

논문 2014-51-11-7

레이더 신호 능동 상쇄를 위한 Pade 근사 기반의 적응적 파라미터 추정 기법

(Pade Approximation Based Adaptive Parameter Estimation for Radar
Signal Active Cancellation)

이 상 근*, 임 성 목*, 심 동 규*, 이 충 용**

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

요 약

레이더 신호 능동 상쇄를 위하여 기존의 MLE 기법에 비해 매우 적은 수신 신호 샘플만을 이용하여 신호의 파라미터 추정이 가능한 Pade approximation 기반의 적응적 파라미터 추정 알고리즘을 제안한다. 또한 제안하는 알고리즘이 레이더 신호의 중심 주파수를 갱신함으로써 시간에 따라 변하는 중심 주파수를 갖는 신호에 대한 능동적인 추정이 가능함을 보인다. 레이더 신호 능동 상쇄 모의실험을 통해 위협 레이더 신호의 크기에 대한 추정된 신호의 RMSE의 비를 계산함으로써 제안하는 알고리즘의 추정 정확도를 보인다.

Abstract

We propose a parameter estimation algorithm for radar signal active cancellation based on the Pade approximation that requires much less samples than the conventional MLE scheme. We also verify that the radar signal with time-variant center frequency can be estimated with proposed algorithm by renovating the center frequency. We present simulation results for radar signal active cancellation to show the accuracy of estimated signal using proposed algorithm by calculating the ratio of RMSE of estimated signal to amplitude of hostile radar signal.

Keywords : RCS reduction, radar active cancellation, parameter estimation, Pade approximation

I. 서 론

아군의 무기 체계가 노출되는 정도를 최소화하기 위해서는 아군의 무기 체계가 충분히 작은 레이더 반사

단면적 (RCS: Radar Cross Section) 을 가지도록 하는 것이 필수적이다.^[1] RCS를 줄이고자 기존에는 위협 레이더 신호가 입사하는 방향에 대해 다른 방향으로 반사 되도록 무기 체계의 형상을 설계하거나, 레이더파 흡수재(RAM: Radar Absorbent Material) 또는 흡수구조(RAS: Radar Absorbent Structure)를 이용하여 레이더 반사파의 세기를 감소시키는 기술 등의 수동적 RCS 감소 기술이 활발히 연구되었다. 하지만 수동적 RCS 감소 기술은 도입 및 유지 과정에서 매우 많은 비용이 발생할 뿐 아니라 비행체의 항력 등 공기 역학적인 특성에 영향을 미치기 때문에 비행체의 기동성을 떨어뜨릴 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 RCS 감소 기술

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학부
(Dept. 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: 2014년10월14일
게재확정: 2014년11월03일

로 최근 레이더 신호 능동 상쇄 기술이 고려되고 있다. 레이더 신호 능동 상쇄 기술은 위협 레이더 신호를 추정하여 그와 반대 위상을 갖는 대응 신호를 송출함으로써 레이더 반사파를 상쇄하는 기술로, RCS 감소 효과를 얻을 수 있을 뿐 아니라 예측이 어려운 위협 레이더 신호에 대하여 능동적으로 대응할 수 있다는 점에서 미래의 유망한 스텔스 기술로 전망되고 있다.^[2] 하지만 위협 레이더 신호에 대한 정확한 대응 신호를 송출하지 않을 경우 오히려 반사파를 증폭시켜 RCS 값이 커질 가능성이 존재하기 때문에 레이더 신호 능동 상쇄 기술은 위협 레이더 신호의 정확한 추정을 필요로 한다.

한편 위협 레이더 신호를 추정하기 위해서는 수신된 레이더 신호의 진폭, 중심 주파수, 위상 등의 파라미터 추정이 필요하다. 이를 위하여 기존의 연구는 수신 신호의 확률 밀도 함수를 분석하여 파라미터를 추정하는 maximum likelihood 방법과, 추정 정확도를 향상시키기 위한 보간법에 대하여 진행되었다.^[3-4] 하지만 기존 기법의 경우 높은 분해능을 얻기 위하여 수신 신호 샘플의 수를 많이 필요로 하고, 시간에 따라 변하는 파라미터에 대한 고려를 하지 않고 있다.

본 논문에서는 Pade approximation을 이용한 파라미터 추정 기법을 제안하고, FFT size 만큼의 샘플 수를 필요로 하는 기존 기법에 비하여 제안 기법이 매우 적은 수의 샘플만을 이용하여 파라미터 추정이 가능함을 보인다. 또한 제안 기법이 귀납적 알고리즘을 통하여 다음 수신 신호를 예측 가능하며, 이를 이용하여 시변하는 중심 주파수를 갖는 레이더 신호의 추정이 가능함을 모의실험을 통하여 보인다.

II. 시스템 모델

입사하는 레이더 신호는 식 (1)의 $x(t)$ 와 같이 시간 영역인 t 도메인에서 사인파 신호에 부가 잡음이 섞인 형태를 가정한다.

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi) + v(t) \quad (1)$$

식 (1)에서 A , f_c , ϕ 는 각각 사인파 신호의 진폭, 중심 주파수, 위상이고, $v(t)$ 는 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 분포를 따르는 부가 잡음이다. 또한 $x(t)$ 를 f_s 의 레이트로 샘플링한 이후의 이산 신호 $x[n]$ 은 중심 주파수

대 샘플링 레이트의 비 $\beta = f_c/f_s$ 를 이용하여 이산 시간 영역인 n 도메인에서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x[n] = A \cos(2\pi\beta n + \phi) + v'[n] \quad (2)$$

여기서 $v'[n]$ 은 샘플링 이후의 부가 잡음으로, $v'[n] = v(n/f_s)$ 이다. 아군은 이산 신호 $x[n]$ 을 이용하여 위협 레이더 신호의 파라미터 A , f_c , ϕ 를 추정하고자 한다. 추정된 파라미터를 \hat{A} , \hat{f}_c , $\hat{\phi}$ 로 표기하면 추정된 레이더 신호는 식 (3)과 같다.

$$\hat{x}(t) = \hat{A} \cos(2\pi\hat{f}_c t + \hat{\phi}) \quad (3)$$

아군은 추정된 이산 신호 $\hat{x}[n]$ 을 바탕으로 위협 레이더 신호에 대한 아군의 무기 체계 표면에서의 반사파를 예측 가능하며 예측된 반사파와 위상이 반대인 신호를 송출하여 반사파의 파워를 줄임으로써 RCS 감소효과를 얻을 수 있다.

III. Pade Approximation

임의의 이산 신호 $x[n]$ 는 복소 주파수 영역인 z 도메인에서 식 (4)와 같은 power series $X(z)$ 로 표현될 수 있다.

$$X(z) = \sum_{i=0}^{\infty} x[i]z^{-i} \quad (4)$$

이때 식 (4)와 같이 $X(z)$ 를 구하기 위해서는 무한히 많은 신호 샘플이 필요하므로 유한한 개수의 신호 샘플을 이용한 $X(z)$ 의 근사 기법이 필요하다. Pade approximation은 power series 모델링을 이용하여 실제 power series $X(z)$ 를 추정하는 잘 알려진 기법 중 하나이다.^[5]

식 (4)에서 $X(z)$ 는 식 (5)의 $\hat{X}(z)$ 와 같이 P 개의 폴과 Q 개의 제로를 갖는 형태로 표현이 가능하다.

$$\hat{X}(z) = \frac{\sum_{k=0}^Q b_q(k)z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^P a_p(k)z^{-k}} \quad (5)$$

여기서 a_p 와 b_q 는 각각 $\hat{X}(z)$ 의 분자와 분모의 계수이다. 복소 주파수 영역에서의 power series $\hat{X}(z)$ 는 역 z

$$\begin{bmatrix} x(0) & 0 & \cdots & 0 \\ x(1) & x(0) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(Q) & x(Q-1) & \cdots & x(Q-P) \\ x(Q+1) & x(Q) & \cdots & x(Q-P+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(P+Q) & x(P+Q-1) & \cdots & x(Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_p(1) \\ a_p(2) \\ \vdots \\ a_p(P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_q(0) \\ b_q(1) \\ \vdots \\ b_q(Q) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

변환을 통하여 식 (6)과 같이 시간 영역에서 분석이 가능하고, 특히 $0 \leq n \leq P+Q$ 인 경우 식 (7)과 같은 행렬 형태로 표현이 가능하다.

$$x[n] + \sum_{k=1}^P a_p[k]x[n-k] = b_q[n] \quad (6)$$

식 (6)과 (7)은 신호 샘플 $x[n]$ 을 이용하여 모델링된 power series $\hat{X}(z)$ 의 계수 a_p 와 b_q 를 추정할 수 있음을 의미하며 특히 $x[0]$ 부터 $x[P+Q]$ 까지의 $P+Q+1$ 개의 신호를 이용하여 $\hat{X}(z)$ 를 구할 수 있다. 이 경우 $P+Q+1$ 개의 신호 샘플에 대한 정확한 power series를 구할 수 있으며, 모델링된 power series $\hat{X}(z)$ 의 폴과 제로의 차수를 늘릴수록 $X(z)$ 에 가까운 모델링이 가능하다.

IV. Pade approximation을 이용한 적응적 파라미터 추정 알고리즘

수신단은 수신 신호 값을 이용하여 레이더 신호의 파라미터를 추정하고, 추정된 파라미터를 기반으로 아직 수신되지 않은 신호를 예측하여 이를 상쇄하기 위한 대응 신호를 송신하고자 한다. 이때 아군은 위협 레이더 신호에 대한 파라미터 정보를 갖고 있지 않으므로 아군은 위협 레이더 신호에 대해 유동적으로 대응이 가능한 추정 기법이 필요하다.

한편 2장에서 언급한 것과 같이 본 논문에서는 사인파 레이더 신호를 추정하기 위하여 신호의 진폭, 중심 주파수, 위상의 세 파라미터를 추정하고자 한다. 이 중 신호의 진폭은 식 (8)과 같은 사인파의 특징을 이용하여 수신 신호의 파워를 측정함으로써 쉽게 추정이 가능하다.

$$E\{|A \cos(2\pi f_c t + \phi)|^2\} = \frac{A^2}{2} \quad (8)$$

이때 수신 과정에서 발생한 부가 잡음에 의해 수신 신호의 파워는 레이더 신호와 잡음의 파워가 더해진 형태를 갖는다. 하지만 부가 잡음의 이차 통계 특성은 시간에 따라 변하는 정도가 매우 적으므로 수신단은 잡음의 분산 정보를 쉽게 획득 가능하고, 수신 신호의 파워에서 이를 제거함으로써 레이더 신호의 진폭을 추정할 수 있다.

가. Learning interval

위협 레이더 신호의 적응적인 추정을 위해서는 파라미터의 추정 과정에서 수신 신호의 정보를 실시간으로 이용하는 것이 필수적이며, 이를 위해서는 초기 파라미터 값을 구하기 위한 구간이 필요하다. 본 장에서는 초기 파라미터인 초기 중심 주파수와 위상을 구하기 위한 초기 구간을 learning interval로 정의한다. 수신단은 식 (7)과 (5)를 이용하여 초기 $P+Q+1$ 개의 수신 신호 샘플에 대한 복소 주파수 z 영역에서의 power series $\hat{X}(z)$ 를 구할 수 있다. 이때 $z = \exp(j2\pi f/f_s)$ 를 대입하면 $P+Q+1$ 신호 샘플에 대한 복소 주파수 영역에서의 $\hat{X}(z)$ 를 실수 주파수 영역에서의 DFT (Discrete Fourier transform) 신호 $\hat{X}(e^{j\omega})$ 로 전환이 가능하며, 식 (9)와 같이 $\hat{X}(e^{j\omega})$ 에서의 peak detection을 통하여 중심 주파수를 추정 가능하다.

$$\hat{f} = \arg \max_f |\hat{X}(e^{j\omega})| \quad (9)$$

또한 learning interval 내부의 위상은 식 (10)과 같이 수신 신호와 사인파 신호 사이의 ML 방법을 이용하여 추정할 수 있다.

$$\phi_0 = \min_{\phi} \sum_{n=0}^{P+Q} \left| x[n] - A \cos\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \phi\right) \right|^2 \quad (10)$$

추정된 파워 스펙트럼 밀도는 수신 과정에서의 부가 잡음에 의해 실제 파워 스펙트럼 밀도에 대한 오차를

갖는다. 이때 각 샘플에 더해지는 잡음은 서로 독립적인 가우시안 분포를 가지기 때문에 추정에 사용되는 샘플 수가 많을수록 잡음의 효과가 줄어드는 성질을 갖는다. 따라서 Pade approximation을 이용한 파워 스펙트럼 밀도 함수를 구하기 위하여 높은 차수의 폴과 제로를 갖는 power series 모델을 사용하는 것이 추정 과정에서의 잡음의 영향을 줄이는데 효과적이다. 즉, learning interval의 길이를 길게 할수록 파라미터 추정의 정확도가 향상된다.

나. 적응적 파라미터 추정 알고리즘

단일 중심 주파수를 갖는 사인파 이산 시간 신호의 경우 인접한 신호 샘플은 식 (11)과 같이 서로 $2\pi\beta$ 만큼의 위상차를 갖는다.

$$A \cos(\phi[i+1]) = A \cos(\phi[i] + 2\pi\beta) \quad (11)$$

한편 i 번째까지의 신호 샘플이 추정되었을 때, $i - (P+Q)$ 번째부터 i 번째까지의 $P+Q+1$ 개의 추정된 신호 샘플을 이용하여 IV-가 절에서 설명한 바와 같이 DFT 신호의 peak detection을 통한 중심 주파수 \hat{f}_i 를 추정 가능하다. 이때 i 번째 신호 샘플과 $i+1$ 번째 신호 샘플이 $2\pi\hat{\beta}_i = 2\pi\hat{f}_i/f_s$ 만큼의 위상차를 갖는다고 가정하면 i 번째 신호 샘플은 식 (12)와 같이 $i-1$ 번째까지의 위상차의 합을 이용하여 추정 가능하다.

$$\hat{x}[i] = A \cos\left(\Phi_0 + \sum_{k=0}^{i-1} 2\pi\hat{\beta}_k\right) \quad (12)$$

여기서 Φ_0 는 learning interval에서 추정된 마지막 신호 샘플의 위상 $\Phi_0 = \arccos(\hat{x}[P+Q])$ 로, 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}[P+Q] = A \cos\left(2\pi\frac{\hat{f}_0}{f_s}(P+Q) + \phi_0\right) \quad (13)$$

그림 1은 learning interval의 길이가 $P+Q+1=7$ 샘플이고 $i=6$ 인 경우의 신호의 추정 과정이다.

아군은 무기 체계 표면에서의 $\hat{x}[i]$ 에 해당하는 반사파를 알 수 있고, 반사파와 π 만큼 위상이 차이 나는 신호를 송출하여 반사파를 상쇄 가능하다. 이때 제안 기법은 $i-1$ 번째까지의 수신 신호 샘플을 이용하여 i

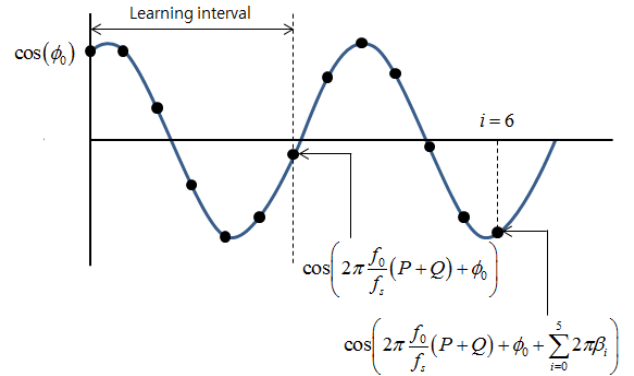


그림 1. 레이더 신호의 추정 과정의 예시
($P+Q+1=7, i=6$)

Fig. 1. Example of radar signal estimation procedure.
($P+Q+1=7, i=6$)

번째 레이더 신호를 추정하므로 시간에 따라 변하는 파라미터를 갖는 레이더 신호에 대하여 능동적인 대처가 가능하다.

한편 기존의 MLE 기법은 중심 주파수의 추정을 위하여 FFT를 필요로 한다. 하지만 FFT의 분해능이 FFT size에 따라 증가하므로 기존 기법의 중심 주파수 추정 성능은 FFT size에 의해 제약받을 뿐 아니라 추정에 필요한 샘플 수 역시 FFT size에 비례한다. 또한 기존 기법은 단일 파라미터를 추정하기 위한 기법이므로 시간에 따라 변하는 파라미터의 추정이 어렵다. 그에 반해 제안 기법은 기존 기법 대비 적은 신호 샘플만을 이용하여 별도의 FFT 연산 없이 DFT 신호를 구함으로써 레이더 신호의 중심 주파수를 추정 가능하며, 수신 신호의 정보를 파라미터 추정에 실시간으로 이용하므로 기존 기법에 비하여 유동적으로 시간에 따라 변하는 파라미터의 추정 및 레이더 신호의 상쇄가 가능하다.

V. 모의실험

Pade approximation 기반의 레이더 신호 추정 기법의 성능을 검증하기 위하여 추정된 신호를 이용한 레이더 신호 능동 상쇄 모의실험을 진행하였다. 모의실험은 표 1과 같은 실험 환경에서 진행하였으며, 위협 레이더 신호는 아군의 무기 체계의 표면에서 반사되는 과정에서 진폭이나 위상의 변화를 겪지 않는다고 가정하였다. 또한 제안하는 기법의 성능을 검증하기 위하여 평균 상

표 1. 레이더 신호 능동 상쇄 모의실험 환경
Table 1. Radar active cancellation simulation environment.

파라미터	값
진폭 A	1
단일 중심 주파수 f_c	10MHz
시변 중심 주파수 f_c	$10(1+\sin(2\pi t))$ MHz
샘플링 레이트 f_s	80MHz
P	6
Q	5
초기 위상	$\pi/3$
SNR	20dB
샘플 수	1000

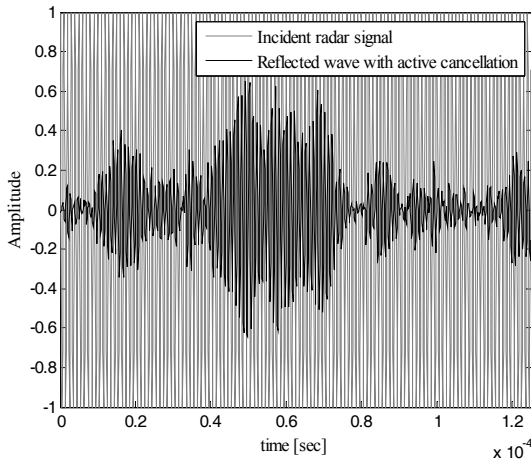


그림 2. 단일 주파수 레이더 신호의 능동 상쇄 결과
Fig. 2. Result of active cancellation for radar signal with signal center frequency.

쇄된 반사파의 크기 대 실제 레이더 신호의 크기의 비 η 를 성능의 지표로 사용하였다. 상쇄된 반사파의 크기는 실제 레이더 신호와 추정된 신호 사이의 오차의 크기인 root mean square error (RMSE) 이므로 η 는 식 (14)와 normalized RMSE로 표현 가능하다.

$$\eta = \sqrt{\frac{E\{|d[n] - \hat{d}[n]|^2\}}{E\{|d[n]|^2\}}} \quad (14)$$

식 (14)에서 $d[n]$ 는 위협 레이더 신호, $\hat{d}[n]$ 은 추정된 레이더 신호이다.

그림 2는 단일 중심 주파수를 갖는 사인파 레이더 신호에 대한 능동 상쇄의 결과 그래프이다. 성능 검증에 사용된 1000개의 신호 샘플에 대한 normalized RMSE η 는 약 0.5768로, 레이더 신호 대비 약 33.3% 만큼의 파워 오차를 갖는 것을 확인하였다. 그림 2에서 확인할

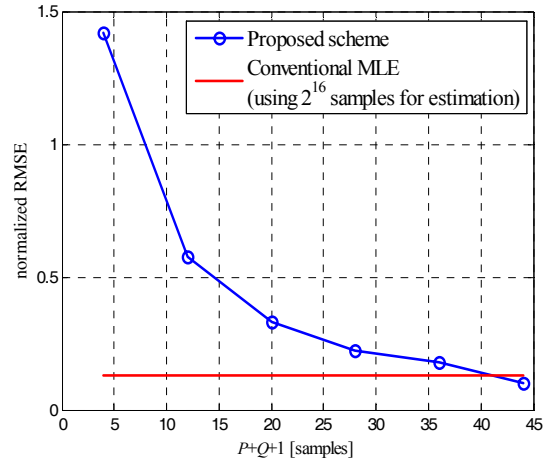


그림 3. 추정에 사용된 샘플 수에 따른 추정된 신호의 normalized RMSE
Fig. 3. Normalized RMSE of estimated signal according to the number of samples for estimation.

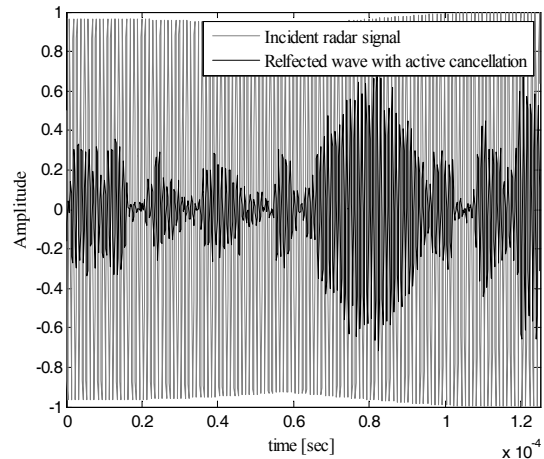


그림 4. 시간에 따라 변하는 중심 주파수를 갖는 레이더 신호의 능동 상쇄 결과
Fig. 4. Result of active cancellation for radar signal with variant center frequency.

수 있듯이 추정된 신호와의 오차는 실험에 사용된 1000개의 샘플에 걸쳐서 수렴하지 않고 랜덤한 특성을 갖는데, 이것은 부가 잡음에 의하여 발생한 주파수 추정 과정에서의 오차 때문이다. 이러한 오차는 추정에 사용되는 $P+Q+1$ 개의 샘플에 더해진 잡음에 의해 발생되며, IV-가 절에서 설명하였듯이 추정에 사용된 샘플의 수가 많을수록 잡음의 영향이 적어지므로 추정 오차를 줄일 수 있다. 또한 Pade approximation을 이용하여 DFT 신호를 모델링함으로써 레이더 신호의 파라미터를 추정하는 제안 기법은 중심 주파수의 추정 과정에서

오차가 발생할 경우 이후 신호들에 대하여 위상 오차에 의한 에러 전파가 발생할 수 있다. 특히 한 샘플에 매우 큰 잡음이 부가되었을 경우 다음 샘플들에 대하여 버스트 에러가 발생할 수 있다. 본 모의실험에서는 이러한 버스트 에러를 줄이기 위하여 주파수가 갱신되는 과정에서 20% 이상 변할 수 없도록 설정하였다.

그림 3은 추정에 사용된 샘플 수 $P+Q+1$ 에 대한 단일 주파수 레이더 신호의 능동 상쇄 성능을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 추정에 사용된 샘플의 수가 늘어날수록 추정된 신호의 normalized RMSE η 가 줄어들며 이러한 결과를 통하여 추정에 사용된 샘플의 수가 많을수록 랜덤 부가 잡음에 의한 추정 오차가 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 기존 MLE 기법이 $2^{16}=65536$ 개의 샘플을 사용한 파라미터 추정을 통해 약 $\eta=0.11$ 의 성능 보인 것에 비해 제안 기법은 약 40개의 샘플을 이용하여 동일한 성능을 얻을 수 있음을 보임으로써 제안 기법의 우수함을 검증하였다.

그림 4는 시간에 따라 변하는 중심 주파수를 갖는 레이더 신호에 대한 능동 상쇄의 결과 그래프이다. 성능 검증에 사용된 1000개의 신호 샘플에 대한 normalized RMSE η 는 약 0.5404로, 단일 중심 주파수를 갖는 레이더 신호를 추정한 경우와 비슷한 추정 성능 결과를 보이는 것을 확인하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 Pade approximation을 이용하여 위협 레이더 신호의 능동 상쇄를 위한 레이더 신호 추정 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안하는 알고리즘이 MLE를 이용한 기존 파라미터 추정 기법에 비해 적은 수의 샘플만을 이용하여 레이더 신호의 추정이 가능하며 시간에 따라 변하는 중심 주파수를 갖는 신호에 대해서 추정이 가능함을 보였다. 또한 이를 바탕으로 레이더 신호의 능동 상쇄 모의실험을 통하여 제안 기법의 추정 정확도를 검증하였다.

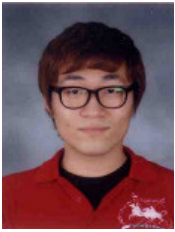
REFERENCES

- [1] Merrill Skolnik, Radar Handbook 3rd edition, McGraw-Hill Professional, Feb. 2008.
- [2] Jungryul Kim, Current State of Stealth and

Correspond Radar Technology, Defense & Technology, vol. 390, pp. 68-75, Aug. 2011.

- [3] Steven M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing Estimation Theory, Prentice-Hall, 157-218, 2014.
- [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, Statistical Digital Signal Processing and Modeling, Wiley, 1996.

저 자 소 개



이 상 근(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,
MIMO, 군사전자>



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



이 충 응(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>