

# Particle Swarm Optimization를 이용한 다중편파보정 성능향상 연구

## Study on Improved Performance of Polarimetric Calibration Using Particle Swarm Optimization

최인오 · 정성재\* · 박상홍\*\* · 신재민\*\*\* · 양도철\*\*\*\* · 김경태

In-Oh Choi · Seong-Jae Jung\* · Sang-Hong Park\*\* · Jae-Min Shin\*\*\* · Do-Chul Yang\*\*\*\* · Kyung-Tae Kim

### 요 약

최근 저궤도관측위성의 개발에 의하여 다중편파 SAR(synthetic aperture radar) 영상의 활용성이 매우 증대되고 있다. 하지만, 다중편파 신호들이 송, 수신되는 과정에서 다중편파 채널간의 불균일성 및 이 신호들 간의 간섭으로 인해 다중편파 신호 내에 왜곡이 불가피하게 발생하며, 이는 다중편파 SAR 영상의 품질을 급격히 저하시킨다. 이를 해결하기 위해 다양한 다중편파 산란행렬을 제공할 수 있는 PARC(polarimetric active radar calibrator) 기반의 다중편파 왜곡변수 추정 기법들이 개발되어 왔다. 하지만, 실제 환경에서는 PARC의 성능 오차가 항상 존재하기 때문에 이에 따른 채널 불균형(channel imbalance: CI) 왜곡변수 추정 오차 또한 함께 존재한다. 따라서 본 논문에서는 PARC의 성능 오차로 발생하는 부정확한 CI 왜곡변수 추정을 보상하기 위하여, 먼저 3대의 PARC들을 기반한 기존 다중편파 보정기법을 활용하여 다중편파 왜곡변수들을 1차적으로 추정한 후, CI 왜곡변수들에 대한 particle swarm optimization 기반의 2차 정밀 추정을 수행하는 새로운 다중편파 보정 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘 및 다중편파 SAR 영상들을 활용한 시뮬레이션 결과, 기존 보정 기법들과 비교하여 보다 향상된 정확도로 다중편파 SAR 영상의 보정을 성공적으로 수행할 수 있었다.

### Abstract

With the development of state-of-the-art low earth orbit observation satellites, polarimetric synthetic aperture radar(SAR) images have been widely utilized. However, polarimetric signals are inevitably distorted by channel imbalance(CI) and interference between multiple channels, resulting in rapidly degraded quality of polarimetric SAR images. Therefore, several polarimetric calibration methods using a polarimetric active radar calibrator(PARC), which can provide different scattering matrices, have been developed. Nevertheless, errors generated by the performance of imperfect PARCs are inevitable, leading to significant errors of estimated CIs. In this study, we propose a framework for calibrating polarimetric SAR images, which consists of two stages: 1) coarse estimation of distortion parameters through a conventional method using three PARCs, and 2) fine estimation of CIs using particle swarm optimization and a single PARC. In simulations using polarimetric SAR images, we observed that our proposed method can more accurately calibrate polarimetric SAR images as compared to conventional methods.

Key words: Polarimetric Calibration, Polarimetric Active Radar Calibrator, Synthetic Aperture Radar, Coner Reflector, Power Ratio

포항공과대학교 전자전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

\*삼성 네트워크사업부 (Department of Network Business, Samsung)

\*\*부경대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pukyong National University)

\*\*\*한국항공우주연구원 위성연구본부(Satellite R&D Head Office, Korea Aerospace Research Institute)

\*\*\*\*한국항공우주연구원 위성정보센터(Satellite Operation & Application Center, Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received June 13, 2019 ; Revised August 27, 2019 ; Accepted August 27, 2019. (ID No. 20190613-059)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

## I. 서 론

최신의 저궤도관측위성(LEO Observation Satellite)은 다양한 운용모드들을 통해 고품질의 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상들을 생성한다. 그리고 이러한 모드들의 성공적인 운용을 위해서는, SAR 영상의 그림 1과 같은 보정 절차가 반드시 필요하다<sup>[1]</sup>. 이때, 다중편파 보정(polarimetric calibration) 단계는 송, 수신과정에서 다채널 간의 불균일성(i.e. channel imbalance)과 HH(horizontal-to-horizontal), HV(horizontal-to-vertical), VH(vertical-to-horizontal) 및 VV(vertical-to-vertical) 신호들 간의 간섭(i.e. cross-talk)으로 인한 왜곡을 보상해 주는 단계이며, 최종 radiometric calibration 단계를 위해 반드시 수행되어야 한다.

다중편파 SAR 영상 보정은 일반적으로 크게 세 가지 접근방식으로 수행되어 왔다<sup>[2]~[6]</sup>. 먼저, 첫 번째 방식은 송, 수신 과정에서 발생하는 왜곡변수들의 12가지 값들을 자명한 해로 추정하기 위해, 근사된 방정식들을 사용하는 해석적 방법(analytic method)이다<sup>[2],[3]</sup>. 이 방식을 위해서는 넓은 들판이나 잔잔한 강과 같은 분산형 표적(distributed target)과 polarimetric active radar calibrator(PARC)<sup>[4]</sup>를 반드시 필요로 한다. 여기서 분산형 표적의 경우, HV와 VH 신호가 같아야 하는 조건(i.e. reciprocity theorem<sup>[3]</sup>)과 HH 및 VV 신호들과 HV 및 VH 신호들 간의 상관관계가 매우 작아야 하는 조건(i.e. azimuth symmetry<sup>[3]</sup>)이 반드시 필수적이며, 이 조건을 바탕으로 근사된 공분산 방정식을 사용하기 때문에 왜곡변수 추정에서 오차가 항상 존재하는 문제점이 있었다. 반면에 두 번째 방식으로써, 분산형 표적이 없이 오직 3대의 PARC들만 사용하여 왜곡변수를 추정하기 위한 해석적 방법<sup>[4],[5]</sup>이 있다. 이는 첫 번째 방법과 달리 근사된 수식들을 사용하지 않는 장점이 있지만, PARC의 성능 오차에 의해 왜곡변수 추정 성능이 급격히 저하될 수 있다. 마지막으로, 세 번째 방식인 수치해석적 방법(numerical method)기반의 왜곡변수 추정 연구가 있다<sup>[6]</sup>. 하지만, 수치 해석적 방법들 또한 여전히 분산형 표적을 사용하고, 다차원 최적화 알고리즘의 사용으로 인해 왜곡변수 추정의 안정성 문제가 항상 존재한다. 따라서 보다 정확한 다중편파 SAR 영상 보정을 위해서는 근사적인 방식이 아니면서, 왜곡변수 추정에 대한 안정성

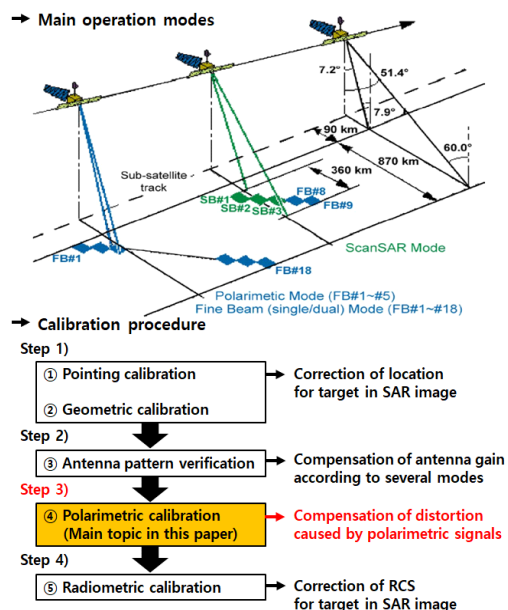


그림 1. SAR 위성의 보정절차<sup>[1]</sup>

Fig. 1. Calibration procedure of satellite for SAR<sup>[1]</sup>.

을 가지는 보정기법 개발이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 기존 보정 기법들에 대한 문제점들을 심층적으로 분석한 후, 3대의 PARC들만을 사용한 1차 왜곡변수 추정단계와 단일 PARC 및 particle swarm optimization(PSO)<sup>[7]</sup> 알고리즘을 사용한 2차 왜곡변수 추정단계로 구성된 새로운 다중편파 SAR 영상 보정 알고리즘을 제안한다. 특히, 제안된 기법은 기존의 해석적 방식<sup>[4]</sup>에서 PARC의 성능 오차로 발생하는 특정 2 가지 왜곡변수들에 대한 추정 오차를 보상하기 위하여, PSO 알고리즘 내에 2 가지 비용함수를 독립적으로 사용하였다. 다중편파 SAR 영상들을 사용한 시뮬레이션 결과, 제안된 기법을 통해 기존 해석적 방식과 비교하여 보다 정확하고 안정적으로 다중편파 SAR 영상 보정을 수행할 수 있었다.

## II. 신호 모델링 및 문제점 분석

### 2-1 다중편파 신호 모델링

먼저 다중편파 신호 모델링을 위하여 저궤도관측위성이 총 4 가지의 다중편파 신호 HH, HV, VH 및 VV를 성공적으로 수신하였다고 가정한다. 또한 각 신호들이 X

밴드 대역의 특성으로 인해 전리층(ionosphere)의 영향을 크게 받지 않음을 가정할 경우<sup>[3]</sup>, 다중편파와 신호의 산란 행렬은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HV} \\ M_{VH} & M_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_{1r} \\ \delta_{2r} & f_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta_{1t} \\ \delta_{2t} & f_t \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서  $S_{HH}$ ,  $S_{HV}$ ,  $S_{VH}$  및  $S_{VV}$ 는 왜곡이 없는 다중편파와 산란 값들,  $M_{HH}$ ,  $M_{HV}$ ,  $M_{VH}$  및  $M_{VV}$ 는 왜곡된 다중편파와 신호 값들,  $f_t$ ,  $\delta_{1t}$  및  $\delta_{2t}$ 는 송신 과정에서의 왜곡변수들, 그리고  $f_r$ ,  $\delta_{1r}$  및  $\delta_{2r}$ 는 수신 과정에서의 왜곡변수들이다. 이때,  $f_t$ 와  $f_r$ 는 channel imbalance,  $\delta_{1t}$ ,  $\delta_{2t}$ ,  $\delta_{1r}$  및  $\delta_{2r}$ 는 cross-talk으로 각각 정의된다<sup>[3],[6]</sup>. 따라서 다중편파 보정의 수행은 측정된 다중편파와 신호 값,  $M_{HH}$ ,  $M_{HV}$ ,  $M_{VH}$  및  $M_{VV}$ 를 사용하여, 식 (1)의 왜곡변수들에 대한 크기와 위상을 모두 포함하여 총 12 가지 값들을 추정하는 문제로 귀결된다.

## 2.2 다중편파 보정을 위한 기존 방법들의 문제점

본 절에서는 앞서 서술한 다중편파와 신호 모델링으로부터 왜곡변수들의 12가지 값들을 추정하기 위한 기존 방법들<sup>[3],[6]</sup>의 간략한 소개와 문제점들을 분석한다.

먼저 분산형 표적과 1대의 PARC를 사용하는 기존 해석적 방법<sup>[3]</sup>을 위해서는, 다음과 같은 2가지 필수 조건을 가지는 분산형 표적이 반드시 필요하다.

$$S_{HV} = S_{VH}, \quad (2)$$

$$S_{ii}S_{ij}^* = 0, \text{ if } i \neq j \quad (3)$$

여기서 \*는 복소공액 연산자,  $i$ 와  $j$ 는 H 또는 V를 의미한다. 일반적으로 식 (2)와 식 (3)은 각각 reciprocity theorem 및 azimuth symmetry로 정의된다<sup>[3]</sup>. 이 가정들이 필요한 이유는 식 (1)의 좌변에 대한 공분산 값들  $C_{ij}$ ,  $i=1, 2, \dots, 4$ ,  $j=1, 2, \dots, 4$ 를 근사적으로 다음과 같은 수식들로 표현하기 위해서이다.

$$\begin{aligned} C_{11} &\approx |\alpha|^2, \\ C_{21} &\approx |\alpha|^2 u O_{11} + \alpha^* v O_{13} + \alpha(v^* + \alpha^* w^*) O_{22}, \\ C_{31} &\approx |\alpha|^2 z O_{11} + \alpha^* w O_{13} + (v^* + \alpha^* w^*) O_{22}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{41} &\approx \alpha^* O_{13}^*, \\ C_{22} &\approx |\alpha|^2 |u|^2 O_{11} + \alpha^* u^* v O_{13}^* + \alpha u v^* O_{13} + |\alpha|^2 O_{22} + |v|^2 O_{33}, \\ C_{32} &\approx |\alpha|^2 u^* z O_{11} + \alpha^* u^* w O_{13}^* + \alpha z v^* O_{13} + |\alpha|^2 O_{22} + |v|^2 O_{33}, \\ C_{42} &\approx \alpha^* u^* O_{13}^* + v^* O_{33} + \alpha^* (u + \alpha z) O_{22}, \\ C_{33} &\approx |\alpha|^2 |z|^2 O_{11} + \alpha^* z^* w O_{13}^* + \alpha z w^* O_{13} + O_{22} + |w|^2 O_{33}, \\ C_{43} &\approx \alpha^* z^* O_{13}^* + w^* O_{33} + (u + \alpha z) O_{22}, \\ C_{44} &\approx O_{33}, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $u = \delta_{2r}/f_r$ ,  $v = \delta_{2t}$ ,  $z = \delta_{1t}/f_t$ ,  $w = \delta_{1r}$ ,  $\alpha = f_t/f_r$  및  $k = f_r$ , 그리고  $O_{ij}$ ,  $i=1, 2, \dots, 3$ ,  $j=1, 2, \dots, 3$ 은 식 (1)의 우변에 다중편파와 산란값들과 왜곡변수  $k$ 에 의해 정의되는 3×3 공분산 행렬에 대한 각각의 공분산 값들이다(Ref. [3] 참조). 따라서 분산형 표적에 대한 공분산 값들을 측정값들로부터 계산할 수 있을 경우, 식 (4)의 근사식들에 대한 선형관계식을 통해 다음과 같이 다중편파와 왜곡변수들을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{u} &= (C_{44}C_{21} - C_{41}C_{24})/(C_{11}C_{44} - C_{14}C_{41}), \\ \hat{v} &= (C_{11}C_{24} - C_{21}C_{14})/(C_{11}C_{44} - C_{14}C_{41}), \\ \hat{z} &= (C_{44}C_{31} - C_{41}C_{34})/(C_{11}C_{44} - C_{14}C_{41}), \\ \hat{w} &= (C_{11}C_{34} - C_{31}C_{14})/(C_{11}C_{44} - C_{14}C_{41}), \\ \hat{k} &= O_{13}/(S_{HH}S_{HV}^*), \\ \hat{\alpha} &= \frac{|\alpha_1\alpha_2| - 1 + \sqrt{(|\alpha_1\alpha_2| - 1)^2 + 4|\alpha_2|^2}}{2|\alpha_2|}, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_1 &= (C_{22} - \hat{u}C_{12} - \hat{v}C_{42})/(C_{32} - \hat{z}C_{12} - \hat{w}C_{42}), \\ \hat{\alpha}_2 &= (C_{32} - \hat{z}C_{12} - \hat{w}C_{42})^*/(C_{33} - \hat{z}^*C_{31} - \hat{w}^*C_{34}). \end{aligned}$$

지금까지 분산형 표적과 단일 PARC를 사용하여 왜곡변수들의 총 12 가지 값들을 추정하는 해석적 방법<sup>[3]</sup>을 소개하였다. 그러나 이 기법은 분산형 표적이 항상 식 (2) 및 식 (3)의 가정을 만족해야 하는 문제점을 가지고 있다.

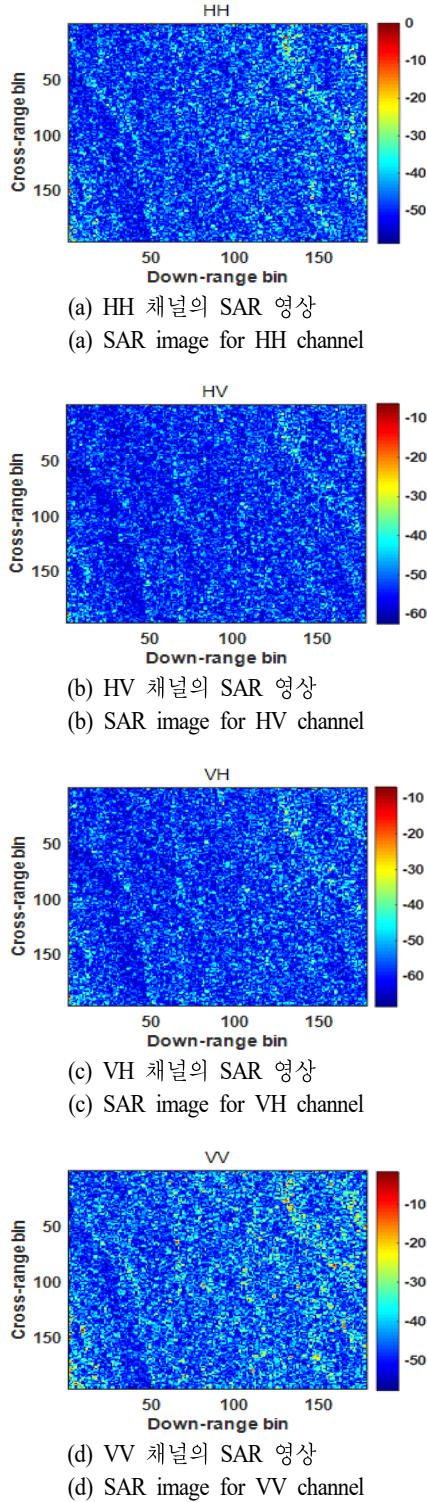


그림 2. Radarsat-2 위성의 실제 다중편파 SAR 영상들  
Fig. 2. Polarimetric SAR images using Radarsat-2.

예를 들어, 그림 2와 같이 실제 분산형 표적으로부터 측정된 그리고 다중편파 왜곡이 보상된 Radarsat-2 위성의 다중편파 SAR 영상들에서 HV와 VH의 SAR 영상들이 서로 같지가 않음을 확인할 수 있었다(i.e. 식 (2)의 reciprocity theorem 가정과 다름). 게다가, HH와 HV 채널에 대한 SAR 영상들 간의 공분산 값이  $S_{HH}S_{HV}^* = -34.1393$  dB로 나타났다(i.e. 식 (3)의 azimuth symmetry 가정과 다름). 따라서 이 가정들을 만족하지 못하기 때문에, Radarsat-2의 다중편파 SAR 영상들에 대한 공분산은 더 이상 식 (4)와 같이 이상적으로 정의될 수가 없다. 게다가, 기존 해석적 방법<sup>[3]</sup>은 식 (4)를 유도하기 위하여 고차항에 대한 성분들을 근사적으로 제거하여 수식들을 정의하였다. 이때, 식 (4)에  $C_{42}$ 의 경우, 근사화로 인해 근사 전의 수식과 비교하여 오차가 실제로 크게 나타났으며(그림 3 참조), 이로 인해 왜곡변수  $\hat{\alpha}$ 의 추정에 대한 정확성이 떨어지는 문제점이 발생하였다. 마찬가지로 최근 개발된 수치 해석적 방법 기반의 기존 알고리즘<sup>[6]</sup>들 또한 식 (2)와 식 (3)의 가정을 반드시 만족해야 하는 분산형 표적을 사용하여 보정을 수행하기 때문에, 왜곡변수에 대한 추정오차가 항상 존재한다.

반면에 오직 PARC만을 사용하는 기존 방법<sup>[4]</sup>은 다음과 같은 다중편파 산란 값들을 가지는 3대의 PARC들을 반드시 필요로 한다.

$$\begin{bmatrix} S_{1,HH} & S_{1,HV} \\ S_{1,VH} & S_{1,VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon \\ \epsilon & \epsilon^2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

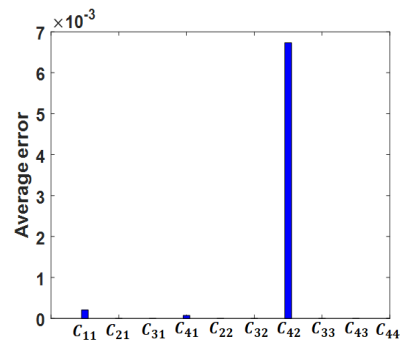


그림 3. 기존의 공분산과 근사된 공분산 간의 평균 오차  
Fig. 3. Average error between original covariance and approximated covariance.

$$\begin{bmatrix} S_{2,HH} & S_{2,HV} \\ S_{2,VH} & S_{2,VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon^2 & \epsilon \\ \epsilon & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} S_{3,HH} & S_{3,HV} \\ S_{3,VH} & S_{3,VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1+\epsilon \\ 1+\epsilon & 1+\epsilon^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

여기서  $\epsilon$ 는 PARC의 성능오차 변수이다<sup>[4],[5]</sup>. 만약 PARC의 성능이 매우 정확할 경우 (i.e.  $\epsilon = 0$ ), 식 (6)~식 (8)의 값들을 식 (1)에 각각 대입하여 다음과 같이 왜곡변수들을 자명하게 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{f}_t &= \frac{M_{2,VV} (M_{1,HH}M_{3,VH} - M_{1,VH}M_{3,HH})}{M_{1,HH} (M_{2,VV}M_{3,HH} - M_{2,HV}M_{3,VH})}, \\ \hat{\delta}_{2t} &= \frac{M_{2,HV}}{M_{2,VV}} \hat{f}_t, \\ \hat{\delta}_{1t} &= \frac{M_{3,VH}}{M_{3,HH}} (\hat{\delta}_{2t} + 1) - \hat{f}_t, \\ \hat{f}_r &= \frac{M_{2,VV} (M_{1,HH}M_{3,HV} - M_{1,HV}M_{3,HH})}{M_{1,HH} (M_{2,VV}M_{3,HH} - M_{2,VH}M_{3,HV})}, \\ \hat{f}_r &= \frac{M_{2,VV} (M_{1,HH}M_{3,HV} - M_{1,HV}M_{3,HH})}{M_{1,HH} (M_{2,VV}M_{3,HH} - M_{2,VH}M_{3,HV})}, \\ \hat{\delta}_{1r} &= \frac{M_{2,VH}}{M_{2,VV}} \hat{f}_r, \\ \hat{\delta}_{2r} &= \frac{M_{3,HV}}{M_{3,HH}} (\hat{\delta}_{1r} + 1) - \hat{f}_r, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $M_{k,HH}$ ,  $M_{k,HV}$ ,  $M_{k,VH}$  및  $M_{k,VV}$ 는 앞서 언급한 3대의 PARC들 중  $k$ 번째 PARC에 대한 왜곡된 다중편파 신호 값들이다<sup>[4]</sup>. 특히, 식 (9)는 더이상 근사된 수식들을 사용하지 않기 때문에 분산형 표적을 사용하는 방법<sup>[3]</sup>보다 비교적 정확한 왜곡변수 추정이 가능하지만, PARC의 성능 오차 변수  $\epsilon$ 에 의해 channel imbalance의 크기 값에 대한 오차가 급격히 증가하는 문제가 있다. 예를 들어, 그림 4와 같이 점산란원 기반의 PARC에 대한 다중편파 SAR 영상들을 사용한 기존 보정 기법<sup>[4]</sup>의 경우, 그림 5와 같이 PARC의 성능오차  $\epsilon$ 에 따라  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 추정오차가 상대적으로 급격히 증가함을 확인할 수 있었다. 특히, 저궤도관측위성이 실제로 특정 지역에 배치된 PARC

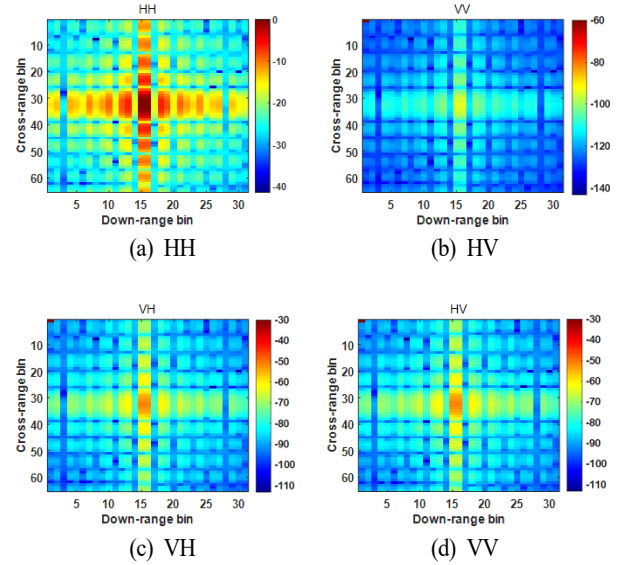


그림 4. 식 (6)의 PARC에 대한 다중편파 SAR 영상들  
Fig. 4. Polarimetric SAR images for PARC of eq. (6).

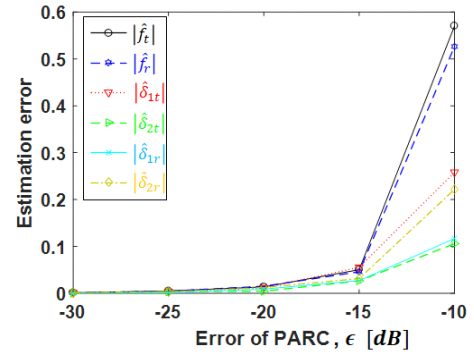


그림 5. PARC의 성능 오차에 따른 왜곡변수 추정 오차  
Fig. 5. Estimation error of parameters for various errors of PARC.

들을 사용하여 다중편파 보정을 수행할 때, 불가피한 위성의 움직임과 H와 V의 두 채널만을 사용하는 다중편파 모드 때문에 PARC에 대한 이상적인 다중편파 산란행렬을 획득하는 것은 매우 힘든 일이다. 따라서 이러한 PARC의 성능오차 문제를 보상하기 위한 새로운 다중편파 보정 알고리즘이 반드시 필요하다.

### III. 제안된 기법

본 절에서는 앞서 언급된 3대의 PARC들만을 사용하는 1차 왜곡변수 추정 이후, 단일 PARC 및 particle swarm optimization (PSO)<sup>[7]</sup>를 사용한  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 2차 왜곡변수 추정단계를 추가적으로 수행하는 다중편파 SAR 영상 보정 알고리즘을 제안한다.

먼저 1차 왜곡변수 추정을 위한 3대의 PARC들 외에 2차 왜곡변수 추정단계를 위해 추가된 단일 PARC의 다중편파에 대한 산란 값들은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{4,HH} & S_{4,HV} \\ S_{4,VH} & S_{4,VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon & 1 \\ 1 + \epsilon^2 & \epsilon \end{bmatrix}. \quad (10)$$

만약  $\epsilon = 0$  및  $\delta_{1r} = \delta_{2r} = \delta_{1t} = \delta_{2t} = 0$ 의 경우에서 식 (10)을 식 (1)에 대입할 때,  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 는 직관적으로 다중편파 신호값  $M_{4,HV}$ 와  $M_{4,VH}$ 를 각각 독립적으로 왜곡시킴을 알 수 있다. 이를 바탕으로 PSO를 통한  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 정밀 추정을 위해 다음과 같은 2개의 비용함수를 각각 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{cost}_1 &= \left| 1 - \left| \hat{S}_{4,HV} \right| \right| + \left| 1 - \frac{\left| \hat{S}_{4,VH} \right|}{\left| \hat{S}_{4,HV} \right|} \right|, \\ \text{cost}_2 &= \left| 1 - \left| \hat{S}_{4,VH} \right| \right| + \left| 1 - \frac{\left| \hat{S}_{4,VH} \right|}{\left| \hat{S}_{4,HV} \right|} \right|, \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $\hat{S}_{4,HV}$  및  $\hat{S}_{4,VH}$ 는 1차 왜곡변수 추정과정에서 추정된 왜곡변수들의 10 가지 값들과 2차 왜곡변수 추정을 위한  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 임의의 2가지 값들로 구성된 왜곡행렬들을 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{S}_{4,HH} & \hat{S}_{4,HV} \\ \hat{S}_{4,VH} & \hat{S}_{4,VV} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \hat{\delta}_{1r} \\ \hat{\delta}_{2r} & \hat{f}_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_{4,HH} & M_{4,HV} \\ M_{4,VH} & M_{4,VV} \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} 1 & \hat{\delta}_{1t} \\ \hat{\delta}_{2t} & \hat{f}_t \end{bmatrix}^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

만약  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 가 최적의 해로 추정될 경우, 식 (11)의 비용함수들은 0에 가까운 값을 가지게 된다. 따라서 2개의 비용함수들이 최소화되는 방향으로 다음과 같이  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 최적화를 수행한다<sup>[7]</sup>.

$$\vec{p}(i) = w\vec{p}(i) + c_1(\vec{p}_{pb} - \vec{p}(i)) + c_2(\vec{p}_{pg} - \vec{p}(i)), \quad (13)$$

여기서  $\vec{p}(i)$ 는  $i$ 번째 particle에 해당하는  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 으로 구성된  $1 \times 2$  벡터이며,  $\vec{p}_{pb}$ 는 개별 particle들 중 최적의 벡터 값,  $\vec{p}_{pg}$ 는 전체 particle들 중 최적의 벡터 값,  $w$ 는 가중치, 그리고  $c_1$  및  $c_2$ 는 수렴 계수이다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

먼저 식 (6)~식 (8) 및 (10)의 PARC 표적들을 사용한 제안된 다중편파 보정 기법의 성능 검증을 위하여, 그림 4와 같은 점산란원 기반의 PARC에 대한 다중편파 SAR 영상들을 사용하였다. 이때, PARC의 성능 오차는  $-30$  dB으로 정의하였으며, 식 (1)의 왜곡변수 값들 중 channel imbalance의 크기 값은  $0.9 \leq |f_r|, |f_t| \leq 1.1$ , channel imbalance의 위상 값은  $-5^\circ \leq \angle f_r, \angle f_t \leq 5^\circ$ , cross talk의 크기 값은  $-30 \text{ dB} \leq |\delta_{1r}|, |\delta_{1t}|, |\delta_{2r}|, |\delta_{2t}| \leq -10 \text{ dB}$ , 그리고 cross talk의 위상 값은  $0^\circ \leq \angle \delta_{1r}, \angle \delta_{1t}, \angle \delta_{2r}, \angle \delta_{2t} \leq 90^\circ$ 의 범위 내에서 50번의 몬테 카를로 시뮬레이션마다 임의의 값들로 설정하였다<sup>[1]~[3]</sup>. PSO 알고리즘과 관련된 세부 변수들은 표 1과 같다.

제안된 기법과의 성능 비교를 위한 기준 방법들<sup>[3],[4]</sup>의 다중편파 보정은 그림 2의 분산형 표적에 대한 실제 다중편파 SAR 영상들과 점산란원 기반의 PARC에 대한 다중편파 SAR 영상들을 통해 수행되었으며, 이외의 왜곡변수 및 보정과 관련된 실험변수는 앞서 언급된 제안된 기법의 경우와 동일하게 선택되었다.

잡음에 대한 제안된 기법의 안정성을 분석하기 위하여 백색 가우시안 잡음을 SNR(signal-to-noise ratio) =  $-30, -25, \dots, 0$  dB에 따라 추가하였다. 참고문헌 [3]과 참고문헌 [4]의 기존 기법들과 제안된 기법을 각각 사용한 시뮬

표 1. PSO 알고리즘 관련 변수들

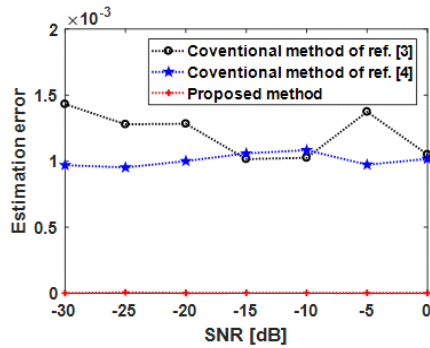
Table 1. Simulation parameters for PSO algorithm.

Population	10,000
Iteration	10
Inertia weight $w$	0.5
Acceleration coefficient $c_1, c_2$	2.0

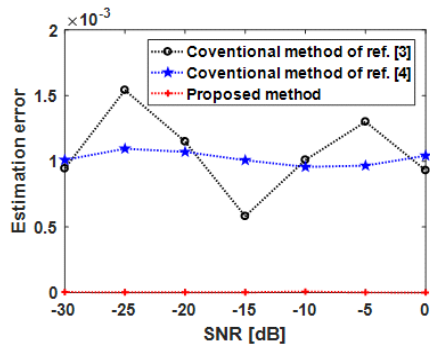


레이션 결과,  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 추정 결과가 그림 6과 같이 나타났다. 특히, PSO 알고리즘을 사용하는 제안된 기법에서 여전히 PARC는  $-30$  dB의 성능 오차를 가지고 있었지만, 기존 기법들과 달리 잡음 환경에서도 매우 정확한  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 추정이 가능하였다.

다음으로 PARC의 성능 오차  $\epsilon = -30, -25, \dots, -10$  dB에 따른 제안된 기법의 추정 정확성을 분석하기 위하여, SNR=0 dB에서 참고문헌 [3]과 참고문헌 [4]의 기존 기법들과 비교 및 분석을 수행하였다. 그 결과, 그림 7에서 보는 바와 같이 참고문헌 [4]의 기존기법은 PARC의 성능오차에 매우 민감함을 보이지만, 제안된 기법은 비교적 매우 높은 정확성으로  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 추정이 가능함을 확인할 수 있었다.



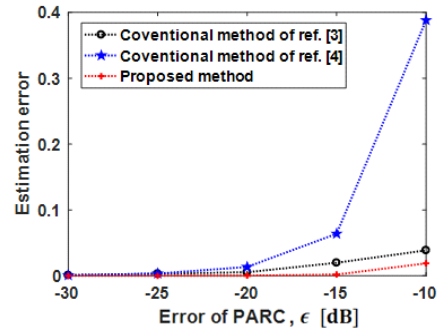
(a)  $|\hat{f}_t|$ 의 추정 오차  
(a) Estimation error of  $|\hat{f}_t|$



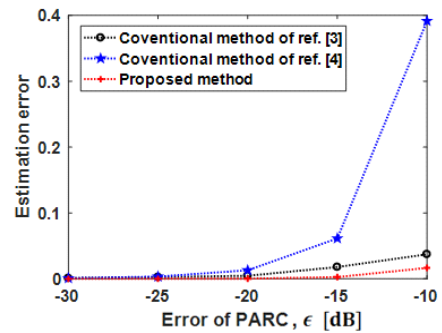
(b)  $|\hat{f}_r|$ 의 추정 오차  
(b) Estimation error of  $|\hat{f}_r|$

그림 6. SNR에 따른  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 추정 오차

Fig. 6. Estimation error of  $|\hat{f}_t|$  and  $|\hat{f}_r|$  for various SNRs.



(a)  $|\hat{f}_t|$ 의 추정 오차  
(a) Estimation error of  $|\hat{f}_t|$



(b)  $|\hat{f}_r|$ 의 추정 오차  
(b) Estimation error of  $|\hat{f}_r|$

그림 7. PARC 성능 오차에 따른  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 의 추정 오차

Fig. 7. Estimation error of  $|\hat{f}_t|$  and  $|\hat{f}_r|$  for various errors of PARC.

마지막으로 제안된 기법을 통한 다중편파 보정 성능 분석을 위하여 일본의 저궤도관측위성 ALOS에서 사용되는 대표적인 보정 성능 검증 도구 3가지(i.e. HH와 VV 간의 크기비 및 위상차<sup>[8]</sup>, HH와 HV 간의 전력비)를 사용하였다<sup>[1]</sup>. 이 검증 도구들을 위하여 corner reflector(CR) 표적이 보통 사용되며, CR에 대한 다중편파 신호들의 보정을 먼저 수행한 후, 보정된 HH와 VV의 크기비가 1의 값에 가까울수록, 보정된 HH와 VV의 위상차가 0°의 값에 가까울수록, 그리고 보정된 HH와 HV의 전력비가  $-30$  dB보다 낮을수록 보정이 성공적으로 수행되었다고 판단한다.

PARC의 성능 오차  $-30$  dB 및 SNR=30 dB에서 시뮬

표 2. ALOS의 다중편파 보정 성능 요구사항<sup>[1]</sup>에 대한 기존 기법들과 제안된 기법의 비교Table 2. Comparison of proposed method and conventional methods versus requirements for performance of polarimetric calibration of ALOS<sup>[1]</sup>.

Items of ALOS	Conventional method of ref. [3]	Conventional method of ref. [4]	Proposed method	Requirements of ALOS <sup>[1]</sup>
VV/HH amplitude ratio	1.0688	0.9402	0.9975	$\leq 1 \pm 0.047$
VV/HH phase difference	$-1.7402^\circ$	$0.3097^\circ$	$0.2745^\circ$	$\leq 5^\circ$
HV/HH power ratio	$-30.9657$ dB	$-30.1461$ dB	$-30.1947$ dB	$\leq -30$ dB

레이션을 수행한 결과, 표 2와 같이 나타났다. 특히 주주목해야할 점은 제안된 기법을 통해 channel imbalance의 크기값  $|\hat{f}_t|$ 와  $|\hat{f}_r|$ 를 보다 정확하게 추정하였기 때문에, HH와 VV 간의 크기비에 대한 ALOS의 요구조건(i.e.  $\leq 1 \pm 0.047$ )에 유일하게 제안된 기법만 만족함을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 기법을 통해 PARC의 성능오차가 상대적으로 크게 나타남에도 불구하고, 기존 기법들보다 향상된 정확도로 다중편파 보정을 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 보다 정확한 다중편파 SAR 영상들의 보정을 위하여, 3대의 PARC들을 사용한 1차 왜곡변수 추정 단계와 단일 PARC 및 PSO 알고리즘을 사용하는 2차 왜곡변수 추정 단계로 구성된 새로운 다중편파 보정 기법을 제안하였다.

다중편파 SAR 영상들을 사용한 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 reciprocity theorem 및 azimuth symmetry 가정을 반드시 요구하는 분산형 표적 기반의 기존 보정 기법들<sup>[2],[3],[6]</sup> 및 PARC의 성능오차가 충분히 낮아야만 하는 기존 보정 기법들<sup>[4],[5]</sup>과 비교하여, 더 이상 근사된 수식들을 사용하지 않고 보다 향상된 정확도로 다중편파 보정을 수행할 수 있었다.

## References

[1] M. Shimada, A. Freeman, "A technique for measurement of spaceborne SAR antenna patterns using distributed

targets," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 1, pp. 100-114, Jan. 1995.

[2] D. Yang, J. M. Shin, S. Jung, I. Choi, and S. Park, "Polarimetric calibration of satellite SAR images," in *International Symposium Remote Sensing (ISRS) 2018*, Pyeongchang, May 2018.

[3] S. Quegan, "A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 1, pp. 89-99, Jan. 1994.

[4] S. H. Yueh, J. A. Kong, R. M. Barnes, and R. T. Shin, "Calibration of polarimetric radars using in-scene reflectors," *Journal of Electromagnetic Waves and Application*, vol. 4, no. 1, pp. 27-48, 1990.

[5] M. Fujita, "Polarimetric calibration of the SIR-C C-band channel using active radar calibrators and polarization selective dihedrals," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 6, pp. 1872-1878, Nov. 1998.

[6] A. Villa, L. Iannini, D. Giudici, A. Monti-Guarnieri, and S. Tebaldini, "Calibration of SAR polarimetric images by means of a covariance matching," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 2, pp. 674-686, Feb. 2015.

[7] M. S. Kang, S. H. Lee, S. H. Park, S. Y. Shin, E. Yang, and, K. T. Kim, "Inter-pulse motion compensation of an ISAR image generated by stepped chirp waveform using improved particle swarm optimization," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and*



*Science*, vol. 26, no. 2, pp. 218-225, Feb. 2015.

- [8] G. Chang, Y. S. Oh, "Polarimetric SAR image classification based on the degree of polarization and co-

polarized phase-difference statistics," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 12, pp. 1345-1351, Dec. 2007.

최 인 오 [포항공과대학교/박사과정]

<http://orcid.org/0000-0002-0410-1066>



2012년 8월: 부경대학교 전자정보통신공학과 (공학사)

2014년 8월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)

2015년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 미세도플러 분석, 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 패턴인식, 스펙트럼 추정

박 상 홍 [부경대학교/정교수]

<http://orcid.org/0000-0001-8512-1431>



2004년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학사)

2007년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)

2010년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)

2010년 9월~현재: 부경대학교 전자공학

과 정교수

[주 관심분야] 미세도플러 분석, 전력단지 EMI/EMC 분석, 레이더 표적인식, 레이더영상, 레이더 신호처리 등

정 성 재 [삼성 네트워크사업부/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3987-2012>



2010년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)

2012년 2월: 동국대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)

2019년 2월~현재: 삼성 네트워크사업부

책임연구원

[주 관심분야] 다중 편파 ISAR 영상 및 표적 식별, 다중편파 보상 알고리즘

신 재 민 [한국항공우주연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5966-6833>



2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2016년 8월: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학박사)

2002년 4월~현재: 한국항공우주연구원

위성연구본부 책임연구원

[주 관심분야] SAR 시스템 보정, 다중 편파 영상 보상 및 표적 식별, InSAR 활용, Stereo Vision

양 도 철 [한국항공우주연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9027-3728>



1996년 2월: 전북대학교 항공우주공학과 (공학사)

1999년 12월: 텍사스 주립대학교 오스틴 항공우주공학과 (공학석사)

2010년 5월: 텍사스 주립대학교 오스틴 항공우주공학과 (공학박사)

2010년 5월~2012년 12월: Center for Space Research, SAR 원격탐사 연구원

2012년 12월~현재: 한국항공우주연구원 영상체계개발실 선임 연구원

[주 관심분야] SAR 시스템 검보정, SAR/InSAR/PolSAR 알고리즘 개발 및 활용

김 경 태 [포항공과대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장

2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정