

## FMCW 레이다에서 작은 간섭 신호의 효과적인 탐지 및 억제

## Effective Detection and Suppression of Low-Amplitude Interference in FMCW Radars

조병래 · 이정수 · 이종민 · 선선구

Byung-Lae Cho · Jung-Soo Lee · Jong-Min Lee · Sun-Gu Sun

## 요약

많은 레이다 시스템들이 주파수 밴드를 공유하여 동시에 운용될 때, 레이다 시스템 간 간섭은 불가피하게 발생한다. 간섭이 레이다 성능을 저하시킬 수 있기 때문에 간섭의 억제는 레이다 시스템에서 중요한 문제이다. 본 논문에서 STFT와 적응형 대역 저지 필터를 이용하여 간섭을 탐지하고 제거하는 방법을 제안하였다. 실제 FMCW 레이다를 이용하여 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

## Abstract

As many radar systems are simultaneously operated with overlapping frequency bands, interference between systems inevitably occurs. Because interference can degrade radar performance, suppression of interference is a critical issue in radar systems. In this letter, a new interference detection and suppression method using a short-time Fourier transform and an adaptive notch filter is proposed. An experiment is carried out to validate the proposed method and the results demonstrate that the proposed method is suitable for application in real FMCW radars.

Key words : FMCW Radar, Low-Amplitude Interference, Short-Time Fourier Transform, Adaptive Notch Filter

## I. 서론

많은 레이다 시스템들이 군사적이나 산업적 목적으로 여러 분야에 적용되어지고 있다. 최근에는 지상에서 운용되는 군사적 목적의 차량에 많은 레이다 센서들이 장착되고 있다<sup>[1]</sup>. 자율 주행을 위한 전방 관측 영상 레이다<sup>[2]</sup>나 고속 접근 표적을 탐지, 추적하는 레이다<sup>[1]</sup> 등이 그 실례다.

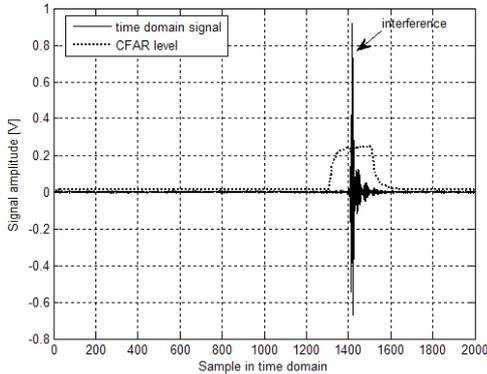
이런 레이다를 장착한 차량이 근거리에서 운용될 경우, 레이다 간 간섭이 발생하는 것은 당연하다<sup>[3]</sup>. 레이다 간 간섭을 제거하기 위한 방법으로 주파수 호핑 방법이나 시간 영역에서 간섭 신호를 감소시키

는 방법<sup>[3]</sup> 등이 소개되고 있다. 참고문헌 [3]에서 큰 신호의 간섭을 탐지하여 그 구간의 신호를 제거하여 간섭 신호를 억제하는 방법을 제안하였다. 그러나 작은 크기의 간섭 신호는 시간 영역에서 탐지하는 것이 어렵다. 그림 1은 참고문헌 [1]에서 소개한 레이다에 간섭이 발생하였을 때 수신 신호를 시간 영역에서 보여주고 있다. 그림 1(a)는 CW 파형에서 간섭이 발생하였을 때 수신 신호이며, 그림 1(b)는 LFM 파형에서 간섭이 발생하였을 때 수신 신호이다. 그림 1(a)의 CW 파형에는 광대역 간섭 신호를 인가하였으며, 그림 1(b)의 LFM 파형에는 협대역 간섭 신호를 인가하였다. 그림 1에서는 실선은 시간 영역에

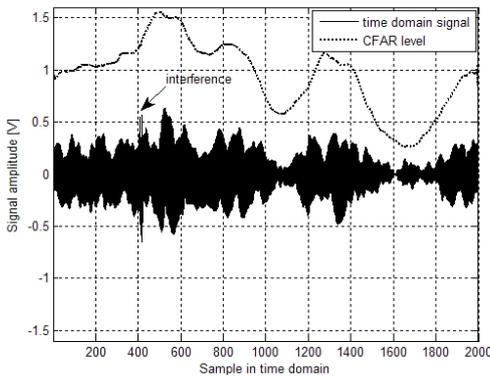
국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 17, 2012 ; Revised June 1, 2012 ; Accepted June 4, 2012. (ID No. 20120417-045)

· Corresponding Author : Sun-Gu Sun (e-mail : sgsun@add.re.kr)



(a) CW 파형에서 간섭 발생  
(a) Interference occurrence in CW region



(b) LFM 파형에서 간섭 발생  
(b) Interference occurrence in LFM region

그림 1. FMCW 레이더에서 간섭 신호 예  
Fig. 1. Examples of interference in real FMCW radars.

서 획득한 신호이며, 점선은 CFAR(Constant False Alarm Rate) 알고리즘을 이용하여 계산한 임계치이다. 그림 1(a)와 같이 간섭 신호의 크기가 크면 시간 영역에서의 CFAR 알고리즘에 의해 계산된 임계치보다 커서 간섭 신호를 쉽게 탐지할 수 있다. 그러나 그림 1(b)와 같이 간섭 신호의 크기가 상대적으로 작을 때는 시간 영역에서의 CFAR 알고리즘에 의해 계산된 임계치보다 작아서 간섭 신호를 탐지하기 쉽지 않다. 참고문헌 [3]에서 FMCW 레이더에 간섭이 발생할 경우, 수신된 신호의 주파수 전대역에 잡음 수준을 높여주는 특성을 보여주었다. 이런 특성을 이용하여 획득된 시간 영역 신호를 작은 구역으로 나눠 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform<sup>[4]</sup>(STFT) 과정) 후 스펙트럼의 잡음 수준을 계산한다. 간섭이 STFT 윈도우의 센터에 있을 때 STFT를 통해 계산된

스펙트럼의 크기 성분은 가장 큰 값을 가질 것이다. 이를 이용하면 작은 크기의 간섭을 탐지하는 데 효과적이다. 또한, raised cosine filter를 이용하여 설계한 적응형 대역 저지 필터를 이용하여 간섭 신호를 억제하는 방법을 제안하였다. 다음 장에 제안된 방법에 대해 자세히 설명하였으며, 실제 FMCW 레이더를 이용한 실험을 통해 성능을 검증하였다.

## II. 간섭 신호의 탐지 및 억제

### 2-1 STFT를 이용한 간섭 신호의 탐지

그림 1(a)를 보듯이 간섭 신호의 크기가 크면 간섭을 탐지하기 쉽다. 그러나 간섭 신호의 크기가 상대적으로 작으면 시간 영역에서 간섭을 탐지하기 어렵다. 이를 극복하기 위해서 STFT를 이용해 효과적으로 간섭 신호를 탐지하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 그림 1(b)의 신호에 적용하였으며, 방법은 다음과 같다.

- ① 시간 영역 신호를 여러 개의 조각으로 나눈다.
- ② 식 (1)과 같이 각 조각에 대해 푸리에 변환을 수행한다.

$$STFT(t, \omega) = \int s(t') WIN(t' - t) \exp\{-j\omega t'\} dt' \quad (1)$$

여기서  $s(t')$ 은 조각난 신호이고,  $WIN()$ 은 윈도우 함수이다. 그림 1(b)에 적용 시 조각의 크기는 200 샘플, 윈도우는 블랙만(Blackman)을 사용하였다. 그림 2는 조각 신호에 간섭이 존재할 경우와 존재하지 않을 경우의 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 2에서 보듯이 간섭이 존재하면 표적이 존재할 수 있는 스펙트럼 구간의 크기 성분이 커지는 것을 볼 수 있다.

- ③ 식 (1)을 통해 계산된 조각 신호의 스펙트럼에서 표적 구간의 평균값을 조사한다.
- ④ 각 조각 신호의 스펙트럼에서 표적이 존재하는 구간의 크기 성분의 변화량으로 간섭의 유무를 확인한다. 그 변화량(RAS: Ratio of Average of Spectrum)은 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$S_a^i = Mean_{f: f_1 \rightarrow f_2} [|S^i(f)|]$$

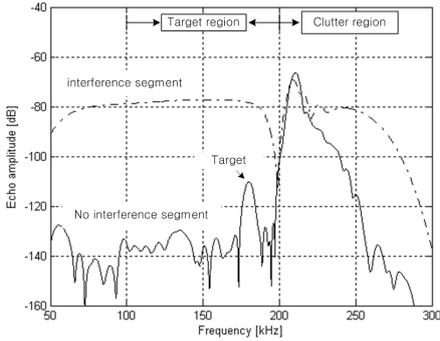


그림 2. 조각 신호에 간섭이 존재할 경우와 존재하지 않을 경우의 스펙트럼  
Fig. 2. Spectrum for interference and no interference segments.

$$RAS^i = \frac{S_a^i}{S_{a, No INT}} \quad (2)$$

여기서  $Mean[]$ 은 평균 연산자이며,  $S^i(f)$ 는 식 (1)을 통해 얻은  $i$ 번째 조각의 스펙트럼이며,  $f_1, f_2$ 는 스펙트럼 상에서 표적 영역의 첫 주파수와 끝 주파수이다. 그림 (2)에서는  $f_1, f_2$ 는 각각 100 kHz와 200 kHz이다.  $S_{a, No INT}$ 는 간섭이 존재하지 않을 때 스펙트럼에서 표적 구간의 평균값이다.

그림 3은 그림 1(b)의 신호에 제안된 방법을 적용하여 식 (2)와 같이 계산된 스펙트럼 크기 평균값의 변화량을 보여주고 있다. 간섭이 발생한 지점에서 RAS 값이 상대적으로 커짐을 알 수 있으며, 작은 크기의 간섭 신호를 탐지하는 데 효과적임을 알 수 있다.

### 2-2 적응형 대역 저지 필터를 이용한 간섭 신호 억제

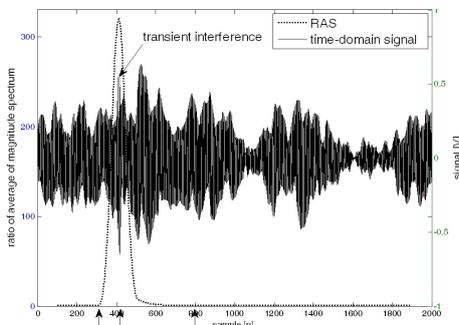


그림 3. 시간 영역 신호와 식 (2)에 의해 계산된 스펙트럼 크기 변화량  
Fig. 3. Time-domain signal and RAS calculated by Eq. (2).

STFT를 이용하여 간섭이 발생한 지점을 찾아낸 후 간섭이 발생한 지점을 '0'으로 바꾸지 않고 적응형 대역 저지 필터를 이용하여 간섭을 억제하였다. 적응형 대역 저지 필터는 raised cosine filter<sup>[5]</sup>를 이용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$h(n) = \begin{cases} 1 & , n \leq n_c - \alpha_1 N \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[ \frac{2\pi \frac{n - n_c}{\alpha_1 N} - \pi}{2} \right] \right\} & , n_c - \alpha_1 N < n \leq n_c \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 - \sin \left[ \frac{2\pi \frac{n - n_c}{\alpha_2 N} - \pi}{2} \right] \right\} & , n_c \leq n < n_c + \alpha_2 N \\ 1 & , n \geq n_c + \alpha_2 N \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 0과 1 사이 값을 가지는 roll-off 성분이다.  $N$ 은 측정된 시간 영역 신호의 길이이고,  $n_c$ 는 그림 3에서 보듯이 간섭이 발생한 지점이다.

그림 4는 제안된 적응형 대역 저지 필터를 설계하는 방법을 보여주고 있다.  $\alpha_1, \alpha_2$ 는  $|n_c - n_1|/N, |n_c - n_2|/N$ 라는 초기값을 가지도록 하였으며,  $n_1$ 과  $n_2$ 는 그림 3에서 보듯이 간섭이 시작하는 지점과 끝나는 지점이다. 적응형 대역 저지 필터의 파라미터 값을 정한 후 간섭이 발생한 신호에 적용하면 간섭을 억제할 수 있다.

### III. 시험 및 분석

제안된 방법의 성능을 검증하기 위하여 참고문헌

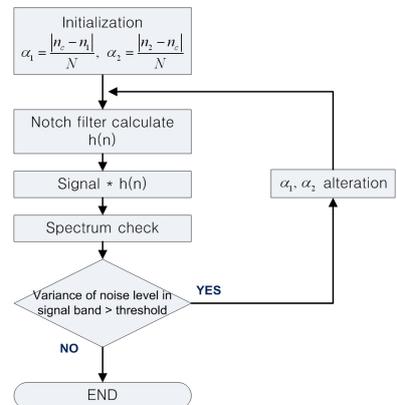


그림 4. 적응형 대역 저지 필터 설계 방법  
Fig. 4. Flowchart of an adaptive notch filter design method.

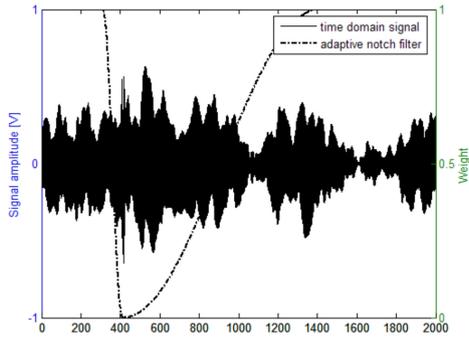


그림 5. 시간 영역 신호와 설계된 적응형 대역 저지 필터

Fig. 5. Time domain signal and adaptive notch filter calculated by Eq. (3).

[1]의 FMCW 레이더를 이용하여 시험을 수행하였다. 실제 시험은 국방과학연구소 시험장에서 수행하였다. 두 대의 레이더를 30 m 이격시킨 후 한 대의 레이더가 간섭 신호를 생성하게 하였다. 그림 1(a)는 CW 파형에서 간섭이 발생하였을 때 수신 신호이며, 그림 1 (b)는 LFM 파형에서 간섭이 발생하였을 때 수신 신호를 보여준다. 그림 3은 STFT를 이용하여 수신 신호에 비해 상대적으로 간섭 신호의 크기가 작을 때에도 효과적으로 간섭을 탐지함을 보여준다.

그림 4의 방법에 의해  $\alpha_1, \alpha_2$ 는 CW 파형에서는 0.025, 0.3으로 LFM 파형에서는 0.05, 0.5로 정하였다. 그림 5의 점선은 제안된 방법에 따라 그림 1(b)의 신호에 적용하여 설계된 적응형 대역 저지 필터이다. 그림 6에서 푸른색 점선은 간섭에 의해 오염된 신호의 스펙트럼이고, 붉은색 점선은 시간 영역 신호에 간섭으로 탐지된 부분을 '0'으로 대체하였을 때 스펙트럼이다. 검은색 실선은 시간 영역 신호에 제안된 대역 저지 필터를 곱한 후의 스펙트럼이다. 그림 6에서 표적의 신호 크기와 주위의 노이즈 레벨과의 차는 각각 3.15 dB, 8.05 dB, 25.76 dB이었으며, 간섭이 발생한 부분을 '0'으로 대체하는 것보다 대역 저지 필터를 적용하였을 때 표적 탐지에 더 효과적임을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

FMCW 레이더에서 간섭 신호를 효과적으로 탐지하고 억제하는 방법에 대해 제안하였다. 수신 신호

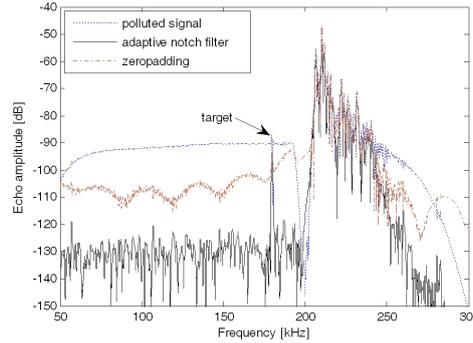


그림 6. 제안된 적응형 대역 저지 필터를 적용 후 스펙트럼 비교

Fig. 6. Spectrum comparison of the proposed adaptive notch filter with other approaches.

에 비해 상대적으로 작은 크기의 간섭 신호가 발생하였을 때 시간 영역에서 탐지하는 것이 어렵지만, STFT를 이용하여 작은 구역별 스펙트럼의 잡음 수준 변화율을 이용하면 효과적으로 탐지할 수 있음을 확인하였다. 또한, 수신 신호에 간섭이 발생한 부분을 '0'으로 대체하는 것보다 대역 저지 필터를 적용하면 더 효과적으로 간섭을 억제함을 실제 FMCW 레이더 시험을 통해 보여주었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. G. Sun, J. M. Lee, J. S. Lee, and B. L. Cho, "Ground-based radar interferometer for tracking fast approaching targets", *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 5, Iss. 4, pp. 398-404, 2011.
- [2] 선선구, 조병래, 박규철, 남상호, "무인 차량 탐제형 전방 관측 영상 레이더 가능성 연구", *한국전자과학회논문지*, 21(11), pp. 1285-1294, 2010년.
- [3] G. M. Brooker, "Mutual interference of millimeter-wave radar systems", *IEEE Trans. on Elec. Compa.*, vol. 49, pp. 170-181, 2007.
- [4] V. C. Chen, H. Ling, *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, Artech House, 2002.
- [5] B. L. Cho, Y. K. Kong, and Y. S. Kim, "Interpolation using optimum Nyquist filter for SAR interferometry", *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, vol. 19, no. 1, pp. 169-175, 2005.