

논문 2007-44SC-3-10

# GPS 수신기 간섭 제거를 위한 적응 IIR 노치 필터 설계

(Design of an adaptive IIR notch filter to reject the interference in GPS Receiver)

임 덕 원\*, 이 건 우\*, 박 찬 식\*\*, 황 동 환\*\*\*, 이 상 정\*\*\*

(Deok Won Lim, Geon Woo Lee, Chansik Park, Dong-Hwan Hwang, and Sang Jeong Lee)

## 요 약

GPS 신호는 수신 전력이 매우 낮으며, 민간용 신호의 경우에는 신호 구조가 잘 알려져 있어서 고의적 혹은 비고의적인 간섭에 취약하다. 많은 간섭 제거 기법이 연구되고 있으며 그 중에서 ATF가 상관전 처리 기법으로 널리 사용되고 있다. 그러나 ATF는 노치 폭과 관련된 설계 변수가 없어서 간섭을 제거하더라도 주변 주파수에 스펙트럼 손실을 가져온다. 반면 IIR 노치 필터는 노치 폭과 관련된 설계 변수가 있어서 CW 간섭에 대하여 매우 예리한 노치를 생성할 수 있으므로 스펙트럼 손실을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 적응 알고리즘을 적용할 수 있는 구조의 IIR 노치 필터를 제시하고, 소프트웨어 신호발생기와 실제 측정치를 이용하여 성능을 평가하였으며, IIR 필터의 SNR 손실이 FIR 필터에 비하여 5dB 정도 작은 것을 확인하였다.

## Abstract

GPS signal is vulnerable to intentional and unintentional interferences since it has a very weak signal power and its structure is well-known. Among the interference rejecting techniques, the ATF is being generally used as a pre-correlation technique. However, it does not have a design parameter relating to the notch width, resulting in the spectral loss around frequency of the interference. The IIR notch filter has a design parameter relating to the notch width and can generate a sharp notch for the CW interference. In this paper, an adaptive IIR notch filter is proposed and the performance is evaluated using software signal generator and real measurements.

**Keywords :** GPS, Notch filter, Interference, Jamming, ATF

## I. 서 론

GPS 신호는 매우 작은 전력(-160dBW)으로 수신될 뿐만 아니라 민간용 신호(C/A 코드)는 신호 구조가 공공연히 알려져 있는 상태여서 고의적이거나 비고의적인 간섭에 매우 취약하다. 따라서 이를 제거하기 위한 기법들이 활발히 연구 중에 있으며, 일반적으로 안테나

기법, 상관전 기법, 상관후 기법으로 분류한다<sup>[1]</sup>.

이 중에서 안테나 기법이 가장 좋은 성능을 보이지만 하드웨어적인 비용이나 크기 등의 제약 조건이 있어 군사용에 주로 사용되며, 민간용 수신기에서는 비용과 성능 측면을 모두 고려하여 상관전 기법이 가장 적합하다고 알려져 있다<sup>[1]</sup>. 상관전 처리 기법으로 적응 횡단 필터(ATF: Adaptive Transversal Filter)가 널리 이용되고 있지만 ATF는 FIR(Finite Impulse Response) 필터가 갖는 고유 특성상 노치 폭에 대한 설계 변수가 없어서 노치 폭을 최적화할 수 없으므로 간섭 주변 대역에 대한 신호 손실이 발생한다. 반면에 IIR(Infinite Impulse Response) 필터의 경우에는 노치 깊이와 노치 폭에 대한 설계 변수를 독립적으로 가지고 있으므로 CW(Continuous Wave)와 같은 간섭에 대해서도 매우 예리한 노치를 생성할 수 있어 GPS 신호의 손실을 줄

\* 충남대학교 전자공학과  
(Department of Electronics Engineering, Chungnam National University)

\*\* 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부  
(School of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University)

\*\*\* 충남대학교 전기정보통신공학부  
(School of Electrical and Computer Engineering, Chungnam National University)

접수일자: 2006년8월10일, 수정완료일: 2007년4월20일

일 수 있다. 그러나 IIR 필터의 경우, ATF에서처럼 일반적인 적응 알고리즘을 적용하기 어렵다는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 GPS 수신기에서의 간섭 제거를 위한 IIR 노치 필터를 설계하고 적응 알고리즘을 적용할 수 있는 구조를 제시하였다, 또한 CW 간섭이 인가되었을 경우 소프트웨어 신호발생기와 실제 측정치를 이용하여 FIR 필터와 제시한 IIR 필터의 특성을 비교하고, JSR(Jamming to Signal Ratio)에 따른 SNR(Signal to Noise Ratio) 손실 등을 분석하여 제시한다.

### II. FIR 필터와 설계 변수

2차 FIR 필터의 경우에 전달함수는 분자다항식만으로 표현되고 영점(Zero)이 켈레복소수 관계가 있으므로 전달함수를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 이 때, 설계 변수는  $a$ 와  $w_0$ 이다<sup>[2]</sup>.

$$H(z) = (1 - ae^{jw_0}z^{-1})(1 - ae^{-jw_0}z^{-1}) \tag{1}$$

$$= 1 - 2a \cos(w_0)z^{-1} + a^2z^{-2}$$

여기서 설계 변수에 따른 영점 위치의 특성이 그림 1과 같다.

노치 폭을 구하기 위하여  $w_0$ 를 기준으로 주파수 오프셋( $\delta w$ )을 포함하여 전달함수를 구하면 식 (2)와 같다.

$$H(e^{j(w_0 + \delta w)}) = (1 - ae^{jw_0}e^{-j(w_0 + \delta w)})(1 - ae^{-jw_0}e^{j(w_0 + \delta w)}) \tag{2}$$

$$= 1 - 2a \cos(\delta w) + a^2$$

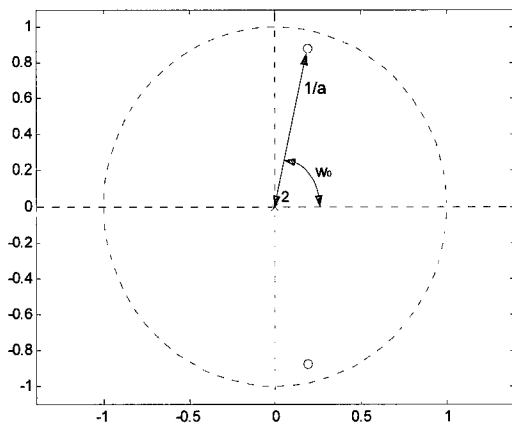


그림 1. FIR 필터의 설계 변수에 따른 영점 위치  
Fig. 1. Zero location according to a design parameter.

이때, 노치 폭을 DC 전력보다 3dB 작은 지점으로 가정하면 식 (3)과 같은 방정식을 유도할 수 있다.

$$H(e^{j(w_0 + \delta w)}) = \frac{1}{2}H(e^{j0}) \tag{3}$$

$$1 - 2a \cos(\delta w) + a^2 = \frac{1}{2}(1 - 2a \cos(w_0) + a^2)$$

위 식으로부터 설계 변수에 따른 노치 폭을 구하면 식 (4)와 같다.

$$N.W \equiv 2|\delta w| = 2\cos^{-1}\left(\frac{1 + 2a\cos(w_0) + a^2}{4a}\right) \tag{4}$$

노치 깊이를 구하기 위하여 위의 전달함수에서  $z = e^{jw_0}$ 일 때의 응답을 구하면 식 (5)와 같다.

$$N.D \equiv H(e^{jw_0}) = (1 - ae^{jw_0}e^{-jw_0})(1 - ae^{-jw_0}e^{jw_0}) \tag{5}$$

$$= (1 - a)(1 - ae^{-j2w_0})$$

$$= (1 - a)[1 - a \cos(2w_0)] + j(1 - a) \sin(2w_0)$$

위 식은 복소 계수를 가지므로 크기만을 고려하면 다음과 같다.

$$Mag(N.D) = \sqrt{\{(1 - a)[1 - a \cos(2w_0)]\}^2 + \{(1 - a) \sin(2w_0)\}^2} \tag{6}$$

$$= \sqrt{a^4 - 4\cos^2(w_0)a^3 + [8\cos^2(w_0) - 2]a^2 - 4\cos^2(w_0)a + 1}$$

위 식(4), 식(6)에서 알 수 있듯이, 각 설계 변수는 노치 깊이뿐만 아니라 폭에도 영향을 미치므로 큰 전력의 간섭이 인가되면 노치의 폭이 넓어져서 신호의 스펙트럼 손실을 가져온다.

### III. 적응 IIR 노치 필터 설계

IIR 필터에 대한 전달함수로 식 (7)과 같은 모델을 이용한다<sup>[2]</sup>.

$$H(z) = \frac{(1 - re^{jw_0}z^{-1})(1 - re^{-jw_0}z^{-1})}{(1 - \alpha re^{jw_0}z^{-1})(1 - \alpha re^{-jw_0}z^{-1})} \tag{7}$$

$$= \frac{1 - 2r \cos(w_0)z^{-1} + r^2z^{-2}}{1 - 2\alpha r \cos(w_0)z^{-1} + \alpha^2r^2z^{-2}}$$

그런 다음, 아래 그림 2와 같은 격자(Lattice) 필터 구조에 기초하여 전달함수를 구하면 식 (8)과 같다<sup>[3]</sup>.

$$H(z) = \frac{1 + (k_0 + k_0k_1)z^{-1} + k_1z^{-2}}{1 + (a_0 + a_0a_1)z^{-1} + a_1z^{-2}} \quad (8)$$

이 전달함수가 노치 필터의 전달함수가 되기 위해서는 식 (9)와 식 (10)의 두 조건을 만족시켜야 한다.

$$a_0(1 + a_1) = \alpha k_0(1 + k_1) \quad (9)$$

$$a_1 = \alpha^2 k_1 \quad (10)$$

위 조건으로부터 식 (11)을 유도할 수 있으며,

$$a_0 = \frac{\alpha k_0(1 + k_1)}{1 + \alpha^2 k_1} \quad (11)$$

논문에서 제시된 근사화를 통하여 식 (12)와 같은 전달함수를 얻을 수 있다.

$$H(z) = \frac{1 + 2k_0z^{-1} + k_1z^{-2}}{1 + k_0(1 + a_1)z^{-1} + a_1z^{-2}} \quad (12)$$

여기서,  $k_0 = -\cos(w_0)$ ,  $w_0 = \frac{1.134}{5.714} \times 2\pi$ 이고  $a_1$ 은 노치 폭,  $k_1$ 은 노치 깊이와 관련이 있는 변수이다. 따라서 적당한 노치 폭을 갖도록  $a_1$ 을 고정시킨다면,  $k_0$ 는 분자식에도 있으므로 ATF에서처럼 적응 알고리즘을 적용할 수 있다. 본 논문에서는  $a_1$ 값으로 0.9를 설정하였으며, 적응 알고리즘으로는 ATF에서 사용하던 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 사용하였다. 이때, 탭 계수(Tap-weight) 벡터를 업데이트하기 순환 관계식이 식 (13)과 같다<sup>[4]</sup>.

$$\hat{w}(n+1) = \hat{w}(n) + \mu \hat{u}(n)e(n) \quad (13)$$

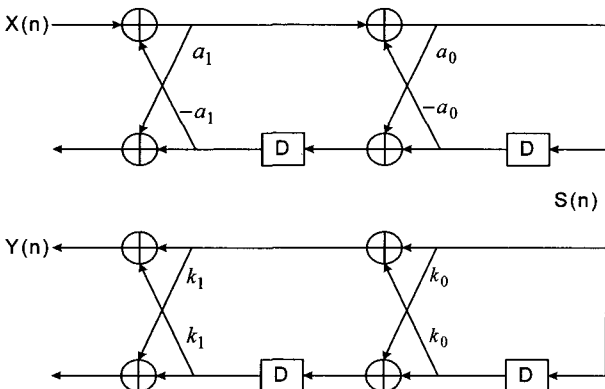


그림 2. 격자(Lattice) 구조 필터  
Fig. 2. Lattice Filter Structure.

여기서,  $\hat{w}$ 는 탭 계수 벡터이고,  $u(n)$ 는 입력 벡터,  $y(n) = \hat{w}^H(n)u(n)$ ,  $e(n) = d(n) - y(n)$ ,  $u$ 는 스텝 간격이다.

#### IV. 플랫폼 구성 및 성능 평가

성능 평가를 위한 실험 플랫폼 구성이 그림 3과 같다. 입력 신호로서 소프트웨어 기반에서 생성한 IF 신호와 하드웨어 수집 장치로부터 저장한 IF 신호를 고려하였으며, 필터링한 신호를 GPS 소프트웨어 수신기로 처리하여 성능을 분석하였다. 여기서 소프트웨어 IF 신호발생기와 하드웨어 수집장치, GPS 소프트웨어 수신기는 간섭 제거 필터의 성능 분석을 위하여 자체적으로 개발하였다.

소프트웨어 기반의 GPS IF 신호 발생기의 구조는 그림 4와 같다. 이때 샘플 클럭은 5.714MHz이고 GPS 반송파의 중심주파수는 1.134MHz이며, CW 간섭의 중심주파수는 1.184MHz이다. 또한 실제 GPS 신호를 모사

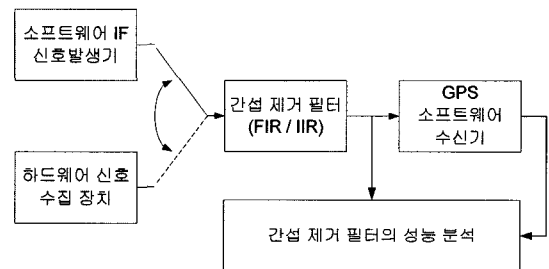


그림 3. 성능 평가용 플랫폼 구성  
Fig. 3. Platform to evaluate the performance.

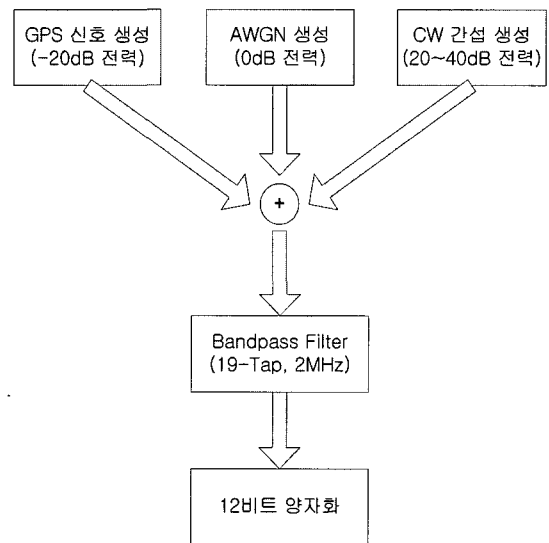


그림 4. 소프트웨어 IF 신호 발생기 구조  
Fig. 4. A structure of the software IF signal generator.

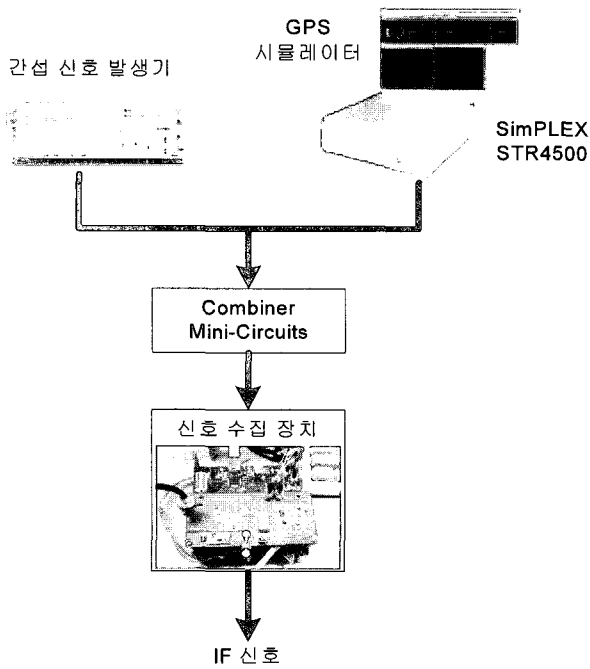


그림 5. 하드웨어 수집 장치를 이용한 IF 신호 저장  
 Fig. 5. A structure of the software IF signal generator.

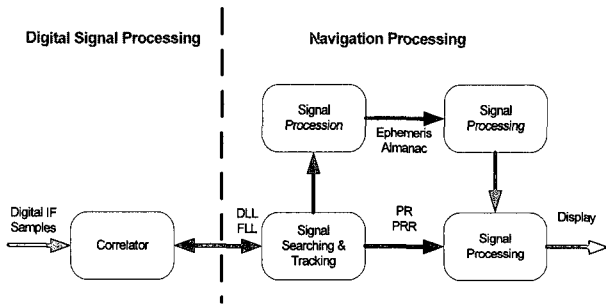


그림 6. 소프트웨어 IF 신호 발생기 구조  
 Fig. 6. A structure of the software IF signal generator.

하기 위하여 2MHz의 대역폭을 갖는 19탭의 대역통과 필터(Band-pass Filter)를 설계하였으며, 하드웨어 수집 장치와 동일한 특성을 갖도록 16비트 양자화를 구현하였다.

모사 신호가 아닌 실제 신호를 가지고 성능을 분석하기 위하여 그림 5와 같이 하드웨어 수집 장치의 입력으로 GPS 신호와 함께 CW 간섭을 인가하였으며, 인가한 GPS 신호와 CW 간섭은 각각 Spirent社의 STR4500 GPS 시뮬레이터와 Hewlett Packard社의 E4432B 신호 발생기를 이용하여 발생하였다.

필터 출력 신호를 처리하기 위하여 개발한 GPS 소프트웨어 수신기의 태스크 구조는 그림 6과 같으며, 기능적인 면에서 디지털 신호처리부와 항법데이터 처리부로 나눌 수 있다. 디지털 신호처리부의 기능은 입력 신호와 복제(Replica) 신호를 상관하여 항법데이터와 측정치

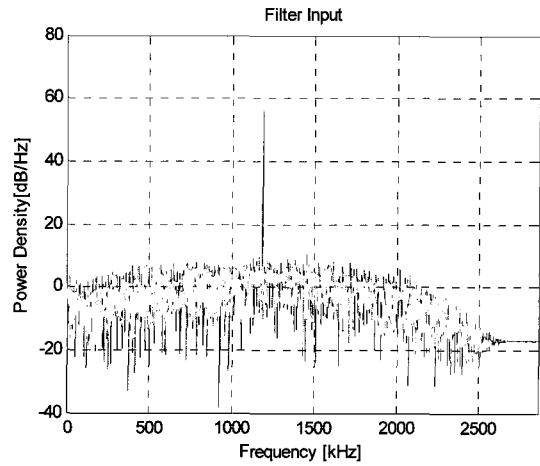


그림 7. 필터 입력 신호의 스펙트럼  
 Fig. 7. The spectrum of filter input.

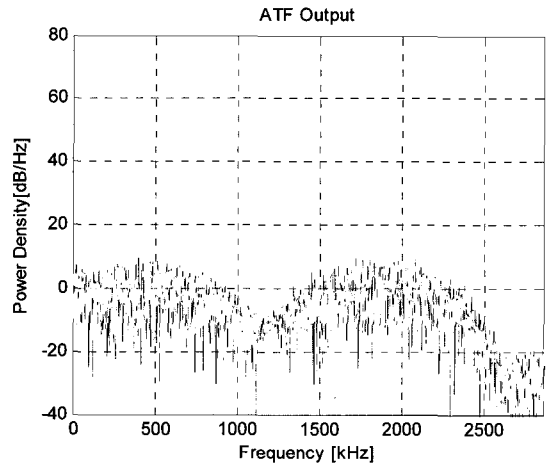


그림 8. FIR 필터 출력 신호의 스펙트럼  
 Fig. 8. The spectrum of FIR filter output.

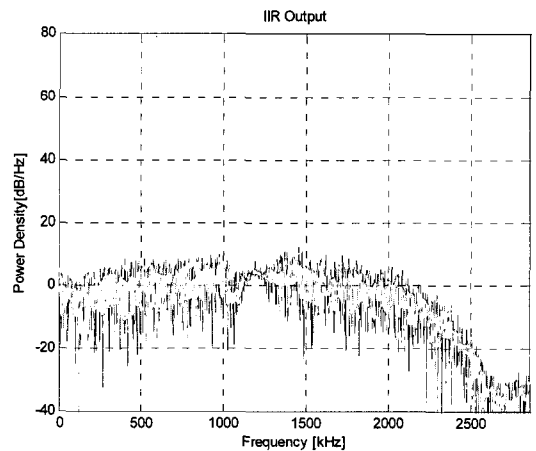


그림 9. IIR 필터 출력 신호의 스펙트럼  
 Fig. 9. The spectrum of IIR filter output.

를 출력하며, FLL과 DLL에 측정치를 전달하는 것이다. 항법데이터 처리부는 입력된 항법데이터와 측정치를 이

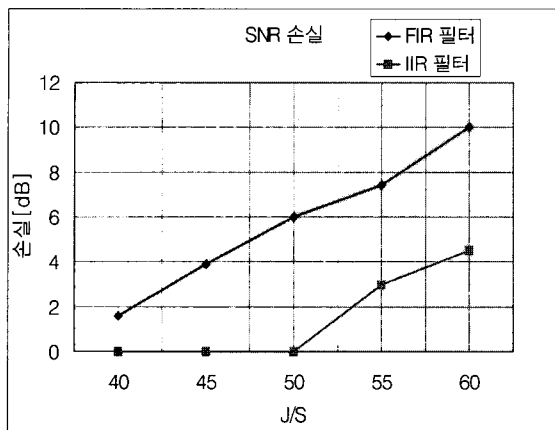


그림 10. SNR 손실 비교

Fig. 10. The comparison of SNR loss between filters.

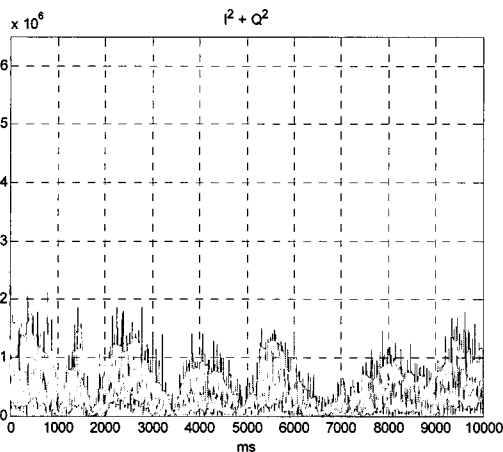


그림 11. FIR 필터 출력의 상관 전력

Fig. 11. Correlation power of FIR filter output.

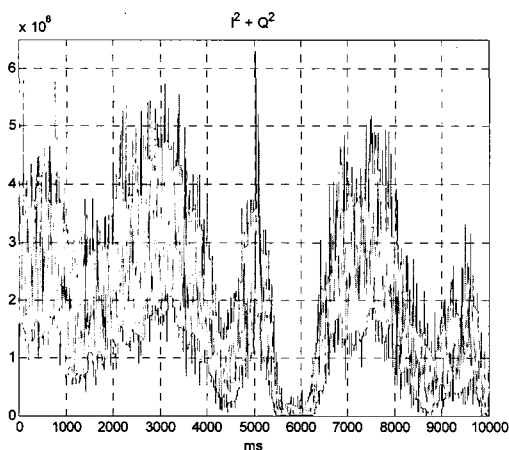


그림 12. IIR 필터 출력의 상관 전력

Fig. 12. Correlation power of IIR filter output.

용하여 신호를 추적하고 항법을 수행하는 것이다. 본 논문에서는 항법 성능이 아닌 신호 손실 정도에만 착안 하였으며, 필터의 노치 특성과 상관값을 가지고 성능

분석을 수행하였다.

CW 간섭의 간섭 대 신호 전력비(JSR)가 40dB일 때 16비트 양자화 된 신호의 스펙트럼이 그림 7과 같다. 그림 7과 같은 신호를 ATF 필터링한 출력 신호는 그림 8과 같은 신호 스펙트럼을 갖고, 본 논문에서 제안한 적응 IIR 필터링을 한 출력 신호는 그림 9와 같은 스펙트럼을 갖는다. 이 때, 각 필터의 스텝 간격( $\mu$ )은 0.0005로 동일하게 설정하였다. 그림 8과 그림 9의 스펙트럼 특성이 실제 GPS 수신기의 SNR 손실에 미치는 영향은 그림 10과 같다. 그림 10을 분석한 결과, JSR이 50dB 이하인 경우에는 IIR 필터의 SNR 손실이 없었으며, JSR이 50dB 이상인 경우에는 IIR 필터의 SNR 손실이 FIR 필터보다 약 5dB 정도 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

또한, 실제 하드웨어로 수집한 신호를 가지고 신호 획득 및 추적 상태를 확인한 결과, 그림 10과 그림 11에서 보인 것처럼 IIR 필터가 FIR 필터보다 상관 전력이 높을 뿐만 아니라 획득 및 추적 상태도 더 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 GPS 수신기의 간섭 제거를 위한 IIR 노치 필터를 설계하고 IIR 필터에 적용 가능한 적응 알고리즘을 제시하였다, 또한 신호 획득 및 추적 상태와 SNR 손실 등을 기존의 ATF와 비교함으로써 노치 폭에 대한 설계 변수가 있는 IIR 필터의 성능의 우수성을 확인하였다. 본 논문에서는 3탭의 FIR, IIR 필터를 설계하여 CW 간섭에 대해서만 성능을 비교를 하였지만, 13탭 이상의 필터를 설계하여 CW 뿐만 아니라 FM, AM 등의 간섭에 대해서도 성능 평가를 진행 중이다.

## 참 고 문 헌

- [1] George Dimos, "Low-cost solution to narrowband GPS Interference Problem," *Proceedings of the IEEE 1995 National*, Vol. 1, pp. 145-153, 22-26 May 1995.
- [2] Vinay K. Ingle, John G. Proakis, *Digital Signal Processing using MATLAB*, Brooks/Cole, pp. 182-223, 2000.
- [3] Jun Won Choi and Nam Ik Cho, "Suppression of narrow-band interference in DS-spread spectrum system using adaptive IIR notch filter," *Signal Processing 2002*, Vol. 82, pp. 2003-2013, 2002.

[4] Simon Haykin, *Adaptive Filter Theory - Third Edition*, PRENTICE HALL, pp. 365-390, 1996.

— 저 자 소 개 —



임 덕 원  
2004년 충남대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2006년 충남대학교 대학원  
석사 졸업.  
2006년~현재 충남대학교 대학원  
박사 과정.

<주관심분야 : 소프트웨어 GNSS 수신기 설계>



이 건 우  
2002년 충남대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2004년 충남대학교 대학원  
석사 졸업.  
2004년~현재 충남대학교 대학원  
박사 과정.

<주관심분야 : ATF, 배열안테나 신호처리>



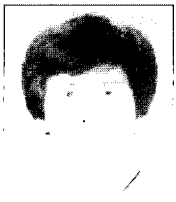
박 찬 식  
1984년 서울대 제어계측공학과  
학사 졸업.  
1986년 동 대학원 석사 졸업.  
1997년 동 대학원 박사 졸업.  
1997년~현재 충북대학교 전기  
전자컴퓨터공학부 부교수.

<주관심분야 : GNSS 신호처리>



황 동 환  
1985년 서울대학교 전기공학과  
학사 졸업.  
1987년 KAIST 전기및전자공학과  
석사 졸업.  
1991년 동대학원 박사 졸업.  
1996년~현재 충남대학교  
전기정보통신공학부 교수.

<주관심분야 : INS, GPS, 추정론>



이 상 정(정회원)  
1979년 서울대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
1981년 동 대학원 석사 졸업.  
1987년 동 대학원 박사 졸업.  
1988년~현재 충남대학교 전기  
정보통신공학부 교수.

<주관심분야 : 강인제어, GNSS>