

논문 2013-50-7-27

2차 BPS 시스템의 다중 대역 interpolant 필터

(The Multiband Interpolant Filter in the Second-order BPS System)

김 혁*, 백 제 인**

(Hyuk Kim and Jein Baek[©])

요 약

입력 신호보다 낮은 주파수로 표본화하는 BPS (bandpass sampling) 기술은 별도의 주파수 하향 변환기를 사용하지 않고 표본화 처리만으로 기저 대역 신호를 얻을 수 있으므로 수신기 회로를 간소화할 수 있어 유리하다. 표본화 장치를 2개 사용하는 2차 BPS 방식은 aliasing 현상에 의하여 기저 대역에서 간섭이 발생하더라도 표본화된 두 가지 BPS 신호 사이의 관계를 이용하여 간섭 성분을 제거할 수 있다. 이 때 사용되는 interpolant 필터는 두 BPS 신호 사이의 위상을 조절하는 것으로서, 간섭 제거 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 본 논문에서는 다중 대역으로부터 여러 개의 간섭 신호가 aliasing으로 유입될 때 하나의 interpolant 필터를 사용하면서 이들을 한꺼번에 제거할 수 있는 다중 대역 interpolant 필터를 제안하였다. 또한 제거할 간섭 신호가 없는 경우에는 수신하려는 신호 성분의 세기를 증대시킴으로써 신호의 품질을 3dB 개선시키는 방안을 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 제안된 방법이 타당함을 확인하였다.

Abstract

In a bandpass sampling (BPS), the frequency of the sampler is lower than that of the signal being sampled. In this method, the baseband spectrum directly appears by the sampling operation, so that it is not necessary to use any frequency down-converter, which makes the receiver's hardware simpler. The second-order BPS uses two identical BPS samplers, of which sampling times are offset by each other. By exploiting the relationship between two sampled signals, it can be possible to cancel the aliased signal component or the interference due to the bandpass sampling. In order to cancel the interference, an interpolant filter is used to manipulate the phase characteristics of the BPS sampled signal. In this paper, it is introduced a multiband interpolant filter which can simultaneously cancel multiple interference signals that have been aliased from multiple frequency bands. In case of no need of interference cancellation, another method is suggested to enhance the signal quality by 3dB. A computer simulation has been performed, and the feasibility of the suggested methods has been verified.

Keywords : bandpass sampling, subsampling, second-order BPS, interpolant filter

I. 서 론

표본화 이론에 따르면, 아날로그 신호를 디지털 신호로 표본화할 때, 표본화 주파수 값은 아날로그 신호 성분이 갖고 있는 최고 주파수 값의 2배 (즉 Nyquist 표본화 주파수) 이상이 되어야 한다. 하지만 대역통과 표

본화 (BPS: bandpass sampling)는 아날로그 신호가 대역통과 신호인 경우에 Nyquist 표본화 주파수보다 낮은 주파수로 표본화하는 기술이다^[1]. 대역통과 신호를 낮은 주파수로 표본화하면 원 신호보다 낮은 주파수 영역에도 신호 스펙트럼이 복제되어 나타난다. 이러한 현상을 이용하면 주파수 하향 변환기를 별도로 사용하지 않고 표본화 과정만으로도 스펙트럼을 기저 대역으로 하향 변환시킬 수 있다. 이 결과 수신기 구조가 간단해지고 하드웨어 크기 및 소모 전력을 줄일 수 있는 장점이 있다^[2]. 단, 대역통과 스펙트럼들이 복제될 때 동일 주파수 상에서 서로 겹치는 현상이 발생하지 않아야 한다. 만약 이들이 겹치면 서로 aliasing 간섭 성분으로 작

* 학생회원, ** 평생회원, 한남대학교 정보통신공학과 (Department of Information and Communication Engineering, Hannam University)

© Corresponding Author (E-mail: baek@hnu.kr)

※ 이 논문은 2010년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음

접수일자: 2013년2월15일, 수정완료일: 2013년6월20일

용되어 원래의 스펙트럼을 추출할 수 없게 된다.

Aliasing 현상이 발생한 경우에 간섭 성분을 제거하기 위하여 2차 BPS 시스템이 도입되었다^[3]. 이는 2개의 동일한 표본화기를 사용한다. 두 표본화기는 서로 간의 표본화 시점을 시간차 T_Δ 로 유지한다. BPS 표본화에 의하여 aliasing 현상이 발생하더라도 표본화된 두 신호를 신호처리 한 후 합산함으로써 간섭 성분을 제거할 수 있다. 이 과정에서 신호 위상을 조절하기 위하여 interpolant 필터를 사용한다. SDR (software defined radio) 및 CR (cognitive radio) 등에서와 같이 수신 신호를 동적으로 가변해야 할 필요성이 증대되면서 BPS 간섭 성분 제거 문제가 더욱 중요하게 되었다. 이에 2차 BPS 시스템 구성 및 interpolant 필터의 설계에 대한 연구가 진행되고 있다^[4~7].

본 논문에서는 2차 BPS 시스템에 대하여 다중 대역 interpolant 필터를 제안한다. 이는 BPS에 의한 aliasing 간섭 신호가 여러 개의 아날로그 주파수 대역으로부터 만들어진 경우에 이들을 한꺼번에 제거할 수 있는 필터이다. II장에서는 BPS 시스템에 대한 개념을 설명하고, III장에서는 다중 대역 interpolant 필터 설계 방안들을 제시하였다. IV장에서는 제안된 각각의 방법에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 다중 대역 간섭 제거 기능을 확인하였다. 그리고 V장에서 결론을 맺었다.

II. BPS 시스템

대역 통과 신호 $r(t)$ 의 스펙트럼을 $R(f)$ 라 하자. 이에 대한 1차 BPS 시스템의 구조 및 신호 스펙트럼은 그림 1과 같다.

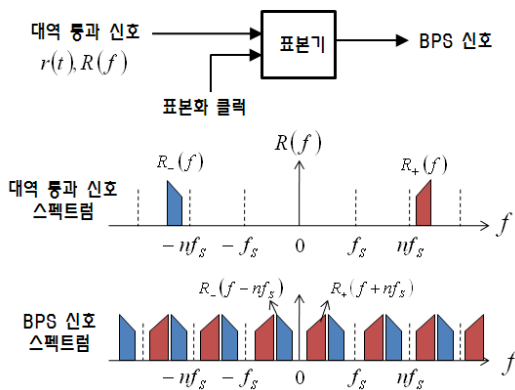


그림 1. 1차 BPS 시스템 구조 및 신호 스펙트럼
Fig. 1. System structure and signal spectrum for the 1st-order BPS.

표본화 주기를 T_S sec라 하면, 표본화 주파수는 $f_s = 1/T_S$ Hz이고, 표본화 클럭 함수는 $\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_S)$ 이 된다. 표본화 과정은 입력 신호와 표본화 클럭 함수를 곱하는 것이다. 따라서 표본화 출력인 BPS 신호의 시간 함수는 $\sum_{k=-\infty}^{\infty} r(kT_S)\delta(t - kT_S)$ 이 되며, 그 스펙트럼은 $f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(f - kf_s)$ 이 된다. 즉 BPS 신호 스펙트럼은 $R(f)$ 가 f_s 간격으로 무한히 반복되는 모습이다. $R(f)$ 의 스펙트럼은 주파수 범위 $nf_s + [-f_s/2, f_s/2]$ 에 제한되어 있으며, 양의 주파수 영역과 음의 주파수 영역의 함수를 각각 $R_+(f)$, $R_-(f)$ 라 하자. 이들이 기저 대역 주파수 영역 $[-f_s/2, f_s/2]$ 에 복제된 스펙트럼은 각각 $R_+(f + nf_s)$, $R_-(f - nf_s)$ 가 된다. 그림 1의 BPS 신호 스펙트럼에서 표현된 바와 같이, 복제된 스펙트럼의 주파수 대역이 서로 겹치지 않는다면 표본화 자체만으로 주파수 하향 변환이 이루어진다.

그림 2는 2차 BPS 시스템의 신호처리 모델을 나타낸 것이다.

동일한 표본기를 2개 사용하고 있으며, 표본기-B는 표본기-A보다 표본화 시점이 T_Δ 만큼 늦은 위상으로 작동한다. 이 관계를 신호처리 모델에서는, 두 표본기의 표본화 클럭을 동일하게 놓는 대신에 표본기-B는 $r(t + T_\Delta)$ 를 표본화하는 것으로 표현하였다. 두 표본기 출력 스펙트럼을 각각 $R_A(f)$, $R_B(f)$ 라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$R_A(f) = f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(f - kf_s) \tag{1}$$

$$R_B(f) = f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(f - kf_s) e^{j2\pi(f - kf_s)T_\Delta} \tag{2}$$

BPS 신호의 기저 대역에서 $R_+(f + nf_s)$ 를 수신하려 한다 하자. 이 스펙트럼이 $R_-(f - nf_s)$ 혹은 또 다

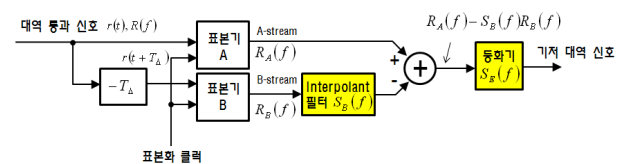


그림 2. 2차 BPS 시스템 신호처리 모델
Fig. 2. Signal processing model of the 2nd-order BPS.

른 신호의 복제 스펙트럼과 겹치면 aliasing 현상이 발생한다.

Aliasing을 유발하는 간섭 신호는 주파수 범위가 $mf_s + [-f_s/2, f_s/2]$ 라고 할 때, 이것이 기저 대역으로 복제된 간섭 성분을 제거하려면 표본기-B 출력에 대한 interpolant 필터 특성 $S_B(f)$ 를 다음과 같이 설정한다.

$$S_B(f) = e^{-j2\pi(f+mf_s)T_\Delta} \quad (3)$$

Interpolant 필터 출력을 A-stream 출력에서 빼주면 다음을 얻는다.

$$R_A(f) - S_B(f)R_B(f) = f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(f - kf_s) [1 - e^{-j2\pi(k+m)f_s T_\Delta}] \quad (4)$$

수신하고자 하는 성분 $R_+(f + nf_s)$ 항에는 $[1 - e^{j2\pi(n-m)f_s T_\Delta}]$ 의 복소수가 곱해져 나타난다. 이를 보상하기 위하여 등화기는 다음과 같이 설정한다.

$$S_E(f) = [1 - e^{j2\pi(n-m)f_s T_\Delta}]^{-1} \quad (5)$$

예를 들어 self-aliasing을 제거하는 경우를 보자. 이것은 $R_-(f - nf_s)$ 에 의하여 간섭 현상이 발생하는 것을 말한다. 이때에는 식 (3)에서 $m = -n$ 으로 놓으면 된다. 그 결과 식 (4)의 우변에서 $R(f - nf_s)$ 가 있는 항, 즉 $k = n$ 번 째 항의 계수가 0이 되고, 이로써 $R_-(f - nf_s)$ 성분이 제거됨을 알 수 있다.

III. 다중 대역 interpolant 필터

식 (3)의 interpolant 필터는 주파수 범위 $mf_s + [-f_s/2, f_s/2]$ 으로부터 aliasing 복제된 간섭 신호만 제거하였다. 본 논문에서는 간섭 성분이 없는 경우 혹은 여러 주파수 대역으로부터 간섭 성분이 유입된 경우에 대한 interpolant 필터 설계법을 제안한다. 이를 다중 대역 interpolant 필터라고 부르기로 한다. 이것은 BPS 신호의 기저 대역에서, 주파수 영역별로 제거하고자 하는 간섭 신호 성분에 맞추어 interpolant 필터 및 등화기 필터 특성을 설정하는 방법이다.

1. 제거해야 할 간섭 신호가 없는 경우
2. 제거해야 할 특정한 간섭 신호가 존재하지 않는 경우

에는 수신하고자 하는 $R_+(f + nf_s)$ 항의 세기를 증대시키도록 interpolant 필터를 다음과 같이 설정한다.

$$S_B(f) = -e^{-j2\pi(f+nf_s)T_\Delta} \quad (6)$$

그러면 두 BPS 신호의 연산 결과는 다음과 같다.

$$R_A(f) - S_B(f)R_B(f) = f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(f - kf_s) [1 + e^{-j2\pi(k+n)f_s T_\Delta}] \quad (7)$$

우변에서 $k = -n$ 번 째 항의 $R_+(f + nf_s)$ 항의 크기는 $|1 - e^{j2\pi(k+n)f_s T_\Delta}|$ 의 최대값인 2가 된다. 그러므로 등화기 필터는 다음과 같이 설정한다.

$$S_E(f) = 1/2 \quad (8)$$

식 (7)에서 $k \neq -n$ 인 나머지 항들은 복제 스펙트럼들이 겹쳐져서 합성된 것들인데, 모두 간섭 성분으로 작용한다. 이들은 아날로그 신호 스펙트럼 $R(f)$ 에서 주파수 대역이 서로 다르기 때문에 통계적으로 서로 독립적이라고 볼 수 있다.

식 (6)을 적용한 2차 BPS 시스템 출력의 신호 성분 대 간섭 성분비를 SIR_2 라 하면 다음과 같다.

$$SIR_2 = \frac{4E\{|R(f+nf_s)|^2\}}{\sum_{\substack{k=-\infty, \\ (k \neq -n)}}^{\infty} E\{|R(f-kf_s)[1 + e^{-j2\pi(k+n)f_s T_\Delta}]\|^2\}} \quad (9)$$

이에 비하여 1차 BPS 시스템 출력의 신호 성분 대 간섭 성분비 SIR_1 은 식 (1)로부터 다음과 같다.

$$SIR_1 = \frac{E\{|R(f+nf_s)|^2\}}{\sum_{\substack{k=-\infty, \\ (k \neq -n)}}^{\infty} E\{|R(f-kf_s)|^2\}} \quad (10)$$

식 (6)을 적용함으로써 얻게 된 신호 대 간섭 성분비의 증대 비율은 다음과 같다.

$$\frac{SIR_2}{SIR_1} = \frac{4 \sum_{\substack{k=-\infty, \\ (k \neq -n)}}^{\infty} E\{|R(f-kf_s)|^2\}}{\sum_{\substack{k=-\infty, \\ (k \neq -n)}}^{\infty} E\{|R(f-kf_s)[1 + e^{-j2\pi(k+n)f_s T_\Delta}]\|^2\}} \quad (11)$$

만약 $R(f)$ 는 $[K_1f_s - f_s/2, K_2f_s + f_s/2]$ 주파수 대역으로 제한되었고 (단 $K_1 \leq n \leq K_2$), $R_+(f)$ 외에 AWGN (가산성 백색 가우스 잡음)만 섞여 있다 하면,

식 (11)은 다음과 같다.

$$\frac{SIR_2}{SIR_1} = \frac{4(K_2 - K_1)}{\sum_{\substack{k=-K_2 \\ (k \neq -n)}}^{-K_1} E\{|1 + e^{-j2\pi(k+n)f_s T_\Delta}\|^2\}} \quad (12)$$

이 값은 $(K_2 - K_1)$ 값의 증대에 따라 2로 수렴하는 것으로 나타났다. 그러므로 2차 BPS를 적용함으로써 신호 품질을 점진적으로 3dB까지 개선할 수 있다.

2. 다중 대역으로부터 간섭 신호가 유입된 경우

$r(t)$ 에는 수신하고자 하는 신호 성분 외에 간섭 신호가 여러 대역으로부터 유입되는 경우에 대한 것이다. 여러 간섭 신호들은 모두 BPS 신호의 기저 대역으로 복제되어 $R_+(f + nf_s)$ 성분과 합성된다. 간섭 신호의 복제 스펙트럼들 사이는 서로 주파수 대역 겹침이 발생하지 않고, $R_+(f + nf_s)$ 성분과의 일대일 겹침만 발생한다고 가정한다. 이 경우는 다중 대역의 간섭 성분을 한꺼번에 제거하기 위하여 interpolation 필터를 다음과 같이 설정한다.

$$S_B(f) = e^{-j2\pi(f + m_i f_s) T_\Delta}, \quad f \in F_i \subset [-f_s/2, f_s/2] \quad (13)$$

여기서 F_i 는 i 번째의 간섭 신호 스펙트럼이 $m_i f_s + [-f_s/2, f_s/2]$ 주파수 대역으로부터 기저 대역으로 aliasing 복제되는 주파수 영역을 가리킨다. 다중 대역으로부터 여러 개의 간섭 성분이 존재하더라도 각자의 기저 대역 주파수 영역별로 interpolation 필터 특성을 유지하면 식 (4)에 의하여 이들은 모두 개별적으로 제거된다.

두개의 BPS stream에 대한 신호처리로 간섭 성분이 제거된 결과는 수신하고자 하는 성분 $R_+(f + nf_s)$ 항에 기저 대역 주파수 영역 F_i 별로 $[1 - e^{j2\pi(n - m_i)f_s T_\Delta}]$ 의 복소수가 곱해진 모습이다. 그러므로 이를 보상하기 위하여 등화기 필터는 기저 대역 주파수 영역별로 다음과 같이 설정한다.

$$S_E(f) = [1 - e^{j2\pi(n - m_i)f_s T_\Delta}]^{-1}, \quad f \in F_i \subset [-f_s/2, f_s/2] \quad (14)$$

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 간섭 제거 기능 확인

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다중 대역 interpolant 필터의 동작을 확인하고 간섭 성분 제거 기능을 확인한다. 대역 통과 아날로그 신호 $r(t)$ 의 발생 모델은 그림 3과 같다. 수신하려는 신호 성분 외에 간섭 신호가 2개, 백색 가우스 잡음 신호를 발생하며, 각각 선택적으로 합성되도록 하였다. 아날로그 신호 발생 표본화 주파수는 3GHz로 하였다.

그리고 수신기 처리 과정은 그림 2와 같다. BPS 표본화 주파수 f_s 는 100MHz, 표본기 사이의 시차는 $T_\Delta = 0.2T_s$ 로 설정하였다. 아날로그 신호별 특성은 표 1에 요약하였다. 수신하려는 신호의 펄스 속도를 더 높게 설정함으로써 수신하려는 신호와 2개의 간섭 신호 사이의 스펙트럼 겹침 현상을 뚜렷하게 볼 수 있도록 하였다. 또한 간섭 신호의 세기는 수신하려는 신호보다 12dB 및 6dB 더 높게 설정함으로써 간섭 신호 제거 효과를 시각적으로 확인할 수 있도록 하였다. 식 (13)에 표기된 신호 성분별 BPS 주파수 지수 값은 각각의 반송파 주파수를 f_s 로 나눈 정수 값으로서, $n = 10$, $m_1 = 9$, $m_2 = 12$ 가 된다.

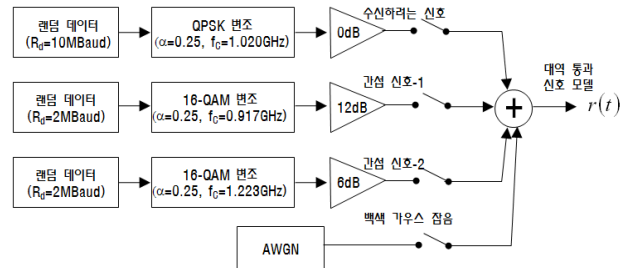


그림 3. 대역 통과 신호 발생 모델

Fig. 3. Model of the bandpass signal generation.

표 1. 아날로그 신호의 특성

Table 1. Features of the analog signals.

아날로그 신호 변수	수신하려는 신호	간섭신호-1	간섭신호-2
중심주파수	1.020 GHz	0.917 GHz	1.223 GHz
변조방식	10Mbaud QPSK	2Mbaud 16-QAM	2Mbaud 16-QAM
전송 전력	0dB	12dB	6dB
roll-off 지수	0.25	0.25	0.25
BPS 주파수 지수	$n=10$	$m_1=9$	$m_2=12$

1. 수신하려는 신호에 잡음만 섞인 경우

수신하려는 신호에 AWGN 잡음만 섞인 경우에 대하여 실험하였다. Interpolant 필터는 식 (6), 등화기 필터

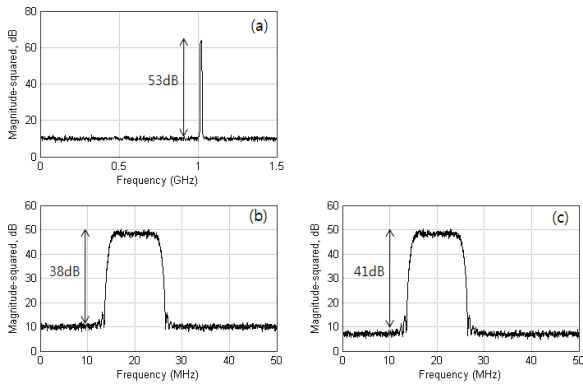


그림 4. 잡음이 섞인 경우의 스펙트럼 측정. (a) 아날로그 신호. (b) BPS 신호. (c) 등화기 출력 신호
Fig. 4. Spectrum measurements for the case of added noise. (a) analog signal. (b) BPS signal. (c) equalizer output signal.

는 식 (8)을 적용하였다. 신호처리 과정의 스펙트럼은 그림 4와 같다.

그림 (a)는 $r(t)$ 의 스펙트럼이다. 수신하려는 신호와 백색 잡음은 전력 밀도가 약 53dB 차이가 나는 것으로 측정되었다. 그림 (b)는 이 신호에 대한 1차 BPS 신호의 스펙트럼이다. 식 (1)에 따라 잡음의 스펙트럼이 겹쳐지고, 이 결과 신호와 잡음의 전력 밀도 차이는 15dB 축소되어 약 38dB로 나타났다. 시뮬레이션 상에서 스펙트럼 겹침은 총 30회 발생하였으므로 이론적 축소량은 $10\log_{10}30 = 14.8\text{dB}$ 가 된다. 그림 (c)는 2차 BPS 신호 처리를 완료한 결과의 스펙트럼이다. 신호와 잡음의 전력 밀도 차이는 그림 (b)보다 3dB 증대되어 41dB로 나타났다. 2차 BPS 시스템은 1차 BPS에 비하여 신호의 품질을 3dB 개선할 수 있음을 확인하였다.

2. 수신하려는 신호에 2개의 간섭 신호가 섞인 경우
수신하려는 신호에 2개의 간섭 신호가 섞인 경우에 대하여 실험하였다. Interpolant 필터는 식 (13), 등화기 필터는 식 (14)를 적용하였다. 신호처리 과정의 스펙트럼은 그림 5와 같다.

그림 (a)는 $r(t)$ 의 스펙트럼이다. 수신하려는 신호와 2개의 간섭 신호의 성분이 모두 나타나고 있다. 그림 (b)는 1차 BPS 신호의 스펙트럼이다. 수신하려는 신호와 간섭 신호의 스펙트럼이 겹쳐져서 aliasing 현상이 발생하였다. 간섭 신호의 전력은 수신하려는 신호보다 각각 12dB 및 6dB 더 크게 나타나고 있다. 그림 (c)는 간섭 성분을 제거한 후의 $R_A(f) - S_B(f)R_B(f)$ 스펙트럼을 나타낸 것이다. 간섭 신호의 주파수 영역 F_i 구간

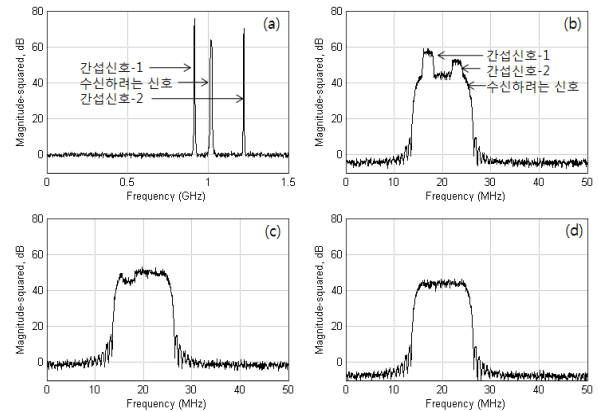


그림 5. 다중 대역 간섭 신호가 섞인 경우의 스펙트럼 측정. (a) 아날로그 신호. (b) BPS 신호. (c) 간섭 성분 제거 후의 신호. (d) 등화기 출력 신호
Fig. 5. Spectrum measurements for the case of multiband interferences. (a) analog signal. (b) BPS signal. (c) interference cancelled signal. (d) equalizer output signal.

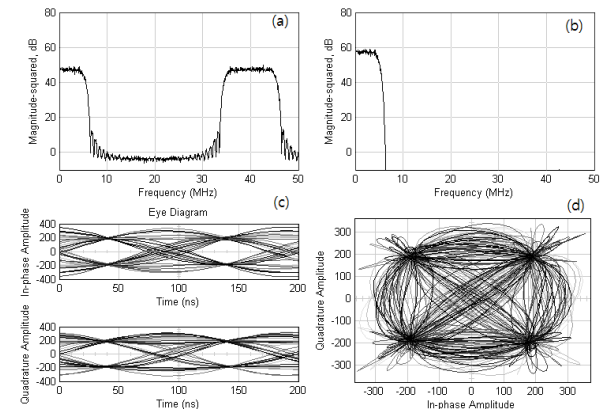


그림 6. 수신하려는 신호의 복조 과정 측정. (a) 복조 후 스펙트럼. (b) 제곱근 상승 여현 필터 처리 후의 스펙트럼. (c) 눈 모양. (d) 신호 궤적
Fig. 6. Measurements for the demodulation of the signal. (a) spectrum after demodulation. (b) spectrum after the square-root raised cosine filtering. (c) eye diagram. (d) signal trajectory

별로 세기가 변화되었음을 볼 수 있다. 그림 (d)는 등화기 출력 신호, 즉 2차 BPS 신호처리가 완료된 결과의 스펙트럼이다.

신호 수신 과정을 기저 대역에서 계속해서 진행한 것을 그림 6에 나타내었다.

그림 (a)는 복조 후 신호의 스펙트럼이다. 그림 5-(d)에서 수신하려는 신호는 20MHz 반송파에 변조되어 있으므로 이를 복조하면 0Hz와 40MHz를 중심으로 2개의 스펙트럼이 나타났다. 이 신호에 대하여 제곱근 상승 여현 필터 처리를 하여 그림 (b)를 얻었다. 그림 (c) 및

(d)는 복조가 완료된 QPSK 기저 대역 신호를 눈 모양 및 신호 궤적으로 관찰한 것이다. 4개의 신호점이 잘 구분되어 나타나고 있으므로 4진 데이터를 온전히 검출할 수 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

BPS 기술은 수신기에서 아날로그 하향 변환기를 생략하게 하여 부품 간소화, 성능 향상, 시스템 안정화 등의 효과를 얻도록 하는 기술이다. 더 나아가, SDR 및 CR과 같이 다중 대역, 다중 모드의 무선 서비스가 확대됨에 따라 시스템의 동적 재구성^[8] 및 유니버설 신호 수신 기능을 가능하게 하는 2차 BPS 기술의 필요성이 증대되고 있다.

이에 본 논문에서는 2차 BPS 시스템에 대하여 다중 대역 interpolant 필터를 제안하였다. BPS 처리에 의하여 야기된 aliasing 간섭 신호가 여러 개 발생하는 경우에 이들을 한꺼번에 제거할 수 있는 필터 설계 방안을 제시하였다. 그리고 간섭 신호가 존재하지 않는 경우에 대해서도 신호의 품질을 3dB 향상시킬 수 있는 필터 설계 방안을 제시하였다. 또한 각 경우에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 결과 제시한 설계 방안이 타당함을 확인하였다.

앞으로 interpolant 필터의 구현 기법 및 필터의 복잡도를 고려한 간섭 제거 성능 분석을 계속 연구할 필요가 있다.

REFERENCES

- [1] Rodney G. Vaughan, Neil L. Scott, and D. Rod White, "The theory of bandpass sampling," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 39, no. 9, pp.1973-1984, Sept. 1991.
- [2] G. Hueber and R. B. Staszewski, *Multi-Mode/Multi-Band RF Transceivers for Wireless Communications*, John Wiley & Sons, 2011.
- [3] A. Kohlenberg, "Exact interpolation of band-limited functions," *J. Appl. Phys.*, vol. 24, no. 12, Dec. 1953.
- [4] Hyung-jung Kim, Jin-up Kim, Jae-Hyung Kim, Hongmei Wang, and In-Sung Lee, "The design method and performance analysis of RF subsampling frontend for SDR/CR receivers," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no. 5, pp.1518-525, 2010.
- [5] Hyung-jung Kim, Jin-up Kim, Jae-Hyung Kim, Hongmei Wang, and In-Sung Lee, "RF band-pass sampling for multiband access CR/SDR receiver," *ETRI Journal*, vol. 32, no. 2, pp.214-221, 2010.
- [6] Yi-Ran Sun and Svante Signell, "Analysis and implementation of uniform quadrature bandpass sampling," *IEEE SIPS 2005*, pp.137-142, Athenes, Greece, Nov. 2005.
- [7] Hyung-Jung Kim, *Study and implementation of a BPS receiver for SDR/CR*, Ph. D. Dissertation, Chungbuk National University, 2010.
- [8] Jongsik Kim and Hyunchol Shin, "Design considerations for cognitive radio based CMOS TV white space transceivers," *ISOC 2011 Conference*, IEEK, pp.238-241, 2011.

저 자 소 개



김 혁(학생회원)
2011년 한남대학교 정보통신
공학과 학사 졸업.
2013년 한남대학교 대학원
정보통신공학과
석사 졸업.

<주관심분야 : 이동통신, 신호처리>



백 제 인(평생회원)
1978년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1980년 KAIST 산업전자공학과
석사 졸업.
1986년 KAIST 전기및전자공학과
박사 졸업.

1984년~1988년 ETRI TDX개발단 선임연구원
1988년~현재 한남대학교 정보통신공학과 교수
<주관심분야 : 디지털변복조, 디지털필터>