

PFA의 기하 왜곡 보정 기법

이한길¹⁾ · 김동환^{*,1)} · 손인혜¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

The Correcting Algorithm on Geometric Distortion of Polar Format Algorithm

Hankil Lee¹⁾ · Donghwan Kim^{*,1)} · Inhye Son¹⁾

¹⁾ *The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 17 August 2017 / Revised 24 November 2017 / Accepted 26 January 2018)

ABSTRACT

Polar format algorithm (PFA) was derived from medical imaging theory, known as back projection, to process synthetic aperture radar(SAR) data. The difference between the operating condition of SAR and back projection assumption makes two distortions. First, the focusing performance of PFA is degraded in proportion to distances from the scene center. Second, the geometric accuracy in SAR images is distorted. Several methods were introduced to mitigate the distortions, but some disadvantages, such as the geometric discontinuity, are arisen when sub-images are combined. This paper proposes the novel method to compensate the geometric distortion with chirp Z-transform (CZT). This method corrects precisely the geometric errors without any problems, because a whole image can be processed all at once.

Key Words : Synthetic Aperture Radar(영상레이더), Polar Format Algorithm, Geometric Distortion(위치 왜곡)

1. 서론

일반 레이더는 빔폭에 해당하는 만큼의 영역을 촬영할 수 있지만, 빔폭에 따른 해상도 저하 때문에 일반 레이더의 안테나를 사용에서는 고해상도 영상을 획득할 수 없는 단점을 가지고 있다. 영상레이더는 이러한 일반 레이더의 단점을 보완하기 위해서 신호처

리 기법을 이용해서 가상의 안테나를 합성하여 고해상도 영상을 얻는 기법이다.

영상레이더가 가상의 안테나를 합성하기 위해서는 일정한 거리를 이동하면서 신호를 수집하여야 가능하기 때문에, 일반적으로 영상레이더는 항공기나 위성과 같은 이동하는 장비에 탑재해서 운영한다^[1]. 레이더가 위치를 이동하면서 신호를 수집하면, 레이더에서 특정한 위치까지의 거리가 변하게 된다. 거리셀(range bin) 이상으로 거리가 변하면, 특정 위치의 신호가 서로 다른 거리에 표시가 된다. 방위 방향으로 고해상도 영상

* Corresponding author, E-mail: kdh0812@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

을 얻기 위해서는 위치에 따른 거리 변화를 보정해야 한다. 영상 레이더 처리 알고리즘의 핵심은 이런 거리 변화를 보정하는 방법이다.

영상 레이더에서 이러한 거리변화 처리방법으로 많이 알려진 알고리즘은 Range-Doppler Algorithm(RDA), Range Migration Algorithm(RMA), Chirp Scaling Algorithm(CSA), Polar Format Algorithm(PFA)이다. RDA, RMA, CSA는 스트립맵(strip map)으로 불리는 모드에서 수신신호를 처리하는 방법이고, PFA는 스포트라이트(spotlight)으로 불리는 모드에서 수신 신호를 처리하는 방법이다. 스트립맵과 스포트라이트의 차이는 후자는 영상 중심점의 도플러 주파수를 일정하게 하여 방위 방향으로 고해상도의 영상을 얻는 모드이다^[2,3].

RDA는 영상레이더를 위해서 개발된 알고리즘으로 거리와 방위 방향 처리를 분리해서 수행하는 특징이 있다^[3]. 영상 레이더의 원리를 설명하기 용이한 알고리즘으로 많은 소개 자료에서 다루고 있다.

RMA는 지진파 신호 처리에서 이용되던 방법을 영상레이더에 적용한 방법이다^[4]. 주파수 영역에서 가장 정확한 영상 처리 방법으로, 신호처리 과정에서 발생하는 오차가 없다.

CSA는 보간법을 이용하지 않고 영상 레이더 신호를 처리하는 방법으로 연산량을 줄이는데 집중한 알고리즘이다^[3]. CSA는 RMA의 수식을 근사해서 신호처리에 이용하기 때문에 스캔트 각도가 커지면 변형이 필요하다^[5].

PFA는 back projection을 영상 레이더에 적용한 방법이다^[6]. 시간 영역 back projection은 영상 레이더에서도 가장 정확한 신호처리 기법이지만, 필요한 연산량이 가장 많다^[1]. 시간 영역 back projection의 시간을 줄이는 기법으로 주파수 영역 back projection이 제안되었고, PFA는 이 방법을 SAR에 적용한 결과이다^[6]. 영상 레이더와 주파수 영역 back projection이 가정하는 환경이 다르기 때문에 파면 곡률 오차(wavefront curvature error)라고 불리는 오차가 발생한다.

본 논문에서는 파면 곡률 오차 때문에 발생하는 문제점 중에서 위치 왜곡 현상을 보간법 없이 정확하게 보정하는 기법을 다루고 있다. 논문의 구성은 파면 곡률 오차에 대해서 설명하고, 이어서 제안하는 방법을 설명하였다. 제안한 방법을 시뮬레이션과 영상 레이더 영상으로 비교하여 성능을 검증하였다.

2. PFA의 파면 곡률 오차

시간 영역 back projection은 영상 픽셀을 개별적으로 적분해서 구하는 방식으로, 정확한 영상 처리가 가능하지만, 영상의 픽셀이 늘어나거나 해상도를 좋게 하면 기하급수적으로 연산량이 늘어나는 구조이다. 주파수 영역 back projection은 Radon 변환을 이용하는 방법으로 개별적 영상 픽셀을 처리하는 방식이 아닌 전체 영상을 한 번에 처리하는 방식이다^[6]. 주파수 영역 back projection은 제한된 수집 조건에서 정확한 처리가 가능한 단점을 가지고 있다.

주파수 영역 back projection으로 처리가 가능한 조건은 전체 영상이 직선으로 투영이 일어나야 한다는 점이다. 하지만, 영상 레이더의 전자파는 원호를 그리며 진행한다. Fig. 1에 주파수 영역 back projection과 영상 레이더의 투영 방식이 묘사되어 있다. 파란색 점선이 back projection에서 가정하는 투영 경로이다. 검은색 선이 전자파에 의해서 투영되는 경로이다. 두 개의 투영 경로 차이를 파면 곡률 오차라고 부른다.

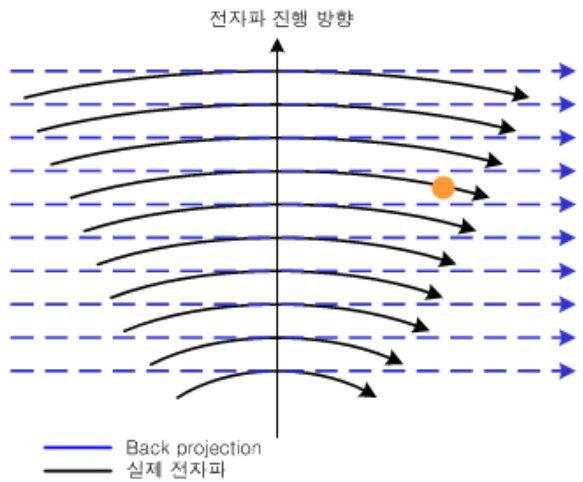


Fig. 1. Projection geometry of back projection and radar signal

파면 곡률 오차는 PFA로 영상을 형성할 때 두 가지의 성능 저하를 일으킨다. 첫째는 영상 중심에서 거리에 따른 영상의 성능 저하이고, 두 번째는 영상의 위치 왜곡이다. 수식 (1)은 파면 곡률 오차에 의해서 발생하는 위상 오차를 표현한 식이다^[6].

$$\phi_c(f, f_d) \approx -\frac{S_x^2}{2R_c} K_Y(f) - \frac{S_x S_y}{R_c} K_X(f_d) + \frac{\lambda(S_x^2 - S_y^2)}{8\pi R_c} K_X^2(f_d) \quad (1)$$

위 수식에서 f 는 거리 방향 주파수이고 f_d 는 방위 방향 도플러 주파수이다. S_x 는 방위 방향 위치이고 S_y 는 거리 방향 위치이다. 위치는 모두 영상 중심에서 상대 값이다. R_c 는 레이더에서 영상 중심까지 거리이고 λ 는 중심 주파수의 파장이다. $K_Y(f)$ 는 거리 방향 파수(wavenumber)이고 $K_X(f_d)$ 는 방위 방향 파수이다. 앞에 있는 두 개의 성분이 위치 오차를 나타내고, 마지막 성분은 영상 성능 저하를 의미한다.

위치 왜곡 오차는 Fig. 1을 이용해서 설명할 수 있다. 방위 방향의 경우 각도에 대한 분해능이 위치로 변환된다. 근거리와 원거리는 경사 거리 차이로 각도 분해능이 같아도 방위 거리가 달라진다. 거리 방향의 경우는 곡률 때문에 방위 방향으로 멀어질수록 거리가 멀어지게 된다. Fig. 2는 PFA 영상의 위치 왜곡을 묘사하고 있다. 점선으로 표시된 영역을 PFA로 영상 형성을 하면 실선으로 표시된 모양으로 영상이 형성된다.

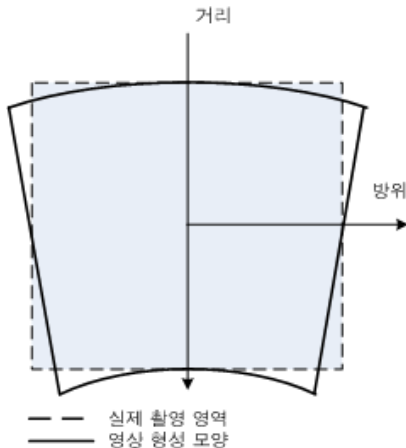


Fig. 2. Geometry distortion of PFA

PFA에서 곡률 왜곡을 보정하는 기법은 3가지가 제안되어 있다. 첫째, 곡률 왜곡이 영상 중심으로부터 거리에 따라서 나타나는 특징을 이용해서 영상을 여러 개의 작은 영상으로 분할해서 처리하는

방법이다⁶⁾. 둘째는 저해상도 영상을 만들어서 위상 오차를 보정하고 고해상도 영상으로 합성하는 방법이다⁷⁾. 마지막은 PFA로 영상을 형성하고 영상에 보정 필터를 적용하는 방법이다⁸⁾.

3가지 방법 모두 성능 저하와 위치 왜곡을 보정할 수 있는 방법이다. 하지만, 분할처리 기법으로 위치를 보정할 경우 영상을 연결하는 부분에서 불연속으로 인한 차이가 발생할 수 있다. 보정 필터의 경우 정확한 필터는 연산량이 문제가 될 수 있고, 근사한 필터는 분할처리와 동일한 문제를 야기할 수 있다.

3. 제안 방법

분할처리의 단점을 극복하기 위해서 영상 전체에 위치 왜곡을 보정하는 접근 방법도 존재한다. 이때, 일반적으로 보간법을 이용해서 위치 왜곡을 보정한다. 보간법은 신호의 전후 관계를 이용해서 새로운 위치의 값을 추정하는 방식이다. 하지만, 영상의 경우는 인과관계가 성립하지 않기 때문에, 보간법을 이용해서 추정한 값의 정확성을 보장할 수 없다.

제안하는 방법은 보간법을 이용하지 않고 신호처리 기법을 이용해서 위치 왜곡을 보정한다. Fig. 3은 제안하는 방법의 순서도이다. 거리 방향은 한 방향으로 위치가 이동하기 때문에 주파수 영역에서 위상 보상으로 오차를 보정한다. 방위 방향은 거리에 따라서 방위 픽셀의 크기가 변하는 효과이기 때문에, Chirp Z 변환(CZT)을 이용해서 방위 방향의 픽셀 크기를 일정하게 변환한다⁹⁾.

거리 방향 위치 왜곡은 수식 (1)에서 보듯이, 방위 위치에 의해서만 영향을 받는다. 거리 방향은 수식 (2)를 이용해서 위상 오차를 보정한다.

$$\phi_r(f) = \frac{2\pi f S_x^2}{c R_c} \quad (2)$$

위 식에서 f 는 주파수이고, S_x 는 방위 위치이다. c 는 빛의 속도이고, R_c 는 기준 경사거리이다.

거리 방향 위치 보정 시에 $K_Y(f)$ 에서 $4\pi f_c/c$ 는 수식에 반영되어 있지 않다. 이유는 방위 방향으로 위상의 불연속을 만들어서 방위 방향으로 성능 저하를 야기할 수 있기 때문이다. f_c 시스템에서 사용하는 중심 주파수이다.

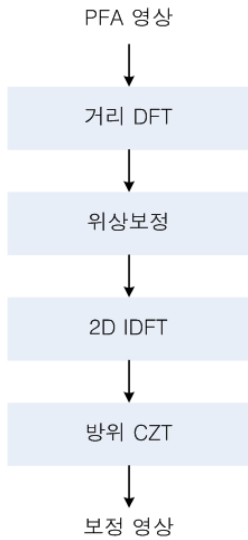


Fig. 3. Block diagram of proposed method

방위 방향 위치 왜곡은 거리 위치와 방위 위치에 따라 모두 영향을 받을 뿐만 아니라 부호에도 영향을 받는다. 즉, 방향성이 일관되지 않기 때문에, 거리 방향과 동일한 위치 보정 방법을 사용할 수 없다. 방위 방향의 위치와 오차를 위상으로 정리하면 수식 (3)처럼 된다. 거리에 따라서 방위 방향의 위치가 일정한 비율로 변하는 것을 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{azi}(f_d) &\approx S_x K_X(f_d) - \frac{S_x S_y}{R_c} K_X(f_d) \\ &= \frac{4\pi f_c}{c} \left(1 - \frac{S_y}{R_c}\right) S_x \tan(\alpha(f_d)) \end{aligned} \quad (3)$$

위 수식에서 $\alpha(f_d)$ 는 수신 위치와 수신 기준선 사이의 각도 차이이다.

방위 방향으로 압축을 수행할 경우 기본적으로 이산 푸리에 변환(DFT)를 이용한다. DFT를 이용해서 방위 압축을 수행하고 나면 거리에 따라서 픽셀 크기가 달라져서 방위 위치 오차가 발생한다. 제안하는 방법은 CZT를 이용해서 방위 압축을 수행함으로써 거리에 상관없이 일정한 픽셀 크기를 유지한다.

$$\begin{aligned} s(k) &\approx \sum_n e^{j\frac{4\pi f_c}{c} \left(1 - \frac{S_y}{R_c}\right) S_x d\alpha} e^{-j\frac{2\pi}{N} \left(1 - \frac{S_y}{R_c}\right) kn} \\ &= \text{csinc} \left(2\pi \left(1 - \frac{S_y}{R_c}\right) \left(\frac{2f_c}{c} d\alpha - \frac{k}{N} \right) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

위 수식에서 $\tan(\alpha(f_d))$ 는 $\alpha(f_d)$ 가 작다는 가정과 이산 기호를 이용해서 $d\alpha n$ 으로 근사했다. 두 번째 지수 함수가 DFT를 대체한 CZT이다. $1 - S_y/R_c$ 은 CZT의 스케일 값이다. csinc는 수식 (5)로 표현되는 함수로 sinc와 유사한 함수이다. 스케일 값을 적용함으로써 방위 위치가 거리와 무관하게 일정하게 변경된다.

4. 시뮬레이션

제안한 방법의 성능을 확인하기 위해서 먼저 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4는 시뮬레이션에서 점표적의 위치를 나타내고 있다. Table 1에 주요 변수를 요약하였다.

Table 1. Parameter for simulation

구분	값
중심 경사거리	20 km
고도	5 km
비행체 속도	100 m/s
스윕트 각도	0 °
해상도	0.4 m

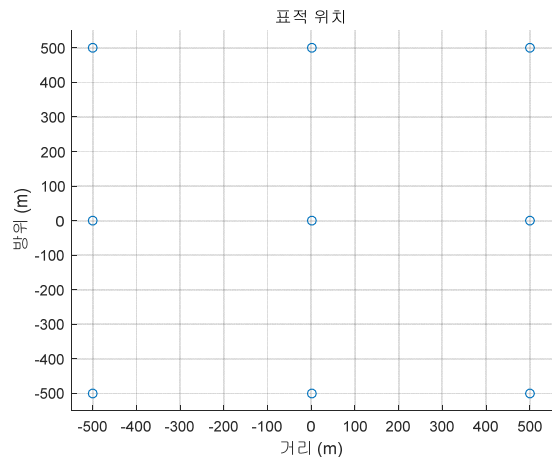


Fig. 4. Point targets for simulation

Fig. 5는 PFA로 영상을 형성한 근거리 표적 영상이다. 3개의 표적을 붉은색 원으로 표시하였다. 앞에서

설명하였듯이 방위와 거리 방향으로 위치가 왜곡되어 있다. Fig. 6은 제안한 방법으로 위치 왜곡을 보정한 결과이다. 표적이 거리 방향으로 일렬로 정렬이 되어 있고 방위 위치도 보정된 것을 볼 수 있다.

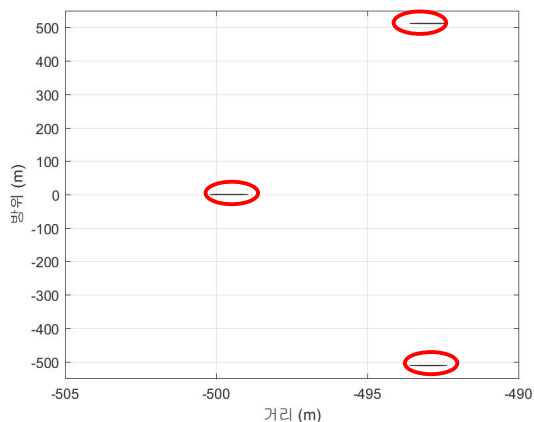


Fig. 5. Before geometry correction

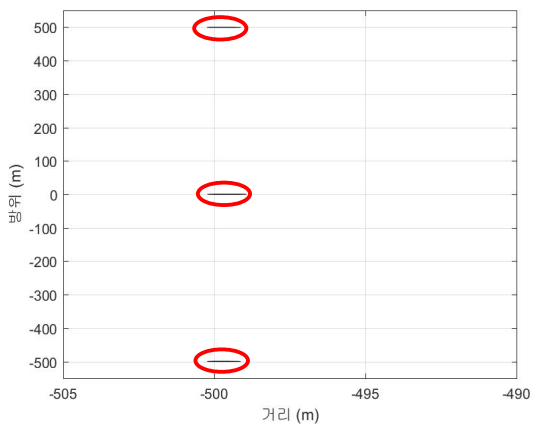


Fig. 6. After geometry correction

Table 2. Points location before correction

	표적1	표적2	표적3
거리, 방위(m)	-493, -512	6, -500	507, -488
	표적4	표적5	표적6
거리, 방위(m)	-500, 0	0, 0	501, 0
	표적7	표적8	표적9
거리, 방위(m)	-493, 512	7, 500	507, 488

Table 3. Points location after correction

	표적1	표적2	표적3
거리, 방위(m)	-500, -500	0, -500	500, -501
	표적4	표적5	표적6
거리, 방위(m)	-500, 0	0, 0	501, 0
	표적7	표적8	표적9
거리, 방위(m)	-500, 500	0, 500	501, 501



Fig. 7. Corrected image with interpolation

Table 2와 Table 3은 시뮬레이션에서 사용한 9개 표적 모두의 위치를 측정된 결과이다. 보정 후에 정확하게 정렬되어 있는 것을 볼 수 있다. 원거리 표적 3개의 거리와 방위 방향에 1 m 정도의 오차(미터로 반올림)가 발생한다. PFA 신호처리 과정에서 입사각을 영상 중심에 맞춰 처리하기 때문에 위치 별로 입사각의 오차가 누적되어 나타나는 현상이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 비행시험으로 획득한 데이터를 처리한 결과이다. Fig. 7은 거리 방향을 위상 보정으로 처리하고 방위 방향을 스플라인 보간법으로 처리한 결과이다. 앞 절에서 언급하였듯이, 영상은 인접 픽셀 간의 연관성이 없기 때문에 물결무늬 같은 왜곡현상이 발생함을 볼 수 있다. Fig. 8은 제안하는 기법으로

보정한 결과이다. 위치왜곡에 대한 보정은 동일한 성능을 유지하면서 방위보정에 따른 왜곡 현상이 영상에서 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 8에 붉은 원으로 표시한 지역에 성능 측정을 위해서 코너 리플렉터(CR)를 설치하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 위치 보정 후 CR의 방위 방향 성능을 비교한 그림이다. 푸른 점선이 보간법을 이용한 기법이고 붉은 실선이 제안하는 방법이다. 제안 방법이 보간법을 이용할 때보다 성능이 좋은 것을 볼 수 있다.



Fig. 8. Corrected image with proposed method

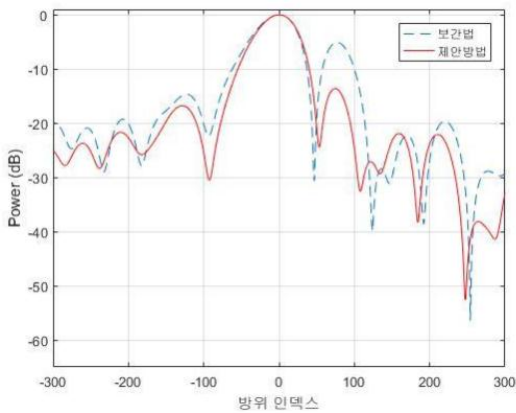


Fig. 9. IRF of CR ('16. 6. Image)

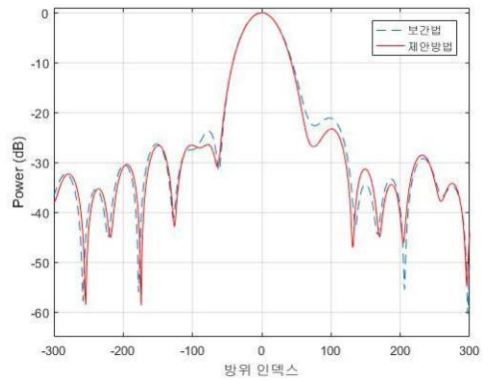


Fig. 10. IRF of CR ('16. 12. Image)



Fig. 11. Coastal image

Fig. 11은 해안가 지역을 제안한 기법으로 위치 보정한 그림이다. 붉은 실선으로 표시된 지역을 확대한 영상이 Fig. 12이다. 보간법 결과를 보면 Fig. 7처럼 물결무늬 왜곡이 발생하는 것을 볼 수 있다.

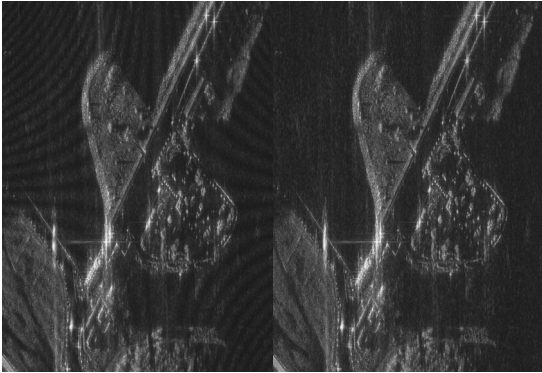


Fig. 12. Extended images(Left: Interpolation, Right: Proposed method)

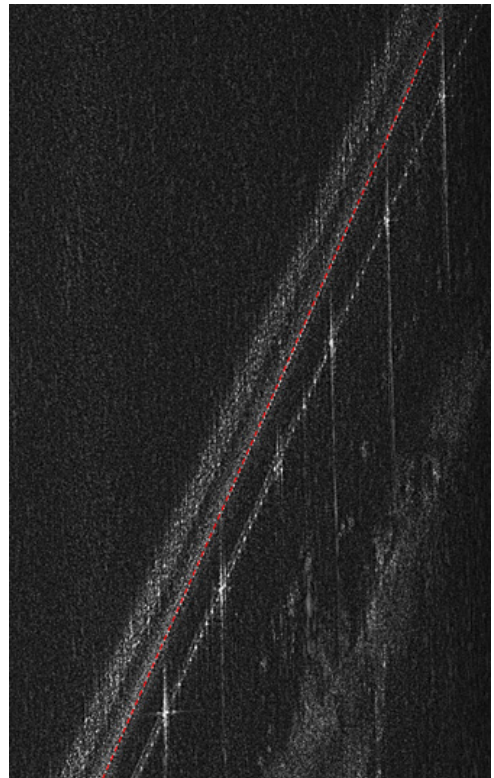


Fig. 14. Extended images of coastal road after correction

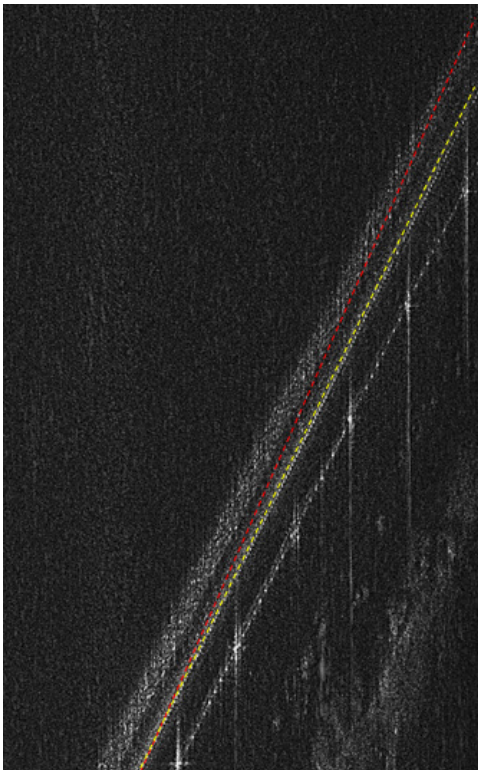


Fig. 13. Extended images of coastal road before correction

Fig. 11의 노란색 점선으로 표시된 지역을 위치 보정 전/후로 확대한 그림이 Fig. 13과 14이다. 그림에서 도로의 가드레일로 추정되는 두 개의 밝은 선이 있다. 두 그림의 붉은 점선은 보정 후 Fig. 14의 좌측 가드레일 위에 평행하게 그은 선이다. 보정 전 Fig. 13을 보면 우측 상단으로 갈수록 평행한 붉은 점선과 좌측 가드레일(노란 점선)이 점점 멀어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 13의 노란 점선은 좌측 가드레일의 좌측 하단에서 가드레일을 따라 그은 선이다. 우측 상단으로 가면서 노란 점선 옆으로 반사된 좌측 가드레일이 나타나는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

영상의 크기가 정해지면 거리와 무관하게 일정한 자료 처리량을 유지할 수 있고, 단순한 요동 보상 구조를 가지고 있어서 PFA는 항공기의 실시간 처리에

적합한 신호처리 구조를 가지고 있다. 하지만, PFA는 알고리즘의 태생적 한계 때문에 영상 품질을 위해서는 발생하는 오차를 보상해야 한다.

본 논문에서는 PFA의 오차 중 위치왜곡을 CZT를 이용하여 보정하는 기법을 제안하였다. CZT를 이용한 보정 기법은 영상의 주파수 신호를 이용해서 보정을 수행하기 때문에 영상의 성능 저하 없이 정확한 위치 보정이 가능한 기법이다.

시뮬레이션과 실제 SAR 영상을 이용해서 제안한 방법의 성능을 검증하였다. 시뮬레이션을 통해 위치 정확도를 측정된 결과 왜곡된 위치를 거의 정확하게 보정할 수 있는 것을 확인하였다. 실제 SAR 영상을 이용한 결과에서도 보간법에서 발생할 수 있는 성능 저하 요인이 발생하지 않으면서 위치보정이 되는 것을 확인하였다.

References

- [1] Alberto Moreira, Pau Prats-Iraola, et. al., "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," IEEE Geoscience and Remote Sensing Mag. pp. 6-43, April, 2013.
- [2] Walter G. Carrara, Ron S. Goodman and Ronald M. Majewski, Spotlight Synthetic Aperture Radar, Artech House, 1995.
- [3] Ian G. Cumming and Frank H. Wong, Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation, Artech House, 2005.
- [4] Prati. C., Rocca F., Monti-Guarnieri A. and Damonti E., "Seismic Migration for SAR Focusing: Interferometrical Applications," IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., Vol. 28, No. 4, pp. 627-640, 1990.
- [5] Alberto Moreira and Yonghong Huang, "Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation," IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., Vol. 32, No. 5, pp. 1029-1040, 1994.
- [6] Charles V. Jakowatz, Jr, et. al., Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach, Springer, 1996.
- [7] Armin W. Doerry, "Synthetic Aperture Radar Processing with Tiered Subapertures," Sandia National Lab. Report SAND04-1390, 1994.
- [8] Neall E. Doren, "Space-Variant Post-Filtering for Wavefront Curvature Correction in Polar-Formatted Spotlight-Mode SAR Imagery," Sandia National Lab. Report SAND99-2706, 1999.
- [9] L. R. Rabiner, et. al., "The Chirp Z-Transform Algorithm," IEEE Trans. Audio & Elec., Vol. AU-17, No. 2, pp. 86-92, June, 1969.