

# 스포트라이트 모드 SAR 영상 형성에서의 수정된 가중치 최소 자승기법에 의한 자동 초점 알고리즘

## Modified WLS Autofocus Algorithm for a Spotlight Mode SAR Image Formation

황 정 훈 · 신 현 익 · 김 환 우\*

Jeonghun Hwang · Hyun-Ik Shin · Whan-Woo Kim\*

### 요 약

요동이 존재하는 환경에서 항법 장비 정확도의 한계 및 시스템 지연 오차 등으로 방위 위상 오차가 필연적으로 발생하는 항공기 탑재 SAR(Synthetic Aperture Radar)의 경우, 방위 위상 오차를 신호처리 알고리즘으로 추정하고 보상하는 자동 초점(Autofocus: AF) 기법 적용이 필수적이다. 본 논문에서는 수정된 가중치 최소 자승기법(Modified Weighted Least-Squares: MWLS)에 의한 자동 초점 알고리즘을 제안한다. 새로운 방식의 표적 선정 및 정렬과 방위 방향 반복 위상 추정 방식을 통해 기존 WLS보다 견고한 성능을 보이게 된다. 비행 시험을 통해 획득한 SAR 원시데이터에 제안한 방식을 적용하고 성능을 분석하여 제안한 방식의 유효함과 우수성을 입증하도록 한다.

### Abstract

In the existence of motion, azimuth phase error due to accuracy limitation of GPS/IMU and system delay is unavoidable and it is essential to apply autofocus to estimate and compensate the azimuth phase error. In this paper, autofocus algorithm using MWLS(Modified WLS) is proposed. It shows the robust performance compared with original WLS using new target selection/sorting metric and iterative azimuth phase estimation technique. SAR raw data obtained in a captive flight test is used to validate the performance of the proposed algorithm.

Key words: SAR, Autofocus, Weighted Least-Squares(WLS), Modified WLS, MWLS

### I. 서 론

위성 또는 항공기에 탑재하여 운용하는 SAR는 레이더의 동작 원리와 동일하게 전자파 신호를 송신하고, 수신한 정보로 영상을 형성하게 되므로, 광학 영상과 달리 날씨 및 주야간 여부에 상관없이 운용 가능하다. 이러한 장

점으로 인해 과학 연구 목적의 원격 측정 분야에서 뿐만 아니라, 감시정찰 목적의 군사적 분야에서도 그 필요성을 크게 주목받고 있다. 바람 및 항공기 진동 등으로 인해 요동이 존재하는 환경에서 운용하는 항공기 탑재 SAR의 경우, 이상적인 직선 비행경로에서 벗어나는 요동을 반드시 경험하게 된다. 이러한 요동은 항공기에 탑재된 GPS/IMU

국방과학연구소 제3기술연구본부 2(The 3<sup>rd</sup> Research and Development Institute, Agency for Defense Development)

\*충남대학교 전자공학과 (The Department of Electronics Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received September, 4, 2017 ; Revised October, 20, 2017 ; Accepted November, 6, 2017. (ID No. 20170904-093)

· Corresponding Author: Jeonghun Hwang (e-mail: jhhwang@add.re.kr)

등에 의해 위치를 측정하여 보상하게 되나, 그 정확도의 한계로 인하여 잔여 오차가 남게 된다. SAR 시스템 HW의 지연 오차 또한 존재하며, 이러한 오차들로 인한 열화는 주로 SAR 방위 방향의 위상 오차로 나타나, 방위 해상도 및 부엽 성능을 저하시키는 요인이 된다<sup>[1],[2]</sup>.

SAR 영상 형성 결과에서, 방위 위상 오차를 추정하고 보상하여 방위 성능을 개선하는 신호처리 방식을 자동 초점 (Autofocus: AF) 기법이라고 한다. PGA(Phase Gradient Autofocus)<sup>[3],[4]</sup>는 가우시안 잡음이 존재한다는 가정 하에서 오차 추정 성능이 크래머 라오 최저 한계(Cramer rao lower bound)에 도달한다고 알려진 SAR 분야의 대표적인 최적 AF 알고리즘이다. 다만 실제 환경에서는 위의 가정이 엄밀하게 성립하지 않으므로, 개선 성능은 이론치보다 다소 저하될 수 있다. PGA와 달리 잡음에 대한 가정이 전혀 필요 없기에 실제 환경에서 PGA보다 나은 성능을 보인다는 가중치 최소 자승법(Weighted Least-Squares: WLS) AF가 제안되었다<sup>[5]</sup>. WLS-AF는 표적 지역 클러터 모델에 대한 가정이 없으므로, 모델 차이에 의한 성능 변이가 없다는 장점이 있으며, 잔여 위상 오차의 분산을 최소화한다는 측면에서 최적이다. 다만 큰 SCR(Signal to Clutter Ratio) 값을 갖는 반사 신호들의 존재 여부, SCR 값을 기준으로 하는 표적 선택 및 정렬의 적절함, 그리고 방위 위상 추정을 위한 방위 표적의 길이 차이에 따라 AF 성능 개선 편차가 발생한다는 단점이 있다.

이 논문에서는 기존 WLS-AF에서 제시한 SCR 계산 및 표적 선택 방식의 문제점, 방위 표적 길이 차이에 의한 성능 편차를 설명하고, 그로 인한 성능 저하를 극복할 수 있는 방식을 제안한다. 제안한 MWLS-AF 방식은 새로운 기준에 의해 선택한 표적들을 이용하고, 방위 방향 반복 위상 추정 방식을 적용한다. 제안 방식의 유효성을 검증하기 위해 비행시험으로 획득한 실제 SAR 원시데이터를 활용하여 SAR 영상을 형성 후 AF를 적용한다. 기존 WLS-AF에 의한 위상 추정 및 영상 형성 결과뿐만 아니라, PGA 적용 결과와도 비교, 분석하여 성능을 검증하고, 제안한 방식의 실효성을 입증하도록 한다.

## II. 본 론

### 2-1 가중치 최소자승법 자동초점 기법(WLS-AF)

AF는 일반적으로 SAR 영상의 거리 압축 방위 푸리에 변환 도메인(range compressed phase history) 신호에서 방위 위상을 추정하여 보상하게 된다<sup>[1]-[5]</sup>.

$\Phi(m, n)$ 을  $n$ 번째 거리 빈(range bin) 내의  $m$ 번째 위치에서의 방위 위상 값이라고 하고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi(m, n) = \phi_e(m) + \phi_c(m, n) \quad \text{where } m = 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$\phi_e(m)$ 은 AF에 의해서 추정하고자 하는 위상 오차이며,  $\phi_c(m, n)$ 은  $n$ 번째 거리 빈에 위치한 클러터들에 의한 위상 값이다. 거리 빈의 위상 값에는 빈마다 다른 임의의 상수 편차가 포함되어 있으나, WLS-AF 기법<sup>[5]</sup>에서 제시한 LPU(Local Phase Unwrapping) 방식에 의해서 쉽게 제거가 되므로, 여기서는 언급하지 않기로 한다.  $M$ 은 방위 방향 샘플 개수이며,  $N$ 은 거리 빈(샘플) 개수이다.  $\phi_e(m)$ 은 거리 빈이 달라져도 변하지 않는다는 게 일반적인 가정이므로  $n$ 의 함수가 아니나,  $\phi_c(m, n)$ 은 거리 빈 위치마다 다른 클러터들에 의한 위상 값이므로,  $n$ 이 달라지면 서로 다른 위상 값으로 나타난다.  $\phi_c(m, n)$ 의 분산을  $\sigma_n^2$ 라고 한다면,  $\phi_e(m)$ 의 WLS 추정치  $\widehat{\phi_e(m)}$ 는 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\widehat{\phi_e(m)} = \sum_{n=1}^N w_n \cdot \Phi(m, n) \quad \text{where } w_n = \frac{1}{\sigma_n^2} / \sum_{l=1}^N \frac{1}{\sigma_l^2}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기서  $w_n$ 은 가중치가 되며,  $\sigma_n^2$ 이 커질수록 가중치가 작아지는 반비례 관계가 된다. WLS-AF에 의한 추정 오차의 분산  $\sigma_e^2$ 은 다음 식 (3)처럼 나타난다.

$$\sigma_e^2 = 1 / \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sigma_n^2} \quad (3)$$

식 (3)에 의해서 추정 오차의 분산은  $n$ 이 커질수록 작아지므로, 이는 보다 많은 거리 빈을 사용할수록 오차가

작아지게 됨을 의미하며, 추정 오차의 분산을 최소화한다는 측면에서 최적 추정치라고 할 수 있다.

$\sigma_n^2$ 을 알 수 있다고 한다면, 식 (2)에 의한  $\widehat{\phi_e}(m)$  추정이 직접적으로 가능하나, 실제 SAR 영상 신호에서  $\sigma_n^2$  값을 직접 알 수 있는 방법은 없기에, 영상의 방위 푸리에 도메인 신호 진폭으로부터 SCR을 계산하여 강한 표적 신호와 클러터 신호의 비가 큰 순서대로 거리 빈을 정렬하고, 복잡한 Taylor 근사화를 이용하여  $\sigma_n^2$ 을 계산하는 방법을 아래와 같이 제시하였다.

$$\sigma_n^2 \approx \frac{1}{2}R + \frac{5}{24}R^2 \text{ where } R = 1/SCR$$

$$\text{and } R \approx \frac{1}{d} [4(2c^2 - d) - 4c\sqrt{4c^2 - 3d}]$$

$$\text{with } c = E[A(m, n)], d = E[A^2(m, n)] \quad (4)$$

$A(m, n)$ 은 방위 푸리에 변환 도메인 신호의 진폭을 나타낸다. 위의 수식에 의한 계산 방식은 많은 근사화를 포함한 유도이므로 SCR이 클 경우(High SCR)에는 작은 오차를 갖게 되나, SCR이 작을 경우(Low SCR)에는 오차가 크게 증가하여 적용할 수 없음을 설명하고, 다음의 방안을 제시하고 있다. Low SCR 경우를 위한 두 번째 방안은 모든 거리 빈에 대해서  $\sigma_n^2$ 을 한꺼번에 계산하여 식 (2)에 적용하는 것이 아니라, 가장 큰 SCR을 갖는 거리 빈의 위상 값을 위상 오차  $\widehat{\phi_e}$ 의 초기 추정치  $\widehat{\phi_{e_1}}$ 로 놓는다. 그리고 SCR이 큰 순서대로 정렬한 방위 수신 신호들에 식 (5)를 적용하여 거리 방향으로 반복적으로  $\sigma_{p+1}^2$  구하게 되며, 이를 가중치에 반영하여  $\widehat{\phi_e}$ 를 점진적으로 추정한다. 추정한다.  $p$ 를 한 번 증가시켜 구한  $\sigma_{p+1}^2$ 를 식 (2)에서  $\sigma_n^2$  자리에 치환하고,  $N$  대신  $p+1$ 까지 계산한 결과는  $\widehat{\phi_{e_{p+1}}}$ 이 되며,  $p$ 가 증가할수록 추정 오차의 분산이 작아게 되므로, 이를 최소화하는 관점에서  $\widehat{\phi_{e_{p+1}}}$ 는 최적 추정치가 된다고 언급하고 있다.

$$\sigma_{p+1}^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [\Phi_{sorted}(m, p+1) - \widehat{\phi_{e_p}}(m)]^2$$

where  $p = 1, 2, \dots, N-1$  (sorted range bins by SCR) (5)

## 2-2 수정된 가중치 최소자승법 자동초점 기법(MMLS-AF)

실제 SAR 원시데이터를 획득하여 영상을 형성한 결과에 WLS-AF를 적용해 본 결과, 식 (4)의  $R$ 을 이용해 SCR을 구하고, 이를 큰 순서대로 정렬한다고 했을 때, 많은 거리 빈에서  $R \geq 0$  이 아닌 복소수 값 형태로 나타나는 경우가 다수 발생하였다. 식 (4)에서  $R \geq 0$  인 실수가 되는 조건을 확인하기 위해  $c$ 와  $d$  사이의 관계를 분석해보면 다음과 같이 나타난다.

$$c^2 \leq d \leq (4/3)c^2 \quad (6)$$

$c^2 \leq d$ 은 수학적으로 언제나 만족하는 조건이나,  $d \leq (4/3)c^2$ 에 의해서  $R \geq 0$ 인 실수가 되는 경우는 매우 제한적인 조건을 만족하는 거리 빈만 선택 가능하다. 이로 인해 SCR을 계산할 수 있는 일부의 거리 빈만으로 WLS-AF에 의한 추정을 할 경우, 많은 거리 빈을 사용할수록 추정 오차의 분산이 작아진다는 식 (3)을 충족하지 못하게 되어 추정 정확도가 떨어지게 된다. 또한 SCR이 작은 경우를 위한 식 (5)번에서도 SCR 크기순으로 정렬이 잘 되어야만 최종 위상 오차 추정 정확도에 큰 영향을 미치게 되나, 기존 WLS-AF에서는 SCR이 클 경우에만 쓸 수 있는 식 (4) 외에 Low SCR 경우를 위한 표적 선정 및 정렬 방식을 전혀 언급하지 않고 있다. 우리는 SAR 영상에서 방위 신호의 진폭 정보로부터 WLS-AF에 유리한 거리 빈을 선택하고 정렬하여, 많은 거리 빈을 WLS-AF 기반의 위상 오차 추정에 사용하여 위상 오차의 분산을 최소화하는 최적 AF를 구현하기를 원한다.

### 2-2-1 제한 조건 없는 SCR 계산 기법의 적용

$n$ 번째 거리 빈 내의 강한 표적 신호와 클러터들 사이의 대비차(contrast)를 측정하는 방식으로 방위 푸리에 변환 도메인 신호를 이용하여 측정하는 방법이 적응형 빔형성 관점에서의 AF<sup>[6]</sup>와 QPGA(Quality PGA) 방식<sup>[7]</sup>에서 식 (7)과 같이 제안되었다.

$$Q_k = 1 - c^2/d$$

$$= \frac{\text{var}(A(m, n))}{\text{var}(A(m, n)) + c^2}$$

where  $\text{var}(A(m, n)) = d - c^2$  (7)

이 수식에서는 강한 표적 신호와 같은 거리 bin 내의 다른 클러스터 신호들 사이의 세기 차이가 클수록  $c^2$ 이  $d$ 에 가까워지며, 이로 인해  $Q_k$ 는 작아지게 되며, 이 값이 작을수록 SCR이 크다고 할 수 있기에 거리 bin의 SCR을 판단하는 또 다른 척도가 된다. 특히 식 (7)에서  $Q_k$ 는  $c^2 \leq d$ 라는 항상 만족하는 조건 하에 있으므로, 항상  $Q_k \geq 0$ 이 된다. 그러므로 모든 거리 bin에 대해서 대비차 차 계산 및 그에 의한 정렬이 가능하므로, 우리는 WLS의 SCR 계산식 대신  $Q_k$ 에 의한 거리 bin의 대비차 순으로 정렬하고, WLS-AF 기법 적용을 고려한다. 하지만  $Q_k$ 로부터  $\sigma_n^2$ 을 직접 계산하는 것은 불가능하므로, 점진적으로  $\widehat{\phi}_e(m)$ 를 계산하는 Low SCR을 위한 두 번째 방안에  $Q_k$ 를 적용하고  $1/Q_k$ 이 큰 순서로 정렬한 거리 bin을 적용하는 WLS-AF가 되도록 수정한다.

### 2-2-2 방위 표적 길이 차이에 의한 성능 편차 극복

오리지널 PGA에서는 전체 방위 길이에 대해서 방위 위상 오차 추정 후 보상하고, 그 길이를 일정 비율로 감소시키며 방위 해상도를 고려한 일정 길이로 줄여들 때까지 반복 적용(iteration) 하며 위상 오차를 반복 추정 및 보상한다. 이렇게 함으로써 거리 bin 내 클러스터의 영향을 지속적으로 줄여가면서 위상 오차 추정 정확도를 높여가는 접근법을 사용하게 되며 이는 오리지널 PGA의 핵심 기법 중 하나이다<sup>[3][4]</sup>. 하지만 방위 영상의 전체 길이를 시작 길이로 할 경우, 필요 이상으로 연산량이 크게 증가하며, 또 시작 길이를 너무 작게 할 경우, 방위 위상 오차를 정확하게 추정하지 못할 수 있다<sup>[8]</sup>. 이러한 고려 사항은 WLS-AF에서도 유효하나, 기존 WLS-AF에서는 방위 반복 위상 오차 추정 방식을 적용하지 않으므로, 초기 방위 표적 길이가 최종 방위 표적 길이가 된다. 즉, 방위 표적 길이 차이로 인해 위상 오차 추정 정확도가 달라질 수 있음을 의미하며, 방위 샘플 간격과 잔여 위상 오차의 영향 등을 고려하여 적절한 길이(샘플 수)를 결정하여야 한다. 이것은 시도 및 오차(trial and error) 접근법에 의해서 적절한 길이를 선정할 수도 있다. 우리는 실질적 활용 관점에서 견고한 성능을 항상 보장하고자, 방위 방향의 표적 길이를 일정 크기 이상에서 시작하고, 그 길이를 줄여가면

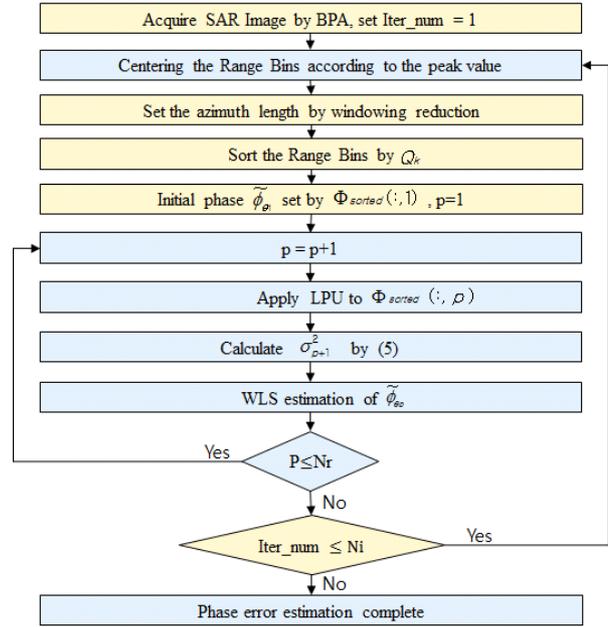


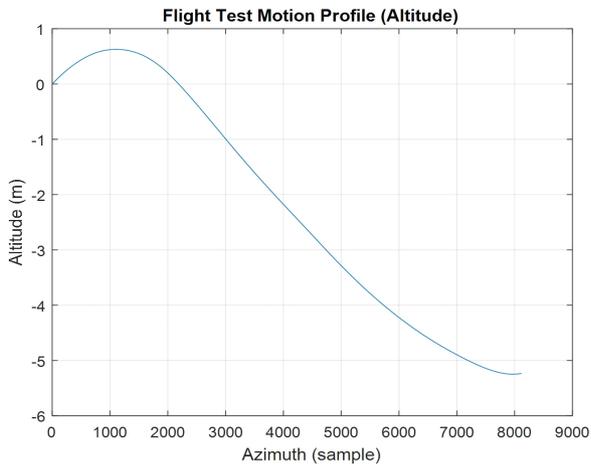
그림 1. MWLS-AF 블록 다이어그램

Fig. 1. MWLS-AF block diagram.

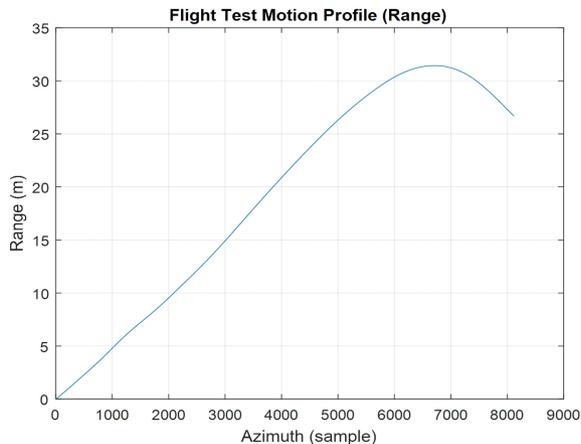
서 잔여 위상 오차를 추정해 가는 반복 적용 방식이 WLS-AF에서도 유효함을 입증한다. 이로 인해 연산량이 다소 증가하게 되나, 적절한 방위 표적 길이를 선정하지 못해서 생기는 성능 열화를 배제하게 된다. MWLS-AF에 대한 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다.  $N_r$ 은 사용한 거리 bin 수이며,  $N_i$ 은 방위 방향 반복 횟수를 나타낸다.

### III. 실험 결과 분석

제안한 방식의 유효성을 확인하고자 비행시험을 통해 획득한 SAR 원시데이터<sup>[9]</sup>에 적용하여 성능을 검증하기로 한다. 비행 고도는 약 3 km, 경사거리 16 km, 스캔트 각도는  $-17^\circ$ 에서 스포트라이트 모드로 서브미터급 해상도를 목표로 원시 데이터를 획득하였다. AF에 의한 성능 비교 분석 시에 영상 형성 알고리즘에 의한 오차 발생 영향을 최소화하기 위해, 역투영 알고리즘(Back-Projection Algorithm: BPA)에 의해서 거리 방위 각각  $1,000 \times 1,000$  샘플 크기를 갖는 영상을 형성하였고, 방위 방향으로 도플러 정렬함수를 적용하였다<sup>[10]</sup>. 그림 2에는 SAL(Synthetic Aperture Length) 동안 비행체가 경험한 요동의 특성을 거



(a) 고도 방향  
(a) Altitude direction



(b) 거리 방향  
(b) Range direction

그림 2. 비행체 요동 특성

Fig. 2. Motion characteristics of platform.

리, 방위 방향으로 분해하여 나타내었다. 보다 가혹한 조건에서 AF에 의한 개선 여부를 확인하고, 결과를 비교 분석하기 위해 그림 3의 위상 오차를 거리 방향으로 삽입하여, 실제 영상에 존재하는 위상 오차보다 훨씬 큰 위상 오차를 갖는 경우에 대해서 영상을 형성하여 AF를 적용하고, 개선 정도를 분석하기로 한다.

### 3-1 방위 표적 길이 차이에 의한 위상 추정 결과

$N_i=1$ 일 때, MWLS-AF에서 방위 표적 길이 차이에 의

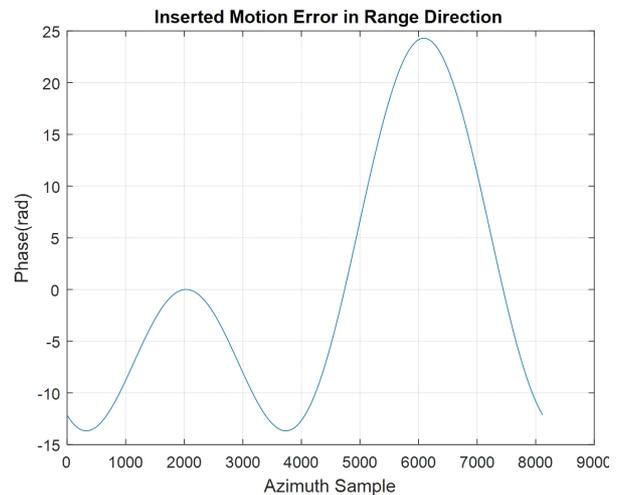


그림 3. 임의의 위상 오차 삽입

Fig. 3. Insertion of arbitrary phase error.

한 위상 추정 결과를 그림 4에 나타내었다. WLS-AF의 최적화 관점에 따라 오차의 분산을 최소화하기 위해 1,000개의 거리 bin을 모두 사용한 결과이다. 그림 5의 최종 방위 위상 오차 추정 결과 중에서, 그림 6의 추정 위상 오차를 보정한 영상 형성 결과 중 가장 우수한 결과를 보여준 (e) PGA와 (f) MWLS- $N_i=3$ 에 해당하는 위상 오차 추정 결과와 비교했을 때, 방위 표적 길이가 256일 때의 위상 오차 추정 결과가 추정 위상 오차의 형태 및

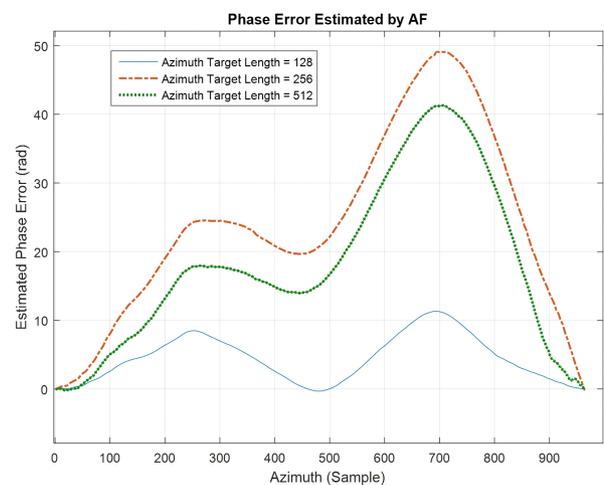


그림 4. 표적 길이 차이에 의한 위상 추정 결과

Fig. 4. Phase estimation by target length difference.

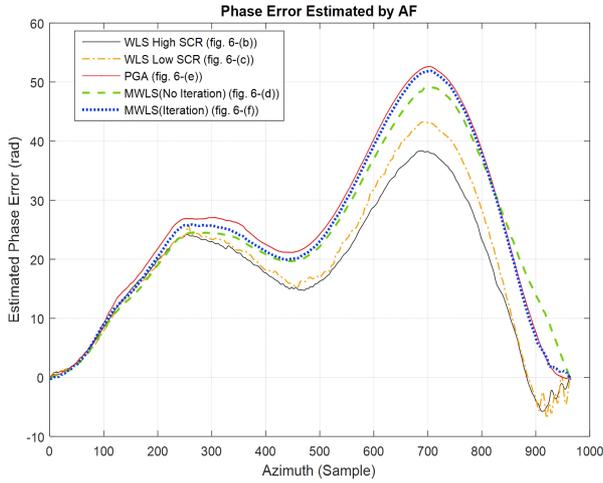


그림 5. 방위 위상 오차 추정 결과  
Fig. 5. Azimuth phase error estimation results.

크기에서 제일 유사하므로 상대적으로 가장 정확함을 확인할 수 있다. 방위 표적 길이가 너무 길 때에는 같은 거리 빈 내의 주변 클러터들의 영향이 커져서 위상 오차 추정 정확도가 저하되고 있으며, 반대로 너무 짧을 때에는 표적의 위상 오차가 나타나는 방위 길이를 충분히 포함하지 못하여, 위상 오차 추정 정확도가 크게 저하되고 있음을 알 수 있다.

### 3-2 MWLS-AF 적용 결과 성능 분석

최종적으로 제안하는 방위 방향 반복 적용 MWLS-AF의 성능을 검증하기 위해 기존 WLS-AF의 High SCR, Low SCR, PGA, 그리고 MWLS-AF에서  $N_i=1$ 과  $N_i=3$ 일 때의 위상 추정 정확도 및 추정된 위상 오차를 보정한 SAR 영상 형성 결과를 비교 분석하기로 한다. 기존 WLS-AF에서 제안한 SCR 계산 수식에 의해 유효한 거리 빈은 10개 뿐이므로, 이것만으로 High SCR, Low SCR을 위한 WLS-AF를 적용한다. WLS-AF와  $N_i=1$ 인 MWLS의 경우, 가장 좋은 위상 오차 추정 결과를 나타난 256개의 샘플을 방위 표적 길이로 사용하였다. PGA의 경우, 초기 방위 표적 길이로 충분히 큰 512 샘플로 선정하고, 50 %씩 샘플 수를 감소시키며 적용하였으며, 거리 빈은 1,000개를 모두 사용하였다.

$N_i=3$ 인 MWLS에서도 PGA와 동일하게 초기 방위 표적

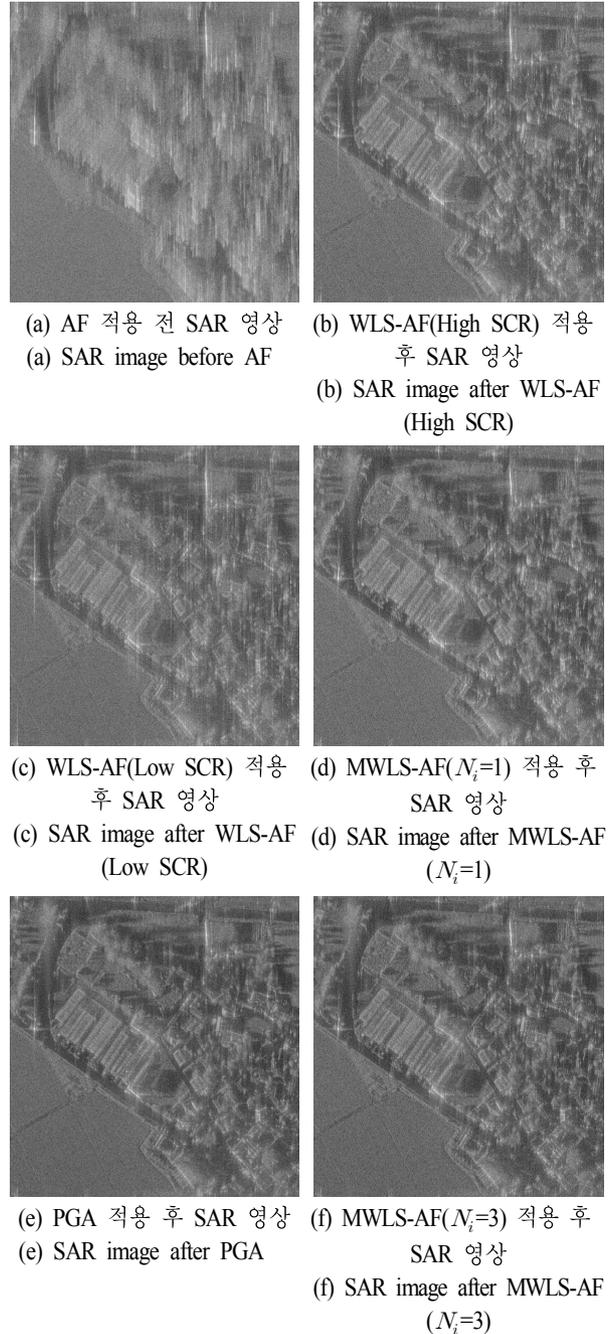


그림 6. SAR 영상형성 결과  
Fig. 6. SAR image formation results.

길이 512, 거리 빈 1,000개, 50 %씩 샘플 수를 감소시키며 반복 적용하였다. 그로 인한 위상 오차 추정 결과와 추정된 위상 오차로 보정한 영상 형성 결과를 그림 5 및 그

림 6에 각각 나타내었다. 그림 5에서 WLS-AF의 경우, High SCR와 Low SCR에 의한 위상 추정 결과가 PGA, MWLS-AF의 경우와 형태 및 크기 면에서 상당한 차이가 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 그리고 Low SCR일 때의 추정 결과가 High SCR일 때의  $\sigma_n^2$ 를 직접 계산한 결과보다 더 정확함을 알 수 있다. 이는 주어진 영상에서  $R \geq 0$ 을 만족하는 거리 빈이 오직 10개뿐인 SCR이 작은 경우라 오차가 크게 증가하여 정확도가 떨어진 것으로 보인다. 그림 6의 SAR 영상에서 보면, 10개의 거리 빈에 의한 결과라고 했을 때, 크게 개선이 된 결과라고 볼 수도 있으나, 사용 가능한 거리 빈의 수가 작기에 마치 역필터(inverse filtering) 방식<sup>[3]</sup>처럼 개선이 이루어졌다고 할 수 있다. 이럴 경우 이상적인 점표적에 근접한 거리 빈이 존재했다면 상당한 성능 개선을 기대할 수 있으므로, 어느 정도 개선된 결과가 나타났다고 분석할 수 있으나, 실제 환경에서는 이러한 조건을 항상 만족한다고 볼 수 없는 것이 타당하다.

$N_r=1$ 인 MWLS에서도  $Q_k$ 에 의해 모든 거리 빈 정렬이 가능하므로 기존 방식보다는 성능 개선이 크게 되었음을 그림 5 및 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 하지만 위상 오차 추정 결과뿐 아니라, SAR 영상에서 해상도 및 방위 ISLR(Integrated Side-Lobe Ratio) 성능 등이 열화되어 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 마지막으로 그림 6에서 위상 오차 보상 후 영상의 성능 개선 정도가 가장 우수하고 유사한 (e)와 (f)에 적용한 방위 위상 오차 추정 결과를 그림 5에서 서로 비교해 보면 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 기존 WLS-AF의 제안 목표 및 결과가 PGA보다 나은 성능을 보인다는 것이었으나, 실제 SAR 영상에 적용해 보았을 때, 본 논문에서 제안한 방위 반복 적용 MWLS-AF를 적용하여 성능을 안정적으로 크게 개선한 결과와 비교하더라도, PGA 적용 결과보다 반드시 더 좋다고 할 수는 없었다. 이는 SAR 영상의 표적 지역 특성에 따라 일부 작은 성능 차이를 보이는 것일 뿐, PGA와 WLS 기반 AF 사이 어느 방식이 항상 우수하다고 결론 내리기 어렵다고 할 수 있다. 하지만 제안한 방식은 기존 WLS-AF와 비교 시 성능 개선 편차가 발생하지 않는 안정적인 개선이 가능하다는 점에서 확실히 우수하다고 할 수 있다.

#### IV. 결 론

항공기 탑재 SAR의 경우, 요동에 의한 영향을 받게 되며, 항법 장비 위치 측정 정확도의 한계 및 SAR 시스템 내부 지연 오차 등으로 방위 위상 오차가 필연적으로 발생하며 이를 추정하여, 보상하는 AF의 적용은 반드시 고려되어야 한다. 본 논문에서는 기존 WLS 기반 AF를 실제 SAR 영상에 적용했을 때의 성능 저하 원인을 설명하고, 이를 극복하기 위한 수정된 가중치 최소 자승기법(MWLS)에 의한 자동 초점 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 새로운 방식의 표적 선정 및 정렬과 방위 방향 반복 위상 추정 방식을 결합하여 기존 WLS-AF 보다 견고한 성능을 보이게 된다. 비행 시험을 통해 획득한 SAR 원시데이터에 제안한 방식을 적용한 결과, 기존 방식 뿐 아니라 PGA 적용 결과와 성능을 비교 분석하여 제안한 방식의 유효함과 우수성을 입증하였다.

#### References

- [1] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar, A Signal Processing Algorithms*, Artech House, Jul. 1995.
- [2] T. J. Kim, J. R. Fellerhoff, and S. M. Kohler, "An integrated navigation system using GPS carrier phase for real-time airborne synthetic aperture radar(SAR)", *Navigation*, vol. 48, no. 1, pp. 13-24, Mar. 2001.
- [3] C. V. J. Jakowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A. Thompson, *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach*, Springer Science & Business Media, 1996.
- [4] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz, "Phase gradient autofocus- A robust tool for high resolution sar phase correction", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, Jul. 1994.
- [5] W. Ye, T. S. Yeo, and Zheng Bao, "Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2487-2494, Sep. 1999.

- [6] E. Yadin, "SAR autofocusing viewed as adaptive beam-forming on prominent scatterers", in *Proceedings of 1994 IEEE National Radar Conference*, Atlanta, GA, USA, pp. 138-143, Mar. 1994.
- [7] H. L. Chan, T. S. Yeo, "Non-iterative quality phase-gradient autofocus(QPGA) algorithm for spotlight SAR imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36. no. 5, pp. 1531-1539, Sep. 1998.
- [8] 윤상호, 고보연, 공영균, 신희섭, "Stripmap SAR 신호 처리를 PGA 적용 기법", 대한원격탐사학회논문지, 27(2), pp. 151-161, 2011년 4월.
- [9] 신현익, 권경일, 윤상호, 김형석, 황정훈, 고영창 외, "실시간 영상형성 및 원시데이터 획득용 SAR 테스트 베드", 한국군사과학기술학회지, 20(2), pp. 181-186, 2017년 4월.
- [10] 황정훈, 김환우, "스캔트 모드 SAR 영상 형성을 위한 역투영 알고리즘에서의 자동초점 기법 적용 연구", 대한전자공학회 논문지, 54(7), pp. 81-89, 2017년 7월.

### 황 정 훈



2003년 2월: 한양대학교 전자전기컴퓨터 공학부 (공학사)  
 2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학석사)  
 2005년~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
 2015년~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 체계 설계

### 김 환 우



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1979년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학석사)  
 1988년 6월: University of Utah 전자공학과 (공학박사)  
 1980년~현재: 충남대학교 전자공학과 정교수

[주 관심분야] 레이더/SAR 신호처리, 디지털 통신 및 신호처리

### 신 현 익



1986년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1988년~현재: 국방과학연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더/SAR/GMTI 체계설계/신호처리