

논문 2014-51-3-4

단일 스테거 PRI의 추정 및 능동 상쇄를 위한 예상 도착 시간 추정 기법

(Estimation Method of Single Stagger PRI
and Future TOA for Active Cancellation)

임 성 목*, 심 동 규*, 이 충 용**

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

요 약

스태거 펄스 반복 주기 (pulse repetition interval, PRI)로 구성된 위협 레이더 신호에 대하여 실시간으로 PRI transform을 적용하여 스테거 PRI를 분석하고 측정 TOA와 추정된 PRI를 이용하여 능동 상쇄에 필요한 미래의 TOA (time of arrival)를 계산한다. 또한, 추정된 PRI와 TOA에 포함되어 있는 오차의 영향을 살펴보고 추정 PRI의 정확도를 향상시키는 기법과 TOA 오차의 영향을 감소시키기 위하여 TOA 평균화 기법을 제안한다. 마지막으로 TDOA와 최근 TOA를 이용하여 단순하게 예측된 미래 TOA와 제안된 방법을 통해 예측된 미래 TOA 간의 RMSE (root mean square error)를 비교하여 제안된 기법의 예측 정확도가 높음을 보인다.

Abstract

Through applying hostile radar signals that use stagger PRI to PRI transform in real time, we can analyze stagger PRI and calculate the future TOA for active cancellation by using measured TOA and estimated PRI. We shows the effect of the errors that are contained in PRI and measured TOA. Then, it will suggest the technique to improve the accuracy of estimated PRI and the TOA averaging method for reducing the effect of measured TOA error. Finally, we will show that accuracy of estimated future TOA that is calculated by proposed scheme is higher than that of future TOA that is simply calculated with TDOA and newest TOA through comparing RMSE performance.

Keywords : PRI transform, 스테거 PRI, 레이더 신호 능동 상쇄, TOA

I. 서 론

기존 아군 무기 체계를 적군의 레이더로부터 은폐하기 위해 레이더 신호를 흡수하는 도료 (RAM)를 무기

체계 표면에 도포하는 방법과 신호의 반사량을 최소화하는 각도로 무기 체계의 구조, 형상을 조절하는 방법 등을 이용하여 레이더 반사 단면적 (RCS)을 감소시키는 수동형 피탐지 기술을 이용하였다. 하지만 이러한 수동형 피탐지 기술은 고비용의 RAM을 지속적으로 도포해야하므로 매우 높은 유지비용이 필요하고 반사량을 최소화하는 구조로 비행하는 무기 체계를 변형할 경우, 항력 등 비행과 관련된 요소에 방해가 된다는 단점이 발생하게 된다. 따라서 수동형 피탐지 기술의 단점을 보완할 수 있는 능동형 피탐지 기술의 개발이 요구된다. 능동형 피탐지 기술은 레이더 신호의 변화를 파악

* 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: 2013년8월26일, 수정완료일: 2014년3월4일

하고 이에 대응하는 피탐지 전략을 수립하여 아군 무기 체계의 레이더 반사 단면적을 효과적으로 감소시키는 기술을 의미한다. 능동형 피탐지 기술은 크게 RF 기술을 이용한 기법과 기저대역 신호처리를 이용한 기법으로 나눌 수 있다. RF 기술은 입사한 레이더 신호가 유발하는 표면 전류를 제거함으로써 상쇄를 유도하는 방법과 위상 공액 배열을 이용하여 대응 신호를 발생시키는 방법이 있다. 하지만 기저대역 기반 기술은 입사 신호에 대한 신호처리를 수행하여 파라미터를 추정하고 추정된 파라미터를 기반으로 대응 신호를 발생시켜 입사 신호를 상쇄한다. 기저대역 기반 기법은 파라미터를 추정하는데 시간이 소요된다는 단점이 있지만 추정된 파라미터를 통해 적군의 레이더 시스템에 대한 정보를 수집할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문은 기저대역 신호처리를 통해 PRI를 추정하고 이에 대한 입사 신호의 TOA를 예측하는 것에 목표를 둔다. 기저대역 신호처리를 이용한 기법을 구현하기 위해 적 레이더의 신호를 분석하여 주요 파라미터를 추정하는 과정이 선행되어야 한다. Pulsed-CW 신호를 기반으로 하는 레이더 신호를 능동 상쇄하기 위하여 수신된 신호의 크기, 중심 주파수, 위상과 펄스 반복 주기 (pulse repetition interval, PRI) 등을 추정해야 한다. 이후, 반사되는 신호와 동일하지만 위상이 180° 반전된 신호를 발생시켜 상쇄시킨다면 적군의 레이더를 교란시킬 수 있다. 하지만 정확한 파라미터를 추정하지 못할 경우, 신호를 상쇄시키지 못하고 보장시킬 수 있기 때문에 아군 무기 체계에 불리한 결과를 발생시킬 수 있다. 따라서 정밀한 파라미터의 추정이 능동 상쇄에 필수적인 요소가 된다. PRI를 제외한 레이더 신호의 크기, 중심 주파수, 위상 파라미터는 MLE (maximum-likelihood estimation) 기법을 이용하여 추정될 수 있으며 추정 오차에 따른 영향이 연구되었다^[1].

본 논문은 정확한 PRI 추정 기법과 이를 이용하여 미래 도착 시간 (time of arrival, TOA)을 예측하고 오차에 대한 결과를 제시한다. II장에서는 목적에 따라 운용될 수 있는 다양한 PRI 중 MTI (moving target indication) 레이더 시스템이 무효 속도 (blind speed) 문제를 해결하기 위하여 사용하는 스테거 PRI와 PRI를 추정하기 위한 기법 중 하나인 PRI transform^[2]에 대하여 개략적으로 설명한다. 그리고 단일 스테거 PRI에 대한 분석 알고리즘을 설명한 후, 더욱 정밀한 추정을 위

한 기법을 제시한다. 제안된 기법의 성능에 대한 실험을 III장에서 정리하였으며 마지막 장에서 결론 및 앞으로의 연구 방향에 대하여 논의한다.

II. 본 론

1. 스테거 (stagger) PRI

고정된 지형이나 건물에 의한 레이더 탐지 결과를 제외하고 이동하는 항공기 등의 위치를 탐지하기 위하여 MTI 레이더가 고안되었다^[3~4]. 하지만 이동하는 목표물이 무효 속도로 이동하는 경우 MTI 레이더가 목표물을 탐지하지 못하게 된다. 이러한 무효 속도로 인한 MTI 레이더의 탐지 성능 열화를 제거하기 위하여 단일 PRI를 이용하는 것이 아닌 두 개 이상의 PRI를 배열하여 주기적인 신호를 송출한다. Element PRI는 스테거 PRI를 구성하고 있는 작은 펄스 간격이며 frame PRI는 한 주기의 element PRI가 반복되는 펄스 간격이다.

2. PRI transform

PRI transform은 신호의 TOA만을 이용하여 PRI를 추정하는 기법이다. PRI transform은 harmonics의 영향을 제거한 자기 상관함수 (autocorrelation)로 표현할 수 있다. PRI transform을 수행하기 위하여 필요한 정보인 측정된 TOA를 $t_n (n = 0, 1, \dots, N-1)$ 으로 정의하고 수신되는 신호의 펄스열을 다음과 같이 임펄스의 합, $g(t)$ 로 나타내고

$$g(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - t_n) \quad (1)$$

펄스열 $g(t)$ 에 대한 자기 상관함수를 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)g(t+\tau)dt \quad (2)$$

펄스열을 나타내는 식 (1)과 자기 상관함수를 결합하여 시간 차이를 의미하는 τ 와 TOA 간 차이 (time difference of arrival, TDOA)가 일치하는 경우 ($\tau = t_n - t_m$), 값을 가지게 되는 식 (3)을 구한다.

$$C(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) \quad (3)$$

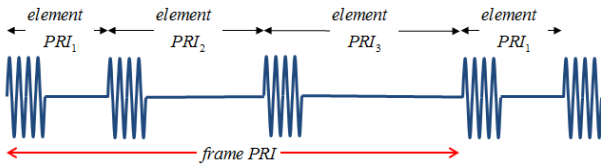


그림 1. 세 개의 element PRI로 구성된 스테거 펄스열
Fig. 1. Stagger pulse train that consists of three element PRI.

자기 상관함수를 이용하여 PRI를 추정할 경우, 실제 PRI의 배수에 해당되는 harmonics, τ 에도 큰 값이 검출되는 문제가 발생한다. 이와 같은 문제를 제거하기 위하여 식 (4)와 같이 자기 상관함수에 exponential 인자를 추가한 PRI transform, $D(\tau)$ 를 이용한다.

$$D(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) \times \exp[2\pi i t_n / (t_n - t_m)] \quad (4)$$

Harmonics가 제거된 $D(\tau)$ 는 연속적인 값을 가지는 함수로써 계산의 편리함을 위하여 이산 형태로 변환하여 계산한다. 연속하는 값을 가질 수 있는 τ 의 검색 구간을 일정한 폭의 여러 개 영역 (bin)으로 나누어 PRI transform을 수행한다. 식 (5)는 최소 관심 값이 τ_{min} , 최대 관심 값이 τ_{max} 일 때, 구간을 K 개의 bin으로 나누고, 연속하는 시간 값, τ 의 검출 값 $D(\tau)$ 를 해당되는 k 번째 bin에 적분해줌으로써 이산 형태 D_k 로 변환된다.

$$D_k = \int_{\tau_k - b/2}^{\tau_k + b/2} D(\tau) d\tau, \quad (5)$$

$$b = (\tau_{max} - \tau_{min}) / K,$$

$$\tau_k = (k - 1/2)b + \tau_{min}$$

여기서 b 와 τ_k 는 bin의 폭과 중심 값을 의미한다. PRI transform은 여러 개의 다른 레이더가 송출한 신호의 PRI를 효과적으로 추정할 수 있다. 하지만 스테거 PRI를 이용하는 레이더 신호를 분석할 경우, 펄스열을 구성하고 있는 element PRI를 추정할 수 없다는 단점이 존재한다[5]. 또한, PRI transform을 수행하는데 이용되는 측정 TOA 정보에 오차가 포함되었을 때, 추정 PRI의 성능이 열화된다. 기저대역 신호처리 기반으로 레이더 신호를 상쇄하기 위하여 정확한 PRI 추정이 요구되기 때문에 TOA 오차로 인해 발생하는 문제를 해결해야 한다.

3. 단일 스테거 PRI 분석 알고리즘

PRI transform을 이용하여 스테거 PRI를 추정할 때, element PRI를 검출할 수 없지만 스테거 PRI가 반복되는 주기인 frame PRI는 검출이 가능하다. 단일 스테거 PRI의 반복되는 특성을 이용하여 frame PRI와 보유하고 있는 TOA 정보를 통해 스테거 펄스열을 분석할 수 있다[5]. 입사 신호의 TOA를 나타낸 그림 2는 시간 축상에 화살표를 이용하여 세 개의 element PRI로 구성된 단일 스테거 PRI 및 TOA를 표현한다. 실선 화살표는 입사된 신호의 측정된 TOA이며 점선 화살표는 추정된 미래 입사 TOA를 나타내고 있다. 한 주기의 스테거 PRI를 구성하고 있는 element PRI를 찾아내는 과정은 다음과 같다.

- 1) N 개의 측정된 TOA에 PRI transform을 적용하여 frame PRI를 추정한다.
- 2) N 개의 TOA 정보 중 첫 번째 TOA에 1 frame PRI를 더하여 한 주기 이후의 TOA 추정 값을 계산한다.
(예시: 추정된 한 주기 후 $TOA = t_1 + frame\ PRI$)
- 3) 한 주기 이후의 추정된 TOA 값과 측정된 TOA를 비교하여 실제 한 주기 이후의 TOA를 검색한다. (예시: 추정된 한 주기 후 $TOA = t_4$)
- 4) 첫 번째 TOA와 한 주기 이후의 TOA 사이에 입사한 신호 개수를 파악하여 스테거 펄스열을 구성하는 element PRI의 개수를 추정한다. (예시: t_1 과 t_4 사이의 펄스열을 분석)
- 5) 한 주기 동안의 TDOA를 이용하여 모든 element PRI를 추정한다. (예시: $T_1 \approx t_2 - t_1$)

위 알고리즘을 이용하여 단일 스테거 펄스열을 구성하고 있는 element PRI의 개수와 PRI 값을 추정하였다. 레이더 신호를 상쇄시키기 위한 미래 TOA를 예측하기

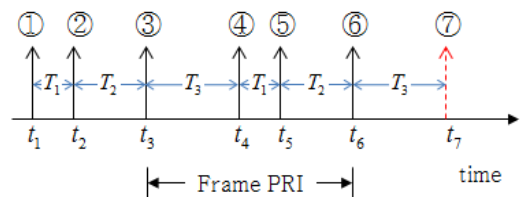


그림 2. 측정된 TOA 정보 및 예측된 미래의 TOA
Fig. 2. Measured TOA and estimated TOA that will be received in the future.

위하여 가장 최근에 입사한 펄스의 TOA와 추정된 element PRI를 이용한다. 그림 2의 점선 화살표가 나타내고 있는 미래의 TOA는 가장 최근에 입사한 신호인 t_6 에 element PRI T_3 를 더하여 추정된다. 하지만 추정된 element PRI의 오차와 측정된 최근 TOA의 오차 때문에 예측된 미래 TOA 값의 정확성이 떨어진다는 문제가 발생한다.

4. 정밀한 미래 TOA 추정을 위한 기법

미래의 TOA를 정확히 예측하는데 발생하는 문제점을 크게 두 가지로 나누어 살펴볼 수 있다. 첫 번째로 추정된 frame PRI와 element PRI의 추정 오차가 미래 TOA의 예측에 악영향을 미친다. 두 번째로 미래의 TOA 예측을 수행할 때, 오차가 있는 측정 TOA에 element PRI 추정 값을 직접 더하여 계산하기 때문에 문제가 발생하게 된다. 두 가지의 문제를 해결하기 위하여 아래에 제시된 방법을 제안하였다.

가. 정확한 PRI 추정을 위한 기법

(1) Element PRI 추정 기법

앞서 살펴본 PRI transform을 이용하여 스테저 펄스열을 분석하고 한 주기의 펄스열을 구성하고 있는 펄스의 개수를 추정하였다. 이후 추정된 펄스의 개수를 기반으로 TOA 간의 차이인 TDOA를 이용하여 element PRI를 계산하였다. 단순한 TDOA를 이용하여 추정된 element PRI는 TOA의 불확실성에 의해 오차를 포함하고 있으며 TOA의 오차는 서로 독립적이며 평균이 0이었기 때문에 element PRI의 오차 또한 동일한 특성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 element PRI의 오차를 줄이고 정확도를 향상시키기 위하여 과거에 추정된 element PRI를 이용하는 방법을 제안하였다. 과거의 element PRI를 현재 element PRI를 추정하는데 이용하기 위해 다음과 같이 가중 평균을 이용하는 방법을 제안하였다. 우선 PRI transform에 필요한 TOA 정보를 수집한 후 처음으로 수행하는 추정시간동안에 스테저 펄스열을 분석하고 element PRI를 추정한다. 추정된 element PRI는 미래 TOA 예측에 이용된 이후 저장된다. 이후 다음 레이더 신호가 입사하게 될 것이며 t_{n+1} 이라는 새로운 정보를 얻는다. t_{n+1} 과 t_n 의 TDOA를 계산하고 이를

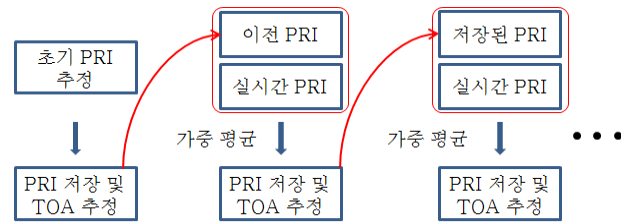


그림 3. 가중 평균을 이용한 element PRI 추정 방법
Fig. 3. Method of element PRI estimation by using weighted average.

저장된 element PRI와 비교하여 가장 가까운 값의 저장된 element PRI와 가중평균을 수행하여 새로운 element PRI를 추정한다. 가중 평균을 수행하였던 element PRI를 저장하여 갱신한다. 시간이 지남에 따라 가중 평균을 반복함으로써 저장되어 있는 모든 element PRI의 정확도를 향상시킬 수 있다. 저장된 element PRI 값은 지속적인 가중평균을 통하여 오차의 영향이 감소되었기 때문에 실시간 TDOA를 통해 얻은 추정 값보다 저장된 element PRI에 더 큰 가중치를 부여한다. 가중 평균을 이용한 element PRI 추정에 대한 식을 나타내면 다음과 같다.

$$\widehat{PRI} = \frac{[\alpha \times PRI_{store} + \beta \times PRI_{new}]}{(\alpha + \beta)} \quad (6)$$

여기서 PRI_{store} 는 저장된 element PRI를 의미하며 PRI_{new} 는 실시간으로 계산된 element PRI로서 가장 최근에 입사한 신호의 TOA, t_{n+1} 와 그 이전 TOA인 t_n 의 TDOA인 $(t_{n+1} - t_n)$ 으로 얻은 값이다. 그리고 가중치 α 는 β 보다 큰 값을 가지도록 값을 설정한다.

제안된 기법은 지속적인 가중평균을 이용하여 포함되어 있는 오차의 영향을 감소시킬 수 있기 때문에 element PRI의 추정 정확도를 향상시킬 수 있다.

(2) Frame PRI 추정 기법

하나의 레이더 신호가 새롭게 입사하고 PRI transform에 이용되는 샘플의 수가 고정되었을 때, 새로 얻은 TOA 정보를 이용하게 되며 가장 오래된 TOA 정보는 제외하여 PRI 추정을 하게 된다. 즉, 레이더 신호가 입사할 때마다 PRI transform에 이용되는 TOA 정보가 하나씩 갱신된다. 하지만 PRI transform은 많은 개수의 TOA를 이용하여 추정을 수행하기 때문에 하나의 TOA가 추정에 미치는 영향은 매우 작다. 이러한 이

유 때문에 PRI transform을 이용한 frame PRI 추정 시, 새롭게 입사한 신호에 대한 반응이 매우 느리게 발생하게 된다. 이것은 frame PRI 추정에 오차가 발생하였을 경우, 오랜 시간동안 잘못된 PRI를 추정할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 새로운 TOA를 실시간으로 반영하여 오차가 있는 frame PRI를 실제 값에 빠르게 근사할 수 있도록 앞서 제안된 정확도가 향상된 element PRI를 이용한 frame PRI 추정 방법을 제시한다. Frame PRI와 element PRI 간의 관계는 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 한 주기의 모든 element PRI를 더하면 frame PRI를 추정할 수 있다. 스테저 펄스열이 P 개의 element PRI로 구성되었을 경우 frame PRI를 element PRI로 표현하면 다음 식 (7)과 같다.

$$\text{frame PRI} = T_1 + T_2 + \dots + T_P \quad (7)$$

식 (7)의 T_1, T_2, \dots, T_P 는 element PRI를 의미한다. 초기 스테저 펄스열을 파악하기 위해서만 PRI transform을 이용하게 되며 이후 추정 시간동안에는 PRI transform을 사용하지 않고 파악된 스테저 펄스열과 추정된 element PRI를 통해 frame PRI를 추정하게 된다. 따라서 frame PRI는 element PRI의 정확도에 영향을 받게 될 것이다. 앞서 제안한 기법을 통해 얻은 element PRI는 정확도가 향상되었지만 TOA에 포함된 오차의 영향 완벽하게 제거하기 힘들다. 따라서 최종적으로 식 (7)을 통해 추정된 frame PRI를 저장하고 저장된 frame PRI의 산술평균을 구함으로써 추정 정확도를 높인다.

나. 측정 TOA의 평균화

레이더 신호가 다중 경로를 통해 입사하였거나 TOA 측정기의 성능 한계 등으로 인해 측정된 TOA에 오차가 발생한다. TOA 오차는 TOA 간에 서로 독립적으로 발생하며 frame PRI에 비례하는 크기로 실제 TOA의 좌우에 균등 분포하는 잡음으로 가정하였다. 따라서 서로 다른 TOA에 포함되어 있는 오차를 정합해준다면 0에 가까운 값으로 영향을 감소시킬 수 있다. 미래 TOA를 예측하기 위해 필요한 최근 입사 신호의 TOA가 t_n 이라면 frame PRI와 n 번째 TOA를 포함한 이전의 정보를 활용하여 오차를 줄인다. 오차의 영향을 줄이기 위하여 그림 4가 나타내고 있는 바와 같이 t_n 과 스테저 펄스열 내에 같은 위치에 해당하는 펄스의 TOA를 이

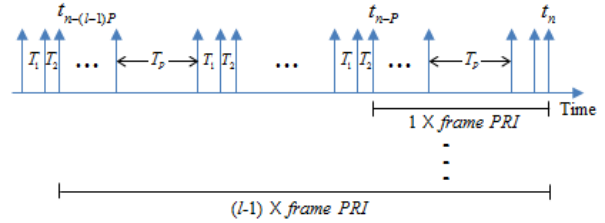


그림 4. TOA 오차의 영향을 줄이는 추가적인 처리
Fig. 4. Additional processing for reducing effect of TOA noise.

용한다. 같은 위치에 위치한 TOA 정보를 이용하여 t_n 과 동기를 맞추게 되고 동기화된 TOA의 추정 값들을 t_n 과 평균을 수행함으로써 TOA 평균화를 수행한다. 그림 4를 살펴보면 스테저 펄스열이 P 개의 펄스로 구성되어 있을 때, t_n 과 같은 위치에 있는 TOA는 $t_{n-P}, t_{n-2P}, \dots, t_{n-(l-1)P}$ 가 된다. t_n 및 같은 위치의 TOA와 frame PRI를 이용하여 동기화를 수행하고 평균을 계산하는 식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{t}_n &= [t_n + (t_{n-P} + 1 \times \text{frame PRI}) + \dots \\ &\quad + (t_{n-(l-1)P} + (l-1) \times \text{frame PRI})] / l \\ &= \left[\sum_{q=0}^{l-1} (t_{n-qP} + q \times \text{frame PRI}) \right] / l \approx \tilde{t}_n \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 l 은 TOA 평균화에 사용된 t_n 과 같은 위치에 있는 TOA의 개수이다. 한 주기의 스테저 펄스열 내부에 t_n 과 같은 순서에 위치한 TOA는 정수배의 frame PRI만큼 차이가 있다는 특징을 이용하였다. 평균화를 취해서 얻은 \hat{t}_n 은 실제의 TOA에 해당하는 \tilde{t}_n 의 값과 유사하게 보정된다. 하지만 실제 값이 아닌 추정된 frame PRI를 이용하여 t_n 을 보정하였기 때문에 문제가 발생하게 된다. n 번째 TOA에 포함된 오차를 n_n 이며 frame PRI로 발생한 오차를 n_{frame} 이라 할 때, 보정된 \hat{t}_n 을 계산하는데 발생하는 오차를 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{error}_n &= [n_n + (n_{n-P} + 1 \times n_{\text{frame}}) + \dots \\ &\quad + (n_{n-(l-1)P} + (l-1) \times n_{\text{frame}})] / l \\ &= \left[\sum_{q=0}^{l-1} (n_{n-qP} + q \times n_{\text{frame}}) \right] / l \\ &= \left[\sum_{q=0}^{l-1} n_{n-qP} / l \right] + l(l-1) \times n_{\text{frame}} / 2l \\ &= n_{TOA} + (l-1) \times n_{\text{frame}} / 2 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 n_{TOA} 는 TOA에 포함된 오차들의 평균으로

써 l 이 커질수록 0에 가까운 값으로 수렴하여 TOA 오차의 영향이 완화된다. 하지만 l 이 커질수록 frame PRI의 추정 오차인 n_{frame} 은 더 많은 오차를 발생시켜 결과적으로 보정된 \hat{t}_n 의 오차가 커지게 되므로 측정 TOA의 평균화를 이용하기 위해서 정확한 frame PRI 추정이 선행되어야 한다. 결과적으로 앞에서 제안하였던 정확한 PRI를 구하기 위한 기법과 측정 TOA의 평균화 기법이 함께 수행되었을 때, 정확한 미래 TOA를 예측할 수 있다.

III. 실험

모의실험을 위하여 표 1에서 제시한 파라미터를 이용한 실험 환경을 설정하였다. 표 1에서 제시된 window size는 PRI transform을 수행하는데 이용되는 TOA의 개수를 의미하며 total TOA는 총 수신될 레이더 신호의 TOA 개수이다. RMSE를 계산하기 위하여 iteration 횟수는 100으로 정하였다. 스테거 펄스열의 element PRI는 세 개로 구성되었으며 2초의 frame PRI를 기준으로 반복되면서 이용될 것이다. PRI transform을 수행하기 위해 2초에 해당하는 frame PRI를 추정할 수 있도록 검색 PRI range는 0~5초 구간으로 설정하였다. 가중 평균에 사용한 파라미터 α 는 5, β 는 1로 설정하였으며 가중치에 따른 RMSE의 영향은 다음 시뮬레이션 결과를 통해 살펴보도록 한다.

측정 TOA의 평균화에 이용한 이전 TOA의 개수를 나타내는 l 은 9로 설정하여 총 10개의 TOA를 이용한 평균화를 수행하였으며 이는 TOA에 포함된 오차의 영향을 완화시킬 것이다. 더 많은 수의 TOA를 이용하지 않은 이유는 평균화에 사용되는 추정 frame PRI의 오차로 인해 무한정으로 늘릴 수 없기 때문이며 선택된 값, l 은 임의로 선택하였다. 측정 TOA는 실제 TOA를

표 1. 미래 도착 시간 추정 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters for future TOA estimation.

Parameter	Value
Window size	240
Total TOA number	900
Frame PRI [s]	2
Element PRI [s]	0.8817 0.4589 0.6597
Noise	5% (균등 분포)
Iteration	100

기준으로 좌우를 합한 폭이 5% frame PRI인 범위 안에서 균등 분포를 가지는 값이 되도록 설정하였으며 오차가 없는 TOA를 기준이 되는 정보로 활용하여 추정된 미래 TOA의 성능을 평가하였다. 제안한 기법의 성능을 분석하기 위하여 추정된 미래 입사 신호의 TOA와 오차가 없는 실제 입사한 신호의 TOA를 비교하여 입사한 신호의 index에 따라 root mean square error (RMSE)를 계산하였다. 신호의 time index에 따른 RMSE를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$SE_{n+1} = \sqrt{\frac{1}{er} \sum_{i=1}^{er} (\widetilde{t}_{n+1} - \widehat{t}_{n+1,i})^2} \quad (10)$$

여기서 $iter$ 은 RMSE를 계산하기 위하여 사용한 iteration 횟수를 나타낸다. 실제 $n+1$ 번째 TOA, \widetilde{t}_{n+1} 에 대하여 i 번째 iteration을 수행하였을 때, 추정된 결과를 $\widehat{t}_{n+1,i}$ 라 정의하였다. 그림 5는 TDOA만을 이용한 element PRI 및 TOA 평균화를 수행하지 않은 예측 TOA의 RMSE와 제안된 기법을 수행한 예측 TOA의 RMSE를 비교한 모의실험 결과이다. 제안된 기법을 수행하지 않은 미래 TOA의 RMSE는 element PRI의 추정 오차와 측정 TOA 오차에 직접 영향을 받기 때문에 약 0.07을 평균으로 하는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 향상된 frame/element PRI 및 TOA 평균화를 수행한 경우, RMSE가 0.02보다 낮은 값으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 하지만 추정 초기에는 0.07 이상의 RMSE 값을 가지며 이는 제안 기법을 수행하지 않은 경우보다 큰 RMSE 값을 가지게 됨을 의미한다. 오차의 보정이 이루

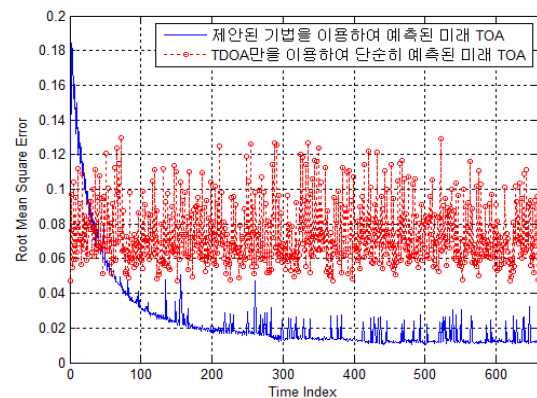


그림 5. RMSE를 이용한 제안 기법의 성능 분석
Fig. 5. Performance analysis for proposed scheme by using RMSE.

어지러진 element PRI와 frame PRI를 이용하여 미래 TOA를 계산하였기 때문에 추정 TOA 평균화의 성능 열화 문제가 발생하여 추정 초기의 RMSE가 0.07보다 큰 값을 가지게 되었을 것이다. 이에 대한 근거로서 제안된 기법을 이용하여 추정된 frame PRI의 time index에 따른 값을 그래프로 나타내면 그림 6과 같다. 추정 초기에는 실제 frame PRI, 2초를 기준으로 추정 frame PRI 값이 크게 변화함을 알 수 있다.

다음으로는 제안된 element PRI를 추정할 때 이용되는 가중치 α 와 β 에 따른 RMSE 실험을 진행하였다. 앞서 제시한 조건과 동일하게 실험환경을 구성했으며 실험에 사용된 가중치 (α, β)는 (5, 1), (3, 1), (9, 1)으로 설정하였다. α 와 β 에 따른 실험결과는 다음 그림 7과 같다. 저장된 element PRI의 가중치인 α 가 3일 경우, RMSE의 0.03으로 도달하는 시간이 약 80 time index로서 α 가 5인 경우 106 time index에 도달하는 것과 비교하였을 때, RMSE 수렴 속도가 빨라짐을 알

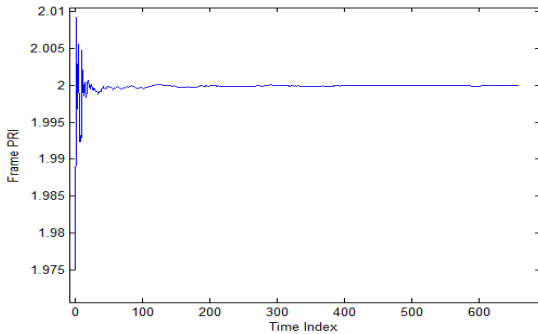


그림 6. Time index에 따른 frame PRI 추정 결과
Fig. 6. Result of frame PRI estimation according to time index.

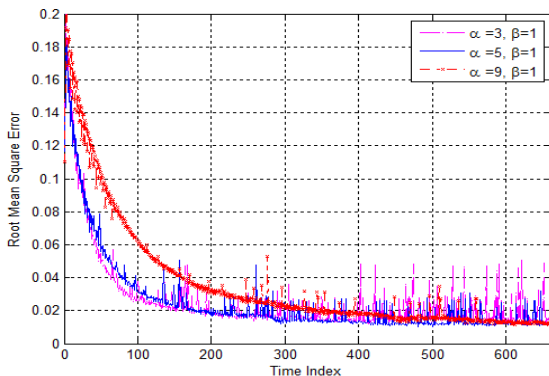


그림 7. 가중치에 따른 RMSE 비교
Fig. 7. Comparison of RMSE according to weight.

수 있다. 이는 α 가 작기 때문에 새로운 값에 해당하는 TDOA로 인한 element PRI의 갱신이 빠르게 발생하기 때문이다. 반대로 α 가 9인 경우 저장된 element PRI의 가중치가 커지게 되고 RMSE가 0.03에 도달하는데 213 index time의 시간이 걸린다. 이는 저장된 element PRI의 가중치가 크기 때문에 새로운 값인 TDOA로 인한 element PRI의 갱신이 느리게 발생하기 때문이다. 하지만 RMSE의 그래프의 형태를 살펴보았을 때, jagged 형태가 완화된다는 특징을 보인다. 위 결과를 종합하였을 때, 추정 초기 구간은 작은 α 를 이용하여 RMSE 수렴속도를 높이고 후기 구간에는 큰 α 를 이용하여 안정적으로 미래 TOA를 예측하는 전략을 선택할 수 있다.

IV. 결 론

PRI transform을 이용하여 단일 스테거 펄스열의 frame PRI 및 element PRI를 분석하고 능동 상쇄에 필수적인 미래 TOA를 정확하게 예측하기 위해 필요한 기법에 대하여 살펴보았다. 실험결과에서 살펴볼 수 있듯이 추가적인 신호처리를 통하여 미래 TOA를 더욱 정확하게 예측할 수 있음을 파악할 수 있었다. 하지만 그림 5에서 제시된 결과를 살펴보았을 때, 추정 초기에는 제안된 기법을 통해 예측된 미래 TOA의 RMSE가 단순 TDOA를 이용한 미래 TOA보다 나쁘다는 점을 확인할 수 있었다. 이에 따른 성능 열화 문제를 개선하기 위하여 추정 초기에는 단순 TDOA를 이용하여 미래 TOA를 추정하며 일정 time index 이후에는 제안된 기법을 통해 정확도가 향상된 frame/element PRI를 이용하여 미래 TOA를 예측하는 전략을 선택할 수 있을 것이다. 이러한 전략을 선택하기 위해서는 측정된 오차의 크기에 따른 제안된 기법의 RMSE 수렴속도에 대한 연구가 필요하다. 이는 element PRI 추정 시, 가중 평균에 이용되는 가중치와 TOA의 오차에 따른 분석 및 TOA 평균화 기법에 이용되는 TOA 개수 최적화에 대한 연구와 함께 추후 연구되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] K. Nishiguchi and M. Kobayashi, “Improved Algorithm for Estimating Pulse Repetition Intervals,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 36, pp. 407~421, Apr. 2000.
- [3] R. G. Wiley, *ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals*. Norwood, MA: Artech House, 2006
- [4] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill companies, 2008
- [5] Seongmok Lim, Sunghoon Jang, Dongkyu Sim, Chungyong Lee, “TOA Estimation and Active Cancellation Performance of Single Hostile Radar Using Staggered PRI,” *2013 Low Observable Technology Conference*, Feb. 2013.

— 저 자 소 개 —



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 전기전자
공학과 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>