

고해상도 SAR Imaging 시스템에서의 Incoherent Detection Error 교정 기법 연구

정희원 최 정 희*

Incoherent Detection Error Correction in the High-resolution SAR(Synthetic Aperture Radar) Imaging System

Jeong-Hee Choi* *Regular Member*

요 약

SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템에서 목표물의 정보를 성공적으로 추출해내기 위해서는 반사 된 신호를 수신할 때 Coherent detection이 필수적이다. 수신시 Incoherent detection은 복소 위상오차 형태로 나타나서 실제 목표물의 영상에 심각한 Degradation을 야기시켜 치명적인 결과를 초래하게된다. 본 논문에서는 Incoherent detection을 야기 시키는 가장 큰 원인인 Echo 데이터 측정시 레이다와 목표물의 상대적 거리오차를 보정하는 기법을 제시한다. 제시된 위상오차 보정 기법은 수신되는 신호를 파동방정식으로부터 모델링하고, 각 주파수대의 전체 수신신호의 조합으로 위상오차 값을 유도한다. 보다 더 정확한 위상오차를 교정하기 위해 반복적으로 추정된 위상오차로부터 수신신호에 포함된 오차를 제거하고, 이 때 Error를 최소화시키는 신호처리를 위해 각 반복적용 단계에서 오차가 제거된 신호의 대역폭을 추정하는 방법도 제시한다. 본 논문에서는 위상오차를 포함한 수신 신호를 컴퓨터 시뮬레이션으로 발생시키고 제안된 위상오차 추정 및 교정 알고리즘을 적용하고 최종적으로 오차가 제거됨을 보이기 위해 SAR Inversion 기법에 적용시켜 알고리즘의 성능을 영상으로 확인한다.

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 extended 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

Synthetic Aperture Radar(SAR) Imaging 시스템은 안테나의 개구면이 물리적으로 제한되어 목표물

의 유무와 위치만을 파악할 수 있었던 기존의 레이다에 비해 작은 송·수신 안테나를 위성이나 비행체에 탑재하여 움직여가면서 수신한 데이터를 처리하여, Cross range에 대한 해상도를 향상시킴으로

* 대구대학교 정보통신공학부

논문번호: 020327-0726, 접수일자: 2002년 7월 26일

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R04-2000-00-00077-0) 지원으로 수행되었음.

써 기존 레이더의 제한성을 극복하였다.^[2,7,8,9,10]

이러한 SAR 시스템에서 목표물의 정보를 성공적으로 추출해내기 위해서 반사된 신호를 수신할 때 Coherent detection이 필수적이다. 레이더가 정해진 직선 경로를 정확히 움직이지 않고, APC(Antenna Phase Center)와 측정 지역과의 보상되지 않은 움직임^[3,4,11], 송·수신 무선 채널 상에 발생하는 Turbulence에 의한 전파 효과^[6]들은 Incoherent Detection의 요인으로 작용하며 Incoherent Detection은 복소 위상오차 형태로 나타나서 실제 목표물의 영상에 심각한 Degradation을 야기시켜 치명적인 결과를 초래한다. 또한 복소 위상오차는 사용하는 Source 신호의 주파수와 직접적인 연관이 있어 Cross-range에 대한 고해상도 영상을 얻기 위해 높은 주파수의 Source 신호를 사용하는데 저해가 되는 요소이기도 하다. 기존에 사용되는 Incoherent Detection에 의한 위상오차 보상기법은 영상복원 과정 중에 위상오차를 추정하고 추정된 위상오차에서 신호를 교정한다. 즉 거리 방향에 대한 처리가 끝난 신호로부터 위상오차 추정과 교정이 수행된다. 이러한 기법에는 Mapdrift, Phase Difference, Multiple Aperture Mapdrift, Phase Gradient Autofocus 방식 등이 있다. Mapdrift Autofocus 방식은 2차 위상오차를 제거하는 기법으로 Synthetic Aperture Duration 구간을 두 개로 나누어 2차 위상오차가 천이시킨 정도를 알아낸다.^[3] Phase Difference Autofocus 방식은 나누어진 각각의 Subaperture 위상의 차를 알아내어 2차 위상오차의 정보를 알아내는 기법이다.^[3] Multiple Aperture Mapdrift는 Mapdrift Autofocus를 확장시킨 개념으로써 Synthetic Aperture Duration 구간을 제거하고자 하는 위상오차의 차수만큼 나누어 원하는 위상오차 차수까지 제거한다^[3]. Phase Gradient Autofocus 기법은 위상오차의 차수 모델이 필요 없으며 높은 차수의 위상오차를 제거할 수 있다^[3,5].

본 논문에서는 Phase Gradient Autofocus 기법처럼 위상오차의 차수 모델에 관계없이 수신된 Echo 신호로부터 바로 위상오차의 미분값을 추정하는 기법을 제시한다. 제안하는 알고리즘은 하나의 목표물로부터 수신되는 전파는 파동방정식을 만족한다는 사실에 근거한다. 하나의 목표물에서 수신된 전파 형태를 두 개의 시간 주파수의 조합에 의해서 모든 목표물에서 수신되는 신호의 형태, 즉 수신기가 수신하는 전파의 형태에서 위상 오차식을 유도한다.

따라서 수신한 Raw 데이터로부터 위상오차를 추

정하고 교정한 후에 영상복원 기법을 수행하게 된다. 또한 제안된 알고리즘은 위상오차의 차수 모델 없이 고차수의 위상 오차까지도 제거 가능한 장점이 있으며 반복 연산을 통해서 더욱더 정확한 위상오차를 추정해냄으로써 시스템 모델에서 이론적으로 얻을수 있는 해상도의 SAR 영상을 복원할 수 있게 한다.

본 논문은 위상오차를 모델링하고, 위상오차를 제거하는 새로운 알고리즘을 제시하며, 그리고 제시된 알고리즘의 성능을 목표물 결과영상을 제시함으로써 입증하였다.

II. 시스템 Geometry와 위상오차 모델

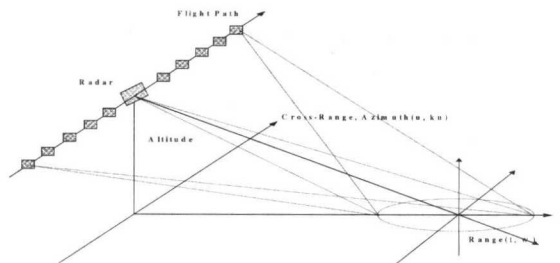


그림 1. Spotlight-mode SAR imaging 시스템 Geometry

실질적인 SAR 신호는 목표물과 레이더간에 신호를 주고받는 영역(fast time 영역 t)과 레이더가 움직여 감에 따라 레이더의 개구면을 합성해 가는 경로의 영역, 즉 Cross-range 방향(slow time 영역 u)의 2-dimensional 신호다. 만약 특정한 u 위치에서 레이더가 5cm 경로 이탈을 하였다면 특정 u 위치에서 수신한 각 주파수 성분을 가진 수신신호(Range bin)에는 5cm에 대한 위상오차가 똑같이 작용하게 된다. 따라서 수신되는 위상오차는 각각의 u 위치에서 모든 Range bin에 같은 위상오차를 가진다고 가정한다. SAR신호는 (u, t) 영역 2-Dimensional 신호이며 레이더의 위치오차는 시간 지연을 초래하고 시간 지연은 FT (Fourier Transform)의 Time Shifting 이론에 의해 각 주파수 영역(ω)에서 위상오차($\exp[j\Omega]$)를 야기시킨다. 위상오차를 두 가지 범주로 분류하면, 주파수에 독립인 위상오차와 주파수에 종속인 위상오차로 분류할 수 있다. 위상오차는 원 신호에 Exponential의 형태로 곱해 지며, 전체 위상오차 모델식은 다음과 같다.

$$\Omega_e(u, w) \equiv A(u) + kB(u) \quad (2.1)$$

$k = \frac{w}{c}$: Wavenumber

$A(u), B(u)$ 는 알려지지 않은 복소 신호

$A(u)$: 주파수에 독립인 위상오차

$B(u)$: 주파수에 종속인 위상오차로써 주로 레이더 경로 오차

$A(u) \neq 0, B(u) = 0$ 인 경우는 주파수에 독립인 위상오차다. $A(u) = \alpha_e(u) + j\phi_e(u)$, 여기서 $\alpha_e(u)$ 는 전파 채널상 잡음의 크기, 즉 페이딩이고, $\phi_e(u)$ 는 채널의 위상오차, 즉 Coherence의 손실을 의미한다.

주파수에 독립인 위상오차 모델식은 $\Omega_e(u, w) \equiv A(u) = \alpha_e(u) + j\phi_e(u)$ 의 형태이다. 주파수종속인 위상 오차에서는 $A(u) = 0, B(u) \neq 0$ 이다. 즉, $B(u) = \alpha_e(u) + j\phi_e(u)$ 이고, 전체 위상오차 모델식은 $\Omega_e(u, w) \equiv kB(u)$ 의 형태이다. 레이더 경로오차가 여기에 속하는데 사용하는 Source 신호의 파수가 곱해져서 위상오차가 되므로 작은 경로 오차도 큰 위상 에러를 야기시키는 심각한 결과를 초래한다.

본 논문에서는 심각한 영향을 끼치는 주파수 종속 위상오차 제거기법에 대하여 연구하였으며 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Omega_e(u, w) &\equiv kB(u) \\ &= k\alpha_e(u) + jk\phi_e(u) \end{aligned} \quad (2.2)$$

III. 위상 오차 추정 기법

본 논문에서 제시하는 위상오차 제거 알고리즘은 파동 방정식에서 전체 수신신호로부터 위상오차의 관계식을 유도해 내었다. 따라서 수신된 Raw 데이터로부터 위상오차를 먼저 계산해서 제거하고 영상을 복원한다. 제시한 알고리즘은 위상오차의 차수 모델에 관계없이 유도된 위상오차 식으로부터 고차수의 위상오차까지도 제거 가능하며 반복 적용을 통하여 비교적 큰 위상오차까지도 제거할 수 있는 장점이 있다. <그림 1>의 Spotlight mode SAR 시스템의 Geometry상에서 수신되는 신호는 다음과 같다^[2,11].

$$s(u, w) = \iint f(a, b) \exp[j2k\sqrt{(X_1+a)^2+(u+b)^2}]dadb \quad (3.1)$$

위의 식에서 (a, b) 는 Imaging 영역에 속한 하나의 점 표적에 대한 위치를 나타내고, $f(a, b)$ 는 그 위치에 있는 하나의 점 표적에 대한 반사 계수를 의미한다. 그리고 $\exp[\cdot]$ 항은 그 점 표적에 대한 위상값을 표현하고 있다. 따라서 Imaging 영역에 대하여 적분을 취하게 되면 모든 목표물로부터 반사되어 수신되는 신호 $[s(u, w)]$ 가 된다. $s(u, w)$ 의 u 는 Azimuth 방향에서 레이더가 신호를 송수신하는 위치이고, w 는 시간 t 에 대한 주파수 영역이다. 따라서 식(3.1)은 (u, w) 영역에서 모든 표적으로부터 수신한 신호다. 앞으로 처리하게 될 신호는 Azimuth 방향으로 압축이 되어 있는 신호를 기본으로 한다.

Spotlight-mode SAR 시스템에서 신호의 압축은 Imaging하는 영역의 중심 좌표를 이미 알고 있기 때문에 그 중심에 대한 위상값을 수신 신호에서 제거시킴으로써 이루어진다. 즉, 알고있는 목표물의 중심점에서의 위상값을 제거함으로써 전체 신호 대역폭을 압축한다. 압축된 신호를 $s_0(u, w)$ 라 할 때, 다음과 같다.

$$s_0(u, w) \equiv s(u, w) \exp[-j2k\sqrt{X_1^2 + u^2}] \quad (3.2)$$

합성 개구의 중심으로부터 Imaging 영역의 중심까지의 거리는 실질적인 경우에 있어 Imaging 영역에 비해 상당히 크다. $X_1 \gg a, b, u$ 이기 때문에 Fresnel zone은 근사화가 가능하다^[11].

$$s_0(u, w) = \iint f(a, b) g_{a,b}(u, w)dadb \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{where, } g_{a,b}(u, w) &\equiv \exp\left[-j\frac{2kb}{X_1}u\right. \\ &\left.+ jk\frac{a^2 + b^2 - 2aX_1}{X_1}\right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

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

$$\frac{\partial^2}{\partial u^2} g_{ab}(u, w) + \left(\frac{2kb}{X_1}\right)^2 g_{ab}(u, w) = 0 \quad (3.5)$$

식 (3.4)를 근간으로 위상오차 수식을 유도할 것이다. 위상오차를 포함하는 SAR 신호를 $r(u, w)$ 라고 했을 때,

$$r(u, w) = \int \int f(a, b) p_{ab}(u, w) da db \quad (3.6)$$

위상오차를 포함하지 않는 SAR 신호와의 관계는 다음과 같다.

$$s_0(u, w) = r(u, w) \exp[\Omega_e(u, w)] \quad (3.7)$$

식(3.3), (3.6), (3.7)을 이용하면 위상오차가 포함된 식과 포함되지 않은 식과의 관계식이 유도된다.

$$g_{ab}(u, w) = p_{ab}(u, w) \exp[\Omega_e(u, w)] \quad (3.8)$$

식(3.8)을 식(3.5)에 대입하면, 식(3.9)을 구할 수 있다. 식(3.9)은 하나의 점 표적으로부터 수신된 신호의 표현이다. 수신신호는 Imaging 영역의 모든 표적으로부터 반사된 신호기 때문에 모든 표적으로부터의 수신 신호 표현이 요구된다. 따라서 식(3.9)을 이용하여 모든 표적으로부터 수신되는 신호 표현식을 유도한다. 우리가 사용하는 Source 신호는 Multi frequency 이며 그중 하나의 주파수에 대해서 각각 w_i, w_j 라 하면, (3.9)식에 의해 식(3.10), (3.11)을 유도할 수 있다. $(a, b), (c, d)$ 는 모두 (x, y) 좌표

에 있는 점 표적들이고 (c, d) 는 (a, b) 와 다른 점 표적에 대한 좌표이다.

식(3.10), (3.11)에 각각 $k_j p_{cd}(u, w_j), k_i p_{ab}(u, w_i)$ 를 곱하고 서로 뺀다. 그리고 $(\frac{d}{du} B(u))^2$ 항을 무시한다. $(\frac{d}{du} B(u))^2$ 항은 $\frac{d}{du} B(u)$ 항에 비해 훨씬 작고, 레이다 신호의 대역폭은 그것의 중심 주파수에 비해 훨씬 작기 때문에 $(\frac{d}{du} B(u))^2$ 항을 무시할 수 있다. 무시한 항은 식(3.13)과 같다. 그리고 식(3.12) 오른쪽의 마지막 항을 무시한다. 근사화 이후에 유도된 수식으로부터 $f(a, b)$ 와 $f(c, d)$ 를 분자와 분모에 각각 곱한다. 그리고 2-Dimensional 신호 각각의 u 에 대한 모든 Range bin 에는 같은 위상오차를 포함한다는 사실에 근거하여 식 (3.14)와 같은 계산이 가능하다. 그리고, 전체 Imaging 영역으로부터 수신된 신호의 표현식 (3.6)을 이용하면 모든 표적으로부터의 수신신호 형태의 표현이 가능하다. 결과적으로 식 (3.15)가 유도된다. 식 (3.15)를 적분하면 위상오차를 추정할 수 있다. 위상오차 교정을 위해서 추정된 위상 오차값을 원 신호에 역으

$$\frac{\partial^2}{\partial u^2} p_{ab}(u, w) + 2 \frac{\partial}{\partial u} p_{ab}(u, w) \frac{d}{du} \Omega_e(u, w) + [\frac{d^2}{du^2} \Omega_e(u, w) + [\frac{d}{du} \Omega_e(u, w)]^2 + (\frac{2kb}{X_1})^2] p_{ab}(u, w) = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial u^2} p_{ab}(u, w_i) + 2 \frac{\partial}{\partial u} p_{ab}(u, w_i) \frac{d}{du} \Omega_e(u) + [\frac{d^2}{du^2} \Omega_e(u) + [\frac{d}{du} \Omega_e(u)]^2 + (\frac{2k_i b}{X_1})^2] p_{ab}(u, w_i) = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial u^2} p_{cd}(u, w_j) + 2 \frac{\partial}{\partial u} p_{cd}(u, w_j) \frac{d}{du} \Omega_e(u) + [\frac{d^2}{du^2} \Omega_e(u) + [\frac{d}{du} \Omega_e(u)]^2 + (\frac{2k_j b}{X_1})^2] p_{cd}(u, w_j) = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{d}{du} B(u) = \frac{k_j \frac{\partial^2}{\partial u^2} p_{ab}(u, w_i) p_{cd}(u, w_j) - k_i \frac{\partial^2}{\partial u^2} p_{cd}(u, w_j) p_{ab}(u, w_i)}{2k_i k_j [\frac{\partial}{\partial u} p_{cd}(u, w_j) p_{ab}(u, w_i) - \frac{\partial}{\partial u} p_{ab}(u, w_i) p_{cd}(u, w_j)]} + \frac{[k_i (\frac{2k_i b}{X_1})^2 - k_j (\frac{2k_j b}{X_1})^2] p_{ab}(u, w_i) p_{cd}(u, w_j)}{2[\frac{\partial}{\partial u} p_{cd}(u, w_j) p_{ab}(u, w_i) - \frac{\partial}{\partial u} p_{ab}(u, w_i) p_{cd}(u, w_j)]} \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta p_{ab}(u, w_i) p_{cd}(u, w_j) (\frac{d}{du} B(u))^2}{2[\frac{\partial}{\partial u} p_{ab}(u, w_j) p_{cd}(u, w_i) - \frac{\partial}{\partial u} p_{cd}(u, w_i) p_{ab}(u, w_j)]} \quad (3.13)$$

where, $\Delta \equiv k_j - k_i$

로 곱하게 된다.

여기서 중요한 관건은 식(3.15)의 실행 기법에 있다.

$$\frac{d}{du} B(u) = \frac{A_1}{B_1} = \frac{A_2}{B_2} = \dots = \frac{A_N}{B_N} \text{ 이 성립할 때,}$$

$$\frac{d}{du} B(u) = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_N}{B_1 + B_2 + \dots + B_N} \quad (3.14)$$

IV. 제안 알고리즘의 실행 및 성능 분석

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 3> 과 같고 그에 대한 세부적인 Block diagram은 <그림 2>와 같다.

<그림 2>를 크게 세 부분으로 분류하면 위상오차를 포함한 신호를 만드는 단계 그리고 제안된 수식의 수행단계 그리고 위상오차를 제거하는 단계로 설명할 수 있다. 위상오차는 Turbo C의 subroutine인 "srand"(seed number 3)를 이용하였으며, LPF

(low-pass filter)를 통하여 원하지 않는 움직임을 만들었다. 그리고 위상오차를 포함하지 않는 신호에 $\exp[\cdot]$ 형태로 곱한다. 식(3.15)는 위상오차를 포함한 신호의 1차 미분과 2차 미분의 조합으로 이루어져 있기 때문에 각각의 항을 먼저 만들고 식(3.15)를 수행하였다. 식(3.15)는 단일 Range bin의 조합이다. 따라서, $i, j=1, 2, 3, 4 \dots$ 순서로 바꾸어 가며 모든 Range bin에 제안된 수식을 적용시켰다. 위상오차는 각각의 u 에 대하여 모든 Range bin에 똑같은 위상오차를 포함한다. 따라서 평균을 취함으로써 더욱더 정확한 위상오차 추정이 가능하다. 그리고 마지막 단계는 추정된 위상오차를 신호에 역으로 곱함으로써 위상오차를 포함한 신호에서 위상오차를 제거한다.

본 알고리즘은 알고리즘의 반복수행을 통하여 비교적 큰 위상오차까지도 추정해 낸다. 알고리즘에 재 적용시 신호에 포함된 위상오차의 정도를 추정함에 있어 95%의 에너지 스펙트럼을 추정하는데 이전에 추정된 위상오차의 대역폭이 현재에 추정된 위상오차의 대역폭과 거의 차이를 보이지 않으면 신호에는 위상오차가 거의 없는 것으로 판정하고 Inversion 기법을 수행한다<그림 3>. 알고리즘 적용 결과 <그림 4> 와 같은 추정치를 보였다. 가는 점

$$\frac{d}{du} B(u) = \frac{k_j \frac{\partial^2}{\partial u^2} r(u, w_j) r(u, w_i) - k_i \frac{\partial^2}{\partial u^2} r(u, w_j) r(u, w_i)}{2 k_i k_j [\frac{\partial}{\partial u} r(u, w_j) r(u, w_i) - \frac{\partial}{\partial u} r(u, w_i) r(u, w_j)]} \quad (3.15)$$

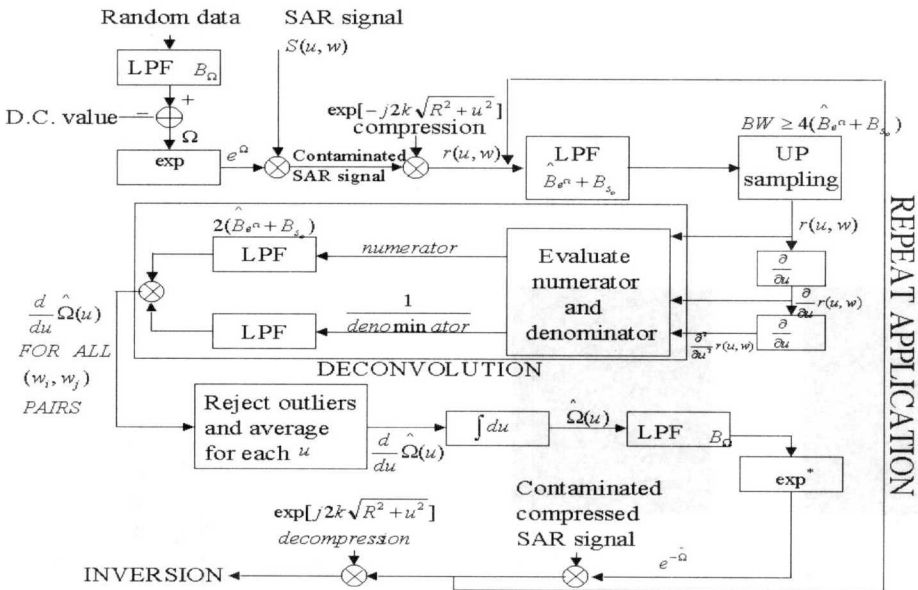


그림 2. 위상오차 추정과 교정의 세부 Block diagram

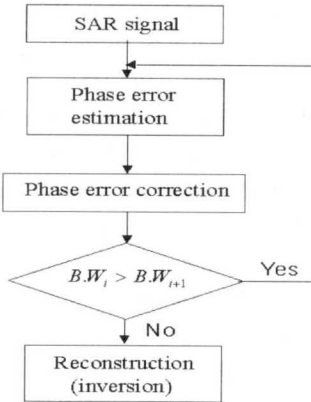


그림 3. SAR 신호 처리 단계

선은 알고리즘에 한번 적용하였을 때이고 반복 적용을 통하여 원래의 위상오차에 가까워 졌다. <그림 4>의 위상오차는 Dynamic range가 [-0.3747 ~ 0.3747](meters)이며 k_c 가 62.8319(rad/m) 로써 실질적인 위상오차가 [-23.5436 ~ 23.5436](radians)의 위상오차를 나타낸다. $\exp[\Omega_c]$ 의 대역폭 추정 결과 0.8589(rad/m)의 추정 결과를 얻었다. <그림 4>의 위상오차가 신호에 포함되었을 때 영상에 기인하는 효과를 <그림 5>에서 보여준다. <그림 5>의 좌측은 위상오차가 없는 신호로부터 복원한 영상이고 우측은 <그림 4>의 위상오차가 영상에 기인한 효과다.

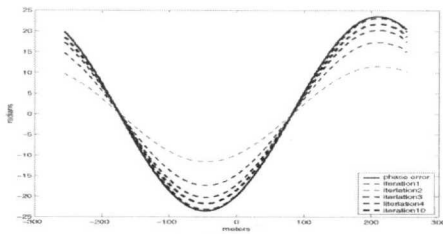
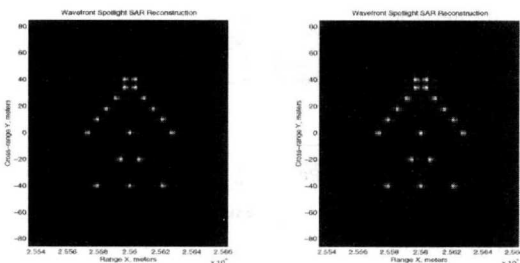


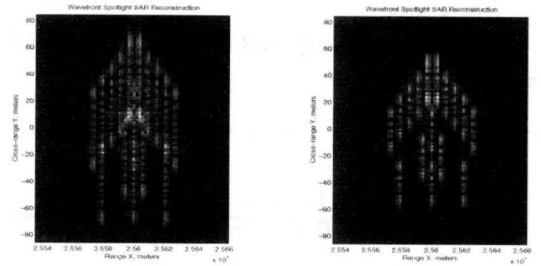
그림 4. 알고리즘의 반복 수행에 따른 위상 오차 추정 결과



(a) 위상오차를 포함하지 않은 영상

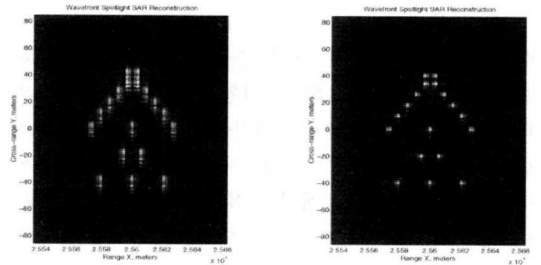
(a) 위상오차를 포함하지 않은 영상

그림 5. 위상오차의 영향



(a) 알고리즘 한 번 적용

(b) 알고리즘 두 번 적용



(c) 알고리즘 네 번 적용

(d) 알고리즘 열 번 적용

그림 6. 위상오차 교정에 따른 영상

<그림 6>은 각각의 반복 적용에서 추정한 위상오차 값으로 위상오차를 교정하고 난 후 Inversion기법으로 영상화 한 그림이다. <그림 7>의 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. 위상오차를 추정하고 오차를 제거한 주파수 스펙트럼은 오차가 없는 스펙트럼과 아주 비슷함을 알 수 있다. 따라서 알고리즘의 반복 적용시, 대역폭 추정은 신호에 포함된 위상오차의 교정 정도를 판단하는 기준으로 사용한다. <그림 8>의 왼쪽 그림은 <그림

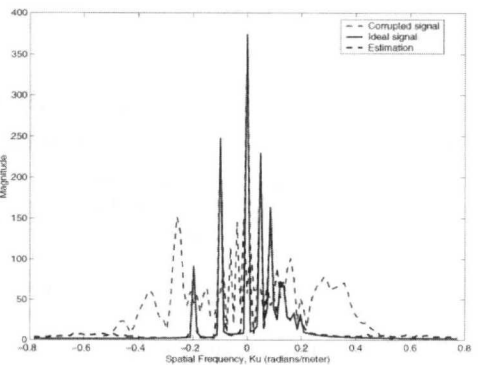


그림 7. 신호의 주파수 스펙트럼

4>의 위상오차에 대하여 계속 반복적용 시켰을 때의 SNR 값을 나타내었다. 제안하는 알고리즘은 발산하지 않고 수렴하는 안정된 알고리즘임을 <그림 8>을 통해 알 수 있다.

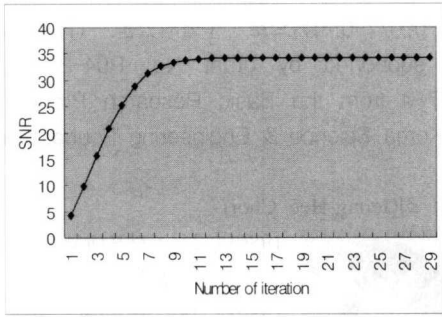


그림 8. $SNR = 10 \log \frac{\Omega^2}{(\Omega - \hat{\Omega})^2}$

V. 결론

본 논문에서는 SAR Imaging 시스템에서 기인되는 위상오차를 모델하고, 위상오차가 전체 영상에 미치는 효과를 Inversion 기법을 적용하여 영상으로 확인하였다. 확인 결과 수 Cm ~ 수십 Cm 의 위상오차에 의해서도 영상에 상당한 Degradation을 야기함을 알 수 있었다<그림 5>. 그리고, 위상오차를 제거하는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 제안하는 알고리즘은 파동 방정식으로부터 유도하여 위상오차를 수신한 여러 주파수대의 수신 신호를 그대로 이용하여 구하였기 때문에 수신한 Raw 데이터로부터 위상오차를 추정하고 교정한 후 Inversion 기법을 적용하는 알고리즘이다. 또한 파동방정식으로부터 위상오차 식을 유도함으로써 위상오차의 차수에 관계없이 추정된 위상오차를 위상오차가 포함된 신호에 역으로 곱하여 줌으로써 위상오차를 제거한다. 그리고, 반복 적용을 통하여 큰 위상오차도 단계별로 안정되게 제거할 수 있는 장점이 있다. MATLAB을 이용한 컴퓨터 모의 실험에서 신호가 위상오차를 가질 때 영상에 기인된 효과와 알고리즘의 반복 적용에 따른 각 스테이지의 영상들을 제시하여 위상오차가 교정되어 가는 단계를 영상으로 확인하였다<그림 6>.

Inversion 기법은 Wavefront Reconstruction 기법을 적용하였다. 또 한가지 특징은 제안한 알고리즘의 반복적용으로 큰 위상 오차도 제거할 수 있다는 점으로 약 30회 이상의 반복연산을 통하여 제시된 알고리즘이 발산하지 않고 안정하다는 것을 보였다.

모르는 위상오차를 추정할 때 위상오차가 교정된 정도를 판단하는 문제점이 있다. 알고리즘이 위상오차를 거의 다 추정하였을 때 신호의 대역폭은 알고리즘 적용 전과 후에 거의 차이를 보이지 않았다. 따라서 알고리즘 재 적용의 판단기준을 신호전력의 95%가 되는 주파수 대역을 계산하여 알고리즘 적용 전·후에 거의 차이를 보이지 않으면 신호에는 위상오차가 거의 포함되지 않은 것으로 판단하였다.

본 논문에서 제시하는 모든 알고리즘은 실질적으로 소프트웨어로 많이 처리한다. 따라서, 본 연구에서 만들어진 위상오차 제거기법 프로그램 소스와 Wavefront Reconstruction 프로그램 소스는 실제 환경에 대한 파라미터만 고려해 주면 실질적인 환경에서도 그대로 이용할 수 있을 것으로 본다.

[부록 1]

$$\nabla^2 g_{ab}(x, y, w) + 4 k^2 g_{ab}(x, y, w) = 0$$

$$\text{여기서, } \nabla^2 \equiv \left(-\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) + \left(-\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)$$

[Joseph W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", p39, eq.(3-13)]

$$\left[\left(-\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) + \left(-\frac{\partial^2}{\partial u^2}\right)\right] g_{ab}(x, u, w) + 4 k^2 g_{ab}(x, u, w) = 0$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} g_{ab}(x, y, w) = (D_{xr} + j D_{xi}) g_{ab}(x, y, w)$$

여기서,

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} g_{ab}(x, y, w) = (D_{yr} + j D_{yi}) g_{ab}(x, y, w)$$

$$D_{xr} \equiv -4 k^2 \frac{(x-a)^2}{(x-a)^2 + (u-b)^2},$$

$$D_{xi} \equiv 2k \frac{(u-b)^2}{[(x-a)^2 + (u-b)^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$D_{yr} \equiv -4 k^2 \frac{(u-b)^2}{(x-a)^2 + (u-b)^2},$$

$$D_{yi} \equiv 2k \frac{(x-a)^2}{[(x-a)^2 + (u-b)^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$x \approx X_1 \gg a, b, y; \quad y \gg b$$

$$D_{xr} = O(4 k^2) \quad D_{xi} = O\left(2k \frac{y^2}{X_1^3}\right)$$

$$D_{yr} = O\left(4 k^2 \frac{y^2}{X_1^2}\right) \quad D_{yi} = O\left(2k \frac{1}{X_1}\right)$$

실수와 허수로 다시 정리하면,

$$[real + j(imaginary)] g_{ab}(x, y, w) = 0$$

$$[(D_{xr} + D_{yr} + 4 k^2) + j(D_{xi} + D_{yi})] g_{ab}(x, y, w) = 0$$

$$\therefore D_{xr} + D_{yr} + 4 k^2 = 0 \quad D_{xi} + D_{yi} = 0$$

$$D_{xi} \ll D_{yi} \quad \therefore D_{yi} \approx 0$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} g_{ab}(x, y, w) = D_{yr} g_{ab}(x, y, w)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} g_{ab}(x, y, w) - D_{yr} g_{ab}(x, y, w) = 0$$

$$D_{yr} \approx -4 k^2 \frac{y^2}{X_1^2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} g_{ab}(x, y, w) + \left(\frac{2ky}{X_1}\right)^2 g_{ab}(x, y, w) = 0$$

참고 문헌

- [1] J.W.Goodman, "Introduction to Fourier Optics", New York: McGraw-Hill, 1968.
- [2] M. Soumekh, "Echo imaging using physical and synthesized arrays," Optical Engineering, 29(5), pp.545-554, May 1990
- [3] Walter G. Carrara, Rom S. Goodman, Ronald M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar" 1995
- [4] Mehrdad Soumekh, "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms" 1999
- [5] 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
- [6] M. Soumekh, "Phase reconstruction/unwrapping from amplitude for diffracted waves using a perturbation solution of the wave equation", IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, 36, p. 1076, July 1988
- [7] D. Ausherman, "Developments in radar imaging", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 20:363, July 1984
- [8] N. Bojarski, "Three-dimensional electromagnetic short pulse inverse scattering," Syracuse University Res. Corp, February 1967
- [9] J. C. Curlander and R. N. McDonough Synthetic Aperture Radar, New York: Wiley, 1991.
- [10] D. Munson, J. O'Brien, and W. Jenkins, "A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar," Proc, IEEE, vol. 71, p. 917, August 1983
- [11] M. Soumekh, "A system model and inversion for synthetic aperture radar imaging," Proc, ICASSP' 90, Albuquerque, April 1990.
- [12] 김형주, 최정희, "Spotlight SAR 시스템에서의

복소 위상오차 제거 기법 연구, 2000 전자과학기술학회, 한국전자과학회, p.105-108, 2000, 07.

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R04-2000-000-00077-0)지원으로 수행되었음. (This work was supported by grant No. R04-2000-000-00077-0 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation.)

최정희(Jeong-Hee Choi)



1986년 2월 : 경북대학교
전자공학과 학사.

1989년 2월 : 뉴욕주립 버팔로
대학교(SUNY at Buffalo)
전기 및 컴퓨터공학과
(Dept. of Electrical and
Computer Engineering) 석사.

1992년 6월 : 뉴욕주립 버팔로 대학교 전기 및 컴퓨터
공학과 박사.

1994년 1월~1998년 2월 : SK 텔레콤 중앙연구소 선
임연구원.

1998년 3월~현재 : 대구대학교 공과 대학 정보통신공
학부 조교수.

<주관심 분야>는 Microwave Active Imaging 시스템
(Synthetic Aperture Radar Imaging)과
Wireless Communication에서 Signal and
Image Processing임.