

해수면 온도분포에 대한 최대상관계수법과 역행렬법의 적용*

이태신, 정종률
서울대학교 해양연구소

Application of MCC and Inverse Method for the AVHRR/SST

Tae-Shin Lee, Jong Yul Chung
Research Institute of Oceanography, Seoul National University
Seoul 151-742, Korea

Abstract

The surface velocities were estimated by the Maximum Cross Correlation(MCC) method and an inverse method from AVHRR/SST. In the results of MCC, discontinuous flow fields were estimated in the case that cross correlation coefficient was above 0.5 but these flow pattern disappeared when cross correlation coefficient was above 0.9. This estimation was conspicuous near SST patterns of eddies. In the results of inverse method, flow field was continuous and eddy motion was estimated definitely but the velocity was overestimated in compared with MCC result over the area of small temperature gradient. This result may be due to temperature error included in SST calculated and spatial variation of heat flux.

1. 서론

NOAA위성의 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)자료는 관측의 특성상 광

1995년 4월 30일 접수 ; 1995년 6월 14일 수리.

* 본 연구는 1994년도 교육부 기초과학 육성연구비에 의하여 일부 지원을 받아 수행된 것임.

역성, 동시성, 주기성이 유지되므로 이 자료로부터 산출한 SST(Sea Surface Temperature)자료는 표층해수의 움직임 추정하는데 유용한 자료가 된다. SST자료를 이용하여 표층류를 추정하는 연구는 두 부류로 구분된다(Kelly, 1989). 하나는 SST영상에 나타나는 표층의 특징적인 모양을 추적자로 보고 그것을 추적하는 것이고 다른 하나는 한정된 지역내에서 어떤 물리법칙을 만족하는 표층의 흐름을 추정하는 것이다. 전자는 형태추적법(Feature tracking method)과 최대상관계수법(Maximum Cross Correlation method: MCC)이 있다. 형태추적법은 염료, 식물색소, 클로로필의 분포, 온도등에 의해 나타나는 특징적인 모양에 대한 연속적인 영상으로 부터 그 모양의 이동과 경과 시간을 이용하여 표층의 유속을 추정하는 것이다(Vastano와 Border, 1980; Hatakeyama et al, 1985). 최대상관계수법은 형태를 추적할 때 가시적으로 하지않고 하나의 영상에 있는 형태를 중심으로 작은 구역을 설정하고 시간연속인 다음 영상에서 넓은 구역을 설정하여 보다 넓은 구역내에서 작은 구역의 위치를 이동시키면서 이전 영상의 형태와 상호 상관계수(Cross correlation)가 가장 큰 방향으로 흐름의 크기를 계산하는 것이다(Emery et al, 1986; Wahl과 Simpson, 1990). 후자의 방법은 연구해역내에서 어떤 물리법칙을 만족하는 표층유속을 추정하는 것이다. Kelly(1989)는 AVHRR/SST자료를 이용하여 온도보존식으로 부터 표층유속을 추정하였다. 연구해역을 격자로 구성하여 시간연속인 영상으로부터 온도의 시, 공간적인 변화를 계산하고 등온선에 수직인 이류속도(Advective velocity)를 계산하였으며 등온선에 수평인 성분을 구하기위하여 발산, 와도, 에너지 최소화의 제한요소를 사용하였다. 계산과정에서는 과결정체계(Overdetermined system)에 대한 역행렬법(Inverse method)를 사용하였다.

이상에서 언급한 표층류를 추정하는 방법들은 Kubota와 Shirota(1993)에 의해 지적된 바와 같이 각각 장, 단점이 있다. 특징추적법은 SST형태에 대한 가시적 분석이므로 확실한 오류발생원(예, 구름)을 피할 수 있는 반면에 분석자에 따라 오류의 크기가 일정하지 않다. 최대상관계수법은 오류의 크기가 객관적인 반면에 분석법이 해수의 흐름과 관계 없는 통계적 처리이며 상관계수의 하한치를 설정해야하는 불확정성이 있다. 역행렬법은 해수의 흐름과 관계있는 물리법칙에 기초하고 있지만 제한요소의 적용범위에 불확정성이 있다. 본 연구에서는 시간연속인 SST영상에 대하여 최대상관계수법과 역행렬법을 적용하여 표층유속을 추정하고 각 결과를 비교, 분석하고자 한다.

2. 자료와 방법

2-1. 자료

SST자료는 서울대학교 해양연구소에서 수신한 NOAA/AVHRR자료에서 산출하였다. 극궤도 위성인 NOAA의 주기는 약 100분으로서 상승과 하강궤도에 따라 동일 지역을 하루에 2번 주사하며 그 주기는 약 12시간이다. 지상해상력은 주사간격(IFOV: Instantaneous Field of View)

Table 1. Receiving time of data processed.

satellite	receiving	time	receiving angle(degree)
NOAA-10	1993. 11. 4	18:09	75
NOAA-12	1993. 11. 4	19:42	78

에 의해 결정되는데 천저에서 약 1.1 km이다(NESS 107, 1988). 현재 운용되는 NOAA 위성(9, 10, 11, 12, 14호)에 대하여 한반도 지역에서 양각이 좋은 경우(약 30°이상)에 수신을 하면 약 1~5시간 간격의 자료를 수신할 수 있으며 본 연구에서는 Table 1과 같이 시간간격이 93분인 연속영상자료를 이용하였다.

SST는 AVHRR의 채널4 자료를 이용하여 산출공식(SeaSpace, 1994)에 따라 산출하였다.

$$SST = 1.1 \times T_4 \quad \text{여기에서 } T_4 \text{는 채널4의 휘도온도}$$

이와같이 산출한 SST영상은 Fig. 1, Fig 2와 같이 한국 동안해역으로서 난수와류가 존재하며 영상의 크기는 290×290화소이다.

2-2. 방법

최대상관계수법의 적용에는 SST분포가 나타내는 해수표면의 특징적인 모양이 시간이 경과



Figure 1. SST image of study area (NOAA-10).

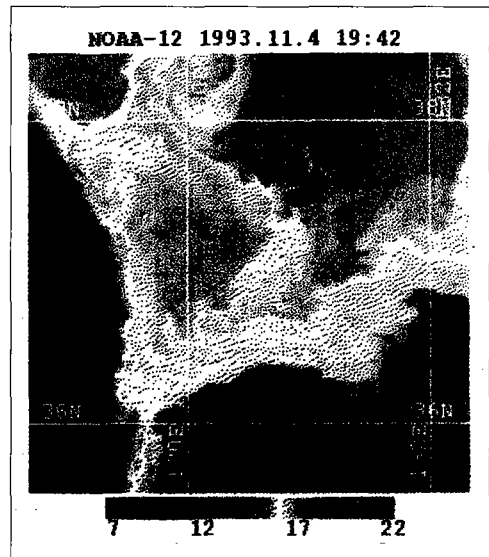


Figure 2. SST image of study area (NOAA-12)

함에 따라 그 모양이 변화하지 않고 이류에 의해서 이동된다는 가정이 필요하다. 해수의 흐름이 난류적이거나 대기-해양 경계면에서 열수지(Heat flux)가 공간적으로 변화가 큰 경우에는 상호상관계수가 작게 계산된다(Wahl과 Simpson, 1990). 시간 연속인 2개의 영상자료에서 최대상관계수를 계산하는 과정은 다음과 같다.

첫번째 자료에서 작은 구역(Pattern tile)을 설정하고 두번째 자료에 보다 넓은 구역(Search tile)을 설정한다(Fig. 3). 각각의 구역자료는 함수 P, S로 표시할 수 있으며 다음과 같이 상호상관계수를 계산한다.

$$\gamma_{sp}(k,l) = \{ \sum \sum [s(i+k,j+1) - \eta_s(k,l)] \times [p(i,j) - \eta_p] \} / D \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{여기에서 } D = \{ \sum \sum [s(i+k,j+1) - \eta_s(k,l)]^2 \times \sum \sum [p(i,j) - \eta_p]^2 \}^{1/2}$$

$$\eta_s = E[s(i,j)]$$

$$\eta_p = E[p(i,j)]$$

즉, 첫번째 자료의 P와 같은 넓이의 영역을 S내에서 이동 시키면서 두 영상자료 사이의 γ_{sp} 를 계산한다. 따라서 S내에서 P를 이동 시킨 횟수($k \times l$) 만큼 γ_{sp} 가 계산되며 S의 중심으로부터 γ_{sp} 가 가장 큰 위치까지 거리(Δl)을 산출할 수 있다. 유속의 계산은 두 영상간의 시간간격(Δt)과 Δl 로부터 $\Delta l / \Delta t$ 에 의해 계산한다. 이와같은 과정은 넓은 구역으로 설정한 S의 갯수만큼 계산되며 S의 이동거리는 분석자에 따라 결정될 수 있다.

역행렬법은 연구해역내에서 온도보존식을 이용하여 표층의 유속을 추정하는 것이다.

$$\partial T / \partial t + U \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T + Q \dots\dots\dots (2)$$

여기에서 κ 는 확산계수 U와 T는 각각 온도와 유속이며 Q는 열수지이다

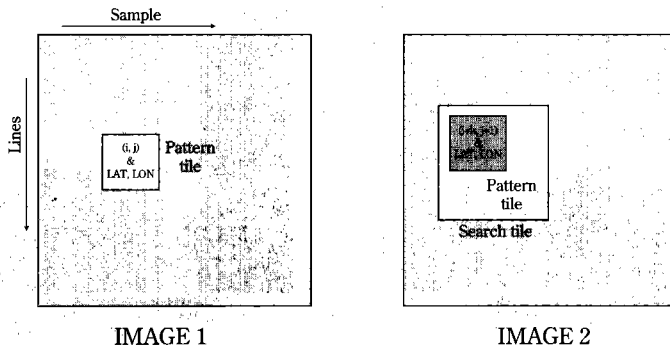


Figure 3. Pattern tile and search tile geometry.

유속의 크기를 $10^{-1}m/sec$ 로 간주하고 연안지역에서 나타나는 열전선의 수온경사의 크기를 $1^{\circ}C/10km$ 로 하고(Fedorov, 1983) 열확산계수를 $10^2m^2/sec$ 로 하면 규모분석에 의해 위식의 좌변 두번째항은 $O[10^{-5}]$ 우변 첫번째항은 $O[10^{-6}]$ 이 된다. 여기에서는 이와같은 분석에 따라 확산의 효과를 고려하지 않았다. 위식의 우변 두번째항인 열수지는 대기와 해양의 상호작용에 의해 나타나며 대기의 흐름 및 수온과 기온의 차이가 주요한 요소이다. 본 연구에서 설정한 연구해역의 규모(약200km)에서는 대기의 상태가 공간적으로 변화가 적으므로 연속 영상자료의 시간동안 열수지는 공간적으로 일정한 것으로 간주 하였다. 이와같은 가정에 따라 열수지의 크기는 각 영상자료의 SST평균의 차이에 의해 산출할 수 있다.

위 식은 Fig. 4의 격자체계에서 다음과 같이 사다리꼴 음해법(Trapezoidal implicit scheme)으로 차분화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & [(U_{i,j,n+1} + U_{i+1,j,n+1})/2] \times [(T_{i+1,j,n+1} - T_{i-1,j,n+1} + T_{i+1,j,n} - T_{i-1,j,n})/(4L)] + \\
 & [(V_{i,j+1,n+1} + V_{i,j-1,n+1})/2] \times [(T_{i,j+1,n+1} - T_{i,j-1,n+1} + T_{i,j+1,n} - T_{i,j-1,n})/(4L)] \\
 & = -[(T_{i,j,n+1} - T_{i,j,n-1})/2t] + QD \dots \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

여기에서 ij 는 격자상의 격자점이며 n 은 시간이고 QD 는 SST평균의 차이이다.

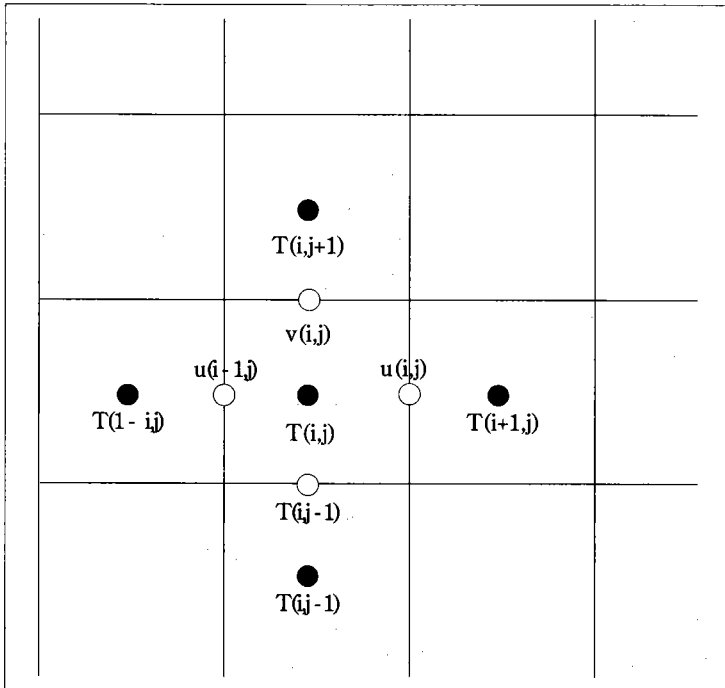


Figure 4. Grid system.

과정에 따라 구성되는 계수행렬 G 는 overdetermined의 경우가 되며 역행렬식의 해는 SVD (Singular Value Decomposition)에 의해 계산하였다(IMSL, 1989).

3. 결과 및 분석

3-1. 최대상관계수법

290×290화소의 SST영상자료에서 육지부분을 제외하고 10개화소 간격으로 유속을 산출하였다(Fig. 5). 10개화소 간격은 연구해역에 나타나는 난수와류의 형태를 나타낼 수 있다.

상관계수가 0.5인 경우의 결과(Fig. 5)에 의하면 해역의 남쪽에는 와류형태의 흐름(울릉분지 서부 상층해수)이 시계방향으로 흐르고 있는 것으로 나타났으며 이와같은 흐름은 울릉도 남동해역에서 반시계 방향의 흐름과 북상하는 흐름으로 나누어진다. 울릉도와 한국 동안사이의 해류는 한국동안을 따라 북상하는 흐름이 추정되었으며 울릉도 서쪽과 동쪽해역에서는 흐름이 불연속적으로 추정되는 결과가 일부 나타났다. 상관계수가 0.7인 경우의 결과(Fig. 6)는 상관계수가 0.5인 경우의 결과와 유사하며 상관계수가 0.9인 경우(Fig. 7)에는 연구해역의 남쪽에서 시계

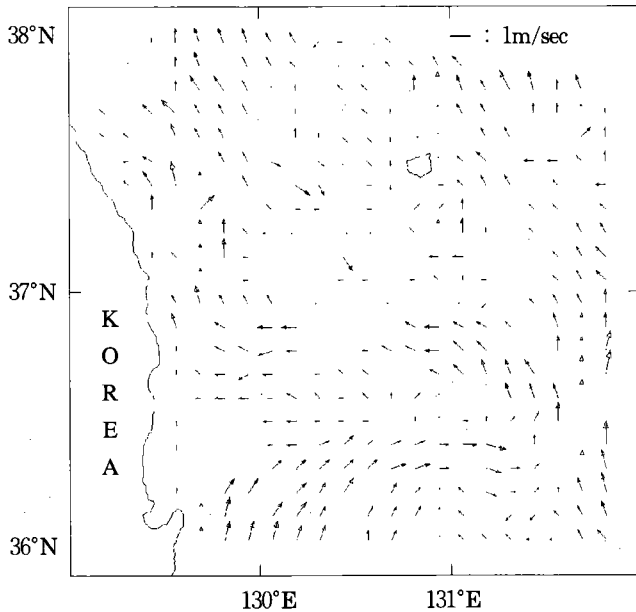


Figure 5. Velocities estimated by MCC (coefficient > 0.5).

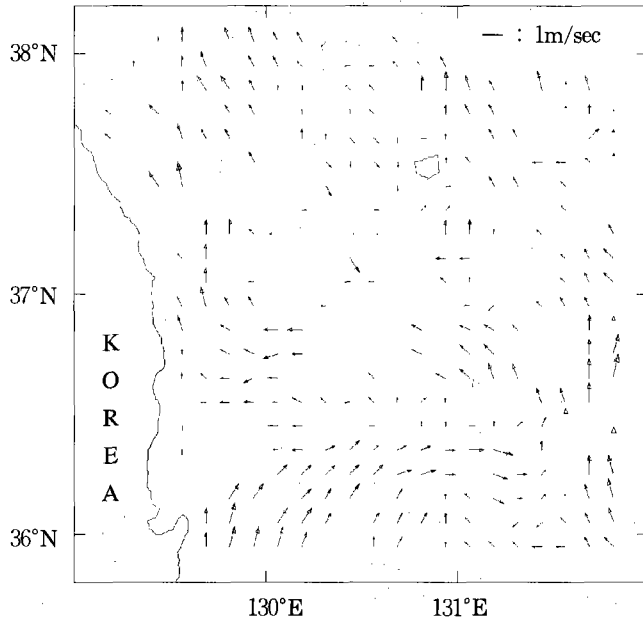


Figure 6. Velocities estimated by MCC (coefficient > 0.7).

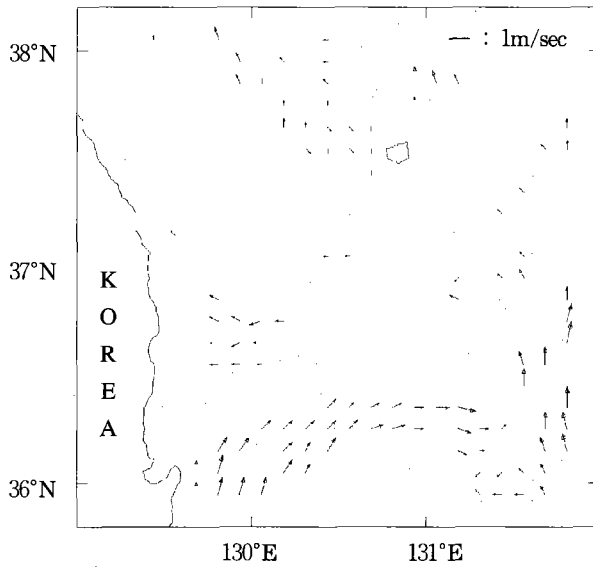


Figure 7. Velocities estimated by MCC (coefficient > 0.9).

방향으로 흐르는 와류형태의 흐름이 있으며 울릉도 근해역의 흐름은 뚜렷하지 않으나 불연속적인 흐름은 추정되지 않았다.

3-2. 역행렬법

유속을 추정하는 위치는 최대상관계수법의 경우와 동일하며 계수행렬의 크기는 행이 162이고(Fourier 급수 5차전개) 열의 크기는 유속이 추정되는 격자의 갯수로서 육지부분을 제외하고 514이다. 역행렬법에서는 온도보존식이외에 제한요소로서 가중치가 포함된 연속방정식($\omega \nabla \cdot U=0$)을 도입하였다. 이것은 수온경사가 작은 경우에, 산출한 SST에 포함된 온도오류에 의해서 추정유속이 크게 산출되는 것을($U=-(\partial T/\partial t)/|\nabla T|$) 방지 하기위하여 도입되었다. 제한요소에는 추정요소로서 가중치(ω)가 필요하며 가중치의 크기는 가장 적합한 것으로 알려진 $O[10^{-1}]$ 내에서 0.5를 사용하였다(이, 1994). 이와같이 도입된 제한요소에 의하여 행렬 G의 열은 514가 증가한다.

유속을 추정한 결과에 의하면(Fig. 8) 연구해역의 남쪽과 울릉도와 한국동안 사이에 존재하는 와류형태의 흐름이 추정되었다.

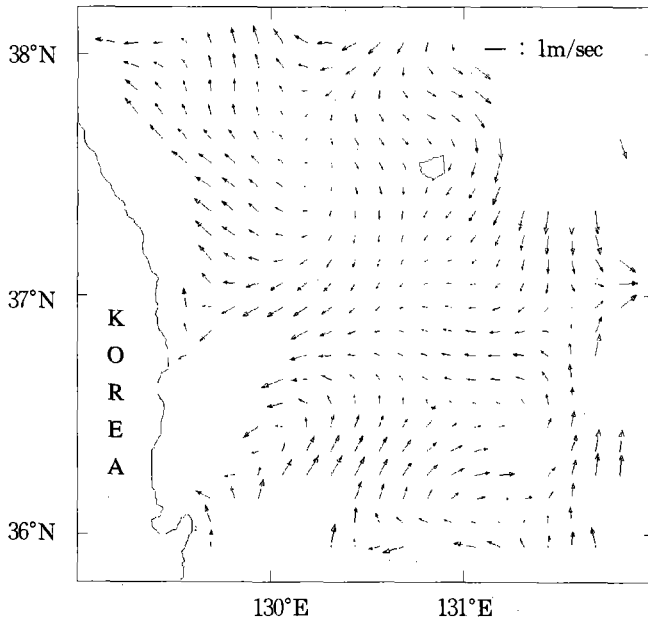


Figure 8. Velocities estimated by inverse method.

3-3. 분석

최대상관계수법은 SST형태의 추적을 통계적으로 처리하는 방법으로서 해수의 흐름을 지배하는 물리법칙과 직접 관련이 없다. 따라서 불연속적인 흐름이 추정될 수 있으며 상관계수가 0.5인 경우(Fig. 5)에 울릉도와 한국동안 사이의 와류형태 부분에서 이와같은 결과가 나타났고 상관계수가 0.7인 경우에는 울릉도 근해역에서 이와같은 결과가 나타났다. 반면에 상관계수가 0.9인 경우에는 흐름의 불연속적인 결과가 추정되지 않았으나 추정결과가 연구해역의 일부에 국한되며 특히 울릉도 서쪽해역에 존재하는 와류형태의 흐름은 추정되지 않았다. 이와같은 결과는 와류의 SST형태가 시간의 경과에 따라 이동하면서 유사한 형태를 유지하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 특히 와류부분은 SST형태가 이동하면서 연속영상에서 유사성이 작아지므로 최대상관계수법을 적용하는데 한계가 있을 수 있으며 최대상관계수법에서 신뢰할 수 있는 유속 추정치는 위성자료의 분해능(AVHRR의 경우 약 1.1km)을 연속영상의 시간간격으로 나눈 수치 이상으로서 여기에서는 약 20cm/sec 이상의 추정치를 신뢰할 수 있다.

역행렬법은 연구해역에 대하여 온도보존식과 연속방정식을 적용하여 유속을 추정하는 것이다. 추정된 결과(Fig. 8)는 흐름이 연속적이며 특히 와류의 형태가 뚜렷이 추정되었다. 반면에 유속이 최대상관계수법의 결과보다 크게 추정되었으며 울릉도 근해역에서 이와같은 경향이 현저하고 유향이 반대로 추정되었다. 이와같은 결과는 유속에 대한 현장관측이 수행되지 않아 실제 유속과 직접 비교할 수 없으나 수온경사가 비교적 작은(Fig. 1,2) 울릉도 근해역에서 특히 현저하므로 역행렬법의 적용과정에서, 산출한 SST에 포함된 온도오류와 열수지의 공간적 분포를 일정한 것으로 간주한 가정에 기인하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 이태신, 1994. NOAA/AVHRR자료를 이용한 표층이류 추정, 박사학위논문, 서울대학교, 126pp.
- Emery, W. J., A. C. Thomas, M. J. Collins, W. R. Crawford, and D. L. Mackas, 1986. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images, *J. Geophys. Res.*, 91, C11, 12865-12878.
- Fedorov, K. N., 1983, Lecture note on coastal and estuarine studies (the physical nature and structure of oceanic front), Spring-Verlag, 333pp.
- Hatakeyama, Y., S. Tanaka, T. Sugimura and T. Nishimura, 1985, Surface currents around Hokkaido in the late fall of 1981 obtained from analysis of satellite images, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 41, 327-338.
- IMSL STAT/Library, 1989 : FORTRAN Subroutines for Statistical Analysis, ver 1-1.
- Kelly, K. A., 1989, An inverse model for near-surface velocity from infrared images, *J. Phys.*

Oceanogr., 19, 1845-1864.

Kubota, M. and M. Shiota, 1993, Methods for estimating sea surface velocity from NOAA/AVHRR images, J. Remote Sensing Soc. Japan, 2, 169-187.

Menke, W., 1989, Geophysical Data Analysis : Discrete Inverse Theory, Academic Press Inc., 289pp.

NESS-107, 1988, Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers, rev-1, U.S. Department of Commerce, 58pp.

SeaSpace, 1994, TeraScan Reference Manual, ver. 1.3.

Vastano, A. C. and S. E. Border, 1984, Sea surface motion over an anticyclonic eddy on the Oyashio front, Remote Sensing Environ., 16, 87-90.

Wahl, D. D. and J. J. Simpson, 1990, Physical processes affecting the objective determination of near-surface velocity From satellite data, J. Geophys. Res., 95, No. C8, 13511-13528.