

두 대의 FMCW 레이더에서 레이더간 상호 간섭 신호를 이용한 시간동기화 방법

Time Synchronization Using Mutual Interference in Two FMCW Radars

조병래 · 이정수 · 이종민 · 선선구

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

요 약

군사적 목적으로 많은 레이더들이 근거리에서 동시에 운용된다. 특히, 동종의 레이더가 동시에 운용될 경우 주파수 할당을 해야 한다. 많은 레이더가 동시에 운용될 때 일부 주파수를 공유하여야 하는데, 부득이하게 레이더 시스템 간 간섭이 발생하게 된다. 레이더간 간섭은 성능을 저하시킬 수 있기 때문에, 간섭 신호의 억제는 중요한 문제이다. 본 논문에서는 두 대의 FMCW 레이더간 간섭 신호를 분석하고, 간섭 신호를 이용하여 레이더간 시간 동기화 방법을 제안하였다. 실제 레이더 시스템을 통해 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

Abstract

In military applications, many radar systems are simultaneously operated at a close range. In particular, the frequency allocation must be executed for operating the homogeneous radar systems at the same time. 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, we analyze the interference between two FMCW radars. In addition, time synchronization method between radars using mutual interference is proposed. Experiments are carried out to validate the proposed method. The results demonstrate that the proposed method is suitable for real radar systems.

Key words : FMCW Radar, Mutual Interference, Time Synchronization

I. 서 론

많은 레이더 시스템들이 군사적이나 산업적 목적으로 여러 분야에 적용되어지고 있다. 최근에는 지상에서 운용되는 군사적 목적의 차량에 많은 레이더 센서들이 장착되고 있다^[1].

레이더 센서를 장착한 차량이 근거리에서 운용될 경우 레이더간 간섭이 발생하는 것은 당연하다^[2]. 레이더간 간섭을 제거하기 위한 방법으로 주파수 호핑

방법이나 시간 영역에서 간섭 신호를 감소시키는 방법^[2] 등이 소개되고 있다. 주파수 호핑 방법은 운용되는 레이더가 몇 대 되지 않을 경우 가능하지만 한정된 주파수 밴드 내에서 여러 대의 레이더가 동시에 운용될 경우, 이 방법 만으로 간섭을 해결할 수는 없다. 또한, 시간 영역에서 간섭 신호를 감소시키는 방법은 완벽하게 간섭 신호를 제거하기 힘들며, 그 경우 신호대잡음비가 나빠지는 현상이 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 제안된 것이 GPS(Global

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received August 21, 2012 ; Revised September 28, 2012 ; Accepted October 4, 2012. (ID No. 20120821-096)

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

Positioning System) 신호를 이용하여 여러 대의 레이 다간 동기를 맞추는 방법이 제안되고 있다^[3]. 그러나 GPS 신호에 대해 방해 전파를 사용하였을 경우, 레이 다간 동기화를 장담할 수 없게 된다. 특히, 근거리에서 사용되는 FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더의 경우 동기화가 되지 않으면 동종의 레이더간 간섭이 발생할 것이다.

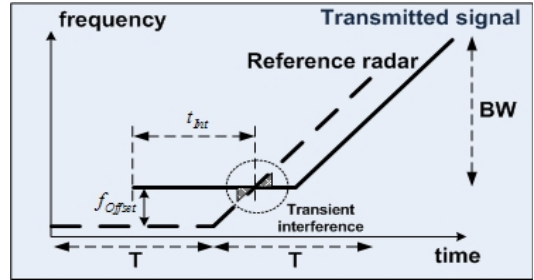
본 논문에서는 두 대의 FMCW 레이더간 간섭 신호를 이용하여 시간 동기화하는 방법^[4]을 제안하였다. 이 방법은 송신 파형을 CW-LFM(Continuous Wave-Linear Frequency Modulation) 형태로 전환, 레이더간 간섭 신호의 발생 지점 계산, 클럭 신호 조정, 파형 복귀의 순으로 수행된다. 제안된 방법은 근거리에서 많은 동종 FMCW 레이더가 운용되는 환경에 적용 가능하다^[4]. 다음 장에 그 방법과 실험을 통한 결과를 보여준다.

II. 간섭 신호를 이용한 동기 방법

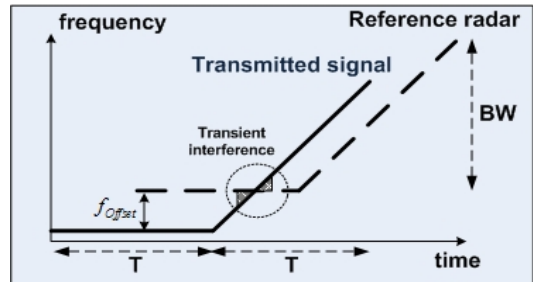
그림 1은 f_{Offset} 만큼의 주파수 이격을 한 2대의 CW-LFM 파형을 가지는 FMCW 레이더가 동기가 맞지 않아 발생하는 간섭의 3가지 경우를 보여주고 있다. 그림 1(a)는 CW 구간에 다른 FMCW 레이더의 송신 LFM 파형이 수신되어 간섭이 발생하는 경우이며, 그림 1(b)는 LFM 구간에 다른 FMCW 레이더의 송신 CW 파형이 수신되어 간섭이 발생하는 경우이다. 그림 1(c)는 LFM 구간에 다른 FMCW 레이더의 송신 LFM 파형이 수신되어 마치 표적 신호처럼 나타나는 간섭의 경우를 보여주고 있다.

그림 2는 두 대의 FMCW 레이더간 상호 간섭 신호를 이용하여 동기화하는 방법의 전체적인 흐름도이다. 먼저 GPS 시스템의 사용 유무를 판단한다. GPS 시스템이 사용 가능하면 GPS의 PPS(Pulse Per Second) 신호를 이용하여 시스템 간 동기화를 수행한다. GPS 시스템이 불가할 경우, 다음의 방법으로 두 대의 FMCW 레이더간 시간 동기화를 수행한다.

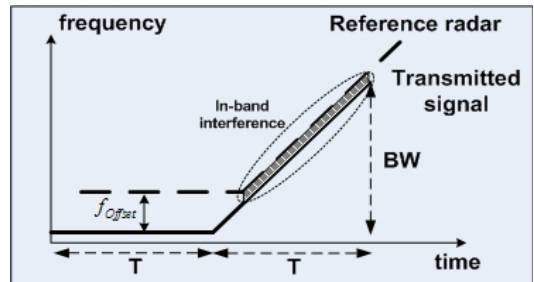
- ① FMCW 레이더의 송신 파형을 CW-LFM 형태로 전환한다.
- ② STFT^[5](Short Time Fourier Transform)를 이용하여 간섭 발생 유무를 판단한다.
- ③ 간섭 유형을 파악하고 유형에 따라 동기화 과



(a) CW 구간에 간섭이 발생한 경우
(a) Transient interference in the CW region



(b) LFM 구간에 간섭이 발생한 경우
(b) Transient interference in the LFM region



(c) 신호 대역에 간섭이 발생한 경우
(c) In-band interference

그림 1. 두 대의 CW-LFM 파형의 FMCW 레이더간 상호 간섭의 경우

Fig. 1. Three cases of mutual interference between two FMCW radars using CW-LFM waveform.

정을 수행한다.

- ④ 동기화가 완료되면 CW-LFM 파형을 원래의 파형으로 변환한다.

간섭 유형이 그림 1(a)와 같이 CW 구간에 간섭이 발생한 경우, 식 (1)과 같이 두 레이더 사이의 비동기 시간을 계산한다.

$$t_{Async} = T - t_{Int} + \frac{f_{Offset}}{BW} T \quad (1)$$

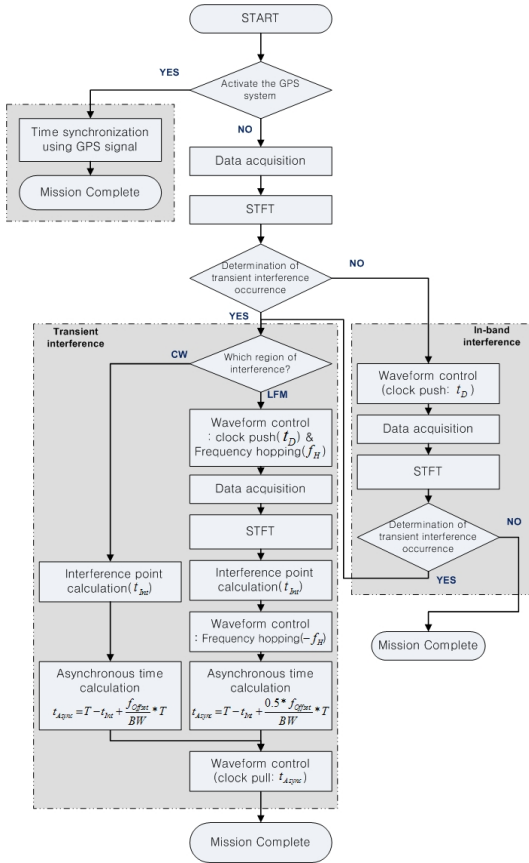


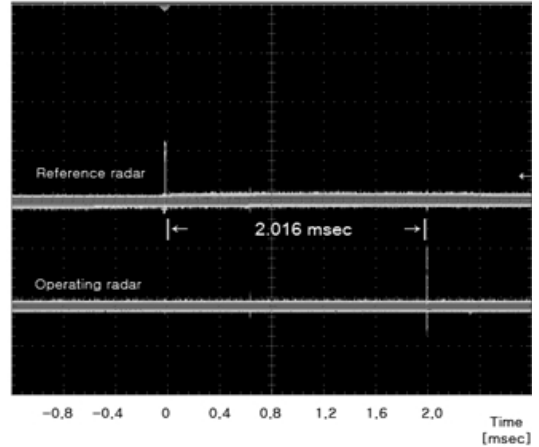
그림 2. FMCW 레이다간 상호 간섭 신호를 이용한 시간 동기화 방법 흐름도

Fig. 2. Overall flowchart of the time synchronization method between two FMCW radars using mutual interference.

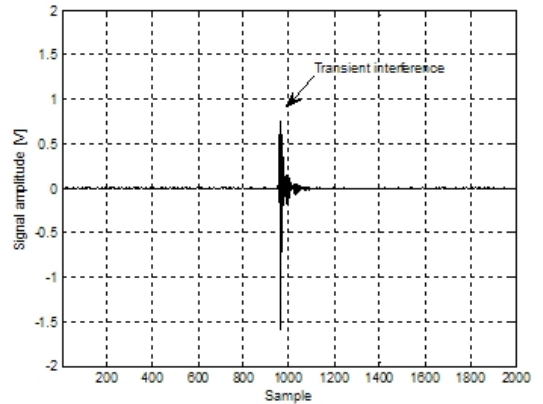
여기서 T 는 변조 시간, BW 는 변조폭이다. f_{Offset} 은 두 레이다 사이의 주파수 오프셋이고, t_{Int} 는 STFT를 이용해 탐지한 간섭의 발생 시점이다.

간섭 유형이 그림 1(b)와 같이 LFM 구간에 간섭이 발생한 경우 다음과 같이 비동기 시간을 계산한다.

- ① 간섭이 CW 구간에 발생하도록 송신 파형을 조정한다. 이를 수행하기 위해 클럭을 $t_D = T/2$ 만큼 지연시키고, 주파수를 $f_H = 1.5 \times f_{Offset}$ 만큼 호핑시킨다.
- ② STFT를 이용하여 간섭이 발생한 시점 t_{Int} 을 계산한다.
- ③ 주파수를 $-f_H$ 만큼 호핑시킨다.
- ④ 식 (2)를 이용하여 두 레이다간 비동기 시간을



(a) 동기화 전 두 레이다의 기준 클럭 차이
(a) Clock difference of two radars before synchronization



(b) CW 구간에서 간섭이 발생하였을 때 수신 신호
(b) Received signal having transient interference in the CW region

그림 3. 동기화 방법을 적용하기 전 두 레이다의 기준 클럭과 수신 신호

Fig. 3. Reference clocks and received signal before synchronization between two radars.

계산한다.

$$t_{Async} = T - t_{Int} + \frac{0.5 \cdot f_{Offset}}{BW} T \quad (2)$$

간섭 유형이 그림 1(c)와 같이 신호 대역에 간섭이 발생하여 표적처럼 인식되는 경우에는 송신 파형의 클럭을 $t_D = T/2$ 만큼 지연시키면서 간섭이 CW 구간이나 LFM 구간에 발생하도록 한다. 그리고 간섭이 발생한 유형에 따라 앞에서 언급한 방법을 수행하면 된다. 3대 이상의 레이다가 동시에 운용될

경우, 기준 레이더를 이용하여 순차적으로 위의 방법을 수행한다^[4].

III. 시험 및 분석

제안된 방법의 성능을 검증하기 위하여 참고문헌 [1]의 FMCW 레이더 두대를 이용하여 시험을 수행하였다. 실제 시험은 국방과학연구소 시험장에서 수행하였다. 두 대의 레이더를 30 m 이격시킨 후 두 대의 레이더에 GPS 시스템을 무능화시켰다. 두 레이더의 주파수 오프셋은 8 MHz이고, 변조 비율(BW/T)은

20×10^9 Hz/s로 하였다. 그림 3(a)는 동기화 전 두 레이더의 기준 클럭을 보여주고 있다. 기준 클럭은 오실로스코프로 측정하였으며, 대략 2.016 ms였다. 그림 3(b)는 동기를 맞추려는 레이더의 CW 구간에 간섭이 발생한 것을 보여주고 있다.

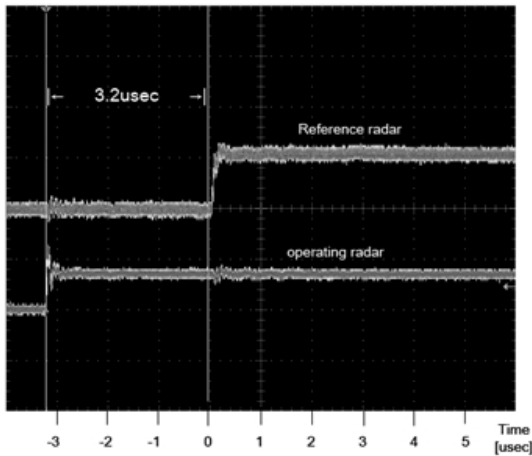
제안된 시간 동기 방법을 수행 후 두 레이더의 비동기 시간은 그림 4(a)와 같이 약 $3.2 \mu\text{s}$ 였다. 이 값은 실제 적용 시 무시할 정도이다. 그림 4(b)는 동기를 맞추려는 레이더의 CW 구간에 간섭이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

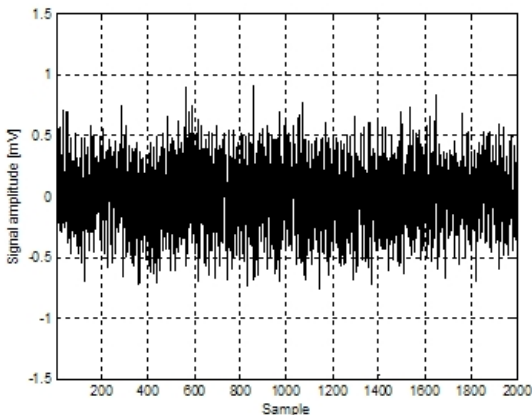
본 논문에서는 두 대의 FMCW 레이더간 시간 동기 방법을 제안하였다. FMCW 레이더의 파형을 CW-LFM 파형으로 변경하고, 간섭이 발생하는 구간에 따라 비동기 시간을 계산하는 방법을 제안하였다. 실제 CW-LFM 파형을 사용하는 FMCW 레이더를 이용한 시험을 통해 제안된 방법을 검증하였다. GPS 시스템이 동작하지 않을 때 동종의 FMCW 레이더간 시간 동기화에 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [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] G. M. Brooker, "Mutual interference of millimeter-wave radar systems", *IEEE Trans. on Elec. Compa.*, vol. 49, pp. 170-181, 2007.
- [3] H. Yulin, Y. Jiangyu, and X. Jintao, "Synchronization technology of bistatic radar system", *IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings*, vol. 4, pp. 2219-2221, 2006.
- [4] 조병래, 신상진, 선선구, 이정수, 이종민, "주파수 변조 연속파 레이더에서 간섭 제거를 위한 시스템 간 동기화 방법", 대한민국특허청, 특허번호 10-1135982, 2012년.
- [5] 조병래, 이정수, 이종민, 선선구, "FMCW 레이더에서 작은 간섭 신호의 효과적인 탐지 및 억제", *한국전자과학회논문지*, 23(7), pp. 848-851, 2012년 7월.



(a) 동기화 후 두 레이더의 기준 클럭 차이
(a) Clock difference of two radars after synchronization



(b) 두 레이더가 동기화된 후 수신 신호
(b) Received signal after synchronization between two radars

그림 4. 동기화 방법을 적용한 후 두 레이더의 기준 클럭과 수신 신호

Fig. 4. Reference clocks and received signal after synchronization between two radars.