

CDGPS의 요동 측정 결과를 이용한 Spotlight SAR 영상 형성에 관한 연구

황정훈^{*,1)} · 고영창¹⁾ · 김소연¹⁾ · 권경일¹⁾ · 윤상호¹⁾ · 김형석¹⁾ · 신현익¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

A Study on Spotlight SAR Image Formation by using Motion Measurement Results of CDGPS

Jeonghun Hwang^{*,1)} · Young-Chang Ko¹⁾ · So-Yeon Kim¹⁾ · Kyoung-Il Kwon¹⁾ · Sang-Ho Yoon¹⁾ · Hyung-Suk Kim¹⁾ · Hyun-Ik Shin¹⁾

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

(Received 10 August 2017 / Revised 5 January 2018 / Accepted 9 February 2018)

ABSTRACT

To develop and evaluate the real-time SAR(Synthetic Aperture Radar) motion measurement system, true antenna phase center(APC) positions during SAT(Synthetic Aperture Time) are needed. In this paper, CDGPS(Carrier phase Differential Global Positioning System) post processing method is proposed to get the true APC position for spotlight SAR image formation. The CDGPS position is smoothed to remove high frequency noise which exists inherently in the carrier phase measurement. This paper shows smoothed CDGPS data is enough to provide the true APC for high-quality SAR image formation through motion measurement result, phase error estimation and IRF(Impulse Response Function) analysis.

Key Words : SAR(영상레이다), CDGPS(캐리어 위상 차분 위성 항법 장치), Smoothing Technique(평탄화 기법), Back-Projection Algorithm(역투영 알고리즘), Autofocus(자동 초점)

1. 서론

합성 개구면 레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR) 또는 영상 레이더라고 불리는 기술은 항공기 또는 위성에 탑재 되어 운용 하게 되며, 전자파를 송신 하고

목표 지역의 반사 신호를 수신하여 영상을 형성한다. 전자파를 사용하므로 주야간 및 날씨에 상관없이 전천후로 운용이 가능하여 민간 목적 뿐 아니라 군사적 목적으로 다양하게 활용되고 있다.

특히 항공기에 탑재 되어 운용한다고 했을 때, 바람의 영향 및 비행체 진동 등으로 인해 이상적인 직선 비행경로에서 벗어나 요동이 발생 하게 된다. 이를 요동 보상(Motion Compensation) 알고리즘으로 극복하기

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

위해서는, SAR 안테나의 위상 중심점(Antenna Phase Center, APC)의 위치를 정확히 측정하기 위한 요동 측정 시스템의 개발이 필요하다^[1,2]. 실시간 SAR 요동 측정 시스템을 개발하고 평가하기 위해서는, 무엇보다도 먼저 영상 획득 구간(Synthetic Aperture Length, SAL) 동안 가장 정확한 APC 위치를 측정하여 이를 기준 위치로 정하고, 영상 형성 알고리즘에 의한 열화가 없는 방식으로 SAR 영상을 형성하고 그 결과를 비교/분석하여 기준 위치로서의 유효성을 확인하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 CDGPS(Carrier phase Differential Global Positioning System, 반송파 차분 위성 항법)를 지상에서 후처리한 결과를 기준 APC 위치로 사용하기 위하여, 항공기를 이용한 SAR 테스트 베드 구축^[3]시, 항공기에서 CDGPS 데이터를 획득할 수 있도록 장비를 구성하였다. 비행 중 획득된 GPS 데이터는 지상에서 후처리하여, 고해상도(spotlight) SAR 영상 형성에 이용하였다. SAR 영상의 대표적인 품질 지표인 해상도 및 부엽 성능을 SAR 영상을 비교/분석함으로써 CDGPS를 이용한 기준 위치의 유효성을 확인하였다. 이를 통해서 CDGPS를 이용한 영상이 실시간 SAR 요동 측정 시스템의 개발 및 평가뿐만 아니라, 새로운 요동 보상 알고리즘, 영상 형성 알고리즘, 그리고 자동초점(Autofocus, AF) 알고리즘 개발에서 기준 영상으로 활용 가능함을 확인하였다.

2. CDGPS 항법 자료 저장기 구성 및 지상 처리

CDGPS 또는 RTK(Real Time Kinematics)는 GPS 위성에서 이동국(항공기)에 장착되어 있는 수신기 안테나까지의 도달 시간을 나타내는 C/A(Coarse Acquisition) 코드 반송파 측정치와, 지상에 고정되어 정확한 위치를 알고 있는 기준국에서 동시에 측정된 반송파 측정치를 모두 사용하여 상대측위기법을 통해 mm급의 정확도를 가지는 위치를 계산한다. 정밀한 반송파 위상 추적을 위해 기준국의 위치는 이동국과 기준국 사이의 전리층에 의한 전파 지연차, 대류층 지연오차, 위성 궤도오차 등을 고려해 이동국으로부터 약 30 km 이내 위치한 곳을 선정해야 한다^[4].

2.1 CDGPS 항법 자료 저장기 구성 및 기능

CDGPS 후처리를 위해 이동국/기준국의 GPS 수신기

를 통해서 위성의 궤도 정보와 상태(Almanac), 이력정보(Ephemeris), 전리층 정보(Ionospheric) 그리고 위성파 수신기 사이의 거리 정보를 획득한다. Fig. 1은 항공기 요동 측정을 위한 GPS 항법 자료 저장용 장비 구성을 나타낸다. 이동국과 기준국 모두 동일한 Novatel의 OEM628^[5] GPS 수신기를 사용하였고, GPS 안테나는 Antcom의 42AT1 모델^[6]을 사용하였다. OEM628은 C/A코드 기반 약 1.2 m, RTK 기반 10 mm + 1 ppm의 수평 정확도를 갖는 위치 좌표를 출력한다.

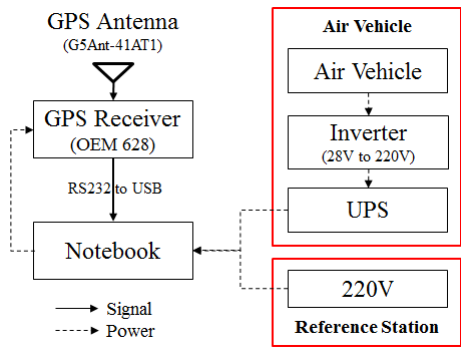


Fig. 1. Block diagram of the GPS receiver

상대측위기법에 의한 정밀한 위치 측정을 위해서는 영상 획득 시간 동안 기준국의 정확한 위치가 필요하다. 현재 국토 정보 지리원은 수평 5 mm + 1 ppm, 수직 10 mm + 2 ppm 위치오차를 가지는 통합기준점^[7]을 전국에 약 500개 설치하여 측량분야의 기준점으로 제공하고 있다. 하지만 SAR 임무 지역의 항공기 운용 반경 30 km 이내에는 이러한 통합기준점이 존재하지 않았기에 별도의 방안 구성이 필요하게 되었다.

미국 항공우주국(NASA)에서는 임의의 위치에서 획득한 GPS 데이터를 온라인으로 입력하면 GDGPS(Global Differential GPS) 기법으로 정확한 위치 좌표를 사용자에게 제공하는 APPS(Automatic Precise Positioning Service)를 운용하고 있다^[8]. APPS에 의한 위치 정확도는 절대위치 오차가 10 mm 미만이라고 알려져 있으며, 통합기준점의 위치 정확도와 큰 차이가 없기에 우리는 비행 시험동안 임의 위치에 설정한 기준국과 APPS를 이용해 기준국의 위치 좌표를 계산하였다. CDGPS 후처리를 위해서는 상용 프로그램인 Septentrio사의 PP-SDK(Post Processing Software Development Kit)^[9]를 사용하였다. CDGPS 후처리 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

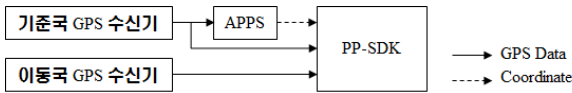


Fig. 2. Block diagram of the CDGPS post processing

2.2 정지 상태 CDGPS 처리결과 정확도 분석

CDGPS 후처리 결과의 정확도를 확인하기 위해 정지 상태에서 기준국 위치 대비 위치 오차를 분석하였다. 이를 위해 정확한 위치를 알고 있는 고정된 지점에서 GPS 수신기를 안테나에 연결하고 약 1시간 동안 100 Hz의 GPS 데이터를 획득하였다.

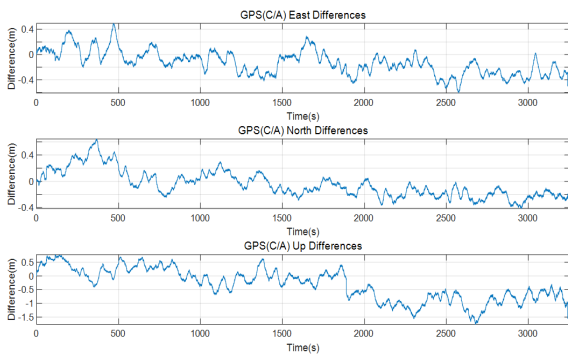


Fig. 3. Differences of GPS east, north, and up

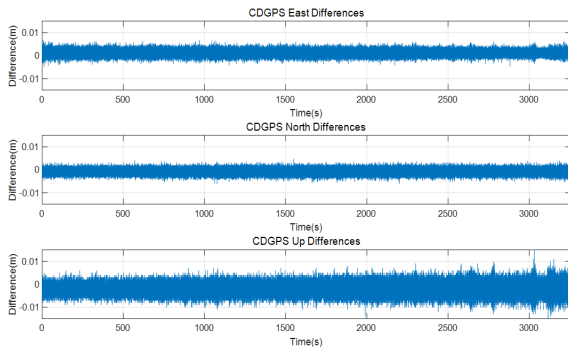


Fig. 4. Differences of CDGPS east, north, and up

Fig. 3은 C/A코드 기반 GPS 좌표의 시간별 East, North, Up 방향 상대 위치 변화량을 나타낸다. East와 North 방향은 약 1 m 이내, Up 방향은 약 2 m 이내의 상대 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4는 동일한 GPS 데이터를 CDGPS로 후처리 하여, 각 방향의 상대위치 변화량을 나타내었다. 상대측위기법을 이용한 위치 보정으로 C/A코드 기반 GPS 오차 대

비 East, North, Up 모든 방향에서 정확도가 대폭 향상되어 East, North 방향은 약 10 mm, Up 방향은 약 10~20 mm 이내의 상대 오차를 나타내고 있음을 확인하였다. 특히 Up 방향의 상대 위치 보정 정확도가 크게 향상되었음을 쉽게 확인할 수 있다.

3. CDGPS에 의한 요동 측정 결과

본 논문에서 제시한 CDGPS 활용 기법의 성능 검증을 위한 자체 비행 시험의 목표 성능 및 주요 SAR 체계 변수를 아래 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Main system parameters

제 원	값
Operating Frequency (Hz)	X-band
Flight Altitude (ft)	10,000
Flight Velocity (m/s)	60.8
Slant Center Range (km)	15.5
Range / Azimuth Resolution (m)	< 1

Spotlight 모드로 서브미터 급 SAR 영상을 형성하며, 영상 획득 기하를 아래 Fig. 5에 나타내었다. 비행체 진행 방향 기준 90°(Broadside) 방향의 표적에 대한 원시 데이터를 획득 하였고, 동시에 앞서 설명한 GPS 정보 저장을 별도로 수행하였다. GPS의 자료 획득 빈도수는 20~100 Hz 사이에서 설정할 수 있으나, 체계 설계상 도출한 요구 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency, PRF)는 수백 Hz 이상이므로 실제 펄스 방사 위치를 구하기 위해서는 보간(interpolation) 적용이 반드시 필요하다. 보간 오차를 줄이기 위해서는 획득 빈도수를 높이는 것이 유리하며, 우리는 여기에 spline 보간법을 적용하였다.

SAR의 영상 획득 동안, APC의 실제 방사 위치와 APC의 측정 위치 사이의 평균적인 거리 차이인 절대 거리 오차에 의한 영향은, SAR 영상에서 절대 기하 위치 편차 및 QPE(Quadratic Phase Error) 형태의 단순 오차로 나타나게 되므로, 시스템 규격 수용 및 AF에 의한 성능 개선이 충분히 가능하다. 반면 절대 거리 오차를 무시하고 측정 위치에서 실제 요동의 형태에 더해져 나타나는 상대 위치 오차만을 고려한다고 했

을 때, 오차의 진폭 및 주파수 특성에 따라 다양한 형태로 나타날 수 있으며, 저주파 형태의 오차로 인한 열화는 AF에 의해 상당 부분 성능 개선이 가능하나, 고주파 형태의 오차로 인한 열화는 AF에 의해서 성능 개선이 되지 않고, 최종 SAR 영상의 누적 부엽 성능 (Integrated Side Lobe Ratio, ISLR)을 저하 시킨다고 잘 알려져 있다^{1,2)}.

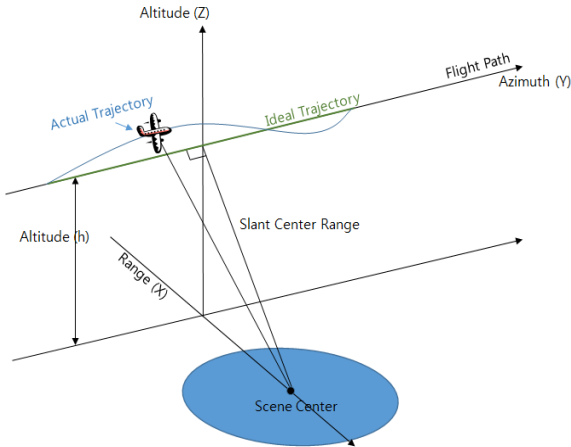


Fig. 5. SAR data acquisition geometry

Fig. 6은 비행 시험 동안의 임무 시작 위치, 종료 위치에 의한 직선 대비 고도, 거리 방향 요동을 측정 한 결과이다. 고도 방향으로선형(Linear)에 가까운 형태의 요동이 약 1 m 정도, 거리 방향으로는 2차항(Quadratic)과 유사한 형태의 요동이 약 0.8 m 이내로 직선 비행 대비 편차가 발생하였음을 알 수 있다.

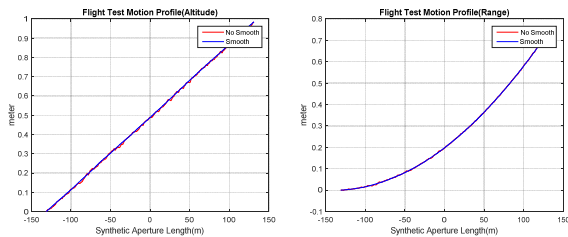


Fig. 6. Motion profile(Left : Alt, Right : Rg)

CDGPS의 절대 위치 정확도는 평균 수 cm 이내로 매우 정확한 편이기에, SAR 성능 저하에 미치는 영향이 미미하므로, 성능 저하에 크게 영향을 미치게 되는 상대 오차에 대한 분석만을 수행하기로 한다. 이를 보

다 세밀하게 수행하기 위해서 거리, 고도 방향으로의 변화량을 Fig. 7에 나타내었다. CDGPS의 상대 위치의 변화량은 무작위 오차가 포함 된 것처럼 고주파 형태를 보임을 알 수 있다. 실제 위치 변화량인지, 고주파 오차인지 식별하기 위해 고주파 성분의 제거 전/후 SAR 영상을 형성 후 분석하기로 하였다. 잡음처럼 보이는 고주파 성분을 제거하기 위해 잘 알려진 Savitzky-Golay(S-G) 평탄화(smoothing) 기법¹⁰⁾을 적용하였다. S-G 평탄화 기법은 최소자승기반의 평탄화 기법으로서 원하는 신호(desired waveform)의 형태와 크기는 유지하면서 잡음만을 평탄화하기 위해 제안되었다¹¹⁾. 따라서 CDGPS에 후처리에 의한 위치 값이 원하는 위치 정보와 고주파 잡음이 함께 나타난 경우라면 평탄화 기법에 의한 위치 오차 감소를 기대할 수 있다. Fig. 7에서 보면 위치 변화량의 고주파 성분은 평탄화 기법에 의해서 상당 부분 제거되었음을 알 수 있다. Fig. 6에도 평탄화 기법 미적용/적용 결과 사이의 상대 위치 차이를 나타내었으나, 세밀한 차이를 확인하기 위해 상대적인 거리 차이를 Fig. 8에 나타내었다. 거리 방향으로는 약 10 mm, 고도 방향으로 20 mm 이내의 상대적인 차이가 고주파 형태로 나타나고 있으며, 이는 평탄화 기법 적용으로 인해 위치 측정치에서 고주파 성분의 제거 전/후 차이에 의한 것으로 해석할 수 있다.

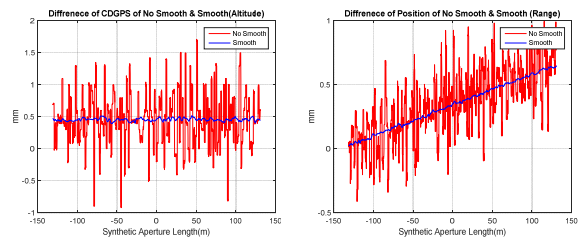


Fig. 7. Difference results(Left : Alt, Right : Rg)

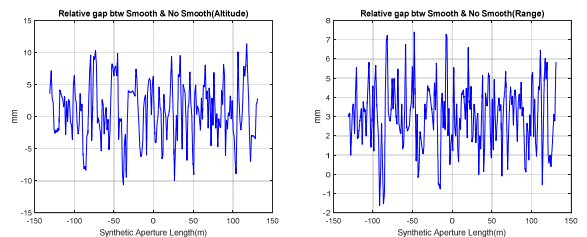


Fig. 8. Relative gap between smooth & non smooth (Left : Alt, Right : Rg)

4. SAR 영상 형성 및 성능 분석 결과

CDGPS의 위치오차는 AF에 의한 방위 위상오차 추정치로 추정하였으며, SAR의 영상 품질은 영상에 포함된 코너 반사기(Corner Reflector, CR)를 이용하여 임펄스 응답 함수(Impulse Response Function, IRF) 특성을 분석하였다. 요동의 특성 및 요동 보상 알고리즘에 의한 성능 저하를 최소화 하고, CDGPS의 위치를 사용했을 때의 영향만을 고려한 SAR 영상 성능 분석을 위하여, 역투영 알고리즘(Back-Projection Algorithm, BPA)을 적용하여 실제 SAR 영상 형성을 수행하였고, 자동 초점 알고리즘으로는 PGA(Phase Gradient Algorithm, PGA)을 적용하였다^[12]. 역투영 알고리즘은 연산량은 많은 대신, 큰 요동이 존재하는 환경에서도 공간 변이 성능 저하가 없는 영상 형성이 가능하다고 잘 알려져 있다^[12-14].

4.1 위상 오차 추정치 분석

CDGPS에 평탄화 기법 미적용/적용한 위치를 사용한 SAR 영상에서 AF에 의한 방위 위상 오차 추정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 평탄화 기법을 미적용한 경우, 방위 위상 오차 성분에 고주파 성분이 남아있는 결과가 보인다. 이에 비해 평탄화 기법이 적용된 경우, 고주파 성분 추정치가 크게 감소되었음을 확인할 수 있다. 그리고 CDGPS에 의한 위치 측정 오차는 고주파 성분을 제외하고는 거의 발생하지 않을 것을 기대하였으나, 실제로는 약 3~4 radian 정도의 크기를 갖는 2차 항(Quadratic) 위주의 오차 성분이 포함되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 2차항 형태의 위상 오차는 해상도 저하의 주된 원인이 되므로, 이로 인해서 방위 방향 해상도 및 부엽 성능에 영향이 있는지에 대한 분석은 반드시 필요하다.

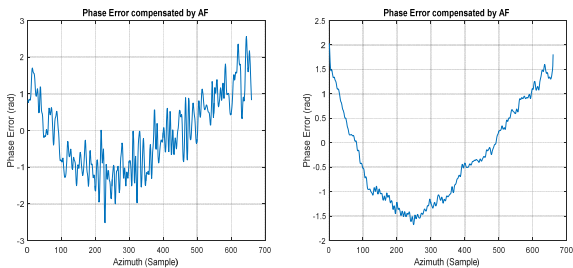


Fig. 9. Azimuth phase error estimated by AF (Left : no smoothing, Right : smoothing)

4.2 평탄화 적용에 의한 영상 형성 결과

CDGPS 위치에 평탄화 기법 적용 전/후 영상 형성 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 가로축이 거리(Range) 방향, 세로축이 비행(방위, Azimuth) 방향이 되며, AF를 적용하지 않은 영상 형성 결과이다. 평탄화 기법을 미적용한 위치 사용에 의한 SAR 영상 결과를 보면, 강한 반사 신호를 가진 표적들이 매우 긴 방위 부엽 신호 형태로 나타나 ISLR이 열화 되었음을 알 수 있으며, 영상 전체적으로 방위 부엽 성능이 크게 저하되었음을 쉽게 확인할 수 있다. 반면 평탄화 기법을 적용한 위치 사용 시, 방위 부엽 성능이 크게 개선되어, 방위 방향 긴 부엽신호 형태가 전혀 보이지 않으며, 영상 전체적으로도 ISLR 개선 효과가 뚜렷함을 확인할 수 있다. 즉 이러한 결과는 Fig. 6, 8에 나타난 위치 차이 변화량이 실제 APC의 위치 변화가 아닌 CDGPS에 의해 야기된 고주파 형태의 잡음에 의한 오차 성분으로 쉽게 분석 할 수 있다.

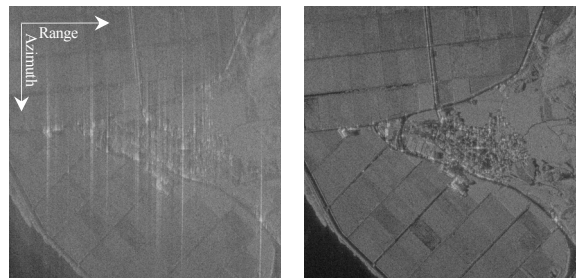


Fig. 10. SAR image by CDGPS before AF (Left : no smoothing, Right : smoothing)

4.3 CDGPS 적용 기법의 SAR 영상 성능 분석

CDGPS 위치에 평탄화 기법을 적용한 경우의 성능 분석을 위해 일반적인 GPS/IMU에 의한 항법 위치로 SAR 영상 형성한 결과와 비교 분석을 수행하기로 한다. AF를 적용하지 않은 영상 형성 결과를 Fig. 11에 나타내었다. GPS/IMU 영상의 왼쪽 하단을 보면 어두운 지역에 방위 방향으로 잡음처럼 긴 하얀 선들이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 GPS/IMU 위치 정보의 특성상 주기적인 GPS 위치 보정이 들어가게 되며, 이때 마다 임펄스 형태의 위치 점핑이 발생해 방위 부엽 성능이 저하되어 나타나는 현상으로 분석할 수 있다. 영상에서 SNR이 낮은 지역에서만 나타나는 것처럼 보이나, 실제 표적의 세기에 따른 정도의 차이가 있을 뿐 영상 전체적으로 방위 부엽 성능이 열화 되

어 나타나는 결과라고 할 수 있다. 이와 달리, CDGPS 평탄화 기법의 영상에서는 그러한 현상이 전혀 나타나지 않고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.

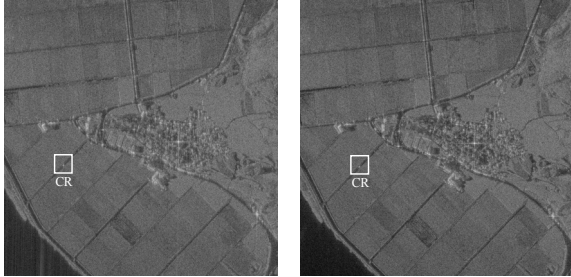


Fig. 11. SAR image formation results before AF (Left : GPS/IMU, Right : CDGPS smoothing)

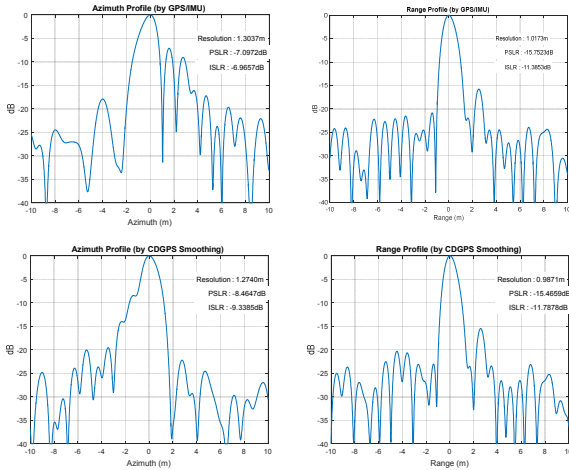


Fig. 12. IRF analysis results on CR before AF (Up : by GPS/IMU, Down : by CDGPS smoothing)

보다 엄밀한 성능 분석을 위해 Fig. 11의 CR에 의한 IRF 분석을 수행하여 Fig. 12에 나타내었다. 먼저 방위 방향의 성능을 분석해 보면, 해상도 및 부엽 성능 모두 CDGPS 평탄화 적용한 결과가 우수함을 확인할 수 있으며, 거리 방향에서도 침두 부엽 성능(Peak Side Lobe Ratio, PSLR)의 미미한 차이를 제외하고 CDGPS 평탄화 적용한 결과가 우수함을 확인할 수 있다. 다만 CDGPS 평탄화 기법으로 고주파 오차를 제거하더라도 남은 잔여 오차 성분으로 인하여 방위 해상도가 Table 1의 목표성능을 일부 벗어나고 있으므로, AF에 의한 최종 성능 개선 가능여부 확인 및 성

능 분석을 수행하기 위하여 CR에 대해 AF 적용 후 IRF 분석 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13에서의 IRF 분석 결과, Fig. 12에서의 방위 성능 저하 결과가 AF에 의해서 쉽게 Table 1에서 제시한 목표 성능 달성이 가능함을 확인하였다. 즉 CDGPS를 후처리하고 여기에 평탄화 기법을 적용한 위치 정보는 절대 위치의 정확도 뿐 아니라, 상대 위치 정확도 측면에서 AF에 의한 성능 개선이 충분히 가능한 수준의 잔여 위치 오차 정확도를 제공한다. 그러므로 CDGPS보다 절대/상대 위치 정확도가 떨어지는 GPS/IMU를 기반으로 실시간 요동 측정 시스템 개발 시 위치 측정 성능 비교를 위한 기준 위치로서 충분히 유효함을 확인 하였다.

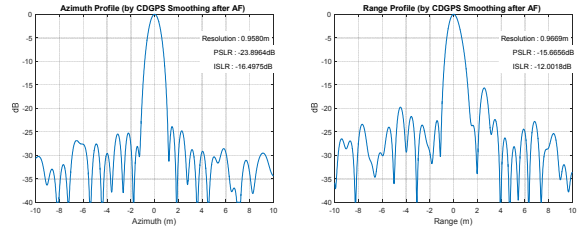


Fig. 13. IRF analysis results on CR after AF

5. 결론

실시간 SAR 전용 요동 측정 시스템을 개발하고, 평가하기 위한 그 첫 단계는 APC의 정확한 절대/상대 위치 측정이다. 이를 위한 방안으로 우리는 CDGPS 후처리 결과에 평탄화 기법을 적용하여 이를 APC의 기준 위치로 사용하는 방식을 제안하였고, 평탄화가 적용된 CDGPS의 위치 정보를 비행시뮬로부터 획득한 실제 SAR 원시데이터에 적용하여 영상 형성을 수행하고 그 성능을 비교/분석 하였다. CDGPS의 위치 정보에 포함되는 고주파 잡음은 SAR 영상의 ISLR 성능을 크게 저하시키게 되나, 평탄화 기법을 적용할 경우 영상의 품질을 크게 개선할 수 있음을 확인하였다. 이를 일반적인 GPS/IMU 위치 데이터를 적용한 영상 형성 결과와 비교 분석을 수행한 결과, CDGPS 평탄화 기법을 적용했을 때, 해상도뿐만 아니라 부엽 성능 측면에서 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 다만 방위 방향 해상도, 부엽 성능은 잔여 위치 오차로 인해 이상적인 IRF 특성 대비 다소 저하되는 면이 있으나,

AF 적용 이후 최종 해상도, 부엽 성능 개선이 가능한 정도의 오차임을 확인하였다. 결론적으로 CDGPS를 이용한 영상 형성 결과의 성능 분석을 통해 CDGPS에 의한 위치가 SAR 요동 측정 시스템을 개발하고 평가하기 위한 기준 위치로서 유효함을 확인 하였다.

References

- [1] Walter G. Carrara, Ron S. Goodman and Ronald M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms," Artech House, 1995.
- [2] Theodore J. Kim, J. Rick Fellerhoff, Stewart M Kohler, "An Integrated Navigation System Using Carrier Phase for Real-Time Airborne Synthetic Aperture Radar(SAR)," NAVIGATION, Journal of The Institute Navigation, Vol. 48, No. 1, pp. 13-24, Spring 2001.
- [3] Hyun-Ik Shin, Kyoung-Il Kwon, Sang-Ho Yoon, Hyung-Suk Kim, Jeonghun Hwang, Young-Chang Ko, Eung-Noh You, and Jin-Woo Kim, "SAR Test-bed to Acquire Raw Data and Form Real-time Image," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 181-186, April, 2017.
- [4] Jong-Seong Yoon, Byung-Guk Kim and Chang-No Lee, "GPS/INS Aerotriangulation Using CORS Observations," The Korean Society for Geospatial Information System, Vol. 17, No. 1, pp. 71-78, 2009.
- [5] Receivers OEM628 Manuals, Novatel.
- [6] G5Ant-42AT1-A Manuals, Antcom.
- [7] National Geographic Information Institute(<http://www.ngii.go.kr>)
- [8] APPS(<http://apps.gdgps.net/>), NASA.
- [9] PP-SDK, <http://www.septentrio.com/>, Septentrio.
- [10] A. Savitzky and M. J. E. Golay, "Soothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures," Anal. Chem., Vol. 36, pp. 1627-1639, 1964.
- [11] R. W. Schafer, "What is a Savitzky-Golay Filter?," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 111-117, July, 2011.
- [12] Jeonghun Hwang, Whan-Woo Kim, "A Study on Autofocus Method for Back-Projection Algorithm under the Squint Mode in Synthetic Aperture Radar," Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 54. No. 7, pp. 1069-1077, July, 2017.
- [13] Ali F. Yegulalp, "Fast Backprojection Algorithm for Synthetic Aperture Radar," In Proceedings 1999 IEEE Radar Conference, Waltham, MA, pp. 60-65, April 20-22, 1999.
- [14] LARS M. H. ULANDER, HANS HELLSTEN and GUNNAR STENSTRÖM, "Synthetic-Aperture Radar Processing Using Fast Factorized Back-Projection," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, No. 3, pp. 760-776, July, 2003.