

VSB 수신기를 위한 반송파 위상 오차에 독립적인 심벌 타이밍 오프셋 추정 알고리즘에 대한 연구

*신성수 **김준태

건국대학교

*sungsu56@konkuk.ac.kr

An Alternative Carrier Phase Independent Symbol Timing Offset Estimation Methods for VSB Receivers.

*Shin, Sung-Soo **Kim, Joon-Tae

Konkuk University

요약

본 논문에서는 VSB 수신기를 위한 반송파 위상 오차에 독립적인 심벌 타이밍 오프셋 추정 알고리즘을 제안하고자 한다. 심벌 타이밍 오프셋 추정에 대표적인 알고리즘인 가드너 방법은 반송파 위상 오프셋이 포함된 VSB 수신기에서는 타이밍 오프셋을 추정할 수 없다. 본 논문에서는 수신신호의 공액 곱 연산을 통하여 신호의 스펙트럼을 확장하고 반송파 위상 오프셋을 상쇄하였고, 그 후 가드너 알고리즘을 통하여 인접 스펙트럼 간의 중복부분을 발생시켜, 타이밍 오프셋을 추정하는 방식을 연구하였다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 알고리즘은 VSB 수신기에서 반송파 위상 오차에 영향을 받지 않고, 정확하게 타이밍 오프셋을 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

1. 서론

일반적으로 통신 시스템에서, 수신기는 신호에 포함된 반송파 위상 오프셋과 타이밍 오프셋을 복구 하는 과정이 필요하다. VSB 수신기에서는, 반송파 위상의 동기화를 이루기 위해 8-PAM(pulse amplitude modulation, 펄스 진폭 변조, 變調)에 DC 1.25V의 파일릿 신호를 사용한다[1]. 그리고 타이밍 동기는 일반적으로, 반송파 위상 동기화 동기에 이루어지거나, 먼저 반송파 위상 동기를 이룬 뒤에 진행된다. 동기화에 있어서, 잔류 반송파 오프셋은 타이밍 오프셋 추정 성능을 떨어뜨리고 전체적인 수신기의 성능을 저하시키기 때문이다.

QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 시스템에서는 심벌의 정보가 동 위상(同相 In-phase) 채널과 직각 위상(位相 Quadrature-phase) 채널에 독립적으로 존재한다. QAM 시스템은 타이밍 동기화에 있어서, 가드너 알고리즘[2]을 적용하면 동 위상 채널과 직각 위상 채널이 서로 작용하여 반송파 위상 오차가 포함되어도 타이밍 오프셋을 추정 할 수 있다.

VSB 시스템의 경우, 심벌의 정보가 동 위상 채널에만 포함되고 직각 위상 채널은 동 위상의 힐버트 변환(Hilbert Transform)에 의하여 구성되기 때문에 전송 대역폭을 줄여주는 장점이 있다. 하지만, 이러한 이유로 VSB 수신기의 타이밍 정보는 동 위상 채널과 직각 위상 채널에 독립적으로 존재하지 않게 되고, 타이밍 동기를 이루기 위해 사용되는 일반적인 추정 방식을 적용 할 수 없게 만든다. 그래서 보통, VSB 수신기의 심벌 타이밍 동기는 반송파 위상 오차를 복구 한 뒤, 동 위상 채널에서만 실행하게 된다.

이와 관련하여 많은 연구가 진행 되었고, 그 중, 스펙트럴 라인

(Spectral line)의 추출을 이용한 반송파 위상 오차에 독립적인 타이밍 오프셋 추정 알고리즘이 제시 되었다. 논문[3]은, 2배 오버 샘플링 된 수신 신호에 공액(共軛, conjugate) 곱과 자승 곱으로 스펙트럼 간의 중복부분(Overlap)을 생성하여 반송파 위상 오차가 존재하는 상황에서 심벌 타이밍 오프셋을 추정하는 방법이다. 논문[3]의 S-커브는 1/4 심벌 타임($0.25 T_s$) 만큼 옮겨져 나타나는 특성이 있는데, 이러한 특성은 수신기의 정합 필터에서 다시 $0.25T$ 만큼 보정하여 해결 할 수 있기 때문에 별다른 하드웨어를 추가 할 필요는 없다. 또한 논문[4]는 논문[3]과 마찬가지로 공액 곱과 자승 곱을 사용하지만, 공액 곱 이전에 대역 날 전처리 필터(Bandedge Pre-filter)를 사용한다. 논문 [3], [4]는 모두 공액 곱으로 반송파 위상 오차를 상쇄시키는 특성을 가진다.

본 논문에서는 VSB 수신기로 전송한 신호를 반송파 위상 오차가 포함된 상황에서 타이밍 오프셋을 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 논문[3], [4]와 같이, 공액 곱을 사용하여 반송파 위상 오차를 상쇄하고 스펙트럼을 확장 시키지만, 가드너 알고리즘[2]을 통하여 인접 스펙트럼 간의 중복부분을 생성시켜 타이밍 오프셋을 추정한다. 이 방법은 반송파 위상 오차에 영향을 받지 않고 정확한 타이밍 오프셋을 추정 할 수 있으며, 논문[3], [4]와는 달리 S-커브의 평균 에러 값이 0T일 때 정규화 에러 값이 0에서 옮겨지지 않아, 별도의 추가과정 없이 타이밍을 동기화 할 수 있는 장점이 있다.

2. 제안하는 심벌 타이밍 오프셋 추정 알고리즘

반송파 위상 오프셋을 포함한 신호에서 타이밍 에러를 추정 할 때,

QAM과 같은 DSB(double side band)모듈레이션 시스템은 동 위상 채널과 직각 위상 채널의 독립적인 특성으로 반송파 위상 옵셋을 상쇄하고 타이밍 옵셋을 추정할 수 있다. 하지만 VSB 전송 시스템은 동 위상 채널에만 심볼 정보가 운반되고 직각 위상 채널은 동 위상 채널의 힐버트 변환으로 이루어지기 때문에, 각 채널의 타이밍 옵셋이 독립적이지 않다.

VSB 전송 방식을 사용하는 시스템에서 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x_m p_c(t - mT) + n(t) \quad (1)$$

여기서 x_m 은 전송된 심벌을, $p_c(t)$ 는 VSB 변조에 대한 복소 펄스 웨이핑 필터의 임펄스 응답을 나타낸다. T는 심벌의 주기를 나타내고, 그리고 $n(t)$ 은 아날로그 채널 필터에 의해 필터링 된 잡음을 나타낸다. 그리고 $r(t)$ 의 공액 곱은, $v(t) = |r(t)|^2$ 라고 하고, 데이터 심벌 x_m 이 일정하다고 가정 할 때, $E\{v(t)\}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\{v(t)\} = \sigma_x^2 \sum_m |p_c(t - mT)|^2 + noise\ term \quad (2)$$

여기서 σ_x^2 는 심벌 파워의 평균을 나타낸다. 그리고 푸아송 합 공식을 이용하여, 주기신호로 표현된 $E\{v(t)\}$ 에 푸리에 변환을 적용하면,

$$\sum_m |p_c(t - mT)|^2 = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z\left(\frac{n}{T}\right) e^{j2\pi nt/T} \quad (3)$$

여기서,

$$Z\left(\frac{n}{T}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} P_c(f) P_c\left(f - \frac{n}{T}\right)^* df \quad (4)$$

* 은 공액 복소(Complex Conjugate)를 의미한다. 주파수 도메인에서 $Z(n/T)$ 는 $P_c(f)$ 와 그것의 n/T 만큼 옮겨진 것의 중복된 형태의 스펙트럼을 나타낸다. 그림 1(b)은 전송된 신호에 공액 곱을 하여 나타난 스펙트럼이다. 공액 곱의 조합 $v(t)$ 는 Double Side Band(DSB)와 같은 조건을 갖게 되고, 반송파 위상 옵셋이 상쇄되는 상태가 된다.

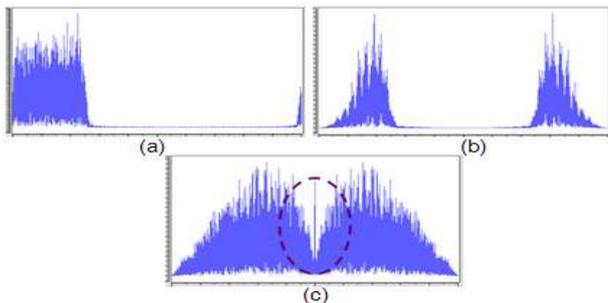


그림 1. VSB신호의 스펙트럼 (a)와 컨주게이트 곱(b), 알고리즘 적용 후(c)의 스펙트럼 모습

이제 공액 곱한 전송신호 $V(t)$ 에 가드너 알고리즘을 적용하여 타이밍 옵셋을 추정한다. 가드너 알고리즘의 식은 다음과 같다.

$$\delta(t) = v\left(t - \frac{1}{2}\right) \{v(t) - v(t-1)\} \quad (5)$$

식 (5)에 의해 추정된 타이밍 옵셋 $\delta(t)$ 는 주파수 축에서 다음과 같이 다시 표현 할 수 있다. 추정된 타이밍 옵셋의 성분 $U_t(\tau)$ 은,

$$W(t) = |P_c(t)|^2 \text{ 일 때,}$$

$$U_t(\tau) = -(4/T) \sin 2\pi\tau/T \cdot \int_0^{1/T} W(f) W\left(\frac{1}{T} - f\right) \sin \pi f T df \quad (6)$$

추정된 타이밍 옵셋은 그림 1(c)처럼 나타나는데, 식 (6)에서 알 수 있듯이 $W(f)$ 와 $W(1/T-f)$ 의 스펙트럼 중복부분에 의하여 타이밍 옵셋이 추정되는 스펙트럴 라인 방식이 적용되었음을 보여준다.

그림(2)는 제안하는 타이밍 옵셋 추정기의 알고리즘을 나타낸 것이다. 2배 오버 샘플링 된 수신 신호의 공액 곱 이후에 대역 통과 필터(Band Pass Filter)를 사용하여 DC 컴포넌트를 제거하고, 추정된 값에 고 대역 통과 필터(High Pass Filter)를 통해 타이밍 에러의 톤 신호를 필터링 한다.

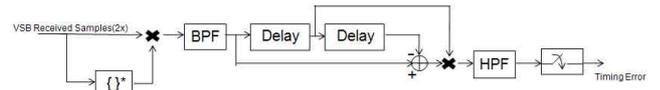


그림 2. 제안하는 타이밍 옵셋 추정 알고리즘의 구조

그림(3)은 정규화 된 타이밍 옵셋에, 1000ppm의 반송파 위상 옵셋을 포함하여 제안하는 방법과 가드너 방식[2]의 S-커브를 정규화 하여 비교한 것이다. 가드너 알고리즘의 경우 반송파 위상이 존재하는 VSB 수신기에서 성능이 좋지 않지만, 제안하는 알고리즘은 그림(3)과 같이 타이밍 옵셋을 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

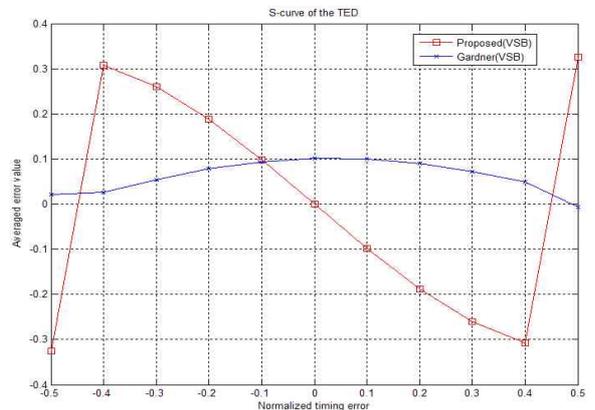


그림 3. 제안하는 알고리즘과 가드너 방식의 S-커브 (CPO)

1000ppm)

그림(4)은 AWGN 채널에서 추정된 심볼 타이밍 옵셋의 분산 그래프를 나타낸 것이다.

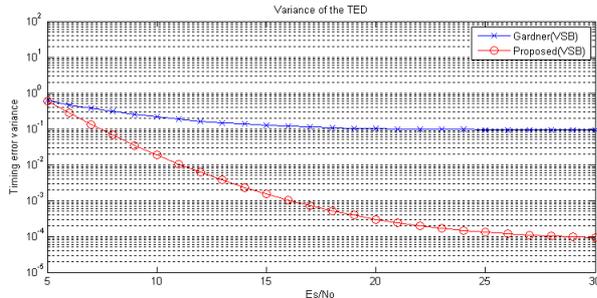


그림 4. 제안하는 방식과 가드너 방식의 분산 성능 그래프 (CPO 1000ppm)

그림(5)은 1000Hz의 일정한 타이밍 옵셋을 주어 $-\pi$ 부터 π 까지의 반송파 위상 옵셋 간의 S-커브를 정규화 하여 나타낸 그래프이다. 그림(5)에서와 같이, 제안하는 알고리즘은 반송파 위상 옵셋에 독립적으로 정확한 타이밍 옵셋을 추정 할 수 있다.

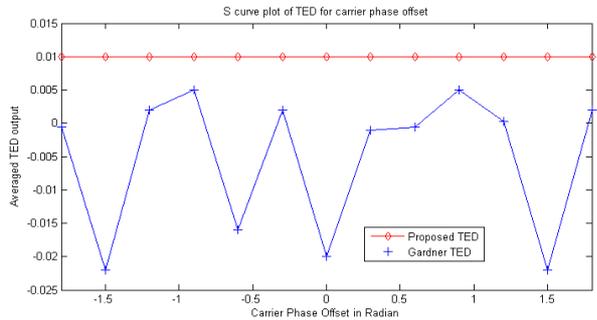


그림 5. 제안하는 알고리즘과 가드너 방식의 반송파 주파수 오차 S-커브

3. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션은 현재 DTV 전송방식의 표준으로 사용 중인 ATSC 8-VSB 시스템[5]를 구성하여 테스트 하였다. 그림(6)은 1000Hz의 타이밍 옵셋에서 제안하는 알고리즘과 가드너 방식의 루프 필터 수렴을 보여주는 그림이다. 제안한 알고리즘은 반송파 위상 옵셋이 포함된 환경에서도 반송파 위상 옵셋이 포함되지 않은 결과와 동일한 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

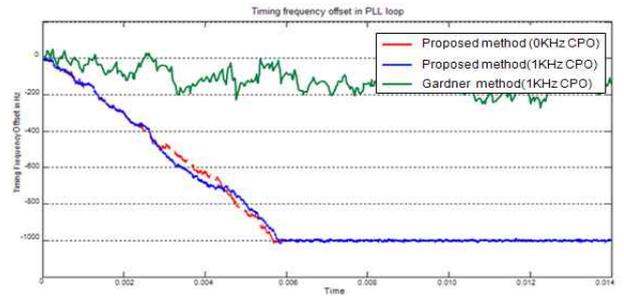


그림 6. 1000Hz 타이밍 옵셋의 PLL 루프 수렴 그래프

4. 결론

ATSC -8VSB 지상파 DTV 시스템에서 심볼 타이밍 동기를 얻기 위해 가드너 방식을 사용한다. 하지만 가드너 방식은 VSB 수신기에 반송파 위상 옵셋이 포함되면 타이밍 옵셋을 추정 할 수 없기 때문에, 먼저 반송파 위상의 동기를 이룬 뒤에 가드너 방식을 사용한다. 제안하는 알고리즘은 가드너 방식에서 큰 수정 없이 공액 곱을 사용하여, 반송파 위상 오차가 존재하더라도 타이밍 옵셋을 추정할 수 있는 방법을 제안하고 그 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 보였다. 제안한 알고리즘은 동 위상 채널에만 정보가 있는 VSB 시스템의 수신기에서, 수신 신호의 공액 곱으로 반송파 위상 오차를 상쇄하고, 스펙트럼을 넓히며, 가드너 방식을 통해 스펙트럼 간의 중복부분을 생성시켜 타이밍 옵셋을 추정 한다. 또한 논문 [4]에서 나타나는 S-커브가 옮겨지는 현상 없이, 정확한 타이밍 옵셋을 얻을 수 있다.

Acknowledgment

- 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [KI0010035618, 차세대 지상파 3D HDTV를 위한 고효율 전송기술 개발]

참조 문헌

- [1] Grand Alliance HDTV system Specification, Ver. 2.0, Dec. 7, 1994.
- [2] F.M. Gardner, "A BPSK/QPSK timing error detector for sampled receiver," IEEE Trans. On Comm., COM-34, pp. 423-429, May, 1986.
- [3] J. T. Kim, "Carrier phase independent timing recovery methods for VSB receivers," IEEE Trans. On Consumer Electronics, Vol.52, No. 1, Feb.
- [4] Huang. Lou. , "Timing recovery Methods for VSB Receivers," IEEE Trans. On Consumer Electronics, Vol. 53, No. 2, pp. 265-269, May. 2007.
- [5] ATSC A/43, Guide to the use of the ATSC digital television standard, DEC. 2003.