

논문 2014-51-11-6

레이더 신호 능동 상쇄를 위한 Pade 근사 폴-제로 모델 기반의 단계적 파라미터 추정

(Stepwise Parameter Estimation Using Pole-Zero Model of Pade Approximation for Radar Signal Active Cancellation)

한 용 규*, 임 성 목*, 심 동 규*, 이 충 용**

(Yonggue Han, Seongmok Lim, Dongkyu Sim, and Chungyong Lee[©])

요 약

위협 레이더 신호의 능동 상쇄를 위한 파라미터 추정 알고리즘으로 Pade 근사 폴-제로 모델 계수를 이용하여 반복적으로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 Pade 근사의 폴-제로 모델 계수와 파라미터, 수신 샘플의 관계를 바탕으로 적은 수의 수신 샘플과 간단한 비교 과정만을 이용하여 closed form으로 파라미터를 추정한다. 그리고 적은 수의 수신 샘플만을 이용하는 특징과 간단한 계산 과정만을 요구하는 특징을 바탕으로 시간에 따라 오차가 커지는 현상을 억제하기 위해 단계적으로 파라미터를 추정한다. 마지막으로 모의실험을 통해 기존 기법과의 계산 복잡도 및 성능을 비교하고, 제안 알고리즘이 간단하고 신속하게 레이더 신호의 능동 상쇄를 수행함을 보인다.

Abstract

We introduce a parameter estimation algorithm by using pole-zero coefficients of Pade approximation for radar active cancellation. Proposed scheme is based on relation among pole-zero coefficients of Pade approximation, parameters, and samples of received signal. A closed form solution for parameter estimation is achieved with a few samples of received signal and a simple comparison. Also, stepwise estimation algorithm is proposed to suppress beat effect which is occurred by active cancellation over long time with imperfectly estimated parameters. Simulation results show that proposed scheme performs faster radar active cancellation with lower computational complexity than the conventional schemes.

Keywords: 레이더 신호 능동 상쇄, 파라미터 추정, Pade 근사, 단계적 추정 알고리즘

I. 서 론

최근 스텔스 또는 저피탐 (low observation) 기술, 특

히 탐지 가능 범위가 가장 넓은 레이더 신호에 대한 저피탐 기술이 중요하게 연구되고 있다. 레이더의 탐지 범위는 레이더 반사 면적 (RCS; radar cross section), 레이더의 출력, 안테나 이득, 파장 등 여러 변수에 의해 결정된다^[1]. 이때, 아군 무기체계에 의해 결정되는 레이더 반사 면적을 감소시키는 것이 저피탐 기술의 핵심으로 알려져 있다. 기존에는 기체의 형상을 설계하는 기술, 기체 표면에 전파 흡수 물질 (RAM; radar absorbing material)을 도포하는 기술, 그리고 전파를 흡수하는 구조 (RAS; radar absorbing structure)로 설계하는 기술 등의 수동형 저피탐 기술을 이용하였다^[2].

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학부
(Department of Electrical and Electronic Engineering,
Yonsei University)

© Corresponding Author(E-mail: cylee@yonsei.ac.kr)

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

접수일자: 2014년08월13일, 수정일자: 2014년10월08일

게재확정: 2014년11월03일

하지만 레이더 반사 면적을 줄이기 위한 형상은 비행 성능을 떨어뜨리고 전파 흡수 물질 및 전파 흡수 구조는 유지와 정비 비용을 증가시킨다. 따라서 이러한 수동형 피탐지 기술의 문제점을 보완하기 위해 레이더 반사 신호와 반대 위상을 가지는 신호를 송출하여 레이더 반사 면적을 줄이는 능동형 레이더 신호 상쇄 기술이 연구되고 있다. 실시간으로 수신 위협 레이더 신호와 반대 위상을 가지는 신호를 송출하기 위해서는 위협 레이더 신호의 파라미터 추정 이 필수적이다. 이때 신호의 주요 파라미터인 중심 주파수, 진폭, 위상 등을 정확히 추정하지 못하면 반대 위상을 가지는 신호를 정확히 재현하지 못해 오히려 레이더 반사 신호를 보강시키기 때문에 파라미터를 정밀하게 추정하는 것이 중요하다. 또한, 파라미터 추정을 위한 신호처리를 수행 하는 동안에는 적의 레이더 신호에 노출되므로 신속한 대응을 위해 파라미터 추정은 간단한 알고리즘으로 빠르게 진행되어야 한다.

기존에 알려진 파라미터 추정 기법으로는 exhaustive search 기법, maximum likelihood estimation (MLE) 기법 등이 있다^[3~4]. Exhaustive search 기법은 위협 레이더 신호의 진폭, 주파수 및 위상을 가능한 모든 범위에서 조정해 가면서 수신 샘플과의 MSE가 가장 작은 파라미터를 선택하는 기법이다. Exhaustive search 기법은 경우의 수를 모두 고려해야 하므로 계산이 복잡한 단점이 존재한다. MLE 기법 역시 수신 샘플의 FFT를 통해 중심 주파수 및 위상을 추정하는 기법으로 정확한 FFT를 위해서는 많은 수신 샘플과 큰 FFT size가 필요하므로 초기 대응이 늦고 계산량이 많다. 이와 같이 기존 기법들은 복잡한 수행 과정과 많은 수신 샘플을 필요로 하므로 신속한 능동 상쇄를 수행하기 어렵다.

본 논문에서는 Pade 근사의 폴-제로 모델 계수와 위협 레이더 신호 파라미터 간 관계를 이용해 적은 수의 수신 샘플을 이용하여 closed form으로 파라미터를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 또한, 제안 알고리즘의 단점을 보완하기 위한 짧은 구간의 추정을 반복하는 단계적 추정 알고리즘을 제안한다. 그리고 모의실험을 통해 기존 기법과 제안 기법의 계산 복잡도 및 성능을 비교한다. 마지막으로 결론 및 앞으로의 연구 방향에 대해 논의한다.

II. Pade 근사의 폴-제로 모델 계수를 이용한 파라미터 추정 알고리즘

위협 레이더 신호가 단일 주파수 신호이고 수신 잡음이 없다고 가정하면 이산 수신 신호 $s[k]$ 는 식 (1)과 같이 모델링된다.

$$s[k] = A \cos\left(2\pi f \frac{k}{f_s} + \phi\right) u[k], \quad k \text{는 정수}, \quad (1)$$

여기서 $u[k]$ 는 단위 계단 함수이고 f_s 는 샘플링 주파수이며 추정해야 할 파라미터 A, f, ϕ 는 각각 위협 레이더 신호의 진폭, 주파수, 위상을 의미한다. 신호의 크기는 간단히 정규화할 수 있으므로 $A = 1$ 로 가정하고, f, ϕ 를 추정하는 것을 목표로 한다.

식 (1)을 k 에 대해 Z 변환을 하면 식 (2)와 같이 표현되고, 이는 식 (3)의 $p = 2, q = 1$ 인 폴-제로 모델과 같은 형태를 가지므로 파라미터를 대응할 수 있다.

$$S(z) = \frac{\cos\phi - \cos\left(\frac{2\pi f}{f_s} - \phi\right)z^{-1}}{1 - 2\cos\left(\frac{2\pi f}{f_s}\right)z^{-1} + z^{-2}} \quad (2)$$

$$X(z) = \frac{b_q(0) + b_q(1)z^{-1}}{1 + a_p(1)z^{-1} + a_p(2)z^{-2}} \quad (3)$$

대응 관계에 의해 폴-제로 모델의 계수 $a_p(1), a_p(2), b_q(0), b_q(1)$ 은 식 (4)와 같이 추정해야 하는 파라미터 f, ϕ 에 의한 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} a_p(1) &= -2\cos\left(\frac{2\pi f}{f_s}\right), \\ a_p(2) &= 1, \\ b_q(0) &= \cos\phi, \\ b_q(1) &= -\cos\left(\frac{2\pi f}{f_s} - \phi\right) \end{aligned} \quad (4)$$

한편 Pade 근사에 따르면 위와 같은 폴-제로 모델의 계수는 식 (5)의 일반식을 통해 수신 샘플 $x[k]$ 로부터 구할 수 있다^[5].

$$\begin{bmatrix} x[0] & 0 & 0 \\ x[1] & x[0] & 0 \\ x[2] & x[1] & x[0] \\ x[3] & x[2] & x[1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_p(1) \\ a_p(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_q(0) \\ b_q(1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pade 근사의 일반식은 식 (6), (7)과 같은 선형 연립 방정식 두 개로 나누어 풀 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x[2] & x[1] & x[0] \\ x[3] & x[2] & x[1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_p(1) \\ a_p(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x[0] & 0 & 0 \\ x[1] & x[0] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_p(1) \\ a_p(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_q(0) \\ b_q(1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

먼저 식 (6)을 풀어서 $a_p(1)$, $a_p(2)$ 와 수신 샘플 $x[k]$ 와의 관계식을 구한 후, 그 결과를 식 (7)에 대입해서 $b_q(0)$, $b_q(1)$ 와 수신 샘플 $x[k]$ 와의 관계식을 구한다.

$$\begin{bmatrix} a_p(1) \\ a_p(2) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x[1] & x[0] \\ x[2] & x[1] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x[2] \\ x[3] \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} b_q(0) \\ b_q(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ x[0] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p(1) \\ a_p(2) \end{bmatrix}$$

식 (8)과 같이 $x[k]$ 로 표현되는 $a_p(1)$, $a_p(2)$, $b_q(0)$, $b_q(1)$ 을 식 (4)에 대입해 풀면 (9), (10)과 같이 f 와 ϕ 를 수신 샘플 $x[k]$, $k=0,1,2$ 에 대한 closed form으로 표현할 수 있다.

$$f = \pm \frac{f_s}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x[0] + x[2]}{2x[1]} + 2n\pi \right), \quad n \text{은 정수} \quad (9)$$

$$\phi = \pm \cos^{-1}(x[0]) \quad (10)$$

이때, n 은 임의의 정수이므로 식 (9)는 위협 레이더 신호의 실제 주파수를 포함한 무한개의 해를 가진다. 무한개의 가능한 해를 모두 대입하여 찾는 것은 불가능하므로, 제한하는 알고리즘에서는 f_s 에 따른 f 의 범위를 분석하여 유일 해를 얻고자 한다.

식 (11)은 식 (9)의 다른 표현으로, 그림 1과 같이 $f_s/2$ 당 하나의 해를 갖는 방정식이다.

$$\cos\left(\frac{2\pi f}{f_s}\right) = \frac{x[0] + x[2]}{2x[1]} = \text{상수} \quad (11)$$

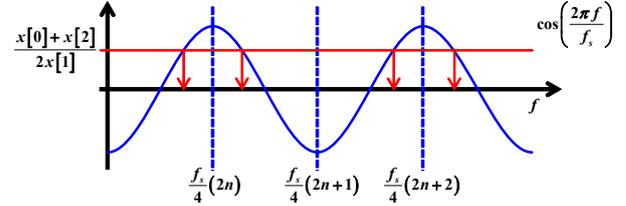


그림 1. 샘플링 주파수로 표현되는 주파수의 범위에 따른 주파수 해의 분류

Fig. 1. Division of frequency solutions according to range of frequency represented by sampling frequency.

이를 이용하여 f_s 로 표현되는 f 의 범위에 따라 다음과 같이 해를 분류할 수 있다.

$$f = \frac{f_s}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x[0] + x[2]}{2x[1]} + 2n\pi \right)$$

$$\text{if } f \in \left[\frac{f_s}{4}(2n), \frac{f_s}{4}(2n+1) \right]$$

$$f = \frac{f_s}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x[0] + x[2]}{2x[1]} + 2(n+1)\pi \right)$$

$$\text{if } f \in \left[\frac{f_s}{4}(2n+1), \frac{f_s}{4}(2n+2) \right] \quad (12)$$

이때 f_s 와 f 는 양의 실수이므로 n 은 0 이상의 정수이다. 특히 $n=0$ 인 경우 식 (13)과 같이 주파수가 $f_s/4$ 보다 작을 때의 특수 해를 찾을 수 있다.

$$f = \frac{f_s}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x[0] + x[2]}{2x[1]} \right) \quad (13)$$

$$\text{if } 0 \leq f \leq \frac{f_s}{4}$$

여기서 f 는 양수이므로 f 의 범위가 양방향으로 표현되는 조건 $0 \leq f \leq f_s/4$ 는 f 의 범위가 한 방향으로 표현되는 조건 $f \leq f_s/4$ 와 같다. $n \neq 0$ 인 경우에는 f 의 범위가 양 방향으로 표현되는데, 이때 f 와 f_s 의 비에 따라 해가 달라지므로 f 의 범위를 알아야 해를 결정할 수 있다. 하지만 f 의 범위가 식 (13)과 같이 한 방향으로만 제한되면 f 의 범위에 대한 정보가 부족하더라도 f_s 를 충분히 크게 설정하여 항상 식 (13)의 조건을 만족하게 할 수 있다. 즉, 충분히 큰 f_s 에 대해 식 (9)의 일반해는 항상 식 (13)의 특수해가 되며 이 해는 유일하다. 그리고 이 해는 3개의 수신 샘플과 샘플링 주파

표 1. 파라미터 추정 알고리즘
Table 1. Parameter estimation algorithm.

파라미터 추정 알고리즘	
1단계: 주파수 추정	
$\hat{f} = \frac{f_s}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x[0] + x[2]}{2x[1]} \right), f_s \gg f$	
2단계: 위상 추정	
if	$\left \left x[k] - \cos(2\pi\hat{f}\frac{k}{f_s} + \cos^{-1}(x[0])) \right \right _{k=1,2}$
	$< \left \left x[k] - \cos(2\pi\hat{f}\frac{k}{f_s} - \cos^{-1}(x[0])) \right \right _{k=1,2}$
then	$\hat{\phi} = +\cos^{-1}(x[0])$
else	$\hat{\phi} = -\cos^{-1}(x[0])$

수에 대한 closed form으로 간단하게 표현된다는 특징이 있다.

위상은 정수 n 에 대해 $2n\pi$ 차이는 같은 값을 가진다는 특징에 의해 식 (10)과 같이 두 가지 경우로 나타낼 수 있다. 따라서 추정된 주파수를 바탕으로 두 가지 경우의 위상에 대해 능동 상쇄 신호를 생성하여 수신 샘플과 비교해 오차가 적은 능동 상쇄 신호에 사용된 위상을 선택한다. 이 방법은 하나의 수신 샘플과 한 번의 비교만을 요구하므로 간단하게 수행할 수 있다는 특징이 있다.

Pade 근사의 폴-제로 모델 계수를 이용한 파라미터 추정 알고리즘을 정리하면 표 1과 같다. 먼저 식 (4)와 식 (8)로부터 파라미터를 수신 샘플에 관한 식으로 정리하고, 충분히 큰 샘플링 주파수를 설정함으로써 유도된 식 (13)을 통해 수신 샘플 세 개로 주파수를 추정한다. 그리고 추정된 주파수를 바탕으로 식 (10)과 간단한 비교를 통해 위상을 추정한다.

III. 단계적 추정 알고리즘을 통한 능동 상쇄

본 논문에서 제안한 알고리즘은 3개의 수신 샘플만

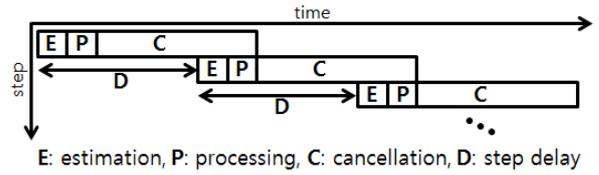


그림 2. 단계적 추정 알고리즘
Fig. 2. Stepwise estimation algorithm.

을 이용해 closed form 해를 찾으므로 계산 복잡도가 낮아 신속한 파라미터 추정이 가능하다. 하지만 적은 수의 수신 샘플을 이용하기 때문에 잡음에 의한 파라미터 추정 오차에 민감하다는 단점을 지닌다. 또한, 짧은 시간 동안 추정된 주파수 파라미터를 오랜 시간 능동 상쇄에 사용하면 맥놀이 현상이 발생하는 단점이 있다. 여기서 맥놀이 현상이란 약간의 주파수 차이를 가지는 반사되는 신호와 능동 상쇄 신호가 간섭을 일으켜 진폭이 주기적으로 변해 아군 무기체계에서 반사되는 신호가 증폭되는 현상이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제안한 알고리즘의 추정 시간이 짧다는 특징을 이용하여 그림 2와 같이 지속적으로 파라미터를 추정하는 반복하는 알고리즘을 제안한다.

그림 2에서 각 단계는 'E', 'P', 'C' 구간으로 구성되어 있으며 D 시간 마다 반복적으로 수행된다. 'E' 구간은 적 위협 레이더 신호를 수신하여 파라미터 추정 알고리즘에 필요한 수신 샘플을 얻는 구간이다. 제안하는 알고리즘의 경우 3개의 샘플만 수집하면 되므로 이 구간에 걸리는 시간은 매우 짧다. 'P' 구간은 수신 샘플을 바탕으로 파라미터 추정 알고리즘을 적용하는 신호처리 구간이다. 제안 기법의 해가 closed form으로 나타나고 계산 복잡도가 낮으므로 'P' 구간에 걸리는 시간 역시 매우 짧다. 'C' 구간은 추정된 파라미터를 바탕으로 능동 상쇄 신호를 생성해 능동 상쇄를 수행하는 구간으로, 맥놀이 현상이 발생하지 않을 정도의 시간으로 설정한다. 'C' 구간을 수행하는 시간에 비해 'E' 구간과 'P' 구간을 수행하는데 걸리는 시간이 매우 작으므로, 현재 단계에서 능동 상쇄를 하는 동안 다음 단계의 능동 상쇄를 위한 샘플의 수집 및 신호 처리가 가능하다. 즉, 이전 단계의 'C' 구간이 종료되기 전에 다음 단계의 'E', 'P' 구간의 처리를 완료할 수 있다. 따라서 맥놀이 현상 없이 끊임없는 능동 상쇄를 수행할 수 있다. 제안 알고리즘은 'E' 구간과 'P' 구간을 빠르게 수행할 수 있으므로 단계적 추정 알고리즘을 적용하기 적합하다.

IV. 모의실험 결과

표 2는 모의실험에서 사용한 파라미터들을 나타낸다. 위협 레이더 신호와 수신 잡음의 비를 20dB로 설정하였고, 샘플링 주파수는 식 (13)의 조건을 만족시키기 위해 위협 레이더 신호의 주파수인 2GHz의 4배인 8GHz로 설정하였다. 위협 레이더 신호의 phase는 임의로 1 rad 부근에서 균등하게 발생시켰다. 기존 기법인 MLE 기법의 경우 250×10^{-9} s 동안 수신한 100개의 샘플로

표 2. 모의실험 환경 파라미터
Table 2. Simulation parameters.

Parameter	Value
SNR [dB]	20
Sampling freq f_s [GHz]	8
Estimation duration [s] (MLE, Proposed)	250, 3.75×10^{-9}
Center frequency f [GHz]	2
Radar phase ϕ [rad]	$1 + U(0, 0.2)$
Radar amplitude A	1
FFT size	1024
'E' duration [s]	3.75×10^{-9}
'P' duration [s]	0
'C' duration [s]	3.75×10^{-9}
Delay [s]	3.75×10^{-9}

파라미터를 추정했고, 제안 기법의 경우 3.75×10^{-9} s 동안 수신한 3개의 샘플로 파라미터를 추정했다. 기존 기법의 FFT size는 1024로 설정하였고, 단계적 추정 알고리즘의 각 구간의 길이 및 step delay는 3.75ns로 동일하게 설정하였다. 신호처리에 걸리는 시간은 무시할 수 있을 만큼 짧다고 가정하였다.

그림 3은 능동 상쇄 수행 후 제거되지 못한 반사 신호의 크기를 비교한 그래프이다. 기존 기법의 경우 많은 수의 수신 샘플을 요구하므로 샘플을 수집하는 250×10^{-9} s 동안은 능동 상쇄를 수행하지 못한다. 반면, 단계적 추정 알고리즘을 적용하지 않은 제안 기법의 경우 샘플의 수집에 3.75×10^{-9} s 밖에 걸리지 않는다. 하지만 이후 맥놀이 현상에 의해 오히려 반사 신호를 증폭시키는 결과를 확인할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 단계적 추정 알고리즘을 적용했을 때는 맥놀이 현상 없이 능동 상쇄를 수행함을 확인할 수 있다.

그림 4는 추정 시간에 따른 반사 신호 크기의 제공의 평균을 나타낸 그래프이다. 'X'점으로 나타나는 제안 기법은 3.75ns의 추정 시간을 필요로 하며 제안 기법의 반사 신호 크기의 제공은 약 3×10^{-4} 이다. 점선은 기존 기법과의 비교를 위한 'X'점을 지나는 가로축과 평행한 선이다. 실선으로 나타나는 기존 기법의 성능은 추정 시간이 증가함에 따라 증가하는데, 제안 기법과 같은

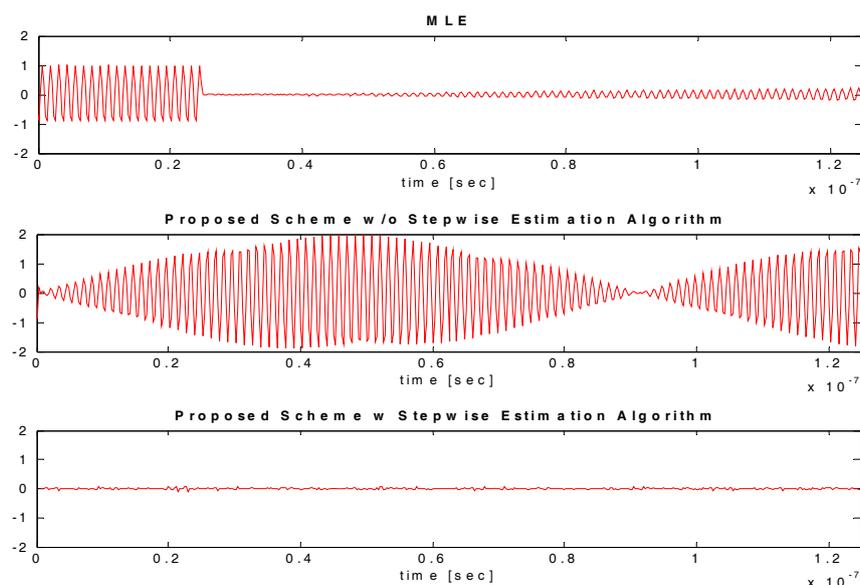


그림 3. 제안 기법과 기존 기법의 능동 상쇄 성능 비교

Fig. 3. Comparison of active cancellation performance between conventional and proposed schemes.

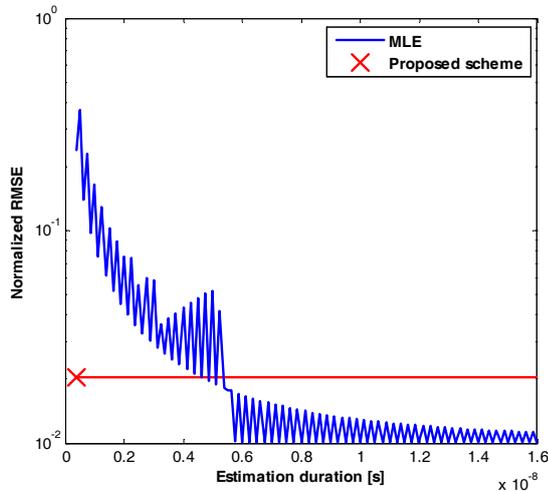


그림 4. 추정 시간과 능동 상쇄 성능의 관계
Fig. 4. Relation between estimation duration and active cancellation performance.

성능을 얻기 위해서는 제안 기법 대비 10배 이상의 추정 시간이 필요함을 확인할 수 있다. 즉, 제안 기법이 기존 기법 대비 신속한 능동 상쇄를 수행할 수 있음을 의미한다.

또한 샘플 수가 N 개일 때 FFT의 계산 복잡도는 $O(N \log N)$ 이므로 기존 기법은 추정 시간 및 샘플 수의 증가에 따라 계산 복잡도가 크게 증가한다. 반면 제안 기법은 3개의 샘플만을 이용하여 closed form으로 나타나고, 단순 비교 알고리즘을 사용하므로 계산 복잡도는 $O(1)$ 이다. 즉, 제안 기법이 기존 기법 대비 단순히 능동 상쇄를 수행할 수 있음을 의미한다.

V. 결 론

본 논문에서는 단일 주파수 위협 레이더 신호에 대해 Pade 근사의 폴-제로 모델 계수를 이용하여 적은 수의 수신 샘플을 사용하여 closed form으로 파라미터를 추정하는 알고리즘과 이 알고리즘의 단점을 보완하는 단계적 추정 알고리즘을 제안하였다. 또한 모의실험을 통해 제안하는 기법은 FFT를 사용하지 않고 3개의 샘플만을 사용하므로 간단하고 신속한 능동 상쇄가 가능함을 검증하였다. 이후 일반적인 위협 레이더 신호에 대응하기 위해 다중 주파수 위협 레이더 신호의 파라미터 추정에 대한 연구가 필요할 것이다.

REFERENCES

- [1] Merrill I. Skolnik (2001), *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill.
- [2] Jungryul Kim (2011), Current State of Stealth and Correspond Radar Technology (1), monthly magazine 'Defense & Technology', vol.390, pp68-75, August 2011.
- [3] Louis L. Scharf (1991), *Statistical Signal Processing-Detection, Estimation, and Time Series Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [4] Seungkyu Choi, Chungyong Lee, "Performance Comparison of Radar Signal Active Cancellation Systems According to Pulsed-CW Parameter Estimation Error," Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, vol.38, TC, no.10, pp.60~66, Oct. 2011.
- [5] Monson H. Hayes (1996), *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. John Wiley & Sons, Inc.

저 자 소 개



한 용 규(학생회원)
 2013년 연세대학교 전기전자
 공학과 학사 졸업.
 2013년~현재 연세대학교 전기전
 자공학과 석박사통합과정
 <주관심분야 : 통신 신호처리,
 MIMO, 군사전자>



임 성 목(학생회원)
 2013년 연세대학교 전기전자
 공학과 학사 졸업.
 2013년~현재 연세대학교 전기전
 자공학과 석박사통합과정
 <주관심분야 : 통신 신호처리, 군
 사전자>



심 동 규(학생회원)
 2011년 연세대학교 전기전자공학
 과 학사 졸업.
 2011년~현재 연세대학교 전기전
 자공학과 석박사통합과정
 <주관심분야 : 통신 신호처리,
 MIMO, 군사전자>



이 충 용(정회원)
 1987년 연세대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1989년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1995년 Georgia Tech.
 전자공학과 박사 졸업.
 1996년~1997년 삼성전자 선임연구원
 1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
 <주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 협력통신
 시스템, 군사전자>