

논문 2012-49TC-1-4

회전 불변 I/Q TCM을 위한 QAM 신호 사상기 회로 설계

(Circuit Design of QAM Signal Mapper for Rotationally Invariant I/Q TCM)

김창중*, 이호경**

(Chang-Joong Kim and Ho-Kyoung Lee)

요약

본 논문은 회전 불변 I/Q TCM에 적용되는 정사각 QAM을 위한 신호 발생 방법을 제안한다. 제안된 방법은 디지털 논리 소자들만으로 이루어져 있으며 look-up table (LUT)을 전혀 사용하지 않아 시스템 구현 복잡도를 줄이는 데 요긴하다. 또한 이 방법은 변조 차수가 64 이상인 모든 정사각 QAM에 적용될 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose a signal generation method of rectangular QAM for rotationally invariant I/Q TCM. The proposed method consists of only digital logic gates without look-up table so that we can implement the system compactly. Our scheme can be applied to every rectangular QAM with the level higher than 64.

Keywords: QAM, signal mapper, rotationally invariant TCM, circuit implementation

I. 서론

90도 회전 불변 I/Q TCM[1~2]을 위한 QAM 신호 성좌의 라벨링은 일반적으로 사용되는 신호 성좌의 라벨링과는 다르다. 따라서 이러한 신호 성좌의 라벨을 쉽게 발생시키기 위한 다양한 방법이 연구되었다^[3~4]. 가장 손쉬운 방법은 LUT를 사용하는 것이지만 이 방식은 변조 차수가 커질수록 더 많은 메모리를 필요로 할 뿐 아니라 변조 방식이 바뀌면 그에 따라 새로운 LUT를 사용해야 한다는 단점을 가지고 있다^[4]. 본 논문에서는 이와 같은 단점들을 보완하기 위하여 LUT 대신 논리 게이트를 이용하여 신호 성좌를 발생시키는

방법을 제안한다.

본 논문에서는 먼저 90도 회전 불변 I/Q TCM을 위한 정사각 QAM 신호 성좌의 규칙성을 추출하고, 이를 충족시키는 회로를 구성하는 방법을 제안한다.

II. 회전 불변 I/Q TCM을 위한 정사각 QAM 신호 성좌의 규칙성

2^m 진 PAM 신호 집합을 χ_{PAM} 이라고 하고, χ_{PAM} 의 원소들 간의 최소 기하 거리는 2라고 하기로 한다. 이 때, 2^{2m} 진 정사각 QAM의 신호 집합 χ_{QAM} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\chi_{QAM} = \{x = x_I + jx_Q \mid x_I \in \chi_{PAM}, x_Q \in \chi_{PAM}\}$$

2^{2m} 진 정사각 QAM의 신호 x 의 라벨을 $L(x)$ 라고 하기로 한다. 여기서 $L(x)$ 는 $1 \times 2m$ 의 이진 벡터이다. 편의상 벡터의 i 번째 성분을 소괄호로 감싼 윗첨자 (i)를 붙여 나타내기로 한다. 예를 들어서 $L(x)$ 의 i 번째

* 정회원, 홍익대학교 전파통신공학과
(Hong-Ik University)

** 평생회원-교신저자, 홍익대학교 전자전기공학부
(Hong-Ik University)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2011-00-20672)

접수일자: 2011년8월8일, 수정완료일: 2012년1월18일

성분(왼쪽에서부터)은 $L^{(i)}(x)$ 이며, 이는 신호 x 의 라벨의 i 번째 비트를 나타낸다. 여기서 비트의 위치는 LSB에서부터 세기로 하며, LSB의 비트 위치는 1로 하기로 한다. 또한 $[L^{(2)}(x) L^{(3)}(x) \cdots L^{(m)}(x)]$ 는 $[L^{(i)}(x)]_{i=2}^m$ 와 같이 축약하여 나타내기로 한다. 이 축약식을 사용하여 $L(x)$ 의 상위 m 비트를 $L_I(x) = [L^{(i)}(x)]_{i=1}^m$ 로 나타내고, 하위 m 비트를 $L_Q(x) = [L^{(i)}(x)]_{i=m+1}^{2m}$ 로 나타내기로 한다.

회전 불변 I/Q TCM을 위한 정사각 QAM 신호 성좌를 분석해 보면, 다음과 같은 세 가지 규칙성을 찾을 수 있다.

1. 신호 집합 분할 규칙

I/Q TCM에서는 $L_I^{(1)}$ 과 $L_Q^{(1)}$ 에 의하여 신호 부집합이 구별되도록 신호 집합을 분할한다. 신호 집합을 분할하는 방법은 TCM의 신호 집합 분할 방법과 같이 신호 부집합 내의 신호 간 기하학적 최소 거리가 최대화되게 하는 것이다. 일반적으로 $L_I^{(1)}(x)$ 는 제일 왼쪽 신호에서부터 0, 1, 0, 1의 순서로 부여되고, 비슷하게 $L_Q^{(1)}(x)$ 도 제일 아래쪽 신호에서부터 0, 1, 0, 1의 순서로 부여하면, 신호 집합 분할이 이루어진다. 이를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\begin{aligned} L_I^{(1)}(x) &= \left\lfloor \frac{x_I}{2} \right\rfloor \bmod 2 \\ L_Q^{(1)}(x) &= \left\lfloor \frac{x_Q}{2} \right\rfloor \bmod 2 \end{aligned} \quad (1)$$

2. 1사분면 신호 규칙

1사분면에 위치한 신호들은 다음과 같은 규칙성을 가진다. 1분면에 위치한 신호들의 라벨 중 $[L_I^{(i)}(x)]_{i=2}^m$ 은 1사분면 상의 제일 왼쪽에 위치한 신호에서부터 차례대로 $[00 \cdots 0]$, $[10 \cdots 0]$, $[01 \cdots 0]$, $[11 \cdots 0]$ 과 같이 오름차순으로 부여되고, 비슷하게 $[L_Q^{(i)}(x)]_{i=2}^m$ 도 1사분면 상의 제일 아래에 위치한 신호에서부터 차례대로 오름차순으로 부여된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} L_I^{(i)}(x) &= \left\lfloor \frac{x_I}{2^{i-1}} \right\rfloor \bmod 2 \\ L_Q^{(i)}(x) &= \left\lfloor \frac{x_Q}{2^{i-1}} \right\rfloor \bmod 2 \end{aligned} \quad (2)$$

단, i 는 2부터 m 까지의 정수이며, x_I 와 x_Q 는 모두 양수이다.

3. 90도 회전 불변 규칙

90° 회전 불변 TCM에 적용되는 QAM 신호의 라벨은 모두 1사분면 신호들을 90°의 정수배로 회전 변환해서 얻어지는 신호의 라벨들과 두 개의 비트만 제외하고 완전히 일치한다. 90° 회전해도 일치하지 않는 두 개의 비트들은 $L_I^{(1)}(x)$ 와 $L_Q^{(1)}(x)$ 이다. 이 두 개의 비트를 제외한 나머지 비트들을 묶어서 $L_U(x) = [[L_I^{(i)}(x)]_{i=2}^m [L_Q^{(i)}(x)]_{i=2}^m]$ 라고 하면, $L_U(x) = L_U(j^k x)$ 가 성립한다. 여기서 k 는 임의의 정수이다.

그러므로 신호가 1사분면 상에 있을 때, 신호의 라벨은 식 (3)과 같은 규칙을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} L_I^{(1)}(x) &= L_I^{(2)}(x) \\ L_Q^{(1)}(x) &= L_Q^{(2)}(x) \end{aligned} \quad (3)$$

또한 신호가 2사분면 상에 있을 때, 신호의 라벨은 식 (4)와 같은 성질을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} L_I^{(1)}(x) &\neq L_Q^{(2)}(x) \\ L_Q^{(1)}(x) &= L_I^{(2)}(x) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 주목할 것은 1사분면 상의 신호 라벨의 관계식은 L_I 들은 L_I 들끼리, L_Q 들은 L_Q 들끼리 비교되는 식이었지만, 2사분면 상의 신호 라벨의 관계식은 L_I 들과 L_Q 들 간의 교차 비교로 이루어져 있다는 점이다. 그 이유는 $L_I^{(1)}(x)$ 와 $L_Q^{(1)}(x)$ 는 90° 회전 불변성을 가지지 않는 반면, 나머지 비트들은 90° 역회전 변환을 통해서 얻어지는 1사분면 신호의 라벨과 일치하기 때문이다. 같은 이유로 3사분면 상의 신호의 라벨은 식 (5)와 같이 L_I 들은 L_I 들끼리, L_Q 들은 L_Q 들끼리 비교되는 식이 된다.

$$\begin{aligned} L_I^{(1)}(x) &\neq L_I^{(2)}(x) \\ L_Q^{(1)}(x) &\neq L_Q^{(2)}(x) \end{aligned} \quad (5)$$

이는 $L_U(x)$ 가 180° 역회전 변환한 해서 얻어지는 1사분면 신호의 라벨과 일치하기 때문이다. 같은 이유로 4사분면 신호의 라벨은 식 (6)과 같은 성질을 만족

표 1. 사분면 판별을 위한 논리식
Table 1. Logical Expression for Quadrant Decision.

사분면	논리식
1사분면	$\overline{(L_I^{(1)}(x) \oplus L_I^{(2)}(x))} \wedge \overline{(L_Q^{(1)}(x) \oplus L_Q^{(2)}(x))}$
2사분면	$(L_I^{(1)}(x) \oplus L_Q^{(2)}(x)) \wedge \overline{(L_Q^{(1)}(x) \oplus L_I^{(2)}(x))}$
3사분면	$(L_I^{(1)}(x) \oplus L_I^{(2)}(x)) \wedge (L_Q^{(1)}(x) \oplus L_Q^{(2)}(x))$
4사분면	$\overline{(L_I^{(1)}(x) \oplus L_Q^{(2)}(x))} \wedge (L_Q^{(1)}(x) \oplus L_I^{(2)}(x))$

하게 된다.

$$L_I^{(1)}(x) = L_Q^{(2)}(x) \tag{6}$$

$$L_Q^{(1)}(x) \neq L_I^{(2)}(x)$$

위의 네 개의 식을 정리하여 논리식으로 만들면 표 1을 얻을 수 있다.

III. 90도 회전 불변 TCM을 위한 정사각 QAM 신호 사상기의 구현

앞 장의 규칙성을 이용하면 LUT 없이 신호 라벨로부터 신호 성좌를 발생시킬 수 있다. 먼저 식 (2)를 이용하여 신호 라벨로부터 1사분면에 위치하는 신호를 생성한다. 다음으로 표 1의 관계식들을 이용하여 신호가 어떤 사분면에 위치해야 하는지를 판단하여, 신호를 회전 변환한다. 그림 1은 이 내용을 블록도로 나타낸 것이다.

각각의 블록을 보다 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 본 장에서는 편의상 신호 라벨 함수에서 x 를 생략한다.

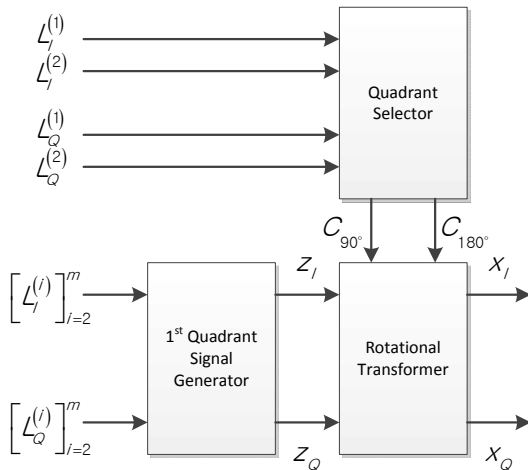


그림 1. QAM 신호 사상기 블록도
Fig. 1. Block Diagram of QAM Signal Mapper.

1. 사분면 선택기(quadrant selector) 블록

사분면 선택기 블록은 $L_I^{(1)}, L_I^{(2)}, L_Q^{(1)}, L_Q^{(2)}$ 의 4개의 신호를 입력 받아서 90° 회전 신호와 180° 회전 신호 2개의 신호를 출력한다. 90° 회전 신호와 180° 회전 신호는 각각 회전 변환이 필요한 경우에는 1, 필요 없는 경우에는 0이 된다. 270° 회전 변환은 90° 회전 변환 후 180° 회전 변환하는 것으로 생각될 수 있다. 그러므로 2사분면이나 4사분면에 있는 신호를 발생시키려면 공통적으로 90° 회전 변환이 필요하다. 따라서 90° 회전 변환 신호의 식은 2사분면 신호 라벨에 대한 관계식과 4사분면 신호 라벨에 대한 관계식의 논리합으로 얻어진다.

$$C_{90^\circ} = (L_I^{(1)} \oplus L_Q^{(2)}) \wedge \overline{(L_Q^{(1)} \oplus L_I^{(2)})} \vee \overline{(L_I^{(1)} \oplus L_Q^{(2)})} \wedge (L_Q^{(1)} \oplus L_I^{(2)}) \tag{7}$$

위의 식은 드모르간 법칙에 의해서 식 (8)과 같이 단순화 될 수 있다.

$$C_{90^\circ} = (L_I^{(1)} \oplus L_Q^{(2)}) \oplus (L_Q^{(1)} \oplus L_I^{(2)}) \tag{8}$$

비슷하게 3사분면이나 4사분면에 있는 신호를 발생시키려면 180° 회전 변환이 필요하다. 따라서 180° 회전 변환 신호의 식은 3사분면 신호 라벨에 대한 관계식과 4사분면 신호 라벨에 대한 관계식의 논리합으로 얻어진다.

$$C_{180^\circ} = ((L_I^{(1)} \oplus L_I^{(2)}) \wedge (L_Q^{(1)} \oplus L_Q^{(2)})) \vee ((L_I^{(1)} \oplus L_Q^{(2)}) \wedge (L_Q^{(1)} \oplus L_I^{(2)})) \tag{9}$$

이를 논리 회로로 나타내면 그림 2와 같이 된다.

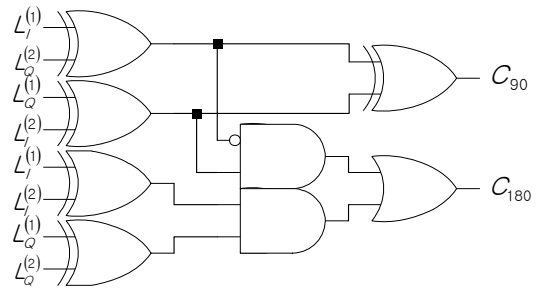


그림 2. 사분면 선택기
Fig. 2. Quadrant Selector.

2. 1사분면 신호 발생기

L_I 에 대응되는 1사분면 상의 신호를 z_I 라고 하고, z_I 의 실수 성분을 z_I , 허수 성분을 z_Q 라고 하면, 규칙성 2

에 의해 식 (10)과 같은 관계를 얻게 된다.

$$z_I = \sum_{i=2}^m L_I^{(i)} 2^i + 1$$

$$z_Q = \sum_{i=2}^m L_Q^{(i)} 2^i + 1 \quad (10)$$

따라서 LUT 없이 1사분면의 신호를 발생시킬 수 있다. 또한 위의 수식은 L_I 와 L_Q 에 각각 이진수 1을 비트 단위 OR 연산해주는 식에 불과하다. 이는 LUT 없이 논리 게이트만으로 구현될 수 있다.

3. 회전 변환기 블록

90° 회전 변환은 I축의 신호를 Q축으로 보내고, Q축의 신호를 반전하여 I축으로 보내는 과정과 같아진다. 또한 180° 회전 변환은 I축과 Q축의 신호를 각각 반전한 것과 같아진다. 따라서 회전 변환기 블록은 그림 3과 같이 구성된다.

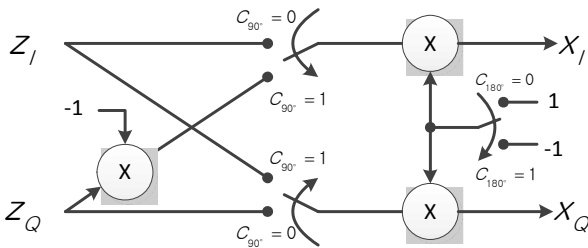


그림 3. 회전 변환기
Fig. 3. Rotational Transformer.

이 방식을 사용하면, LUT를 전혀 사용하지 않고도 DOCSIS 2.0 규격에 정의된 256-QAM과 DOCSIS 2.0+/3.0 규격에 정의된 1024-QAM 신호 성좌를 발생시킬 수 있다^[5]. 한편 DOCSIS 2.0 규격에 정의된 90° 회전 불변 TCM을 위한 64-QAM의 신호 라벨링 방식은 256-QAM, 1024-QAM 등에서 사용된 방식과 약간 다르다. 그러나 이 라벨링 방식에도 규칙성이 존재하기 때문에 이를 이용하면 어렵지 않게 LUT를 제거할 수 있다. 실제로 기존의 특허^[3]에는 LUT를 제거하여 64-QAM 신호 성좌를 얻는 방식이 제시되어 있다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서 제안한 신호 사상 방식은 변조 차수와 관계없이 DOCSIS 표준에서 규정된 90° 회전 불변성을 가지는 TCM을 위한 QAM 성좌도에 모두 사용이 가능

하다. 이는 LUT를 사용할 때^[4] 발생했던 메모리의 문제를 해결한다. 또한 변조 차수에 따라 새로운 LUT를 제작할 필요가 없게 한다. 게다가 기존의 특허에 제안되었던 논리 소자를 사용했던 방식^[3]에 비해 더 적은 논리 소자로 구현하였다. 이로써 90° 회전 불변성을 갖는 TCM/QAM에 변조 차수와 관계없이 범용이 가능한 단순화된 모델의 설계가 가능하다. 본 논문에서는 256-QAM과 1024-QAM을 중점적으로 설명하였지만 고속 디지털 통신이 요구됨에 따라 사용할 가능성이 있는 고차의 변조 방식에도 적용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] L. -F. Wei, "Rotationally invariant convolutional channel coding with expanded signal space. Part I: 180°," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. SAC-2, pp.659-671, Sept. 1984.
- [2] L. -F. Wei, "Rotationally invariant convolutional channel coding with expanded signal space. Part II: Nonlinear codes," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. SAC-2, pp.672-686, Sept. 1984.
- [3] 한국전자통신연구원, "케이블 다운 스트림 전송을 위한 QAM 심볼 매핑방법 및 그 장치," 대한민국 특허청, 10-2004-0102911, 2004년 12월 08일
- [4] Dojun Rhee, Chanthachith Souvanthong, "Apparatus And Method For Recovering Information Bits From A 64/256 Quadrature Amplitude Modulation Trellis Coded Modulation Decoder," US PATENT No. US 6,233,712 B1, May.15,2001
- [5] The Broadcom proposal for 1024-QAM(DOCSIS 3.0)

저 자 소 개



김 창 중(정회원)
 2000년 홍익대학교 전자전기
 공학부 학사 졸업.
 2002년 홍익대학교 대학원 전과
 통신공학과 석사 졸업.
 2005년 홍익대학교 대학원
 전자정보통신공학과
 박사 수료.

<주관심분야 : 통신, 부호 이론, 부호화 변조, 시
 공간부호>



이 호 경(평생회원)
 1981년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1987년 Northrop University
 전자공학과 석사 졸업.
 1994년 University of Southern
 California 전자공학과
 박사 졸업.

1994년~홍익대학교 전자전기공학부 교수.
 <주관심분야 : 채널코딩, TCM, Turbo TCM, 이
 동통신, 위성통신>