

# DVB-T2 복조기를 위한 재표본화기 구조

## An Architecture of the Resampler for DVB-T2 Demodulation

김 시 현\*  
Seehyun Kim\*

### Abstract

DVB-T2 is a next generation DTV transmission standard, which supports various channel bandwidths. Since the symbol rate of the DVB-T2 signal is changed according to its bandwidth, the received signal needs to be sampled at a different frequency. The sampling frequency should be also adjusted depending on the sampling frequency offset due to the frequency error in the local oscillator. The sampling frequency can be locked into the symbol frequency by resampling the sampled data by ADC running at a fixed frequency. In this paper a resampler architecture for DVB-T2 is proposed. And the simulation results reveal the spectral characteristics of each subcarriers used in DVB-T2 system.

### 요 약

차세대 DTV 표준인 DVB-T2는 다양한 전송 대역폭을 지원하며, 대역폭에 따라 심볼 주파수가 달라진다. 따라서 다양한 심볼 주파수로 수신 신호를 표본화해야 한다. 또한 수신부 발진기의 주파수 오차로 인한 표본화 주파수 오차의 보상을 위해 미세한 표본화 주파수 보정도 필요하다. 수신 신호를 고정된 표본화 주파수를 갖는 ADC로 표본화 하고, 재표본화기를 이용하여 표본화 주파수를 심볼 주파수에 맞출 수 있다. 본 논문에서는 DVB-T2 복조기를 위한 재표본화기의 구조를 제안한다. 또한 모의 실험을 통해 DVB-T2 신호의 각각의 부반송파에 대한 재표본화 결과의 주파수 특성을 보인다.

*Key words* : Resampler, NCO, polyphase filter, DVB-T2

## 1. 서론

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)은 다중경로 페이딩이나 임펄스 잡음 등으로 손상된 채널에서도 강인한 전송 능력으로 인해 IEEE 802.11 a/g와 HIPERLAN/2 등과 같은 광대역 무선 LAN (local area network) 표준과 DVB-T/T2 (digital video broadcasting), ISDB-T 등 디지털 지상파 방송 표준에도 널리 채택되고 있다[1][2].

OFDM에서는 여러 개의 부반송파를 사용하여 정보를 전송하는데, 부반송파 간의 직교성을 이용하여 높은 신호대 잡음비 성능을 얻을 수 있다. 그러나 부반송파의 직교성이 보장되지 않으면 수신 성능은 급격히 떨어진다. 직교성이 손상되는 주요 이유로는 반송파 주파수 오차(carrier frequency offset, CFO)와 표본화 주파수 오차(sampling frequency offset, SFO)를 들 수 있다. 반송파 주파수 오차는 송수신기에 사용되는 발진기의 주파수가 일치하지 않은 경우와 도플러 효과에 의한 송신 신호의 주파수 편이 등에 그 원인이 있다. CFO는 반송파 주파수 오차 추정기로 검출하고 역회전기(derotator)로 보정할 수 있다[3]. 수신부 발진기의 주파수 오차는 SFO를 일으키며, 여러 가지 방법으로 추정할 수 있다. SFO 추정치를 바탕으로 표본화된 수신 신호를 재표본화(resample)하여 심볼 타이밍 동기를 맞추어야 한다. OFDM 복조기의

\*수원대학교 정보통신공학과 (Dept. of Information and Telecommunication Engineering, University of Suwon)

接受日:2011年 5月 23日, 修正完了日: 2011年 11月 29日  
掲載確定日: 2011年 12月 01日

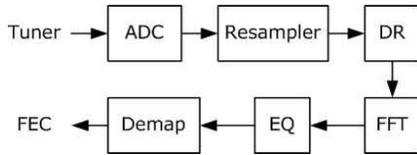


Fig. 1. Block diagram of an OFDM demodulator (DR: derotator, EQ: equalizer)  
 그림 1. OFDM 복조기의 구조

일반적인 구조는 그림 1과 같다.

DVB-T2는 OFDM 기반의 2세대 지상파 디지털 TV 전송 시스템 표준으로서, 1세대 지상파 DTV 표준인 DVB-T의 주요 기술에 다양한 성능 요소들을 확장하고 또한 여러 가지 전송 오버헤드를 줄여 이론적인 한계에 가까이 근접하는 데이터 전송 효율을 보인다. 특히 다양한 전송 대역폭을 지원하므로 방송 시스템의 여건에 따라 적당한 주파수 대역폭을 선택할 수 있다.

DVB-T2 시스템에서는 *기본시간* (elementary period),  $T_s$  라는 단위 시간을 정의하고, 이 기본시간을 단위 시간으로 이용하여 전송 신호를 정의한다. 기저대역 OFDM 전송 신호는 식과 같다.

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=-K/2}^{K/2} X_{n,k} \Psi_{n,k}(t) \quad (1)$$

단,  $X_{n,k}$ 는 n번째 OFDM 심볼의 k번째 부반송파에 실리는 복소수 데이터이며,  $\Psi_{n,k}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\Psi_{n,k}(t) = e^{j2\pi(k/T_u)(t - T_g - nT_s)} g(t - nT_s) \quad (2)$$

$T_u$  와  $T_g$  는 각각 부반송파 간격의 역수와 가드인터벌(guard interval)이고,  $g(t)$ 는  $0 \leq t < T_s$ 에서만 1이고 나머지 구간에서는 0인 펄스 파형이다. 식 (1)과 같이 OFDM 신호는 전송 데이터  $X_{n,k}$ 를 각 부반송파와 곱한 후 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 하여 얻는다. 수신기에서는  $s(t)$ 를 표본화하여  $s[n]$ 을 얻고, 이를 푸리에 변환하여 전송 데이터를 복원하는데, 이때 표본화 주파수는 기본시간  $T_s$ 의 역수이어야 한다.

DVB-T2에서 지원되는 대역폭과 그 때의 기본시간

Table 1. The elementary period for bandwidth

표 1. 대역폭 별 기본시간

대역폭 (MHz)	1.7	5	6	7	8	10
$T(\mu s)$	$\frac{71}{131}$	$\frac{7}{40}$	$\frac{7}{48}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{7}{64}$	$\frac{7}{80}$

은 표 1과 같다. 대역폭이 10MHz일 때 가장 짧은 기본시간을 가지며 그 때의 심볼 주파수는 약 11.43MHz이다. 이 주파수가 최대 심볼 주파수,  $F_{s,max}$ 이다. 즉 최소한 이 주파수로 표본화해야 다른 대역폭이 사용되는 경우에도 재표본화기를 통해 aliasing 없이  $T_s$ 의 간격으로 표본화된 수신 신호를 얻을 수 있다.

수신기에서는 먼저 수신된 신호의 대역폭을 검출하여 기본시간을 복원한다.

## II. 재표본화기의 구조

표본화된 신호를 특정 비율, 예를 들어  $\frac{M}{N}$ 으로 재표본화하는 과정은 0의 값을 갖는 가상 샘플 ( $M-1$ )개를 입력 신호 사이에 삽입하여 저역통과 필터링을 한 후에  $N$ 개 중에 하나를 제외한 나머지 필터 출력을 버리는 동작으로 구성된다. 저역통과 필터는 equiripple 또는 windowing 방법으로 설계할 수 있으며, 컷오프 주파수는  $\pi/M$ 이다. 다위상(polyphase) 필터는 저역통과 필터링 시에 인위적으로 삽입된 0과 필터계수의 곱셈과 사용되지 않는 필터 출력의 계산을 제거하여 연산상의 효율성을 향상시킬 수 있다[4].

### 1. 수치제어발전기 (NCO)

재표본화의 정확한 위상을 얻기 위해 NCO가 사용된다. 그림 2은 NCO의 구조를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 NCO에는 현재의 위상값을 저장하고 있는 n비트 카운터와 덧셈기로 구성된다. 카운터는 modulo  $2^n$  카운터로 동작하며 0과  $2\pi$  사이의 위상을 나타낸다. DVB-T2 복조기에서는 ADC의 표본화 주파수가 재표본화 주파수보다 높으므로 NCO는 표본화 클럭에 따라 위상값을 갱신한다. 즉 ADC가 데이터를 출력할 때마다 (ADC\_valid = 1) 위상값은 위상 변화

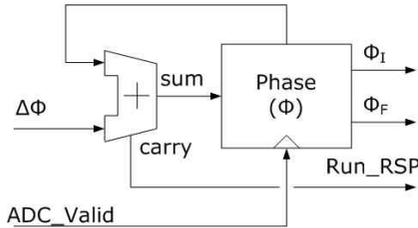


Fig. 2. A numerically controlled oscillator (NCO) for the resampler

그림 2. 재표본화기를 위한 수치제어 발진기의 구조

량( $\Delta\phi$ )만큼 증가하게 된다. 즉,

$$\phi[n+1] = \phi[n] + \Delta\phi \quad (3)$$

$\Delta\phi$ 는 DVB-T2 신호의 전송 모드에 의해 초기값이 결정되며, 이후 표본화 주파수 동기 과정에서 수정된다. 만일 덧셈기에서 carry가 발생한다면 위상이  $2\pi$ 를 넘어가는 것이므로 새로운 재표본화 출력을 구해야 한다. 물론 위상은  $2\pi$ 만큼 빼주어야 하나 카운터가 modulo  $2^n$  동작을 하므로 추가의 연산은 필요하지 않다. 덧셈기의 carry 신호는 재표본화기를 구동시키는 신호로 사용된다.

그림 3와 같이  $n$  비트 위상 카운터는 상위  $K$  비트의 정수 위상과  $n-K$  비트의 소수 위상으로 나눌 수 있다. 단  $K = \log_2 M$  이다. 정수 위상은 0과  $M-1$  사이의 값을 가지며, 다위상 필터 기반의 재표본화기에서

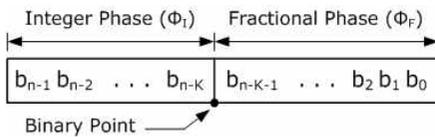


Fig. 3. An  $n$ -bit counter for the phase

그림 3. 위상을 위한  $n$  비트 카운터

부필터 계수를 선택하기 위해 사용된다. 소수 위상은 1보다 작은 위상 값을 나타내며 정수 위상 값에 의한 재표본화 출력을 보정하는데 사용된다.

## 2. 다위상 필터

다위상 필터의 구조는 그림 4와 같다. 입력 샘플들은 FIFO 구조의 저장장치인 delay line memory에 저장된다. 지역통과 필터의 차수가  $LM-1$ 이라면 이 메모리의 크기는  $L$ 이다. 출력 샘플은  $L$ 개의 입력 데이터와 필터 계수를 곱셈 및 덧셈 연산(MAC)을 수행하여 계산된다. MAC 유닛에서 사용되는 곱셈기와 덧셈기의 계수는 입력 데이터의 주파수( $f_{DIN}$ )와 다위상 필터의 동작 주파수( $f_{PPF}$ )에 따라 조정할 수 있다. 만약  $f_{PPF} = L \times f_{DIN}$  이라면 1개의 곱셈기와 덧셈기로 MAC 유닛을 구현할 수 있다. 이때 각 부필터의 계수는  $L$ 개의 주소로 나누어 저장한 후 하나씩 읽어내서 사용한다.

다위상 필터는  $M$ 개의 부필터(subfilter)로 구성된다. 각 부필터는 위에서 설계된 지역통과 필터를  $M:1$ 로 분할하여 얻을 수 있으며, 차수는  $L-1$ 이다. FIR 필터링에 사용되는 부필터는 위상(phase)로 선택된다. 위상값은 0과  $M-1$  사이의 값을 갖는다. 위상이  $n$ 일 때는 다위상 계수 롬(ROM)의  $n$ 번째 계수들을 이용하여 FIR 필터링을 하고 그 결과값이 다위상 필터의 출력값이 된다[5].

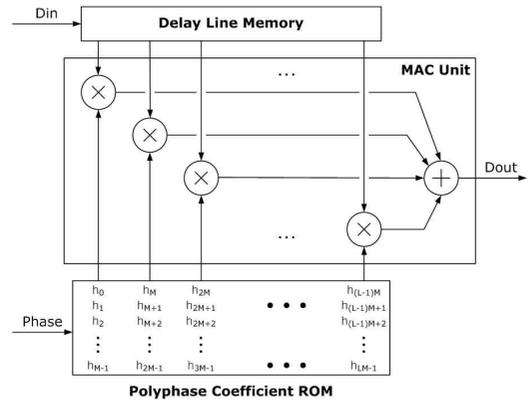


Fig. 4. Architecture of a polyphase filter

그림 4. 다위상 필터의 구조

## 3. 단일 채널 재표본화기

정수 위상만을 이용한 다위상 필터도 재표본화기로 사용될 수 있으나 소수 위상이 고려되지 않기 때문에 재표본화 출력의 정밀도가 평균적으로 떨어지는 단점을 보인다. 소수 위상이 각각 0과 1에 가까울수록 높은 정밀도를 보이고, 0.5에 가까울수록 낮은 정밀도를

보인다. 즉, 소수 위상에 따라 정밀도에 차이가 발생한다. 부필터 계수를 늘림으로써 재표본화 출력의 최저 정밀도를 향상시킬 수 있으나, 여전히 균일하지 않은 정밀도를 보이며 다위상 필터의 계수 메모리도 커지는 문제점이 있다.

이와 같은 정밀도 문제는 하나의 다위상 필터와 선형보간기를 추가함으로써 보완할 수 있다. 그림 5는 하나의 delay line 메모리를 공유하는 두 개의 다위상 필터와 선형 보간기로 이루어진 단일 채널 재표본화기이다. 사용되는 다위상 필터는 그림 4의 구조와 같다. 그림 5에서 보는 바와 같이 두 개의 다위상 필터에 각각 정수 위상,  $\phi_I$ 와  $\phi_I+1$ 를 인가한다.  $P_0$ 과  $P_1$ 은 각 위상에 대한 다위상 필터 출력값이다. 이들을 소수 위상  $\phi_F$ 를 이용하여 선형 보간하면 정밀도가 향상된 재표본화 출력,  $R_{out}$ 을 얻을 수 있다. 즉,

$$R_{out} = P_0(1 - \phi_F) + P_1\phi_F = P_0 + (P_1 - P_0)\phi_F \quad (4)$$

다위상 필터를 위한 계수 ROM도 출력 포트 수를 늘리면 하나의 ROM으로 재표본화기를 구현할 수도 있다.

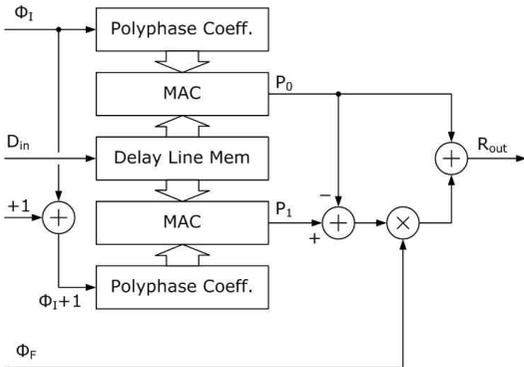


Fig. 5. Architecture of a single channel resampler  
그림 5. 단일 채널 재표본화기의 구조

4. DVB-T2 재표본화기

DVB-T2는 복소수 변조 방식을 사용하므로 각각 I 채널과 Q 채널에 대해 재표본화기가 필요하다. 그림 6에서 보는 바와 같이 수치제어 발진기와 두 개의 단일 채널 재표본화기를 이용하여 DVB-T2 복조기에 사용되는 재표본화기를 설계할 수 있다. 2 채널 ADC

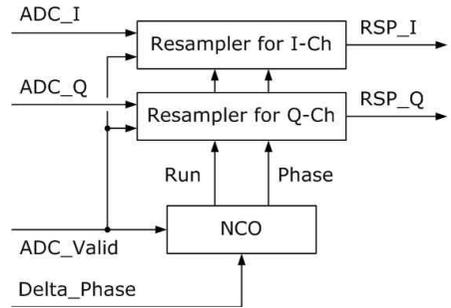


Fig. 6. A resampler for the DVB-T2 demodulator  
그림 6. DVB-T2 복조기를 위한 재표본화기

에서 표본화된 기저대역 신호, ADC\_I와 ADC\_Q는 유효신호인 ADC\_Valid와 함께 재표본화기 입력으로 들어온다. ADC 데이터는 각각 I 채널과 Q 채널의 재표본화기의 delay line 메모리에 저장되며, 동시에 위상값이 위상 변화량 (Delta\_Phase) 만큼 증가한다. 만약 누적 위상이  $2\pi$ 를 넘어가면 재표본화기 실행 신호, 즉 Run 신호를 발생시켜 새로운 재표본화 데이터인 RSP\_I와 RSP\_Q를 생성한다. 이 신호들은 그림 1에서 보는 바와 같이 역회전기(DR)로 전달되며 OFDM 복조 과정을 거친다.

예를 들어 전송 대역폭이 7MHz라면 표 1에서와 같이 기본시간은  $0.125\mu s$ 이고 심볼 주파수  $f_s$ 는 8MHz이다. ADC의 표본화 주파수가 12MHz라고 하면 매 ADC 입력에 대한 위상변화량은

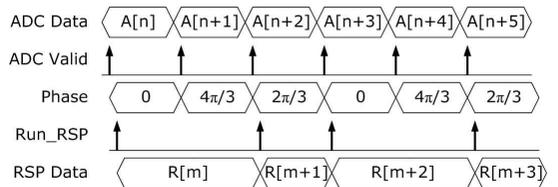


Fig. 7. An example waveform of the signals in the resampler.  
그림 7. 재표본화 관련 신호의 타이밍

$$\Delta\phi = \frac{2\pi f_s}{f_{ADC}} \quad (5)$$

이므로  $4\pi/3$ 이다. 즉 매 3개의 ADC 샘플에 대해 2개의 재표본화 샘플을 얻는다. 그림 7은 ADC 데이터로부터 재표본화 데이터를 얻는 과정의 타이밍을 보여주고 있다.

### III 성능분석

대역폭 7MHz DVB-T2 신호를 12MHz 10 비트 ADC로 표본화한 후 심볼 주파수인 8MHz로 재표본화하는 경우에 대하여 제안된 재표본화기의 성능을 분석하였다. 다위상 필터의 원형 필터는 MATLAB을 이용하여 255차 지역필터로 설계하였으며, 부필터의 개수는 16, 차수는 16이다. 입력으로는 DVB-T2의 부반송파에 해당하는 톤(tone) 신호를 사용하였다. 8K 모드를 이용하면 총 6817개의 데이터 부반송파가 존재한다. 대역폭이 7MHz인 경우 부반송파의 간격은 1/1024 MHz이므로 3408번째 부반송파의 주파수가 최

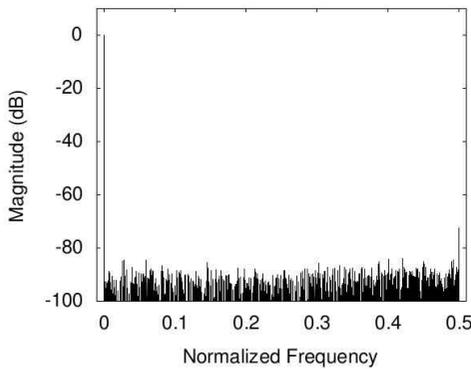


Fig. 8. Power spectral density of the resampler output for the 1st subcarrier

그림 8. 1번 부반송파에 대한 재표본화 출력의 전력밀도

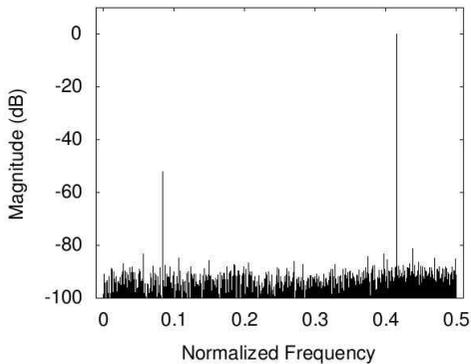


Fig. 9. Power spectral density of the resampler output for the 3408-th subcarrier

그림 9. 3408번 부반송파에 대한 재표본화 출력의 전력밀도

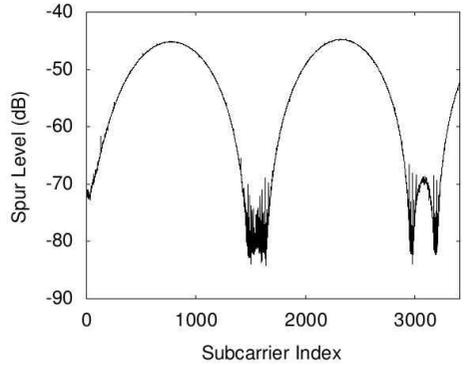


Fig. 10. Spur levels for all subcarriers

그림 10. 모든 부반송파에 대한 스퍼 크기

대이며 그 값은  $3408/1024 = 3.328125$  MHz이다. 모든 부반송파에 대해 제안된 재표본화기의 주파수 성능을 알아보았다. 그림 8과 9는 각각 첫 번째와 3408번째 부반송파에 대한 재표본화 결과의 전력 밀도이다. 첫 번째 부반송파의 경우는 약 -72dB (그림 8), 가장 높은 주파수의 부반송파인 3408 번째 부반송파의 경우는 약 -52dB 스퍼가 발생한다 (그림 9). 1번 부반송파부터 3408번 부반송파까지 모든 부반송파에 대한 스퍼 크기는 그림 10과 같다. 부반송파 별로 스퍼의 크기가 균일하지 않으며, 최대 스퍼는 약 -45dB이다. 제안된 재표본화기의 전반적인 주파수 특성이 우수함을 알 수 있다.

### III 결론

OFDM 기반의 차세대 지상파 DTV 전송 표준인 DVB-T2는 다양한 전송 대역폭을 지원하며 각 대역폭에 대한 심볼 주파수가 서로 다르다. OFDM 신호의 복조를 위해 해당 심볼 주파수로 표본화된 수신 신호가 필요하다. VCO(voltage controlled oscillator)를 이용하여 ADC의 표본화 주파수를 조절하여 원하는 심볼 주파수로 표본화된 수신 신호를 얻을 수도 있다. 그러나 구현 회로가 복잡해지고, 또한 VCO 회로가 온도와 주변 소자의 오차에 민감하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 DVB-T2 복조기를 위해 단일 ADC 표본화 주파수를 이용하여 표본화된 수신 신호를 다양한 심볼 주파수에 맞게 재표본화하는 재표본화기의 구조를 제안한다. 제안된 재표본화기는 미세한 표본

화 주파수 변화에도 대응할 수 있으므로 부반송파의 직교성에 민감한 OFDM 특성에도 적합하다. 재표본화기는 NCO와 두 개의 다위상 필터로 구성되며 각 다위상 필터는 I 채널과 Q 채널 신호의 재표본화를 수행한다. 성능 실험을 통해 재표본화기의 스퍼 수준이 우수함을 보였다. 제안된 재표본화기는 방송 신호의 재표본화 뿐 만 아니라 오디오 신호의 표본화를 변환이나 영상 신호의 스케일링에도 사용될 수 있다.

### 참고문헌

- [1] "Digital Video Broadcasting (DVB): Frame Structure Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2)," ETSI, EN 302 755 V1.2.1 (2011-02), 2011.
- [2] M. Takada and M. Saito, "Transmission system for ISDB-T," *Proc. IEEE*, Vol.94, no. 1, pp.251-256, 2006
- [3] M. Speth, S. Fechtel, G. Fock, H. Meyr, "Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission .II. A case study", *IEEE Trans., Communication*, Vol. 49, No. 4, pp. 571-578, Apr. 2001
- [4] P. Vaidyanathan, *Multirate Systems and Filter Banks*, Prentice Hall, 1993
- [5] R. Crochiere and L. Rabiner, "Interpolation and decimation of digital signals - a tutorial review," *Proc. IEEE*, Vol.69, no. 3, pp.300-331, 1981

---

### 저 자 소 개

---

김 시 현 (정회원)



1990년 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사)

1992년 : 서울대학교 대학원 제어계측공학과 (공학석사)

1996년 : 서울대학교 대학원 제어계측공학과 (공학박사)

2010년 3월~현재 : 수원대학교 정보통신공학과 전임강사

<주관심분야> 디지털통신, 멀티미디어 신호처리, 반도체 설계