

# $\theta$ -정합을 이용한 QAM 복조용 Carrier Recovery

박휘원, 장일순, \*정차근, 조경록  
 충북대학교 정보통신공학과  
 \*호서대학교 제어계측공학과  
 hwpark@hbt.chungbuk.ac.kr

## A New Carrier Recovery Algorithm Usign $\theta$ -matching method for QAM Demodulator

Hwi-Won Park, Ill-Soon Jang \*Cha-Kuen Jung, and Kyeung-Rok Cho  
 Dept. of Computer and Communication Eng. Chungbuk National University  
 \*Dept. of Control and Instrumentation Eng. Hoseo University

### Abstract

Carrier recovery, the process of recovering the carrier in receiver, removes the phase difference between VCO and the received signal. However, the conventional structure of carrier recovery cannot be applied to multi-level QAM demodulator because of the increasing decision interval and the complexity of control as the number of symbol increases. In this paper, we suggest a new carrier recovery algorithm using  $\theta$ -matching algorithm for multi-level QAM demodulation to overcome this problem and analysis the performance and implement it.

source가 필요하며 이로 인해 carrier recovery가 필수적이다. 그러나, 기존의 carrier recovery 방식은 심볼의 개수가 많은 multi-level QAM 통신 방식에서는 적용할 수가 없다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위한 256-QAM 통신 방식용 Carrier recovery 알고리즘을 제안하고 이를 적용 구현한다.

### I. 서론

심볼 동기화는 정보를 동기식으로 전송하는 모든 디지털 통신 시스템에 필요하다. Carrier Recovery는 신호가 동기식으로 검출되면 필요하게 된다. 특히, square-QAM 방식에 대해서는 differential coding 기법이 적용될지라도 carrier recovery가 필요하다. 이것은 square constellation이 I와 Q축으로 각각 분리되어 encoding된 이산 정보로 구성되기 때문이다. 이러한 정보를 decoding 하기 위해서 I, Q 변조의 영향을 분리하는 것이 필수적이다. 이를 위해서는 수신기 내에 coherent

### II. 제안된 Carrier recovery 알고리즘

#### 2.1 $\theta$ -정합 알고리즘

본 논문에서 제안하는 carrier recovery 구조는, 먼저 전송되어진 신호  $R(X_i, X_q)$ 의 전력을 계산한다. 이 때,  $X_i$ 와  $X_q$ 는 각각 신호 R의 in-phase 및 quadrature-phase 성분이다. 계산된 전력은 예측 신호의 전력과 유사한 크기의 값을 가지며, 수신된 신호에 대해 예상되는 신호는 최대 4개이다. Differential coding 기법의 사용으로, 검출해야 할 신호의 위상 에러 범위는  $\pm 45^\circ$ 이고, 위상 에러  $\theta$ 는 수신된 신호와 예상된 신호들과의 값 즉, E1~E4의 4개가 생성된다. 마지막으로 4개의 예상된 에러들 중 위상 에러 선택 블록에서 정확한 위상 에러 값을 선택한다. 제안된 위상 검출기는 수신된 신

호의 진력을 사용하기 때문에 QAM 신호의 레벨에는 의존하지 않는다.

그림 2는 256 QAM 정상도에서 전송된 심볼의 예측자들의 예로 R, R'이 수신된 신호이며, 수신된 신호의 진력과 동일한 반지름의 원을 표시하였다. 원 상의 점들은 256 QAM 정상도상의 심볼에 해당한다. 위상 에러각은 수신된 신호 R과 정상도상의 심볼 예측 값들 사이의 위상 에러 값으로 정의된다. 검출할 수 있는  $\theta$ 의 범위는  $-45^\circ \sim +45^\circ$  이고,  $\theta$  범위 내에서, 256 QAM의 경우 최대 4개의 심볼이 예측될 수 있다. 위상 에러 계산 블록은 위상 에러  $\theta$ 를 계산한다. 그림 3은 그림 2의 R과 R'에서 위상 에러를 선택하는 예이다. 그림 2의에서, 두 개의 심볼 P'1과 P'2는 전에 수신된 신호 R'의 예측된 값들로 위상 에러  $\theta'1$ 과  $\theta'2$ 는 P'1과 P'2로부터 계산될 수 있다. 네 개의 심볼, P1에서 P4는 현재 수신된 신호 R로부터 예상될 수 있으며, 네 개의 위상 에러  $\theta1$ 에서  $\theta4$ 도 계산될 수 있다. 수신된 신호와 반지름이 동일한 원에 이따한 신호도 없다면 수신된 신호로부터 가장 근접한 신호를 선택하여 전송된 신호를 예측한다.

위상 에러를 비교하기 위하여, 256 QAM의 경우, 예상 심볼 사이의 최소각이  $7.63^\circ$  이므로  $\theta$ 의 검출할 수 있는 범위는 그림 3에서처럼  $-45^\circ \sim +45^\circ$  를 16개의 등분으로 나눌 수 있다. 두 개의 심볼을 구분하기 위하여, 각 영역의 범위는  $7.63^\circ$  보다 작아야만 한다. 위상 에러 결정은 전에 수신된 신호의 위상 에러  $\theta'1$ 과  $\theta'2$ 와 현재 전송된 수신 신호의 위상 에러  $\theta1$ 부터  $\theta4$ 를 비교하여 일치되는 것을 선택한다. 두 개의 연속적인 비교 영역으로부터  $\theta'1$ 과  $\theta1$ 이 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 현재 수신된 신호의 위상 에러  $\theta1$ 을 출력시키며, Loop filter를 통하여 위상 에러를 평균화시키고 위상의 에러 신호를 천천히 feedback 시킨다.

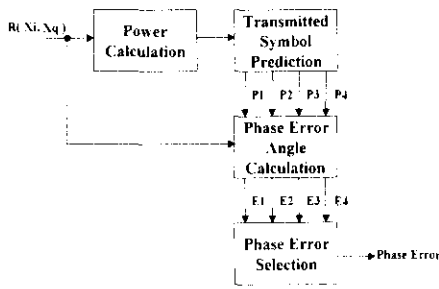


그림 1. 64/256 QAM을 위한 carrier recovery

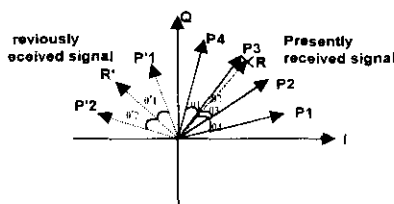
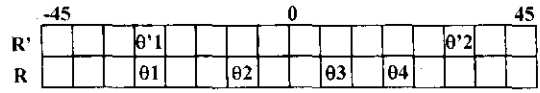


그림 2. 전송 심볼의 예측



Phase Error

그림 3. 영역 분할의 예

## 2.2 AWGN 채널에서의 시뮬레이션

제안된 Carrier recovery 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 모델링한 AWGN 채널에서의 computer 시뮬레이션 결과이다. 대역폭이 제한되어 있는 채널을 통하여 데이터를 전송하는 과정에서 심볼들은 AWGN에 의해서 왜곡을 받게 된다. 이를 고려하여 다음의 채널 특성을 가정하여 시뮬레이션 하였다.

(시뮬레이션 환경)

SNR : 30 dB

M : 256

사용된 심볼의 개수 : 1000 개

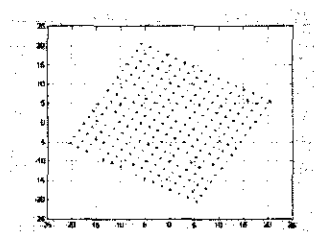
위상 에러각 : 30 degree

시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 여기서 위상이 30도 틀어져 입력된 256-QAM 신호를 본래의 형태로 즉, 위상 에러를 복원하여 틀어짐 없는 신호를 출력하는 것을 확인하였으며, 그림 5에는 carrier recovery가 출력하는 위상 에러각이 수렴하는 것을 나타내었다.

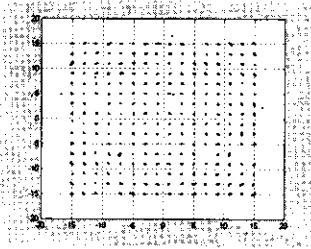
## III. 256-QAM Carrier recovery 회로의 구현

본 논문에서 제안된 알고리즘을 구현하기 위한 Carrier Recovery 회로의 전체 구조는 그림 6과 같다.

제안된 256-QAM용 Carrier recovery 회로의 전체적인 동작은 다음과 같다. I, Q 축으로 각각 분리된 데이터를 입력받으면 2개의 경로를 통해 틀어진 위상각을 복구한다. 먼저 하나의 경로로는 입력된 데이터의 부호 정보를 매어낸 후 전력을 계산하고, 전력 레벨에 문턱값을 적용하여 얻어진 비례상수를 입력 신호에 곱하여 기준 반경(Baseline)으로 패킹시키고, 다른 경로로는 같은 전력을 갖는 정해진 좌표들에 대해 미리 예측 계산해 놓은 테이블에서 순차적으로 가능한 최대 4개의 신호 좌



(a) Carrier recovery를 하기 전



(b) Carrier recovery를 한 후

그림 4. AWGN 채널하의 Carrier recovery 시뮬레이션 결과

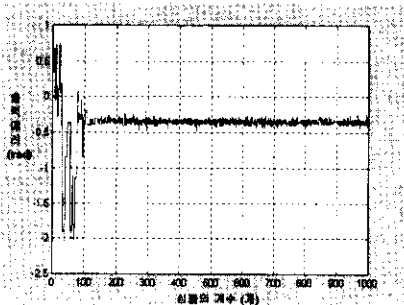


그림 5. Carrier recovery가 출력하는 위상 에러각의 수렴 곡선

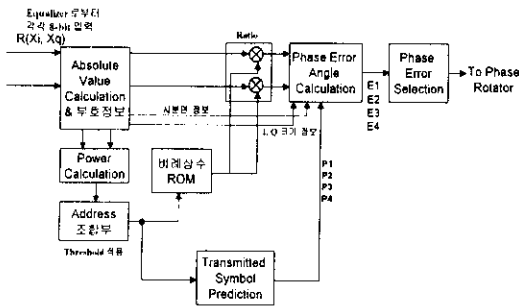


그림 6. 제안된 256-QAM용 Carrier recovery 구조

표를 같은 기준 반경 상에 매핑시켜 출력한다. 다음으로 위상 에러각 계산 블록에서 기준 반경으로 매핑된 입력 신호 좌표와 예측 심볼의 좌표값을 사용해 sin, cos 값을 계산하고, 위상 에러 결정 블록에서는 이전에 계산된 신호의 sin, cos 값과 현재 수신된 신호의 sin, cos 값을 비교하여 같은 위상 에러를 찾아내고 이에 상응하는 sin, cos 값을 phase rotator로 넘겨준다. 그러면 phase rotator는 수신 심볼에 대해 회전변환을 하고 이를 feedback하여 점진적으로 위상 에러를 복원하게 한다. 각각의 세부 블록들은 VHDL coding 및 simulation을 통한 파형 검증의 과정으로 구현되었다.

### 3.1 절대값 및 전력계산

절대값 계산부는 수신된 I, Q축의 data로부터 부호정보를 추출하여 절대값을 취하는 회로로서 결과적으로는 4개의 사분면에 수신된 data를 1사분면으로 가져오는 효과를 갖는다. 신호 크기의 제곱값을 이용한 전력 계산시 MSB 1비트의 부호 정보를 제거한 순수 크기 정보만을 제공하도록 하며, 이후의 위상 에러각 계산 블록에서 신호를 필요한 사분면으로 mapping 시킬 때, constellation상의 모든 좌표를 표시할 수 있도록 한다. 또한 수신 data의 I, Q 성분을 뺄셈하여 대소 여부를 판단하는 신호를 만들어 낸다. 이는 수신된 신호의 sin, cos 값 계산시 4개의 사분면 중 2개의 사분면을 결정하는데 제어 신호로서 사용된다.

수신된 신호의 전력 계산은 I, Q 축의 data를 각각 제곱하여 더함으로써 계산한다. 이는 수신 신호의 성상도가 본래의 좌표로부터 일정각 틀어져 있어도 기준이 되는 점으로부터 일정각격을 유지하므로 이후의 비례상수 ROM을 access할 때 address로 사용하며, 예측 심볼 좌표 군을 결정할 때 address로 사용할 수 있도록 하기 위함이다. 전력 계산부는 2개의 제곱 연산부와 그 결과를 더하는 구조로 되어있다. 제곱 연산을 하는데 있어서 덧셈을 가장 적게 할 수 있도록 합과 자리올림을 최적화하였다.

### 3.2 비례상수 ROM

비례상수 ROM은 Address 조합부로부터 계산된 전력 레벨을 주소로 하여 수신 신호를 기준반경(Baseline) 상으로 mapping 시키는데 필요한 비례상수를 내보내는 메모리이다. 계산 결과 최소 15비트를 사용해야 모든 비례상수를 구분할 수 있었다. 만약 수신 심볼의 전력이 너무 큰 경우는 비례상수를 내보내지 않고 carrier recovery를 하지 않는다.

### 3.3 전송 심볼 예측부

전송 심볼 예측부는 Address 조합부로부터 주소를 입력받으면 1 사분면 상의 전력이 같은 최대 4개의 심볼에 대한 좌표값을 출력하게 된다. 이 심볼들은 기준반경 상의 입력 심볼 좌표와 비교, sin, cos 값을 계산할 수 있도록 성상도상의 좌표가 아닌 기준 반경(Baseline) 상으로 매핑된 좌표군이다. 회로의 축소화를 위해 4개의 좌표를 병렬로 출력하지 않고 I, Q 각각의 좌표를 4번에 걸쳐 순차적으로 출력한다. 즉, 앞의 블록들의 동작률에 대해 이 블록은 4배의 클럭으로 동작한다.

### 3.4 위상 에러각 계산부

위상 에러각 계산부는 틀어진 위상 에러에 대해 수신 심볼의 좌표와, 예측 계산되어 있는 본래의 좌표를 사용해서 그림 7과 같이 sin, cos 값을 계산하는 블록이다. 이 블록은 기준 반경 상으로 mapping 된 수신 심볼의

좌표와 사분면 정보, I, Q 좌표 대소정보 및 예측 심볼 좌표를 입력 받는다. 256-QAM 방식에서는 differential coding 방식을 사용하므로 그 특성상 신호의 위상이  $\pm 45^\circ$  이내에서 틀어진 위상 에러만 찾아내면 된다. 본 논문에서는 회로구현을 간단하게 하기 위하여 영역 확장 방법을 도입하였다. 먼저 수신 심볼의 위상에 대해  $\pm 45^\circ$  가 되는 영역이 다른 사분면에 걸쳐 있을 경우 문제가 되는데 이를 극복하기 위해 제어 신호에 의해 결정된 사분면에 미리 가지고 있는 1 사분면의 심볼들을 부호 정보와 I, Q 좌표 대소 정보를 이용해 필요한 2개의 사분면으로 mirroring한다. 이로써 같은 전력을 갖는 최대 가능한 심볼의 개수는 4개가 아닌 8개가 된다. 이 8개의 심볼 좌표와 수신 심볼 좌표에 대해 각각 sin, cos 값을 계산한다. 필진 총 8개의 심볼 중에서 sin, cos 값이 각각  $\pm 45^\circ$  일 때의 값과 비교, 문턱값을 적용하여 다시 최대 4개로 줄여 출력한다.

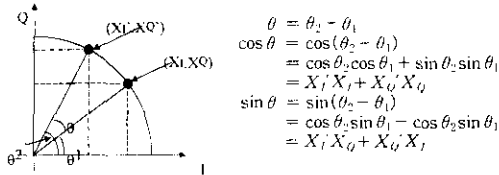


그림 7. 심볼의 좌표만을 이용한 sin, cos 값 계산

### 3.5 Phase Rotator

위상 에러 결정부에서 레지스터에 저장된 현재 수신 심볼의 위상차들에 대한 sin, cos 값과 이전 심볼 레이트에 수신한 심볼에 대한 sin, cos 값을 비교하여 서로 일치하는 값을 위상 에러값으로 결정한다. 결정된 위상 에러에 대한 sin, cos 값을 phase rotator로 넘겨 준다.

Phase Rotator는 위상에러 결정부에서 결정된 sin, cos 값 즉, Carrier recovery 회로의 최종 결과값을 수신된 신호에 반영하는 블록이다. 틀어진 수신 심볼을 본래의 위치로 복원시키기 위하여, 틀어진 위상값에 대응하는 sin, cos 값을 사용해 회전 변환을 수행하는 블록이다.

## IV. 결론

본 논문에서는 기존의 carrier recovery 알고리즘이 multi-level QAM 통신 방식에서는 사용 불가능한 문제점을 해결하기 위해  $\theta$ -정합을 이용한 carrier recovery 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 성능을 알아보기 위해, AWGN 채널을 모델링하여 시뮬레이션한 결과를 제시하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 AWGN이 첨가된 채널을 통과한 수신 신호의 틀어진 위상을 바로잡을 수 있음을 확인하였고, 출력하는 위상 에러각이 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 본 알고리즘을 실제 회로로 구현하기 위해 요구되는 전체 회로의 구조 및 동

작 그리고, 요구되는 각각의 세부 블록의 동작에 대해 설명하였다. 제안된 256-QAM Carrier recovery 알고리즘을 통해 수신측에서 In-phase와 Quadrature-phase로 분리 변조되어 온 신호를 복조할 때, VCO와 입력 신호와의 위상차를 제거하여 수신된 반송파의 위상과 자체 내에서 재생된 내부 신호 위상과의 차이 즉, 위상 지터를 최소화하여 전송된 data의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

## V. 참고 문헌

- [1] Kazuya Yamanaka et al., "A Multilevel QAM Demodulator VLSI with Wideband Carrier Recovery and Dual Equalizing Mode," *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 32, No. 7, pp. 1101-1107, July 1997
- [2] Yoichi Saito et al., "16 QAM Carrier Recovery PLL for Service-Channel Transmission Using FSK Additional Modulation," *IEEE Trans on Commun.*, vol. COM-30, No. 8, pp. 1918-1925, August 1982
- [3] Hikmet Sari et al., "New Phase and Frequency Detectors for Carrier Recovery in PSK and QAM Systems," *IEEE Trans on Commun.*, vol. 36, No. 9, pp. 1035-1043, September 1988
- [4] William C. Lindsey et al., "Carrier Synchronization and Detection of Polyphase Signals," *IEEE Trans on Commun.*, pp. 441-454, June 1972
- [5] Marvin K. Simon et al., "Carrier Synchronization and Detection of QASK Signal Sets," *IEEE Trans on Commun.*, vol. COM-22, No. 2, pp. 98-106, February 1974
- [6] A. Leclert et al., "Universal Carrier Recovery Loop for QASK and PSK Signal Sets," *IEEE Trans on Commun.*, vol. COM-31, No. 1, pp. 130-136, January 1983
- [7] David G. Messerschmitt et al., "Frequency Detectors for PLL Acquisition in Timing and Carrier Recovery," *IEEE Trans on Commun.*, vol. COM-27, No. 9, pp. 1288-1295, September 1979