

RADARSAT 위성의 궤도결정과 자세결정을 이용한 SAR 영상의 자리매김

소진욱 · 최규홍
연세대학교 천문우주학과

원중선
연세대학교 지구시스템학과

GEOCODING OF SAR IMAGE USING THE ORBIT AND ATTITUDE DETERMINATION OF RADARSAT

Jin Wook So and Kyu-Hong Choi

Department of Astronomy

e-mail: sojw@galaxy.yonsei.ac.kr, khchoi@galaxy.yonsei.ac.kr

Joong-Sun Won

Department of Earth System Science

e-mail: jswon@bubble.yonsei.ac.kr

(Received April 30, 1998; Accepted May 20, 1998)

요 약

SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상과 수치지형표고모형(DEM: Digital Elevation Model)을 이용하여 3차원 입체영상지도를 만드는 과정이 소개된다. 영상좌표계와 DEM의 지리적 좌표계를 이어주기 위해서는 그 연결고리로서 위성의 궤도결정과 자세결정의 방법을 이용하여 영상신호 취득기하를 정밀하게 모형화하는 작업이 요구된다. 이를 위해 사례연구 대상으로 삼은 RADARSAT의 궤도결정과 자세결정을 수행하였다. 궤도결정을 위해서는 영상신호 취득시 관측된 영도플리(zero Doppler) 경사거리를 이용하며, 자세결정을 위해서는 도플러 중심주파수(Doppler centroid)를 이용한다. 엄밀한 영상신호 취득기하를 확립함으로써 위성중심의 정밀한 영상자리매김 과정이 소개된다. 기존의 영상자리매김이 순방향(영상좌표계에서 지리적 좌표계)으로 이루어진 것과는 반대로 영상내에 지형보정을 동시에 실시하기 위해서 DEM을 이용하여 역방향(지리적 좌표계에서 영상좌표계)으로 수행하였다. 위성과 지상목표물간의 운동은 지구중심 관성좌표계에서 기술된다.

ABSTRACT

The Synthetic Aperture Radar(SAR) image and the Digital Elevation Model(DEM) of an target area are put into use to generate three dimensional image map. An method of image map generation is explained. The orbit and attitude determination of satellite makes it possible to model signal acquisition configuration precisely, which is a

key to mapping image coordinates to geographic coordinates of concerned area. An application is made to RADARSAT in the purpose of testing its validity. To determine the orbit, zero Doppler range is used. And to determine the attitude, Doppler centroid frequency, which is the frequency observed when target is in the center of antenna's view, is used. Conventional geocoding has been performed on the basis of direct method(mapping image coordinates to geographic coordinates), but in this research the inverse method(mapping from geographic coordinates to image coordinates) is taken. This paper shows that precise signal acquisition modeling based on the orbit and attitude determination of satellite as a platform leads to a satellite-centered accurate geocoding process. It also shows how to model relative motion between spaceborne radar and target. And the relative motion is described in ECIC(earth-centered initial coordinates) using Doppler equation and signal acquisition geometry.

1. 서 론

Curlander(1982)에 의해 위성중심의 영상자리매김이 시작된 이래로 SAR 영상자료를 정확한 위치정보가 담긴 의미있는 영상지도로 만드는 작업은 영상좌표를 지리적 좌표로 전환시키는 방법을 중심으로 이루어졌다. 이와같은 순방향의 영상자리매김 과정은 레이더영상에 나타나는 거리축소(foreshotening), 역전현상(overlay), 음영현상(shadow)과 같은 지형에 의한 기학적 왜곡을 보정할 수 없다. 그 결과 정밀한 자리매김은 불가능해진다. 만일 DEM을 이용할 경우 지형보정(terrain effect correction)이 가능하지만 이 경우 영상의 자리매김과 지형보정이 독립된 처리과정으로 다루어지는 비효율성이 있다. 이러한 단점을 피하기 위해서 DEM을 이용하여 지리적 좌표를 영상좌표로 전환하는 위성중심의 역방향 자리매김 과정을 수행한다면 이 두 과정을 하나로 융합하는 잇점을 얻게 되며, 이에 대해서 2.5절에서 설명할 것이다. 더 나아가 Wievell(1992)의 경우처럼 영상좌표결정 과정이 위성과 목표물간의 상대운동을 기술함으로써 레이더 위성의 안테나 시야에 목표물이 걸리는 시각을 계산하는 문제로 전환할 수 있다. 그러나 위성중심의 영상자리매김을 수행함에 있어서 문제는 위성의 상태벡터에 대한 추정이 정확하지 못하고 대상영역을 TM좌표에서 지구중심 관성좌표계로 전환하는 과정에서 위치오차가 발생할 수 있다는 점이다. 만일 주어진 SAR 영상자료가 지상거리 영상인 경우에 경사거리를 선택된 지구회전 타원체 표면상의 지상거리로 전환하는 과정에서 또한 오차가 발생한다. 국내에서 발표된 경사거리영상이나 지상거리영상에 대한 엄밀자리매김과 지형보정에 대한 논문들(손홍규 외 1997, 정수 1997)은 바로 이런 점에서 한계를 보였다. 본 연구는 이러한 한계점을 극복하고 지상기준점 선택과 같은 사용자 개입을 통한 영상자리매김을 지양하고자 한다. 영상처리 과정에서 사용된 위성의 상태벡터를 정확히 추정해내고 위성과 영상내 개개의 픽셀들이 대표하는 지상 점들과 위성의 상대운동을 지구중심 관성좌표계에서 기술하여 안테나의 시야에 걸린 시각과 이 때

의 경사거리, 그리고 위성의 직하점으로부터 지구타원체(WGS84) 표면상의 지상거리를 계산하여 지상거리영상내에서 영상좌표를 결정한다. 연구자료가 지상거리영상이므로 위성의 직하점과 해당 지상점까지의 지상거리를 계산함으로써 경사거리를 지상거리로 바꾸는 작업을 수행해야 한다. 또한 위성의 진행각(heading angle)을 이용하여 안테나 시야의 중심선상에서 대상영역의 경사도와 국부입사각을 계산하여 역전(overlay)영역과 음영(shadow)영역을 추출할 수 있다(소진욱 1997).

2. 영상의 자리매김

2.1 수치지형도에서 WGS84 좌표계로의 변환

TM좌표값을 베셀타원체 직교좌표값으로 변환하는 과정에서 평균해수면 상에서의 고도값을 베셀타원체 상의고도값으로 보정(undulation correction)하는 작업이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 일본의 측지자료를 근거로 만들어진 국부적인 지오이드 높이를 계산하는 관계식을 사용하였으며, 그 기준점은 북위 35°, 경도 135°이다.

$$\text{타원체 높이(ellipsoidal height)} = \text{평균해수면 높이(orthometric height)} + \text{지오이드 높이(geoidal height:undulation)}$$

$$U = \text{입력위도} - 35.0$$

$$V = \text{입력경도} - 135.0$$

$$\begin{aligned} \text{지오이드높이} = & 19.004 - 37.468U + 31.784V + 3.470UV - 4.018U^3 \\ & + 1.326UV^2 - 8.480V^3 - 3.724U^3V + 7.243U^2V^2 \\ & - 4.923V^4 + 0.293U^9V^2 - 0.225U^5V^6 + 0.2U^2V^9 \end{aligned} \quad (1)$$

주어진 RADARSAT의 영상자료는 WGS84 타원체 표면이 아니라 중심은 일치하지만 반장경과 반단경이 다소 다른 회전타원체를 사용하여 투영시킨 지상거리 영상으로서 제주도 남동부와 우도섬을 포함하고 있으나 우도섬의 남동해안만을 연구대상으로 삼았다. 따라서 TM좌표를 RADARSAT 영상자료가 정의한 타원체의 직교좌표로 변환해야 하지만, 본 연구는 TM좌표를 최종적으로 WGS84 직교좌표계로 변환시켰다. 왜냐하면, 베셀타원체상의 TM좌표를 지구중심 고정좌표계로 바꾸는 타원체간 좌표변환을 위해서는 헬머트 유사변환(Helmert Similarity Transform)을 시도해야 하고, 이 과정에서 일곱가지 매개변수(3개의 위치이동변수, 3개의 회전이동변수, 1개의 축적변수)들을 결정해야 한다(Hofmann-Wellenhof *et al.* 1994). 이를 위해서 사용될 관측자료는 GPS 자료로서 WGS84 좌표계를 사용하고 있으며, 이 좌표계가 국제표준이므로 TM좌표를 최종적으로 WGS84 직교좌표계로 변환시켰다.

2.2 RADARSAT의 궤도결정

Radarsat를 통해 제공되는 다양한 형식의 영상자료를 이용하여 영상의 지리적 자리매김을 수행

표 1. RADARSAT의 궤도정밀도.

| 방향 | 사전 추정된 궤도자료의 오차(m) | 궤도결정 후 궤도자료의 오차(m) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|
| along-track | 140 | 100 |
| cross-track | 30 | 20 |
| radial | 30 | 20 |

하거나 간섭영상 또는 입체영상을 통해 특정지역의 고도정보를 추출하여 DEM을 만들려 하는 사용자들의 공통적인 불만사항은 정확한 궤도정보가 제공되지 않는다는 것이다. 밝혀진 Radarsat의 궤도자료 정확도는 표 1과 같다(Marandi 1997).

이번 연구대상지역은 취득시간대가 두 번째와 세 번째 상태벡터 사이에 해당하며 해당 지역의 전체 영상신호 취득시간대가 7.56초이므로 헤더파일에 제공되는 15점의 480초 간격의 상태벡터(위치와 속도) 자료만을 가지고는 영상신호 취득시 위성의 상태벡터를 추정한다는 것은 무리이다. 따라서 본 연구에서는 지구중력장 내에서 위성의 운동을 기술하여 사전예비궤도(Escobal 1975) 결정을 시도하였고, 헤더파일에 존재하는 영상 각 라인 취득시 경사거리(영도플러 경사거리)와 이 때의 목표물의 지표면 위치자료를 근거로 궤도미분보정을 실시하였다. 궤도결정 기준시각은 영상신호 수신(영도플러 신호수신 방식)을 시작한 시각에 근접한 시각으로 정했으며, 이 시각에서 결정된 위성의 상태벡터를 초기값으로 다시 세 번째 상태벡터 시각까지 전파시킨 결과는 표 2와 같다.

기준시각 : 1996.8.15.09:28:32.273(UTC)
 seconds of day : 34112.273000(sec)
 그리니치 평균시각각(GMHA) : 106.20397256(deg)
 지구중력모형 : EGM96(Earth Gravity Model 96 : 21 x 21)
 대기모형, 태양복사압모형, 태양과 달 중력모형 : 사용안함
 적분방식 : Runge-Kutta 4계, 8계, 고정구간 적분방식(윤재철 1996)
 입력요소 :

| | 위치(m) | 속도(m/s) |
|-----|--------------|---------------|
| x : | -4191341.680 | vx : -896.300 |
| y : | -5820823.110 | vy : 657.729 |
| z : | 1255.559 | vz : 7372.968 |

저궤도 위성의 궤도전파모형을 세움에 있어서 필히 공기저항을 고려한 대기모형을 사용해야 하지만, 본 연구는 단지 7.56초에 불과한 영상취득 시간대를 대상으로 하기에 정밀한 섭동모형을 필요로 하지는 않으며 지구중력만을 고려해도 충분하다고 생각한다.

표 2. 레도미분보정을 실시한 후 세 번째 상태벡터의 비교.

| 상태벡터 | 제작된 레도전파기의 결과값 | 헤더파일 |
|------------|----------------|--------------|
| $x(m)$ | -2994057.165 | -2994066.120 |
| $y(m)$ | -2620526.059 | -2620498.049 |
| $z(m)$ | 5957038.716 | 5957007.339 |
| $v_x(m/s)$ | 3179.334 | 3179.347 |
| $v_y(m/s)$ | 5445.686 | 5445.695 |
| $v_z(m/s)$ | 3984.482 | 3984.431 |

계산된 성분별 위성의 위치오차 :
 along track : 12.2(m), cross track : 24.0(m), radial direction : -28.7(m)

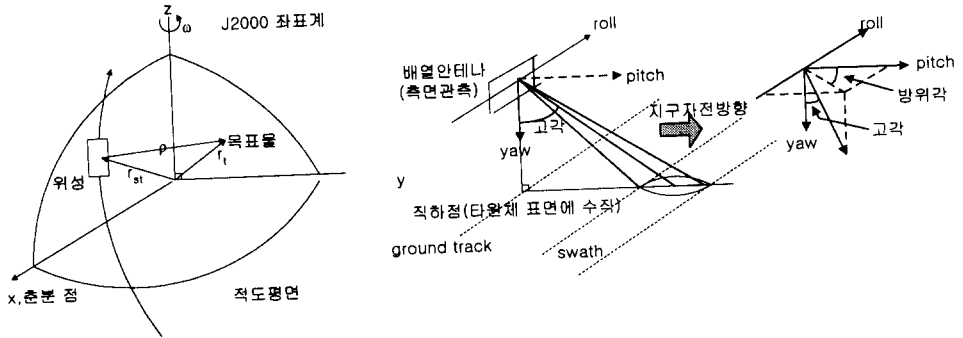


그림 1. RADARSAT의 위성의 동체좌표계.

2.3 자세결정

레이다 위성인 RADARSAT의 빔은 영상취득을 목적으로 하므로 위성의 동체좌표계 상에서 높은 지향성을 요구한다는 점에서 수신신호의 도플러 편이를 이용한 자세결정을 가능케 한다. 그림 1은 안테나가 진행방향의 우측을 지향하는 RADARSAT의 위성의 동체좌표계를 보여주고 있다. 안테나의 빔과 지표면이 만나는 영역, 즉 안테나의 시야는 RADARSAT의 경우 위성진행방향의 시야폭이 지상거리로 4.3km 정도이고 위성진행방향에 수직인 방향(경사거리방향)으로는 약 38km(사용된 빔형식에 따라 다르다. 본 연구자료는 F3 빔모드로 관측된 영상이다)정도이다. 이를 위성중심의 동체좌표에서 바라본다면 거의 피치축과 요축이 이루는 평면에 놓여 있다고 볼 수 있을만큼 폭이 좁은 영역이다. 따라서 안테나의 빔과 지표면이 만나는 지점의 중심축선상을 안테나 빔의 방위각(롤축에 대해서)과 고각(요축에 대해서)을 이용한 기하학적인 방법으로 구하기 위해서는 펄스가 안테나를 떠나 는 순간 위성의 요, 피치, 롤각의 자세변화를 보정해 주어야 한다. 이는 곧 영상내 픽셀의 절대적 위

치(지리적 좌표)가 자세측정 센서의 정밀도에 의존함을 말한다.

0.1도 정도의 자세측정 오차는 RADARSAT의 고도와 빔고각을 고려할 때 지상거리로 약 2km의 오차를 유발시킨다. 이러한 사실로부터 SAR 위성의 자세측정 정밀도를 높이기 위해서는 수신되는 영상신호의 도플러 편이를 이용하는 것이 더 높은 정밀도를 보장함을 알 수 있다. 자세결정을 위해서는 자세오차모형을 세우고 헤더파일에 주어진 관측자료의 함수식을 이용하여 이들의 차이가 최소가 되도록 자세각 변수들을 바꿔주는 방법이 근본 내용이다. 관측자료는 도플러 중심주파수이며, 도플러 중심주파수란 안테나 빔이 지상과 만나는 영역(안테나 시야)의 중심선상을 따라 측정된 위성과 목표물간의 상대운동으로부터 야기된 수신전파의 도플러편이이다.

따라서 위성과 목표물간의 상대속도 성분 중에서 상대거리벡터 방향의 성분만을 기술하는 모형식이 요구되며 다음과 같다(Marandi 1997, Goldstein 1980, Wertz 1986).

$$D(\psi, \phi, \theta, t, t_m) = F_{DC} = -\frac{2}{\lambda} \frac{d\rho}{dt} \quad (2)$$

$$= -\frac{\lambda}{2} (0 \sin \gamma \cos \gamma) Q T \begin{pmatrix} v_x + w y_{st} \\ v_y - w x_{st} \\ v_z \end{pmatrix}$$

여기서, (v_x, v_y, v_z) 는 위성속도벡터, w 는 지구자전각속도, ρ 는 $|\vec{r}_{sc} - \vec{r}_{target}| = (x_{st}, y_{st}, z_{st})$,

ψ 는 요각, θ 는 피치각, ϕ 는 롤각, $Q = \begin{pmatrix} 1 & \Delta\psi & \Delta\theta \\ -\Delta\psi & 1 & \Delta\phi \\ -\Delta\theta & -\Delta\phi & 1 \end{pmatrix}$, T 는 관성좌표계에서 국부수직수

평좌표계로의 변환행렬, $(0 \sin \gamma \cos \gamma)$ 는 위성과 목표물간의 상대거리벡터의 방향코사인, γ 는 안테나빔의 고각, t 는 도플러 중심주파수 측정시간, t_m 은 해당 영상소에 해당하는 지상점까지의 전파왕복시간이다. 또한 안테나 빔은 고각의 변화(경사거리변화)에 따라 안테나 빔의 최대전력이 나타나는 방위각이 다르며 고각과 방위각은 RADARSAT의 경우 다음과 같은 관계를 갖는다(Marandi 1997).

$$\text{영상취득시 적용된 고각}(\gamma) = 37.2889404(\text{deg}) \text{ (영상중심에 대해서)}$$

$$\Psi = \gamma - 29.8(\text{deg})$$

$$\text{Azimuth} = 0.0006605\Psi^3 - 0.001803\Psi^2 - 0.000185\Psi + 0.0594361$$

위성을 도플러 중심주파수 측정시간까지 전파시키고 앞서 안테나의 빔형태의 조건을 이용하여 이 때의 지상점을 계산해서 이들과 위성간의 도플러 편이를 계산하여 관측값과 비교한다. 위 모형식에서 미소한 롤각의 변화는 미소한 고각(γ)의 변화를 야기하며, 함수 D에 $(\Delta\phi)^2$ 의 영향을 주므로 무시할 수 있다. 자세결정방식은 다음과 같다(Marandi 1997).

$$E(\psi, \theta) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (D(\psi, \theta, t, t_j) - \text{관측값})^2}{N+1}} \quad (3)$$

표 3. 자세결정 결과.

| 자 세 측 | 회 전 각(radian) |
|-------|---------------|
| yaw | -0.00234 |
| pitch | 1.7194091e-7 |

위 식을 최소화하는 ψ, θ 가 영상신호 취득시 위성의 자세라고 말할 수 있으며 그 결과는 표 3과 같다.

$$\text{사용된 도플러 중심주파수}(Hz) = -8980.2363281 - 4172115.000t + 12746085376.000t^2 \quad (4)$$

여기서, t 는 가장 안쪽 경계선(픽셀)까지 진행된 시간을 영으로 할 때 경사거리방향을 따라 펄스가 추가로 진행된 시간이다.

2.4 영상취득기하

RADARSAT의 경우 영상신호 수신방법은 지표면상에서 영도플리션을 따라 신호를 수신한다. 이러한 신호 수신방식은 그림 2에서 보듯이 안테나 시야의 안쪽 지점이 그려내는 지상궤적에 수직인 방향으로 영상자료를 취득하기 위함이다. 즉 영상내의 뒤틀림을 방지하기 위함이다(Curlander & McDonough 1991). 이러한 관측방식은 영상의 네 모서리에 해당하는 위경도 자료를 이용하여 앞서 위성을 전파시키면서 이들 지점이 영도플리션상에 걸렸을 때의 시각, 방위각(롤축에 대해서)을 계산해 보면 알 수 있으며, 그 결과는 표 4와 같다. 본 연구에서는 영도플리 수신방식을 모형화해서 관측된 목표물의 지리적 좌표를 영상좌표로 변환하는 방법을 사용하지 않고 도플러 중심주파수 수신방식, 즉 DEM의 각 격자점이 안테나 빔패턴 조건을 만족하면서 안테나 시야 중심선상(피치축과 요축이 이루는 평면)에 놓였을 때의 시각과 경사거리를 이용하여 대상지역의 영상좌표를 주어진 영상의 좌하귀 지점이 안테나 시야에 걸린 시각과 경사거리를 원점으로 하여 상대적인 방법으로 계산하였으며 그 결과는 표 5와 같다. 영상의 네 모서리와 DEM의 네 모서리가 안테나 시야 중심축선상에 걸린 시각과 이 때의 경사거리, 도플러 주파수, 도플러 주파수 편이율을 표 6에 보였다. 참고적으로 헤더 파일에 근거한 영상의 좌하귀 지점에서의 도플러 중심주파수 관측값은 도플러편이값이 -8980.23(Hz)이고, 도플러 편이율값은 -1730.27(Hz)이다. 또한 이 때의 경사거리는 1022831.3(m)이다.

2.5 영상의 자리매김과 지형보정

지형에 따른 레이더 영상내 왜곡(지형효과)은 그림 3처럼 크게 세가지가 혼합되어 나타난다. 만일 DEM이 없는 지역에 대해 단순히 개개의 픽셀들의 지리적좌표를 결정하여 지구타원체표면으로 자리매김을 할 경우 지구타원체표면에 투영된 영상은 지형효과를 제거하지 못하게 되며, 그 결과 자리매김은 큰 오차를 유발하게 된다. 만일 DEM이 있는 경우 지형의 고저에 따른 위성안테나와 목표물간의 경사거리 변화를 계산할 수 있으며, 그 결과 영상좌표계 내에서의 좌표변화를 계산하여 보정하지만 번거로움이 수반된다. 그러나 이 경우 DEM의 각 격자점의 지리적좌표를 위성의 운동을 기술하는 지구중심관성좌표로 변환하여 각 격자점에 해당하는 목표물이 안테나의 시야에 들어온 시각과

표 4. 영상의 네 모서리 지점에서의 영도플러 신호수신시간.

| 영상내 위치 | 영도플러선상에 걸린 시각(second of day) | 방위각(deg) | 경사거리(m) |
|--------|---------------------------------|-----------|-----------|
| 좌하귀 | 34655.15518023 | 86.586658 | 1022291.2 |
| 우하귀 | 34655.15664185 | 86.592396 | 1048498.0 |
| 좌상귀 | 34662.72459796 | 86.601907 | 1022336.5 |
| 우상귀 | 34662.72465045 | 86.607461 | 1048541.8 |

헤더파일 자료에 근거한 영상의 네 모서리 지점에서의 영도플러 신호수신시간.
 좌하귀 : 34655.156 우하귀 : 34655.156 좌상귀 : 34662.724 우상귀 : 34662.724 .

표 5. 영상의 네 모서리 지점에서의 도플러 중심시간.

| 위치 | 안테나 시야중심에 걸린 시각(second of day) | 경사거리(m) | 도플러편이(Hz) | 도플러편이율(Hz/sec) |
|-----|-----------------------------------|-----------|-----------|----------------|
| 좌하귀 | 34660.3608 | 1022954.0 | -9010.62 | -1729.22 |
| 우하귀 | 34660.6428 | 1049215.1 | -9251.44 | -1684.03 |
| 좌상귀 | 34667.9008 | 1022946.9 | -8961.96 | -1729.02 |
| 우상귀 | 34668.1807 | 1049207.2 | -9200.24 | -1683.83 |

표 6. 수치지형표고모형 네 모서리 지점에서의 도플러 중심시간.

| 위치 | 안테나 시야중심에 걸린 시각(second of day) | 경사거리(m) | 도플러편이(Hz) | 도플러편이율(Hz/sec) |
|-----|-----------------------------------|-----------|-----------|----------------|
| 좌하귀 | 34664.0868 | 1041509.3 | -9144.63 | -1696.98 |
| 우하귀 | 34664.0446 | 1043045.0 | -9158.46 | -1694.37 |
| 좌상귀 | 34664.3758 | 1041737.5 | -9144.19 | -1696.58 |
| 우상귀 | 34664.3336 | 1043273.7 | -9158.01 | -1693.97 |

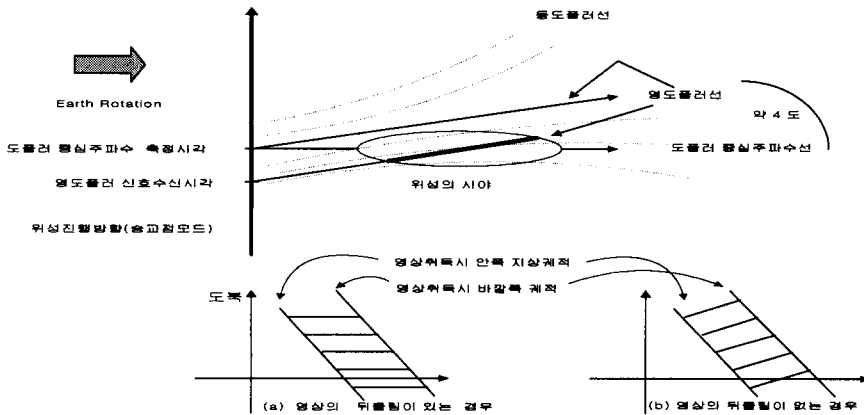


그림 2. 영도플러 신호수신.

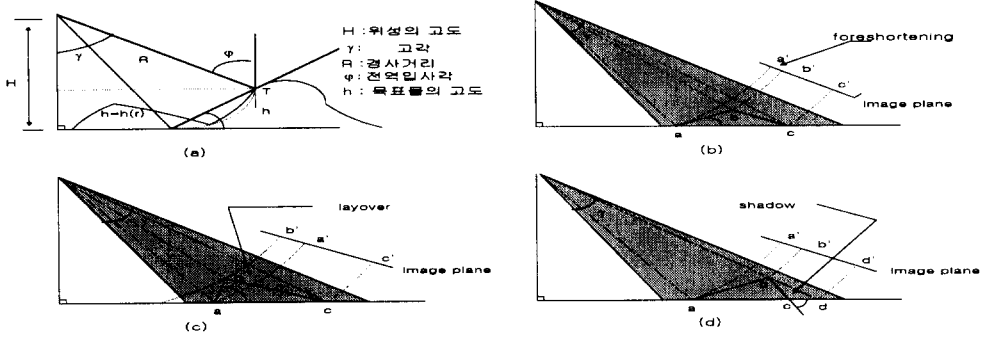


그림 3. 지형효과.

이 때의 경사거리를 계산하면 쉽게 영상좌표를 결정할 수 있다. 그 결과 지형보정과 자리매김이 동시에 수행되는 것이다.

목표물의 취득시각과 경사거리는 영상내 한 행과 열이 대표하는 시간의 크기와 경사거리 크기로 나누어 주면 경사거리영상내 행 번호와 열 번호를 얻게 된다. 즉 행의 증가방향을 i , 한 행에서 열의 증가방향을 j 라 했을 때, 방향은 관측시간 t 의 함수이고 방향은 관측경사거리 r 의 함수이다. 따라서,

$$i = \text{int} \left(\frac{t - t_{R_0}}{IPP} \right), \quad IPP = \frac{1}{PRF}$$

$$j = \frac{r - r_0}{m_r}$$

여기서, t_{R_0} 는 range gate start time, r_0 는 영상자료내 첫 영상소까지의 경사거리, m_r 는 경사거리 영상의 해상도, PRF 는 1371.2269287(Hz), IPP 는 0.000729274(sec)이다.

그러나 문제는 경사거리 영상이 아닌 지상거리 영상으로 주어진 경우, 경사거리를 지상거리로 전환해 주어야 하는 작업이 요구된다. 거의 모든 연구논문이 이 점에 있어서 구형의 지구를 가정하고 기하학적 관계에서 유도되는 근사식을 사용하여 지상거리를 계산하지만 본 연구는 수치적인 방법(최규홍 외 1986)을 통해서 대상영역의 중심이 안테나 시야 중심선상에 걸린 시각에서 위성의 직하점과 목표물과의 타원체 표면상의 거리를 계산하여 경사거리변화에 따른 지상거리변화를 함수 형태로 표현했으며, 그 결과는 표 7과 같다.

$$x(m) = \text{경사거리(slant range)} - \text{안쪽경사거리(inner swath slant range)}$$

$$\text{지상거리}(m) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3$$

여기서, c_0 는 위성의 직하점에서 관측영역 안쪽 경계선까지의 타원체면상의 지상거리이다.

표 7. 경사거리에서 지상거리로의 환산.

| 계수 | 계수값 | 계수 | 계수값 |
|-------|-----------|-------|-----------|
| c_0 | 606793.15 | c_2 | -1.12e-16 |
| c_1 | 1.50 | c_3 | 2.77e-12 |

사용된 지상거리영상의 한 행의 시간적 크기는 0.000471초이고 열의 지상거리는 3.125미터이다. 여기서 픽셀의 크기가 곧 해상도를 의미하지는 않으며, 주어진 영상의 해상도는 25미터이다. DEM을 이용한 영상자리매김 과정의 장점은 지형의 기복에 의한 영상내 좌표값의 변화(보정값)를 다시 계산할 필요가 없다는 점이며, 영상취득 당시 위성의 진행방향과 관측기하에 따라 안테나 시야에 보인 역전영역(overlay)영역과 음영(shadow)영역을 추출함으로써 지형보정의 결과를 평가할 수 있다. DEM을 구성하는 지상점들에 대해서 영상취득 기하조건을 만족하는 시각은 반복법을 통해 결정한다. 계산과정은 다음과 같다.

1) 도플러 중심주파수 신호수신의 경우, 영상좌표원점의 절대시각 추산값을 초기값으로 위성을 전파시키면서 동체좌표계 상에서 방위각 90, 즉 요측과 피치측이 이루는 평면에 지상점이 들어올 때까지 반복한다(그러나 실제로는 고도각에 따라 안테나빔의 최대전력을 보이는 방위각은 다르며 이러한 조건을 적용해야만 한다. 만일 zero Doppler 신호수신의 경우라면 도플러 방정식을 영으로 하는 조건을 사용하며 본 연구의 대상자료는 이러한 방식으로 수신되었다).

2) 조건을 만족하면 이 때의 시각과 안테나의 고각, 기하학적 경사거리를 계산한다. 지상점이 시야 중심에 들어온 시각에서 위성의 상태벡터를 계산하고 위성의 방향각(heading angle)을 계산하여 해당 영상라인의 방향각으로 간주한다. 그 결과 위성 안테나 시야선상에서 지형의 경사도를 계산할 수 있다.

3) 이 때 동체좌표계나 관성좌표계 내에서 해당 지상점의 상대운동에 따른 도플러 중심주파수와 도플러 편이율을 계산한다(zero doppler 신호수신시 계산할 필요가 없다).

4) 3)에서 계산된 도플러 매개변수들을 이용하여 안쪽 지표면경로(swath)의 경계선까지의 도플러 경사거리를 계산한다(zero doppler 신호수신시 단순히 기하학적인 경사거리에 해당).

5) 목표지점까지의 도플러 경사거리에서 4)의 결과를 빼준다.

6) 5)의 계산결과를 지상거리로 환산한 다음 안쪽 지표면경로(swath)의 경계선에서 지상점까지의 지상거리를 계산한다.

7) 6)의 결과를 픽셀의 크기(지상거리 : 3.21m)로 나누어 픽셀의 번호를 결정한다.

8) (영상취득 개시시각 - 안테나 시야 중심에 걸린 시각)/(한 라인에 해당하는 시간) 를 계산하여 라인의 번호를 계산한다.

DEM을 구성하는 모든 지상점들의 영상좌표를 계산하고 이를 바탕으로 실제 영상자료의 해당위

치를 찾아가 샘플링함으로써 그 밝기값을 얻고자 하는 영상지도의 해당위치에 심어주게 된다. 또한 DEM을 이용한 3차원 입체영상을 만들기 위해서는 그 값을 밝기값으로 화면에 표시해 주도록 프로 그래밍하게 된다. 모든 DEM 자료의 영상좌표내 위치결정이 끝나면 이 과정에서 빔의 전역입사각 자료와 지형도의 경사도 자료(이를 계산하기 위해서는 위성의 진행각(heading angle)이 필요하다.)가 마련되므로 국부입사각을 계산할 수 있다(소진욱 1997). 국부입사각지도를 만들기 위해서는 지상점의 높이에서 경사를 고려하지 않은 입사각(global incidence angle)을 계산해야 한다. 이를 위해서는 DEM의 중심라인을 따라 타원체표면상의 지상거리를 512구간으로 나누어 높이를 고려하지 않은 입사각을 계산한다. 각 구간에서 높이를 10m마다 증가시키면서 150m까지 높이에 따른 입사각을 계산한다. 그 결과 지상거리와 높이에 따른 입사각변화 자료를 3차원 곡면fitting를 시켜 임의의 지상거리와 높이에 따른 입사각을 계산할 수 있도록 환산식을 마련한다. 대상지역의 국부입사각지도(local incidence angle map)를 작성하면 지형의 고저에 따른 역전영역(overlay)나 음영영역(shadow)이 나타나는 지점을 탐색하게 된다. 이를 바탕으로 역전영역(overlay)지도, 음영영역(shadow)지도를 작성하여 영상지도에 추가적인 정보를 제공하여 영상지도인식에 도움이 되도록 할 수 있다.

3. 결과 및 토의

그림 4의 왼쪽은 대상영역의 지형도이며 오른쪽은 영상자리매김 결과의 정밀도를 가늠하기 위해 추출된 해안선의 윤곽이다. 오른쪽 자료를 영상자리매김 과정에 입력하여 계산된 영상좌표를 가지고 실제 영상에서 그 위치를 표시하게 된다. 그림 5는 격자간격을 12.5m로 하였을 때 얻은 대상영역의 수치지형표고모형으로서 대부분이 평지에 가까우며 동남 해안쪽에 급경사면을 보이는 것이 특징이다. 그림 6은 본 연구에서 사용된 영상자리매김 알고리즘의 정밀도를 보여주고 있다. 왼쪽 중앙에 보이는 선착장의 끝부분에서 나타나는 영상좌표의 오차는 다음과 같다.

- 라인 방향 : 12 lines : $12 \times 3.125\text{m} = 37.5\text{m}$
- 픽셀 방향 : 11 pixels : $11 \times 3.125\text{m} = 34.375\text{m}$

주어진 영상의 헤더파일에서 제시하는 라인과 픽셀 방향의 위치오차한계는 각각 600m와 40m이다. 따라서 위의 실험에서 얻은 라인및 픽셀방향 오차는 오차범위 내에 존재한다. 이와같은 오차를 더욱 줄이기 위해서는 RADARSAR에 대한 보다 정밀한 궤도자료와 영상취득시의 자세각 정보가 제공될 필요가 있다. 또한 GPS 수신기를 이용한 측지를 통해 대상영역의 위치정밀도를 향상시킨 DEM을 만들어야만 한다고 생각한다. 그림 7a는 앞 결과에서 계산된 위치편향을 대상영역 전체에 동일하게 보정해준 결과이며 매우 일치함을 볼 수 있다. 그림 6에서 보듯이 사용된 영상자리매김 과정의 내부적인 오차는 없다는 것이 한 지점에서 계산된 위치편향오차를 모든 DEM의 지리적좌표에 동일하게 보정해 줌으로써 상당한 일치를 얻어냈다는 사실에서 분명하다. 또한 RADARSAT이 제공하는 궤도자료 정밀도 내로 본 연구에서 사용한 궤도전파기의 결과가 수렴하므로 RADARSAT의 영상자료와

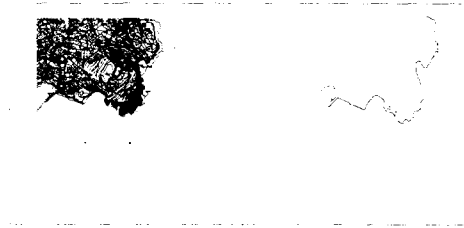


그림 4. 지형도와 추출된 해안선 윤곽.

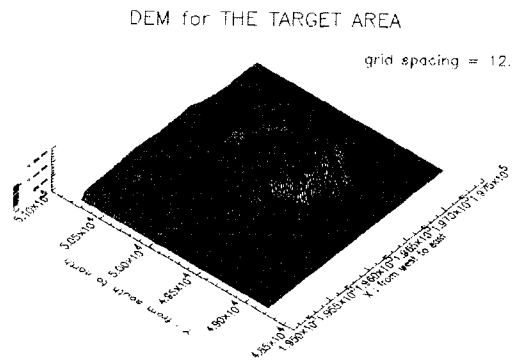
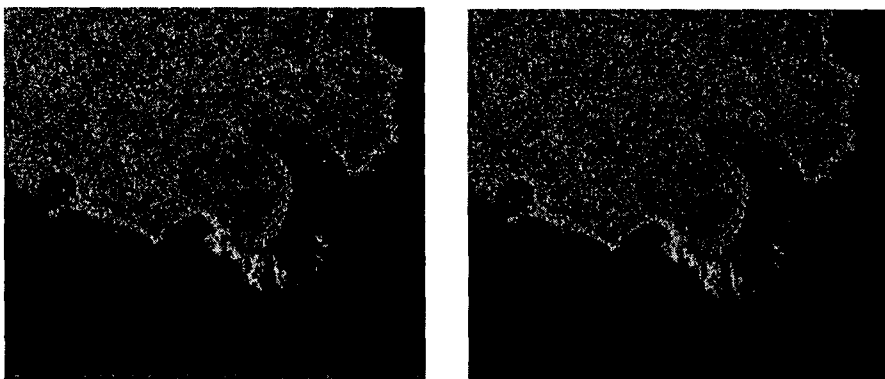


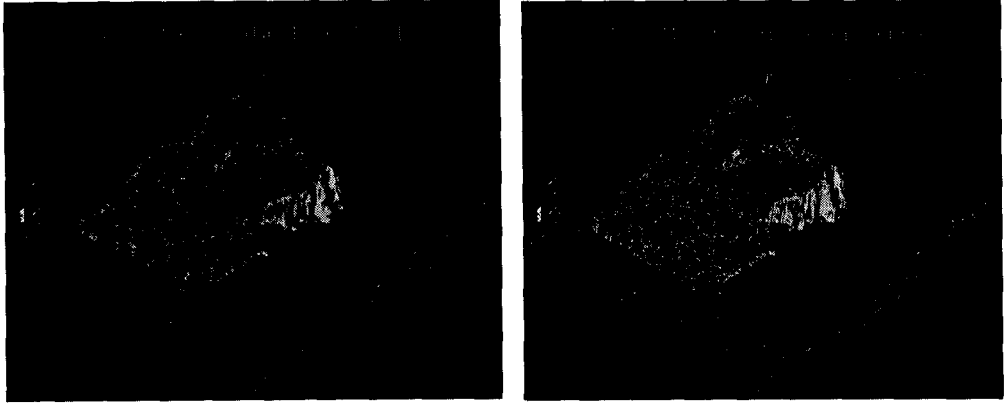
그림 5. 대상영역(우도섬 남동해안)의 수치지형표고모형(2km × 1.9km).



(a)

(b)

그림 6. 영상자리매김 결과. (a) 위치편향을 보정하지 않은 경우, (b) 위치편향을 보정한 경우.



(a) (b)

그림 7. DEM을 이용한 3차원 입체영상자료.

의 상대적인 오차계산을 한다는 것은 큰 의미가 없다고 보며 절대적인 위치오차를 계산한다는 것은 무리이다. 다만, 영상좌표값 계산에서 오차가 나타난 또 다른 근본적인 원인은 실제 영상취득상황과 영상취득모형 상호간에 위치편향이 존재하기 때문이라고 판단되며 이처럼 영상취득모형 전체에 동일한 크기의 편향을 야기하는 요소는 다른아닌 지상거리 계산과 상대적인 영상 좌표(픽셀번호)를 계산하는 데 기준으로 삼은 영상의 중심에 해당하는 지상점의 고도를 RADARSAT 영상제작시 고려하지 않았기 때문이라고 생각한다. 주어진 영상의 중심에 관한 지리적 정보는 헤더파일을 근거로 할 때 위도는 $33^{\circ}29'13''.0$, 경도는 $126^{\circ}51'20''.06$, 전역입사각은 $42.685(\text{deg})$, 지명은 북제주군 상도리 지역, 고도는 약 $70(\text{m})$ 이다. 그 결과 RADARSAT이 제공한 원래 영상 전체가 모형을 통해 계산된 지상거리보다 증가한 것으로 나타났으며, 이에따라 고도 70m 로 인해 발생하는 지상거리증가량 75.89 를 보정하였다. 그 결과 그림 6a를 얻었다. 이 값을 보정하지 않을 경우 픽셀오차는 약 32픽셀(100m)의 차이를 보인다. 그림 7a는 격자의 크기를 12.5m 로 했을 때 공1차 보간(bilinear interpolation)을 통해 얻은 입체영상이다. 그림 7b는 본래 영상의 한 픽셀의 크기에 해당하는 격자크기(3.125m)로 했을 때 얻은 입체영상이다. 중앙에 지형도에서 볼 수 있듯이 물을 가두어 두는 시설같은 부분이 선명하게 보인다.

참고문헌

- 소진욱 1997, 석사학위논문(연세대학교: 서울)
 손홍규, 정수, 유복모 1997, 대한토목학회 논문집, III-1, 81

윤재철 1996, 석사학위논문(연세대학교: 서울)

정수 1997, 박사학위 논문(연세대학교: 서울)

최규홍, 천문석, 이용삼, 김경미, 김호일, 전용우 1986, M/W 대 통신망 치국 설계용 측지 기술식에 작성에 관한 연구(연세대학교: 서울)

Curlander, J. C. 1982, *IEEE Transaction and Remote Sensing*, Vol. GE-20, NO. 3, Jul., pp.359-364

Curlander, J. C. & McDonough, R. N. 1991, *Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing*(John Wiley and Sons: New York), pp.390-393

Escobal, P. R. 1975, *Method of Orbit Determination*(John Wily and Sons: New York), pp.318-357

Goldstein, H. 1980, *Classical Mechanics*(Addison Wesley: New York), pp.128-173, pp.606-610

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. 1994, *Global Positioning System Theory and Practice*(Springer-Verlag: New York), pp.255-271

Marandi, S. R. 1997, "RADARSAT Attitude Estimates based on Doppler Centroid Measurements", *Proceedings on a Workshop on RADARSAT Data Qaulity, RSCSA-AN0007-02*, Feb. 4

Wertz, J. R. 1986, *Spacecraft Attitude Determination and Control*(D.Reidel Publishing Company: Dordrecht)

Wievell, C. E. 1992, *IEEE transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-24, NO. 4, Jul., pp.473-480