

다중차량의 자동 주행 시의 레이더 상호간섭 억제

정회원 최병철*, 김용철*

Suppression of mutual interference among vehicular radars by ON-OFF control of pulses

Byeong Cheol Choi*, Yong Cheol Kim* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 지능형 차량에서 사용하는 레이더 센서 사이의 상호 간섭 억제 방법을 제안한다. 이 연구는 표준화된 펄스형 레이더에서 동기형 간섭 신호의 억제 방안에 관한 것이다. 레이더 펄스의 방사는 ON-OFF 제어되며, OFF 구간에서 수신된 간섭 신호는 각 레인지 별로 분석되어 저장되며 이를 이용하여 ON 구간에서의 거짓 반사파의 위치를 예측하며, 이로써 ON 구간에서의 동기형 간섭 신호를 제거한다. I-Q 변복조 방식의 레이더 시스템에서, Rayleigh 분포와 Rician 분포의 잡음에서의 오경보 확률과 미탐지 확률을 유도하였다. 펄스 신호 유무의 판별 시의 임계값을 적응적으로 조절함으로써 오경보 확률은 감소시키고 미탐지 확률의 저하를 억제하는 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션 결과 오경보 확률은 최고 10⁴배 감소하였고 미탐지 확률의 저하는 무시할 정도였다.

ABSTRACT

Intelligent vehicles are equipped with radar sensors for collision avoidance. We present a method of suppressing mutual interference among pulse-type radars, where all the radars are standardized. We developed a method of separating the true self-reflection from the false one by controlling the pulse emission of a radar in an orthogonal ON, OFF pattern. Interference signal identified in OFF-intervals is recorded to indicate the positions of the expected ghosts in ON-intervals. P_{FA} and P_M are derived for a radar system with I-Q demodulation scheme, where Gaussian noise alone is Rayleigh-distributed and Gaussian noise plus reflected radar pulse are Rician-distributed. The value of the threshold adaptively updated in order to prevent the deterioration of P_M . In the experimental result, P_{FA} decreases by an order of 10,000, when compared with the conventional M of N majority voting method.

1. 서 론

차량 레이더는 1970년대 초부터 연구되어 왔는데, 레이더 신호 처리에 관한 연구들은 대부분 단일 차량 상태에서의 자동 주행에 관한 것이어서, 레이더 센서 신호의 처리 또는 정보 융합 등이 주된 연구의 대상이었다. 그러나, 여러 대의 차량이 동시에

움직일 때는, 단일 차량만의 자동 주행 상태에서는 문제되지 않던 차량 레이더 사이의 간섭이 새로운 문제로 나타나게 된다.

펄스형 차량 레이더가 부착된 여러 대의 차량이 도로에서 동시 운행될 때 발생하는 상호 간섭 현상을 그림 1에 나타내었다.

이 경우에 방사되는 레이더 펄스와 이동 차량과 고정된 물체로부터의 반사 신호들을 그림 2에 나타

* 서울시립대학교 전자전기공학부 로봣비전연구실 (bcchoi@ee.uos.ac.kr, yckim@uoscc.uos.ac.kr)

논문번호 : 99356-0906, 접수일자 : 1999년 9월 6일

※ 본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수과제 연구지원사업에 의하여 수행되었습니다.

내었다. PRF(펄스 반복 주파수: pulse repetition frequency)가 수 kHz 이상일 경우에는 차량들의 상대적인 위치는 수 개의 펄스 구간동안 거의 변하지 않는다. 차량에서 볼 때, 검은 색의 펄스는 실제의 장애물로부터의 참 반사파이고, 흰색의 펄스는 거짓 반사파로서 실제로는 차량 B의 레이더 펄스의 반사파이다. 장애물을 정확히 판별하기 위해서는 참 반사파와 거짓 반사파를 분리해야 하는데, 이들의 발생 패턴이 모두 일관성 있게 주기적으로 나타나므로, 참 반사파와 거짓 반사파를 구별하기가 매우 어렵다. 이 논문에서는 이와 같은 간섭 신호를 IS (interference synchronized)의 약어로 표현한다. IS 신호를 제거하는 것이 이 연구의 목적으로서, 다중 차량간의 자동 주행 상태에서의 간섭을 억제하는 방법을 제안하고 그 탐지 성능을 전통적인 M of N 방법의 성능과 비교하였다. 또한 임계값을 적응적으로 설정할 수 있는 방법을 제안하고 시뮬레이션에서 구체적으로 설명하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 기존의 간섭 억제 방법들의 적용 가능성을 연구하고, 3장에서 새로운 간섭 억제 방법을 제안한다. 4장에서 이의 성능을 분석하고 5장에서 제안된 방법의 실험 결과를 보이고 6장에서 결론을 맺는다.

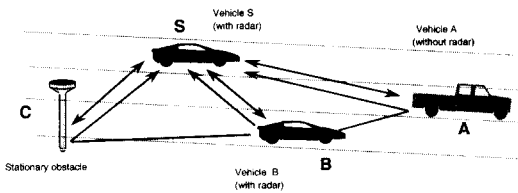


그림 1. 차량의 상호 간섭

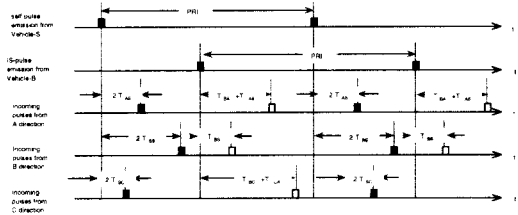


그림 2. 차량 펄스의 방사와 반사

II. 기존의 간섭 억제 방법

이 장에서는 대표적인 기존의 레이더 간섭 억제

방법들의 특징을 서술하고, 이러한 방법들을 동기형 레이더 간섭 신호의 억제에 활용하는 것이 가능한지 여부를 서술한다.

2.1 레이더 간섭 및 재밍 신호 억제 방법

대표적인 간섭 억제 방법으로는 랜덤 잡음에 효과적인 펄스 압축, 부호 변조 등의 방법과, 고의적인 재밍 신호에 대한 대전자전 방식, 다수결 투표 방식의 M of N 방식, 적응적 임계값을 사용하는 CFAR (constant false alarm rate)방법 등이 있다 [2,3,9].

펄스 압축 방법은 선형 주파수 변조된 송신 펄스를 방사하는 방식이며, 수신된 반사 신호를 주파수에 대해 선형적 지연 시간 특성을 갖는 필터를 통과시키면, 신호가 시간 축 상의 한 점으로 압축되어 고 분해능의 펄스를 얻을 수 있으며, 간섭 신호도 억제된다.

부호 변조 방식에서는 레이더 펄스를 랜덤 수열로 부호 변조하며, 수신부에서는 동일한 랜덤 수열의 정합 여파기로서 원하는 신호를 얻는다. 이 방식은 대역 확산 방식을 레이더 펄스에 적용한 것으로서, 신호 대역폭은 증가하나, 간섭 및 재밍 신호를 억제할 수 있다

전자전에서 흔히 사용하는 RGPO (range gate pull-off) 방법에서는, 매 펄스 주기마다 상대방의 레이더로부터 받은 레이더 펄스를 증폭하여 적당한 시간 지연 후 방사하여 동기형 펄스 재밍 신호를 생성하여 상대방 레이더의 거리 측정 기능을 방해한다. 이에 대한 대전자전적 대응책으로는 수신 신호의 leading edge의 위치를 추적하는 방법을 사용한다.

M of N 방식은 레이더 펄스를 N 회 방사했을 때, 반사파를 탐지한 횟수가 M 회 이상인지를 판별하여 목표물을 탐지하는 방식이다. N 회의 펄스 방사는 각각 다른 펄스 간격 혹은 다른 변조 주파수로써 행해져, 매 펄스마다 수신된 간섭 신호의 특성이 독립적이 되도록 한다. 이렇게 여러 수신 펄스를 종합함으로써 간섭 신호의 파워를 상대적으로 줄일 수 있다.

CFAR 방법에서는 입력 신호의 잡음의 에너지의 크기에 따라 임계값이 계속적으로 변화된다. 신호 유무 여부의 결정에서 균일한 임계값을 적용하는 방식에서는 시스템의 성능이 저하되므로, CFAR 방식에서는 평균 간섭 신호의 레벨을 감지하여 임계값을 조절하여 단위시간 당 오경보 확률이 일정하

도록 한다.

2.2 기존 방법의 활용 가능성

기존의 방법 중에서 펄스 압축 방법과 부호 변조 방식은 레이더 펄스의 변조 방식에 관한 것이므로 제안하는 바의 레이더 펄스의 ON- OFF 제어와는 관계가 없으므로 비교하지 않는다. 단, 레이더 펄스를 압축하거나 부호 변조하면 단일 펄스 자체의 탐지 확률이 월등히 개선되므로 본 논문에서 제안하는 방법의 성능도 따라서 향상된다.

RGPO 재밍 신호는 수신 펄스를 증폭하여 지연시켜 방사하므로 본 논문에서 분석하고자 하는 동기형 간섭 신호와 그 패턴이 유사하다. 수신 신호의 leading edge 위치부를 추적하는 대응 방법을 사용할 경우, 재밍 신호가 참 반사파의 후에 위치할 때에는 효과적으로 참 반사파만을 추출할 수 있다. 그러나, 지능형 재머에서 참 반사파의 발생 시점에 재밍 신호를 발생시키는 경우에는 효과가 없다.

일반적인 CFAR의 방법으로는 평균 간섭 신호의 레벨을 감지하고 단위시간당 오 경보의 확률이 일정하도록 임계값을 적용한다. 본 논문에서의 임계값 추적에서는 일정한 레인지 bin에서 체크된 잡음의 수를 전체 비율로 계산하여 임계값을 추적하는 방법을 사용한다.

결론적으로, 본 논문에서는 펄스의 ON-OFF 제어 알고리즘에 기존의 CFAR 방식을 적용하여 미탐지 확률의 저하를 방지하고, 그 성능을 동등한 조건에서의 M of N 방식의 성능과 비교한다.

III. ON-OFF 펄스 방사 제어

레이더 사이의 간섭을 억제하는 방법으로 펄스를 ON-OFF 방사하여 차량 레이더 사이의 상호 간섭을 억제하는 방법을 제안한다. 먼저 단일 펄스의 에너지의 분포 확률을 구하고 참 반사파와 IS신호의 분리의 방법 및 판단 규칙에 대해서 서술한다.

3.1. 펄스의 ON-OFF 제어

제안하는 시스템에서는 레이더 펄스의 방사를 ON-OFF 제어한다. 그림 3에서 검은 색 펄스는 ON 펄스 구간의 위치를 나타내며, 흰 색 펄스는 OFF 펄스 구간의 위치를 나타낸다. 이 ON-OFF 패턴은 이진 수열로 나타낼 수 있으며, 각 레이더에서 사용되는 이진 랜덤 수열의 cross-correlation 값이 최소화되는 직교형 수열을 사용한다.

OFF 구간 동안에 수신되는 신호는 IS 펄스와 랜덤 잡음이므로 이를 분석하면 IS 펄스의 시간 축상에서의 위치를 파악할 수 있다. ON 주기동안 수신된 신호는 참 반사파와 거짓 반사파인 IS 펄스가 혼합되어 있는데, IS 신호는 이미 그 위치가 파악되어 있으므로 쉽게 이를 제거할 수 있다.

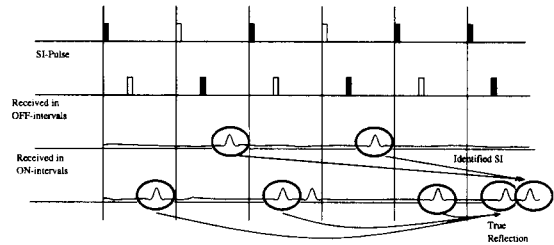


그림 3. ON-OFF 펄스의 방사와 IS신호의 분리

3.2 수신 신호의 처리

펄스형 레이더의 복조 방식을 분류하면, 포락선 방식, 동기형 복조 방식과 I-Q 복조 방식의 세 종류가 있다. 포락선 방식은 신호의 위상 정보를 검출할 수 없는 기능상의 한계성이 있고, 동기형 복조 방식은 위상 정보를 검출할 수는 있으나, COHO와의 위상 차가 ±90° 인 신호 성분은 검출이 되지 않아 수신기의 SNR이 저하된다^[3]. I-Q 복조 방식은 in-phase 성분과 quadrature 성분으로부터 신호의 크기와 위상을 모두 재생할 수 있다. 이와 같은 이유로, 본 논문에서는 차량용 레이더는 I-Q 복조 방식을 사용한다고 가정하였다.

한 펄스 구간 내에서의 참 반사 신호, s(t)와 IS 신호, i(t)는 다음의 식(1)과 같이 정현파로 표현할 수 있다. I-Q 복조 방식을 이용할 때, 랜덤 잡음의 분포가 Gaussian이면 수신 신호 r(t)의 크기의 분포는 다음과 같다^[3,8].

$$\begin{aligned}
 s(t) &= A_s \cos(\omega_0 t + \theta_s) & (i-1)T_w \leq t \leq iT_w \\
 T_w &= \text{Pulse width} \\
 i(t) &= A_i \cos(\omega_0 t + \theta_i) & (j-1)T_w \leq t \leq jT_w
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

참 반사파도 IS도 모두 존재하지 않을 때에는, r(t)의 pdf는 Rayleigh 분포를 이루며(식2), 참 반사파만 존재할 때, r(t)의 pdf는 Ricean 분포를 이루며(식3), 간섭 신호만 존재 할 때, r(t)의 pdf는 Ricean 분포를 이루며(식4), 참 반사파와 간섭 신호가 모두

존재할 때, $r(t)$ 의 pdf는 Ricean 분포를 이룬다(식5).

$$f_N(r) = \frac{r}{P_N} \exp\left(-\frac{r^2}{2P_N}\right) \quad (r \geq 0) \quad (2)$$

$$f_S(r) = \frac{r}{P_N} \exp\left(-\frac{r^2}{2P_N}\right) \exp\left(-\frac{A_S^2}{2P_N}\right) I_0\left(\frac{rA_S}{P_N}\right) \quad (3)$$

$$f_I(r) = \frac{r}{P_N} \exp\left(-\frac{r^2}{2P_N}\right) \exp\left(-\frac{A_I^2}{2P_N}\right) I_0\left(\frac{rA_I}{P_N}\right) \quad (4)$$

$$f_C(r) = \frac{r}{P_N} \exp\left(-\frac{r^2}{2P_N}\right) \exp\left(-\frac{A_C^2}{2P_N}\right) I_0\left(\frac{rA_C}{P_N}\right) \quad (5)$$

$$A_C = \sqrt{A_S^2 + A_I^2}$$

여기에서 $I_0(\cdot)$ 는 변형된 Bessel 함수이다^[9].

3.3 하나의 레인지 bin에서의 반사 펄스의 탐지

복조된 수신 신호는 그림 4에 나타난 바와 같이 각 레인지 bin마다 샘플링 되어 임계값과 비교되어 그 레인지 bin에서의 반사 펄스의 존재 유무가 판별한다. ON 구간과 OFF 구간에서의 하나의 레인지 bin에서의 반사 펄스에 대한 탐지 확률과 오경보 확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{ds} = \int_{TH_s}^{\infty} f_S(r) dr \quad (6)$$

(ON 구간에서 참 반사파가 실제로 존재할 때의 참 반사파의 탐지 확률)

$$P_{di}^{OFF} = \int_{TH_i}^{\infty} f_I(r) dr \quad (7)$$

(OFF 구간에서 IS 펄스가 실제로 존재할 때의 IS 펄스의 탐지 확률)

$$P_{di}^{ON} = \int_{TH_s}^{\infty} f_I(r) dr \quad (8)$$

(ON 구간에서 IS 펄스가 실제로 존재할 때의 IS 펄스의 탐지 확률)

$$P_{fn} = \int_{TH_f}^{\infty} f_N(r) dr \quad (9)$$

(OFF 구간에서 참 반사파가 존재하지 않을 때 존재한다고 판단할 오경보 확률)

$$P_{fi}^{OFF} = \int_{TH_i}^{\infty} f_N(r) dr \quad (10)$$

(OFF 구간에서 IS 펄스가 존재하지 않을 때 존재한다고 판단할 오경보 확률)

$$P_{fi}^{ON} = \int_{TH_s}^{\infty} f_N(r) dr \quad (11)$$

(ON 구간에서 IS 펄스가 존재하지 않을 때 존재한다고 판단할 오경보 확률)

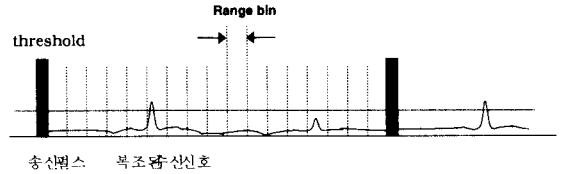


그림 4. 복조된 신호의 샘플링

3.4 참 반사파와 IS 신호의 판별

그림 5는 레인지 맵에 저장된 데이터를 분석하여 IS 신호와 참 반사파의 존재 여부를 판단하는 과정을 나타낸다. HIT와 SIG는 모두 최근의 복수(L) 개의 OFF 구간, 혹은 ON 구간으로부터 어느 임계 횟수(K) 이상 펄스가 탐지될 때 1의 값을 갖는다. HIT=1이 의미하는 것은 그 레인지 bin에 IS 신호가 존재한다는 것이고, SIG=1이 의미하는 바는 그 레인지 bin에 참 반사파가 존재한다는 것이다. 그 판단 규칙을 표 1에 나타내었다.

HIT와 SIG가 모두 1로 나타나는 경우는 참 반사파와 IS 신호가 동일한 레인지 bin에 위치하는 경우로서, 이 연구에서는 오경보 확률을 낮추는 것을 중요하다고 여겨 이 경우에는 IS 신호가 존재하는 것으로 판단하기로 한다.

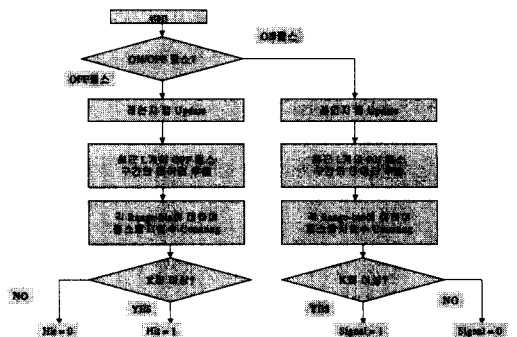


그림 5. HIT와 SIG의 판단 규칙

IV. 제안하는 시스템의 탐지 성능 분석

성능 지표로는 하나의 레인지 bin에 대한 탐지 확률 P_D 와 오경보 확률 P_{FA} 를 계산하여 기존 M of N 방법과 비교하였다. 각각의 값을 확률적으로 유도한 후, 상호 간섭을 일으키는 레이더의 수, 랜덤 잡음과 레이더 펄스의 신호 대 잡음 비 등이 변할 때의 성능을 계산하여 기존의 방법과 비교한다. 공정한 비교가 되도록 하기 위하여, 동일한 P_M 값에 대한 P_{FA} 의 값을 제안하는 방법과 기존의 M of N 방법에서 각각 계산하여 도시하였다. 또한 적정 임계값 구간을 추적하는 방법^[7,10]을 제시하였으며 이를 CFAR^[11,4] 방식과 비교하였다.

하나의 레인지 bin에 대한 탐지 확률 P_D 와 오경보 확률 P_{FA} 는 다음과 같이 정의한다.

P_D = 참 반사파가 존재할 때, 복수 개의 ON 펄스 구간의 관찰 결과 참 반사파가 존재한다고 판단할 확률

P_{FA} = 참 반사파가 존재하지 않을 때, 복수 개의 ON 펄스 구간의 관찰 결과 참 반사파가 존재한다고 판단할 확률

4.1 Hit와 Collision

Hit와 collision은 모두 하나의 펄스 구간에서의 단일 레인지 bin에 대해 정의된다. Hit는 어느 하나의 레인지 bin에 간섭 레이더로부터의 IS 펄스가 존재하는 것을 의미하며, collision은 어느 하나의 레인지 bin에 참 반사파와 IS 펄스가 동시에 존재하는 것을 의미한다. Hit 확률과 collision 확률은 펄스의 존재 유무에만 의존하며, 펄스의 탐지 여부에는 관계없다.

Hit 확률 P_H 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_H = 1 - (1 - P_{RES})^{R-1} \tag{12}$$

$$P_{RES} = \frac{W}{c} f \tag{13}$$

R = 운용 중인 레이더의 숫자 (자신 포함),

c = 전파의 속도,

W = 레인지 bin의 크기,

f = 레이더의 PRF(pulse repetition frequency)

표 1. HIT와 SIG의 판단 규칙

HIT	SIG	HIT	SIG	HIT	SIG	HIT	SIG
0	0	0	1	1	0	1	1
No Signal		참 반사파		IS신호존재		IS신호존재	

4.2 복수 개의 펄스 구간에서의 탐지 확률의 정의 (하나의 레인지에 대한 확률)

$P_d^p(ON)$ = 참 반사파가 존재 할 때(present), L 개의 ON 구간에서 참 반사파가 탐지된(detected) 횟수가 K 회 이상일 확률

$$= \sum_{i=K}^L \binom{L}{i} (P_{ds})^i (1 - P_{ds})^{L-i} \tag{14}$$

$P_i^p(ON)$ = IS가 존재할 때, L 개의 ON 구간에서 IS가 탐지된 (interference) 횟수가 K 회 이상일 확률

$$= \sum_{i=K}^L \binom{L}{i} (P_{di}^{ON})^i (1 - P_{di}^{ON})^{L-i} \tag{15}$$

$P_i^p(OFF)$ = IS가 존재할 때, L 개의 OFF 구간에서 IS가 탐지된 횟수가 K 회 이상일 확률

$$= \sum_{i=K}^L \binom{L}{i} (P_{di}^{OFF})^i (1 - P_{di}^{OFF})^{L-i} \tag{16}$$

$P_{fi}^a(ON)$ = IS가 존재하지 않을 때(absent) L 개의 ON 구간에서 IS가 탐지된 횟수가 K 회 이상일 (false interference) 확률

$$= \sum_{i=K}^L \binom{L}{i} (P_{fi}^{ON})^i (1 - P_{fi}^{ON})^{L-i} \tag{17}$$

$P_{fi}^a(OFF)$ = IS가 존재하지 않을 때 L 개의 OFF 구간을 관찰한 결과 IS가 탐지된 횟수가 K 회 이상일 확률

$$= \sum_{i=K}^L \binom{L}{i} (P_{fi}^{OFF})^i (1 - P_{fi}^{OFF})^{L-i} \tag{18}$$

P_{BOTH} = 동일한 레인지 bin에서, IS가 OFF 구간에서 탐지된 상황에서 참 반사파가 ON 구간에서 탐지될 확률

$$= P_d^p(ON) (P_H * P_i^p(OFF)) + (1 - P_H) * P_{fi}^a(OFF) \tag{19}$$

식 (19)의 유도 과정은 부록에 상술하였다.

4.3 탐지 확률과 오경보 확률의 유도

최근의 L개의 ON 구간에서 참 반사파가 K회 이상 탐지될 때, 목표물이 존재한다고 판단한다. 단, IS가 OFF 구간에서 탐지된 것과 동일한 레인지 bin에서 참 반사파가 ON 구간에서 탐지되는 경우에는 IS로 판단하므로 탐지 확률 P_D 는 다음과 같다.

$$P_D = P_d^P(ON) * (1 - \text{Prob}(IS \text{ detected in the same range bin in OFF})) = P_d^P(ON) - P_{BOTH} \quad (20)$$

오경보는 IS가 존재할 때와 존재하지 않을 때 모두 발생할 수 있다. IS가 존재하지 않을 때에는 랜덤 잡음이 오경보의 원인이며, IS가 존재할 때에는 OFF 구간에서는 IS를 발견하지 못한 상태에서, ON 구간에서 IS를 탐지할 때 오경보가 발생한다. 따라서, 오경보 확률 P_{FA} 는 다음과 같다. 상세한 유도 과정은 부록에 상술하였다.

$$P_{FA} = P_H * (1 - P_i^P(OFF)) * P_i^P(ON) + (1 - P_H) * (1 - P_{fi}^a(OFF)) * P_{fi}^a(ON) \quad (21)$$

4.4 M of N 방법과의 성능 비교

M of N 방법에서의 제안하는 방법과 M of N 방법을 비교하기 위해서 L = N, K = M으로 하여 동일한 관찰 구간 수와 판단 기준치를 사용한다. M of N 방법에서의 $P_D^{M \text{ of } N}$ 과 $P_{FA}^{M \text{ of } N}$ 을 제안하는 방법의 확률로 환산하면 다음과 같다.

$$P_D^{M \text{ of } N} = \text{Prob}(L \text{ 개의 ON 구간 중 참 반사파의 탐지 횟수가 K회 이상}) = P_d^P(ON) \quad (22)$$

$$P_{FA}^{M \text{ of } N} = P_H * P_i^P(ON) + (1 - P_H) * P_{fi}^a(ON) \quad (23)$$

식 (23)의 유도 과정은 부록에 상술하였다.

M과 N의 값을 충분히 크게 하면, $P_i^P(ON) \rightarrow 1$, $P_{fi}^a(ON) \rightarrow 0$ 이 되므로

$$P_{FA}^{M \text{ of } N} \approx P_H \quad (24)$$

식 (21)과 식 (23)을 비교하면 다음의 결과를 얻으며, 유도 과정은 부록에 상술하였다.

$$P_{FA}^{M \text{ of } N} - P_{FA} \approx P_H \quad (25)$$

따라서, 제안하는 방법과 M of N 방법을 비교하면 제안하는 방법에서의 오경보 확률이 P_H 만큼 작다. 식 (24)와 같이 오경보가 대부분 IS 신호에 의해 발생한다는 점을 볼 때, 제안하는 시스템에서는 IS 신호에 의한 오경보를 거의 발생시키지 않는다.

식 (20)과 식 (22)를 비교하면

$$P_D = P_D^{M \text{ of } N} - P_{BOTH} \quad (26)$$

따라서, 제안하는 방법에서의 탐지 확률은 M of N 방법에서의 탐지 확률보다 P_{BOTH} 의 크기만큼 작다. 탐지 확률이 다소 감소하는 것은 오경보를 줄이기 위해 치루는 대가이다.

4.5 임계값의 적응적 설정

전술한 바와 같이 탐지 확률은 P_{BOTH} 의 값만큼 저하되므로 가능한 P_{BOTH} 의 크기를 작게 하는 것이 바람직하다. 적정 임계값 구간에서는 P_{FA} 에 의한 성능 향상은 크고, P_M 에 의한 성능 저하는 거의 없게 되는데, 그림 6에 표시된 구간을 적정 구간(good region)으로 정의하기로 한다. 제안된 방법의 성능은 이러한 적정 구간에서 기존의 방법의 성능보다 향상된다. P_{FA} 는 기존의 M of N 방식에 비해 우수한 성능을 보이고 P_M 은 기존의 M of N 방식과 비슷한 성능을 갖게 된다.

임계값을 적응적으로 설정하는 방식은 CFAR 방식에서 임계값을 입력 잡음의 에너지 변화에 맞추어 가는 것과 유사하다. 실제적으로 시뮬레이션에서는 N개의 레인지 bin에 적정 임계값을 적용하여 잡음이 체크되는 레인지 bin의 수를 전체 레인지에 대

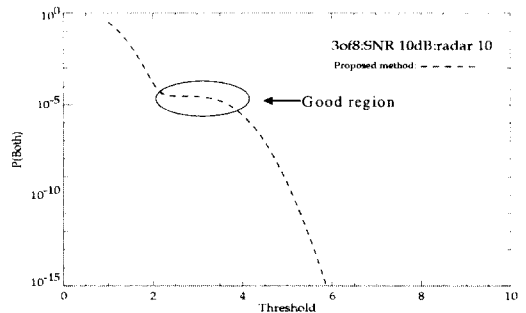


그림 6. P_{BOTH} 의 분석(임계값 단위: σ)

한 비율로 환산하여 P_{β} 를 구한다. 이 값은 근사적으로 OFF구간 동안의 잡음에 의한 오경보 확률로 산출한 P_{β} 의 값과 거의 같게 된다.

그림 7은 제안한 시스템에서 P_{β} 의 값을 통하여 임계값을 찾아가는 알고리즘을 도시한 것이다. 초기 임계값이 주어지면 시스템의 OFF구간 동안에서의 잡음의 레벨을 체크하여 현재 시스템의 P_{β} 를 구하고, 원하는 P_{β} 와 비교하여 임계값을 조정한다. 시스템의 P_{β} 값이 원하는 P_{β} 값에 근접하면 종료한다. 이렇게 하여 제안하는 시스템은 적정 임계값을 추적할 수 있게 되고 시스템의 성능은 향상된다.

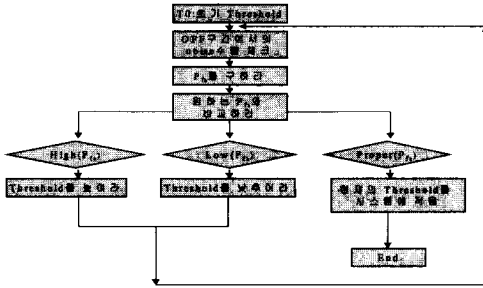


그림 7. 임계값 추적 알고리즘

V. 실험 결과

제안하는 방법과 기존의 M of N 방법에서 오경보 확률 P_{FA} 와 미탐지 확률 P_M 의 값을 각각 구하였다. 신호 대 잡음 비를 변화시키면서, 오경보 확률과 미탐지 확률의 값을 구하였다. 동일한 임계값에서의 P_{FA} 와 P_M 를 각각 구하여 비교하고, 두 가지 방식 모두에서 동일한 P_M 의 값에 대한 P_{FA} 의 값의 변화를 계산하여 비교하였다. 또한 적정구간에서 제안하는 방법의 성능이 향상됨을 보였다.

5.1 실험 결과

M of N 의 값으로, 3 of 8의 경우에는 $W_{ON} = W_{OFF} = 8$, $T_d^{ON} = T_h^{ON} = 3$ 의 값을, 4 of 9의 경우에는 $W_{ON} = W_{OFF} = 9$, $T_d^{ON} = T_h^{ON} = 4$ 의 값을 사용하였다. 신호 대 잡음비가 각각 SNR=7dB, SNR=10dB인 경우에 대해 간섭 레이더의 수를 10으로 하여 두 가지 방식의 성능을 비교하였다. σ 는 잡음의 RMS 값을 나타내며, 임계값은 σ 에 대해 정규화 한 값이다. 레이더 수는 10으로 하였다.

그림 8에는 오경보 확률의 그래프를 나타내었다. (a)와 (c)는 SNR=7dB, (b)와 (d)는 SNR =10dB 일 때 제안한 방법을 3 of 8과 4 of 9의 방법과 비교한 것이다. 임계값이 $2.0\sigma \sim 2.5\sigma$ 일 때는 제안된 방법과 기존의 방법이 별 차이가 없으나, 임계값이 $2.5\sigma \sim 5.0\sigma$ 일 때는 제안된 방법에서의 오경보 확률이 기존의 방법보다 현저히 낮아진다.

그림 9에는 미탐지 확률을 비교하였다. (a)와 (c)는 SNR=7dB, (b)와 (d)는 SNR=10dB 일 때 제안한 방법을 3 of 8과 4 of 9의 방법과 비교한 것이다. 임계값이 $2.0\sigma \sim 2.5\sigma$ 일 때는 큰 P_{BOTH} 값으로 인하여 제안하는 방법에서의 미탐지 확률의 값이 기존의 방법보다 커지게 된다. 임계값이 $2.5\sigma \sim 5.0\sigma$ 인 적정 구간에 도달하면 미탐지 확률의 값이 기존의 방법의 경우와 거의 차이가 없게 되며, 이때의 제안된 방법에서의 오경보 확률의 값은 기존의 방법의 경우에 비해 매우 작아진다.

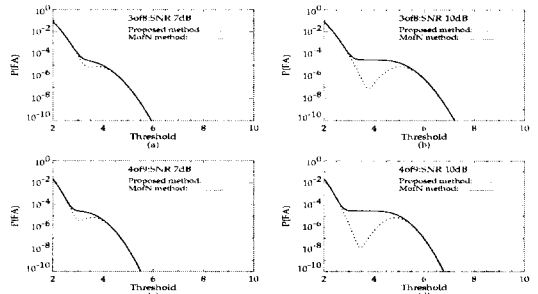


그림 8. 오경보 확률(레이더 수: 10, 임계값 단위: σ) (a)3of8: SNR=7dB (b)3of8: SNR=10dB (c)4of9: SNR=7dB (d)4of9: SNR=10dB

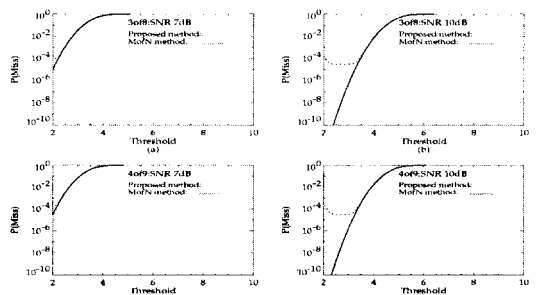


그림 9. 미탐지 확률(레이더 수: 10, 임계값 단위: σ) (a)3of8: SNR=7dB (b)3of8: SNR=10dB (c)4of9: SNR=7dB (d)4of9: SNR=10dB

5.2 적정 임계값 구간에서의 성능

그림 10은 제안하는 방법과 기존의 M of N 방

법에서 동일한 P_M 의 값에 대한 P_{FA} 의 값을 나타낸 그래프이다. 임계값이 너무 크거나 작은 경우에는 제안하는 방법의 P_{FA} 의 값이 기존의 방법에 비해서 거의 차이가 없지만, 적정 구간에서는 10^4 정도 감소한다.

$T_d^{ON}(T_h^{ON})$ 와 $W_{ON}(W_{OFF})$ 의 값, 신호 대 잡음 비 및 간섭 레이더의 수가 변할 때, 이러한 적정 구간에 대한 P_{β} 의 값을 표 2에 나타내었다.

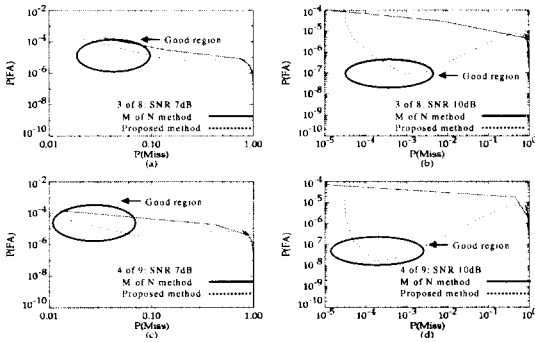


그림 10. 적정 임계값 구간(레이더 수: 10) (a)3of8: SNR=7dB (b)3of8: SNR=10dB (c)4of9: SNR=7dB (d)4of9: SNR=10dB

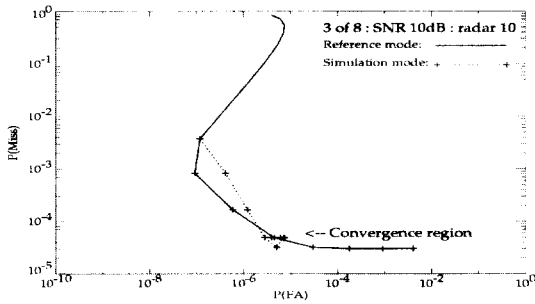


그림 11. 적정 구간 수렴 과정 시뮬레이션

표 2. 적정 구간에서의 Pfs의 값

Method	SNR	Radar 수	임계값	Pfs
$W_{ON}=W_{OFF}=8$ $T_d^{ON}=T_h^{ON}=3$	7	5	2.6	3.40E-02
		10	2.6	3.40E-02
	10	5	3.4	3.09E-03
		10	3.2	5.98E-03
결론 : 최적 Pfs구간 5.976E-3(Threshold 3.2이상)				
Method	SNR	Radar 수	임계값	Pfs
$W_{ON}=W_{OFF}=9$ $T_d^{ON}=T_h^{ON}=4$	7	5	2.3	7.10E-02
		10	2.3	7.10E-02
	10	5	3.1	8.19E-03
		10	2.9	1.49E-02
결론 : 최적 Pfs구간 1.492E-2(Threshold 2.9이상)				

그림 11은 $W_{ON} = W_{OFF} = 8$, $T_d^{ON} = T_h^{ON} = 3$, SNR=10dB, 레이더 수가 10일 때, 적정 구간 추적 알고리즘을 시뮬레이션하는 과정을 나타낸 것으로, 임계값이 3.2σ , P_{β} 가 $5.976e-3$, P_M 이 $3.203e-5$, P_{FA} 가 $2.981e-5$ 에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 실험한 결과, 수렴하는 임계값에 1.0σ 를 더한 값을 임계값의 상한선으로 정하기로 하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 표준화된 펄스형 차량 레이더 사이의 동기형 간섭 신호에 의한 상호 간섭을 억제하기 위해 레이더의 펄스 방식을 ON-OFF 제어하는 방법을 제안하고 이의 간섭 억제 성능을 기존의 방법과 비교하였다. 성능 지표로는 오경보 확률과 미탐지 확률의 값을 비교하였으며 최선의 성능을 얻을 수 있는 임계값의 적정 구간을 구하는 방법을 제시하였다.

레이더의 펄스 방식은 ON-OFF 제어되며, OFF 주기와 ON 주기 동안에 수신된 신호는 각각 분석되어, 데이터들의 조합에 의한 확률적 처리를 함으로써 참 반사파와 동기형 간섭 신호가 분리된다. 탐지 확률과 오경보 확률의 값을 확률적으로 유도한 후, 상호 간섭을 일으키는 레이더의 수, 랜덤 잡음과 레이더 펄스의 신호 대 잡음 비 등이 변할 때의 성능을 계산하여 기존의 방법과 비교하였다. 임계값이 적정 구간에 존재할 때, 기존의 M of N방법에 비해서 오경보 확률이 감소하며 미탐지 확률의 증가로 인한 성능 저하는 거의 없게 된다. 단 신호의 레벨에 비해 임계값이 너무 작거나 큰 경우에는 기존의 방법에 비해 성능 향상은 이루어지지 않는다.

부 록

1. 식 (19)의 유도 과정

$$\begin{aligned}
 P_{BOTH} &= P_d^P(ON) * \text{Prob}(\text{IS detected in the same range bin in OFF}) \\
 &= P_d^P(ON) * \{ \text{Prob}(\text{IS present}) * \text{Prob}(\text{IS detected in OFF} | \text{IS present}) + \text{Prob}(\text{IS absent}) * \text{Prob}(\text{IS detected in OFF} | \text{IS absent}) \} \\
 &= P_d^P(ON) (P_H * P_i^P(OFF) + (1 - P_H) * P_{\beta}^a(OFF))
 \end{aligned}$$

2. 식 (21)의 유도 과정

$$\begin{aligned}
 P_{FA} &= \text{Prob}(\text{false alarm} \mid \text{IS present}) \\
 &\quad + \text{Prob}(\text{false alarm} \mid \text{IS absent}) \\
 &= \text{Prob}(\text{IS present}) * \text{Prob}(\text{IS not detected in} \\
 &\quad \text{OFF} \mid \text{IS present}) * \text{Prob}(\text{IS detected in} \\
 &\quad \text{ON} \mid \text{IS present}) + \text{Prob}(\text{IS absent}) * \text{Prob} \\
 &\quad (\text{IS not detected in OFF} \mid \text{IS absent}) * \\
 &\quad \text{Prob}(\text{IS detected in ON} \mid \text{IS absent}) \\
 &= P_H * (1 - P_i^p(\text{OFF})) * P_i^p(\text{ON}) + (1 - P_H) \\
 &\quad * (1 - P_{fi}^a(\text{OFF})) * P_{fi}^a(\text{ON})
 \end{aligned}$$

3. 식 (23)의 유도 과정

$$\begin{aligned}
 P_{FA}^{MofN} &= \text{Prob}(\text{false alarm} \mid \text{IS present}) + \text{Prob}(\text{false} \\
 &\quad \text{alarm} \mid \text{IS absent}) \\
 &= \text{Prob}(\text{IS present}) * \text{Prob}(\text{IS detected} \\
 &\quad \text{ON-intervals} \mid \text{IS present}) + \text{Prob}(\text{IS} \\
 &\quad \text{absent}) * \text{Prob}(\text{IS detected in} \\
 &\quad \text{ON-intervals} \mid \text{IS absent}) \\
 &= P_H * P_i^p(\text{ON}) + (1 - P_H) * P_{fi}^a(\text{ON})
 \end{aligned}$$

4. 식 (25)의 유도 과정

$$\begin{aligned}
 P_{FA}^{MofN} - P_{FA} &= P_H * P_i^p(\text{ON}) * P_i^p(\text{OFF}) \\
 &\quad + (1 - P_H) * P_{fi}^a(\text{ON}) * P_{fi}^a(\text{OFF}) \\
 &\simeq P_H + P_{fi}^a(\text{ON}) * P_{fi}^a(\text{OFF}) \\
 &\simeq P_H \\
 (\because P_i^p(\text{ON}) \simeq 1, P_i^p(\text{OFF}) \simeq 1, (1 - P_H) \simeq 1, P_{fi}^a(\text{ON}) * \\
 &\quad P_{fi}^a(\text{OFF}) \ll P_H)
 \end{aligned}$$

참 고 문 헌

[1] R. S. Blum, J. Qiao, "Threshold Optimized for Distributed Order-Statistic CFAR Signal Detection", *IEEE Trans. AES*, Vol.32, No.1, Jan, 1996

[2] R. Dixon, "Spread Spectrum Systems", 2nd, Wiley, 1984

[3] B. Edde, "RADAR: principles, technology, application", Prentice-Hall, 1993

[4] C.H. Gowda *et al.*, "Distributed CFAR target detection", *Journal of the Franklin Institute* 336, pp. 257-267, 1999

[5] Y.C Kim, "Orthogonal ON-OFF control of

radar pulses for the suppression of mutual interference", *Proceedings of SPIE*, vol. 3462, pp. 366-377, Jul, 1998

[6] T. Mimuro *et al.*, "Surrounding Obstacle Recognition System for Automatic Collision Avoidance", *3rd World Congress on ITS*, 1996

[7] Daniel T. Nagle, Jafar Saniie, "Performance Analysis of Linearly Combined Order Statistic CFAR Detectors", *IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems*, Vol.31, No.2, April, 1995

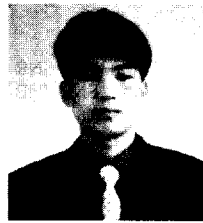
[8] Louis L. Scharf, "Statistical Signal Processing", Addison-Wesley, 1991

[9] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill, 1990

[10] Van Trees, "Detection, Estimation and Modulation Theory", Wiley, 1968

최 병 철(Byeong-cheol Choi)

준회원



1999년 2월 : 서울시립대학교
제어계측공학과 졸업
1999년 3월~현재 :
서울시립대학교 전자
전기공학부 석사과정
<주관심 분야> 컴퓨터비전,
레이더시스템

김 용 철(Yong-cheol Kim)

정회원



1981년 2월 서울대학교
전자공학과 졸업(학사)
1983년 2월 KAIST 전기 및
전자공학과 졸업(석사)
1983년~1986년
금성전기연구소
무선통신부

1993년 5월 University of Southern California 졸업
(Ph.D.)

1993년~1996년 LG정밀연구소 전문팀장
1996년~현재 서울시립대학교 전자전기공학부 조교
수
<주관심 분야> 컴퓨터비전, 레이더 시스템, 이동통
신 시스템