



탑재비행시험 데이터를 이용한 PFA 및 기하오차 보상 알고리즘 검증

손 인 혜*

PFA and Geo-correction Algorithm Verification by Using Captive Flight Test Data

Inhye Son*

요 약

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 주야간 및 날씨에 독립적으로 고해상 영상을 얻을 수 있는 레이더이다. SAR 시스템은 플랫폼이 이동하면서 전자파를 송수신하여 만들어 내는 가상조리개를 통해 고해상 영상을 형성 할 수 있다. 고해상 영상을 형성하는 대표적인 알고리즘으로는 polar형태로 수신된 데이터를 rectangular형태로 바꿔 신호를 처리하는 PFA(Polar Format Algorithm), 가상의 라인 중심의 요동보상 및 Stolt interpolation을 사용하는 RMA(Range Migration Algorithm), 부분 조리개로 저해상 영상을 얻은 후 이 영상들의 조합으로 고 해상 영상을 형성하는 OSA(Overlapped Sub-aperture Algorithm)등이 있다. 본 논문에서는 PFA 및 PFA의 기 하오차 보상 알고리즘을 시뮬레이션 및 탑재비행시험 데이터로 검증한다.

Abstract

SAR is a radar that can acquire high resolution images independently of day and night and weather. The synthetic aperture is created by sending and receiving pulses as the platform moves. Through the synthetic aperture, SAR systems process high-resolution images. There are representative algorithms for processing of high resolution images. First, PFA(Polar Format Algorithm) is signal processing algorithm by converting received signals of polar format to rectangular format signals. Second, RMA(Range Migration Algorithm) applies virtual line for motion compensation and Stolt Interpolation. Third, OSA(Overlapped Sub-aperture Algorithm) acquires high resolution images by combining low resolution images of sub-aperture. This paper demonstrates the performance of PFA and geo-correction algorithm through to simulation. In addition, we apply real data of captive flight test to this algorithm and check the image processing steps.

Keywords

synthetic aperture radar, SAR, geo-correction, PFA, image processing

* 국방과학연구소 - ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7451-6398	 Received: Mar. 26, 2018, Revised: Apr. 25, 2018, Accepted: Apr. 28, 2018 Corresponding Author: InHye Son Defense Space Technology Center, ADD, Yuseong P.O. Box 35-3C, Daejeon, 305-600, Korea,
	305-600, Korea,
	Tel.: +82-42-821-0695, Email: ihson@add.re.kr

Ⅰ.서 론

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 주야간 및 날씨 에 독립적으로 고해상 영상을 얻을 수 있는 레이더 이다. SAR는 항공기에 레이더가 탑재되어 일반적인 레이더와 유사하게 전자파가 순차적으로 전송되고, 반사파는 레이더에 의해 수집된다. SAR의 경우 송 수신하는 전자파는 영상 중심을 기준으로 플랫폼이 이동하면서 플랫폼의 이동경로 만큼의 물리적 안테 나 길이를 가지는 가상 조리개에서 얻을 수 있는 신호들의 조합이다. 고해상 영상의 해상도는 거리에 상관없이 방위각 안테나 길이 반으로 고정된다[1].

고해상 영상을 형성하는 대표적인 알고리즘으로 는 PFA(Polar Formatting Algorithm), RMA(Range Migration Algorithm), OSA(Overlapped Sub-aperture Algorithm)등이 있다.

PFA는 영상 중심으로부터 같은 거리에서 polar형 태로 수신되는 신호를 이차원 FFT를 수행하기 위해 rectangular형태로 바꿔주는 알고리즘이다. 간단하게 수신된 신호를 리샘플링(resampling)하기 때문에 다 른 알고리즘들 보다 계산 효율이 좋다[2]. 하지만 알고리즘 구현 시 근사화로 공간 가변 성분이 남아 파면 곡률(wavefront curvature)이 나타난다. 이를 보 완해야 기하오차가 없는 영상을 얻을 수 있다[3].

RMA는 표준모드(Stripmap)와 비슷하게 주파수 신호를 방위방향으로 샘플링 수를 크게 하여 수집 하고, 가상의 라인을 기준으로 요동을 보상한다. 그 후 Stolt 보간을 적용하고 2D-FFT를 통해 영상을 형 성한다. RMA는 가상의 라인을 기준으로 요동을 보 상하기 때문에 PFA에 비해 파면곡률의 영향을 덜 받는다[4].

OSA는 원래의 가상 조리개를 중복된 부분을 포 함한 부분 조리개(Sub-aperture)로 나누어 저해상 영 상을 얻은 다음, 이 저해상 영상들의 적절한 위상을 곱하고 조합하여 고해상 영상을 얻는다. OSA는 가 상 조리개를 여러 부분으로 나눠서 신호를 처리하 기 때문에 파면 곡률의 영향을 덜 받지만 중복하여 신호를 처리하기 때문에 계산 시간이 PFA보다 오 래 걸린다[5][6].

영상 형성 후 잔여 위상오차를 보상하기 위한 알 고리즘은 PGA(Phase Correction Algorithm)가 주로 쓰이고 본 논문에서도 PGA를 적용하였다[7].

주야간 및 날씨에 독립적으로 고해상 영상을 얻 을 수 장점 때문에 SAR는 군사용으로 그 역할이 증가하고 있고, 국내에서도 지속적인 연구가 이루어 지고 있다. 본 논문에서 사용한 탑재비행시험 데이 터는 PIPER 항공기의 개조 및 승인을 통해 테스트 베드를 구축하여 실제 비행시험을 통해 획득하였다 [8]. 본 논문에서는 탑재비행시험 데이터에 PFA 및 기하오차 보상 알고리즘을 적용한 결과를 시뮬레이 션 결과와 비교하여 제시한다.

11. PFA 영상형성

실 데이터를 처리하는 알고리즘의 영상 형성 단 계 순서도는 그림 1과 같다.



그림 1. 영상형성단계 순서도 Fig. 1. Flowchart of synthetic aperture radar image formation

기하오차를 줄이기 위해 거리방향으로 분할 된 데이터에 거리방향보간/방위방향보간을 수행하는 PFA를 적용한 후, 영상을 하나로 정합한다. 영상정 합 후에 Autofocus알고리즘을 적용하고 마지막으로 기하오차를 보상하여 고해상 영상을 얻는다.

실제 적용한 알고리즘의 자세한 내용은 아래에서 서술하도록 하겠다.

2.1 PFA 알고리즘

PFA는 참고문헌[3]을 기반으로 설계하였다. SAR 에서의 3차원 레이더 구조는 그림 2와 같다. s는 점표적의 위치, r_c 는 레이더의 위치, r_s 는 레이더와 점표적의 상대적 위치 $r_s = r_c - s$ 이다. 벡터 r_c 는 각도 α_n, ψ_n 로 표현된다.

PFA에서 신호처리를 2차원 평면 $(s_z = 0)$ 으로 가 정하였을 때 Dechirp과 ADC를 수행한 후 데이터를 파수 영역(Wavenumber Domain) 항으로 표현하면 식 (1)과 같다. 파수는 원점에서 표적까지의 거리를 (k_x, k_y, k_z) 세 축에서 순시 주파수(Instantaneous Frequency)로 표현하는 방법으로 샘플링된 신호 $X_V(i, n)$ 를 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

식 (1)의 (k_x, k_y, k_z) 의 값은 식 (2)와 같다.

$$X_{V}(i,n) = A_{R}\sigma(s)\exp j \begin{cases} k_{x}(i,n)s_{x} \\ + k_{y}(i,n)s_{y} \end{cases}$$
(1)

$$k_{x}(i,n) = \frac{2}{c} \left[\omega_{n} + \gamma_{n} T_{s,n} i \right] \cos \psi_{n} \sin \alpha_{n},$$

$$k_{y}(i,n) = -\frac{2}{c} \left[\omega_{n} + \gamma_{n} T_{s,n} i \right] \cos \psi_{n} \cos \alpha_{n},$$

$$k_{z}(i,n) = \frac{2}{c} \left[\omega_{n} + \gamma_{n} T_{s,n} i \right] \sin \psi_{n}$$
(2)

ω_n는 송신펄스의 중심 주파수, τ_n는 울림속도,
A_R은 수신펄스 크기, T_{s.n}는 샘플링 시간, c는 빛
속도, *i*는 거리방향 샘플 번호, *n*는 펄스 번호이다.
영상형성 단계에서 2차원 FFT적용을 위한 polar-to-rectangular 리샘플링은 식 (1)에서 방위 순시 주파
수 k_x와 거리 순시 주파수 k_y의 값을 rectangular형
태로 다시 구하여 수행한다.



그림 2. SAR 구소 영상 Fig. 2. SAR geometry



그림 3. PFA 리샘플링 구조 Fig. 3. Resampling geometry of PFA

그림 3에서처럼 기존 $k_y(i,n)$ 을 중심 펄스 기준 으로 펄스 번호 n에 대하여 변하지 않는 값을 가지 는 $k_y(i,0)$ 로 리샘플링한다.

중심 펄스를 기준으로 하면 $\alpha_n = 0$ 이 되고 이를 새로운 번호 $i^{'}$ 로 정리하면 수식 (3)과 같다.

식 (3)에서 리샘플링된 $k_y(i',0)$ 값과 식 (4)을 이 용해 $k_x(i',n)$ 을 구하면 식 (5)이고 이를 정리하면 식 (6)과 같다.

$$k_{y}(i,n) \to k_{y}(i,0) = k_{y}(i)$$

$$= \frac{2}{c} \left[\omega_{0} + \gamma_{0} T_{s,0} i \right] \cos \psi_{0}$$
(3)

$$(k_x(i',n),k_y(i')) = (k_r \sin\alpha_n,k_r \cos\alpha_n)$$
(4)

$$k_x(i,n) = k_y(i') \frac{\sin\alpha_n}{\cos\alpha_n} = k_y(i') \tan\alpha_n$$
(5)

$$k_{x}(i,n) \rightarrow k_{x}(i,n)$$

$$= \frac{2}{c} \left[\omega_{0} + \gamma_{0} T_{s,0} i' \right] \cos \psi_{0} \tan \alpha_{n}^{\dagger}$$
(6)

PFA에서 스퀸트 각이 있을 때 α_n 은 펄스와 펄 스사이에서 일정한 값을 가지지 않는다. 이는 FFT 처리 시 성능에 저하를 야기하고 이를 보완하기 위 해 등 간격을 가지는 α_n 을 새롭게 구하여 스퀸트 각이 있을 때의 수신 신호를 스퀸트 각이 0도 일 때인 측면모드(broadside mode)와 동일하게 처리한 다.

식 (7)에서 영상 중심점을 $(x_c, y_c) = (0,0)$ 으로 정 의 했을 때 x_a 는 스퀸트 각만큼 이동된 x축에서의 비행경로, r_g 는 영상 중심과 비행체 이동경로 중심 에서의 경사거리를 2차원 평면으로 정사영 시킨 값이다.

식 (7)에서 수신 신호를 측면모드처럼 처리하기 위하여 스퀸트 각이 반영된 x_a 와 영상 중심에서의 x_c 로 α_0 를 구한다. 그 후 각의 최솟값과 최댓값의 평균 α_{cen} 을 구하고, 스퀸트 각이 반영된 α_0 에 α_{cen} 를 빼줌으로써 측면모드 일 때의 α_n 를 구한 다. 식 (6)을 계산할 때 식 (7)에서 구한 α_n 을 적용 하면 된다.

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= atan \left(\frac{x_a - x_c}{r_g - y_c} \right) \\ \alpha_{cen} &= mean \left([\max(\alpha_0) \min(\alpha_0)] \right) \\ \alpha_n &= \alpha_0 - \alpha_{cen} \end{aligned}$$
 (7)

Ⅲ. 기차오차 보상

PFA는 영상 중심을 기준으로 신호를 처리하기 때문에 중심에서 멀어질수록 기하오차가 크게 발생 한다. 이런 기하오차는 거리/방위방향으로 복합적으 로 발생하기 때문에 두 방향 모두 기하오차를 보상 해야 한다. 본 논문에서 거리방향 기하오차는 참고문헌[3]을 참고하여 보상하였고, 방위방향 기하오차는 거리방 향의 데이터를 분할하여 PFA를 처리함으로써 보상 하였다. 거리방향과 방위방향 기하오차 보상에 대해 아래에서 설명하겠다.

3.1 거리방향 기하오차 보상

그림 4에서처럼 거리방향 기하오차 보상은 Autofocus까지 영상 처리를 끝낸 후 기하오차 보상 값을 곱해줌으로서 이루어진다.

거리오차 보상 위상 값은 식 (8)과 같다.

$$\phi_{corr} = -\frac{w_0 + \gamma_0 T_{s,0} i}{c |r_{c,0}|} \times s_x^2$$
(8)

식 (8)에서 ω_0 는 기준 주파수, γ_0 는 울림속도, $T_{s,0}$ 는 펄스 샘플링 간격, i는 거리 방향 샘플 번 호, c는 빛 속도, $|r_{c0}|$ 는 기준 경사 겨리, s_x 는 방 위방향 픽셀 위치이다.

식 (8) 거리방향 기하오차 보상에서 위치에 해당 되는 값은 방위방향 픽셀 값 s_x하나이다. 하나의 펄스에서 수신된 샘플들에 같은 위상 보정 값 Φ_{corr}을 곱해줌으로서 거리방향 기하오차를 보상 한다.



3.2 방위방향 기하오차 보상

방위방향 기하오차는 그림 5에서처럼 거리방향으 로 수신 데이터를 분할하여, 각 분할된 데이터의 영 상중심으로 PFA를 적용함으로서 보상할 수 있다.



Fig. 6. Position of target

표 1.	시	뮬레이	션	변수		
Table	1.	Main	par	ameter	of	simulation

Parameter	Value
Center slant range	25 km
Height	10 km
Flight velocity	90 m/s
Squint angle	0 °
resolution	0.4 m

분할된 데이터의 영상중심으로 PFA를 적용하면 PFA특성상 영상 중심에서 멀어질수록 발생하는 기 하오차를 줄일 수 있다.

Ⅳ. 시뮬레이션

탑재비행시험 데이터를 처리하는 알고리즘의 성 능을 우선 시뮬레이션을 통해서 확인한다. 그림 6은 시뮬레이션에서 점표적의 위치를 나타내고, 표 1에 는 주요 변수가 요약되어있다. 동일한 점표적과 주 요 변수에서 PFA, 거리방향 기하오차보상, 방위방 향 기하오차보상 단계로 나누어 성능을 확인한다.



그림 7. PFA 적용 후 점표적 영상 Fig. 7. Image after applying PFA



그림 8. 모서리에 위치한 점표적 해상도 Fig. 8. Resolution of edge target

2.1절에서 설명한 PFA알고리즘을 적용하였을 때, 그림 7과 같이 점표적이 집중이 잘 되어서 영상 이 생성된 것을 확인 할 수 있다. 그림 8은 이 점표 적들 중 그림 6에서 왼쪽 상단 동그라미로 표시된 표적의 해상도를 나타내고, 설계한 해상도를 만족하 는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9와 그림 10은 그림 7에서 경사/방위 거리 에서 점선으로 표시된 부분을 확대한 것이다. 그림 9의 거리방향, 그림 10의 방위방향 표적의 위치를 살펴보면 기하오차 보상을 하지 않았을 때 동일 경 사/방위 선상에 위치하는 표적이 영상 중심에서 멀 어 질수록 기하오차로 인하여 다른 곳에 위치하는 것을 알 수 있다. 그림 11은 Autofocus까지 적용된 영상에 식 (8)을 적용하여 기하오차를 보상 하였을 때 거리방향으로 표적들이 동일 거리상에 정렬되는 것을 보여준다.

그림 12는 거리 방향으로 데이터를 분할하여 처 리 하였을 때, 그림 10에서 방위 방향으로 퍼져있던 표적들이 동일 방위 거리상에 나타나는 것을 보여 준다.

그림 13은 비행 시험에서 촬영한 지역의 광학 영 상으로 고해상 영상과 비교를 위한 영상이다.

탑재비행시험에서 데이터를 획득하여 본 논문의 알고리즘을 적용한 결과가 그림 14와 그림 16이다. 그림 14는 스퀸트 각 0도, 그림 16은 스퀸트 각 -21도 이다.



그림 9. 거리 방향 점표적 확대 영상 Fig. 9. Zoom image of range



그림 10. 방향 방향 점표적 확대 영상 Fig. 10. Zoom image of azimuth



그림 11. 거리방향 기하오차 보상 영상 Fig. 11. Geo-correction image of range



그림 12. 방위방향 기하오차 보상 영상 Fig. 12. Geo-correction image of azimuth



그림 13. 광학 영상 Fig. 13. Optics image



그림 14. 고해상 영상(squint 각 : 0도) Fig. 14. SAR image(squint angle : 0 degree)



그림 15. 표적 영상(squint 각 : 0도) Fig. 15. Target image(squint angle : 0 degree)



그림 16. 고해상 영상(squint 각 : -21도) Fig. 16. SAR image(squint angle : -21 degree)



그림 17. 표적 영상(squint 각 : -21도) Fig. 17. Target image(squint angle : -21 degree)

그림 14와 그림 16에서 네모 박스로 표시된 부분 은 영상에서 초점이 잘 맞춰졌는지 확인하기 위해 편편한 바닥에 표적이 될 수 있는 반사체를 설치한 영역이다.

그림 15와 그림 17은 이 영역을 확대한 것이고, 반사체에 초점이 잘 맞춰져서 점표적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 오른쪽에 인접한 세 개의 표적들 도 잘 분리가 되는 것을 확인할 수 있다. 측면모드 뿐만 아니라 스퀸트 각이 존재 할 때도 영상이 잘 형성 되는 것을 알 수 있다.

V.결 론

본 논문에서는 항공기 SAR의 실시간 영상처리에 적합한 구조를 가지는 PFA의 처리 단계 및 실제적 용 단계에서 구현 방법을 기술하였다. 추가적으로 PFA의 영상 중심 신호처리로 인해 발생하는 기하오차문제를 보상하는 기하오차 보상 알고리즘을 적용하는 단계도 구현하였다.

시뮬레이션을 통해 PFA 및 기하오차 보상 알고 리즘의 성능을 검증하였고, 그 후 탑재비행시험을 통해 획득한 SAR데이터에 구현한 알고리즘을 적용 하였다. 성능 확인을 위해 설치한 반사체 표적의 영 상 형성을 통해 성능을 확인하였다. 또한 스퀸트 각 이 존재 할 때도 반사체 표적의 분해능 확인을 통 해 실제 데이터에서의 알고리즘 성능을 검증하였다.

References

- A. Moreira, "A Turorial on Synthetic Aperture Radar", IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, Vol. 1, No. 1, pp. 6-43, Mar. 2013.
- [2] Walter G. Carrara Ron S. Goodman and Ronald M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithm", Artech House, pp. 81-152, 1995.
- [3] Armin W. Doerry, "Wavefront Curvature Limitations and Compensation to Polar Format Processing for Synthetic Aperture Radar Images", Sandia Report SAND2007-0046, Jan. 2007.
- [4] Ian G. Cumming and Frank H. Wong , "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data", Artech House, pp. 323-362 2005.
- [5] B. L. Burns and J. T. Cordaro, "A SAR image formation algorithm that compensations for the spacially-variant effect of antenna motion", Proceedings of the SPIE: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery, Vol. 2230, pp. 14-24, Apr. 1994.
- [6] Charles V. Jakowatz, Daniel E. Wahl, David A. Yocky, Brian K. Bray, Wallace J. Bow, and John A. Richards, "Comparison of Algorithm for Use in Real-Time Spotlight-Mode SAR Image Formation", Proc. SPIE 5427, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XI, pp. 108-116, Sep. 2004.
- [7] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglla, and C.

V. Jakowatz, "Phase Gradient Atofocus – 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.

[8] Hyun-Ik Shin, Kyoung-Il Kwon, Sang-Ho Yoon, Hyung-Suk Kim, Jeonghun Hwang, Young-Chang K, Eung-Noh You, and Jin-Woo Kim, "SAR Test-bed to Acquire Raw Data and Form Real-time Image", Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 2, pp. 181-186, Apr. 2017.

저자소개

손 인 혜 (In-Hye Son)



2011년 2월 : 경북대학교 전기전자공학과(공학사) 2013년 2월 : 한국과학기술원 전기전자공학과(공학석사) 2013년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원 관심분야 : SAR, 신호처리, RADAR