

일반논문-11-16-1-10

수정된 ATSC 전송 시스템을 위한 반송파 주파수 동기부 설계에 관한 연구

전 영 곤^{a)}, 김 준 태^{a)*}

A Carrier Frequency Synchronization Scheme for modified ATSC Systems

Young Gon Jeon^{a)} and Joon Tae Kim^{a)*}

요 약

최근 들어 3D HDTV (3-Dimensional High Definition Television)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 3D HDTV 방송 서비스를 위하여 기존의 HDTV 전송 방식인 ATSC (Advanced Television Systems Committee) 8-VSB (8-Vestigial Side Band) 시스템을 수정하려는 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 프레임헤더에 PN (Pseudo-Noise) 심볼을 삽입하여 반송파 주파수 오차와 반송파 위상 오차 복구를 이루도록 하는 프레임 구조와 VSB 변조방식을 채택하고자 한다. 본 논문에서는 이 시스템을 수정된 ATSC 전송시스템이라 부르려 한다. 수정된 ATSC 전송시스템의 수신기는 방송 신호의 원활한 수신을 위하여 반송파 주파수 오차(심볼속도 대비 최대 1%)를 정확하게 추정하고 복구하여야 한다. 기존 ATSC 시스템이 파일럿 신호를 삽입하여 반송파 주파수 오차를 복구 하였다면, 수정된 ATSC 시스템은 별도의 파일럿 신호 첨가 없이 PN 심볼을 이용하게 된다. 본 논문에서는 수정된 ATSC 전송 시스템에 적용 가능한 반송파 주파수 복구 방식을 소개한다. 제안된 방식은 Fitz 알고리즘을 이용한 거친 반송파 주파수 오차 복구부와 간단한 PN 심볼 상관 알고리즘을 이용한 미세 반송파 주파수 오차 복구부를 가진다. 그리고 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조된 신호는 심볼 정보가 동위상 채널과 직각위상 채널에 존재하는 반면 VSB 변조된 신호는 심볼 정보가 동위상 채널에만 존재하고 직각위상 채널은 단지 동위상 채널의 힐버트 변환된 값이다. 그러므로 VSB 변조된 신호는 QAM 변조된 신호와 같은 고정된 위상을 가지지 못하고, 반송파 주파수 옵셋에 더욱 민감하게 된다. 이 같은 문제를 해결하고 성능을 향상시키기 위하여 이상적인 송수신 시스템에서 수신된 PN 심볼을 이용한 수신된 신호의 위상보정 과정을 수행하게 된다.

Abstract

Recently, studies of 3D HDTV broadcasting technology have been processed actively. Korea is making efforts to modify Advanced Television Systems Committee (ATSC) 8-Vestigial Side Band (8-VSB) systems for terrestrial 3D HDTV broadcasting services. We intend to adopt a new frame structure to use PN (Pseudo-Noise) sequence as frame header, and VSB modulation. PN sequence is used to recover carrier frequency offset, carrier phase error. In this paper, we will describe this system as the modified ATSC systems. The receiver of the modified ATSC system should be able to estimate and recover carrier frequency offset exactly. A existing ATSC systems inserts pilot to recover carrier frequency offset, on the other hand the modified ATSC systems use PN sequence to recovery carrier frequency offset without the use of pilot. In this paper, we introduce carrier frequency recovery (CFR) scheme for the modified ATSC systems. The proposed CFR scheme is composed of coarse CFR scheme using Fitz algorithm and fine CFR scheme using a simple PN sequence correlation algorithm. And, the symbol information of QAM modulated signal is contained in both In-phase (I)channel and Quadrature-phase (Q)channel. However the symbol information of VSB modulated signal is contained in I channel, and Q channel is just Hilbert transform of I channel. For the reason, VSB modulated symbols can not have fixed phase like QAM modulated symbols, and VSB modulated symbols is more sensitive to carrier frequency offset. Therefore we perform phase correction of received PN sequence to improve performance.

Keyword : Carrier Frequency Recovery, Carrier Frequency Synchronization, 3D HDTV, ATSC

1. 서론

최근 들어 방송 화면에서 거리감, 질감 등을 입체적으로 느낄 수 있는 3D HDTV 방송 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 지상파 3D HDTV 서비스를 위한 동영상 압축방식, 전송 방식, 그리고 디스플레이 인터페이스에 관한 표준화의 필요성을 인식하고 2010년 초 한국 정보통신기술협회(TTA)^[1]를 중심으로 표준화 위원회를 신설하여 3D HDTV 방송을 위한 표현방식, 부호화, 송수신시스템 및 디스플레이와 응용 포맷, 평가 및 측정/시험방법 등에 관한 표준화를 진행하고 있다. 또한 방송통신위원회는 한국전파진흥협회(RAPA) 산하에 3DTV 방송 진흥센터^[2]를 설치하여 3DTV 실험방송 추진단을 지원하고, 3DTV 방송관련 분야별 프로젝트 발굴과 추진, 정보 DB(기술규격 및 표준화, 제품/서비스 동향) 구축, 대외협력 등 3DTV 방송 활성화를 위해 노력중이다.

현재 국내의 지상파 전송 방식은 미국 ATSC (Advanced Television Systems Committee) 에서 제정한 8-VSB (8-Vestigial Side Band) 시스템^{[3][4]}을 표준으로 사용하고 있다. ATSC 8-VSB 시스템은 6MHz의 TV 채널 대역폭에서 약 19.2Mbps의 데이터를 전송 할 수 있으며, 풀 HD를 기준으로 $1920 \times 1080(\text{화소}) \times 2(\text{TV판넬수}) \times 30(\text{프레임}) \times 24(\text{RGB}) \times 0.01(\text{압축률}) = \text{약} 29.8\text{Mbps}$ 정도의 데이터 전송량을 필요로 하는 3D HDTV를 위해서는 적합하지 않다. 이를 극복하기 위하여 3D HDTV 방송 서비스를 위한 새로운 전송시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 연구 중 하나로 기존의 ATSC 8-VSB 시스템의 채널 부호화 부를 수정하고, 변조 성상도를 증가 시켜 채널 전송 용량 증대의 가능성을 확인한 연구가 수행되었다^[5]. 또한 논문 [6]에서는 논문 [5]에 수행된 연구를 바탕으로 하여 시변다중경로채널에 강인한 프레임 구조가 제안되었고, ISI (Inter Symbol Interference)를 방지하기 위한 프레임 헤더의 보호

구간에 PN (Pseudo-Noise) 심볼을 삽입하여 순수 데이터 전송률을 최대한 보장하면서 시변다중경로채널에서 효율적으로 채널을 추정하고 복구하는 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 앞선 논문에서 연구된 프레임 구조를 가지는 시스템을 수정된 ATSC 시스템이라 부르려 한다.



그림 1. 수정된 ATSC 시스템의 예상 프레임 구조
Fig. 1. A frame structure of modified ATSC systems

수정된 ATSC 시스템은 그림 1과 같이 프레임헤드 (Frame header)와 프레임 바디 (Frame body)가 연속되는 프레임 구조를 가질 것으로 예상되며 프레임헤드에는 PN 심볼을 사용하고, 프레임 바디에는 시스템 정보와 데이터가 실리게 될 것이다. 프레임 헤드에 해당하는 PN심볼은 반송파 주파수 오차 복구, 반송파 위상 오차 복구, 채널 추정, 타이밍 오차 복구 등에 사용 된다. 그리고 수정된 ATSC 시스템은 기존 ATSC 전송시스템의 8-VSB 변조방식을 고려하고 있다.

본 논문에서는 수정된 ATSC 전송시스템에 적용 가능한 견고한 반송파 주파수 복구 방식을 제안한다. 기존의 ATSC 시스템이 VSB 변조 전 각 신호에 주파수 대역(DC 1.25V)의 파일럿 신호를 더하여 전송하고, 이를 이용하여 주파수와 위상 오차를 복구하였다면, 수정된 ATSC 시스템은 별도의 파일럿 신호 첨가 없이 프레임헤드에 해당하는 PN심볼을 이용하여 반송파 주파수 오프셋과 위상오차를 복구 한다. 수정된 ATSC 전송 시스템을 위한 반송파 주파수 복구 방식은 거친 반송파 주파수 오차 복구부와 미세 반송파 주파수 오차 복구부가 연동되는 구조를 제안한다. 거친 반송파 주파수 복구를 위한 알고리즘으로는 높은 정확성과 분산성능을 가지는 잘 알려진 Fitz 알고리즘 [7]을 적용하였고, 미세 반송파 주파수 오차 복구 알고리즘으로는 잘 알려진 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘 [8]을 이용하였다. 일반적으로 알려져 있는 반송파 주파수 복구 알고리즘들은 복소수 신호를 이용하여 반송파 주파수 오차를 복구한다^{[7]-[13]}. QAM 변조방식의 경우 진폭과 위상을 동시에 변조

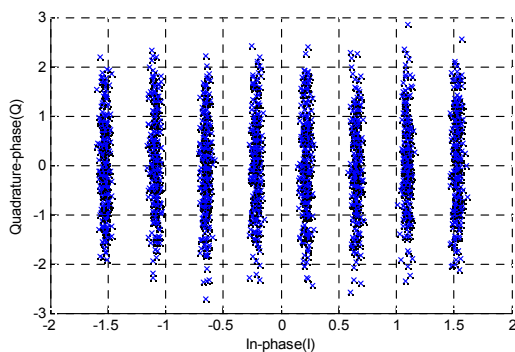
a) 건국대학교 전자공학과 차세대방송통신연구실
Department of Electronics Engineering, Konkuk University
교신저자 : 김준태 (jtkim@konkuk.ac.kr)
* 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [K1001003561-8, 차세대 지상파 3D HDTV를 위한 고효율 전송기술 개발]
· 접수일(2010년10월26일), 수정일(2010년12월20일), 게재확정일(2010년12월21일)

시켜 사용하기 때문에 심볼 정보가 동위상 (In-phase) 채널과, 직교위상 (Quadrature-phase) 채널 모두에 포함되어 있어 수신된 신호에 대한 별도의 보정 과정 없이 반송파 주파수 오차와 위상 오차 복구가 가능하다⁹⁾. 그러나 VSB 변조방식의 경우 진폭만을 이용하여 변조하기 때문에 심볼 정보가 동위상 채널에만 존재하고, 직교위상 채널은 단지 수신된 동위상 채널의 힐버트 변환에 의해 생성된 예측 불가능한 신호에 지나지 않는다⁹⁾. 그러므로 VSB 변조된 신호는 QAM 변조된 신호처럼 고정된 진폭과 위상이 존재하지 않고, 반송파 주파수 오프셋에 더욱 민감하게 된다. 이 문제를 해결해 주기 위한 방안으로 수신된 PN심볼의 위상을 보정하는 과정을 제안한다. 수신된 PN심볼의 위상을 보정하는 과정은 이상적인 송수신 시스템에서 수신된 PN심볼을 이용하여 이루어진다. 이 과정을 통해 기존의 타임 도메인에서 QAM 변조된 신호나 PSK 변조된 신호와 같이 고정된 진폭과 위상으로 이루어진 배열을 가진 신호에 대해서만 적용 가능하였던, 반송파 주파수 동기 방식을 고정된 진폭과 위상을 가지지 않는 VSB 변조된 신호에도 적용 가능하게 된다.

II. QAM 변조방식과 VSB 변조방식 비교

1. QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조방식

QAM은 반송파의 진폭과 위상을 동시에 변조시키는 방



(a) 8-VSB 변조된 신호의 성상도

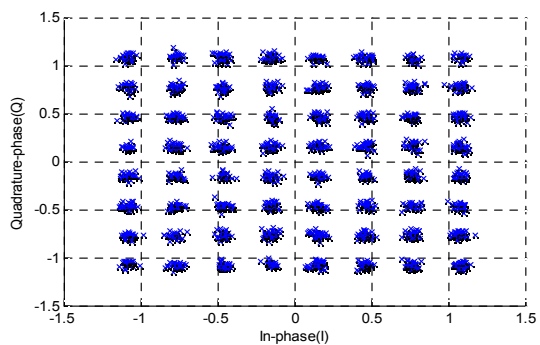
식을 사용하는 것으로 APK (Amplitude Phase shift Keying)의 일종이다. QAM 변조 방식은 위상과 진폭을 동시에 변화시키기 때문에 인접부호간의 간섭이 적어, 하나의 파형이 의미하는 값을 여러 가지 형태로 만들 수 있다. 현재 256QAM까지 상용화되어 실제 디지털 방송 서비스에 많이 사용되고 있다. 이 밖에도 16QAM, 32QAM, 64QAM 등이 디지털 방송 또는 ADSL 등의 브로드밴드 통신서비스에 활용되고 있다.

2. VSB (Vestigial Side Band) 변조방식

잔류측파대(VSB) 변조방식은 디지털 방송을 지상파로 보내기 위해 변조하는 방식중의 하나로 미국에서 사용하고 있으며, 반송파가 주파수대역의 사이트에 존재하기 때문에 붙여진 이름이다. VSB 변조 방식은 신호의 진폭표시를 3비트 혹은 4비트를 사용함에 따라 8-VSB 또는 16-VSB가 되며, 이것은 신호의 진폭값을 8단계 또는 16단계로 변환하여 전송하는 것을 의미한다. 잔류측파대 변조방식의 장점은 진교 변조방식에 비해 직교신호사이의 크로스토크가 없으므로 전송로나 기기의 위상 일그러짐에 강하다.

3. QAM 변조방식과 VSB 변조방식의 차이점

그림 2의 (a)와 (b)는 VSB 변조된 신호와 QAM 변조된 신호의 성상도 차이를 보여주고 있다. QAM 변조방식은 반



(b) 64-QAM 변조된 신호의 성상도

그림 2. 8-VSB 와 64-QAM의 성상도 차이

Fig. 2. A difference between 8-VSB constellation and 64-QAM constellation

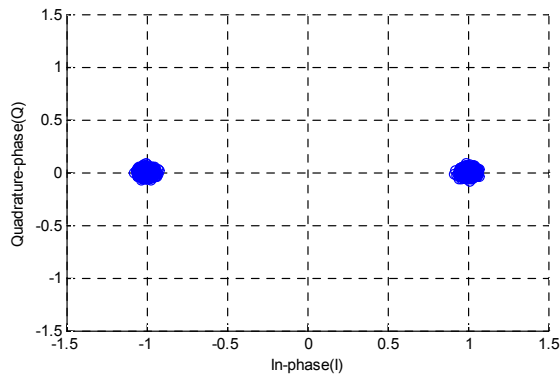
송파의 진폭과 위상을 동시에 변화시켜 사용하기 때문에 그림 2의 (b)와 같이 반송파 크기와 위상의 조합으로 이루어진 고정된 신호 배열을 가지게 되지만, VSB 변조방식은 위상이 아닌 진폭의 크기만으로 신호가 전송되어 위상은 독립변수로 작용하지 않기 때문에 그림 2의 (a)와 같이 고정되지 않은 위상과 진폭을 가지게 된다.

III. 제안된 반송파 동기 방식

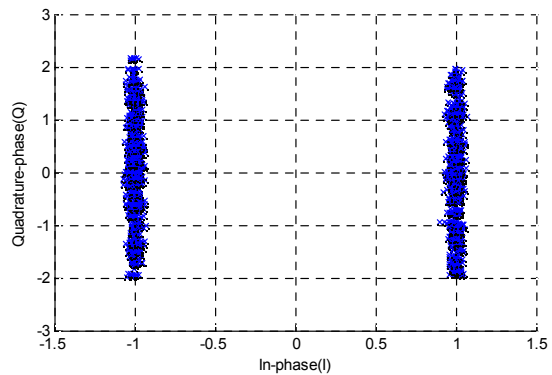
1. VSB 변조된 신호의 위상 보정 알고리즘

그림 3은 QAM 변조된 PN심볼과 VSB 변조된 PN심볼에 주파수 오프셋이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우의 차

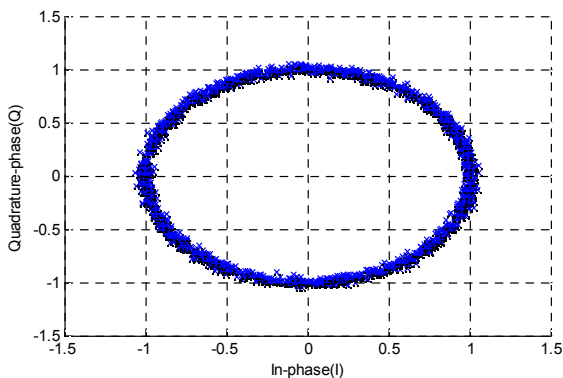
이를 보여주고 있다. QAM 변조방식은 진폭과 위상을 모두 사용하여 변조하기 때문에 심볼 정보가 동위상 채널과 직교위상 채널 모두에 포함되어 있지만 VSB 변조방식은 진폭의 변화만을 이용하여 변조하므로, VSB 변조된 신호의 심볼 정보는 동위상 채널에만 존재하고 직교위상 채널은 단지 동위상 채널 정보를 힐버트 변환하여 생성한 값에 지나지 않는다. 그러므로 그림 3의 (b)에 나타난 것처럼, VSB 변조된 PN심볼은 QAM 변조된 PN심볼 처럼 진폭과 위상으로 이루어진 고정된 값을 가지지 않는다. 그림 3의 (c)와 (d)는 주파수 오프셋이 존재하는 경우 PN심볼의 성상도 변화를 보여준다. 그림 3의 (c)에 나타난 것처럼 QAM 변조된 신호는 거의 일정한 진폭을 가지고 주파수 오프셋 만큼 위상이 변함에 따라 일정한 고리모양으로 신호가 변하지만, VSB 변조된 신호는 그림 3의 (d)와 같이 일정한 규칙성이



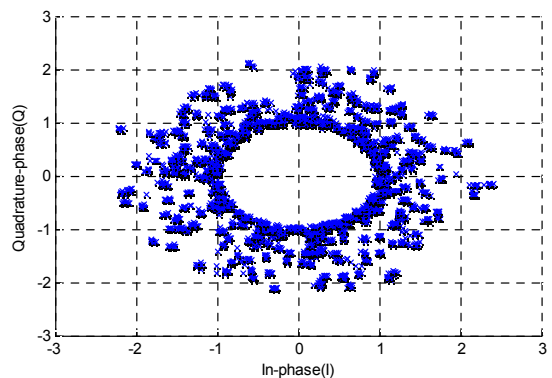
(a) 주파수 오프셋이 없는 경우의 QAM



(b) 주파수 오프셋이 없는 경우의 VSB



(c) 1%의 주파수 오프셋이 있는 경우의 QAM



(d) 1%의 주파수 오프셋이 있는 경우의 VSB

그림 3. 주파수 오프셋이 존재하는 경우 QAM과 VSB의 신호배열의 차이

Fig. 3. A difference between QAM constellation and VSB constellation with frequency offset

없이 광범위하게 신호가 퍼져 있음을 확인 할 수 있다. 그러므로 VSB 변조된 수신신호의 위상을 보정하지 않고 반송파 주파수 및 위상 오차 복구에 이용하게 되면 성능 열화를 유발하게 된다.

VSB변조된 신호의 위상오차 보정은 잡음이 존재하지 않는 이상적인 전송 시스템에서 수신된 PN심볼의 진폭과 위상 값을 알고 있다고 가정하고, 일반적으로 수신되는 잡음이 섞인 신호에서 알고 있다고 가정한 이상적인 전송 시스템에서 수신된 신호의 진폭을 나누고, 위상을 빼주는 과정을 통하여 수행하게 되며, 식 (1)과 7같이 쓸 수 있다.

$$z(i) = p(i) \times \frac{1}{|r(i)|} \times e^{(-j \times \arg(r(i)))}$$

$$\left(\text{단, } i = \frac{k-1}{2} + 1, \dots, N - \frac{k-1}{2} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서 $z(i)$ 는 위상이 보정된 PN심볼, $p(i)$ 는 위상이 보정되기 이전에 수신된 PN심볼, $r(i)$ 는 알고 있다고 가정하는 이상적인 전송 시스템에서 수신된 PN심볼, N은 PN심볼의 개수, k는 힐버트 필터의 탭수를 나타낸다. 그리고 힐버트 필터의 탭 수에 따라 이상적인 전송시스템에서 예측할 수 있는 심볼의 개수가 변하게 되므로 수신된 모든 PN심볼을 사용하지 않고 정확하게 예측 가능한 $(k-1)/2+1 \sim N-(k-1)/2-1$ 구간에 존재하는 PN심볼만을 위상 보정 과정

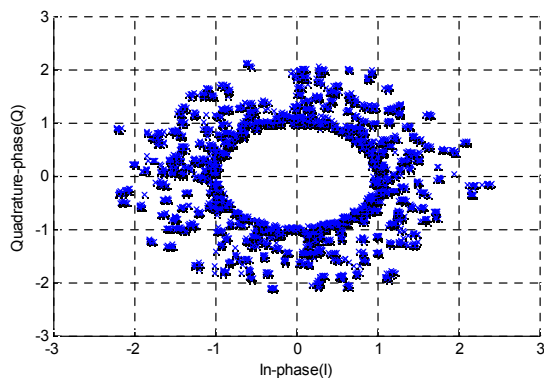
에서 사용하게 되며, 보정된 $N-(k-1)$ 개의 심볼만을 이용하여 거친 반송파 주파수 오차를 복구하게 된다. 예를 들어 420개의 심볼을 가진 PN 블록과 65탭을 가진 힐버트 필터를 이용하였다면, 처음의 32개 $((65-1)/2)$ 와 마지막의 32개 $((65-1)/2)$ 를 제외한 356개의 PN심볼을 이용하게 되는 것이다. 위상 보정 과정을 거친 VSB변조된 신호는 그림 4의 (b)와 같이 마치 QAM 변조된 신호처럼 보이게 되며, 시스템의 성능 향상에 기여하게 된다.

2. 반송파 주파수 복구 방식

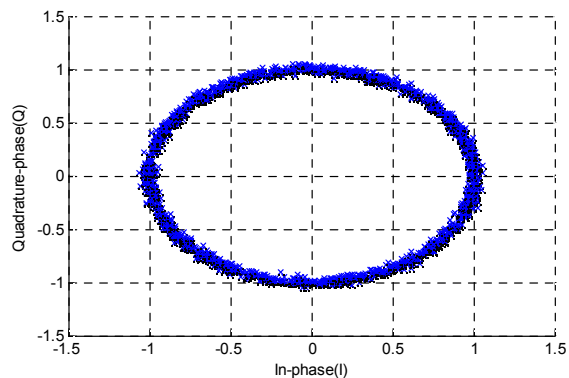
수정된 ATSC 전송 시스템의 반송파 주파수 복구방식은 거친 반송파 주파수 오차 복구부와 미세 반송파 주파수 오차 복구부가 연동되는 구조를 제안한다. 거친 반송파 주파수 오차 복구부를 통하여 거친 반송파 주파수 옵셋을 대략적으로 복구하고, 미세 반송파 주파수 오차 복구부를 통하여 거친 반송파 주파수 옵셋 복구 과정에서 복구되지 않은 미세주파수 옵셋에 대한 복구를 수행하게 된다. 그림 5는 본 논문에서 제안하는 반송파 주파수 옵셋 복구 방식을 나타낸다.

2.1 거친 반송파 주파수 복구 알고리즘

지상파 전송 방식의 경우 심볼 속도 대비 최대 1%의 반송파 주파수 오차를 추정할 수 있어야 하며, 높은 정확성을



(a) 1%의 주파수 옵셋을 가진 VSB 변조된 신호(보정전)



(b) 1%의 주파수 옵셋을 가진 VSB 변조된 신호(보정후)

그림 4. 1% 주파수 옵셋을 가진 VSB 변조된 신호의 위상 보정 전후 성능상 차이
Fig. 4. A constellation of VSB modulated signal with 1% frequency offset

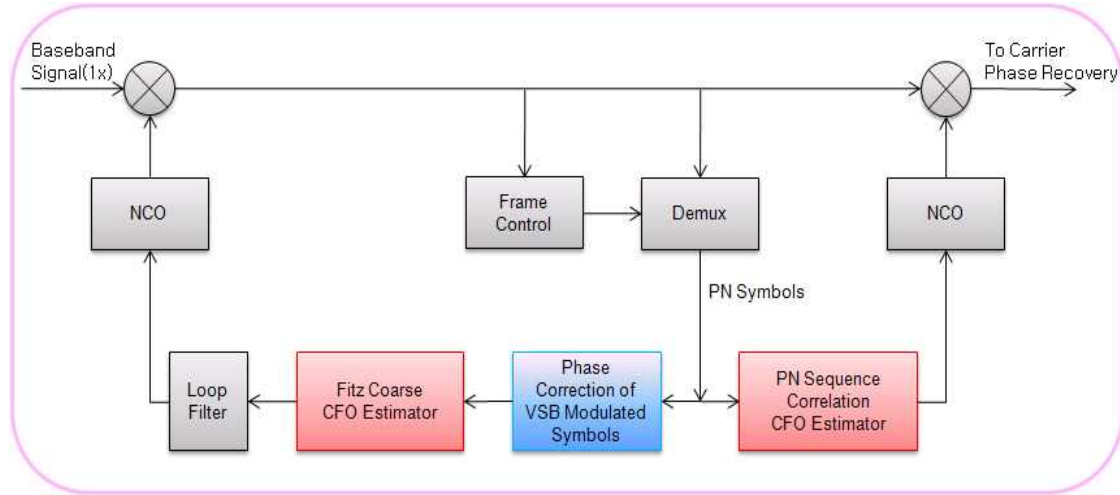


그림 5. 반송파 주파수 복구 방식
Fig. 5. Carrier Frequency Recovery Scheme

가져야 한다. 심볼 속도 대비 1% 이상의 반송파 주파수 오차를 추정 할 수 있는 알고리즘으로는 Data-aided 주파수 추정 방식으로 Kay 알고리즘 [10], L&W 알고리즘 [11], L&R 알고리즘 [12], M&M 알고리즘 [13], Fitz 알고리즘 등이 있다. 본 논문에서는 다양한 알고리즘 중 Fitz 알고리즘을 거친 반송파 주파수 오프셋 추정 알고리즘으로 결정하였다. 그 근거는 다음과 같다.

표 1은 가능한 반송파 주파수 오차 추정 알고리즘들의

구조와 식을 정리한 것이다. 각 식에서 사용된 변수 \hat{f} 은 추정된 반송파 주파수 오차, $z(k)$ 는 수신된 신호의 PN심볼, $w(k)$ 와 $w(m)$ 은 가중지수, L_0 는 프레임에 존재하는 수신된 심볼의 수, N 은 탭수를 의미한다. 본 논문에서는 수신된 신호의 PN심볼 ($z(k)$)로 VSB 변조된 신호의 위상 보정 알고리즘을 통해 위상이 보정된 PN 심볼을 이용하게 된다.

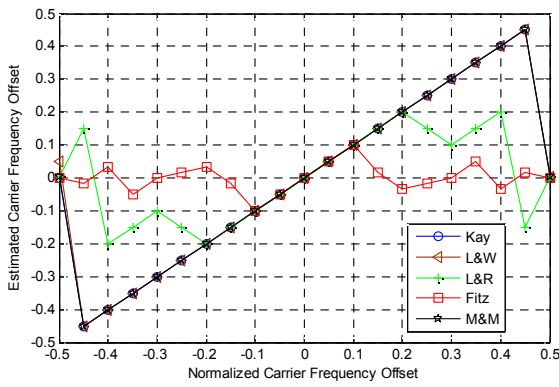
표 1. 주파수 오프셋 추정 알고리즘들
Table 1. The frequency offset estimator algorithm

알고리즘 종류	알고리즘의 구조	주파수 오프셋 추정 식
Kay		$\hat{f} \approx \frac{1}{2\pi T} \sum_{k=1}^{L_0-1} w(k) \times \arg \{ z(k) \times z^*(k-1) \}$ $w(k) = \frac{3}{2} \frac{L_0}{L_0^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{2k - L_0}{L_0} \right)^2 \right]$ <p>Where L_0 is the number of PN symbols $w(k)$ is weighted factor</p>
L&W		$\hat{f} \approx \frac{1}{2\pi T} \arg \left\{ \sum_{k=1}^{L_0-1} w(k) \times \{ z(k) \times z^*(k-1) \} \right\}$ <p>where</p> $w(k) = \frac{6k(L_0 - k)}{L_0(L_0^2 - 1)}$

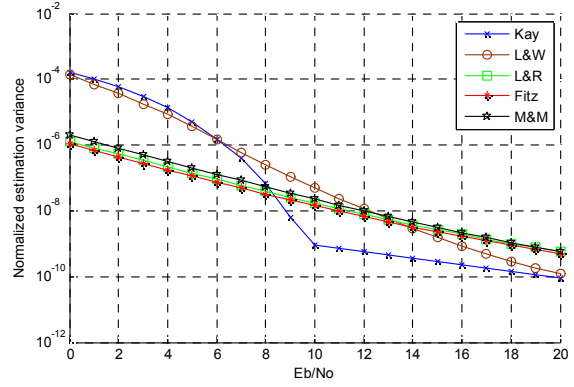
<p>L&R</p>		$\hat{f} \approx \frac{2}{2\pi T(N+1)} \arg \left\{ \sum_{m=1}^N R(m) \right\}$ <p>where</p> $R(m) = \frac{1}{L_0 - m} \sum_{k=m}^{L_0-1} z(k) \times z^*(k-m)$
<p>Fitz</p>		$\hat{f} \approx \sum_{m=1}^N w(m) \times \arg \{ R(m) \}$ <p>where</p> $R(m) = \sum_{k=m}^{L_0-1} z(k) \times z^*(k-m) \quad (m \geq 1)$ $w(m) = \frac{6m}{N(N+1)(2N+1)}$
<p>M&M</p>		$\hat{f} \approx \frac{1}{2\pi T} \sum_{m=1}^N w(m) \times \arg [R(m) \times R^*(m-1)]$ <p>where</p> $R(m) = \frac{1}{L_0 - m} \sum_{k=m}^{L_0-1} z(k) \times z^*(k-m)$ $w(m) = 3 \cdot \frac{[(L_0 - m)(L_0 - m + 1) - N(L_0 - N)]}{N(4N^2 - 6NL_0 + 3L_0^2 - 1)}$

그림 6의 (a)는 가능한 반송파 주파수 옵셋 추정 알고리즘들의 심볼 속도 대비 정규화된 추정범위를 보여주며, 그림 6의 (b)는 심볼 속도 대비 1%의 반송파 주파수 옵셋이 존재하는 경우 가능한 주파수 옵셋 추정 알고리즘들의 분산 특성을 보여주고 있다. L&R, Fitz, M&M 알고리즘의 샘플 수 N은 4로 일정하게 하였다. 추정범위만을 살펴보면,

L&W 알고리즘의 추정가능 범위가 가장 넓고, M&M, Kay, L&R, Fitz 알고리즘 순으로 추정 가능 범위가 줄어든다. 분산성능은 Kay와 L&W 알고리즘의 경우 Eb/No 값이 낮을 때와 높을 때 급격한 성능 차이를 보이고 있고, L&R, Fitz, M&M 알고리즘은 상대적으로 완만하게 성능이 변한다. 완만하게 변하는 알고리즘들 중에 가장 분산 성능이 좋은 알



(a) 추정범위



(b) 분산

그림 6. 반송파 주파수 오프셋 추정 알고리즘들의 성능 비교
Fig. 6. A comparison of a carrier frequency offset estimator performance

고리즘은 Fitz 알고리즘임을 확인 할 수 있다.

표 2는 표 1에서 보여주었던, 식을 바탕으로 하드웨어 복잡성을 분석해본 결과이다. 표 2의 결과는 반송파 주파수 오프셋을 한번 추정하는데 필요한 계산량을 나타낸다. 곱셈 연산은 Kay 알고리즘과 L&W 알고리즘이 가장 적게 나타났고, 아크탄젠트 연산은 L&W 알고리즘과 L&R 알고리즘이 적게 나타났다. 전체 계산량은 L&W 알고리즘이 가장 적었고, 다음이 Kay 알고리즘 그리고 L&R, Fitz, M&M 알

고리즘은 거의 비슷한 값을 보였다. 추정범위, 분산, 하드웨어 복잡성을 종합해 보았을 때 Kay알고리즘과 L&W알고리즘은 계산량은 적었지만 분산성능이 좋지 않아 정확성이 떨어진다고 판단되었다. 그리고 L&R, Fitz, M&M 알고리즘은 비슷한 성능을 가지며, 모두 심볼 속도 대비 1%의 주파수 오프셋 추정이 가능하므로 그 중에서 가장 분산 성능이 좋은 Fitz 알고리즘을 거친 반송파 주파수 복구부의 주파수 오프셋 추정 알고리즘으로 선택하였다.

표 2. 반송파 주파수 오프셋 추정 알고리즘의 하드웨어 복잡성 비교
Table 2. A comparison of hardware complexity of a carrier frequency offset estimator

Estimator	Multiplications	Arc-Tangent Operations
Kay	710	355
L&W	710	1
L&R(N=4)	1419	1
Fitz(N=4)	1418	4
M&M(N=4)	1426	4

2.2 미세 반송파 주파수 복구 알고리즘

거친 반송파 주파수 오프셋 복구 후엔 미세 잔류 주파수 오차가 존재한다. 미세 잔류 주파수 오차의 복구는 그림 7에 나타난 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘을 이용하였다. 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘은 현재 PN심볼과 이전 PN심볼 사이의 위상차를 구하고, 위상차의 평균값을 이용하여 반송파 주파수 오차를 보정하는 방법이며, 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

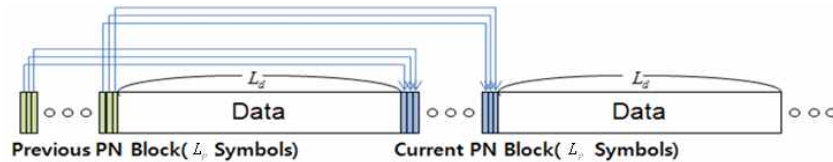


그림 7. 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘
Fig. 7. A simple PN symbols block correlation algorithm

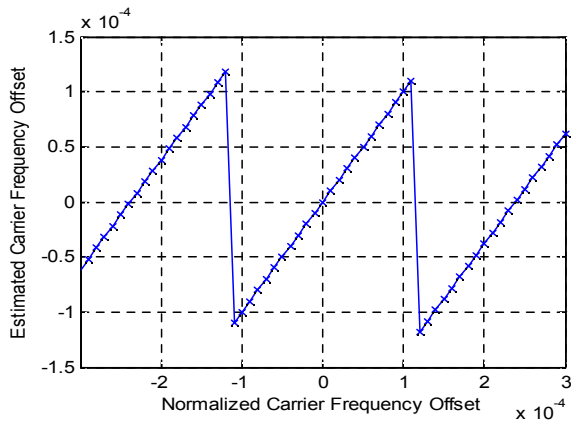
$$\hat{f} = \frac{1}{L_d + L_p} \arg \left(\frac{1}{L_p} \sum_{k=1}^{L_p} P_{current}(k) \times P_{previous}^*(k) \right) \quad (2)$$

여기서 L_d 는 데이터의 심볼수를 L_p 는 PN의 심볼수를 나타내고, $P_{current}$ 는 현재 PN 심볼 블록이고, $P_{previous}$ 는 이전 PN 심볼 블록을 나타낸다. 이 방식은 이전과 현재 PN 심볼 블록의 L_p 개의 PN 심볼 간에 상관을 구하고 $L_d + L_p$ 로 표현되는 프레임 길이를 나누는 과정을 통하여 주파수 오프셋을 추정하는 방식이다. $L_d + L_p$ 로 표현되는 프레임 길이를 역수한 것보다 미세 주파수 오프셋이 큰 경우에는 오프셋 추정이 잘못 될 수 있다. 그림 8의 (a)는 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘의 반송파 주파수 추정범위를 나타내고, (b)는 거친 반송파 주파수 복구후 남아 있는 미세 반송파

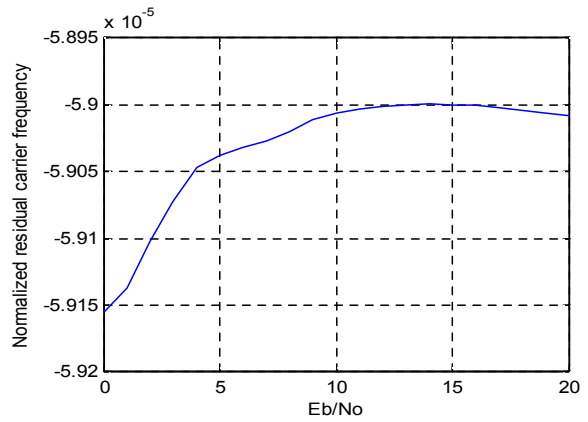
주파수를 보여주고 있다. 그림 8에서 보여진 것과 같이 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘의 경우 약 $-1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$ 범위의 미세 반송파 주파수 오차 추정이 가능하며, 거친 반송파 주파수 오차 복구 이후에 대부분의 주파수 오차가 사라지고 약 -5.9×10^{-5} 가량의 아주 미세한 주파수 오차만이 존재하게 되므로 아무런 문제 없이 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘을 사용 할 수 있다.

3. 위상 오차 복구 알고리즘

반송파 주파수 오차에 대한 복구가 끝나면 위상 오차가 존재하게 된다. 위상오차 복구는 그림 9에 나타난 알고리즘을 통해 수행된다. 일반적인 위상 오차는 식 (3)과 같이 반



(a) 간단한 PN 심볼 블록 알고리즘의 주파수 추정 범위



(b) 거친 반송파 주파수 복구 후 남은 미세 반송파 주파수

그림 8. 미세 반송파 주파수 오프셋 추정 알고리즘의 추정 범위와 거친 반송파 주파수 복구 후 남은 미세 반송파 주파수
 Fig. 8. Fine frequency offset estimating range and Normalized residual carrier frequency after coarse CFO recovery

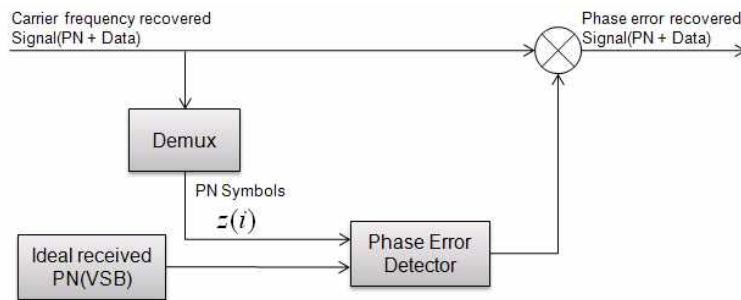


그림 9. 위상 오차 복구 알고리즘
 Fig. 9. A phase error recovery algorithm

송파 주파수 오차가 복구된 신호와 로컬 PN심볼 간의 복소수 곱셈 연산을 실시하고, 평균 위상 오차를 구하여 복구하게 된다. 여기서 로컬 PN심볼은 위상 오차를 구하기 위한 기준값으로 사용되었다. 이상적인 전송 시스템에서 수신된 QAM 변조된 PN심볼은 0 또는 π 의 고정된 위상 값을 가지며, 평균 위상 오차가 0 이므로 위의 방법으로 위상 오차복구가 가능하다. 그러나 이상적인 전송 시스템에서 수신된 VSB변조된 PN심볼은 고정되지 않은 위상 값을 가지며, 평균 위상이 0에서 α 만큼 벗어난 값을 가지게 된다. 그러므로 0 또는 π 의 고정된 위상 값을 가지는 로컬 PN심볼을 기준으로 정하고, 식(3)과 같은 과정으로 위상오차 복구를 수행하게 되면 α 만큼의 오차가 보정되지 않고 남아있게 된다. α 값은 아주 작은 값으로, 잡음이 적은 경우에는 크게 영향을 주지 못하지만 잡음이 많은 경우에는 성능 열화를 일으키는 원인이 된다. 따라서 식 (4)와 같이 이상적인 전송 시스템에서 수신된 VSB변조된 PN심볼의 평균 위상을 구

하여 α 값을 찾고, 식 (3)의 결과에서 보상해 주면 위상 오차를 복구 할 수 있게 된다.

$$\theta_r = \frac{1}{L_p} \sum_{i=1}^{L_p} \arg\{z(i) \times PN_{Local}^*(i)\} \quad (3)$$

$$\theta_{ideal} = \frac{1}{L_p} \sum_{i=1}^{L_p} \arg\{PN_{r_ideal}(i)\} \quad (4)$$

$$\hat{\theta} = \theta_r - \theta_{ideal} \quad (5)$$

여기서 θ_r 은 반송파 주파수 오차 복구 후 수신된 PN심볼의 평균 위상오차, θ_{ideal} 는 이상적인 전송시스템에서 수신된 PN심볼의 평균 위상오차, $z(i)$ 는 반송파 주파수 오차가 복구된 PN심볼, PN_{Local} 은 BPSK 변조된 로컬 PN심볼, PN_{r_ideal} 는 이상적인 전송 시스템에서 수신된 VSB변조

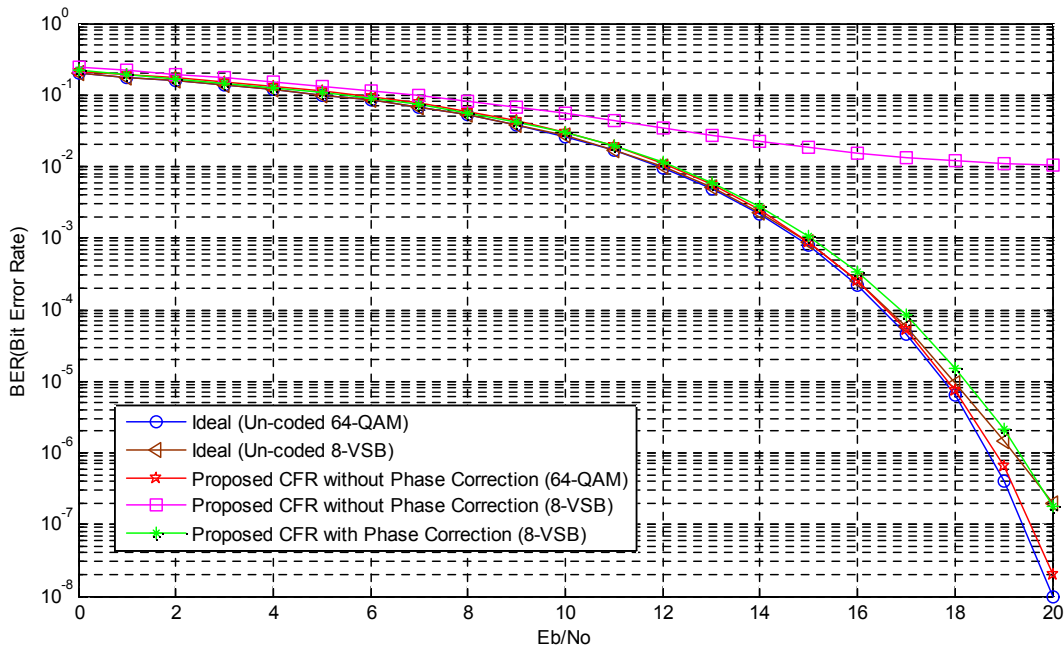


그림 10. BER 성능 비교
Fig. 10. BER performance

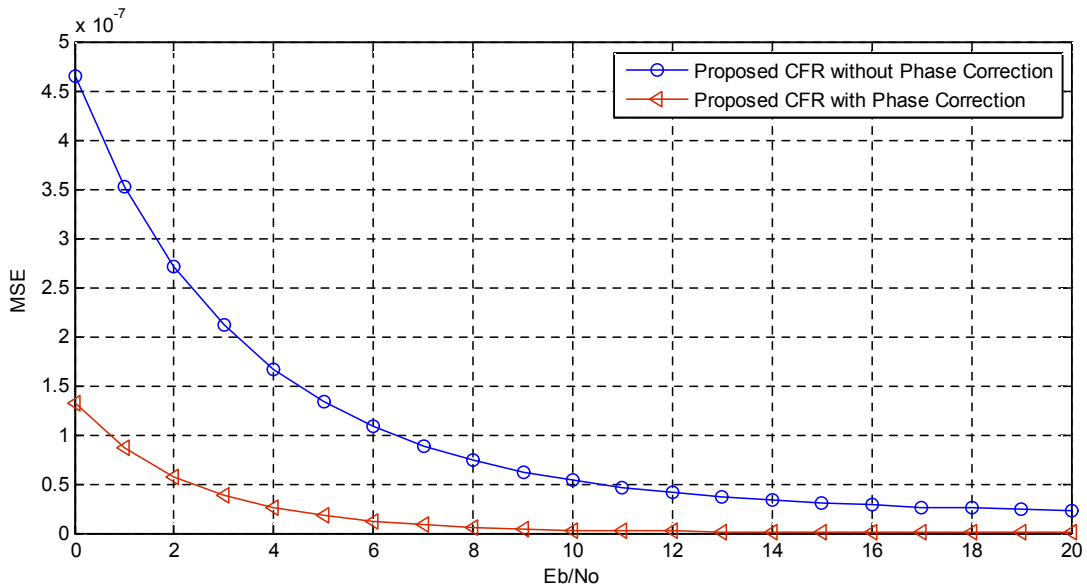


그림 11. 주파수 추정 오차
Fig. 11. The mean square estimation error

된 PN심볼을 의미한다. QAM 변조방식의 경우 이상적인 전송시스템에서 θ_{ideal} 는 0의 값을 가지게 되므로, 단순히 θ_r 만을 이용하여 위상오차를 복구 할 수 있다. 반면, VSB 변조방식의 경우 앞서 소개했듯이, 이상적인 상황에서도 θ_{ideal} 값이 0이 아니므로 이 방법을 사용하면 효율적인 위상오차 복구가 가능하다.

III. 모의실험

제안된 방식을 이용하여 모의실험을 실시하였다. 모의실험은 이상적인 프레임 동기화 및 심볼 타이밍 동기화에 대해서 가정하고, AWGN 채널 하에서 단일 반송파 시스템에 대해서 이루어졌다. 수정된 ATSC 시스템에서 채택할 것으로 보이는 프레임헤드 (PN심볼)와 데이터가 연속되는 프레임 구조를 이용하였다. 프레임헤드에는 455개의 심볼로 이루어진 PN455를 사용하고 데이터의 길이는 4096심볼로 가정하였고, 변조 방식으로는 8-VSB와 64-QAM 방식에 대해서 비부호화 비트 오류율을 측정하였다. 그리고 거친 반송파 주파수 복구 방식에서 사용된 Fitz 알고리즘의 N값은 모

든 시뮬레이션에서 동일하게 4로 하였다. 그림 10은 모의실험 결과를 보여주고 있다. 8-VSB 변조방식을 사용한 시스템과 64-QAM 변조방식을 사용한 시스템에 대해 본 논문에서 제안한 방식을 적용하였을 때 이상적인 경우와 거의 비슷한 BER 성능을 가진다는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 11에 제시된 반송파 주파수 추정 오차 비교를 통하여 위상 보정을 실시했을 때와 그렇지 않았을 때의 확인한 성능 차이를 확인 할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 최근 들어 주목 받고 있는 3D HDTV 전송을 위해 제안된 수정된 ATSC 시스템에 적용 가능한 견고한 반송파 주파수 복구 방식에 대하여 제안하였다. 제안된 방식은 거친 반송파 주파수 오차 복구부에 Fitz 알고리즘을 이용하였고, 미세 반송파 주파수 오차 복구부에 간단한 PN심볼 블록 상관 알고리즘을 이용하였다. 그리고 진폭만을 이용하여 변조하는 VSB 변조 방식의 경우 심볼 정보가 동위상 채널에만 존재하고, 직교위상 채널은 단지 동기

상 채널의 정보를 힐버트 변환하여 생성한 값에 지나지 않으므로 진폭과 위상으로 이루어진 고정된 배열을 가지지 못하고 신호가 흔들리게 된다. 이를 해결하기 위하여 이상적인 송수신 시스템에서 수신된 신호를 이용한 위상 오차 보정 과정을 수행하게 되고, 이 과정을 통하여 시스템의 성능을 향상 시킬 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] 한국정보통신기술협회, <http://www.tta.or.kr>
- [2] 3DTV 방송 진흥센터, <http://www.3dtvkorea.or.kr>
- [3] ATSC A/53, ATSC digital television standard, Sep. 1995.
- [4] ATSC A/54, Guide to the use of the ATSC digital television standard, Sep. 1995.
- [5] 오종규, 김준태, "지상파 3D HDTV 전송을 위한 ATSC 전송 시스템의 확장 및 수정에 관한 연구," 방송공학회 논문지, 제 15권 제 5호, pp.681-696, 2010년 9월.
- [6] 오종규, 김준태, "지상파 3D HDTV 전송을 위한 수정된 ATSC 전송 시스템의 프레임 구조에 관한 연구," 방송공학회 논문지, 제 15권 제 6호, pp. 803-813, 2010년 11월.
- [7] M. P. Fitz, "Further Results in the Fast Estimation of a Single Frequency," in IEEE Trans. Communications, vol. 42. No. 2/3/4/, pp. 862-864, Feb./Mar./Apr. 1994.
- [8] Alan Barieri and Giulio Colavolpe, "On Pilot-Symbol-Assisted Carrier Synchronization for DVB-S2 Systems," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 53, No. 3, September 2007.
- [9] K. J. Kerpez, "A Comparison of QAM and VSB for Hybrid Fiber/Coax Digital Transmission," in IEEE Trans. Broadcasting., vol. 41, No. 1, pp. 9-16, Mar. 1995.
- [10] S. Kay, "A Fast and Accurate Single Frequency Estimator," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, ASSP-37, 1987-1990, Dec. 1989
- [11] B. C. Lovell and R. C. Williamson, "The statistical performance of some instantaneous frequency estimators." IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 40, pp. 1708-1723, July 1992.
- [12] M. Luise and R. Reggiannini, "Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst-mode transmissions, " IEEE Trans. Communications., vol. 43. No. 2/3/4, pp. 1169-1178, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [13] M. Morelli and U. Mengali, "Feedforward frequency estimation for PSK: a tutorial review," European Trans. Telecomm., vol. 9, pp.103-116, Mar./Apr. 1998.

저 자 소 개



전 영 곤

- 2010년 : 건국대학교 전자공학과 학사과정 졸업
- 2010년 ~ 현재 : 건국대학교 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 차세대 방송통신 시스템, 반송파 주파수 동기



김 준 태

- 1990년 : 한국과학기술원 학사과정 졸업
- 1993년 : 한국과학기술원 석사과정 졸업
- 1998년 : 한국과학기술원 박사과정 졸업
- 1998년 ~ 2003년 : LG전자 DTV 연구소 책임연구원
- 2003년 ~ 현재 : 건국대학교 전자공학부 부교수
- 주관심분야 : 차세대 방송통신 융합, 위성 및 이동통신, 통신시스템 설계