

논문 2011-48TC-10-9

Pulsed-CW 신호 파라미터 추정 오차에 따른 레이더 신호 능동 상쇄 성능 비교

(Performance Comparison of Radar Signal Active Cancellation Systems
According to Pulsed-CW Parameter Estimation Error)

최 승 규*, 이 충 용**

(Seungkyu Choi and Chungyong Lee)

요 약

본 논문에서는 pulsed-CW를 사용하는 위협 레이더 신호를 상쇄시키기 위한 능동 상쇄 신호에 임의의 파라미터 추정 오차가 존재하는 경우 능동 상쇄 신호의 영향을 분석하고, 이를 기반으로 능동 상쇄 측면에서 maximum-likelihood estimation (MLE) 기법 및 2차 보간 기법이 포함하는 추정 오차의 영향을 분석한다. 그리고 능동 상쇄 신호의 성능을 향상시키기 위해 MLE 기법의 파라미터 추정 오차를 보정하는 correlation 기반의 오차 보정 기법을 개선하여 적용하고, 이 기법이 능동 상쇄 관점에서 다른 기법보다 우수함을 모의실험을 통해 검증한다.

Abstract

In this paper, we analyze the effects of estimation error in the active cancellation signal, which is intended to counter the pulsed-CW signal of a hostile radar. We also examine the effects of estimation error in maximum-likelihood estimation (MLE) and quadratic interpolation scheme from a radar signal active cancellation viewpoint. Then, we modify the correlation-based error compensation scheme which mitigates the estimation error of MLE to improve the performance of the active cancellation signal. Finally, we present simulation results to show that the correlation-based scheme has better performance than the other in terms of radar signal active cancellation.

Keywords : Pulsed-CW, 능동 상쇄 신호, MLE, 파라미터 추정 오차

I. 서 론

지금까지 연구된 피탐지 감소 기술은 주로 무기체계의 구조 또는 형상을 변경하거나 레이더 신호 흡수 재료(RAM) 및 레이더 신호 흡수 구조(RAS)를 사용하여 레이더 반사 단면적(RCS)을 감소시키는 수동형 기술로

서 다음과 같은 몇 가지 단점들을 지니고 있다. 첫째, 매우 큰 비용이 발생된다. 둘째, 비행체의 공기 역학적 인 특성과 민첩성 등에 악영향을 끼칠 수 있다. 셋째, 저주파 레이더 및 마이스태틱 레이더에는 효과가 제한적이다. 이 같은 수동형 피탐지 감소 기술의 문제점들을 보완하기 위하여 새로운 개념의 피탐지 감소 기술, 즉 입사되는 위협 레이더 신호에 대한 대응 신호를 전송하여 아군 무기체계의 RCS를 능동적으로 감소시키는 능동 상쇄 기술에 대한 고려가 필요하다. 능동 상쇄 기술은 구조 또는 형상 변경을 필요로 하지 않으므로 수동형 피탐지 감소 기술 대비 비용이 매우 적게 발생될

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교
(Yonsei University)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

접수일자: 2011년7월27일, 수정완료일: 2011년10월17일

뿐만 아니라 공기 역학적 특성 변화도 없게 되고, 특히 다양한 환경에서 위협 레이더 신호의 변화 상황에 능동적으로 대응할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 위협 레이더 신호를 능동적으로 상쇄 시키는 기술은 실시간으로 매우 복잡한 처리과정을 필요로 하고 정확한 대응 신호를 발생시키지 않으면 오히려 위협 레이더의 탐지확률을 증가시키는 역효과를 초래한다. 따라서 능동 상쇄 기술은 현재까지 이론적인 수준에서만 논의되고 있거나 위의 문제점들을 해결하여 능동 상쇄 기술을 구현하였다 하더라도 국가 안전과 직결되는 매우 중요한 기술이기 때문에 공개되지 않고 있다.

앞서 언급하였듯이 능동 상쇄 기술을 구현하기 위해서는 정확한 대응 신호를 전송해야만 한다. 즉, 위협 레이더 신호가 아군 무기체계에 반사되어 되돌아가는 반사 신호와 동일한 신호를 재현 후 180° 위상 반전시킨 대응 신호를 전송해야만 반사 신호를 완벽하게 상쇄시킬 수 있다. 그러나 아군 무기체계에서는 위협 레이더 신호에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 아군 무기체계에서의 반사 신호를 기반으로 위협 레이더 신호의 주요 파라미터인 중심 주파수, 신호 크기, 위상, 대역폭등을 추정하여 대응 신호를 발생시킬 수밖에 없다. 모든 파라미터 추정 기술은 필연적으로 추정 오차를 포함하게 되는데 오차가 포함된 파라미터 정보를 기반으로 대응 신호를 전송하게 되면 오히려 위협 레이더의 탐지 확률을 증가시킬 수 있기 때문에 능동 상쇄 기술을 위한 파라미터 추정기술에는 매우 정밀한 파라미터 추정 성능이 요구된다.

본 논문에서는 pulsed-CW 신호를 사용하는 위협 레이더 신호에 대해 능동 상쇄 기술을 적용하고자 할 때 pulsed-CW 신호 각 파라미터들의 추정 오차에 따른 능동 상쇄 신호의 효과를 분석하고, 성능 측면에서 가장 우수한 maximum-likelihood estimation (MLE) 기법을 pulsed-CW 신호 파라미터 추정에 적용 하였을 때 발생하는 오차의 영향을 능동 상쇄 관점에서 분석한다. 또한, 능동 상쇄 성능을 향상시키기 위해 MLE 기법에 근본적으로 내재된 FFT 분해능에 의한 추정 오차를 줄일 수 있는 correlation 기반의 추정 오차 성능 개선 방안을 제시하고, 추정 오차 성능 개선이 능동 상쇄 성능을 향상시킴을 모의실험을 통해 보인다.

II. Pulsed-CW 신호 파라미터 추정 오차에 따른 능동 상쇄 신호 효과 분석

Pulsed-CW 신호는 식 (1)과 같은 신호 모델을 가정하고 위협 레이더 신호는 아군 무기체계에서 전반사 된다고 가정한다.

$$\begin{aligned} x_t &= s_t + \epsilon_t; \quad t = 0, 1, \dots, N-1 \\ s_t &= A \cos(wt - \phi); \quad A > 0, w = 2\pi f_c, \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x_t 는 위협 레이더로부터 송신된 레이더 신호가 아군 무기체계에 수신 되는 신호이고, 수신신호 x_t 로부터 추정해야 하는 파라미터들은 $\theta = (A, w, \phi)$ 이다. 잡음신호 ϵ_t 를 independent, identically 분포된 $N[0, \sigma^2]$ 랜덤 신호라 가정하면, 수신 신호 x_t 는 잡음신호와 동일하게 independent, identically 분포된 $N[s_t, \sigma^2]$ 랜덤 신호로 나타낼 수 있다.

아군 무기체계에서 각 파라미터들을 추정하여 반사 신호를 상쇄시키기 위한 신호를 재현 후 180° 위상 반전시킨 대응 신호를 전송하면 위협 레이더로 되돌아가는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y_t &= A \cos(wt - \phi) + \\ &\quad (A + \Delta A) \cos((w + \Delta w)t - \phi - \Delta \phi + \pi) \\ &= 2A \cos\left(wt - \phi + \frac{\Delta wt - \Delta \phi + \pi}{2}\right) \times \\ &\quad \cos\left(-\frac{\Delta wt - \Delta \phi + \pi}{2}\right) + \\ &\quad \Delta A \cos((w + \Delta w)t - \phi - \Delta \phi + \pi), \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ΔA , Δw , $\Delta \phi$ 는 각각 크기 오차, 주파수 오차, 위상 오차를 의미한다. 식 (2)에서 위협 레이더로 되돌아가는 신호는 본래의 반사 신호에 파라미터 추정 오차에서 유래된 $2\cos\left(-\frac{\Delta wt - \Delta \phi + \pi}{2}\right)$ 가 진폭 변조되고 $\frac{\Delta wt - \Delta \phi + \pi}{2}$ 만큼 위상 변이된 신호에 $\Delta A \cos((w + \Delta w)t - \phi - \Delta \phi + \pi)$ 신호가 추가된 신호로 해석할 수 있다. ΔA 는 A 보다 상대적으로 매우 작은 값을 갖기 때문에 식 (2)의 두 번째 항은 무시할 수 있는 반면, Δw , $\Delta \phi$ 의 값이 0에 근접한 값을 갖는다 하더라도 식 (2)의 첫 번째 항의 값의 크기는 최대 $2A$ 가 될 수 있기 때문에 추정 오차가 포함된 정보를 기반으로 한 능동 상쇄 신호는 오히려 반사 신호의 크기를 두 배로 키우는 역효과를 초래할 수 있다.

식 (2)는 파라미터 추정 오차가 존재하는 한 능동 상쇄 신호가 반사 신호를 완벽하게 상쇄시킬 수 없다는 것을 의미하지만 전혀 효과 없음을 의미하지는 않는다. 왜냐하면 Δw 와 $\Delta \phi$ 가 충분히 작다면 진폭의 크기 $2A \cos\left(-\frac{\Delta wt - \Delta \phi + \pi}{2}\right)$ 의 값이 0에 근접하게 되어 위협 레이더로 반사되어 되돌아가는 신호의 크기를 탐지 문턱값 보다 작게 만들 수 있기 때문이다. 그러므로 레이더 신호 능동 상쇄를 위한 파라미터 추정은 오차 성능이 우수한 추정 기법이 필요하다는 결론을 도출할 수 있다. 특히, Δw 는 시간 변수 t 와 곱해지기 때문에 주파수 추정 오차에 대한 정밀도가 레이더 신호 능동 상쇄를 위한 파라미터 추정에서 가장 중요하다고 할 수 있다.

다음은 pulsed-CW의 Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)를 살펴보도록 한다. 식 (1)과 같이 정의된 신호의 각 파라미터들의 CRLB는 다음과 같다^[1].

$$\begin{aligned} \text{var}(\hat{A}) &\geq \frac{2\sigma^2}{N} \\ \text{var}(\hat{f}_c) &\geq \frac{12f_s^2}{(2\pi)^2 \rho \times N(N^2-1)} \\ \text{var}(\hat{\phi}) &\geq \frac{2(2N-1)}{\rho \times N(N+1)} \approx \frac{4}{\rho \times N}, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 N 은 샘플 수, f_s 는 샘플링 주파수, ρ 는 SNR인 $\rho = A^2/2\sigma^2$ 을 의미한다. 식 (3)은 모든 파라미터 추정 기법이 얻을 수 있는 최대 성능 경계를 나타낸다. 즉, 모든 파라미터 추정 기법은 식 (3)의 우변 값들 이상의 추정 오차를 포함하게 된다. 이 중에서 가장 중요한 파라미터인 주파수의 CRLB를 살펴보면, 주파수의 CRLB는 N^3 에 반비례하게 되지만 실시간 레이더 신호 능동 상쇄 시스템은 샘플 수 N 을 무한대로 증가시킬 수 없기 때문에 샘플 수 N 과 추정 오차 간의 trade-off시 주파수 추정 오차의 정밀도가 큰 영향을 받게 되고 이에 따라 능동 상쇄 신호의 성능도 영향을 받게 됨을 예상할 수 있다.

III. MLE 기법 및 MLE 추정 오차 보정을 위한 2차 보간 기법

1. MLE 기법

식 (1)의 랜덤 신호 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ 의 성분들

은 가우시안 분포를 갖고 서로 독립이기 때문에 다음과 같은 joint density function으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{\theta}(\mathbf{x}) &= \prod_{t=0}^{N-1} f_{\theta}(x_t) \\ &= (2\pi\sigma^2)^{-\frac{N}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{t=0}^{N-1} (x_t - s_t)^2\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

MLE 기법은 (4)의 maximum-likelihood를 계산하여 $\theta = (A, w, \phi)$ 를 추정하는 기법으로 MLE 기법으로부터 얻어진 각 파라미터 추정 결과는 식 (5)와 같다^[2].

$$\begin{aligned} \hat{w} &= \operatorname{argmax}_w |X(w)|^2 \\ \hat{A} &= \frac{2}{N} |X(\hat{w})| \\ \hat{\phi} &= -\operatorname{arg} X(\hat{w}), \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $X(w)$ 는 주파수 w 에서의 \mathbf{x} 의 FFT를 의미한다. 식 (5)에서 보는 것처럼 MLE 기법의 성능은 주파수 추정 오차의 정밀도에 의해 좌우된다. 왜냐하면 MLE 기법은 FFT의 크기가 최대가 되는 지점의 주파수를 추정한 후 그 정보를 이용하여 크기 및 위상을 추정하기 때문이다. MLE 기법의 주파수 추정 오차를 최소화하기 위해서는 고분해능을 갖는 FFT를 사용해야 하지만 실시간 레이더 신호 능동 상쇄 시스템에서는 FFT의 분해능을 결정하는 샘플링 주파수 및 FFT size에 제약이 있기 때문에 FFT의 분해능 한계에 의해 능동 상쇄 신호에 적합하지 않은 주파수 추정 오차를 포함할 수 있다. 예를 들어, X-band를 사용하는 레이더 신호의 샘플링 주파수는 매우 높는데 반해 FFT size는 제약이 존재하기 때문에 샘플링 주파수 범위까지를 표현하는 FFT bin들의 주파수 간격은 정밀하지 못하게 되어 FFT의 크기가 최대가 되는 지점의 주파수를 추정하였다 하더라도 FFT의 분해능에 의한 추정 오차가 포함되게 되고 따라서 능동 상쇄 신호는 반사 신호를 상쇄시키지 못하고 오히려 그 크기를 증가시킬 수 있다.

2. 2차 보간 기법을 이용한 추정 오차 보정

지금까지 FFT 분해능에 의한 주파수 추정 오차를 보정하기 위해 다양한 추정 오차 보정 기법이 제안되었다^[3-4]. 그 중 FFT 크기가 최대가 되는 주파수 k 와 양 옆의 주파수 $k-1$, $k+1$ 의 FFT 크기를 이용하는 2차 보간 기법을 적용한 주파수 추정 오차 보정 기법^[3]에 대해 살펴보도록 한다.

다음은 2차 보간 기법을 이용하여 유도한 주파수 추정오차 δ 값을 나타낸다.

$$\delta = \frac{-(|X(k+1)| - |X(k-1)|)}{(2|X(k)| - |X(k-1)| - |X(k+1)|)} \quad (6)$$

식 (6)은 이차방정식인 $y = a(x-b)^2 + c$ 에 주파수 $k, k-1, k+1$ 의 FFT 크기 값을 대입하면 쉽게 구할 수 있다. 여기서, 식 (6)은 $k-1$ 지점의 FFT의 크기가 $k+1$ 지점의 FFT 크기보다 크다고 가정하여 유도하였다. 유도된 δ 및 주파수 추정 오차 보정 지점에서의 FFT 크기의 값 $c = |X_{\max}|$ 를 이용하여 pulsed-CW MLE 추정 결과 식 (5)를 다음과 같이 보정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{w}_{co} &= \hat{w} + \delta \\ \hat{A}_{co} &= \frac{2}{N} |X_{\max}| \\ \hat{\phi}_{co} &= \hat{\phi}_k - (\hat{\phi}_k - \hat{\phi}_{k-1}) \times |\delta|, \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\hat{\phi}_k, \hat{\phi}_{k-1}$ 는 각각 $k, k-1$ 지점에서의 위상을 의미한다. 식 (7)은 능동 상쇄 관점에서 상당한 성능 개선을 보여주지만 이후 보여주는 실험결과에서 볼 수 있듯이 피탐지 확률을 높이기 위해서는 좀 더 정밀한 추정 오차 보정 기법이 필요하게 된다.

IV. 개선된 correlation 기반 추정 오차 보정 기법

이번 장에서는 제안하는 파라미터 추정 오차 보정 기법에 대해 알아보도록 한다. 다음에 제시될 식 (9)부터 식 (12)까지의 과정은 기 제안된 correlation 기반의 파라미터 추정 오차 보정 기법^[4]과 유사한 과정을 따른다. 단, 사용하는 신호 모델은 기존 기법에서 사용하는 exponential 신호 대신 수신 신호 (1)을 사용한다.

수신 신호 (1)을 기저대역 신호로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$x[n] = A \cos [wnt_s - \phi] + \epsilon[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

여기서 t_s 는 샘플링 간격을 나타낸다. 먼저, 식 (8)에 대하여 MLE 기법을 적용하여 주파수 \hat{w} 를 추정하고 추정된 \hat{w} 를 기반으로 아래와 같은 신호를 발생시킨다.

$$y[n] = 2 \cos [\hat{w}nt_s], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

그 다음, 수신 신호 (8)과 재생 신호 (9)를 correlation 취하면 새로운 신호 $z[n]$ 을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} z[n] &= x[n]y[n] \\ &= A \cos [(w + \hat{w})nt_s - \phi] \\ &\quad + A \cos [w_e nt_s - \phi] + \epsilon'[n], \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 w_e 는 주파수 추정 오차 $w_e = w - \hat{w}$ 이고 $\epsilon'[n] = 2 \cos [\hat{w}nt_s] \times \epsilon[n]$ 이다. $z[n]$ 을 저역 통과 필터 시키면 식 (10)의 첫 번째 항목은 제거가 되므로 $z[n]$ 은 다음과 같이 간단한 수식으로 나타낼 수 있다.

$$z[n] \cong A \cos [w_e nt_s - \phi] + \epsilon''[n] \quad (11)$$

여기서 $\epsilon''[n]$ 은 $\epsilon'[n]$ 의 저역 통과 필터 후 신호를 나타낸다. 마지막으로, 식 (11)을 $M = N/L$ 개의 샘플씩 더하여 총 L 개의 샘플로 신호를 재구성한다.

$$\begin{aligned} v[l] &= A \sum_{n=lM}^{(l+1)M-1} \cos [w_e nt_s - \phi] \\ &\quad + \sum_{n=lM}^{(l+1)M-1} \epsilon''[n] \\ &= A' \cos [w_e Mlt_s - \phi'] + \epsilon'''[l], \\ l &= 0, 1, \dots, L-1, \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $A' \cong MA, \phi' = \phi + \pi f_c (M-1)t_s$ 이다.

기존 기법은 이후 매우 큰 M 값을 가정하여 식 (12)의 잡음 부분을 위상 잡음으로 근사화하고 least-squares estimator를 사용하여 주파수 추정 오차 \hat{w}_e 를 추정하게 되지만 본 논문에서 고려하는 레이다 능동 상쇄 시스템에서는 총 샘플 수 N 및 FFT size에 의해 M 값이 제한되기 때문에 기존 기법과 같이 least square estimator를 사용할 수 없는 경우가 존재하게 된다. 하지만 재구성된 신호 $v[l]$ 은 전송 주파수가 w_e 이고 샘플링 간격이 Mt_s 인 pulsed-CW 신호로 해석할 수 있으므로 식 (12)에 MLE 기법을 다시 적용하면 \hat{w}_e 를 추정할 수 있다. \hat{w}_e 를 추정함에 있어서 한 가지 주의해야 할 점은 식 (12)에서 얻어진 결과인 \hat{w}_e 는 항상 양수 값을 가지는데 반해 w_e 값은 양수 및 음수 값 모두를 가질 수 있기 때문에 \hat{w}_e 를 추정 후 w_e 의 부호를 고려해 주어야 한다. 식 (8)의 FFT를 기준으로 $|X(\hat{w}-1)| > |X(\hat{w}+1)|$ 이면 w_e 는 음수 값, 부호가 반대이면 w_e 는 양수 값을 갖는다.

식 (12)의 주파수 추정 결과는 여전히 FFT 분해능

문제로 인한 주파수 오차가 포함되어 있지만 샘플링 간격 Mt_s 가 원래 신호보다 M 배 만큼 증가, 다시 말해서 샘플링 주파수가 $1/M$ 만큼 감소했기 때문에 FFT 분해능에 의해 발생 될 추정 오차는 동일한 FFT size가 사용되더라도 원래 신호 (8)의 주파수 추정 오차보다 훨씬 작게 된다. 추정된 \hat{w}_e 값이 음수라 가정하였을 때, k , $k-1$ 번째의 FFT 크기 값을 이차방정식 $y = a(x - \hat{w}_e)^2 + c$ 에 대입하면 크기 오차 보정 값 $c = |X_{\max}|$ 를 구할 수 있고, 이를 이용하여 MLE 추정 결과를 다음과 같이 보정할 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{w}_{pro} &= \hat{w} - \hat{w}_e \\ \hat{A}_{pro} &= \frac{2}{N}|X_{\max}| \\ \hat{\phi}_{pro} &= \hat{\phi}_k - (\hat{\phi}_k - \hat{\phi}_{k-1}) \times |\hat{w}_e|.\end{aligned}\quad (13)$$

V. 모의실험 결과

Pulsed-CW 신호에 MLE 기법과 기존의 파라미터 추정 오차 보정 기법을 적용하였을 때의 능동 상쇄 성능 및 제안하는 파라미터 추정 오차 보정 기법의 능동 상쇄 성능을 비교하기 위해 표 1과 같이 환경을 설정하여 모의실험을 수행하였다. 여기서, 총 샘플 수 N 이 FFT size를 초과하므로 $N/10$ 샘플마다 FFT를 적용하고 각각의 FFT 결과를 평균하여 MLE 기법을 수행하였다.

각 기법의 파라미터 추정 성능이 능동 상쇄 성능에 얼마만큼 영향을 미치는지 분석하기 위해 먼저 각 기법의 파라미터 추정 값의 mean-square error (MSE) 성능을 관찰하였다. 모의실험 결과는 그림 1과 같다. 위협 레이더와 아군 무기체계의 거리가 55Km가 넘는 지점에서는 아군 무기체계에 수신되는 신호의 SNR이 너무 작아서 FFT의 threshold effect^[5]가 발생되기 때문에 그림 1에서 유의미한 MSE 성능을 나타내는 구간은 55Km 이전의 성능 그래프이다.

그림 1을 보면 2차 보간 기법보다 제안하는 추정 오차 보정 기법이 45Km 이전 범위에서는 성능이 우수하지만, 45Km 이후 범위에서는 성능이 열등함을 확인할 수 있다. 제안하는 기법의 성능 열화 이유는 재구성된 신호 (12)가 얻는 SNR 이득보다 $N/10$ 샘플마다 FFT를 적용하고 각각의 FFT 결과를 평균하여 얻는 SNR 이득이 더 크기 때문에 첫 번째 FFT를 수행할 때 FFT

표 1. Pulsed-CW 파라미터 추정 모의실험 환경
Table 1. Simulation environments of pulsed-CW parameter estimation.

Parameter	Value
Radar peak power	$P_t = **$ (Kw)
Radar antenna gain	$G_t = 50$ (dB)
Carrier frequency	$f_c = **$ (X-band)
Pulse width	$\tau = 100$ (ns)
Pulse repetition interval	$T = 2$ (ms)
Phase	$\phi = \pi/6$
Range (Km)	$R = [10 : 5 : 60]$
Sampling frequency	$f_s = 5f_c$
Number of sample	$N = f_s \tau$
Aircraft antenna gain	$G_r = 30$ (dB)
Noise power at aircraft	$N_0 = -30$ (dBW)
Reconstruction factor	$M = 10$
FFT size	1024
RCS	$1m^2$
Number of estimation pulses	$N_e = 1$
Number of return pulses	$N_p = 50$

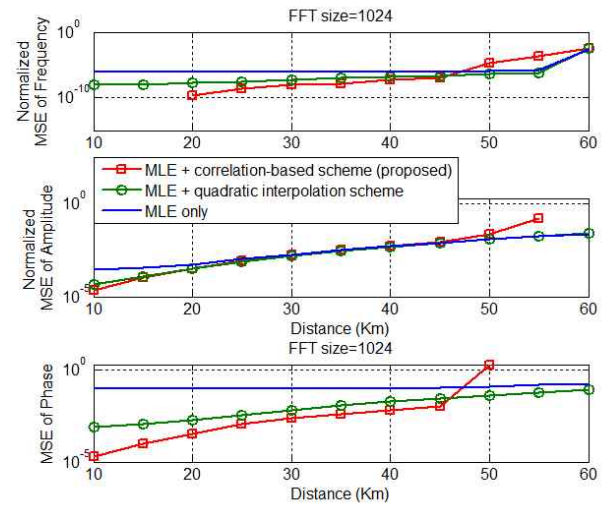


그림 1. MLE 및 추정 오차 보정 기법들의 MSE 성능
Fig. 1. MSE performance of pulsed-CW with MLE and estimation error compensation schemes.

의 threshold effect가 발생하지 않았다더라도 두 번째 FFT를 수행하는 경우 FFT의 threshold effect가 발생되어 정확한 추정 오차 보정을 수행할 수 없기 때문이다. 하지만, 20Km 이내 범위에서 제안하는 기법은 첫 번째 MLE 과정에서 발생하는 주파수 추정 오차를 두

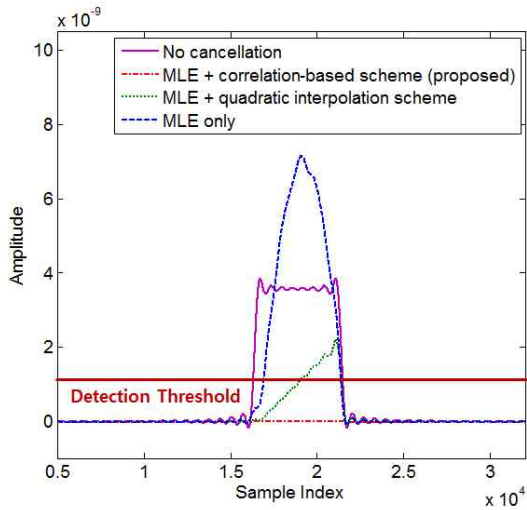


그림 2. 위협 레이더로 되돌아가는 신호 크기 예시
Fig. 2. Example of returned signal to hostile radar.

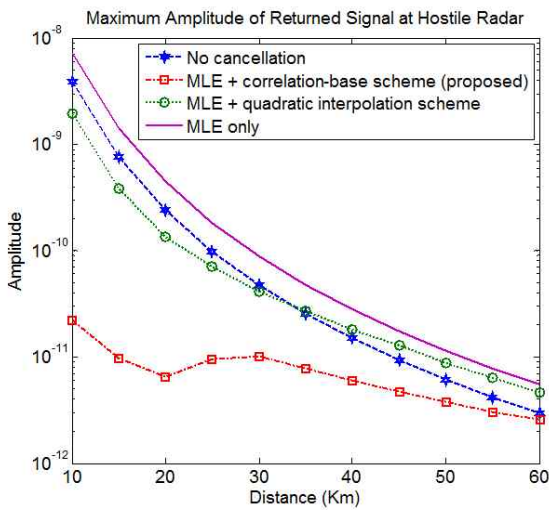


그림 3. 위협 레이더에서 coherent detection시 각 능동 상쇄 기법의 최대 신호 크기
Fig. 3. Maximum amplitude of each active cancellation scheme at hostile radar with ideal coherent detection.

번째 MLE 과정에서 거의 완벽하게 복원해 내어 주파수 추정오차를 0에 근접하게 만들기 때문에 식 (2)의 진폭의 크기 $2A \cos\left(\frac{\Delta\phi - \pi}{2}\right)$ 가 0에 근접하게 되어 능동 상쇄 관점에서 최대의 효과를 기대할 수 있다.

제안하는 기법의 능동 상쇄 효과를 아군 무기체계가 10Km 지점에 존재할 때 위협 레이더로 되돌아가는 신호의 크기를 예시로 보여주면 그림 2와 같다. 여기서, 위협 레이더는 이상적인 coherent detection 기법을 적용한다고 가정한다. 그림 2에서 MLE 기법을 이용한 능

동 상쇄 신호는 오히려 위협 레이더로 되돌아가는 신호의 크기를 두배로 증폭시키지만, 예상하였듯이 2차 보간 기법을 이용한 능동 상쇄 신호는 반사 신호를 상쇄시킨다. 하지만 2차 보간 기법은 주파수 오차가 존재하기 때문에 펄스폭과 관련된 t 에 의하여 $2A \cos\left(-\frac{\Delta\omega t - \Delta\phi + \pi}{2}\right)$ 이 점점 커지고 있음을 확인할 수 있다. 제안하는 기법은 위에서 언급하였듯이 주파수 추정 오차를 0에 근접하도록 만들기 때문에 위협 레이더로 되돌아가는 신호의 크기가 항상 0에 근접하게 된다.

그림 3은 위협 레이더에서 coherent detection을 사용하였을 때 각 능동 상쇄 기법을 적용한 신호의 최대 크기를 나타낸 그림이다. 그림 2의 예시에서 보여주었듯이 제안하는 기법을 적용한 신호의 크기가 기존 기법들보다 매우 작음을 확인할 수 있다. 제안하는 기법의 MSE 성능이 45Km 지점 이후부터는 2차 보간 기법보다 열등함에도 불구하고 능동 상쇄 효과가 더 크게 나타난 이유는 제안하는 기법이 45Km 이후 지점에서도 순시적으로 주파수 오차를 완벽하게 복원하는 경우가 복원하지 하지 못하는 경우보다 다수 존재하여 평균적인 성능을 나타내는 그림 3에 반영되었기 때문이다. 위 결과는 제안하는 기법이 기존의 기법들보다 반사 신호를 상쇄를 상쇄 시키는데 효과적임을 의미하고 따라서 피탐지 감소 기술로 활용될 가능성을 제시하고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 pulsed-CW를 사용하는 위협 레이더 신호에 대해 MLE 기법을 기반으로 한 파라미터 추정 기법의 성능 개선 방안을 제시하였고, 파라미터 추정 성능 개선이 레이더 능동 상쇄에 미치는 영향을 분석하였다. 제안하는 파라미터 추정 오차 보정 기법은 능동 상쇄 신호 발생에서 가장 중요한 주파수 추정 오차를 매우 작도록 보정할 수 있고, 그 결과 제안하는 기법을 적용한 능동 상쇄 신호는 위협 레이더로 되돌아가는 반사 신호를 능동 상쇄시킬 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] Steven M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*,

Prentice-Hall Inc.

- [2] Louis L. Scharf (1991), *Statistical Signal Processing-Detection, Estimation, and Time Series Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [3] Eric Jacobsen and Peter Kootsookos, "Fast, Accurate Frequency Estimators," *IEEE Signal Processing Magazine*, May 2007.
- [4] Zhang Gang-bing, Liu Yu, Xu Jia-jia, Hu Guo-bing, "Frequency estimation based on discrete Fourier transform and least squares," in *International Conference on WCSP 2009*, Nov. 2009.
- [5] Shimon Peleg, "Linear FM Signal Parameter Estimation from Discrete-Time Observations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol 27, No. 4, July 1991.

저 자 소 개

최 승 규(학생회원)
대한전자공학회논문지
48권 TC편 제5호 2011년 참조

이 총 용(정회원)
대한전자공학회논문지
48권 TC편 제4호 2011년 참조