

Spotlight SAR 신호처리기법 FSA를 이용한 위성 자세오차로 인한 위상오차 영향분석 및 보정

The Effect Analysis and Correction of Phase errors by Satellite Attitude Errors
using the FSA for the Spotlight SAR Processing

심 상 훈*

Shim, Sang-Heun

ABSTRACT

In this paper, we have described and simulated the effect analysis and correction of phase errors in the SAR rawdata induced by satellite attitude errors such as drift, jitter. This simulation is based on the FSA(Frequency Scaling Algorithm) for high resolution image formation of the Spotlight SAR. Phase errors produce the degradation of SAR image quality such as loss of resolution, geometric distortion, loss of contrast, spurious targets, and decrease in SNR. To resolve this problem, this paper presents method for correction of phase errors using the PGA(Phase Gradient Algorithm) in connection with the FSA. Several results of the phase errors correction are presented for Spotlight SAR rawdata.

주요기술용어(주제어) : Spotlight SAR Processing, Frequency Scaling Algorithm, Satellite Attitude Error, Phase Error, Phase Gradient Algorithm

1. 머리말

SAR(Synthetic Aperture Radar, 영상 레이더)는 지상 표적에 전자파를 방사하고 반사되어온 신호를 합성 처리하여 영상을 획득하는 능동센서로, 주야간, 강우, 구름 등 기상이나 일조에 크게 영향을 받지 않고, 전천후로 관심지역에 대한 영상을 획득할 수 있다.

Spotlight SAR는 영상획득지역을 보다 긴 시간 동

안 빔이 조사되도록 안테나 포인팅을 조향하여, 영상 획득지역에 대한 데이터 합성 개구 구간을 보다 길게 함으로써 고해상 영상을 획득하는 방식이다. 일반적으로 고해상 영상 획득을 위해 Spotlight SAR의 송신펄스 대역폭은 수 백 MHz 정도로 매우 크고, 샘플링 대역폭도 그 이상으로 커야한다. 따라서 Spotlight SAR 시스템 설계 시 샘플링 대역폭을 줄이기 위해서 수신단에서 dechirp를 수행한다.

이러한 Spotlight SAR 방식으로 획득한 데이터 처리 기법으로 최근 주목받고 있는 알고리즘이 FSA(Frequency Scaling Algorithm)이다^[1]. FSA가 거리 방향으로 dechirp된 데이터를 처리할 수 있기 때문이다. 그리고 frequency scaling 함수를 이용하여

† 2007년 2월 2일 접수~2007년 5월 18일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : ssheun@hanmail.net

RCMC(Range Cell Migration Correction)을 보간(interpolation) 과정없이 수행하기 때문에 데이터 처리 속도도 빠르다.

본 논문은 이러한 FSA를 기반으로 SAR 위성 자세오차로 인해 발생하는 SAR 획득신호 내 위상오차가 Spotlight SAR 영상에 미치는 영향을 분석해보고, 대표적 Autofocus 기법인 PGA(Phase Gradient Autofocus)를 FSA에 결합하는 새로운 방식으로 위상오차를 추정 및 보정해 본다.

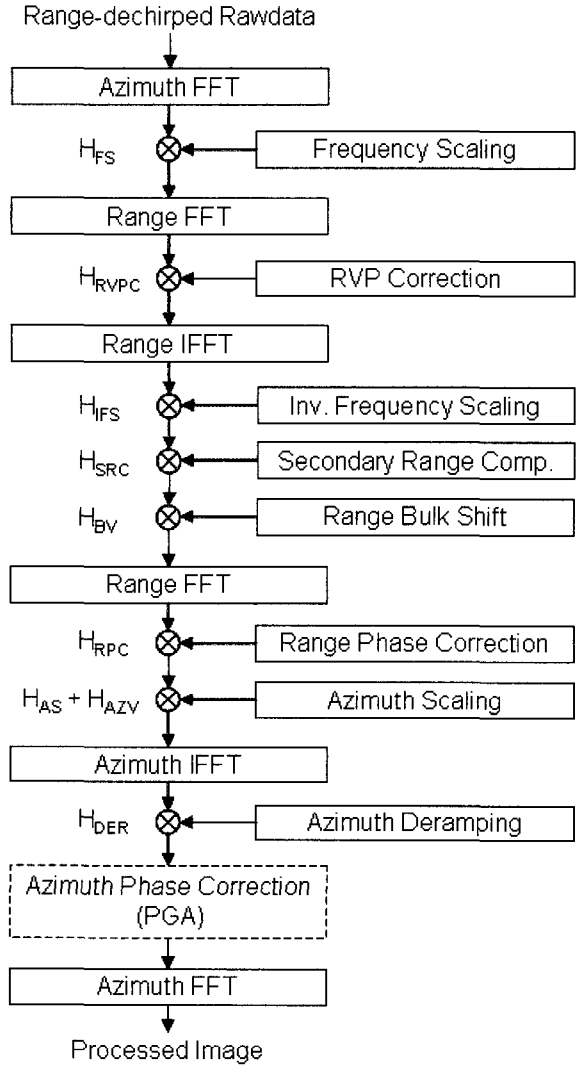
SAR 신호 내 위상오차는 해상도 저하, 기하정보 왜곡, SNR 감소 등 SAR 영상 품질 저하를 발생시키기 때문에, SAR 영상형성 시 위상오차 보정은 매우 중요하다. 특히 Spotlight SAR는 고해상 영상을 획득해야하므로 위상오차 보정이 더욱 중요하다. 따라서 본 논문에서 Spotlight SAR 영상형성기법인 FSA에 적용할 수 있는 위상오차 보정 기법으로 PGA를 제안하고 시뮬레이션을 통해서 제안 방식의 타당성을 검증해본다.

2. Frequency Scaling 알고리즘

본 논문에서 위성 Spotlight SAR 데이터 처리를 위해 사용한 frequency scaling 알고리즘의 기본 흐름은 그림 1과 같다.

본 절의 FSA에 대한 설명은 참고문헌 [1]의 내용을 인용하여 정리한 것이다. 그리고 그림 1 흐름도의 점선 부분은 위상오차 추정 및 보정을 위해 FSA에 새롭게 추가 적용해본 PGA 과정이다. 이 과정에 대한 상세 설명은 5절에 기술한다.

FSA의 Spotlight SAR 데이터 처리 과정을 수식 모델을 이용하여 설명하면 다음과 같다. 우선, 직선 비행 및 수신단에서 dechirp을 수행하는 경우, $t = 0$, r_0 에 위치한 표적의 Spotlight SAR 수신신호 모델은 다음 식 (1)과 같이 정의된다.



[그림 1] PGA를 결합한 FSA 흐름도

$$\begin{aligned}
 s(t, \tau; r_0) = & C \cdot \text{rect} \left[\frac{\tau - 2r(t; r_0)}{T_p} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t - \frac{t_{start} + t_{end}}{2}}{T_{az}} \right] \\
 & \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(t; r_0) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi k_r}{c} (r(t; r_0) - r_c) \left(\tau - \frac{2r_c}{c} \right) \right] \\
 & \cdot \exp \left[j \frac{4\pi k_r}{c^2} (r(t; r_0) - r_c)^2 \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)에서 t 는 방위 시간, τ 는 거리 시간, T_p 는 송신 펄스폭, T_{az} 은 방위 합성 개구 시간, k_r 는

chirp 변조율, r_c 는 센서와 데이터 획득영역 중심 간의 최단 경사거리, f_a 는 방위 주파수, f_r 은 거리 주파수, r_0 는 안테나와 표적 사이의 최단 거리, r 은 방위 위치에 따른 표적까지의 거리이다.

그리고 첫 지수항은 방위 방향 도플러 변조신호이고, 두 번째 지수항은 거리방향 신호로 $r(t; r_0)$ 에 대응하는 일정한 주파수를 갖는 사인파 신호이다. 마지막 지수항은 RVP(Residual Video Phase)이다.

식 (1)의 신호를 방위 FFT하여 거리 도플러 영역으로 변환하면 식 (2)와 같다.

$$s(f_a, \tau; r_0) = C \cdot \left\{ \text{rect} \left[\frac{\tau - \frac{2r(t; r_0)}{c}}{T_p} \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \cdot \beta(f_a) \right] \right. \\ \left. \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi k_r}{c} \left(\frac{r_0}{\beta(f_a)} - r_c \right) \left(\tau - \frac{2r_c}{c} \right) \right] \right. \\ \left. \cdot \text{src} \left(f_a, \tau - \frac{2r_c}{c}; r_0 \right) \right\} * \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_r \cdot \tau^2 \right] \quad (2)$$

$$\text{src} (f_a, \tau; r_0) = \exp \left[-j \frac{2\pi r_0 k_r^2 \lambda \beta^2 - 1}{c^2} \tau^2 \right. \\ \left. + j \frac{2\pi r_0 k_r^3 \lambda^2 \beta^2 - 1}{c^3} \tau^3 \right] \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서, 인자 β 는 RCM을 나타내며, 식 4와 같이 방위주파수에 따라 값이 결정된다.

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \left(\frac{f_a \cdot \lambda}{2v} \right)^2} \quad (4)$$

RCM을 보상하기 위해서, 거리 시간 영역에서 식 (2)의 신호에 곱해지는 frequency scaling 함수 H_{FS} 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$H_{FS}(f_a, \tau) = \exp \left[j \cdot \pi \cdot k_r \cdot \tau^2 \cdot (1 - \beta) \right] \quad (5)$$

다음으로, 거리 신호의 dechirp 과정에서 발생된 RVP를 보상하기 위해서, 거리 FFT 수행 후 식 (6)의 H_{RVPC} 를 곱한다.

$$H_{RVPC}(f_a, f_r) = \exp \left[-j \frac{\pi \cdot f_r^2}{k_r \cdot \beta} \right] \quad (6)$$

이제, frequency scaling 과정에서 발생된 거리 방향 선형 주파수 변조를 제거하기 위해서, inverse frequency scaling 함수 H_{IFS} 을 적용하여 역 스케일링을 수행한다.

$$H_{IFS}(f_a, \tau) = \exp \left[j \cdot \pi \cdot k_r \cdot \tau^2 \cdot (\beta^2 - \beta) \right] \quad (7)$$

Inverse frequency scaling 후 신호는 다음 식으로 표현된다.

$$s(f_a, \tau \cdot \beta; r_0) = C \cdot \text{rect} \left[\frac{\tau \cdot \beta - \frac{2r_c}{c}}{T_p} \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi k_r}{c \cdot \beta} (r_0 - r_c) \cdot \beta \right] \\ \cdot \left(\tau \beta - \frac{2r_c}{c} \right) \cdot \text{src} \left(f_a, \tau \cdot \beta - \frac{2r_c}{c}; r_0 \right) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi r_0}{\lambda} \cdot \beta \right] \quad (8)$$

Inverse frequency scaling 후, RCMC를 위한 2차 거리압축 및 bulk shift가 수행된다. 2차 거리압축을 위해서, 근사화 $r_0 \approx r_c$ 가 요구되며 2차 거리압축 위상함수 H_{SRC} 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$H_{SRC}(f_a, \tau; r_c) = \text{src} \left(f_a, \tau \cdot \beta - \frac{2r_c}{c}; r_c \right)^* \\ = \exp \left[+j \frac{2\pi r_c k_r^2 \lambda \beta^2 - 1}{c^2} \left(\tau \cdot \beta - \frac{2r_c}{c} \right)^2 \right. \\ \left. - j \frac{2\pi r_c k_r^3 \lambda^2 \beta^2 - 1}{c^3} \left(\tau \cdot \beta - \frac{2r_c}{c} \right)^3 \right] \quad (9)$$

그리고 bulk range shift 위상함수 H_{BV} 는 다음

식과 같다.

$$H_{BV}(f_a, \tau) = \exp \left[j \frac{4\pi k_r}{c} r_c \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \left(\tau \beta - \frac{2r_c}{c} \right) \right] \quad (10)$$

Bulk range shift 후 거리 방향 FFT를 수행하고, 거리 위상 보증을 위해서 H_{RPC} 가 곱해진다.

$$H_{RPC}(f_a, f_r; r_c) = \exp \left[j \frac{4\pi r_c}{c} \left(\frac{f_r}{\beta} \right) \right] \cdot \exp \left[-2\pi \tau_0 f_r \right] \quad (11)$$

식 (11)에서, τ_0 는 첫 번째 range bin의 range time delay이다. 거리 도플러 영역 내 거리 압축 신호는 식 (12)와 같으며, 거리 신호는 sinc 함수로 표현되고, 압축되지 않은 방위 신호는 chirp 신호로 표현된다.

$$s \left(f_a, \frac{f_r}{\beta}; r_0 \right) = C \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi \cdot r_0 \cdot \beta}{\lambda} \right] \cdot \text{sinc} \left[\pi \frac{T_p}{\beta} \left(f_r + \frac{2 \cdot k_r}{c} \cdot (r_0 - r_c) \right) \right] \quad (12)$$

다음 과정인 방위 방향 데이터 처리는 azimuth scaling 함수 H_{AS} 을 거리압축 신호에 곱함으로써 거리-도플러 영역에서 시작된다.

$$H_{AS}(f_a, r_0; r_{scl}) = \exp \left[j \frac{4\pi \cdot r_0}{\lambda} \cdot (\beta(f_a) - 1) \right] \cdot \exp \left[-\frac{j\pi}{k_{a,scl}} f_a^2 \right] \quad (13)$$

H_{AS} 는 거리에 따라 다른 쌍곡선 형태를 보이는 방위 신호의 위상을 거리에 따라 일정한 2차 곡선 형태로 변환시킨다. 방위 스케일링은 방위 방향으로 geometric scaling 및 신호의 azimuth time shift 현상을 일으킨다.

그 결과, 신호가 scaling range r_{scl} 에 위치하지 않아서, azimuth time extension이 요구된다. Azimuth time extension을 최소화하기 위해서, 다음 선형 위

상함수를 이용하여 azimuth time shift를 보상한다.

$$H_{AZV}(f_a, r_0; r_{scl}) = \exp \left[-j \cdot 2\pi \cdot t_v(r_0; r_{scl}) \cdot f_a \right] \quad (14)$$

Time shift t_v 는 time extension T_{ext} 이 대칭이 되도록 하며, t_v 에 대한 유도 과정은 참고 문헌 [1]에 기술되어 있다. 방위 스케일링 후 방위 신호의 위상이 2차 함수 형태이기 때문에, 방위 IFFT 후에 수행되는 식 (15)의 deramp 위상함수는 방위 신호와 정확히 정합된다.

$$H_{DER}(t'_a; r_{scl}) = \exp \left[-j \cdot \pi \cdot k_{a,scl} \cdot t_a'^2 \right] \quad (15)$$

$$t'_a(r_0) = t_a - t_v(r_0), \quad t_{a,start} - \frac{T_{ext}}{2} \leq t_a \leq t_{a,end} + \frac{T_{ext}}{2} \quad (16)$$

IFFT된 방위 신호를 deramping하면 방위 신호는 사인파 신호로 변환되고, 이 신호를 방위 FFT하면 방위 압축된 최종 SAR 영상을 얻게 된다.

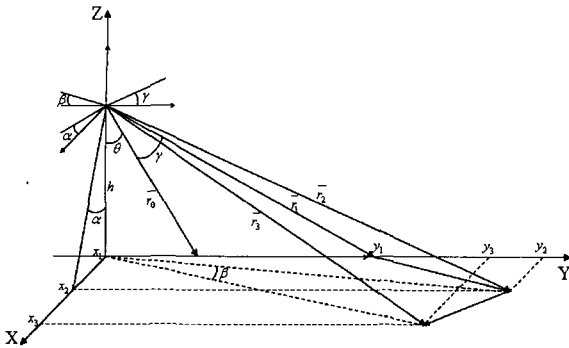
이 때, 방위 chirp 신호가 사인파 신호로 deramping 되기 때문에, 이 방위 사인파 신호에 PGA를 직접 적용하여 방위 신호 내 위상오차를 추정하여 보정할 수 있다.

3. 위성 자세오차 모델링

본 절은 위성 자세오차가 SAR 영상에 미치는 영향 분석을 위해서 pointing error, drift, jitter 및 이로 인해 발생하는 위상오차 모델을 정의한다.

가. 포인팅 오차(Pointing Error)

그림 2는 포인팅 오차각 pitch α , yaw β , roll γ 변화로 인한 안테나 빔 포인팅 이동 기하 관계를 도시한다. \bar{r}_0 는 빔 포인팅의 이상적인 벡터이다. Roll γ 로 인해 빔 포인팅 벡터는 \bar{r}_0 에서 \bar{r}_1 으로 바뀌고, pitch α 로 인해 \bar{r}_1 에서 \bar{r}_2 로 변한다. 그리고 yaw β 로 인해 \bar{r}_2 에서 \bar{r}_3 로 변경된다.



[그림 2] 포인팅 오차에 따른 빔 포인팅 이동

이러한 안테나 빔 포인팅 오차는 식 (17)과 같은 도플러 주파수를 생성한다.

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \bar{v} \cdot \bar{r}$$

$$= \frac{2v}{\lambda} \sqrt{\frac{\tan^2(\alpha) + \frac{\tan^2(\theta+\gamma)}{\cos^2(\alpha)}}{1 + \tan^2(\alpha) + \frac{\tan^2(\theta+\gamma)}{\cos^2(\alpha)}} \cdot \sin\left(\beta + \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\alpha)}{\tan(\theta+\gamma)}\right)\right)} \quad (17)$$

위 식에서, v · \bar{v} 는 위성 속도, λ 는 파장, \bar{r} 는 빔 포인팅 벡터이다. 그리고 심볼 \cdot 는 벡터의 스칼라 곱을 나타낸다.

나. 드리프트(Drift)

드리프트는 방위 합성 개구 시간 T_{az} 동안 각 축에서 일정한 변화율로 증가 및 감소하는 빔 포인팅 오차가 발생하는 것으로 정의한다. Drift 모델은 다음 식으로 정의한다.

$$e_d = A_{d,pp} \cdot t, \quad 0 \leq t \leq T_{az} \quad (18)$$

위 식에서, $A_{d,pp}$ 는 pitch α , yaw β , roll γ 에 대한 변화율(peak-to-peak)이고, t 는 방위 시간이다.

다. 지터(Jitter)

지터는 식 (19)와 같이 빔 포인팅이 각 축에 대해 사인과 형태로 변화하도록 모델링된다.

$$e_j = \sum_{n=1}^N A_{j,pp} \sin(2\pi f_n t + \phi_n), \quad 0 \leq t \leq T_{az} \quad (19)$$

위 식에서, $A_{j,pp}$ 는 pitch α , yaw β , roll γ 에 대한 jitter 오차 크기(peak-to-peak)이다. f_n 는 jitter의 주파수로 n 개로 샘플링된 주파수 범위를 갖는다. 그리고 t 는 방위 시간이고, ϕ_n 는 jitter의 초기 위상으로 랜덤 값으로 모델링한다.

라. 자세오차로 인한 위상오차 모델

위성 자세오차로 인해 발생하는 위상오차 ϕ_e 는 다음 식과 같이 모델링한다. 이 모델은 위상의 미분치가 주파수($d\phi/dt = 2\pi f$)라는 이론에 근거한다.

$$\phi_e(m) = \phi_e(m-1) + f_d(m) \cdot \frac{2\pi}{PRF} \quad (20)$$

위 식에서, $\phi_e(m)$ 은 m 번째 펄스에 삽입되는 위상오차로 초기값은 0로 가정한다. $f_d(m)$ 은 m 번째 펄스의 도플러주파수이며, 식 (17)에 각 축의 자세오차값을 대입하여 구한다.

4. 위성 자세오차 영향분석

위성 자세오차가 SAR 영상에 미치는 영향분석을 위한 시뮬레이션 수행 시 설정한 Spotlight SAR 체계 및 기하 변수는 표 1과 같다.

표 1의 변수 정의는 다음과 같다. f_c 는 캐리어 주파수, η 는 입사각, V 는 플랫폼 속도, θ_{az} 는 방위 빔폭, B 는 송신 펄스 대역폭, F_s 는 수신 펄스의 샘플링 주파수, T_p 는 펄스 길이, H 는 플랫폼 고도, PRF 는 펄스 반복 주기, r_c 는 센서와 데이터 획득영역 중심 간의 최단 거리, T_{az} 는 방위 합성 개구 시간, $\theta_{s,az}$ 는 Spotlight 빔 조향각이다.

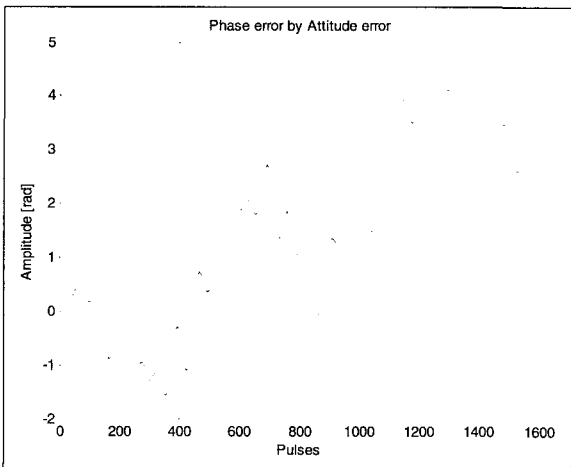
위성 자세오차는 표 2와 같이 설정한다. Drift는 데이터 획득 시 1초 동안 pitch 축으로 0.001° 발생한다고 설정한다. 그리고 jitter는 주파수 대역을 2개로 나누어 설정하며, pitch, yaw, roll 방향으로 모두 받

[표 1] SAR 체계 및 기하 변수

변수	값
f_c	9.3GHz
η	45°
V	7557.852m/s
θ_{az}	0.3°
B	25MHz
F_s	50MHz
T_p	10 μ s
H	600km
PRF	6000Hz
r_c	814783.107m
T_{az}	0.2596sec
$\theta_{s,az}$	-0.069° ~ +0.069°

[표 2] 자세오차 설정값

오차 변수	값
drift	0.001°/sec(in p-axis)
jitter	$\pm 0.001^\circ(1 \sim 50\text{Hz})$
	$\pm 0.005^\circ(50 \sim 100\text{Hz})$

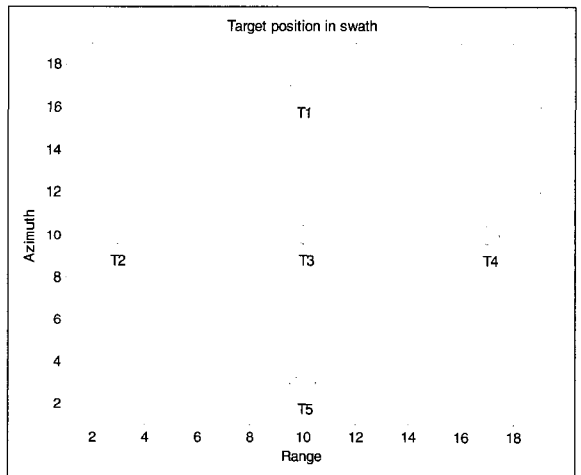


[그림 3] 자세오차로 인해 발생된 위상오차

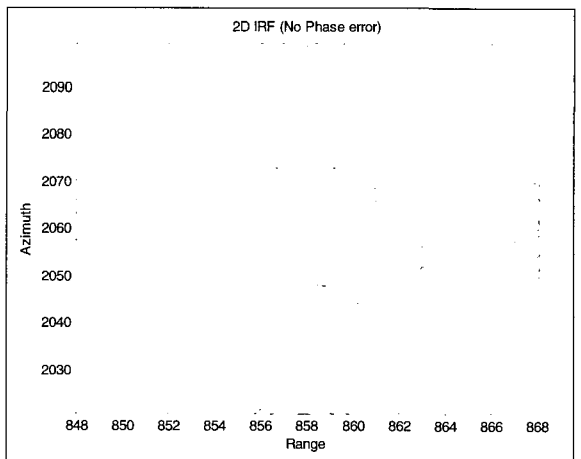
생한다고 가정한다. 이 값들은 기존 SAR 위성의 자세오차를 참고하여 설정한 모의값이다^[6].

그림 3은 설정된 자세오차로 인해 발생된 위상오차를 도시한 것이다. Spotlight SAR 획득 모의데이터 생성 시, 이 위상오차를 각 방위 펄스의 위상에 더한다. 그리고 한 펄스 내의 모든 샘플은 동일한 위상오차를 갖도록 한다.

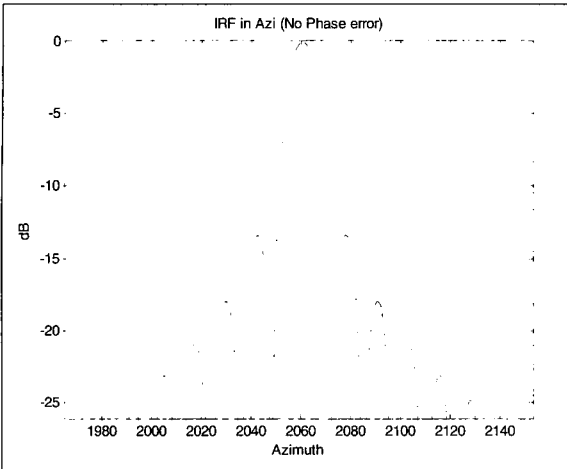
그림 4는 시뮬레이션 시 데이터 획득영역 내 위치한 점표적 5개에 대한 배치를 도시한 것이다. 데이터 획득영역은 넓이가 2698.132m(거리) × 4534.711m(방위)이고, 19 × 19 격자로 분할되어있다. 이 격자의



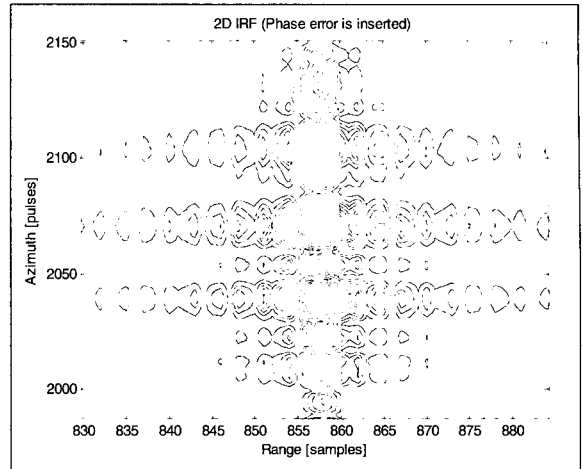
[그림 4] 설정된 점표적 위치 관계



[그림 5] 위상오차 삽입 전 2D IRF Contour(T3)



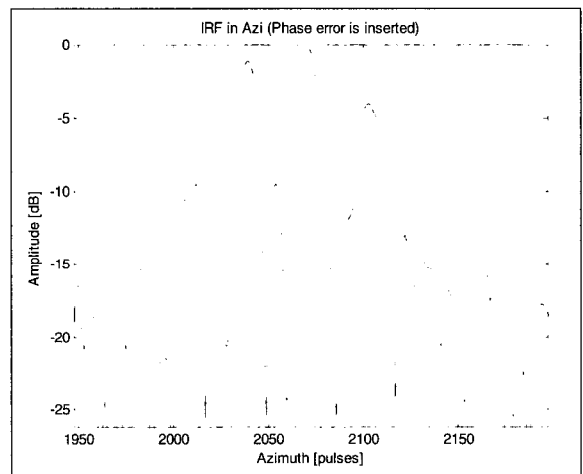
[그림 6] 위상오차 삽입 전 IRF(방위방향, T3)



[그림 7] 위상오차 삽입 후 2D IRF Contour(T3)

[표 3] 위상오차 삽입 전 방위 해상도 및 PSLR

	방위해상도[sample]	PSLR[dB]
T1	10.91	-13.22
T2	11.02	-12.58
T3	10.81	-13.34
T4	11.06	-12.52
T5	10.89	-13.24



[그림 8] 위상오차 삽입 후 IRF(방위방향, T3)

크기는 149.896m(거리) × 251.928m(방위)이다.

그림 5는 위상오차가 삽입되지 않은 SAR 원시데이터를 FSA로 처리한 결과 영상 내 점표적 T3의 IRF 영상이고, 그림 6은 점표적 T3의 방위 IRF이다. 이 영상들은 방위 샘플을 4096개로 upsampling한 결과이다.

표 3은 위상오차가 삽입되지 않은 Spotlight SAR 원시데이터를 FSA로 처리한 결과 영상 내 점표적 5개에 대한 방위해상도 및 PSLR를 측정된 결과를 정리한 것이다.

위성 자세오차는 안테나 위상 중심과 지상 표적 간의 경사거리를 변화시킨다. 따라서 방위 신호의 도플러 정보에 영향을 미쳐 위상오차를 유발시키고, 위상오차는 SAR 영상 품질을 저하시킨다. 이러한 현상은 그림 7과 8의 시뮬레이션 결과를 보면 확인할 수 있

다. 따라서 SAR 영상 품질을 향상시키기 위해서 위상오차 보정이 필요하다.

5. 자세오차로 인한 위상오차 보정

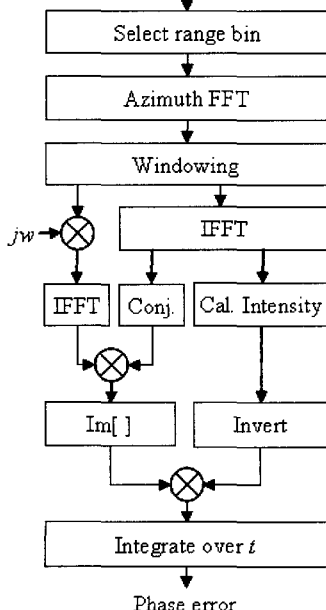
본 절은 PGA를 FSA에 적용하여, 위성 자세오차로 인해 발생한 위상오차를 추정하여 보정하는 과정을 설명하고, 시뮬레이션을 통해 위상오차 보정 결과를 제시한다. 그리고 본 절의 PGA에 대한 설명은 참고문헌 [2]의 내용을 인용하여 정리한 것이다.

그림 9에서 보듯이, PGA는 위상오차 추정을 위해 거리 압축된 데이터에서 가장 큰 에너지를 가지는 거리 공간의 부분 집합을 선택한다. 그리고 각 거리 공간의 방위신호를 압축하기 위해 방위 FFT를 수행하고, 각각의 방위 압축된 데이터로부터 최댓값을 찾는다. 다음으로 그 위치를 중심으로 방위 데이터에 윈도우를 씌운다. 나머지 여러 과정을 거쳐 시간영역 내 방위 신호의 위상오차의 미분치를 구하고 이를 적분하여 위상오차를 추정한다. 따라서 이 추정된 방위 신호의 위상오차를 제거할 수 있게 된다.

PGA의 위상오차 추정 과정을 수식으로 설명하면 다음과 같다. 우선 거리 압축된 일부 데이터를 선택한다. 선택된 거리공간 내 방위신호 $s(t)$ 는 식 21과 같이 모델링되며, 이 방위신호는 deramping된 사인파 신호이다. 이러한 신호 특성은 그림 1의 FSA 내 방위 deramping 후 신호와 동일하다. 따라서 FSA에 PGA를 적용할 수 있다.

$$s(t) = Ae^{j[\omega_0 t + \phi_0 + \phi_e(t)]}, \quad 0 \leq t \leq T_{az} \quad (21)$$

Range-compressed, Azi-deramped data



[그림 9] PGA 흐름도

위 식에서, A 는 방위 신호의 크기, ω_0 는 신호 주파수, ϕ_0 는 신호의 위상, ϕ_e 는 추정해야 할 위상오차를 나타낸다. 이 방위신호 $s(t)$ 를 방위 FFT한 $S(\omega)$ 는 다음 식과 같다.

$$S(\omega) = AT_{az} \text{sinc}[T_{az}(\omega - \omega_0)] e^{j\phi_0} * E(\omega) \quad (22)$$

푸리에 변환의 미분 특성을 이용하여 $S(\omega)$ 의 미분을 구하려면 $j\omega$ 를 곱하면 되는데 영상 내 잡음 및 클러터 등이 존재할 경우 미분치에 영향을 주게 되어 위상 오차의 미분치 추정에 오류를 발생시킨다. 따라서 잡음 및 클러터의 효과를 저지하기 위하여 윈도잉을 수행한다. $S(\omega)$ 를 윈도잉한 $S_w(\omega)$ 는 다음 식과 같다.

$$S_w(\omega) = W(\omega - \omega_0) AT_{az} \text{sinc}[T_{az}(\omega - \omega_0)] e^{j\phi_0} * E(\omega) \quad (23)$$

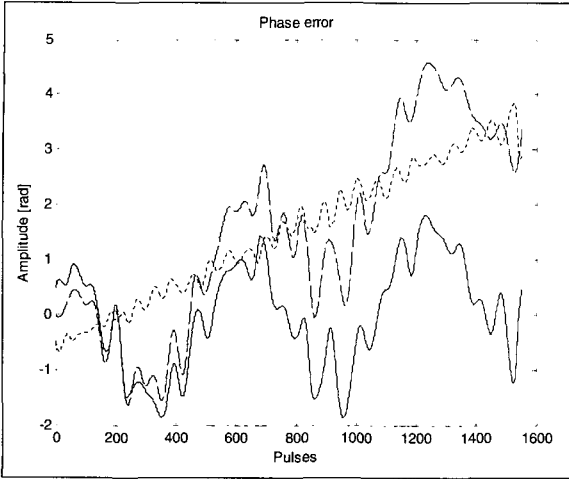
위 식에서, $W(\omega)$ 는 주파수 공간 내 윈도우 함수이다. 이를 IFFT한 $s_w(t)$ 는 식 (24)와 같다.

$$s_w(t) = Ae^{j\phi_0} e^{j\phi_e(t)} * w(t) \quad (24)$$

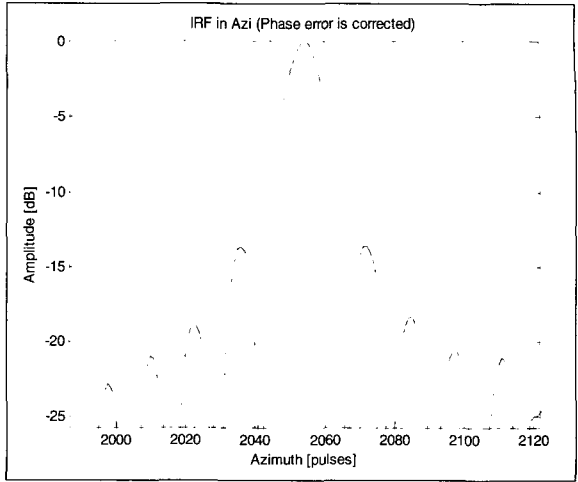
위 식에서, $w(t)$ 는 시공간에서의 윈도우 함수이다. 윈도우 함수의 변화가 위상 오차의 변화에 비하여 무시할 수 있다고 가정하면, 주어진 $s_w(t)$ 를 시공간에서 미분하는 것은 $S_w(\omega)$ 에 $j\omega$ 를 곱하는 것이다. 즉, 주파수공간에서 $S_w(\omega)$ 의 미분을 구한 뒤 IFFT하여 $\dot{s}_w(t)$ 을 구한다.

$$\dot{s}_w(t) = j\dot{\phi}_e(t) s_w(t) \quad (25)$$

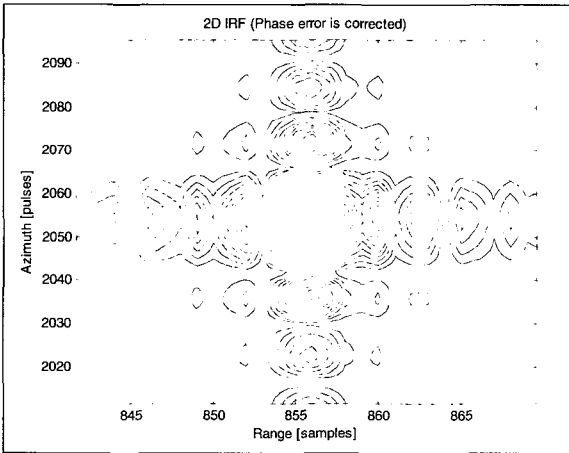
위 식을 위상오차의 미분치 $\dot{\phi}_e(t)$ 에 대하여 식 (26)과 같이 정리하여 적분하면 위상오차를 구할 수 있다.



[그림 10] PGA 적용 추정된 위상오차(solid line : 추정된 위상오차, dashed line : 삽입한 위상오차, dotted line : 삽입치와 추정치 간의 차이)



[그림 12] 위상오차 보정 후 IRF(방위방향, T3)



[그림 11] 위상오차 보정 후 2D IRF Contour(T3)

$$\hat{\phi}_e(t) = \frac{\text{Im}[\hat{s}_w(t)s_w^*(t)]}{|s_w(t)|^2} \quad (26)$$

그림 10은 FSA의 방위 deramping 된 신호에 PGA를 적용하여 추정한 위상오차를 보인다. 결과를 보면, PGA의 고유특성 상 위상오차의 선형성분은 추정되지 못했지만, 삽입된 위상오차의 고차 성분은 유사하

[표 4] 위상오차 보정 후 방위 해상도 및 PSLR

	방위해상도[sample]	PSLR[dB]
T1	10.01	-13.15
T2	10.94	-12.91
T3	9.99	-13.58
T4	11.02	-12.77
T5	10.53	-13.13

게 추정되었다.

그림 11, 12와 표 4는 추정된 위상오차를 보정하여 얻은 결과이다. 이 결과를 그림 7, 8과 비교해 보면, 위상오차가 제거되어 점표적의 IRF가 이상적인 sinc 형태로 영상화되었다. 그리고 점표적의 방위해상도와 PSLR 성능이 위상오차를 삽입하지 않은 이상적인 경우에 근사하게 향상되었다.

6. 맺음말

본 논문에서 Spotlight SAR 영상형성기법인 FSA를 이용하여 drift, jitter 등의 위성 자세오차로 인해 발생하는 SAR 데이터 내 위상오차가 SAR 영상에 미치는 영향을 분석해 보았다. 위성 자세오차로 발생

한 위상오차는 SAR 영상의 해상도 저하, 기하 정보 왜곡, PSLR 성능 저하 등의 SAR 영상 품질을 저하시켰다.

이를 해결하기 위해서, FSA에 PGA를 결합하여 위상오차를 추정하고 보정해 보았다. 그 결과, 위상오차 보정으로 SAR 영상 품질을 위상오차가 없는 경우의 영상 품질과 유사하게 향상시킬 수 있었다.

본 논문에서 제안하고 검증한, FSA에 PGA를 적용하여 위상오차를 추정하고 보정하는 방법은 실제 Spotlight SAR 영상형성 시 적용할 수 있는 효과적인 접근방식이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Mittermayer, A. Moreira, O. Loffeld, "Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm", IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing, Vol. 37, No. 5, pp.2198~2214, Sept. 1999.
- [2] Walter G. Carrara, Ron S. Goodman, Ronald M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms", Artech House, 1995.
- [3] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz. Jr, "Phase gradient autofocus - a robust tool for high resolution SAR phase correction", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 30, No. 3, pp.827~835, July 1994.
- [4] A. Moreira, J. Mittermayer, R. Scheiber, "Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol. 34, No. 5, pp.1123~1136, September, 1996.
- [5] E. Borner, R. Lord, J. Mittermayer, R. Bamler, "Evaluation of TerraSARX Spotlight Processing Algorithm, Accuracy based on a new Spotlight Raw Data Simulator", Proc. IGARSS 2003.
- [6] Michael Inngs, "Tutorial #4 - Imaging Radar As a Mature Technology", Remote Sensing Arabia - Riyadh, May 7-11, 2005.