

<리뷰논문>

# Redundant phase center 기법과 phase gradient autofocus를 이용한 합성개구소나 영상 보정

## A correction of synthetic aperture sonar image using the redundant phase center technique and phase gradient autofocus

유정수,<sup>†</sup> 백경민<sup>2</sup>

(Jungsoo Ryue<sup>1†</sup> and Kyungmin Baik<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>울산대학교 조선해양공학부, <sup>2</sup>한국표준과학연구원 초음파표준팀

(Received August 31, 2021; revised September 27, 2021; accepted October 7, 2021)

**초 록:** 수중 탐지를 위한 합성개구소나(Synthetic Aperture Sonar, SAS) 신호처리에서는 탑재플랫폼이 직선경로를 따라 주행한다고 가정한다. 그러나 실제로는 플랫폼의 복잡한 운동에 따른 궤적 교란으로 인해 SAS 영상에 번짐과 같은 왜곡이 발생한다. 본 연구에서는 예인형 SAS 개발을 위해 궤적 교란에 의한 SAS 영상 왜곡을 개선하기 위한 방법으로서, Redundant Phase Center (RPC)을 이용한 예인체 운동 추정 및 영상 보정, 그리고 자동 초점 기법인 Phase Gradient Autofocus (PGA) 기법에 대해 검토하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해, sway로 인해 왜곡된 SAS 영상에 이 기법들을 적용하고 그 성능 및 유효성에 대해 살펴보았다.

**핵심용어:** 합성개구소나(Synthetic Aperture Sonar, SAS), Redundant Phase Center (RPC), Phase Gradient Autofocus (PGA), 운동 보정

**ABSTRACT:** In the signal processing of synthetic aperture sonar, it is subject that the platform in which the sensor array is installed moves along the straight line path. In practical operation in underwater, however, the sensor platform will have trajectory disturbances, diverting from the line path. It causes phase errors in measured signals and then produces deteriorated SAS images. In this study, in order to develop towed SAS, as tools to remove the phase errors associated with the trajectory disturbances of the towfish, motion compensation technique using Redundant Phase Center (RPC) and also Phase Gradient Autofocus (PGA) method is investigated. The performances of these two approaches are examined by means of a simulation for SAS system having a sway disturbance.

**Keywords:** Synthetic Aperture Sonar (SAS), Redundant Phase Center (RPC), Phase Gradient Autofocus (PGA), Motion compensation

**PACS numbers:** 43.30.Vh, 43.60.Fg

### 1. 서 론

고해상도 해저면 탐지 영상을 얻기 위한 합성개구소나(Synthetic aperture sonar, SAS)에 대한 연구 개발이 활발히 지속되고 있다.<sup>[1-6]</sup> SAS 영상을 얻기 위한 신호처리 모델링에서는 소나가 장착된 센서 플랫폼

이 직선 경로를 따라 일정속도로 움직인다고 가정한다. 그러나, 실제로는 다양한 원인에 의해 플랫폼은 수중에서 직선 경로를 벗어난 복잡한 운동을 하게 된다.<sup>[7]</sup> 궤적 교란의 영향이 없는 선명한 SAS 영상을 얻기 위해서는 직선 경로에 대한 허용 이탈 거리가 반송주파수 파장  $\lambda_c$ 의 1/8 이내가 되어야 한다.<sup>[1,2,8]</sup>

†Corresponding author: Jungsoo Ryue (jsryue@ulsan.ac.kr)

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Republic of Korea  
(Tel: 82-52-259-2168, Fax: 82-52-259-2677)



Copyright©2021 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

센서 플랫폼의 운동은 플랫폼에 부착된 관성측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU)를 이용해 계측할 수 있으나, SAS 영상분석에서 요구하는 만큼의 정밀도를 확보하기 어렵다. 따라서, 궤적 교란을 보정한 SAS 영상을 얻기 위해서는 IMU에서 계측한 센서 플랫폼의 운동 정보에 더하여 소프트웨어적인 신호처리를 이용해 플랫폼의 미세 운동을 추출 및 보정할 수 있는 기법이 적용되어야 한다.

본 논문에서는 예인형 SAS 개발을 위해 예인체의 운동을 추출하기 위한 소프트웨어적인 방법으로서, Redundant Phase Center(RPC)기법에 대해 검토하고, 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다. 즉, sway에 의해 교란된 SAS 신호를 시뮬레이션 하여 RPC 기법으로 예인체의 sway를 추정된 뒤 그 결과를 설정 sway 값과 비교하였다. 추정된 sway는 주파수-파수 방법을 이용한 SAS 영상 분석에 적용해, 궤적 교란에 의해 발생한 SAS 영상의 위상오차를 보정하였다. 또한, sway 운동 보정 후에도 SAS 영상에 남아있는 여분의 위상 오차를 제거하기 위하여 자동초점 기법을 추가 적용하였다. 본 연구에서는 Phase Gradient Autofocus(PGA) 방법을 기반으로 하는 mosaic PGA (mPGA) 방법을 사용하고 시뮬레이션을 통해 그 효과를 검토하였다.

본 논문 II장에서는 SAS 영상 획득을 위한 신호 모델링과 주파수-파수 방법에 대해 간략히 소개하며, III장에서는 RPC 신호를 이용해 예인체의 sway를 추정하고 위상 보정하는 방법을, 그리고 IV장에서는 SAS 영상에서 위상 오차를 제거하는 mPGA 방법에 대해 기술한다. 마지막으로 V장에서는 sway 궤적 교란을 가진 SAS 시스템을 시뮬레이션하고, III장과 IV장에서 소개한 위상 오차 보정 방법의 적용 예를 제시한다.

## II. 주파수-파수 방법을 이용한 SAS 영상 구성

본 합성개구소나 신호 모델링에서는 예인체가 정지 상태에서 신호 송신 및 반향 신호 수신을 완료한 다음 일정 거리를 이동하여 송수신 과정을 반복한다는 ‘stop-and-hop’ 가정을 적용한다. 이를 위해, 실제

로는 양상태인 송수신 센서를 단상태 센서로 가정하고, 위상중심배열 모델링을 이용해 SAS 영상을 구현한다.

Fig. 1에는 SAS를 이용한 해저면의 표적장 탐지 개념을 묘사하였다. 예인체는 진행방향인  $x$  축을 따라 일정 속도로 직선 운동을 하면서, 송신된 펄스의 반향 신호를 수신함으로써 현측 방향(range 방향,  $y$  방향)의 일정영역을 탐지한다. 예인체 진행방향의  $u$  위치에서 송신된 펄스의 반향 신호  $ee_m(t,u)$ 는 Eq. (1)과 같이 표현된다.<sup>[1]</sup>

$$ee_m(t,u) \approx \int \int ff(x,y) [a(t,x-u,y) \odot_t p_m \left( t - \frac{2}{c} \sqrt{(x-u)^2 + y^2} \right)] dx dy, \tag{1}$$

여기서  $ff(x,y)$ 는 SAS를 이용해 탐지하고자 하는 표적장의 반사 함수,  $a(t,x-u,y)$ 는  $u$  위치에 놓인 송수신 음향 센서의 응답함수,  $\odot_t$ 는 시간에 대한 컨볼루션,  $c$ 는 음파의 전파속도,  $p_m(t)$ 는 송신 펄스이며, 하첨자  $m$ 은 반송주파수  $\omega_c$ 를 갖는 주파수 변조를 의미하며,  $\sqrt{(x-u)^2 + y^2}$ 는  $(x,y)$ 지점의 표적과  $u$  위치에 놓인 단상태 송수신 센서 사이의 거리이다. (수식 전개 편의를 위해 송수신 센서의 응답함수는 이후 정식화에서 제외한다.)

수신 신호의 잡음 대 신호비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 높이기 위해 수신 신호에 펄스 압축을 수행하면

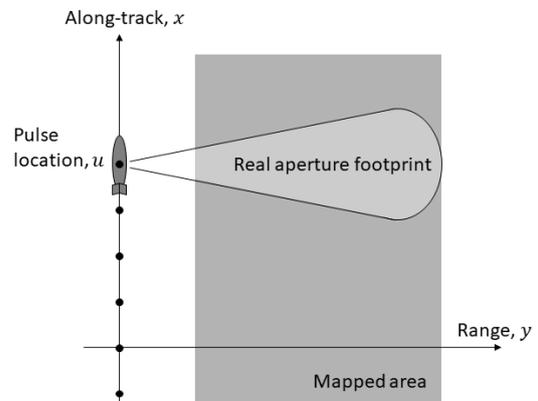


Fig. 1. Coordinate system for image construction using synthetic aperture sonar.

$$\begin{aligned}
 ss_m(t,u) &= \int_{\tau} p_m^*(\tau-t) e e_m(\tau,u) d\tau \\
 &= p_m(t) \otimes_t e e_m(t,u),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서 상첨자 \*는 복소켈레, 기호  $\otimes_t$ 는 시간에 대한 상관을 의미하는 연산자이다.<sup>[1]</sup>

Eq. (2)의 펄스 압축된 수신 신호  $ss_m(t,u)$ 에 2차원 Fourier(푸리에) 변환을 수행하면 주파수  $\omega$ 와  $u$  방향 파수  $k_u$ 를 변수로 갖는 수신 신호  $SS_m(\omega, k_u)$ 를 얻는다. Eq. (2)를  $t$ 와  $u$ 에 대해 2차원 푸리에 변환하면

$$\begin{aligned}
 SS_m(\omega, k_u) &\approx |P_m(\omega)|^2 \sqrt{\frac{\pi}{jk}} \\
 &\int_x \int_y ff_x(x,y) e^{-j(k_x x + \sqrt{4k^2 - k_u^2} y)} dx dy,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서  $\omega$ 는 각주파수,  $k_u$ 는  $u$  방향의 음향 파수,  $ff_x(x,y) = \sqrt{x} ff(x,y)$ 이다.<sup>[1]</sup> Eq. (3)의 이중 적분항은  $ff_x(x,y)$ 를  $x$  방향과  $y$  방향 파수 영역 함수로 변환하는 푸리에 변환의 형태를 띠고 있다. 즉, Eq. (3)에서  $x$  방향과  $y$  방향의 파수를

$$k_x(\omega, k_u) \equiv k_u \tag{4}$$

$$k_y(\omega, k_u) \equiv \sqrt{4k^2 - k_u^2} \tag{5}$$

로 정의하면, Eq. (3)의 적분항은  $FF_m(k_x, k_y)$ 로 쓸 수 있다.  $k_x$ 와  $k_y$ 를  $\omega$ 와  $k_u$ 의 함수로 치환하는 Stolt 사상을 이용해 Eq. (3)을 다시 쓰면

$$SS_m(\omega, k_u) \approx |P_m(\omega)|^2 \sqrt{\frac{\pi}{jk}} S\{FF_m(k_x, k_y)\}, \tag{6}$$

여기서  $S\{ \}$ 는 Stolt 사상을 나타낸다.<sup>[1]</sup> Stolt 사상에 의한  $(\omega, k_u)$ 와  $(k_x, k_y)$ 의 변환 관계는 Fig. 2에 나타내었다. 주파수 변조 펄스  $p_m(t)$ 가 갖는 주파수 대역은 반송주파수  $\omega_c$ 를 중심에 두고 설정되므로,  $SS_m(\omega, k_u)$ 가 정의되는  $(\omega, k_u)$  영역을 표현하면 Fig. 3의 음영 영역과 같다.

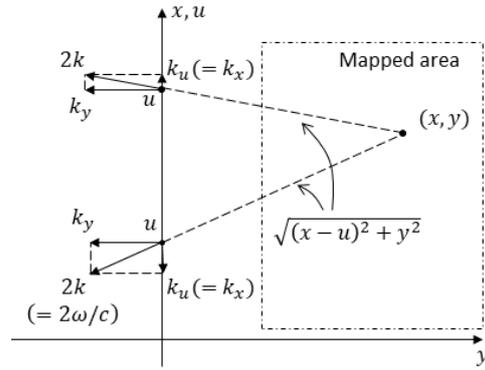


Fig. 2. Coordinate relations between  $(\omega, k_u)$  and  $(k_x, k_y)$ .

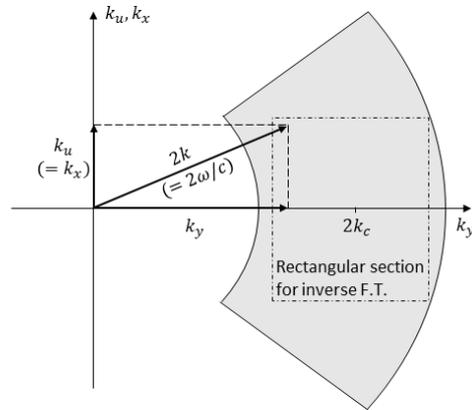


Fig. 3. Domain of  $SS_m(\omega, k_u)$  formed by the Stolt mapping.

Eq. (6)으로부터  $FF_m(k_x, k_y)$ 를 구하면

$$FF_m(k_x, k_y) = S^{-1}\{ \sqrt{jk/\pi} SS_m(\omega, k_u) / |P_m(\omega)|^2 \}, \tag{7}$$

여기서  $S^{-1}\{ \}$ 는 역 Stolt 사상을 나타낸다.<sup>[1]</sup>  $k_x$ 와  $k_y$ 에 대한 역 푸리에 변환으로 표적장 함수  $ff_m(x,y)$ 를 얻기 위해서는 Fig. 3에 일점쇄선으로 표시된 것과 같은 사각 영역을 설정해야 한다. 이를 위해, 파수 영역의 사각 창문함수를 도입하면 Eq. (8)과 같이 쓸 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned}
 \widehat{FF}_m(k_x, k_y) \\
 = WW(k_x, k_y) S^{-1}\{ \sqrt{jk/\pi} SS_m(\omega, k_u) / |P_m(\omega)|^2 \}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Eq. (8)을 역 푸리에 변환하면 표적장 함수  $\hat{f}(x, y)$  를 얻는다.

### III. RPC기법을 이용한 sway 보정

Fig. 4(a)에는 sway를 가지는 예인체가 stop-and-hop 방식으로 운용될 때,  $i$  번째와  $i+1$  번째 핑(ping) 지점에서 송신(Tx) 및 수신 센서(Rx)의 위치를 묘사하였다. 두 핑 사이에서 발생한 예인체의 sway는  $\Delta z_{i+1}$  이다. Fig. 4(a)의 양상태 송수신 센서를 단상태 센서로 변환하여 위상중심배열로 나타내면 Fig. 4(b)와 같다.  $i$  번째와  $i+1$  번째 핑의 위상중심배열 중  $x$  방향으로 중첩되는 위상중심을 Redundant Phase Center (RPC)라고 하며, Fig. 4(b)에 사각형 점선으로 나타내었다.

예인체에 sway 운동이 없다면, 즉,  $\Delta z_{i+1} = 0$  이라면, 두 핑의 RPC에서는 표적의 반향 신호가 동일한 시간 지연을 가진다고 가정할 수 있다. 따라서, Fig. 4(b)에 나타낸 것과 같이 두 핑의 RPC 신호 사이에 발생하는 반향 신호의 시간 지연은 예인체의 sway 운동에 의해 발생한 것으로 간주한다.

동일한  $x$  위치를 갖는 두 RPC 수신 신호의 상관도를 계산하면 두 신호 사이의 시간 지연을 구할 수 있다. Eq. (1)의  $p_m$  에  $e^{-j\omega_c t}$  을 곱하여 반향신호를 복조

하면 기저대역의 반향신호  $ee_b(t, u)$  를 얻는다. 두 기저대역 RPC 수신 신호의 상관도는 복소수이므로 최대 상관도의 크기와 위상 정보를 이용해 시간 지연을 추출할 수 있다.

그러나, 반송주파수 대비 낮은 샘플링을 갖는 이산 시간 신호의 사용, 그리고 복소수의 위상이  $-\pi \sim \pi$  범위에서만 표현되는 위상 랩핑 문제로 인해 정확한 시간 지연을 추출하는데 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 보완하기 위해, 시간 지연  $\Delta$  는 Eq. (9)와 같이 두 개의 항으로 구성한다.<sup>[5]</sup>

$$\Delta(u) = \Delta_{coarse} + \Delta_{fine}, \tag{9}$$

여기서  $\Delta_{coarse}$  는 두 기저대역 RPC 이산 시간 신호가 최대 상관도를 갖는 지연 시간을 이차 근사로 구한 값이며,<sup>[4]</sup>  $\Delta_{fine}$  은 두 RPC 신호의 최대 상관도(복소수)가 갖는 위상과  $\omega_c \Delta_{coarse}$  의 차이가 최소가 되도록 하는 지연 시간이다. 즉, 최대 상관도의 위상을  $\alpha$  라고 할 때, Eq. (10)의 정수  $m$  을 찾으면  $\Delta_{fine}$  을 얻을 수 있다.

$$\omega_c \Delta_{fine} = \min(|\alpha - \omega_c \Delta_{coarse} - 2\pi m|). \tag{10}$$

두 RPC 신호의 상관도는 전체 길이의 시간 신호를 이용해서 구할 수 있다. 그러나, Fig. 4(b)의 두 점표적에서 알 수 있는 것과 같이, 표적장에 다수의 표적이 분포되어 있는 경우에는 표적의 위치에 따라 두 RPC 신호의 지연 시간에 차이가 발생할 수 있다. 따라서 전체 시간 신호를 이용해 최대 상관도 지연 시간을 계산하면 추출 결과에 큰 오차가 발생할 수 있다. 이 문제점을 개선하고자, 본 연구에서는  $y$  방향을 따라 여러 개의 구역(이를 “short window”라고 칭한다)을 설정하여 각 구역별로 sway에 의한 지연 시간을 구하였다.<sup>[5]</sup> 각 short window 별로 얻어진 지연 시간은 평균을 취하여 예인체의 최종 sway를 추정하였다. 각 short window 별로 얻은 지연 시간을 평균함으로써 지연 시간에 포함된 오차를 줄일 수 있다. Sway 추정 시 short window 적용 유무에 따른 추정 결과의 변화는 V장의 시뮬레이션에서 비교한다.

예인체의 sway에 의해 왜곡된 SAS 영상은 RPC 신

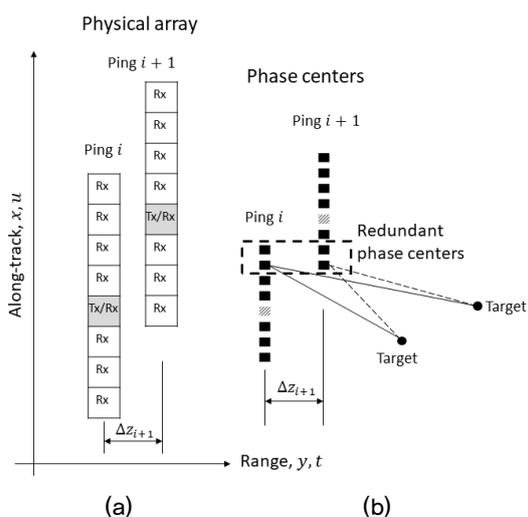


Fig. 4. Sensor array model at two consecutive ping positions having sway motion. (a) Physical array, (b) phase center array.

호로부터 추출한 sway 추정치를 이용해 보정할 수 있다. 즉, 위상중심 시간 신호를  $t$ 에 대해 푸리에 변환한  $Ss_m(\omega, u)$ 에 위상  $\phi(\omega, u) = e^{j2\omega\Delta(u)}$ 을 곱함으로써 sway에 의한 위상 오차를 보정한다.

#### IV. PGA기법을 이용한 영상 보정

III장에서는 RPC 시간 신호 사이의 상관도를 이용해 예인체의 sway 운동을 추정하고, 이를 이용해 SAS 영상을 보정하는 방법을 다루었다. 한편, 자동초점 기법을 이용하면 SAS 영상 신호만을 이용하여 위상 오차에 의해 흐려진 영상의 초점을 개선할 수 있다. 이번 장에서는 PGA 방법을 기반으로 하는 mPGA 방법<sup>[4]</sup>을 이용한 SAS 영상 보정에 대해 기술한다.

예인체의 sway 운동  $z(x)$ 에 의해 발생하는 SAS 영상의 왜곡은 Eq. (1)의  $p_m$ 에  $2z(x)$ 만큼의 시간 지연을 일으킬 것이다. Eq. (8)의 파수 영역 표현에서, sway에 의한 시간 지연은 위상 변화로 나타나므로 교란된 파수영역 표적장  $\widetilde{FF}(k_x, k_y)$ 은 Eq. (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\widetilde{FF}(k_x, k_y) = Z(k_x) \widehat{FF}(k_x, k_y), \quad (11)$$

여기서  $Z(k_x) = e^{j\phi(k_x)}$ 이다[Eq. (11)과 이후의 정식화에서 주파수 변조/복조를 의미하는 하첨자 표기는 생략한다]. Eq. (11)을 2차원 역 푸리에 변환하여 표적장 함수로 표현하면 Eq. (12)와 같다.

$$\widetilde{ff}(x, y) = z(x) \odot_x \widehat{ff}(x, y), \quad (12)$$

여기서  $\odot_x$ 는  $x$  방향 컨볼루션을 의미한다. Eq. (12)에서 표현된 것과 같이, 예인체의 sway는  $x$ 축 방향 컨볼루션에 의해 표적장  $\widetilde{ff}(x, y)$ 에  $x$  방향 퍼짐을 만들어 낸다. 따라서, 예인체의 운동에 의해 초래된 위상 오차  $\tilde{\phi}(k_x)$ 를 추출하여 보상한다면 SAS 영상의 흐림을 제거할 수 있다.

예인체의 운동에 의한 왜곡이 없는 표적장  $ff(x, y)$ 를 점표적의 집합으로 가정하면 Eq. (13)과 같이 모델링할 수 있다.<sup>[1]</sup>

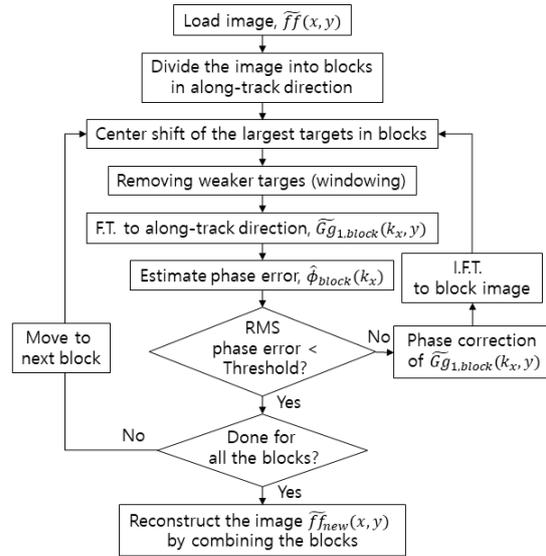


Fig. 5. Flow chart of the mosaic phase gradient autofocus (mPGA) algorithm.

$$ff(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \delta(x - x_n, y - y_n). \quad (13)$$

만약 예인체가 진행 방향 직선 경로에서 벗어난 현측 방향( $y$  방향)의 운동을 가지는 경우,  $y$  방향 운동에 의해 교란되는 표적장은 Eq. (14)로 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{ff}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n z(x - x_n) \delta(y - y_n). \quad (14)$$

mPGA 기법을 이용해 교란된 표적장  $\widetilde{ff}(x, y)$ 의 위상 오차  $\tilde{\phi}(k_x)$ 를 추정하고 영상을 보정하는 과정은 Fig. 5에 흐름도로 나타내었다. mPGA 기법은 전체 영상을  $x$ 축 방향을 따라 여러 개의 블록으로 나누고, 각 영상 블록에 대해 PGA를 적용하는 기법이다. 각 영상 블록에 대해 수행되는 PGA의 단계별 작업 과정은 다음과 같다.<sup>[2,6]</sup>

##### Step 1. 표적의 중심 이동 (center shifting)

표적장 영상  $\widetilde{ff}(x, y)$ 에서 각 열( $y$ 지점)의 최대 표적(픽셀의 강도가 최대인 표적)을 영상의 중심으로 원형 이동시킨다. 이렇게 함으로써 모든 열에서 가장 밝은 표적이 영상의  $x$ 방향 중심에 놓이게 된다.

중심 이동한 표적장 모델은 Eq. (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \widetilde{gg}_{0,block}(x,y) &= \sum_{n=0}^{N-1} f_n z(x) \delta(y-y_n) \\ &+ \sum_{n=N}^{\infty} f_n z(x-x_n) \delta(y-y_n), \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $N$ 은 표적장 영상의  $y$ 방향 픽셀 개수를 나타낸다.

### Step 2. 미약 표적 (weaker targets) 제거

$x$  방향 중심에 위치한 최대 표적들을 해석에 이용하기 위하여  $x$  방향 사각 창문함수를 도입해 중심에서 멀리 벗어난 지점에 놓인 미약 표적들은 제거한다.

$$\begin{aligned} \widetilde{gg}_{1,block}(x,y) &= w(x) \widetilde{gg}_{0,block}(x,y) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} f_n z(x) \delta(y-y_n) + nn(x,y), \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $nn(x,y)$ 는 사각 창문함수 내에 포함된 미약 표적들의 영향을 의미한다.

PGA 기법이 가진 큰 어려움 중의 하나는 창문함수의 길이를 결정하는 것이다. 표적장의 강도, 주요 표적 개수, 분포 형태 등 대상 표적장의 특성에 따라 창문함수의 길이가 적절히 설정되어야 하므로 사용자의 주관적 판단과 시행착오가 수반된다.

### Step 3. $x$ 방향 푸리에 변환

$\widetilde{gg}_{1,block}(x,y)$ 를  $x$  방향에 대해 푸리에 변환하면

$$\begin{aligned} \widetilde{Gg}_{1,block}(k_x,y) &= \sum_{n=0}^{N-1} f_n Z(k_x) \delta(y-y_n) + Nn(k_x,y) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} f_n \delta(y-y_n) e^{j\phi(k_x)} + Nn(k_x,y). \end{aligned} \quad (17)$$

$\widetilde{Gg}_{1,block}(k_x,y)$ 를 이산화된 파수와  $y$  위치로 표현하면  $\widetilde{Gg}_{1,block}[p,q]$ 가 되며, 여기서  $p$ 와  $q$ 는 각각  $k_x$  방향과  $y$  방향의 픽셀 좌표를 나타내는 지표이다.

### Step 4. 위상 오차 추출

위상 오차의  $k_x$  방향 기울기는 최대가능추정 방법을 이용해 Eq. (16)으로 쓸 수 있다.

$$\widetilde{\Delta\phi}_{block}[q] = \angle \sum_{p=0}^{P-1} \{ \widetilde{Gg}_{1,block}^*[p,q-1] \widetilde{Gg}_{1,block}[p,q] \}, \quad (18)$$

여기서  $\angle$ 는 위상각을 의미한다. 위상 오차 추정치  $\widetilde{\phi}_{block}(k_x)$ 는 Eq. (19)와 같이  $\widetilde{\Delta\phi}_{block}$ 을 누적 합산하여 구할 수 있다.

$$\widetilde{\phi}_{block}[q] = \sum_{l=1}^q \widetilde{\Delta\phi}_{block}[l], \quad \widetilde{\phi}_{block}[0] \equiv 0. \quad (19)$$

### Step 5. 위상 오차 보정

추출된 위상 오차를 이용해 Eq. (20)과 같이 원본 영상을 보정한다.

$$\widetilde{Ff}_{block,new}(k_x,y) = e^{-j\widetilde{\phi}_{block}(k_x)} \widetilde{Ff}_{block}(k_x,y). \quad (20)$$

$\widetilde{Ff}_{block,new}(k_x,y)$ 를  $k_x$ 에 대해 역 푸리에 변환하면 위상 보정된 표적장  $\widetilde{ff}_{block,new}(x,y)$ 을 얻는다. Fig. 5의 흐름도에 나타난 것과 같이, 추출된 위상 오차가 허용 한계보다 작아질 때까지 반복 연산을 수행함으로써 위상 보정된 최종 영상  $\widetilde{ff}_{block,new}(x,y)$ 을 획득한다.

위의 Step 1~5를 통해 얻어진 각 영상 블록들을 순서에 맞추어 배열하면 위상오차가 보정된 표적장의 영상  $\widetilde{ff}_{new}(x,y)$ 을 얻는다.

## V. Sway 운동에 대한 시뮬레이션

이번 장에서는 예인체의 sway 운동에 의해 교란된 SAS 영상을 시뮬레이션하고, 이를 RPC 기법과 mPGA 방법을 이용해 보정하면서 그 성능을 검토한다. 시뮬레이션에서 설정한 SAS 시스템의 주요 인자는 Table 1에 나타내었다. 예인체가 가진 sway의 크기는 4 mm로 설정하였으며, 이는 반송주파수의 파장 ( $\lambda_c = 3.7$  mm)과 유사한 크기이다. 표적장으로는 다

수의 점표적을 조합하여 총 10개의 'KRISS', 'UOU' 문자열을 구성하였다. Fig. 6에는 예인체에 가까운 쪽에 놓인 5개의 표적 문자열을 나타내었다. 문자를 만드는데 사용된 점표적 사이의 기본 간격은 0.16 m이며, Fig. 6의 중앙에 위치한 큰 문자열(KRISS)은 점표적 사이의 기본간격이 0.32 m로 설정되었다.

RPC 기법을 이용한 예인체의 sway 운동 추정 은 전체 시간 신호를 이용한 경우와 예인체 현측 방향 short window별 시간 신호를 이용한 경우로 나누어 수행하였다. 본 해석에서 현측 방향 short window는 폭이 약 10 m 정도 되도록 설정하였다. Fig. 7에는 두 경우에 대해 얻은 sway 운동 추정치를 시뮬레이션에 사용한 설정 sway 값과 비교하여 나타내었다.

Fig. 7의 비교를 통해, 거리방향 short window를 적용해 구한 sway 추정치가 전체 시간 신호를 이용해 구한 추정치보다 설정 sway 값에 더 근사한 것을 알

Table 1. Simulation parameters for synthetic aperture sonar system having a sway motion.

No. Channels in towfish	32
Towing speed	1.5 m/s
Ping repetition frequency	3 Hz
No. RPC at each ping	7
Tone burst length	40 $\mu$ sec.
Carrier frequency	400 kHz
Sampling frequency	100 kHz
Sway motion	sinusoidal
Sway amplitude	4 mm
Wavelength of sway	12.5m

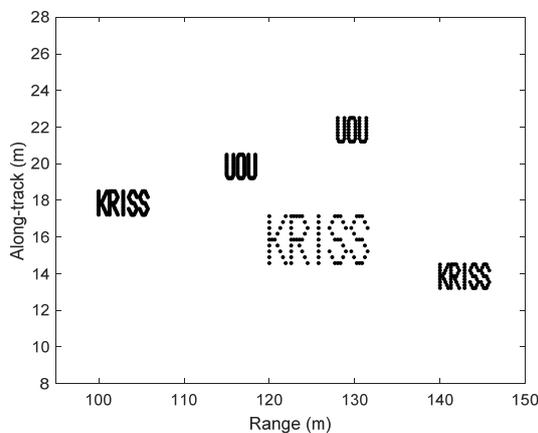


Fig. 6. A half of target field used in simulation.

수 있다. 이 결과를 통해, RPC 기법을 이용한 sway 추정 시 현측 방향으로 short window를 적용하는 방법이 추정 오차를 줄이는데 유리함을 확인하였다.

다만, 본 시뮬레이션에서 설정한 매 핑 별 RPC 채널(7개)이 충분히 많지 않아 sway 추정치의 크기가 설정치 대비 약 20% 정도 작은 값을 보이고 있다. 보다 정확한 sway 추정치를 얻기 위해서는 RPC 채널의 수를 증가시키는 것이 필요하다. 그러나, RPC 채널의 수는 핑 반복 주파수, 예인 속도 등 SAS 시스템 운영 조건 설정과 직접 관련되므로 종합적인 운영 환경을 고려하여 결정되어야 할 것이다.

Sway 운동으로 교란된 원본 SAS 영상과 short window를 적용해 구한 sway 추정치로 보정한 SAS 영상은 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에 비교하여 나타내었다. Fig. 8(a)의 원본 영상에서는 예인체의 sway 운동에 의해 표적장의 문자열이 예인 방향으로 넓게 번져 있는 것을 확인 할 수 있다. 한편, Fig. 8(b)의 영상에서는 sway 추정치를 이용한 위상 보정에 의해 표적의 예인 방향 번짐이 개선된 것을 알 수 있다.

하지만 Fig. 8(b)에도 여전히 다소의 번짐이 남아 있어 원본 영상의 위상 오차가 RPC 기법에 의해 충분히 제거되지 못하였음을 알 수 있다. 이는 Fig. 7에 보인 것과 같이, RPC 기법으로 추출한 sway 추정치

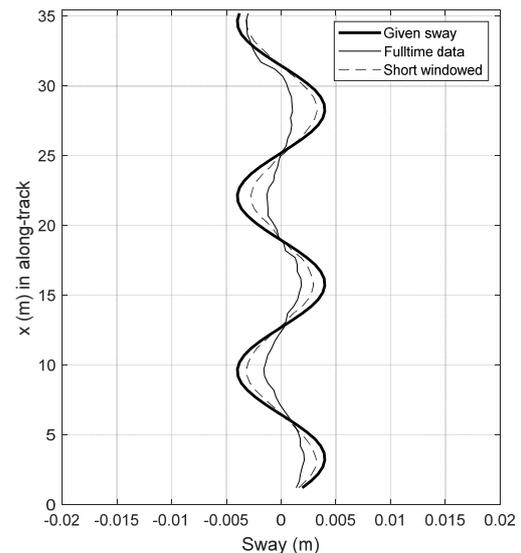
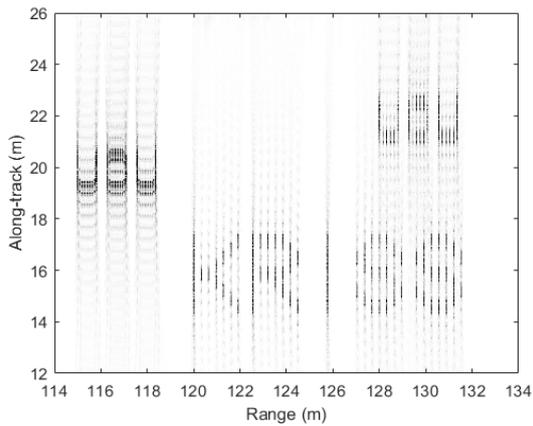
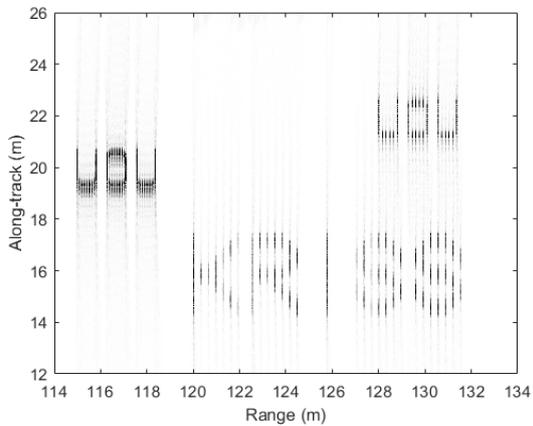


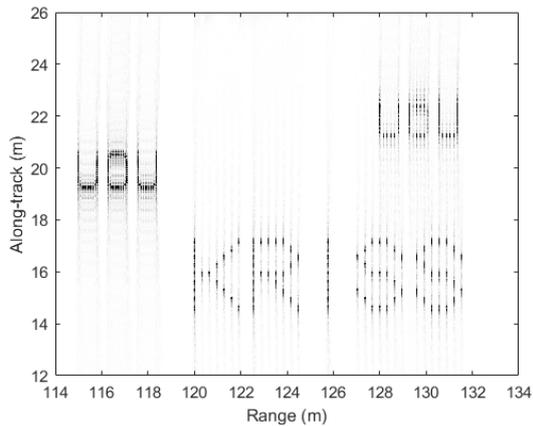
Fig. 7. Model for the sensor locations at two consecutive ping positions with sway. (a) Physical array, (b) phase center array.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. SAS image simulated with sway motion. (a) Original image blurred by sway motion, (b) motion compensated by RPC technique, (c) additionally autofocussed by mPGA method.

가 설정치 대비 상당한 오차를 갖는 것에도 일부 원인이 있다고 판단된다.

예인체의 sway 운동을 보정한 Fig. 8(b)의 SAS 영상

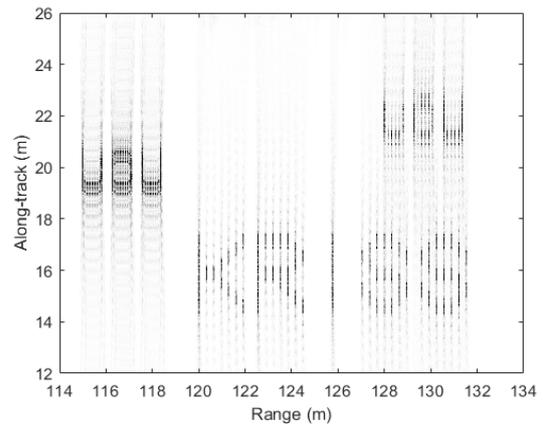


Fig. 9. SAS image compensated only by mPGA.

에 남아 있는 위상 오차는 mPGA 방법을 적용해 추가적인 보정을 수행하였다. 본 시뮬레이션의 mPGA에서는 전체 영상을  $x$  방향으로 약 5 m 길이에 50% 중첩을 갖는 13개의 블록으로 구성하고, 각 블록 별로 PGA를 수행하였다. mPGA 수행 시 사각 창문함수의 길이는 최대 강도의 표적 파워 대비 -10 dB 이내 표적들이 포함되도록 설정하였다. mPGA 방법으로 위상 오차를 개선한 영상은 Fig. 8(c)에 나타내었다. Fig. 8(c)의 영상을 보면 Fig. 8(b)에 남아있던 표적의 예인 방향 번짐이 mPGA 방법에 의해 개선된 것을 확인할 수 있다.

한편, RPC 기법을 이용한 sway 운동의 위상 보정 없이 Fig. 8(a)의 원본 영상에 직접 mPGA 방법을 적용한 SAS 영상은 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 영상은 Fig. 8(c)와 달리 sway 운동에 의한 표적 문자열의 예인 방향 번짐이 크게 개선되지 못하였다. 이러한 결과로부터, mPGA (또는 PGA) 방법은 적은 위상 오차의 보정에 적합한 반면 본 시뮬레이션에서 설정한  $\lambda_c$  정도의 sway를 가지는 SAS 영상 보정에는 효과적이지 않음을 확인하였다. 따라서, 궤적 교란을 가진 SAS 영상의 보정은 예인체의 운동 추정치를 이용한 위상 보정을 먼저 수행하고, 이어서 자동 초점 방법을 이용해 잔여 위상을 보정하는 순서로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 예인체의 운동에 의해 교란된 SAS 영상을 개선하기 위한 방법으로서, RPC 기법을 이용한

예인체 운동 추정 및 보정, 그리고 mPGA를 이용한 SAS 영상의 위상 오차 개선 방법에 대해 검토하고, sway 운동에 대한 시뮬레이션을 통해 그 성능을 살펴보았다.

Sway 운동을 가진 SAS 영상 시뮬레이션을 통해, RPC 기법을 이용한 sway 운동 추정 시에는 현측 방향으로 short window를 적용해 각 구역별 sway를 추출하는 방법이 보다 정확한 운동 추정치를 제공함을 확인하였다. sway 운동에 의한 위상 오차를 보정한 SAS 영상에 mPGA 방법을 적용함으로써 추가적인 영상 개선이 가능함을 확인하였다. 반면에 sway로 교란된 SAS 영상에 예인체의 운동 보정 없이 mPGA (또는 PGA) 방법을 직접 사용해 위상 오차를 보정하는 것은 효과적이지 않음을 파악하였다.

본 연구를 통해 SAS 영상 분석에 필요한 주파수-파수 분석 방법, RPC를 이용한 운동 추정 및 보정 방법, 그리고 PGA, mPGA 등의 자동 초점 방법을 획득하고 그 성능을 확인하였다. 추후, 예인체의 yaw와 surge 등 다른 운동에 의해 교란된 SAS 영상을 보정하기 위한 연구가 진행되어야 할 것이며, 본 연구 결과는 이들 후속 연구 수행에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 논문은 민군협력진흥원의 민군겸용기술과제인 “예인형 간섭계측합성개구소나(InSAS) 개발”(과제번호: 15-CM-SS-01)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이다.

## References

1. D. W. Hawkins, *Synthetic aperture imaging algorithms: with application to wide bandwidth sonar* (Ph.D. Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1996).
2. H. J. Callow, *Signal processing for synthetic aperture image enhancement* (Ph.D. Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2003).
3. D. R. Wilkinson, *Efficient image reconstruction technique for a multiple-receiver synthetic aperture sonar* (M.Eng. Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2001).
4. W. W. Bonifant, Jr, *Interferometric synthetic aperture sonar processing* (M.Sc. Thesis, Georgia Institute of Technology, US, 1999).

5. D. A. Cook, *Synthetic aperture sonar motion estimation and compensation* (M.Sc. Thesis, Georgia Institute of Technology, US, 2007).
6. C. V. Jakowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A. Thompson, *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach* (Springer, New York, 1996), pp. 251-271.
7. S. M. Kim and S. H. Byun, “A quantitative analysis of synthetic aperture sonar image distortion according to sonar platform motion parameters” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **40**, 382-390 (2021).
8. M. P. Hayes and P. T. Gough, “Broad-band synthetic aperture sonar,” *IEEE J. Ocean. Eng.* **17**, 80-94 (1992).

## 저자 약력

### ▶ 유 정 수 (Jungsoo Ryue)



1995년 2월 : 부산대학교 기계설계공학과 학사  
 1997년 2월 : KAIST 기계공학과 석사  
 2003년 8월 : 국방과학연구소 선임연구원  
 2004년 12월 : ISVR, Univ. of Southampton, 석사  
 2007년 12월 : ISVR, Univ. of Southampton, 박사  
 2009년 1월 : ISVR, Univ. of Southampton, 연구원  
 2009년 2월 ~ 현재 : 울산대학교 조선해양 공학부 교수

### ▶ 백 경 민 (Kyungmin Baik)



1996년 2월 : 고려대학교 물리학 학사  
 2000년 2월 : 고려대학교 물리학 석사  
 2008년 5월 : WSU 물리학 박사  
 2008년 7월 : ISVR, U of Southampton  
 2010년 7월 : 우즈홀해양연구소(MHOI)  
 2012년 5월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 책임연구원