

논문 2014-51-8-2

능동 소나 시스템에서 HFM 펄스의 확장 레플리카 상관기를 이용한 고속 광대역 능동탐지 및 도플러 추정 기법

(Fast Wideband Active Detection and Doppler Estimation Using the
Extended Replica of an HFM Pulse in Active SONAR Systems)

신 중 우*, 김 완 진**, 도 대 원**, 이 동 훈***, 김 형 남****

(Jong-Woo Shin, Wan-Jin Kim, Dae-Won Do, Dong-Hun Lee, and Hyoung-Nam Kim[©])

요 약

최근 능동 소나 시스템은 다중 목표물 탐지가 가능하도록 높은 거리 분해능을 얻기 위해 협대역 시스템에서 광대역 시스템으로 발전하고 있다. 하지만, 목표물 탐지 및 파라미터 추정 등의 성능 향상을 위해서는 광대역 신호처리가 요구되며, 이로 인해 연산량의 증가가 불가피하다. 본 논문에서는 hyperbolic frequency modulation (HFM) 펄스를 사용하는 광대역 능동소나 시스템에서 연산량의 증가를 최소화 하면서도 고속으로 목표물의 탐지 및 속도정보 추정을 할 수 있도록, 확장 레플리카를 이용한 광대역 HFM 탐지기 설계 방법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안된 방법이 기존의 필터뱅크를 이용한 광대역 소나 탐지기법에 비해 탐지 및 도플러 추정에서 약간의 성능 열화가 있지만, 연산량 측면에서 매우 우수함을 보인다.

Abstract

In recent SONAR (sound navigation and ranging) systems, wideband active SONAR systems has received more attention than narrowband SONAR systems due to the remarkable detection performance in terms of range resolution. However, the wideband SONAR systems usually requires a huge amount of computational burden in order to achieve their own superiority. To cope with this drawback of the wideband SONAR systems, this paper proposes a fast target detection and velocity estimation method using an extended replica in wideband hyperbolic frequency modulation active SONAR system. Computer simulation shows that the proposed method can be implemented by a highly reduced computational complexity with a little performance degradation in target detection and velocity estimation compared to the conventional filter bank method.

Keywords : Wideband SONAR, active SONAR, hyperbolic frequency modulation(HFM), extended replica, Doppler estimation

* 학생회원, **** 평생회원, 부산대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Pusan National University)

** 정회원, *** 학생회원, 국방과학연구소
(Agency for Defense Development)

© Corresponding Author(E-mail: hnkim@pusan.ac.kr)

※ 본 논문은 2013년 국방과학연구소의 “실시간 음향 신호처리 구현 및 탐지 융합 알고리즘 연구”에 대한 연구용역으로 이루어 졌음.

접수일자: 2014년04월18일, 수정일자: 2014년07월28일
수정완료: 2014년08월01일

I. 서 론

소나 (sound navigation and ranging, SONAR) 시스템은 목표물을 탐지하는 방법에 따라 크게 수동소나 (passive SONAR)와 능동소나 (active SONAR)로 구분된다^[1~3]. 수동소나는 수중청음기를 이용하여 목표물로 부터 방사되는 음향신호의 수신만을 이용하는 탐지 방

법이고, 능동소나는 송신신호를 발생시켜 목표물에 반사되는 신호를 처리하여 탐지하는 기법이다. 일반적으로 능동소나는 수동소나에 비해 높은 탐지 성능을 보이며 파라미터 추정 측면에서도 우수하다고 알려져 있기 때문에, 능동소나에 관한연구가 상대적으로 더욱 활발히 진행되는 추세이다^[4-5].

능동 소나에서는 목적에 따라 다양한 형태의 능동 펄스의 사용이 가능하며, 가장 널리 사용되는 펄스로는 연속파 (continuous wave, CW) 펄스, 그리고 주파수 변조 (frequency modulation, FM) 계열의 펄스가 있다^[6]. 기존의 능동 소나에서는 구현의 단순함과 처리의 편의성으로 인해 주로 협대역 펄스가 사용되어 왔다. 하지만, 현대의 소나 시스템에서는 단일 목표물의 탐지뿐만 아니라 인접한 다중 목표물의 분해 및 식별 또한 중요한 목표가 되어 가고 있으며, 이에 따라 기존의 협대역 소나 시스템보다 향상된 거리 분해능 (range resolution)을 가지는 광대역 소나 시스템으로의 발전이 진행되고 있다^[7-8].

다양한 능동펄스 중에서 펄스의 길이와 대역폭의 크기가 반비례 관계를 가지는 CW 펄스의 경우, 광대역 능동소나 시스템에서 사용되기 위해서는 송신펄스의 길이가 매우 짧아져야 한다. 하지만, 이 경우 침투 전력 (peak power)의 크기 제한으로 인해 목표물 탐지에 충분한 에너지를 송신하지 못한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 시간-대역폭 곱의 크기가 CW 펄스에 비해 큰 FM 계열의 펄스들이 광대역 능동소나 시스템에 고려되어 왔다. FM 계열의 펄스는 CW 펄스와 달리 신호의 대역폭이 펄스 길이의 역이 아니므로, 높은 검출 성능과 정밀한 거리 해상도가 동시에 달성될 수 있는 장점이 있으며, 대표적인 FM 계열 펄스에는 선형 FM (linear FM, LFM)과 선형 주기 또는 쌍곡선 FM (linear period FM or hyperbolic FM, LPM/HFM) 펄스가 있다.

능동소나 시스템은 그림 1^[9]과 같은 구조를 가지며,

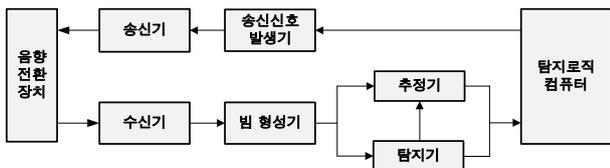


그림 1. 능동소나 시스템의 구조^[9]
Fig. 1. The structure of active SONAR system^[9].

특히 탐지기의 구조는 정합필터, constant false alarm rate (CFAR) 탐지기 등을 포함한다. LFM 펄스의 경우 가장 널리 사용되는 FM 계열의 능동펄스이지만, 사용되는 주파수 대역이 넓어질수록 도플러 효과에 의한 주파수 이동뿐만 아니라 기울기 부정합 (slope mismatch) 현상이 추가적으로 발생하여 정합필터에서 상관손실이 발생하므로 탐지 성능이 저하되는 단점이 있다^[3]. 일반적으로 소나 시스템에서는 목표물의 탐지를 위해 도플러 효과가 고려된 다수의 상관을 이용하여 필터뱅크 형태의 정합필터 처리를 수행하는데^[2], LFM 펄스의 상관손실을 최소화하기 위해서는 필터뱅크의 개수가 크게 늘어나야 하므로 연산량 소모가 매우 커지게 된다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 도플러 불변 (doppler tolerant) 성질을 가지는 HFM 펄스가 등장하였다. HFM 펄스의 경우 도플러 효과가 순수 주파수의 시간 선행/지연 형태로 나타나므로 단일 채널을 통한 정합필터만으로 탐지 성능을 극대화할 수 있다. 하지만, HFM 펄스를 이용하는 능동소나의 경우 도플러 효과에 의한 시간-주파수 결합 (time-frequency coupling) 현상으로 인해 목표물의 거리 및 속도 추정에 어려움을 겪는다^[10-12].

본 논문에서는 HFM 펄스를 이용한 단일 채널 탐지기 설계를 위해 HFM 확장 레플리카 설계방법을 제안하며, 확장 레플리카 상관을 통한 도플러 정보 추정 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안된 방법은 기존의 도플러 상관을 이용한 필터뱅크 방식과 달리 단일 채널을 통해 신호처리가 행해지므로, HFM 기반의 광대역 능동소나 시스템에서 적은 연산량으로 목표물의 탐지 및 속도 추정을 가능하게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 HFM 펄스의 특성에 대해 소개하고, III장에서는 HFM 확장 레플리카를 이용한 탐지기 설계 방법 및 속도 추정 방법을 제안하며, IV장의 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 성능을 분석한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. Hyperbolic Frequency Modulation (HFM) 능동 펄스

HFM 능동펄스에 대한 파형은 다음 식과 같이 표현된다^[13].

$$s(t) = e^{j \frac{\omega_c(r_\omega^2 - 1)T}{2r_\omega} \log(1 + r_\omega(1 - \frac{2t}{T}))}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

여기서 ω_c 는 중심주파수, r_ω 는 대역폭을 W 라고 할 때 $\pi W/\omega_c \leq 1$ 으로 표현되는 비대역폭, 그리고 T 는 송신 펄스의 주기를 나타낸다. 식 (1)의 표현은 시간에 따라 주파수가 증가하는 상향 HFM 신호의 파형을 나타내는데 $\log(1 + r_\omega(1 - 2t/T))$ 가 $\log(1 - r_\omega(1 - 2t/T))$ 로 될 경우, 시간에 따라 주파수가 감소하는 하향 HFM 신호의 파형이 된다. 본 논문에서는 설명의 편의를 위하여 상향 HFM 파형만을 고려한다. 식 (1)로부터 HFM 펄스의 순시 주파수에 관한 표현을 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\omega_c(1 - r_\omega^2)}{1 + r_\omega(1 - \frac{2t}{T})} \quad (2)$$

HFM 신호를 송신펄스로 사용할 경우, 목표물과의 상대 속도에 의한 도플러 효과로 인해 신호의 축소/확장되는 수신신호는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$s(\beta t) = \sqrt{\beta} e^{j \frac{\omega_c(r_\omega^2 - 1)T}{2r_\omega} \log(1 + r_\omega(1 - \frac{2\beta t}{T}))} \quad (3)$$

where $0 \leq t \leq T/\beta, \quad \beta = 1 - \frac{2v}{c}$

여기서 c 는 음파의 속도, v 는 목표물과의 상대 속도, 그리고 β 는 확장 매개 변수를 나타낸다. 이 때, 도플러 효과에 의해 축소/확장된 수신 신호의 순시 주파수는 다음 식과 같이 시간-주파수 영역 상에서 송신 펄스와 시간 천이 관계로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega_\beta(t) &= \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\omega_c(1 - r_\omega^2)\beta}{1 + r_\omega(1 - \frac{2\beta t}{T})} \\ &= \frac{\omega_c(1 - r_\omega^2)}{1 + r_\omega(1 - \frac{2(t - \tau_d)}{T})} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 시간 천이 τ_d 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_d = \frac{(\beta - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta} \quad (5)$$

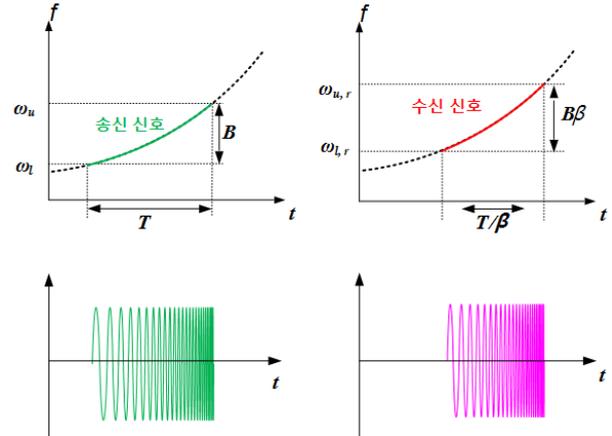


그림 2. HFM 펄스를 이용한 능동펄스의 파형 및 순시 주파수: (a) 송신신호, (b) 수신신호

Fig. 2. Waveform and instantaneous frequency of HFM active pulse: (a) transmitted signal, (b) received signal.

식 (2)와 식 (4)를 비교해 보면, HFM 펄스를 이용한 능동소나에서는 도플러 효과가 그림 2와 같이 순시 주파수의 시간 지연/선행으로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 정합필터 처리 시 상관 손실을 최소화할 수 있지만 거리에 의한 거리-속도 결합으로 인해 속도 및 거리 추정이 부정확하게 된다.

III. Hyperbolic Frequency Modulation (HFM) 확장 레플리카 상관기

HFM 펄스를 이용하면 단일 채널을 통해 표적을 탐지할 수 있다고 알려져 있지만, 시간-도플러 결합 현상으로 인해 효율도가 낮아 단일 채널 탐지기에 대한 설계가 구체적으로 진행되지 않았다. 이러한 한계성을 극복하기 위해서, 본 장에서는 단일 채널 목표물 탐지를 위한 확장 레플리카 설계 방법을 제안하고, 확장 레플리카를 이용한 목표물의 속도 추정 방법을 제안한다.

1. 확장 레플리카 상관기

기존의 광대역 능동소나 탐지기에서는 목표물의 탐지 및 도플러 정보 추정을 위해 그림 3과 같이 다수의 필터뱅크로 구성된 도플러 상관기를 이용한다. 하지만, 정확한 도플러 정보 추정을 위해서는 필터뱅크의 개수가 많아져야 하며, 이는 요구되는 연산량의 증가를 유발한다. HFM 펄스는 도플러 효과가 시간 지연/선행으

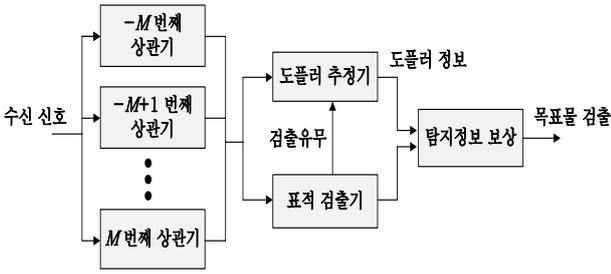


그림 3. 도플러 상관기를 이용한 탐지기 구조
Fig. 3. The structure of active target detector based on doppler correlators.

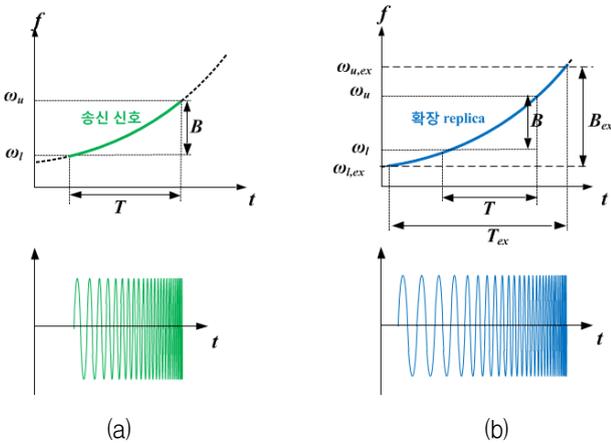


그림 4. HFM 확장 레플리카의 파형 및 순시주파수:
(a) 송신신호, (b) 확장 레플리카
Fig. 4. Waveform and instantaneous frequency of HFM extended replica:
(a) transmitted signal, (b) extended replica.

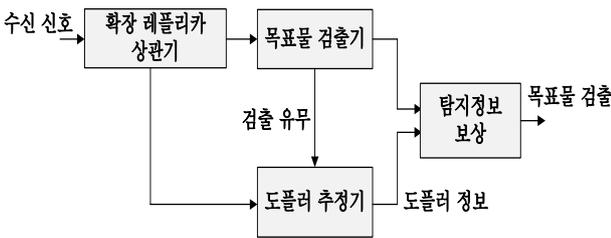


그림 5. 확장 레플리카 상관기를 이용한 HFM 능동소나의 탐지기 구조
Fig. 5. The structure of active target detector based on extended replica correlator.

로 표현되므로, 그림 4와 같이 송신펄스를 시간영역에서 확장된 형태인 확장 레플리카를 이용하여 단일채널 처리가 가능하다. 그림 5는 하나의 필터 연산으로 구현된 단일 채널 확장 레플리카 상관기를 이용한 HFM 능동소나의 탐지기 구조를 보여주고 있다. 이때, 탐지하고자 하는 목표물의 최대 속도 및 최소 속도를 고려하여

확장 레플리카의 길이 및 대역폭을 설정한다. 탐지하고자 하는 목표물의 최대 및 최저 속도에 따른 확장 매개 변수를 각각 β_{max} , β_{min} 이라고 할 때, 확장 레플리카 상관기의 레플리카 $r(t)$ 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = e^{j\frac{\omega_c(r_\omega^2 - 1)T}{2r_\omega} \log(1 + r_\omega(1 - \frac{2t}{T}))}$$

where $t_{min} \leq t \leq t_{max}$

여기서, 확장 레플리카의 양 끝 시간 t_{min} , t_{max} 는 β_{max} , β_{min} 을 이용하여 각각 다음 식들과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{min} = \frac{(\beta_{min} - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta_{min}} \tag{7}$$

$$t_{max} = \frac{T}{\beta_{max}} + \frac{(\beta_{max} - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta_{max}} \tag{8}$$

식 (6)에서 (8)로부터 확장 레플리카의 순시 주파수와 확장 레플리카의 전체 길이는 각각 다음 식들과 같이 표현된다.

$$\omega_{extended}(t) = \frac{\omega_c(1 - r_\omega^2)}{1 + r_\omega(1 - \frac{2(t - \tau)}{T})}$$

where $t_{min} \leq t \leq t_{max}$

$$T_{extended} = t_{max} - t_{min} = \frac{T}{\beta_{max}} + \frac{(\beta_{max} - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta_{max}} - \frac{(\beta_{min} - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta_{min}} \tag{10}$$

$$= \frac{T}{\beta_{max}} + \left(\frac{\beta_{max} - \beta_{min}}{\beta_{max}\beta_{min}}\right) \frac{(1 + r_\omega)T}{2r_\omega}$$

그림 6은 확장 레플리카 탐지기를 이용한 상관기 처리 과정의 예를 나타낸다. 확장 레플리카를 이용한 탐지기에서는 도플러에 의한 송신 신호의 주파수 변화가 일어나더라도 확장 레플리카 상에 목표물 반사 신호가 존재하므로 도플러 크기에 상관없이 확장 레플리카와 높은 상관도를 얻을 수 있으며 그림 3에 나타난 필터뱅크를 이용하는 도플러 상관기 구조와 달리 매우 간단한 형태로 구현될 수 있다.

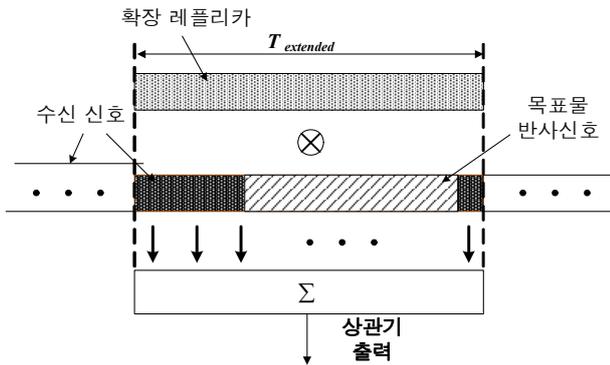


그림 6. HFM 확장레플리카 탐지기의 정합필터 처리 과정의 예시

Fig. 6. An example of matched filter processing using an HFM extended replica in active SONAR systems.

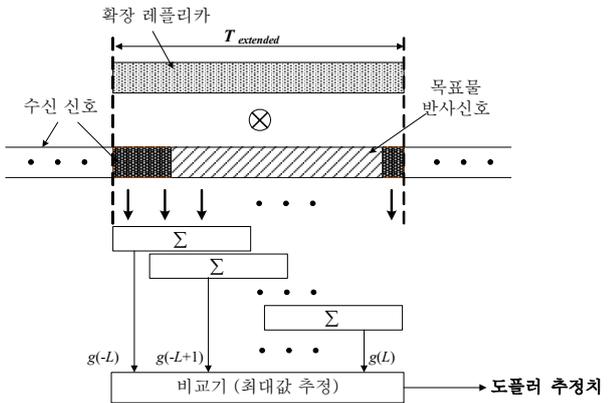


그림 7. HFM 확장레플리카 탐지기를 이용한 도플러 정보 추정 방법

Fig. 7. Doppler estimation using HFM extended replica detector.

하지만, 확장 레플리카를 이용한 표적 탐지기는 상관기의 상관 손실을 최소화할 수 있는 반면에 도플러 효과가 시간 선행/지연 (τ_d)으로 발생하여 표적의 거리에 의한 지연 값 (τ_0)과 더해지므로 ($\tau = \tau_0 + \tau_d$)만큼 표적의 거리 오차 발생 요인으로 작용한다. 그러므로 확장 레플리카 상관기만으로 표적의 거리를 정확하게 알아낼 수 없다. 식 (5)에 의해 소나 시스템과 상대적으로 정지해 있는 표적 ($\beta = 1$)은 시간 선행/지연이 발생하지 않고, 다가오는 운동을 하고 있는 표적 ($\beta > 1$)은 시간 지연이 발생하며 멀어지는 운동을 하고 있는 표적 ($\beta < 1$)은 시간 선행이 발생한다. 따라서, 표적의 도플러에 의한 시간 선행/지연 및 그 값을 알 수 없다면 표적의 정확한 검출이 어려우므로 정확한 표적 검출을 위

해서는 도플러 정보에 대한 추정이 이루어져야 한다.

2. 확장 레플리카를 이용한 속도 추정

소나 시스템에서 수신 신호의 속도 (혹은 도플러) 정보를 추정하고자 할 때, 그림 3과 같이 도플러 상관기를 통한 필터뱅크를 이용하는 것이 일반적이다^[2, 14~15]. 하지만, 확장 레플리카를 사용하는 HFM 탐지기의 경우 확장 레플리카를 이용한 도플러 정보의 추정은 정합 필터의 중간 결과를 통해 달성될 수 있다. 목표물 반사 신호는 도플러 효과에 관계없이 확장 레플리카와 정확히 매칭되는 부분이 존재하며, 확장 레플리카의 길이 ($T_{extended}$) 전체에 걸쳐 분포하지 않고 표적 신호 구간 (T/β)에서만 존재한다. 이러한 사실을 이용하여 정합 필터의 곱셈결과에 대해 부분 합을 취하여 도플러 정보를 추정할 수 있다. 그림 7은 확장 레플리카 상관기에서 곱셈결과의 부분 합을 이용하여 표적의 도플러 정보를 얻는 방법을 제시한 것이다. 이러한 부분 합을 이용한 도플러 추정 방법은 필터뱅크를 이용한 방법과 유사하지만, 각 필터뱅크에서 사용되는 곱셈연산을 요구하지 않고 오직 합연산만을 요구하므로 연산량을 매우 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

추정하고자 하는 최대 목표물 속도 값이 $\pm VL$ 이라고 하고 총 $2L+1$ 개의 합연산기가 존재한다고 할 때, 각 합연산기의 출력($g(l)$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(l) = \int_{-t_{l,\min}}^{t_{l,\min}} r(t+\tau)(s((1-\delta)t+\tau_0)+n(t))dt \quad (11)$$

여기서, l 번째 부분 합연산을 위해 사용되는 구간 $t_{l,\min}$, $t_{l,\max}$ 는 각 합연산기에 대응하는 속도(V_l)값으로부터 얻어지는 β 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$t_{l,\min} = \frac{(\beta_l - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta_l} \quad (12)$$

$$t_{l,\max} = \frac{T}{\beta_l} + \frac{(\beta_l - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta_l} \quad (13)$$

식 (11)에서 $g(l_0)$ 가 가장 큰 값을 가진다고 할 때, 시간 선행/지연 값은 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{\tau}_d = \frac{(\beta_{l_0} - 1)(1 + r_\omega)T}{2r_\omega\beta_{l_0}} \quad (14)$$

확장 레플리카를 이용한 도플러 정보 추정은 확장 레플리카 상관기와 마찬가지로 다수의 레플리카를 이용한 상관 결과를 이용하는 것이 아니라 하나의 레플리카를 이용한 상관기의 중간 결과를 이용하므로 기존의 도플러 상관기를 이용하는 것에 비해 고속으로 동작하는 장점이 있다.

IV. 성능 평가

본 장에서는 기존의 도플러 상관기를 이용하는 필터뱅크 방법과의 비교를 통해 제안된 확장 레플리카 탐지기의 연산 효율성을 보이고, 탐지 및 속도 추정 측면에서의 성능 비교를 수행한다. 본 성능 비교에서 사용된 광대역 HFM 펄스는 중심 주파수가 8kHz이고 4kHz의 대역폭을 가진다고 가정하였다^[7].

1. 연산량 비교

기존의 도플러 상관기를 이용한 필터뱅크 탐지기에서 $(2M + 1)$ 개의 레플리카를 사용하고 하나의 필터는 N 샘플로 구성된다 할 때, 하나의 필터당 N 번의 곱셈과 $(N-1)$ 번의 덧셈 연산이 요구된다. 여기서, 필터에 해당하는 도플러 상관기는 β 값에 따라 그 길이가 달라져야 하지만 그 길이의 차이가 크지 않으므로 모든 필터가 N 샘플로 구성된다고 가정하였다. 따라서, 목표물 탐지와 속도 추정에 필요한 필터뱅크 출력 한 샘플을

얻기 위해 요구되는 전체 곱셈 및 덧셈 (multiplier-accumulator, MACs) 연산량은 다음과 같다.

$$MAC_{FB} = (2M + 1)(2N - 1) \tag{15}$$

이에 반해, 제안된 확장 레플리카 방법은 하나의 필터만을 사용하여 탐지를 수행하며 속도 추정을 위해서 덧셈 연산만을 추가로 요구한다. 따라서, N' 길이의 확장 레플리카를 사용한다고 할 때, 탐지에 필요한 하나의 출력 샘플을 얻기 위해 요구되는 곱셈 및 덧셈 연산량은 다음과 같다.

$$MAC_{EX, Detection} = 2N' - 1 \tag{16}$$

한편, 속도 추정을 위해서는 탐지기의 곱셈 중간결과를 이용하여 합연산만을 수행한다. 이러한 속도 추정 결과는 이동합(moving sum)을 이용하여 구할 수 있으며, 이 때 추가적으로 요구되는 덧셈 연산량은 다음과 같다.

$$MAC_{FB, velocity} = 2N' - N - 1 \tag{17}$$

여기서, 속도 추정에 사용되는 합연산기들은 도플러 상관기에서 사용되는 필터뱅크와 같은 개수를 가지며 각 합연산기의 길이도 각 필터뱅크의 길이와 같다고 가정하였다. 또한, 각 확장 레플리카의 길이 N' 은 추정 가능한 목표물의 최대/최소 속도에 따라 달라지며 N 에 비해 큰 값을 가지지만 수 백 knots의 목표물을 탐지한다고 해도 2배를 넘지 않는다. 그림 8에서 $N'=1.8N(N=1000)$, $N'=1.5N$, 그리고 $N'=1.2N$ 일 경우,

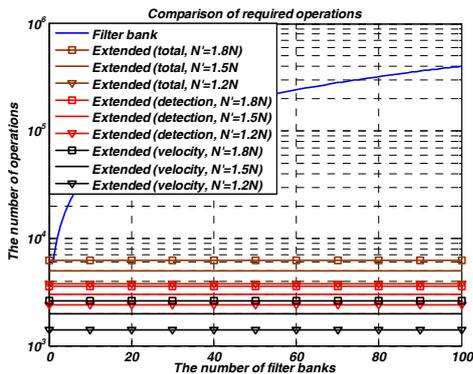


그림 8. 확장 레플리카 탐지기와 필터뱅크 탐지기의 필터뱅크 개수에 따른 요구되는 덧셈 및 곱셈 연산의 수

Fig. 8. The number of required multiplication and accumulation operations of extended replica detector and filter bank detector with different number of filter banks.

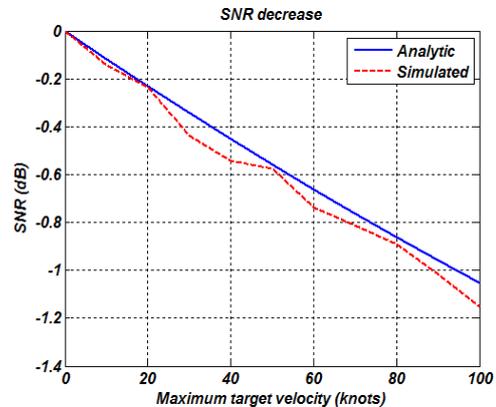


그림 9. 최대 목표 탐지 속도에 따른 HFM 확장 레플리카 탐지기의 출력 SNR 감소량

Fig. 9. Output SNR decrease according to various maximum target velocity.

필터 뱅크 개수에 따른 요구되는 덧셈 및 곱셈 연산의 수를 나타내었다. 그림 8에서 확인할 수 있는 바와 같이, 제안된 방법은 기존의 필터뱅크 방식에 비해 매우 낮은 연산량으로 구현할 수 있다. 필터뱅크 기법의 경우 사용되는 필터의 개수에 따라 탐지 및 속도추정의 정확도가 달라지는데, 요구되는 필터의 개수가 많아질 수록 확장레플리카에서의 요구되는 연산량의 크기가 많게는 100배 이상 차이 나는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과들은 광대역 소나의 표적 탐지 시스템에서 HFM 확장레플리카를 이용한 탐지기를 사용하면 연산 복잡도를 줄일 수 있기 때문에 탐지 속도가 매우 빠르고 실시간 구현성이 개선된다는 것을 보여준다.

2. 출력 신호 대 잡음비

소나 탐지기에서 탐지 성능은 정합필터의 출력 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)에 영향을 받는다. 제안된 확장 레플리카는 기존의 도플러 상관기를 이용한 방법에서의 각 필터에 비해 큰 대역폭을 가진다. 다시 말해, 목표물 신호가 가지는 대역폭에 비해 정합필터의 대역폭이 큰 값을 가지므로 잡음성분을 더 많이 포함한 출력 값을 얻게 되어 탐지기에서의 출력 SNR이 낮아지게 된다. 확장 레플리카의 대역폭은 식 (9)와 같으며 도플러 상관기에서 최대 정합을 이루는 필터에 비해 k 배의 대역폭을 가진다고 할 때, 확장 레플리카의 출력 SNR (SNR_{EX})와 도플러 상관기 필터뱅크의 출력 SNR (SNR_{FB})은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$SNR_{FB} = \sqrt{\frac{2E_0}{N_0}} \quad (18)$$

$$SNR_{EX} = \sqrt{\frac{2E_0}{kN_0}} \quad (19)$$

여기서, E_0 는 능동펄스의 에너지 그리고 N_0 는 백색잡음의 평균파워를 나타낸다. 대역폭 확장 비율 k 는 목표로 하는 최대 속도 V_{max} 에 따라 다른 값을 가지며, 도플러 상관기를 이용한 필터뱅크에 비해 출력 SNR 감소량을 목표로 하는 최대속도에 따라 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 알 수 있듯이 목표로 하는 최대 속도가 커질 수록 출력 SNR의 감소량이 커지는 경향을 보인다. 이러한 현상은 CFAR (constant false alarm rate) 검출기에서의 탐지확률에 영향을 미칠 수 있지만^[16], 탐지가

불가능할 정도로 감소되지는 않으며 도플러 상관기 필터뱅크의 결과와 어느 정도 유사한 성능을 낼 수 있다.

3. 속도 추정 성능

확장 레플리카를 이용한 탐지기와 도플러 상관기를 이용한 필터뱅크 탐지기의 SNR에 따른 속도 추정 성능을 목표물의 속도별로 그림 10에 비교하여 나타내었고 속도 추정 오차에 따른 거리 추정 오차를 그림 11에 도시하였다. 여기서 확장 레플리카의 최대 목표 탐지 속도는 50knots로 설정하였고 필터 뱅크 및 확장 레플리카 탐지기의 합연산기는 1knot 간격으로 배치되도록 설

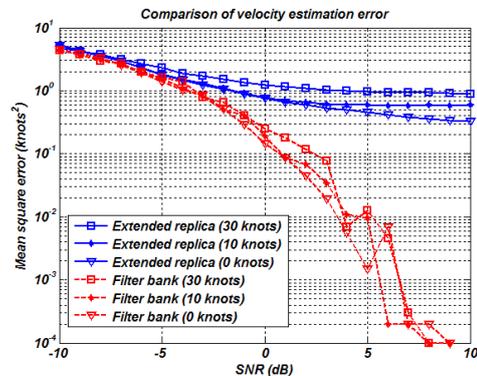


그림 10. HFM 확장 레플리카 탐지기와 도플러 상관기 필터뱅크 탐지기의 속도 추정 성능 비교

Fig. 10. Performance comparison in velocity estimation between extended replica detector and filter bank detector.

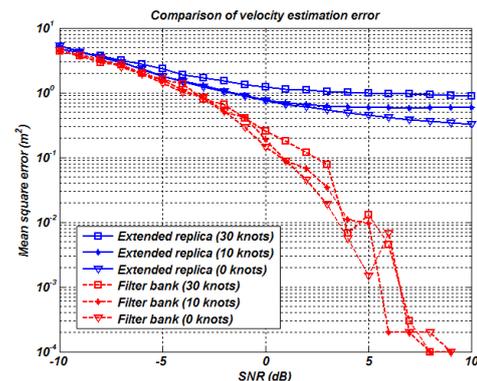


그림 11. HFM 확장 레플리카 탐지기와 도플러 상관기 필터뱅크 탐지기의 속도 추정에 따른 거리오차 비교

Fig. 11. Performance comparison of range estimation error according to velocity estimation between extended replica detector and filter bank detector.

정하였다. 그림 10과 그림 11에서 확인할 수 있듯이 거리 추정은 추정된 속도 값을 이용하여 이루어지므로, 거리 추정 오차가 속도 추정 오차와 유사한 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그리고 확장 레플리카를 이용한 속도 추정방법이 필터뱅크를 이용한 속도 추정방법과 낮은 SNR 상황에서는 비슷한 성능을 보인다. 하지만, 높은 SNR 상황에서는 확장 레플리카를 이용한 속도 추정방법이 필터뱅크를 이용한 속도 추정방법에 비해 높은 추정오차를 보이지만, 실제 거리 추정오차는 0dB 이상에서 $10^{-0.9}$ 이하를 보이므로 구현 가능한 수준이라고 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 광대역 능동소나 시스템에서 hyperbolic frequency modulation 능동펄스를 이용한 고속 목표물 탐지 및 속도 추정 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 확장 레플리카를 활용하면 요구되는 연산량을 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 탐지 및 속도 추정 측면에서 성능 저하를 보이지만 필터뱅크를 이용한 탐지기가 작게는 수 배에서 크게는 100배 이상의 매우 많은 연산량을 요구한다는 점에서 확장 레플리카 탐지기 및 속도 추정기가 유용한 대체 방법이 될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] R. O. Nielsen, "Sonar signal processing," *Artech House*, 1991.
- [2] W. C. Knight, Roger G. Pridham, and S. M. Kay, "Digital signal processing for Sonar," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 69, no. 11, pp. 1451-1506, Nov. 1981.
- [3] T. H. Glisson, C. I. Black, and A. P. Sage, "On sonar signal analysis," *IEEE Trans. on Aerosp. and Elect. Syst.*, Vol. AES-6, no. 1, pp. 37-50, Jan 1970.
- [4] C. -H. Park, W. Y. Hong, H. S. Ko, I. -I. Kim, "Comparison of Active Sonar Target Positioning Performance and Optimal Sensor Arrangement," *The Journal of the Acoustic Society of Korea*, Vol. 22, no. 3, pp. 224-232. Apr. 2003.
- [5] E. -J. Jang, D. S. Han, "MRAL Post Processing based on LS for Performance Improvement of Active Sonar Localization," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 49, No. 9, pp. 172-180, Sep. 2012.
- [6] Y. Sun, P. Willet, and R. Lynch, "Waveform fusion in sonar signal processing," *IEEE Trans. on Aerosp. and Elect. Syst.*, Vol. 40, no. 2, pp. 462-477, Apr. 2004.
- [7] X. Song, P. Willet, and S. Zhou, "Range bias modeling for hyperbolic-frequency-modulated waveforms in target tracking," *IEEE journal of Oceanic Engineering*, Vol. 37, no. 4, pp. 670-679, Oct. 2012.
- [8] Y. Doisy, L. Deruaz, S. P. vanljsselmuide, and S. P. Beerens, "Reverberation suppression using wideband doppler-sensitive pulses," *IEEE journal of Oceanic Engineering*, Vol. 33, no. 4, Oct. 2008.
- [9] 최상문, "어뢰의 잠수함 탐지 기술 및 발전 동향," *국방과학기술 플러스*, Vol. 21, pp. 1-15, 2006년 10월.
- [10] C. Yang, H. Liang, "Time-scale analysis of wideband HFM signal and application on moving target detection" *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 25-27, Xi'an, China, May 2009.
- [11] R. A. Altes, and E. L. Titlebaum, "Bat signals as optimally doppler tolerant waveform," *Journ. of the Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 48, no. 4-2, pp. 1014-1020, 1970.
- [12] Rihaczek, A. W., "Doppler-tolerant signal waveforms," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 54, no. 6, pp. 849-857, Jun. 1966.
- [13] D. W. Ricker, "Echo signal processing," *Klewer Academic Publishers*, 2003.
- [14] E. J. Kelly, and R. P. Wishner, "Matched filter theory for high velocity accelerating targets," *IEEE trans. on Military Electronics*, Vol. 9, no. 1, pp. 56-69, 1965.
- [15] S. K. Yu, J. G. Kim, E. K. Joo, "Performance Analysis of the Pre-Whitening Matched Filter in Shallow Water Environment," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 45, No. 12, pp. 152-158, Dec. 2008.
- [16] P. P. Gandhi, S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background," *IEEE Trans. on Aerosp. and Elect. Syst.*, Vol. 24, no. 4, pp. 608-621, Jul. 1983.

저 자 소 개



신 종 우(학생회원)
2010년 부산대학교 전자전기
공학부 학사 졸업.
2012년 부산대학교 전자전기
공학과 석사 졸업.
2012년~현재 부산대학교
전자전기컴퓨터공학과
박사과정.

<주관심분야 : 레이더 및 소나 시스템, 통신 신호
처리, 스마트 안테나>



이 동 훈(학생회원)
1994년 경북대학교 전자전기
공학 과 학사 졸업.
1996년 경북대학교 전자전기
공학 과 석사 졸업.
1996년~현재 국방과학연구소
선임연구원.

2010년~현재 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과
박사과정.

<주관심분야 : 통신 신호처리, 멀티미디어 시스
템, 소나시스템>



김 완 진(정회원)
2005년 부산대학교 전자전기통신
공학부 학사 졸업.
2007년 부산대학교 전자공학과
석사 졸업.
2011년 부산대학교 전자전기공학
과 박사 졸업.

2011년~현재 국방과학연구소 선임연구원.

<주관심분야 : 적응신호처리, 레이더 및 소나시스
템, 디지털통신, RFID, OFDM>



김 형 남(평생회원)- 교신저자
1993년 2월 포항공과대학교
전자전기공학과 학사
1995년 2월 포항공과대학교
전자전기공학과 석사
2000년 2월 포항공과대학교
전자전기공학과 박사

2000년 3월~2000년 4월 포항공과대학교
전자컴퓨터공학부 박사 후 연구원

2000년 5월~2003년 2월 한국전자통신연구원
선임연구원

2003년 3월~2007년 2월 부산대학교
전자공학과 조교수

2007년 3월~2012년 2월 부산대학교
전자전기공학부 부교수

2012년 3월~현재 부산대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 적응신호처리, 레이더 및 소나 신
호처리, 디지털 방송신호처리, 생체신호처리>



도 대 원(정회원)
1996년 포항공과대학교 전자전기
공학과 학사 졸업.
1998년 포항공과대학교 전자전기
공학과 석사 졸업.
2003년 포항공과대학교 전자전기
공학과 박사 졸업.

2003년 LG전자기술원 모바일멀티미디어연구소
선임연구원.

2007년~현재 국방과학연구소 선임연구원.

<주관심분야 : 통신 신호처리, 멀티미디어 신호처
리, 레이더 및 소나시스템>