교 부호의 각 그룹에 있는 부호 단어를 사용하도록 하면, 각 블록의 출력 부호 단어들은 서로 직교하게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 각 블록의 출력 부호 단어들을 더해져 전송하더라도 수신기에서 블록별로 상관기를 구현하면 전송된 부호 단어를 찾아낼 수 있으며, 정보 비트들을 복구할 수 있게 된다.



[그림 3] MCTO 변조기의 구조

그림 3에서 각 블록의 부호화기에 입력되는 데이터 비트 수는  $r$ 이며 각 부호 그룹에는  $2^r$ 개의 부호가 존재한다. 따라서 전체 부호 집합의 크기는  $4 \times 2^r$ 이 된다. 이 시스템에 동시에 입력되는 데이터 비트 수는  $k = 4 \times r$ 이 되며,  $r$ 개의 비트씩 부호화기에 입력되어 부호 단어를 출력하고, 이 부호 단어들이 합산되어 전송된다. 여기서 부호의 길이는  $3 \times 2^r$ 비트가 되므로 시스템의 대역폭 효율은 식 (12)와 같다.

$$\eta_{MCTO} = \frac{4r}{3 \times 2^r} \quad (12)$$

예를 들어 16개의 부호를 갖는 MCTO 변조에서 각 부호 그룹은 4개의 부호를 가지며 두 비트의 데이터에 의해 부호가 선택된다( $r=2$ ). 따라서 총 8비트의 데이터에 의하여 12비트의 부호들이 출력되어 더해져서 전송된다. 이 경우 대역폭 효율은  $8/12=0.67$ 이 된다. 한편  $k=8$ 비트의 데이터가 동시에 입력되는 경우 직교변조를 하도록 송신기를 구성하면 대역폭 효율이 식 (2)에 의해  $8/256=1/32$ 가 되어 MCTO 변조의 효율이 10배 이상 높은 것을 알 수 있다. 따라서 MCTO 변조를 사용하면 직교변조에 비해 대역폭 효율이 증가하는 장점이 있다.

MCTO 변조기를 사용하는 시스템의 수신기는 수신 신호와 부호워드를 상관시켜야 한다. 그런데 각 블록에 입력되는 데이터 비트의 개수  $r (= k/4)$ 에 대해 총  $2^r$ 개의 부호가 필요하고 총 블록의 개수는 4개이므로 수신단에 필요한 상관기의 개수는  $4 \times 2^r$ 개가 되며 비교를 위해 식을 세우면 다음과 같다.

$$\beta_{MCTO} = 4 \times 2^{(k/4)} \quad (13)$$

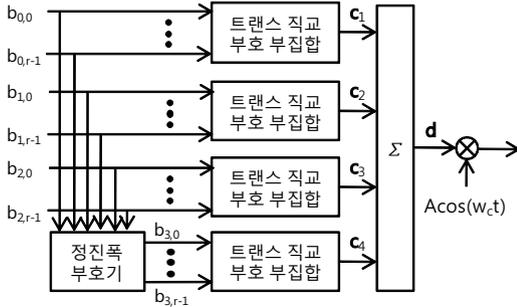
MCTO 변조를 사용하고 상관 검출기를 사용하여 복조하는 통신시스템의 비트 오류율은 실험을 통해 제시될 것이다.

#### 4. 정진폭 다중부호 트랜스직교변조

앞서 살펴본 바와 같이 MCTO 변조를 사용하면 기존의 직교변조에 비해 대역폭 효율이 매우 증가하는 장점이 있다. 그러나 MCTO는 출력 심볼이 정진폭을 갖지 못하고 다중 레벨이 되어 증폭기의 높은 선형성이 요구하게 되는 단점이 있다. 통신에서는 비선형 특성을 지닌 증폭기를 사용하면 가격적인 면이나 전력소모적인 면에서 유리하다. 그러나 진폭이 일정하지 않은 송신 신호에 비선형 증폭기를 사용하게 되면 비선형 왜곡을 겪게 되어 비트오율 성능이 매우 저하된다. 따라서 송신신호를 정진폭화하는 노력은 매우 중요하다.

MCTO에서 사용된 4개의 부호화기 중 한 개를 잉여 부호화기로 사용하고 입력되는 정보 비트열을 적절히 부호화하면 다중 부호 출력 심볼의 진폭을 일정하게 만들 수 있다. 그림 4에 CAMCTO의 구조를 보인다. 상위 3 개의 부호화기에는 정보 데이터 비트들이 입력되며, 4번째의 부호화기는 잉여 부호화기로서 여기에 입력되는 데이터는 정보 비트가 아니라 인위적으로 만들어진 데이터로 4개 부호화기 출력을 합산하였을 때 크기가 일정하게 하

는 역할을 한다.



[그림 4] CAMCTO 변조기의 구조

합산기 출력의 진폭을 일정하게 하는 잉여 부호화기의 입력 데이터는 상위 3개의 부호화기에 입력되는 데이터로부터 만들어진다. 즉, 잉여 블록에 입력되는 데이터 비트는 나머지 블록에 입력되는 정보 비트들의 패리티 비트가 된다. 식 (14)에 구체적인 정진폭 부호화 방법을 표현하였다.

$$b_{3,i} = b_{0,i} \oplus b_{1,i} \oplus b_{2,i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, r-1$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{c}_0 + \mathbf{c}_1 + \mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_3 \quad (14)$$

CAMCTO 변조기는 4개의 코드 그룹으로 구성되어 있으므로 3개의 코드 그룹에서 코드를 선택하는 정보 데이터 비트 수를  $r$ 이라고 하면 전체 코드의 개수는  $4 \times 2^r$ 개가 되고 코드의 길이는  $3 \times 2^r$ 비트가 된다. 그리고 동시에 입력되는 데이터 비트 수는  $k = 3r$ 이 된다. 따라서 대역폭 효율은 식 (15)와 같다.

$$\eta_{CAMCTO} = \frac{3r}{3 \times 2^r} \quad (15)$$

CAMCTO 변조기를 사용하는 시스템의 수신기는 수신신호와 부호워드를 상관시켜야 한다. 그런데 각 블록에 입력되는 데이터 비트의 개수  $r (= k/4)$ 에 대해 총  $2^r$ 개의 부호가 필요하고 총 블록의 개수는 3개이므로 수신단에 필요한 상관기의 개수는 총  $3 \times 2^r$ 개가 되며 비교를 위해 식을 세우면 다음과 같다.

$$\beta_{CAMCTO} = 3 \times 2^{(k/4)} \quad (16)$$

CAMCTO 변조를 사용하고 상관 검출기를 사용하여

복조하는 통신시스템의 비트 오류는 실험을 통해 제시될 것이다.

마지막으로 CAMCTO 변조에서 최적복조기 구조를 제시하고자 한다. 일반적인 CAMCTO 복조신호를 복조하기 위해서는 트랜스 직교 부호 부집합을 이용하여 수신단에서 상관을 수행하게 된다. 하지만 이러한 방식은 정진폭 부호기에 의한 리턴턴시를 충분히 활용하지 못하게 되어 오류에 대한 강인성이 떨어지게 된다. 다른 말로 표현하면 그림 4에서 네 번째 트랜스 직교부호 부집합의 출력결과인  $\mathbf{c}_4$ 는 데이터를 전송하지도 않으면서 송신신호 전력의 일부를 사용하게 되어 수신성능에 악 영향을 끼치게 된다. 이를 수신신호 성능의 개선에 이용할 수 있다면 송신신호 전력 모두를 수신에 사용하게 되어 수신성능이 개선될 수 있을 것이다. 우리는 이 복조기를 최적복조기라고 명명할 수 있다.

최적 복조기 (Optimum Demodulator)의 구조는 다음과 같이 설명될 수 있다. 설명의 편의를 위해 6비트를 전송하는 시스템을 가정해 보자 (그림 4에서  $r=2$ 인 경우). 먼저 보내지는 비트들 즉  $b_{0,0}, b_{0,1}, b_{1,0}, b_{1,1}, b_{2,0}, b_{2,1}$ 가 가질 수 있는 값에 따라 출력  $\mathbf{d}$ 는 총 64가지의 결과가 출력되게 된다. 최적 복조기에는 미리 알 수 있는 이 64가지의  $\mathbf{d}$ 를 수신신호와 상관시켜 최대값이 산출되는  $\mathbf{d}$ 의 인덱스를 찾으면 된다. 이럴 경우 최적 복조기의 수신기는 다음과 같은 복잡도를 가짐을 쉽게 알 수 있다.

$$\beta_{CAMCTO,opt} = 2^k \quad (17)$$

6장의 실험결과에서 제시되지만 이 방식은 비트 오류 성능의 비약적인 개선을 가져오게 된다. 이 방식은 수신기 복잡도가 직교변조와 같다는 문제점이 있지만 높은 대역폭 효율을 유지하면서 좋은 비트오류 성능을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

## 5. 대역폭 및 수신기 복잡도 비교

본 장에서는 먼저 앞서 소개되고 제안된 OM, MCTO, CAMCTO 변조 방식의 대역폭 효율을 분석해본다. 또한 수신기의 복잡도를 비교한다.

### 5.1 대역폭 효율 비교

이번 절에서는 앞서 설명한 변조 방식들의 대역폭 효율을 비교해 보기로 한다. 표 1은 전체 정보 데이터 비트 수  $k$ 에 대하여 변조 방식들의 대역폭 효율을 계산한 결과

를 보이고 있다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 MCTO 변조와 CAMCTO 변조는 직교 변조에 비해 대역폭 효율이 현저히 향상된 것을 확인할 수 있다. 전송하려는 정보 비트의 수가 많아질수록 그 차이는 지수적으로 증가한다. 이는 MCTO나 CAMCTO의 대역폭 효율이 기존의 직교 변조에 비해서 매우 뛰어나다는 것을 증명해준다. 물론 CAMCTO 변조는 일부 부호를 정진폭을 만드는데 사용하게 되므로 MCTO 변조에 비해 약간의 대역폭 효율의 감소를 가져오게 되지만 이는 정진폭에 의한 효과를 고려한다면 충분히 감수할 수 있는 정도이다.

대역폭 효율이 좋다는 의미는 전송하는 주파수 대역폭이 같다면 같은 시간에 더 많은 정보 비트를 전송 가능하므로 같은 대역폭을 사용할 경우 더욱 빨리 정보 데이터를 전송 가능함을 뜻한다. 반대로 똑같은 정보 비트를 전송할 때 대역폭 효율이 좋으면 적은 대역폭을 사용하게 된다.

[표 1] 직교변조/MCTO/CAMCTO 변조의 대역폭효율

K(r)	8(2)	12(3)	16(4)	20(5)
직교변조	0.03125	0.0029	0.00024	0.00002
MCTO	0.67	0.5	0.34	0.208
CAMCTO	0.5	0.375	0.25	0.15625

### 5.2 수신기 복잡도 비교

표 2에서는 수신기 복잡도를 수치로 표현하였다. 표현된 수치는 필요한 상관기의 개수이다. 제안된 CAMCTO 변조가 기존의 MCTO 또는 직교 변조에 비해 수신기의 복잡도가 현저히 낮음을 알 수 있다. 특히 정보 데이터의 길이가 길어질수록 복잡도에 대한 CAMCTO 변조의 이점은 점점 증가하게 되는 특성이 있다. 따라서 CAMCTO 변조는 저가에 모뎀을 구성하는 데에 강점이 있는 변조라고 볼 수 있다.

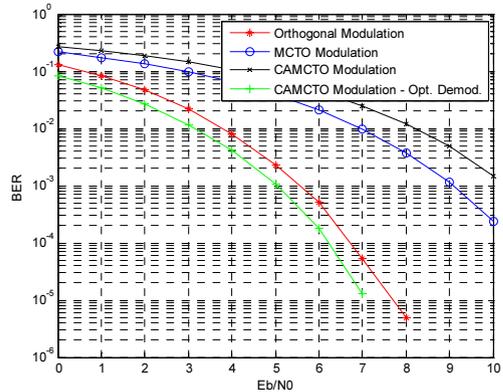
[표 2] 수신기 복잡도 비교

K(r)	8(2)	12(3)	16(4)	20(5)
직교변조	256	4096	65536	1048576
MCTO	16	32	64	128
CAMCTO	12	24	48	96

## 6. 실험 결과

본 장에서는 먼저 앞서 소개되고 제안된 OM, MCTO,

CAMCTO 변조 방식의 비트 오류 성능을 비교하도록 한다.



[그림 5] 비트 오류 비교

비트 오류를 비교하기 위해서 본 연구에서는 C언어를 이용하여 시뮬레이터를 구성하였으며 가산성 백색 가우시안 잡음 채널에서 성능을 평가하였다. 그림 5는 앞서 소개한 세 가지 변조 방식의 비트 오류를 비교한 그림이다. 부호 단어의 길이를 되도록 비슷하게 하기 위해서 직교 변조는 4비트의 정보 데이터, 16비트 길이의 부호 단어를 이용하여 시뮬레이션 하였고, MCTO 변조, CAMCTO 변조는 각각 8비트 정보 데이터, 12비트 부호 단어와 6비트 정보 데이터, 12비트 부호 단어를 이용해서 시뮬레이션 했다.

비트 오류의 성능은 직교 변조에서 가장 좋은 결과가 나왔고, MCTO 변조, CAMCTO 변조의 순서로 우수하게 나타난 것을 알 수 있다. 그러나 직교변조는 대역폭 효율이나 시스템의 복잡도에 있어서 매우 떨어지므로 비교대상이 될 수 없다.

CAMCTO 변조가 MCTO 변조에 비해서 비트 오류 성능은 떨어진다. 즉 동일한 비트 오류 성능을 얻기 위해서 더 많은 신호 전력이 필요하다. 예를 들어 10<sup>-2</sup>의 비트 오류율에서 CAMCTO 변조의 경우에 약 2dB의 신호 전력이 더 필요하다. 제안된 CAMCTO 변조의 같은 비트 오류 성능을 위해 신호전력이 2dB 정도 더 필요하지만 정진폭을 얻기 위해서는 감수하여야 한다.

그림에는 CAMCTO 변조를 사용하되 최적복조기로 복조한 경우의 성능을 함께 보여주고 있다. 최적 복조기의 성능은 직교 변조보다도 오히려 우수하다. 그러나 최적 복조기는 필요한 상관기의 개수가 직교 변조와 같아지므로 이를 감수하여야 한다.

다양한 결과의 비교에 의해 다음과 같은 결론을 얻어

낼 수 있다.

- CAMCTO 변조는 직교 변조에 비해 현격한 대역폭 효율 개선을 얻을 수 있다.
- CAMCTO 변조는 MCTO 변조에 비해 대역폭 효율이 약간 감소하지만 정진폭 신호를 얻을 수 있어 RF의 부담을 줄일 수 있다.
- CAMCTO 변조는 직교 변조나 MCTO 변조에 비해 비트 오류가 나빠진다. 이러한 문제점을 해결하려면 최적 복조기를 사용하여야 한다. 최적 복조기를 사용하면 비트오율 성능이 직교 변조 보다도 좋아진다. 다만 수신기의 복잡도는 증가한다.

## 7. 결론

본 논문에서는 기존의 MCTO 변조의 가변 진폭 특성으로 인한 RF 시스템의 부담을 덜기 위한 CAMCTO 변조를 제안하고 그 성능을 실험을 통해 제시하였다. 실험 결과에 의하면 제안된 CAMCTO 변조는 비트 오류율에 있어서는 기존의 MCTO 변조에 비해 다소 떨어지지만 정진폭 특성을 유지할 수 있어 RF의 부담을 최소화할 수 있다. 제안된 CAMCTO 변조는 저가에 고속 데이터 유희를 제공해야 하는 디지털 무선 통신 시스템의 물리층으로 사용될 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Samuel C. Yang, CDMA RF Engineering, Artech House Inc., 1999
- [2] I. Chih-lin and R. D. Gitlin, "Multi-code CDMA Wireless Personal Communications Networks," in Proc. ICC'95, pp. 1060-1064, Seattle, June 1995.
- [3] 홍대기, "대역폭 효율적인 다중 부호 변조 방식," 한국산학기술학회논문지, Vol.10, No.7, pp.1601-1607, 2009년 7월.
- [4] N. Guo and L. B. Milstein, "Uplink Performance Evaluation of Multi-code DS/CDMA Systems in the Presence of Nonlinear Distortion," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 18, No. 8, pp. 1418-1428, Aug. 2000.
- [5] Y. H. You, C. H. Park, D. K. Hong, S. J. Kang, K. H. Seo and J. W. Cho, "Multi-phased VSG CDMA with Level Clipping for High-rate Transmission Systems," IEEE Communications Letters, Vol. 48,

No. 2, pp.159-161, Apr. 2003.

- [6] 홍대기, "효율적인 대역폭 이용과 정진폭 신호 전송을 위한 CACB-Q2PSK 변조," 한국산학기술학회논문지, Vol.9, No.1, pp.93-99, 2008년 2월.
- [7] W. C. Lindsey and M. K. Simon, Telecommunications Systems Engineering, Prentice-Hall, 1973.
- [8] B. Sklar, Digital Communications : Fundamentals and Applications, Prentice-Hall, 2001.

## 홍대기(Dae-Ki Hong)

[종신회원]



- 1997년 2월 : 광운대학교 컴퓨터공학과 학사
- 1999년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
- 2003년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 박사
- 2006년 2월 : 전자부품연구원 선임연구원

● 2006년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야>

무선통신, 정보통신, 이동통신, 무선 LAN/PAN