고해상도 다중편파 RADARSAT-2 SAR자료를 이용한 서남극해의 빙산 탐지

김진우* · 김덕진*[†] · 김승희* · 황병준** · John Yackel***

*서울대학교 지구환경과학부, **Scottish Marine Institute, ***Department of Geography, University of Calgary

Detection of Icebergs Using Full-Polarimetric RADARSAT-2 SAR Data in West Antarctica

Jin-Woo Kim*, Duk-jin Kim*[†], Seung-Hee Kim*, ByongJun Hwang** and John Yackel***

* School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Scottish Marine Institute, *Department of Geography, University of Calgary

Abstract : In this study, detection of icebergs that have various scattering characteristics around Wilkinson glacier in West Antarctica is investigated using C-band fully-polarimetric RADARSAT-2 SAR data. Various polarimetric analyses including Freeman-Durden decomposition, $H/A/\bar{\alpha}$ decomposition, entropy (H) and anisotropy (A) method, and Wishart unsupervised classification, were applied for the RADARSAT-2 data used in this study. The polarimetric decomposition methods were successfully classified most of the iceberg, yet some iceberg with similar intensity of volume and surface scattering as sea ice were indistinguishable. Unsupervised classification with a combination of the polarimetric parameter, $[1-H][1-A]$, gave a possibility to distinguish those unclassified iceberg.

Key Words : Iceberg, West Antarctica, Polarimetry, RADARSAT-2, Classification

요약 : 본 논문에서는 서남극해에 위치한 Wilkinson 빙하주변에 존재하는 다양한 산란특징을 보이는 빙산을 고해상도 C-밴드 RADARSAT-2의 다중편파 합성구경레이더 (SAR) 자료를 이용하여 탐지할 수 있는 기법을 연구 하였다. 다중편파 SAR 자료에 적용할 수 있는 다양한 기법 들 중 전자기파 산란 특성을 파악할 수 있는 Freeman-Durden decomposition, $H/A/\bar{\alpha}$ decomposition, 그리고 entropy (H)와 anisotropy (A) 기법 들과, 다중편파 SAR자료의 분류를 위해 Wishart 무감독 분류법을 연구지역 SAR 자료에 적용 하였다. 그 결과, Freeman Durden, $H/A/\bar{\alpha}$ decomposition을 이용한 기법들은 대부분의 빙산들을 잘 분류 하였지만 해빙과 비슷한 표면 산란과 체적 산란을 가지고 있는 빙산은 구분되지 않았다. 반면, H와 A의 조합 변수 중 하나인 $[1-H][1-A]$ 변수를 이용한 무감독 분류법은 이러한 빙산들을 잘 구분하였다.

1. 서론

빙산(iceberg)은 극지방의 빙하나 빙봉으로부터 분리되어 나온 얼음 조각이다. 최근 연구 보고에 따르면, 전 지구 기후변화로 인하여 빙하의 붕괴 비율이 높아지는 추세이고 특히, 서남극 지역 빙하의 붕괴 위험이 매우 높다는 것을 보여주고 있다 (MacAyeal, 1992; Rignot and Thomas, 2002). 빙하의 붕괴 비율이 높아지면, 빙산의 분포가 증가하기 때문에 빙산의 분포는 기후변화와 밀접하게 관련될 수 있다. 또한 빙산의 분포는 선박의 안전한 운항과도 연관되어 있기 때문에 정확하게 탐지할 필요성이 있으며, 최근 다양한 인공위성 자료를 이용한 빙산 탐지 기술이 개발되고 있다 (Willis *et al.*, 1996; Tournadre *et al.*, 2008). 특히, 대기의 영향이 적고 밤낮으로 전천후 관측이 가능한 합성구경레이더 (Synthetic Aperture Radar; SAR) 자료를 이용한 빙산 탐지 기술은 장기간 어둠이 계속되는 겨울철 극지방의 빙산 모니터링을 위해 필수적이다 (Willis *et al.*, 1996; Power *et al.*, 2001).

지금까지 SAR를 이용한 대부분의 빙산탐지 연구는 문턱 값(threshold)을 이용하여 밝은 픽셀을 탐지한 후 다양한 수학적 morphology를 적용하여 탐지하거나 (Willis *et al.*, 1996), 픽셀결합과정(pixel bonding process)을 통한 빙산의 경계를 추출하는 방식 (Williams *et al.*, 2010), 또는 Constant False Alarm Rate (CFAR) 기법을 적용하여 확률적으로 빙산을 탐지하는 기법 등 (Power *et al.*, 2001)이 주로 활용되었다. 하지만 이러한 연구들은 사용된 SAR 자료의 해상도가 좋지 않고 대부분 단일편파로 획득된 자료여서, 비교적 크기가 큰 빙산만을 탐지할 수 있거나 또는 스펙클 등이 빙산으로 잘못 탐지될 가능성이 높았다. 본 연구에서는 고 해상도의 SAR영상에서 나타날 수 있는 다양한 산란특성을 지닌 빙산들을 효과적으로 탐지할 수 있는 다중편파 기법을 연구하였다.

이를 위해, 고해상도 C-밴드 다중편파 RADARSAT-2자료를 사용 하였다. 촬영 지역은 최근 빙산이 많이 생성되고 있는 서남극해의 Wilkinson 빙하 주변이다. 다중편파 SAR 자료로부터 추출할 수 있는 다양한 파라미터 (예를 들면, Freeman-Durden decomposition, H/A/mean alpha decomposition, 그리고 entropy

Fig. 1. Location of the study site in West Antarctica.

Table 1. Specification of RADARSAT-2 data used in this study

Acquisition date/Time (UTC)	November 26, 2010/02:41:02
Center Frequency	5.405 GHz (C-band)
Polarization	HH/VV/HV/VH
Pixel Spacing	4.7m (Range)/5.3m (Azimuth)
Incidence Angle	47.7° ~ 48.9°

(H)/anisotropy (A) 등의 조합 변수)를 이용한 Wishart 무감독 분류법을 적용하였다.

2. 연구자료

본 연구에서 획득된 SAR 자료는Wilkinson 빙하 주변의 고해상도 C-밴드 다중편파 RADARSAT-2자료이다(Fig. 1). 촬영시간은 UTC 시간으로 2010년 11월 26일 02:41이며(Table 1), 다중편파 분석을 위하여 Single Look Complex (SLC) 자료로 처리하였다. 정량적 통계 분석을 위하여 획득된 자료는 look-up table을 이용하여 후방산란계수 (backscattering coefficient)를 추출 하였고, 스펙클 잡음(speckle noise)을 줄이기 위하여 5×5 Lee 필터를 적용 하였다. 획득된 SAR 자료의 세부적인 정보는 Table 1에 나타내었다.

3. 연구 방법

Fig. 2(a)는 획득된 SAR 자료의 Pauli RGB 영상을 나타낸다. 영상에서 검정색은 해양 (open water), 파란

Fig. 2. (a) Pauli RGB image of RADARSAT-2. (b) The solid white boxes represent typical iceberg features and the dotted white boxes represent unusual iceberg features.

색은 해빙 (sea ice), 그리고 흰색은 빙하 (glacier) 및 빙산 (iceberg)으로 쉽게 구분할 수 있다. 바람이 불지 않는 잔잔한 해양 표면에서는 후방산란이 일어나지 않기 때문에 모든 편파자료에서 후방산란계수가 매우 낮다. 따라서 SAR 영상에서 해양이 해빙 및 빙산과는 뚜렷하게 구별된다. 그리고 남극에 존재하는 해빙은 대부분이 일년생 해빙 (first-year ice)이므로 해빙 표면의 유전율이 매우 높다. 따라서 표면산란이 매우 강하게 발생한다. 그리고 대부분의 일년생 해빙은 HH 및 VV 편파의 후방산란계수가 HV 및 VH의 후방산란계수보다 높고 또한 VV 편파의 후방산란계수가 HH 편파의 후방산란계수보다 상대적으로 높다 (Onstott *et al.*, 1987). 따라서 Pauli RGB영상에서는 대부분 파란색으로 나타난다. 반면에 빙하 및 빙산은 담수가 얼어서 생성되었기 때문에 낮은 유전율로 인하여 체적산란이 강하게 발생한다. 그리고 체적산란이 강한 경우에는 체적 안의 산란체에서 다중산란이 발생하기 때문에 후방 산란되는 교차편파 (cross polarization)의 세기가 증가한다 (Fung and Eom, 1982). 그러므로 빙하 및 빙산은 모든 편파의 후방산란이 강하게 발생하고 영상에서 흰색으로 나타난다. 또한 빙산은 해수면 위에 드러난 높이가 수 ~

수백 m이므로 영상 안에서 음영효과가 뚜렷하게 나타난다. 따라서 이러한 특징들을 이용하면 후방산란계수만으로도 빙산을 탐지하는 것이 가능하다. 하지만 Fig. 2(b)에서 알 수 있듯이, 일부 빙산의 후방산란계수가 해빙의 후방산란계수와 비슷한 경향을 보이기 때문에 후방산란계수만으로는 이러한 빙산을 구분하기가 쉽지 않다. 이러한 빙산 (이후 '특이빙산'으로 명함)의 산란특징은 현장조사 자료가 없기 때문에 정확한 원인을 알 수 없지만 발생원인으로 가능한 가정은 다음과 같다.

- (1) 빙산 표면이 녹으면서 유전율이 증가하여 체적산란이 약해지고 표면산란이 강하게 발생하였다.
- (2) 빙하로부터 붕괴될 때 해수에 잠기면서 표층의 높은 염분으로 인하여 유전율이 증가하게 되고 이로 인하여 체적산란이 감소하고 표면산란이 강하게 발생하였다.

현재로서는 이러한 특이빙산의 발생원인을 규명하기 어렵지만 향후 현장조사를 통하여 특이빙산의 정확한 원인이 무엇인지 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 위에서 설명한 특이빙산의 구분 가능성에 대하여 초점을 맞추었다. 특이빙산을 구분하기 위하여, 다양한 다중편파 기법에서 추출할 수 있는 변수들의 통계적 분석을 수행

하여 특이빙산의 구분 가능성을 조사하였다. 사용된 다중편파기법은 다음과 같다.

1) Freeman-Durden decomposition

Freeman-Durden decomposition (Freeman and Durden, 1998)은 전자기파의 산란을 유발하는 산란체의 물리적 구조를 모델화하여 전자기파의 산란특징을 표면 산란 (surface scattering), 이중 산란 (double bounce scattering), 체적 산란 (volume scattering)으로 분리할 수 있는 다중편파기법 중의 하나이다. 각각의 산란 모델은 공분산 행렬(covariance matrix)로부터 아래의 식과 같이 추출 해낼 수 있다.

$$[C_3] = [C_3]_{surface} + [C_3]_{double} + [C_3]_{volume}$$

$$= \begin{pmatrix} \langle S_{HH}^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HV}^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{VV}^2 \rangle \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} f_s \beta^2 + f_d \alpha^2 + f_v & 0 & f_s \beta + f_d \alpha + f_v \frac{f_v}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} f_v & 0 \\ f_v \beta + f_d \alpha + \frac{f_v}{3} & 0 & f_v + f_d + f_v \end{pmatrix}$$

여기서 H와 V는 수평 편파(horizontal polarization)와 수직 편파(vertical polarization)를 의미하며, s, d, v는 표면(surface), 이중(double), 체적(volume)을 의미한다. 그리고 각각의 산란 정도의 크기는 다음과 같이 정의된다.

$$P = P_s + P_d + P_v = |S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2$$

$$P_s = f_s (1 + \beta^2), P_d = f_d (1 + \alpha^2) \text{ and } P_v = \frac{8}{3} f_v \quad (2)$$

2) H/A/ $\bar{\alpha}$ decomposition

H/A/ $\bar{\alpha}$ decomposition (Cloude and Pottier, 1997)은 Freeman-Durden decomposition과는 다르게 모델기반의 다중편파기법이 아닌 실제 SAR 자료의 수학적 분석(즉, 고유벡터 및 고유치 분석)을 통하여 지배적인 산란특징을 분리하는 다중편파 기법중의 하나이다. H/A/ $\bar{\alpha}$ decomposition을 통하여 추출되는 변수는 entropy (H), anisotropy (A), 그리고 mean alpha ($\bar{\alpha}$)이다. H는 산란체에서 발생하는 서로 독립적인 산란들의 분포를 나타내는 변수로서, 단일 산란이 우세할수록 작아지는 특징을 가지고 있다. A는 가장 지배적인 산란

Table 2. Combination of H/A

	H	1-H
A	[H][A]	[1-H][A]
1-A	[H][1-A]	[1-H][1-A]

외에 발생하는 서로 독립적인 산란들의 상대적인 크기를 비교할 수 있는 변수이다. 마지막으로 $\bar{\alpha}$ 는 산란체의 지배적인 산란특징을 나타내는 변수로서, $\bar{\alpha}$ 가 0°에 근접하면 단일 또는 표면산란이, 45°에 근접하면 체적산란이, 90°에 근접할 때에는 이중 산란이 우세하다고 알려져 있다. 각각의 계산식은 다음과 같다.

$$H = - \sum_{i=1}^3 P_i \log_3(P_i)$$

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (3)$$

$$\bar{\alpha} = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 = \frac{\pi}{2} (P_2 + P_3)$$

3) H/A 조합 변수

Lee and Pottier (2009)는 H와 A의 다양한 조합을 통하여 물리적 해석이 가능한 변수들을 추출하였다. 예를 들면, H(1-A)의 값이 크기 위해서는 H는 증가하고 A는 감소해야 한다. 즉 산란체에서 서로 독립적인 다양한 산란이 발생하면서 각각의 산란 정도가 서로 비슷해야 한다. 그러므로 H(1-A)가 큰 산란체는 random한 산란특징을 갖는다. 반면에, (1-H)(1-A)의 값이 크기 위해서는 H와 A가 모두 작아야 한다. 그러므로 산란체에서 단일산란 특징이 강해야 하고 이 산란특징 외에 서로 독립적인 산란들의 정도는 거의 0에 가까워야 한다. 즉, (1-H)(1-A)가 큰 산란체는 단일 산란이 강한 특징을 갖는다. H와 A의 조합을 통하여 추출될 수 있는 변수들은 Table 2에 설명 하였다.

4. 결 과

1) 다중편파 기법에서 추출된 변수들의 통계적 분석

앞에서 설명한 변수들이 해빙, 빙산, 그리고 특이빙산에서 어떠한 특징을 갖는지를 알기 위하여 SAR 영상에서 각각의 샘플 지역을 나누었다(Fig. 3). 그리고 각각

Fig. 3. Sampled area for sea ice (SI), iceberg (IB), and unusual iceberg (DIB).

Fig. 4. Mean and standard deviations of volume, double, and surface scatterings in sampled area calculated by Freeman-Durden decomposition (Freeman and Durden, 1998).

의 샘플 지역에서 100 픽셀의 후방산란계수 값을 추출하여 평균과 표준편차를 계산 하였다. Fig. 4는 해빙, 빙산, 그리고 특이빙산의 샘플 지역에서 계산된 Freeman-Durden decomposition의 평균과 표준편차를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 빙산 (IB)은 체적산란이 매우 우세하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존 빙산의 전자기파 산란특징을 연구한 결과와 다르지 않다 (Power *et al.*, 2001). 하지만 특이빙산 (DIB)은 해빙 (SI)과 유사하게 표면산란이 우세한 결과를 보여주었다.

Fig. 5. (a) Mean and standard deviation of mean alpha ($\bar{\alpha}$) in sampled area. (b) Mean and standard deviation of entropy (H) in sampled area. (c) $H/\bar{\alpha}$ diagram.

그리고 특이빙산의 평균과 표준편차의 분포를 통하여 특이빙산의 Freeman-Durden decomposition 확률밀도함수가 빙산 및 해빙의 확률밀도함수와 서로 중복되어 있음을 알 수 있다. 즉 Freeman-Durden decomposition을 이용하여 특이빙산, 빙산, 그리고 해빙의 구분 가능성이 낮다는 사실을 알 수 있다.

다음으로 앞에서 설명한 동일한 방법으로 $H/A/\bar{\alpha}$ decomposition의 평균과 표준편차를 계산 하였다(Fig. 5). 빙산의 경우, H 와 $\bar{\alpha}$ 의 평균은 각각 약 0.87과 45° 이

Fig. 6. Combination of H/A calculated from RADARSAT-2 polarimetric SAR data.

고, 표준편차는 각각 0.03과 5° 이다 (Fig. 5(a) 와 (b)). 이를 $H/\bar{\alpha}$ 다이어그램에 투영을 하면 Fig. 5(c) 에서와 같이 빙산 (IB)의 지배적인 산란 특징이 체적산란인 것을 알 수 있다. 반면에, 특이빙산 (DIB)과 해빙(SI)에서 $\bar{\alpha}$ 의 평균값은 각각 약 39° 와 38° , 각각의 표준편차는 약 7° 와 3° 이다. 그리고 H의 평균은 각각 약 0.68과 0.6이고, 각각의 표준편차는 0.06과 0.07이다. 이를 $H/\bar{\alpha}$ 다이어그램에 투영을 하면 특이빙산 (DIB)과 해빙(SI)의 지배적인 산란 특징이 표면산란인 것을 알 수 있다 (Fig. 5(c)). 이러한 결과는 Freeman-Durden decomposition의 결과와 유사하다. 그리고 계산된 평균과 표준편차의 분포를 통하여 특이빙산 H와 $\bar{\alpha}$ 확률밀도함수도 해빙과 빙산의 확률밀도함수와 서로 독립적이지 못하기 때문에 $H/A/\bar{\alpha}$ decomposition도 특이빙산, 빙산, 그리고 해빙의 구분 가능성이 높지 않다는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 위에서 계산된 H와 A를 조합하여 다양한 편파 변수들을 추출 하였다(Fig. 6). 추출된 변수들의 평균과 표준편차를 위의 방법과 동일하게 계산 하였다. 그 결과, 추출된 변수들 중에서 $[1-H][1-A]$ 의 평균과 표준편차의 분포를 통하여 특이빙산, 빙산, 그리고 해빙의

Fig. 7. Mean and standard deviation of $[1-H][1-A]$ in sampled area.

확률밀도함수가 서로 중복되지 않음을 알 수 있다(Fig. 7). 이러한 결과의 물리적 해석을 위해서는 정확한 현장 자료가 필요하지만 이용 가능한 현장조사자료의 제약으로 인해 앞에서 가정한 사실을 바탕으로 몇 가지 가능성을 제안 하였다. 우선, 해빙은 표면산란만이 우세하기 때문에 $[1-H][1-A]$ 가 특이빙산과 빙산에 비하여 상대적으로 작은 범위에서 분포하고 특이빙산과 빙산 사이에서 선 앞의 가정과 같은 이유로 체적산란과 표면산란 정도

Fig. 8. (a) H/α -Wishart unsupervised classification result. (b) $H/\alpha/[1-H][1-A]$ -Wishart unsupervised classification result.

의 차이가 발생하기 때문에 $[1-H][1-A]$ 에서 서로 구분되는 것으로 여겨진다.

2) Wishart unsupervised classification

획득된 SAR 자료를 이용하여 특이빙산, 빙산, 그리고 해빙을 구분하기 위하여 기존 연구(Lee *et al.*, 1999)에서 제안한 Wishart unsupervised classification 기법을 적용하였다. Fig. 8(a)는 H/α -Wishart unsupervised classification 기법을 적용한 결과이다. 그 결과, 해양, 빙산, 그리고 해빙은 뚜렷이 구분이 되었지만, 특이빙산은 빙산이 아닌 해빙으로 구분 되었다. 앞에서 설명 하였듯이, 특이빙산, 빙산, 그리고 해빙의 H 와 α 의 확률밀도함수가 서로 독립적이지 못하기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 보인다. 다음으로 $H/\alpha/[1-H][1-A]$ -Wishart unsupervised classification 기법을 적용한 결과, Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이, 특이빙산이 빙산으로 정확하게 구분되는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 고해상도 C-band 다중편파 SAR 자료를 이용하여 다양한 산란특징을 지닌 빙산을 탐지하기 위해서는 $H/\alpha/[1-H][1-A]$ -Wishart unsupervised classification method가 효율적인 방법이라는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 서남극해에 존재하는 산란특징이 다양한 빙산을 탐지하기 위해서 고해상도의 C-밴드 다중편파 RADARSAT-2 자료를 획득한 후, 다양한 편파기법을 적용하여 빙산 탐지 가능성을 조사 하였다. 그 결과, 체적산란이 우세하게 나타나는 빙산은 후방산란계수 및 다양한 다중편파 기법에서 추출되는 변수(예: Freeman-Durden 과 $H/A/\alpha$ decomposition)들을 이용하여 해양 및 해빙과 뚜렷하게 구분할 수 있었다. 하지만, 산란특징이 해빙과 비슷하게 나타나는 빙산(특이빙산)의 경우에는 위 변수만을 이용해서는 해양 및 빙산과 구분이 어려웠다. 반면에 H 와 A 의 조합변수 중의 하나인 $[1-H][1-A]$ 을 이용한 $H/\alpha/[1-H][1-A]$ -Wishart classification 기법을 이용하면 특이빙산까지도 해양 및 해빙과 뚜렷하게 구분할 수 있었다. 따라서 이 방법이 고해상도의 C-밴드 다중편파 SAR 자료를 이용하여 빙산을 탐지하기 위한 최적의 방법이라는 것을 확인할 수 있었다.

사 사

이 논문은 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업(RACS_2010-1008)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 사용된 RADARSAT-2 자료는 SOAR-DLR-5078을 통해 JYackel에 제공된 자료입니다.

참고문헌

- Cloude, S.R. and E. Pottier, 1997. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 68-78.
- Freeman, A. and S.L. Durden, 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 963-973.
- Fun, g A.K. and H.J. Eom, 1982. Application of a combined rough surface and volume scattering theory to sea ice and snow backscatter, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-20(4): 528-536.
- Lee, J.S. and E. Pottier, 2009. Polarimetric radar imaging: from basics to applications, CRC Press, New York, USA.
- Lee, J.S., M.R. Grunes, T.L. Ainsworth, L.J. Du, D.L. Schuler, and S.R. Cloude, 1999. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex wishart classifier, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2249-2257.
- MacAyeal, D.R., 1992. Irregular oscillations of the West Antarctic ice sheet, *Nature*, 359: 297-32.
- Onstott, R.G., T.C. Grenfell, C. Matzler, C.A. Luther, and E.A. Svendsen, 1987. Evolution of microwave sea ice signatures during early summer and midsummer in the marginal ice zone, *Journal of Geophysics Research*, 92(C7): 6825-6835.
- Power, D., J. Youden, K. Lane, C. Randell, and D. Flett, 2001. Iceberg Detection Capabilities of RADARSAT Synthetic Aperture Radar, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(5): 476-486.
- Rignot, E. and R.H. Thomas, 2002. Mass balance of polar ice sheets, *Science*, 297(5586): 1502-1506.
- Tournader, J., K. Whitmer, and F. Arduhin, 2008. Iceberg detection in open water by altimeter waveform analysis, *Journal of Geophysical Research*, 113(C08040): 1-8.
- Williams, R.N., W.G. Rees, and N.W. Young, 1999. A technique for the identification and analysis of icebergs in synthetic aperture radar images of Antarctica, *International Journal of Remote Sensing*, 20(15&16): 3183-3199.
- Willis C.J., J.T. Macklin, K.C. Partington, K.A. Teleki, W.G. Rees, and R.G. Williams, 1996. Iceberg detection using ERS-1 Synthetic Aperture Radar, *International Journal of Remote Sensing*, 17(9): 1777-1795.