

SAR(Synthetic Aperture Radar)Imaging 시스템에서 제안 알고리즘의 반복수행을 통한 위상오차의 기울기 추정기법 연구

김형주, 최정희
대구대학교 정보통신공학부
전화 : 053-850-4409 / 핸드폰 : 016-877-8227

The estimation of first order derivative phase error using iterative algorithm in SAR imaging system

Hyung-Joo Kim, Jeong-Hee Choi
School of Computer & Communication Engineering at Taegu University
E-mail : kimhj{choijh}@biho.taegu.ac.kr

Abstract

The success of target reconstruction in SAR(Synthetic Aperture Radar) imaging system is greatly dependent on the coherent detection. Primary causes of incoherent detection are uncompensated target or sensor motion, random turbulence in propagation media, wrong path in radar platform, and etc. And these appear as multiplicative phase error to the echoed signal, which consequently, causes fatal degradations such as fading or dislocation of target image.

In this paper, we present iterative phase error estimation scheme which uses echoed data in all temporal frequencies. We started with analyzing wave equation for one point target and extend to overall echoed data from the target scene - The two wave equations governing the SAR signal at two temporal frequencies of the radar signal are combined to derive a method to reconstruct the complex phase error function. Eventually, this operation attains phase error correction algorithm from the total received SAR signal. We verify the success of the proposed algorithm by applying it to the simulated spotlight-mode SAR data.

I. 서론

SAR(Synthetic Aperture Radar)imaging 시스템이란 비행기나 위성에 작은 송 수신 안테나를 탑재하여 물리적으로 제한된 안테나 크기를 합성함으로써, Cross-Range에 대한 해상도를 향상시켰다. 이러한 시스템에서 목표물의 정보를 성공적으로 추출해내기 위해서는 반사된 신호를 수신할 때 Coherent detection이 필수적이다. 레이더가 정해진 직선 경로를 정확히 움직이지 않고, 안테나 위상중심(APC)의 흔들림 또는 APC와 측정 지역과의 보상되지 않은 움직임들은 Incoherent detection의 요인으로 작용하며 incoherent detection은 복소 위상오차 형태로 나타나서 실제 목표물의 영상에 심각한 Degradation을 야기시켜 치명적인 결과를 초래하게 된다. 또한 복소 위상오차는 사용하는 Source 신호의 주파수와 직접적인 연관이 있어 Cross-range 고 해상도의 영상을 얻기 위해 높은 주파수의 Source 신호를 사용하는데 저해가 되는 요소다. Incoherent detection의 요인으로서는 여러 가지가 있을 수 있으나 그 중에서 목표물에 대한 움직임 오차가 가장 큰 요인이 된다. 기존에 위상오차를 제거하는 대부분의 기법들은 위상오차의 차수 모델식을 이용하여 제거하기 원하는 위상오차 차수의 계수를 추정함으로써 이루어진다. 본 논문에서는 이전의 계수추정 기법들과 다르게 위상오차 함수식을 파동방정식으로부터 직접 유도하여 위상오차를 추정한다. 그리고, 반복수행을 적용하여 알

고리즘에 재 적용시 위상오차의 대역폭을 추정함으로써 위상오차 교정 여부를 판단하게 된다. 또한 알고리즘의 성능여부를 wavefront reconstruction 기법을 적용하여 목표물을 직접 영상화함으로써 오차교정 여부를 확인하였다. 그리고, 서로 다른 위상오차에 대하여 실험한 결과 반복적용을 통하여 알고리즘이 안정함을 확인할 수 있다.

II. 시스템 모델과 제안 알고리즘

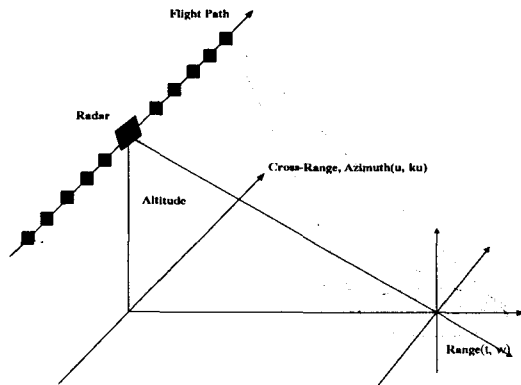


그림 1. Spotlight-mode SAR imaging 시스템 Geometry

기본적인 Imaging 시스템으로는 Two dimensional monostatic spotlight-mode SAR imaging 시스템에 대하여 고려한다. 레이더가 움직여 가는 방향을 Cross-range 혹은 Azimuth방향(parameter u, ku)이라 하고, Cross-range에 수직인 방향을 Range(거리) 방향(parameter t, w)이라 하겠다. 우선, 기본적인 SAR Geometry의 좌표를 살펴보면, Cross-range방향은 (x, y) 영역에서 $x = X_1$ 좌표를 따라 레이더가 움직이고 레이더와 목표물까지의 거리를 나타내는 좌표축, 목표물의 중심은 (x, y) 영역에서 $(0,0)$ 위치에 있다. 여기서 x 좌표는 거리를 나타내고, y 좌표는 거리방향에 수직인 방향으로의 좌표이다[그림 1]. 전파가 공기 중을 전파하는 속도를 c 라 하면, 전파의 파수 k 는 $k \equiv \frac{w}{c}$ 이다. 레이더가 움직이는 합성개구의 범위는 $[-L, +L]$ 이고, 전파형태는 구형이다. 이러한 Geometry에서 수신되는 신호는[3][6],

$$s(u, w) = \int \int f(a, b) \exp[j2k\sqrt{(X_1 + a)^2 + (u + b)^2}] dadb \quad (1)$$

앞으로 처리하게 될 신호는 Azimuth 방향으로 압축된 신호이다[10].

$$s_0(u, w) = \int \int f(a, b) g_{a,b}(u, w) dadb \quad (2)$$

$$\text{where, } g_{a,b}(u, w) \equiv \exp[-j \frac{2kb}{X_1} u + jk \frac{a^2 + b^2 - 2aX_1}{X_1}] \quad (3)$$

$g_{a,b}(u, w)$ 는 하나의 점 표적으로부터 수신되는 신호의 위상이다. 따라서, 이것은 파동 방정식을 만족하고, 파동 방정식으로부터 수식을 유도해 내면 $g_{a,b}(u, w)$ 는 항상 식(4)를 만족한다[1].

$$\frac{\partial^2}{\partial u^2} g_{ab}(u, w) + (\frac{2kb}{X_1})^2 g_{ab}(u, w) = 0 \quad (4)$$

움직임에 의한 위상오차는,

$$\Omega_e(u, w) \equiv kB(u) \quad (5)$$

where, k : 파수, $B(u)$: 경로오차

하나의 목표물에서 수신되는 위상오차를 가진 신호를 $p_{ab}(u, w)$ 라 했을 때 다음과 같다.

$$p_{ab}(u, w) = g_{ab}(u, w) \exp[\Omega_e(u, w)] \quad (6)$$

모든 목표물에서 반사된 수신신호는 식(7)과 같다.

$$r(u, w) = \int \int f(a, b) p_{ab}(u, w) dadb \quad (7)$$

식(4)(6)을 이용하여 하나의 목표물에서 수신되는 신호식(8)을 유도할 수 있다. 우리가 처리 하게될 신호는 전체 Imaging영역으로부터 수신된 신호다. 따라서, 식(7)을 단일 주파수에 대한 식으로 각각 표현하고 각각에 $k_j; p_{ca}(u, w_j); k_i; p_{ab}(u, w_i)$ 를 곱하고 또 다시 서로 빼고 $(\frac{d}{du} B(u))^2$ 항을 무시한다.

$(\frac{d}{du} B(u))^2$ 은 $\frac{d}{du} B(u)$ 항에 비해 훨씬 작고, 레이다 신호의 대역폭은 그것의 중심 주파수에 비해 훨씬 작기 때문에 무시가 가능하다. 그리고, 분자와 분모에 각각 $f(ab), f(cd)$ 를 각각 곱하면, 우리가 원하는 위상오차가 식(9)와 같이 전체 목표물에서 수신된 신

$$\frac{\partial^2}{\partial u^2} p_{ab}(u, w) + 2 \frac{\partial}{\partial u} p_{ab}(u, w) \frac{d}{du} \Omega_e(u, w) + \left[\frac{d^2}{du^2} \Omega_e(u, w) + \left[\frac{d}{du} \Omega_e(u, w) \right]^2 + \left(\frac{2kb}{X_1} \right)^2 \right] p_{ab}(u, w) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d}{du} B(u) = \frac{k_i \frac{\partial^2}{\partial u^2} r(u, w_i) r(u, w_i) - k_i \frac{\partial}{\partial u} r(u, w_i) r(u, w_i)}{2 k_i k_j \left[\frac{\partial}{\partial u} r(u, w_j) r(u, w_j) - \frac{\partial}{\partial u} r(u, w_i) r(u, w_i) \right]} \quad (9)$$

호의 미분과 두 번 미분된 형태의 조합으로 나타난다.

III. 제안 알고리즘의 실행 및 성능분석

본 논문에서 제시하는 알고리즘의 컴퓨터 모의 실험에서는 중첩되지 않게 충분한 대역폭을 확보하는 문제가 가장 중요하다. 실험은 신호의 중첩을 피하기 위해서 위상오차의 대역폭을 추정하고 알고리즘을 수행하기 전에 충분한 대역폭을 확보함으로써 진행되어 나간다. 전체적인 SAR 신호처리 단계는 그림 2 와 같고 그에 대한 세부적인 Block diagram은 그림 3과 같다.

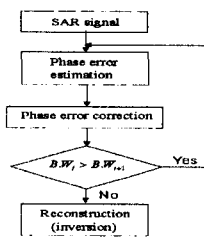


그림 2. SAR 신호 처리 단계

알고리즘에 재 적용시 신호에 포함된 위상오차의 정도를 추정함에 있어 95%의 에너지 스펙트럼을 추정하는데 이전에 추정된 위상오차의 대역폭이 현재에 추정한 위상오차의 대역폭과 거의 차이가 보이지 않으면 신호에는 위상오차가 거의 없는 것으로 판정하고 Inversion 기법을 수행한다[그림 2].

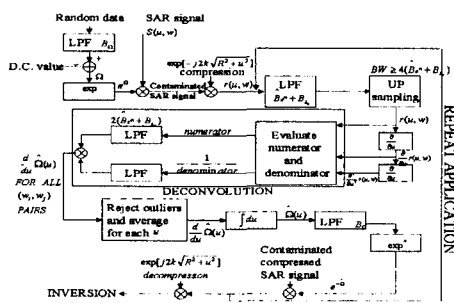


그림 3. 위상오차 추정과 교정의 세부 Block diagram

알고리즘 적용 결과 그림 4 와 같은 추정치를 보였다. 가는 점선은 알고리즘에 한번 적용 하였을 때이고 반

복 적용을 통하여 원래의 위상오차에 가까워 졌다. 그

림 4의 위상오차는 Dynamic range가 [-0.2549 - 0.3024](meters)이며 k_c 가 62.8319(rad/m) 로써 실질적인 위상오차는 [-16.0130 - 19](radians)의 위상오차를

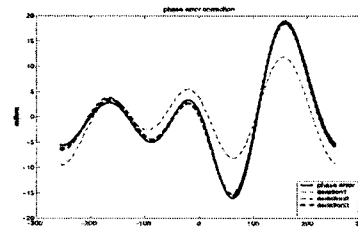


그림 4. 위상오차 추정

보인다. 그림 4의 위상오차가 신호에 포함 되었을 때 영상에 기인하는 효과를 그림 5에서 보여 준다. 그림 5의 좌측은 위상오차가 없는

신호로부터 복원한 영상이고 우측은 그림 4의 위상오차가 영상에 기인한 효과다.

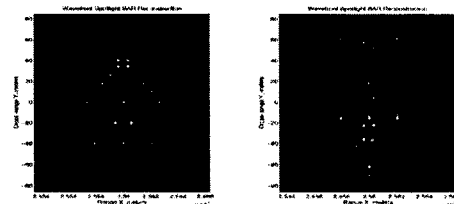
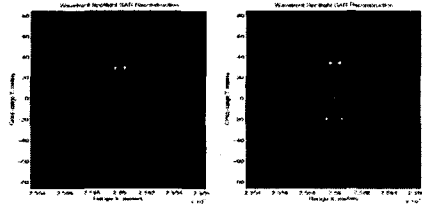


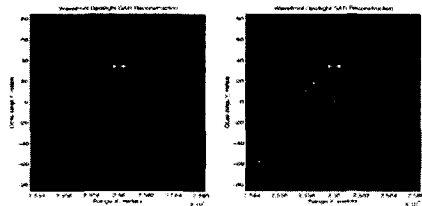
그림 5. 위상오차의 영향

그림 6은 각각의 반복 적용에서 추정한 위상오차 값으로 위상오차를 교정하고 난후 Inversion기법으로 영상화 한 그림이다. 그림 7의 가는 점선은 위상오차를 포함한 신호의 주파수 스펙트럼이고 굵은 점선은 위상오차를 교정하고 난 후의 주파수 스펙트럼이며, 굵은 실선은 위상오차를 포함하지 않은 주파수 스펙트럼을 보여 주고 있다. 그림 8의 왼쪽 그림은 그림 4의 위상오차에 대하여 계속 반복적용 시켰을 때의 SNR 값이고 오른쪽 그림은 위상오차가 [-23.5436 - 23.5436](radians) 에 대하여 반복적용 시켰을 때의 결과다.

Dynamic range가 큰 오차에 대해서는 수렴 속도가 느리다는 것을 알 수 있다.



알고리즘 한번 적용 알고리즘 두번 적용



알고리즘 세번 적용 알고리즘 네번 적용

그림 6. Inversion 기법에 의해 복구된 영상들

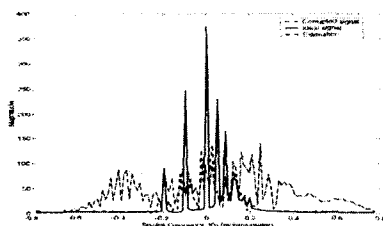


그림 7. 신호의 주파수 스펙트럼

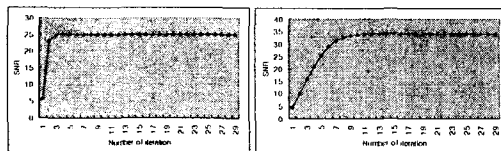


그림 8. $SNR = 10 \log \frac{\Omega^2}{(\Omega - \hat{\Omega})^2}$

V. 결론

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 하나의 목표물에 서 수신되는 전파를 파동방정식에서 모델하고, 전체 목표물에서 수신되는 신호의 형태로 확장하였다. 그리고, 유도된 수식을 Matlab으로 구현하여 알고리즘이 위상오차를 잘 제거할 수 있음을 확인하였다. 또한 Wavefront reconstruction 기법을 적용하여 위상오차

가 영상에 미치는 영향을 영상으로 확인 하였으며, 위상오차가 제거된 신호로부터 영상화함으로써 알고리즘의 성능을 영상을 통하여 확인할 수 있었다[그림 5, 6]. 알고리즘에 재 적용시 신호의 95%대역폭을 추정함으로써 신호에 포함된 위상오차의 정도를 판단할 수 있었다[그림 3]. 그림 7. 은 위상오차가 없는 신호, 위상오차를 포함한 신호 그리고 추정된 위상오차로 위상오차를 제거한 신호에 대한 주파수 스펙트럼이다. 또한 수십회의 반복적용과 서로 다른 위상오차에 대해 실험하여 제안 알고리즘의 안정성을 확인할 수 있다[그림 8].

참고문헌(또는 Reference)

- [1] J.W.Goodman, "Introduction to Fourier Optics", New York: McGraw-Hill, 1968.
- [2] Mehrdad Soumekh, Jeong-Hee Choi, "Phase and Amplitude Phase Restoration in Synthetic Aperture Radar Imaging", IEEE Transactions on image processing. vol. 1, no 2. April 1992
- [3] M. Soumekh, "Echo imaging using physical and synthesized arrays," Optical Engineering, 29(5), pp.545-554, May 1990
- [4] M. Soumekh, "Echo imaging using physical and synthesized arrays," Optical Engineering, 29(5), pp. 545-554, May 1990.
- [5] Walter G. Carrara, Rom S. Goodman, Ronald M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar" 1995
- [6] M. Soumekh, "A system model and inversion for synthetic aperture radar imaging, Proc, ICASSP' 90, Albuquerque, April 1990.
- [7] Mehrdad Soumekh, "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms" 1999
- [8] M. Soumekh, "phase reconstruction/unwrapping from amplitude for diffracted waves using a perturbatin solution of the wave equation", IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, 36, p. 1076, July 1988
- [9] P.H.Eichel and C.V.Jakovatz Jr, "Phase gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative", Vol. 14, No. 20 Optic letters 1989
- [10] Choi J.H, "Signal compression of wavefront inversion in Synthetic Aperture Radar imaging", Taegu university the journal of science and technology vol. 5. No 5 B 1999. 02