

차세대 디지털 방송시스템을 위한 소수배 주파수 오프셋 추정

김호재*, 강인웅*, 서재현**, 김흥목**, 김형남^o

Estimation of Fractional Frequency Offset for the Next-Generation Digital Broadcasting System

Ho Jae Kim*, In-Woong Kang*, Jae Hyun Seo**, Heung Mook Kim**, Hyoung-Nam Kim^o

요약

HDTV(High definition TV)보다 크게 개선된 UHDTV(Ultra High Definition TV) 방송이 차세대 방송 서비스로 주목받고 있다. UHD의 상용화를 위해 DVB(Digital Video Broadcasting)와 ATSC(Advanced Television Systems Committee)등의 표준화 기구들이 대부분 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 차세대 방송시스템의 전송 표준으로 채택하고 있다. OFDM은 송신단과 수신단의 반송파 주파수가 일치하지 않으면 직교성이 파괴되므로, 주파수 오프셋 추정을 통해 OFDM의 직교성을 유지한다. 그러나, 차세대 지상파 방송시스템에서는 이와 같은 주파수 오프셋 추정 방법과 관련해서 구체적인 방법들이 제시된 경우가 많지 않다. 이에 따라서, 본 논문은 차세대 방송시스템 표준의 하나인 ATSC 3.0 시스템의 부트스트랩을 이용한 소수배 주파수 오프셋 추정 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서는 소수배 주파수 오프셋 추정이 불가능한 기존 ATSC 3.0 검출기에 복소켈레의 곱을 추가하여 소수배 주파수 오프셋 추정이 가능하도록 하였다.

Key Words : ATSC 3.0, OFDM, time offset, frequency offset, synchronization

ABSTRACT

Ultra High Definition Television (UHDTV) has attracted much attention as one of next generation broadcasting services. For the commercialization of UHD broadcasting service, standardization groups including the DVB (Digital Video Broadcasting) and the ATSC (Advanced Television Systems Committee) have decided to adopt the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for signal transmission. However, when the carrier frequency is not properly synchronized at the receiver, inter-symbol interference (ISI) and inter-carrier interference (ICI) may occur. In order to avoid performance degradation resulting from ISI or ICI, receivers should synchronize the carrier frequency by using preambles and pilot symbols. However, there only few published literature dealing with the frequency offset estimation methods regarding the next generation terrestrial broadcasting. In this respect, this paper proposes a method to estimate timing and fractional frequency offset for the ATSC 3.0 system by using a preamble bootstrap symbol. The proposed detector can detect the fractional frequency offset by adding a complex conjugate product on the conventional estimator where only timing offset can be estimated.

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구원진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [R0101-16-0294, 융합형 실감방송 서비스 및 전송 기술 개발]

♦ First Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, kkhjj007@pusan.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Pusan National University, hnkim@pusan.ac.kr, 중신회원

* Pusan National University Department of Electrical and Computer Engineering, helaman88@pusan.ac.kr

** 한국전자통신연구원 미디어주파수공유·응용연구실, {jhseo, hmkim}@etri.re.kr

논문번호 : KICS2016-09-244, Received September 5, 2016; Revised November 2, 2016; Accepted November 22, 2016

I. 서 론

디지털 기술 및 통신 기술이 발전하면서 다양한 방송 매체들의 디지털화가 이루어지고, 디지털 방송에 대한 보급 및 수요가 증가하고 있다^{1,2)}. 이에 따라 여러 국가에서 HDTV (High Definition TV)급 대비 4배에서 16배 향상된 해상도의 선명한 초고화질 영상과 다채널 오디오로 사실감과 현장감을 체험할 수 있는 UHD TV(Ultra High Definition TV) 실감방송이 차세대 방송 서비스로 관심을 받고 있다^{1,2)}.

UHD 방송서비스의 상용화를 위해 DVB(Digital Video Broadcasting)와 ATSC(Advanced Television Systems Committee)를 비롯한 방송 표준화 기구에서는 차세대 방송을 위한 표준 연구가 활발히 진행되고 있다. DVB에서는 이미 DVB-T2(Second Generation Terrestrial) 전송 방식의 표준을 제정하였고³⁾, ATSC에서도 차세대 방송을 위하여 2016년 3월 프레임의 가장 앞에 존재하며 수신기의 신호 수집 및 동기화에 사용되는 부트스트랩(Bootstrap) 심볼이 ATSC 3.0 표준으로 채택되었고⁴⁾, 이후 2016년 9월 ATSC 3.0 최종 물리계층 표준 채택을 완료하였다⁴⁾.

현재 널리 사용되는 지상파 방송시스템들은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 전송방식의 표준으로 채택하여 사용하고 있으며 DVB-T2와 ATSC 3.0에서도 OFDM 기반의 물리계층을 사용한다³⁻⁵⁾. 주파수의 직교성을 이용한 OFDM 시스템의 장점을 극대화하기 위하여 수신기에서는 OFDM 신호에 대한 시간 및 주파수 동기를 맞추어야 한다. OFDM 시스템에서 시간 추정이 정확하지 않으면 ISI(Inter-symbol Interference)가 발생하며 주파수 영역에서 위상 오프셋으로 나타난다. 뿐만 아니라, 단일 반송파와 달리 주파수 오프셋의 추정 또한 정확하지 않으면 ICI(Inter-carrier Interference)가 생기며, 이와 같은 주파수 오차는 시간 영역에서 위상 오프셋으로 나타난다^{6,8,17)}. 특히 OFDM 시스템의 부 반송파의 수가 많아질수록 ICI에 따른 성능 열화가 커지게 되는데, 8K 또는 16K 개와 같이 큰 수의 부 반송파가 사용되고 있는 지상파 방송시스템은 더욱 큰 ICI에 의한 심각한 신호 왜곡이 발생할 수 있다. 이와 같이 시간 및 주파수 동기를 획득하지 못하여 발생하는 ISI, ICI는 OFDM의 직교성을 훼손하여 심각한 수신 성능의 열화를 초래한다^{6,8,17)}.

OFDM 신호의 직교성을 유지하기 위해서 시간 오프셋과 주파수 오프셋의 추정이 필요하다. 이러한 오프셋을 추정하기 위해 방송시스템은 프리앰블과 파일

럿을 삽입하여 오프셋을 추정하고 이를 보상한다. 프리앰블은 방송시스템에서 프레임 가장 앞부분에 존재하며, 프리앰블을 이용하여 오프셋을 추정하기 위해 프리앰블을 timing metric이라는 상관 함수에 입력하여 최대 지점을 찾아 시간 오프셋을 추정하고, 최대 지점에서 위상을 구해 소수배 주파수 오프셋을 추정한다⁷⁾. 주요 방송시스템의 프리앰블 역할을 하는 심볼로는 DVB-T2 시스템의 P1 심볼³⁾, ATSC 3.0 시스템의 부트스트랩이 있다⁴⁾. 파일럿은 주파수 영역 부 반송파에 일정한 패턴으로 배치된 심볼이다. 파일럿 심볼에는 연속 파일럿(continual pilot, CP)과 분산 파일럿(scattered pilot, SP) 등이 있으며 주파수 영역에서 파일럿의 상관을 이용하여 정수배 주파수 오프셋 추정을 하고 시변 채널 상황에서 약간씩 남아있는 나머지 소수배 주파수 오프셋을 추정한다⁹⁻¹¹⁾. 또한 채널 응답을 추정하고 미세한 시간 오프셋을 검출한다^{9,10)}. 차세대 방송 시스템 표준 중 하나인 ATSC 3.0 시스템 또한 OFDM 전송 시스템을 사용하기 때문에 오프셋 추정이 필요하며, 프리앰블 역할을 하는 부트스트랩 심볼은 시간 오프셋과 소수배 주파수 오프셋 추정이 필요하다. 그러나 아직 부트스트랩을 이용한 소수배 주파수 오프셋 추정 방법에 대해서는 제시된 바가 없다.

본 논문에서는 DVB-T2 시스템의 P1 심볼에 사용되는 이중 상관 검출기¹¹⁾를 기반으로 ATSC 3.0 시스템의 부트스트랩에 사용될 수 있는 형태의 이중 상관 검출기를 제안한다. 기존에 부트스트랩을 이용하여 심볼 타이밍 오프셋을 추정하는 검출기¹²⁾가 제안되었으나 ATSC 3.0 시스템의 부트스트랩은 보호 구간(Guard Interval, GI)의 주파수 천이 방법이 P1 심볼과 다른 구조이다. 이로 인해 DVB-T2 시스템의 P1 심볼에 사용되는 이중 상관 검출기와 유사한 형태로 이중 상관 검출기를 설계한 기존 검출기는 주파수 천이 과정에서 원하지 않는 위상이 추가되기 때문에 위상을 이용하여 구하는 소수배 주파수 오프셋에 대해서는 원하는 정도의 정확도로 추정이 이루어지지 않는다. 이를 해결하기 위해서 제안하는 방법에서는 주파수 천이 된 부분에 복소 곱을 추가함으로써 ATSC 3.0 시스템의 수신기에서도 소수배 주파수 오프셋 추정이 가능하도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 OFDM 시스템의 오프셋 추정 방법에 관하여 설명하고, III장에서는 기존의 DVB-T2 시스템에 사용되고 있는 오프셋 추정 방법을 소개하고 이를 바탕으로 IV장에서는 ATSC 3.0의 오프셋 추정 방법을 제안하며, V장에

서는 모의실험을 통하여 SNR (Signal to Noise Ratio)에 따른 오프셋 추정 성능을 RMSE (Root Mean Square Error)로 분석하고, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM 시스템 오프셋 추정 방법

2.1 OFDM 시스템 오프셋 추정 방법

OFDM 시스템에서 오프셋은 크게 심볼 타이밍 오프셋(Symbol Timing Offset, STO)과 반송파 주파수 오프셋(Carrier Frequency Offset, CFO)으로 나뉜다^[13]. 심볼 타이밍 오프셋 혹은 시간 오프셋의 원인은 일반적으로 송신기와 수신기의 상호 시간 차이에 의해 발생하며 보호 구간 내에서 추정하지 못하면 ISI가 발생하여 직교성이 파괴된다. 심볼 타이밍 오프셋 문제를 해결하기 위해 우선적으로 전체 프레임의 시작 지점을 추정한다. 이후 무선 채널 경로에 의하여 수 샘플 정도의 오프셋이 발생하는데, 이는 연속적으로 들어오는 프레임마다 심볼 타이밍 오프셋을 추정하여 더 정확한 오프셋을 추정한다^[13].

반송파 주파수 오프셋의 원인은 두 가지 경우가 있다. 첫째는 송신기와 수신기의 반송파를 발생시키는 오실레이터의 주파수 차이에 의하여 오프셋이 발생하는 경우이고, 둘째는 수신기의 이동에 따른 도플러 효과에 의하여 관측한 반송파 주파수가 실제 주파수와 달라진 경우이다. 이와 같은 반송파 주파수 오프셋을 추정하지 못할 경우 ICI가 발생하여 직교성이 파괴된다. 이렇게 발생한 주파수 오프셋은 그림 1에서의 f_{offset} 으로 나타낼 수 있고, 이는 송신단 반송파 주파수 f_c 와 수신단 반송파 주파수 f'_c 의 차 $f_{offset} = f_c - f'_c$ 로 나타낸다. 이렇게 발생한 반송파 주파수 오프셋은 식 (1)과 같이 부 반송파 간격에 따라 정규화된 주파수 오프셋 ϵ 으로 나타낸다.^[6]

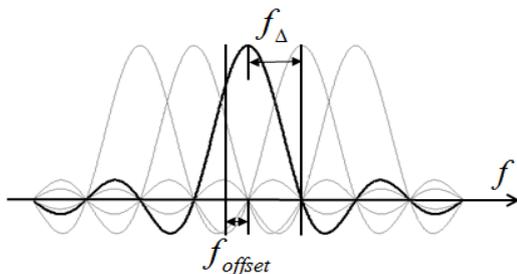


그림 1. 반송파 주파수 오프셋
Fig. 1. Carrier frequency offset

$$\epsilon = \frac{f_{offset}}{f_{\Delta}} \quad (1)$$

식 (1)과 그림 1에서 f_{Δ} 는 부 반송파 간격을 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 반송파 주파수 오프셋은 FFT(Fast Fourier Transform) 출력 신호에서 식 (1)과 같이 부 반송파 간격에 정규화된 값으로 표현되고, 이는 부반송파 간격의 정수배로 나타낼 수 있는 정수배 주파수 오프셋(Integer Frequency Offset)과 정수배로 나타낼 수 없는 소수배 주파수 오프셋(Fractional Frequency Offset)으로 나누어지며 반송파 주파수 오프셋을 추정할 때도 각각에 대해서 다른 방법을 통해서 이루어지는 경우가 대부분이다^[6,13]. 프리앰블을 이용한 오프셋 추정법은 먼저 심볼 타이밍 오프셋을 추정 후 그 시간에서 소수배 주파수 오프셋을 추정하는 방법으로 구성된다.

2.1.1 심볼 타이밍 오프셋 추정 방법

먼저 송신단에서 만든 OFDM 신호를 수신단에서 받은 파형은 아래 식과 같다.

$$r_n = y_n e^{j2\pi\epsilon n/N} + w_n = y_n e^{j\phi n/N} + w_n, \quad (2)$$

여기서 r_n 은 수신 신호를, N 은 FFT 크기, w_n 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 특성을 가지는 잡음, y_n 은 채널을 통과한 수신 신호를 나타낸다. OFDM 시스템은 ISI 방지를 위해 심볼 앞부분에 보호 구간을 삽입한다. 부반송파 간의 직교성 유지를 위해 OFDM 심볼의 뒷부분을 보호 구간에 복사하여 사용한다^[6]. 심볼 타이밍 오프셋 추정은 OFDM 심볼의 일부와 보호 구간이 같은 점을 이용하여 식 (3)과 같이 구해지는 수신 신호의 자기상관(autocorrelation), P_n 을 사용한다^[7,13].

$$P_n = \sum_{m=0}^{N_g-1} (r_{n+m}^* r_{n+m+N}), \quad (3)$$

여기서 N_g 는 보호 구간의 길이를 나타낸다.

자기상관 출력을 정규화시키기 위해 식 (4)와 같이 받은 신호의 에너지, R_n 을 구한다.

$$R_n = \sum_{m=0}^{N_g-1} |r_{n+m+N}|^2, \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)으로 나눈 값 $M_n = |P_n|/R_n$ 을 timing metric이라 하고 이 값은 삼각파형의 형태를 갖는데^[7,13], 이 파형의 최대 지점이 심볼 타이밍 오프셋이 된다.

2.1.2 소수배 주파수 오프셋 추정 방법

앞에서 언급된 바와 같이 정규화된 주파수 오프셋은 정수 부분과 소수 부분으로 나눌 수 있다^[6]. 이를 식 (5)와 같이 정수 부분, ϵ_i 와 소수 부분, ϵ_f 로 나타내기로 한다.

$$\epsilon = \epsilon_i + \epsilon_f, \tag{5}$$

주파수 오프셋 중 소수배 주파수 오프셋은 시간 영역에서 위상 오프셋으로 나타난다. 그래서 소수배 주파수 오프셋 추정은 심볼 타이밍 오프셋을 구한 후 그 지점에서 자기상관함수의 위상을 측정하여 소수배 주파수 오프셋을 구할 수 있다. 식 (2)의 잡음이 없는 상황을 고려하여 식 (3)에 식 (2)를 대입하여 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_n &= \sum_{m=0}^{N_G-1} (r_{n+m}^* r_{n+m+N}) \\ &= e^{j\phi} \sum_{m=0}^{N_G-1} (y_{n+m}^* y_{n+m+N}), \end{aligned} \tag{6}$$

n_0 를 심볼 타이밍 오프셋이라 할 때 식 (6)의 P_{n_0} 에서 위상을 측정하면 $\phi = 2\pi\epsilon$ 을 얻을 수 있다. 측정된 위상은 $|\phi| < \pi$ 범위에서만 추정이 가능하다. 이를 식 (5)에 언급한 정규화된 주파수 오프셋을 정수 부분과 소수 부분으로 나타내면 정수 부분은 $e^{j2\pi\epsilon_i} = 1$ 이 되고 실제로 위상이 측정되는 부분은 소수 부분인 $|\epsilon_f| < 1/2$ 범위 내에서 주파수 오프셋 추정이 가능하다. 결과적으로 심볼 타이밍 오프셋이 추정된 시간에서 위상을 구하면 다음 식과 같이 정규화된 소수배 주파수 오프셋, $\hat{\epsilon}_f$ 를 다음 식 (7)과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\epsilon}_f = \frac{\arg(P_{n_0})}{2\pi} \tag{7}$$

2.2 프리앰블 구조

OFDM 시스템에서 프레임의 시작지점을 찾고 시간 및 주파수 오프셋을 추정하기 위해 설계된 심볼을

훈련 심볼(training symbol) 또는 프리앰블(preamble)이라고 한다^[7]. 이러한 목적 이외에도 프리앰블은 방송시스템마다 약간의 차이는 있지만 신호의 송신 파라미터 정보 (FFT 길이, 샘플링 주파수 등)를 포함하고 있으며 이를 수신단에 전달하는 용도로도 사용이 되고 있다. DVB-T2 시스템의 P1 심볼과 ATSC 3.0 시스템의 부트스트랩 심볼이 이와 같은 역할을 한다^[3-5].

현재 방송시스템에 사용되는 P1 심볼과 부트스트랩 심볼의 구조를 살펴보면 OFDM 심볼 양단에 보호 구간을 모두 붙인 C-A-B 구조를 사용하고 있다^[3-5]. 이러한 이유는 일반적인 OFDM 구조, 즉 데이터 일부를 보호 구간에 붙이는 구조를 사용하였을 때 출력 파형에서 오 검출, 지속과 간섭이 생겨 심볼 타이밍 오프셋을 추정하기 어렵다^[14]. 이러한 문제점을 보완하기 위해 보호 구간을 양단에 사용하고 주파수 천이를 시키는 구조를 현재 방송시스템의 프리앰블 표준으로 사용하고 있다. 이러한 C-A-B 구조를 고려하여 앞서 언급한 심볼 타이밍 오프셋과 소수배 주파수 오프셋을 추정할 수 있도록 하는 검출기의 설계가 필요하다.

III. DVB-T2 오프셋 추정 방법

DVB-T2 시스템에서는 전송 프레임의 가장 앞에 있는 프리앰블 P1 심볼을 이용하여 오프셋 추정을 한다. P1 심볼은 수신기가 DVB-T2 신호를 감지하는 데 사용되며 오프셋 추정 및 기본적인 파라미터 정보 (데이터 전송모드, 데이터 FFT 길이)를 가지고 있다^[3]. 그림 2와 같이 P1 심볼은 C-A-B 구조이며 A 구간의 길이는 $T_A = 1024 T_{P1}$, 보호 구간인 B구간의 길이는 $T_B = 482 T_{P1}$, C 구간의 길이는 $T_C = 542 T_{P1}$ 이며 각 보호 구간은 f_{SH} 만큼 주파수 천이를 시킨 형태이다. T_{P1} 은 P1 심볼의 샘플링 시간을 나타낸다.

P1 심볼의 오프셋 추정 방법은 그림 3과 같이 수신 신호를 $-f_{SH}$ 만큼 주파수 천이를 시킨 후 상단은 C-A가 같음을 이용하여 T_C 만큼의 지연을 시켜 이동 평균 필터를, 하단은 A-B가 같음을 이용하여 T_B 만큼의 지

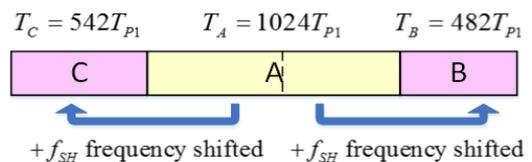


그림 2. P1 심볼 구조
Fig. 2. P1 symbol structure

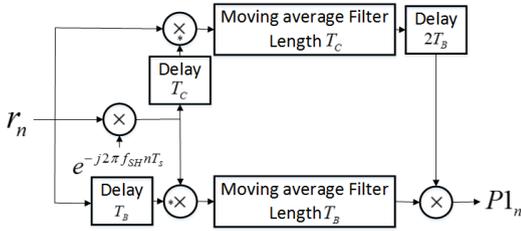


그림 3. DVB-T2 이중 상관 검출기 블록도
Fig. 3. Double correlation detector block diagram for DVB-T2

연을 시켜 이동 평균 필터를 적용한다. 이동 평균 필터의 길이는 각각의 보호 구간의 길이와 같이 적용을 하면, 각 단의 출력 파형은 삼각 파형이 나온다. 이후 각 단의 출력 파형을 맞추기 위해 상단의 출력 파형을 $2T_B$ 만큼 지연을 시켜 양 단의 출력 파형을 곱한 후 출력 파형의 최대 지점을 찾아내면 심볼 타이밍 오프셋을 추정할 수 있다¹⁵⁾. 이후 심볼 타이밍 오프셋의 위치에서 위상을 측정하면 소수배 주파수 오프셋을 추정할 수 있다. 검출기의 최종 출력에서 상단과 하단의 출력을 곱하므로 상단과 하단의 위상은 더해진다. 이때 상단의 위상은 $\phi_U = 2\pi\epsilon(T_C/T_A)$, 하단의 위상은 $\phi_L = 2\pi\epsilon(T_B/T_A)$ 이므로 검출기의 출력 위상은 두 위상의 합인 $\phi = \phi_U + \phi_L = 2\pi\epsilon$ 이 되어 주파수 오프셋 추정이 가능하다^{14,15)}. 최종적으로 그림 3의 이중 상관 검출기 출력 $P1_n$ 의 심볼 타이밍 오프셋 지점 n_0 에서 위상 값을 2π 로 나누어 DVB-T2 시스템의 정규화된 소수배 주파수 오프셋, $\hat{\epsilon}_{P1}$ 을 다음 식 (8)과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\epsilon}_{P1} = \frac{\arg(P1_{n_0})}{2\pi} \quad (8)$$

그러나 ATSC 3.0 시스템의 부트스트랩 구조는 P1 심볼과는 달리 데이터 구간의 뒷부분만 보호 구간으로 복사하고 구간 B에만 주파수 천이를 시키기 때문에 DVB-T2에서 사용되는 이중 상관 검출기와는 다른 형태의 검출기가 필요하다.

IV. 제안하는 ATSC 3.0 소수배 주파수 오프셋 추정 방법

ATSC 3.0 시스템에는 프리앰블 역할을 하는 부트스트랩 심볼이 있다. 부트스트랩은 서비스 검색 및 대

략적인 동기화, 주파수 오프셋 추정, 초기 채널 추정 등을 위해 프레임의 가장 앞부분에 위치하며 여러 개의 심볼로 이루어져 있다. 부트스트랩은 CAZAC (constant amplitude zero auto correlation) 시퀀스 중 하나인 ZC (Zadoff-Chu) 시퀀스를 사용하여 심볼을 생성한다¹⁶⁾.

부트스트랩의 첫 번째 심볼은 그림 4와 같이 C-A-B 구조로 되어 있으며 동기 검출에 사용되고,

나머지 심볼은 그림 5와 같이 B-C-A 구조를 가지며 특정 시그널링 정보 (샘플링 주파수, 대역폭, 프리앰블 구조 등)를 포함하여 전송된다¹⁶⁾. 부트스트랩의 심볼들 중 프레임 가장 앞부분에 위치한 C-A-B 구조가 프레임의 시작 지점을 검출하는 프리앰블과 같은 역할을 수행해야 하므로, 부트스트랩의 첫 번째 심볼인 C-A-B 구조를 가지는 심볼(이를 본 논문에서는 부트스트랩 C-A-B 구조라 명명함)은 프레임의 시작지점을 검출하고, 프레임의 시작지점에서 소수배 주파수 오프셋 추정이 가능해야 한다. 오프셋 추정이 가능한 검출기를 설계하기 위해 먼저 부트스트랩 C-A-B의 구조를 살펴보면, A 구간의 길이는 $T_A = 2048T_{Boot}$, 보호 구간인 B 구간의 길이는 $T_B = 504T_{Boot}$, C 구간의 길이는 $T_C = 520T_{Boot}$ 이다. T_{Boot} 는 부트스트랩 심볼의 샘플링 시간을 나타낸다. 부트스트랩 C-A-B 구조의 식은 다음과 같다.

$$S_n = \begin{cases} A_n + 1528, & 0 \leq n < 520, \\ A_n - 520, & 520 \leq n < 2568, \\ A_n - 1024e^{j2\pi f_{\Delta}nT_{Boot}}, & 2568 \leq n < 3072, \end{cases} \quad (9)$$

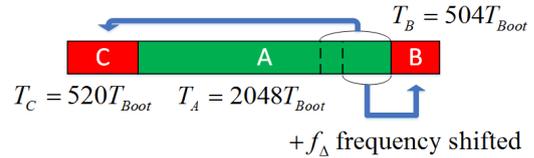


그림 4. 부트스트랩 심볼 C-A-B 구조
Fig. 4. Bootstrap symbol C-A-B structure

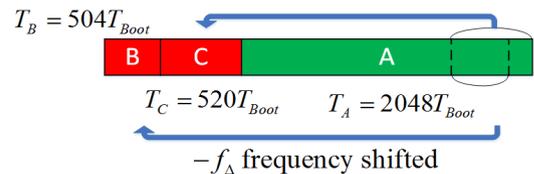


그림 5. 부트스트랩 심볼 B-C-A 구조
Fig. 5. Bootstrap symbol B-C-A structure

A는 부트스트랩 C-A-B 구조의 심볼 구간 A를 나타내는 신호이며, S_{CAB} 는 부트스트랩 C-A-B 구조를 나타내는 신호이다. 식 (9)와 그림 4를 보면 부트스트랩 심볼의 C-A-B 구조는 P1 심볼과는 약간 다른 것을 알 수 있다. 우선 A 구간의 모든 정보를 보호 구간에 사용하지만, 부트스트랩은 A 구간의 뒷부분만 복사하여 보호 구간에 사용한다. 그리고 양쪽 보호 구간 모두 주파수 천이를 시킨 P1 심볼과는 달리, 부트스트랩 심볼에서는 C 구간은 그대로 복사하여 사용하고 B 구간에만 f_{Δ} 만큼 주파수 천이를 시킨 형태를 사용한다. 이러한 부트스트랩 구조를 고려하여 오프셋 추정이 가능한 검출기가 필요하다.

그림 6은 기존에 제안된 부트스트랩 이중 상관 검출기이다^[12]. 이 검출기는 프레임의 시작지점을 탐지하기 위해 심볼 타이밍 오프셋 추정이 가능하도록 설계되었다. 그림 6에서 상단 출력의 방정식 C_n 과 하단 출력의 방정식 B_n 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_n = \frac{1}{T_C} \sum_{m=0}^{T_C} r_{n+m} r_{n+m}^* - T_A \quad (10)$$

$$B_n = \frac{1}{T_B} \sum_{m=0}^{T_B} (r_{n+m} e^{-j2\pi f_{\Delta}(n+m)T_{Boot}}) r_{n+m}^* - T_B \quad (11)$$

검출기를 살펴보면 부트스트랩이 B 구간만 주파수 천이를 시킨 것을 이용하여 A-B 상관 검출 과정에만 $-f_{\Delta}$ 만큼 주파수 천이를 시킨 형태이다. 일반적으로 f_{shift} 만큼 주파수 천이를 시킨 상황에서 심볼 타이밍 오프셋이나 경로 지연이 n_O 만큼 생길 경우, n_O 에 비례하여 상관기의 출력에 $-2\pi f_{shift} n_O T$ 만큼의 위상이 추가된다. 이때의 T 는 샘플링 시간을 나타낸다. 이러

한 상황에서 소수배 주파수 오프셋을 추정할 경우 위상 추가로 인하여 소수배 주파수 오프셋 추정이 어렵다^[14]. 이런 위상 추가를 제거하기 위해 P1 심볼의 이중 상관 검출기는 양 단 모두 주파수 천이를 사용하여 추가된 위상을 상단의 출력과 하단의 출력에 각각 반대로 나오도록 하여 상쇄가 되는 구조로 설계하였다. 그러나 기존의 부트스트랩 이중 상관 검출기는 한쪽만 주파수 천이를 시킨 형태이므로 n_O 만큼 지연이 발생하면 상단 검출기는 주파수 천이를 시키지 않으므로 식 (10)의 출력 위상을 측정하면 추가된 위상이 없이 오프셋에 의한 위상만 측정되지만, 하단 검출기인 식 (11)에서는 $-2\pi f_{\Delta} n_O T_{Boot}$ 만큼의 위상이 추가되기 때문에 출력 파형의 위상을 측정하는 방식을 사용하는 소수배 주파수 오프셋 추정법을 사용할 수 없다. 그림 6의 최종 출력 U_n 은 각 단의 상관기 출력의 최대 지점을 맞추기 위해 상단 상관기 출력 C_n 을 T_B 만큼 지연시켜 두 상관기의 출력을 곱한 형태로 아래와 같이 나타낸다.

$$U_n = C_{n-T_B} B_n \quad (12)$$

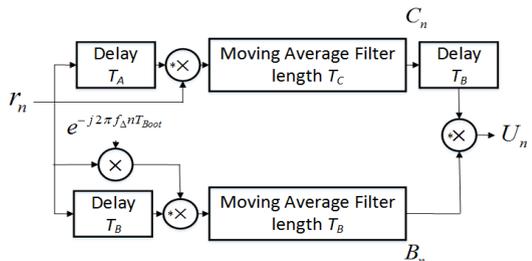
만약 출력 파형의 심볼 타이밍 오프셋이 이상적일 경우($n_O=0$) 추가된 위상이 없이 부트스트랩 검출기의 상단의 위상은 $\phi_U = 2\pi\epsilon$ 이고, 하단의 위상은 $\phi_L = 2\pi\epsilon(T_B/T_A)$ 가 되어 최종 출력 U_n 에서 측정되는 위상은 $\phi = (1 + T_B/T_A)2\pi\epsilon$ 가 측정된다. 심볼 타이밍 오프셋 지점 n_O 에서 측정된 위상을 2π 로 나누면 아래 식과 같이 오프셋에 의해 측정되는 위상과 오프셋에 의하여 추가된 위상의 차로 추정되어 실제 소수배 주파수 오프셋을 추정할 수 없다.

$$(1 + T_B/T_A)\hat{\epsilon}_{Boot} - f_{\Delta} n_O T_{Boot} = \frac{\arg(U_{n_O})}{2\pi} \quad (13)$$

이를 위해 본 논문에서는 심볼 타이밍 오프셋과 소수배 주파수 오프셋 검출이 가능하도록 부트스트랩을 이용한 새로운 이중 상관 검출기를 제안한다. 제안하는 이중 상관 검출기는 그림 7에서처럼 주파수 천이된 하단 상관기에 복소 켄레 곱을 추가하는 방식이다. 그림 7의 최종 출력 V_n 은 다음과 같다.

$$V_n = C_{n-T_B} B_n B_n^* \quad (14)$$

그림 6. 기존 ATSC 3.0 이중 상관 검출기
Fig. 6. conventional double correlation detector block diagram for ATSC 3.0



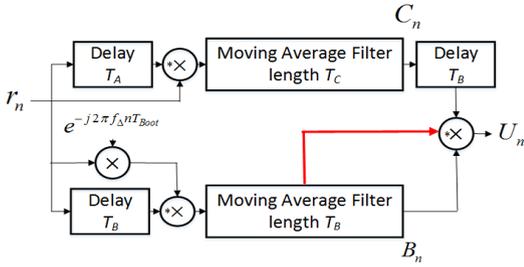


그림 7. 제안하는 ATSC 3.0 이중 상관 검출기
Fig. 7. Conventional double correlation detector block diagram for ATSC 3.0

식 (11)에서 추가된 위상 $-2\pi f_{\Delta} n_o T_{Boot}$ 은 그림 7과 식 (12)와 같이 하단 상관기 출력 B_n 에 복소 곱셈을 추가함으로써 $+2\pi f_{\Delta} n_o T_{Boot}$ 와 더해지므로 출력 파형에서 주파수 천이로 인한 위상의 추가되는 현상을 제거할 수 있다. 하단에서 생기는 위상 모두 복소 곱셈으로 상쇄를 시키더라도 소수배 주파수 오프셋 추정이 가능하고 이중 상관 검출기 출력의 위상을 측정하면 소수배 주파수 오프셋을 추정할 수 있다. 또한 복소 곱셈을 추가하더라도 기존의 존재하는 B_n 에 저장된 수식을 사용하기 때문에 복잡성 또한 기존 기법에서 큰 차이가 생기지 않는다. 최종적으로 그림 7의 이중 상관 검출기 출력 V_n 의 심볼 타이밍 오프셋 지점 n_o 에서 위상을 2π 로 나누어 ATSC 3.0 시스템의 정규화된 소수배 주파수 오프셋, $\hat{\epsilon}_{Boot}$ 를 다음 식 (15)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\epsilon}_{Boot} = \frac{\arg(V_{n_o})}{2\pi} \quad (15)$$

V. 모의실험을 통한 오프셋 추정 분석

5.1 모의실험 환경

본 장에서는, 기존의 ATSC 3.0의 오프셋 추정법과 복소 곱셈을 추가하여 소수배 주파수 오프셋도 추정이 가능한 제안하는 오프셋 추정법을 비교하는 모의 실험 결과를 제시한다. 그림 8과 같이 임의의 OFDM 심볼들 중간에 부트스트랩 C-A-B 심볼을 삽입한 형태의 신호 모델을 생성하고, 이 신호의 심볼 타이밍 오프셋과 소수배 주파수 오프셋을 추정하는 모의실험을 진행하였다. 임의로 생성한 OFDM 심볼 신호의 성상은 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)를 사용하였고, DFT(Discrete Fourier

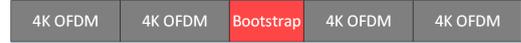


그림 8. 모의 실험모델의 관측 윈도우
Fig. 8. The observation window for simulation model

표 1. TU-6 채널의 프로파일
Table 1. Channel profile of TU-6

Delay (us)	Amplitude (dB)
0.0	-3
0.2	0
0.5	-2
1.6	-6
2.3	-8
5.0	-10

Transform) 크기는 4K를 사용하였다. 보호 구간의 길이는 OFDM 심볼 길이의 1/4을 사용하였다. 채널의 상황은 기본적으로 송신단과 수신단 사이의 지연 $n_o = 20$ 샘플이 있다고 가정하고, AWGN 채널과 표 1과 같이 Rayleigh fading을 가지는 TU-6 채널에서 모의실험을 진행하였다.

5.2 오프셋 추정 모의실험 결과

본 논문은 기본적으로 오프셋 추정 성능을 분석하는 지표로 root mean square error (RMSE)를 사용하였다. RMSE 식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}, \quad (16)$$

여기서 x_i 는 실제 값, \hat{x}_i 는 추정된 값을 나타낸다. 심볼 타이밍 오프셋 추정은 샘플 단위를, 소수배 주파수 오프셋은 정규화시켜 각각 RMSE 성능 분석을 하였다.

그림 9는 AWGN 채널에서 SNR에 따른 심볼 타이밍 오프셋 추정에 대한 결과이다. 기존 검출기와 제안하는 검출기의 심볼 타이밍 오프셋 추정 방식이 거의 동일하기 때문에 심볼 타이밍 오프셋 추정 결과의 RMSE 성능이 두 방식에서 거의 같음을 확인하였다. 두 검출기 모두 약 3 dB 이상에서는 1 샘플 이내의 오프셋 에러가 발생하여 프레임 시작지점 위치 탐지에는 문제가 없을 것으로 예상된다.

그림 10은 AWGN 채널에서 SNR에 따른 정규화된 소수배 주파수 오프셋 추정 성능을 나타낸 것이다. 정규화된 소수배 주파수 오프셋을 $\epsilon_{Boot} = 0.2$ 로 설정하고 추정 오차를 RMSE로 나타내었다. 기존 검출기

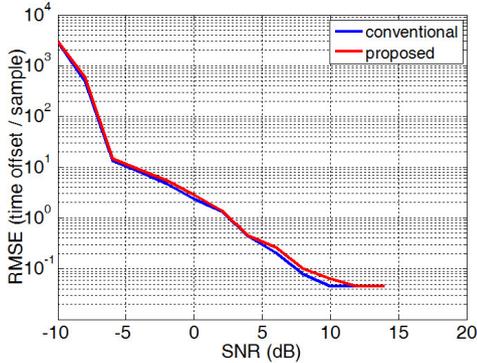


그림 9. 심볼 타이밍 오프셋 성능 (AWGN channel)
Fig. 9. Symbol timing offset performance (AWGN channel)

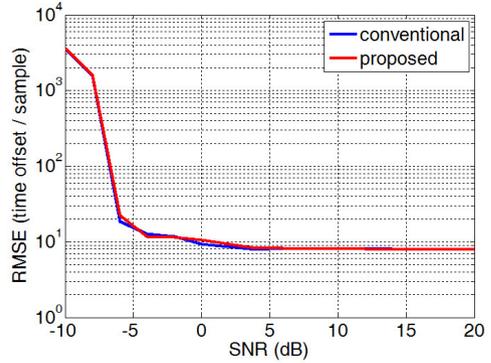


그림 11. 심볼 타이밍 오프셋 성능 (TU-6 channel)
Fig. 11. Symbol timing offset performance (TU-6 channel)

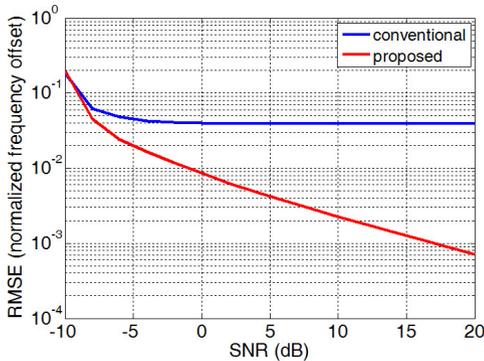


그림 10. 소수배 주파수 오프셋 성능 (AWGN channel)
Fig. 10. Fractional frequency offset performance (AWGN channel)

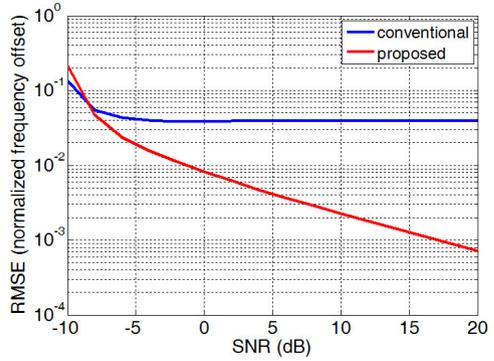


그림 12. 소수배 주파수 오프셋 성능 (TU-6 channel)
Fig. 12. Fractional frequency offset performance (TU-6 channel)

를 사용하면 송신단과 수신단의 시간 차이가 발생할 경우 하단 상관기의 주파수 천이 과정에서 위상이 추가되어 SNR이 증가하더라도 주파수 오프셋 추정이 되지 않는 것을 볼 수 있다. 반면 제안하는 검출기는 하단 상관기에 발생하는 위상 추가를 복소 곱셈 곱을 추가하여 제거를 하기 때문에 소수배 주파수 오프셋 추정이 가능하고, 모의실험을 통해 SNR이 높아짐에 따라서 RMSE 성능이 좋아지는 것을 확인하였다.

그림 11과 12는 TU-6 채널에서 SNR에 따른 심볼 타이밍 오프셋과 정규화된 소수배 주파수 오프셋 추정 성능을 RMSE로 나타낸 것이다. 그림 11을 보면 AWGN 채널에 비해 심볼 타이밍 오프셋 추정이 수 샘플 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 이는 TU-6 채널 모델이 다중경로 지연이 있고 부 경로 신호의 크기가 크기 때문이다. 두 기법의 오프셋 추정 성능은 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 그림 12는 소수배 주파수 오프셋을 $\epsilon_{Boot} = 0.2$ 로 설정하고 주파수 오프셋

추정의 오차를 RMSE로 나타낸 것이다. 앞선 AWGN 채널의 결과와 동일한 이유로 SNR이 증가하더라도 일정한 오차가 나는 것을 볼 수 있다. 제안하는 검출기에서는 AWGN 채널의 결과와 동일한 이유로 SNR이 증가하면서 RMSE 성능이 좋아지는 것을 볼 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 DVB-T2 시스템의 P1 심볼 이중 상관 검출기를 바탕으로 ATSC 3.0 시스템의 부트스트랩 심볼에 적합한 이중 상관 검출기를 제안하였다. 제안된 방법에서는 기존 부트스트랩 심볼의 이중 상관 검출기의 송신단과 수신단의 시간 차이에 의하여 주파수 천이 과정에서 하단 상관기의 위상이 추가되어 소수배 주파수 오프셋 추정이 되지 않는 문제점을 보완하여, 부트스트랩 심볼 타이밍 오프셋 및 주파수 오프셋을 추정하는 프리앰블의 역할을 할 수 있도록

이중 상관 검출기를 설계하였다. 기존 방식이 심볼 타이밍 오프셋만 추정이 가능하다는 단점이 있는데 비하여, 제안하는 이중 상관 검출기는 심볼 타이밍 오프셋과 소수배 주파수 오프셋을 모두 추정할 수 있다는 장점을 갖는다. 이와 같은 장점으로 인해 제안하는 방법은 향후 개발 완료될 ATSC 3.0 신호의 오프셋 추정 기술의 하나로 고려될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. H. JO, D. S. Jeon, and J. S. Choi, "UHD technology and standardization status," *TTA J.*, vol. 140, pp. 49-54, Mar. 2012.
- [2] G. M. Park, Y. J. Lee, K. J. Lee, D. S. Jun, J. S. Choi, and J. W. Kim, "UHDTV video technology-consideration factors in development and strategic policy evolution," *Commun. of KIISE*, vol. 29, no. 12, pp. 45-54, Dec. 2012.
- [3] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), *Digital Video Broadcasting (DVB), Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*, ETSI TS 102 831 V1.2.1, Aug. 2012.
- [4] ATSC Technology Group 3.0, *ATSC Standard: Physical Layer Protocol*, Doc. A/322:2016. Sept. 2016.
- [5] K. S. Ok, I. W. Kang, Y. Kim, J. H. Seo, H. M. Kim, and H. N. Kim, "Frame synchronization method for distributed MIMO terrestrial broadcasting systems," *J. KICS*, vol. 41, no. 4, pp. 424-432, Apr. 2016.
- [6] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications With MATLAB*, John Wiley & Sons (Aisa) Pte Ltd, pp. 153-177, 2010
- [7] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [8] H. K. Lee and H. G. Ryu, "Efficient estimation and compensation of CFO and STO in multi-carrier communication system," *J. KICS*, vol. 36, no. 5, pp. 441-449, May 2011.
- [9] M. Li and W. Zhang, "A novel method of carrier frequency offset estimation for OFDM systems," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 965-972, Nov. 2003.
- [10] D. C. Chang, "Effect and compensation of symbol timing offset in OFDM systems with channel interpolation," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 54, no. 4, pp. 761-770, Dec. 2008.
- [11] Y. Lee, S. Kim, T. H. Han, S. H. Yoo, S. Y. Kim, and S. Yoon, "A novel pilot-aided integer frequency offset estimation scheme for OFDM-Based systems," *J. KICS*, vol. 34, no. 6, pp. 656-663, Jun. 2009.
- [12] K. S. Ok, I. W. Kang, H. J. Kim, Y. Kim, J. H. Seo, H. M. Kim, and H. N. Kim, "Frame Synchronization method by detecting bootstrap signal for ATSC 3.0," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 17-18, Seoul, Korea, Nov. 2015.
- [13] M. Morelli, C.-C. Jay Kuo, and M.-O. Pun, "Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): A tutorial review," in *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 7, pp. 1394-1427, Jul. 2007.
- [14] S. Morshed, "Synchronization performance in DVB-T2," M.S. Thesis, Dept. Commun. Eng., Tampere Univ. of Technol., Tampere, Finland, 2009.
- [15] D. H. Sayed, M. Elsabrouty, and A. F. Shalash, "Improved synchronization, channel estimation, and simplified LDPC decoding for the physical layer of the DVB-T2 receiver," *EURASIP J. Wireless Commun. and Netw.*, Mar. 2013.
- [16] ATSC Technology Group 3.0, *ATSC Standard: A/321, System Discovery and Signaling*, Doc. A/321: 2016, Mar. 2016.
- [17] Y. H. Cho, "Fine Timing Synchronization Based on Reference Signals for OFDM Systems," *J. KICS*, vol. 41, no. 9, pp. 1038-1040, Sep. 2016.

김 호 재 (Ho Jae Kim)



2015년 2월 : 부산대학교 전자
전기공학부 학사
2015년 3월~현재 : 부산대학교
전기전자컴퓨터공학과 석사
과정
<관심분야> 디지털 방송신호처
리

강 인 웅 (In-Woong Kang)



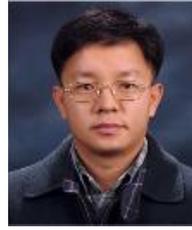
2011년 2월 : 부산대학교 전자
전기통신공학부 학사
2011년 3월~현재 : 부산대학교
전자전기컴퓨터공학과 석박사
통합과정
<관심분야> 디지털 방송신호처
리

서 재 현 (Jae Hyun Seo)



1999년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 학사
2001년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 석사
2016년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 박사
2001년 1월~현재 : 한국전자통
신연구원 미디어주파수공유·응용연구실 책임연구원
<관심분야> 디지털 방송시스템, 디지털 통신 신호
처리

김 흥 목 (Heung Mook Kim)



1993년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 학사
1995년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 석사
2013년 2월 : 한국과학기술원 정
보통신공학과 박사
1993년~2001년 : POSCO 기술
연구소 연구원
2002년~2003년 : (주)맥스웨이브 연구개발팀 팀장
2004년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 미디어주파
수공유·응용연구실 실장
<관심분야> RF 방송신호처리, 디지털 방송/통신 신
호처리

김 형 남 (Hyoung-Nam Kim)



1993년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 학사 졸업
1995년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 석사 졸업
2000년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 박사 졸업
2000년 3월 : 포항공과대학교 전
자컴퓨터공학부 박사 후 연구원
2000년 5월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원
무선방송연구소 선임 연구원
2003년 3월~2007년 2월 : 부산대학교 전자전기통신
공학부 조교수
2007년 3월~2012년 2월 : 부산대학교 전자전기공학
부 부교수
2009년 2월~2010년 2월 : Johns Hopkins Univ.
Visiting Scholar
2015년 9월~2016년 8월 : Univ. of Southampton
Visiting Professor
2012년~현재 : 부산대학교 전자공학과 교수
<관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나 신호처
리, 디지털 방송 신호처리, 생체 신호처리