

衛星遙測海面溫度之評介

A Review on the Satellite Remote Sensing of Sea Surface Temperature

邱 爾 文*

Er-Woon Chiou

ABSTRACT

Sea surface temperature is a very important parameter of the Earth's environment. Not only does it serve as the boundary term in the radiative transfer processes in the atmosphere, thereby providing a strong influence on weather, but it directly affects all marine life in the oceans. The advent of the satellite era provides a tremendous potential for obtaining almost complete global coverage of sea surface temperature on a daily basis.

This paper reviews satellite-sensing capabilities for sea surface temperature measurements. The results of several research papers are discussed. Various algorithms developed for research purpose as well as those for operational application are presented. Special emphasis has been placed on the accuracy and resolution achieved by each method. The effect of volcanic aerosol contamination has also been discussed.

摘 要

海面溫度在大氣的熱收支，霧的形成，以及大氣海洋交互作用等方面，都扮演重要的角色。尤其臺灣四面環海，海面溫度更是各項大氣問題的重要參數之一。以往海面溫度的傳統觀測，由於精確度及時間與空間解析度不甚理想，所以未能進一步加以分析研究。可是近幾年來的研究已經顯示，衛星資料有助於彌補傳統資料的缺失，使我們能夠將海面溫度作更有效更廣泛的應用。

本文之目的是對衛星遙測海面溫度的各種理論與方法之演進作有系統的介紹，其中包括1970年至1983年各學者之研究結果，以及自1972年以來，美國國家大氣與海洋總署 (NOAA) 所採用的衛星

遙測海面溫度例行作業；對各種方法的精確度與解析度均特別提出說明，以便有助於瞭解引用到國內的可行性。此外，還探討了目前尚待解決的問題以及未來的發展趨勢。

一、海面溫度之應用

海面溫度與氣象學、氣候學及海洋學都有很密切的關係。海面溫度觀測資料也廣泛應用在漁業，軍事等各方面。

站在氣象學的觀點，「海面——空氣」溫度差是決定大氣穩定度、濕度、氣壓及風和雲的一項主要因子。從事長期天氣預測者也必須監視大尺度海面溫度異常，因為它會影響環流型式達好幾個月之久 (Namias, 1969)。

* 國立中央大學大氣物理系副教授

從氣候學的立場來看，由於海洋的熱容量很大，海洋對決定地球之氣候扮演很重要的角色。因此，海面溫度一向被列為氣候模式的最重要參數之一。

海洋學的研究也應用海面溫度來探討洋流 (Stumpf, 1974)，湧升流區 (Strong et al., 1972) 及海洋鋒面 (Legeckis, 1977) 等問題。

漁業界須參考海面溫度之分佈來判斷各種漁類的出現。例如：Albacore tuna 鮪魚的漁獲量主要來自 17.9°C 的海面，而總漁獲量的 $\frac{2}{3}$ 均出現在

16.8°C 至 19.2°C 之間 (Flittner, 1969)。臺灣海峽所捕獲之烏魚，則出現在冬至前後寒流來臨時所形成的顯著溫度梯度帶，其洄游適溫在 20°C 至 22°C 之間。

在軍事方面，可利用海面溫度與各不同深度的鹽度，溫度及壓力分佈來分析聲波的水平與垂直分佈，所得之結果對潛水作戰極為重要。

表一列出了氣象學、氣候學、海洋學及漁業與軍事上應用海面溫度時，所要求之精確度、解析度、以及空間與時間涵蓋範圍。

表一 各種用途所要求之海面溫度資料

用 途	期望的精確度	有用的精確度	解 析 度	含 蓋 範 圍
氣 象 學	0.5 °C	1.5°C	100km	全球，每天
氣 候 學	0.5 °C	1.5°C	100km	全球，5天-10天
軍 事	0.25°C	1.5°C	5km	200km×200km, 3小時
	0.5 °C	1.5°C	30km	海洋盆地，12小時
漁 業	0.5 °C	1.5°C	5km	沿海地區，每天
	0.5 °C	1.5°C	50-100km	產卵區，每天
海 洋	0.1 °C	1.0°C	0.1-5km	有限區域，12小時
	0.5 °C	2.0°C	5-100km	全球，每天至每週

二、海面溫度的傳統觀測

海面溫度的觀測由來已久。傳統觀測方法包括：(i) 海水桶方法、(ii) 引擎室入口溫度方法，(iii) 拖帶式電熱阻體器方法 (trailing thermistors)，(iv) 船身接觸方法 (Hull Contact Method)，(v) 輻射溫度計方法，(vi) 浮標方法。其中前四種方法均以商船、及一般船舶作為儀器載臺 (Platform)，而輻射溫度計則由擔負特殊研究工作的船隻或飛機攜帶使用。

以上各種方法所測得的物理參數並不相同。如輻射溫度計所量到的是厚度在 1 mm 以內的表皮溫度 (skin temperature)，而海水桶方法及類似之表面取樣本儀器所量到的，則是 10-20 cm 厚的表面層溫度 (surfacer layer temperature)。另一方面，引擎室入口溫度却代表引擎室入口之水溫，其深度隨船舶種類及載貨量多寡而異，通常為 1 公尺至 10 公尺之間。在夜間，因輻射冷卻作用，表皮溫度可能比海水桶或引擎室入口處溫度低 0.5°C 至 1.5°C。但是若在靜風的晴天，兩者只相差不到 0.2°C (Ewing and Mc Alister, 1960)。

Pichel (1978) 曾指出海洋氣象觀測報告中的

海面溫度，大部份都是船舶的引擎室入口溫度。根據 Tabata (1978) 與 James and Fox (1972) 的研究，和較精確的觀測方法比較，這一類海面溫度觀測，可偏高 0.2°C 至 0.7°C，其標準偏差大約在 0.9°C 至 1.5°C 之間。

船測海面溫度不但精確度不夠，在空間與時間的涵蓋範圍也很不理想 (Yates, 1981)。至於飛機攜帶輻射溫度計進行海面溫度觀測，雖然比較精確，但是由於費用昂貴，不可能作大區域的例行觀測。例如，美國海岸防衛隊在大西洋及太平洋沿岸的飛行觀測，每月只能進行一次，涵蓋範圍只限於沿飛機航行路線的窄小區域。

由此可見，唯有依靠繞極軌道衛星及地球同步衛星，我們才能突破傳統觀測的各種限制，求得涵蓋全球的大範圍海面溫度密集觀測資料。

三、衛星遙測海面溫度原理

衛星遙測海面溫度的基本原理是根據輻射傳輸方程式。在局地熱平衡 (local thermodynamic equilibrium) 的假設之下，若沒有散射，且地表之放射率為 1，則晴空時，衛星在大氣層頂所測到的上升輻射強度 $I(\lambda)$ 可寫成

$$I(\nu) = B(\nu, T_s) J(\nu, P_0) + \int \frac{1}{J(\nu, P_0)} B(\nu, T(P)) dJ(\nu, P) \dots\dots\dots(1)$$

其中

- T_s = 海面溫度 °k;
 P = 氣壓面 mb;
 P_0 = 海面氣壓 mb;
 ν = 波數, cm^{-1} ;
 T = 溫度, °k;
 B = 卜朗克輻射強度 $\text{erg cm}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}$;
 J = 任意氣壓面 P 到大氣層頂之透射函數;
 (1)式右邊第一項與第二項分別被稱為地表貢獻

項及大氣貢獻項。為求取海面溫度，我們通常選用在窗域 (window region) 之頻道。因此，初步可將 $J(\nu, P_0)$ 視為 1，並忽略大氣貢獻項，而得

$$I(\nu) = B(\nu, T_s)$$

由該式可求出海面溫度 (T_s) 的近似值，再經由各修正步驟，求得修正後之海面溫度。

常用到的紅外線窗域頻道包括 $3.5\text{--}4.5\text{ }\mu\text{m}$ ， $8.9\text{--}9.0\text{ }\mu\text{m}$ 及 $10.0\text{--}12.5\text{ }\mu\text{m}$ 。其中 $3.5\text{--}4.5\text{ }\mu\text{m}$ 在白天需要考慮反射太陽輻射之修正。若只在夜間才使用該頻道，則以上各窗域頻道，最重要的修正就是大氣衰減修正。

因水汽， CO_2 ， O_3 及氣懸膠體 (aerosol) 對輻射的吸收而需要進行的修正值列於表二。

表二 海面溫度的大氣衰減修正值

吸 收 之 氣 體	溫 度 修 正 值*
H_2O	0.0°C 至 9.0°C
CO_2	0.1°C 至 0.2°C
O_3	0.1°C
氣 懸 膠 體	0.1°C 至 0.95°C

*針對 $10.5\text{ }\mu\text{m}$ 至 $12.5\text{ }\mu\text{m}$ 的窗域頻道，通常所需要的修正。

四、衛星遙測方法之演進

1970 年以前，已經有許多學者討論到利用衛星的紅外線觀測資料，求得海面溫度場的可行性 (Curtis and Rao 1969, Rao 1968)。但是，因為只限在晴空時才能由衛星觀測求得海面溫度，這些研究只能選擇幾天針對有限區域（尤其在墨西哥暖流區）的海面溫度作個案分析。

1970年8月，Smith (1970) 首先提出了一種「統計式直方圖方法」，可用來推算晴空時應該觀測到的輻射強度。該方法是以一塊較大的區域（包含相當多的衛星觀測點）為對象，由所有各觀測點之亮度溫度頻率分配直方圖，推算出如果整個區域是晴空，所應該出現的直方圖。該直方圖的頻率極大點所對應之亮度溫度即可代表整塊區域的海面溫度。

Smith (1970) 假設二氧化碳分佈均勻，佔空氣體積的 0.031%，然後利用具代表性的極區，中緯度區與熱帶地區之溫度與水汽剖面，考察 Nimbus-2 衛星的高解像度紅外線輻射儀 (High Resolution Infrared Radiometer, HRIR) 所測到的 $3.8\text{ }\mu\text{m}$ 頻道之亮度溫度與實際海面溫度

差隨亮度溫度及視角變化情形。結果發現可以將溫度修正值 (ΔT)，用亮度溫度 (T_B) 及視角 (θ) 的函數表示出來。但是，該公式只能在視角 $<60^\circ$ 時使用。

Smith (1970) 並舉實例說明若採用 Nimbus-2 或 Nimbus-3 的 HRIR 資料，直方圖方法可以針對每一塊經緯度 $1^\circ \times 1^\circ$ 或 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的區域，各求出一個溫度值。但是，若區域內有雲之觀測點太多時，便求不出代表該區域的溫度。為了彌補這一點，Smith 建議連續分析若干天的海面溫度，再求合成結果。圖 1 就是將 1966 年 9 月 7、8、9 日三天 $1^\circ \times 1^\circ$ 直方圖結果合成後所獲得之海面溫度涵蓋範圍。由該圖可發現，將三天合成後，求不出海面溫度的地區已經縮小到持續有雲的一個小範圍。

Smith (1970) 並且從 1966 年 9 月 7、8、9 日三天 Nimbus-2 的 HRIR 資料所求得之北太平洋的海面溫度，取 97 點與附近船舶報告相比較，發現均方根差只有 1.7°K 。此外，還由平均差發現，衛星測得之海面溫度平均偏低 1°K 。Smith (1970) 認為這可能是由於表皮溫度 (skin temperature) 與表面以下之溫度 (subsurface

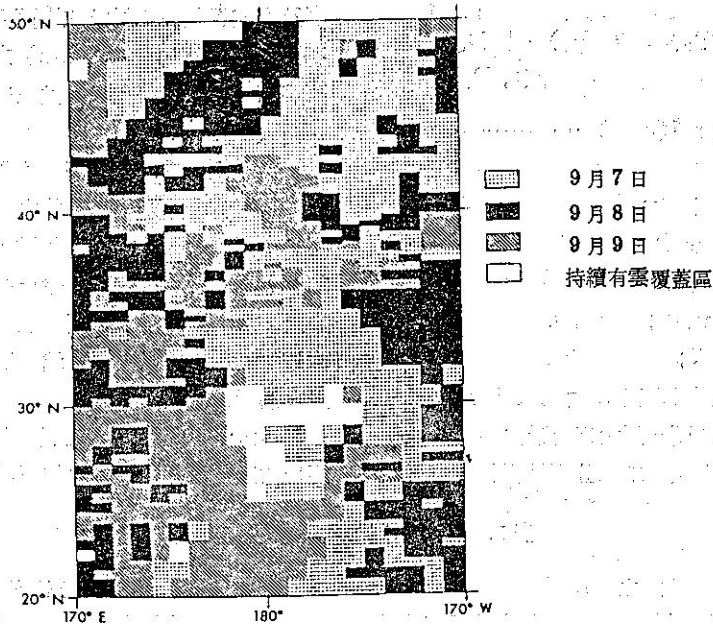


圖1. 1966年9月7, 8, 9日三天 Nimbus-2 HRIR 求得海面溫度之合成結果

temperature) 的差異所引起的,

Smith et. al (1970) 的直方圖方法之缺點就是不能針對衛星的每一個觀測點, 判斷是否晴空。因此, 所獲得海面溫度之解析度便大大打了折扣。於是, 有好幾位學者先後提出了另外幾種濾除雲的影響之方法。其中包括 Vukovich (1971) 的過濾方法 (filtering technique) 以及 shenk and Salomonson (1972) 的多頻道方法。過濾方法是針對 Nimbus 衛星的 HRIR 資料而設計的, 其效果不僅能消滅該資料所含的 200 HZ 雜訊, 並且能將雲的影響減低到最小程度, 而求得解析度為 20 哩的海面溫度場。根據 Vukovich (1971) 的個案研究, 所獲得的海面溫度場之定性特性 (如墨西哥暖流區之邊界, 舌形暖水區等) 十分理想。經過大氣修正後, 該方法求得之海面溫度, 平均只比研究船測得之海面溫度低 1°C 左右。

Shenk and Salomonson (1972) 分析 Nimbus 2 中解析度紅外線輻射儀 (Medium Resolution Infrared Radiometer, 簡稱 MRIR) 資料所採用的多頻道方法包括兩個步驟。第一步驟是利用 $0.2\text{--}4.0\ \mu\text{m}$ 頻道的反射比 (reflectance) 及 $6.4\text{--}6.9\ \mu\text{m}$ 頻道的亮度溫度, 來判斷各衛星觀測點是否為晴天。判斷時, 所根據的臨界值是預先從晴空區域觀測資料之頻率分配求出來的。第二個步驟是將判斷為晴天的各觀測點, 進行

大氣衰減之修正, 而求出海面溫度。Shenk and Salomonson (1972) 的經驗修正方法是藉逐步迴歸方程式用其他兩個頻道 (即 $0.2\text{--}4.0\ \mu\text{m}$ 及 $6.4\text{--}6.9\ \mu\text{m}$) 的觀測值及儀器之視角來修正窗域頻道 ($10\text{--}11\ \mu\text{m}$) 的亮度溫度。在北大西洋西部用一個月的資料實驗, 結果發現與船測海溫相差在 1°K 至 1.5°K 之間。

利用衛星資料分析全球海面溫度分佈的第一篇論文, 發表於 1972 年 (Rao et. al, 1972)。該研究使用 ITOS-1 衛星掃描輻射儀 (Scanning Radiometer, 簡稱 SR) 的 $10.5\text{--}12.5\ \mu\text{m}$ 紅外線觀測資料 (解析度約 7 km), 仿照 Smith et. al, (1970) 的直方圖合成方法, 求出美國國家氣象中心 (NMC) 的網格點上之南半球及北半球海面溫度分佈情形。該網格點在南北半球各包含 64×64 個極地平射投影方格 (polar stereographic squares)。每個方格的大小在中緯度大約為經緯度 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 大氣衰減修正步驟也採用 Smith et. al, (1970) 所提出來的方法; 結果發現, 從衛星求得之海面溫度場, 所顯示的一些特性 (如大西洋西部墨西哥暖流區, 40° 與 60°N 之間的大西洋與太平洋溫度梯度區以及南半球的非洲沿岸之暖流, 巴西暖流, 福克蘭冷流, 秘魯冷流等) 都非常合理, 與船測海面溫比較, 均方根差在 2°K 至 3°K 之間。

Maul and Sidran (1973) 針對 NOAA 系列衛星的掃描輻射儀 (SR)，對衛星求取的海面溫度之誤差，作了理論性分析。該研究考慮了大氣狀態、視角、雲量、雲高，以及儀器誤差等問題。其結果顯示，若沒有經過大氣衰減修正，視角為零時，乾燥之冬季大氣的海面溫度誤差為 2.2°C ，潮濕的副熱帶大氣則誤差可增大到 10.5°C 。如果視角逐漸增大到 60° ，由於斜向路徑輻射被大氣吸收較為嚴重，可使海面溫度偏低到 7°C 。只要有百分之十的雲，就會產生 0.5°C 至 4°C 的誤差，誤差的大小視積狀雲的高度而定。因此，該研究的結論認為，求取海面溫度只能使用晴空的資料。儀器的雜訊可能導致大於 1°C 的誤差，但是經過過濾手續可消除此項誤差。Maul and Sidran (1973) 還提出了一套將晴空觀測值作大氣修正之方法。採用該方法時，系統的總誤差估計為 2°C 左右。其修正方法必須有一個假設，那就是能從衛星獲得與探空氣球類似的探空資料，而且該資料足以代表 SR 的掃描帶 (swath width) (即 $0^{\circ} \leq \text{視角} \leq 40^{\circ}$)。

1973 年夏天所推行的中海洋動力實驗計劃 (Mid-Ocean Dynamics Experiment) (簡稱 MODE)，正好提供一個機會來考驗衛星遙測海面溫度之能力。MODE 的實驗區域是以 28°N ， 70°W 為中心點。Cogan and Willand (1976) 將該實驗所獲得之船舶、飛機與探空資料當作地面真值 (ground truth)，來分析 NOAA-2 SR 所求出之海面溫度。結果顯示只要能根據 MODE 的資料作最佳大氣修正，晴空時衛星測得之海面溫度誤差只有 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。甚至連距衛星路徑 500 km 遠的地方，均方根誤差也不超過 1°C 。他們採用了一種參數公式 (parametric formula)，將海面溫度的大氣修正值視為總積水汽 (integrated water vapor content) 的函數。Cogan and Willand (1976) 還考察了船舶資料與衛星資料的位置誤差，發現船舶的位置誤差通常高達緯度 0.5° ，有參考陸標時，則可以減少到緯度 $0.2-0.3^{\circ}$ 。因此，一般而言，位置誤差所導致的溫度偏差均小於 0.3°C 。

Morcrette and Irbe (1978) 曾利用 NOAA-5 極高解像輻射儀 (Very High Resolution Radiometer, 簡稱 VHRR) 的 $10.5-12.5\mu\text{m}$ 頻道之觀測值，求出加拿大安大略湖 (Lake Ontario) 與伊利湖 (Lake Erie) 1977 年 5 月 26 日

的湖面溫度。並且與空載輻射溫度計 (Airborne radiation thermometer, 簡稱 ART) 及浮標 (buoys) 測得之海面溫度相比較。

他們採用附近若干地方的陸上探空溫度濕度剖面，來進行大氣衰減修正。由於結果不十分理想，經過進一步研究，發覺因為某些層有雲出現，探空資料所提供之溫度與濕度剖面並不能代表湖面上的大氣狀況。於是 Morcrette and Irbe (1978) 將探空濕度剖面修正為相當於晴空之濕度剖面後，重新計算海面溫度，發覺誤差已經顯著減少，在安大略湖與伊利湖均方根誤差分別為 1.8°K 及 1.1°K 。不過他們特別指出，唯有當探空資料很清楚地顯示出某些層有雲，才能夠將濕度剖面作如此修正。

五、大氣窗域多頻道方法

Anding and Kauth (1970) 首先提出利用在紅外線窗域的兩個頻道同時觀測到的亮度溫度，來作大氣修正的構想。他們的研究發現利用 $9.1\mu\text{m}$ 與 $11.0\mu\text{m}$ 頻道，就可以不需要藉助其他氣象資料，而達到抵消大氣吸收與放射效應之目的。Maul and Sidran (1972) 採用 Davis and Vievee (1964) 的大氣穿透模式核算結果，却顯示應該選用 $8.6\mu\text{m}$ 與 $10.96\mu\text{m}$ 。接着，Anding and Kauth (1972) 將自加寬 (self-broadening) 效應列入考慮，採用比較好的水汽穿透模式，再度研究，發現最恰當的頻帶為 $8.95\mu\text{m}$ 與 $11.9\mu\text{m}$ 。

Prabhakarara et al. (1974) 將上述方法試用到 Nimbus 4 衛星 IRIS 儀器 $10.5\mu\text{m}$ 與 $13\mu\text{m}$ 頻帶的晴空海面實際觀測資料，並將求得之各海面溫度和經緯度 $\pm 1^{\circ}$ 以內的船測海面溫度比較，結果十分接近；在 $4^{\circ}-29^{\circ}\text{C}$ 的海面溫度範圍內，兩者之均方根差只有 1.3°C 。

McMillin (1975) 也曾提出利用兩個不同視角同時的觀測值，進行大氣修正的可行性，他由 Wark et al. (1962) 的 106 種大氣選出 32 種大氣，去檢驗修正後的海面溫度之精確度。此外，還嘗試將第一階修正與高階修正相比較，而發現均方根誤差可由 0.6°K 減少到 0.4°K 。

Dechamps and Phulpin (1980) 的研究論文，對於利用窗區的雙頻道或三頻道觀測值來消除大氣效應的基本原理，作了極詳細的說明。該研究並針對 TIROS-N 系列衛星 AVHRR 儀器所要裝設的 3.7 ， 11 及 $12\mu\text{m}$ 三個頻道，分別模

表三 NOAA-7 衛星 AVHRR 各頻道之特性

頻道編號	波長範圍 (μm)	簡 述	NEAT* 或 NEAR**
1	0.58- 0.68	可見光	.02%
2	0.72- 1.10	可見光與近紅外線	.04%
3	3.55- 3.93	紅外線	.20°K
4	10.30-11.30	遠紅外線	.03°K
5	11.50-12.50	遠紅外線	.05°K

*代表1982年7月的雜訊 (Noise Equivalent Temperature)

**代表1982年7月的雜訊 (Noise Equivalent Reflectance)

擬大氣之效應，而獲致下列兩項重要結論：

(一) 多頻道 (二頻道三頻道) 大氣修正方法相當理想，但是因為計算過程中雜訊會被放大，唯有儀器的雜訊階够低時才能應用。

(二) 由於受到太陽輻射反射之影響， $3.7\mu\text{m}$ 的頻道只能在夜間使用；但是該頻道的大氣效應比其他頻道微弱，所以增添該頻道還是有很大的益處。

(i) 若要利用雙頻道進行大氣修正，雜訊階必須低於 0.5°K 。這時候將 3.7 與 $12\mu\text{m}$ 搭配，可得到最好的結果。

(ii) 若要利用三頻道進行大氣修正，雜訊階必須低於 0.1°K 。

1980年至今，先後有許多學者分別對多頻道大氣修正方法進一步加以研究。澳洲 Barton(1983) 之研究，不考慮儀器之誤差，而純粹由穿透模式進行模擬計算，發現用 $10.8\mu\text{m}$ 與 $12.0\mu\text{m}$ 雙頻道做修正，所求得之海面溫度的均方根誤差，在視角 0° 時為 0.2°K ，而視角 60° 時，則增至 0.5°K 。此外，若根據雙視角方法修正 (取視角 0° 與 60° 搭配)，則 $12\mu\text{m}$ 與 $3.7\mu\text{m}$ 頻道求得之海面溫度均方根誤差分別為 0.5°K 及 0.07°K 。

Legeckis (1983) 之研究，先經過平滑 (smoothing) 手續，減低 $3.7\mu\text{m}$ 的雜訊，然後再採用 Mc Clain (1981) 的雙頻道修正法，藉 TIROS-N 1979年11月27日的 $3.7\mu\text{m}$ 及 $11\mu\text{m}$ 觀測資料，求出墨西哥暖流 (Gulf-Stream) 附近的海面溫度；然後以飛機放置下之空降式探溫儀 (Air-dropped expandable bathy thermograph) 測得的 1m 深處海水溫度當作標準，互相比較，結果發現衛星求得之海面溫度的標準偏差在 0.5°C 以內。

六、衛星遙測海面溫度的例行作業

(A) GOSSTCOMP (Global Operational Sea Surface Temperature Computation)

自從1972年12月起，美國國家海洋與大氣總署 (NOAA) 便開始根據繞極軌道衛星的紅外線資料，進行全球每天海面溫度計算的例行作業 (Global Operational Sea Surface Temperature Computation，簡稱 GOSSTCOMP)。當時的 ITOS 系列衛星所攜帶之掃描輻射儀 (Scanning Radiometer, SR) 的可見光 ($0.5-0.7\mu\text{m}$) 與熱紅外線 ($10.5-12.5\mu\text{m}$) 資料之解析度分別為 3.5km 及 8km 。海面溫度的計算是對個別的 $100\text{km}\times 100\text{km}$ 的區域為對象，先判斷區域內是否有够多的晴空觀測點，然後再使用直方圖方法 (histogram technique) 求出相當於晴空直方圖的眾數 (mode) 亮度溫度。

起先大氣修正是根據統計的經驗式。該經驗式將海面溫度的修正值用觀測到的亮度溫度及衛星的視角 (viewing angle) 表示出來。這種修正方法的缺點就是在溫度較高時不十分適用，因此應用到副熱帶與熱帶地區時，會產生較大的誤差。

1973年6月以後，便改為根據同一個衛星所攜帶的垂直溫度剖面輻射儀 (Vertical Temperature Profile Radiometer) (VTPR) 求出的即時溫度與水汽剖面 (解析度 500km)，來進行大氣修正 (Mc Millin et al, 1973)。

1974年期間，GOSSTOMP 例行作業每天發佈全球 1,640,654 點的海面溫度，與船舶報告比較結果，平均差在 -0.9° 至 $+0.39^\circ\text{C}$ 之間，而均方根差則介於 1.67°C 與 2.23°C 。Brower et

al. (1976) 進一步分析, 發現誤差較大的地方是海面溫度梯度較大的墨西哥暖流區域和日本沿海附近的黑潮區域。

1976年開始, 全球海面溫度計算作業採用了一種新的方法。該方法先經由參數法偵測雲 (parametric cloud detection) 步驟, 挑出 SR 的晴天海面溫度估計值及伴隨之 VTPR 觀測值, 然後再用 VTPR 各頻道觀測值由統計複迴歸公式, 求出大氣衰減修正值 Walton et al. 1976)。

Brower et al. (1975), Kalinowski et al. (1977) 及 Pichel et al. (1979) 曾分別說明了 GOS STCOMP 作業的演進情形。

1977年底所進行的北太平洋實驗(The North Pacific Experiment, 簡稱NORPAX), 正好提供了一個機會, 來考驗 GOSSTCOMP 之精確度。Barnett et al. (1979) 就將 NOAA 5 衛星的 GOSSTCOMP 海面溫度, 和 NORPAX 實驗的船測資料及空載可棄式探溫儀 (Airborne Expandable Bathy Thermograph, 簡稱 AXBT) 之資料作比較。這些資料涵蓋了夏威夷到大溪地經向 3400 km 的範圍。結果發現 GOSSTCOMP 的海面溫度週平均及月平均值與船舶及 AXBT 的對應值相差 1°C 至 4°C , 而差值大小與緯度有關。此外還發現 GOSSTCOMP 的海面溫度通常偏低 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。因此 Barnett et al. (1979) 的結論認為 GOSSTCOMP 的衛星遙測海面溫度必須再進一步作大氣修正, 才能達到氣候分析上有用的精度 (誤差 $< 2^{\circ}\text{C}$)。

TIROS-N 系列 NOAA 衛星升空之後, 全球海面溫度作業才有了改進。這時候精密極高解像輻射儀 (Advanced Very High Resolution Radiometer, 簡稱 AVHRR) 提供了解析度 4 km 的低雜訊階輻射資料, 可配合高解像紅外線輻射探測器 (High Resolution Infrared radiation sounder, 簡稱 HRIS) 的解析度 25 km 之輻射資料。雲的偵察則採用了判別函數 (discriminant function) 方法來取代以前的參數方法 (Walton, 1980)。

由於 HIRS 資料只能提供粗略的溫度與水汽剖面, 而且該儀器的解析度也比較差, 所以上述方法還是未能充分利用 AVHRR 的解析度。此外, AVHRR 的五個頻道 (見表三) 也沒有被善加利用。一直到1981年11月, 純粹靠 AVHRR 的多頻

道海面溫度例行作業 (Multi-Channel SST) (簡稱 MCSST) 取代了原有的 GOSSTCOMP 作業, 利用衛星資料進行例行全球海面溫度發佈的工作才有了更新的突破。

(B) MCSST (Multi-channel Sea Surface Temperatures Algorithm)

若將新的 MCSST 作業與原來的 GOSSTCOMP 比較, 新的作業程序具有下列兩項特點:

(一) 濾除雲的步驟不是採用參數方法或判別函數方法, 也不是用直方圖的統計分析方法。新的濾雲程序乃是根據 AVHRR 觀測值, 經由 (i) 可見光反照比率檢驗 (Visible Albedo Test), (ii) 鄰近視場相符合程度檢驗 (Uniformity Test) (iii) 各頻道比較檢驗 (inter-channel comparison) 來判斷可否當作晴天觀測值使用。

(二) 大氣衰減修正採用了窗域多頻道方法 Multiple Atmospheric-Window Techniques)。

NOAA 目前仍然執行中的 MCSST 作業方法, 是由 Dr. E. Paul Mc Clain (1980) 為首的國家環境衛星局 (National Environmental Satellite Service, 簡稱 NESS) 海面溫度研究小組所創建的。Mc Clain et al. (1982) 在渥太華所發表的論文曾經詳細說明該作業的細節。

該作業從 AVHRR 的全球 GAC 資料 (Global Area Coverage) (解析度 4 km) 中, 每次取 11 個掃描線的 11 個掃描點, 形成一個目標區。這些目標區大約是 $35 \times 43 \text{ km}$ 到 $36 \times 81 \text{ km}$, 而相鄰各目標區大約間隔 25 km。由於受到電子計算機容量的限制, 目前的作業規格, 發佈全球海面溫度時, 每一個目標區只求出一個溫度值; 可是在美國沿海的各目標區, 則可以求得 25 點溫度值。

Mc Clain et al. (1982) 曾經使用 1981 年 11 月 3-12 日十天的衛星資料, 分別依照多頻道 MCSST 方法以及舊的作業方法, 每天求取全球遙測海面溫度, 並且與船舶觀測值比較, 發現多頻道海面溫度的均方根差只有 1.56°C , 而舊方法的均方根差則高達 2.19°C 。此外, 又將 1981 年 11 月至 1982 年 4 月半年間的 MCSST 海面溫度與漂移浮標 (drifting buoys) 的觀測值比較, 結果求得均方根差在白天與夜間分別為 0.62°C 及 0.75°C 。

根據 A. E. Strong 與 E. P. Mc Clain

的研究，自從MCSST作業提高了衛星遙測海面溫度的精確度以後，傳統的就地 (in-situ) 觀測值（如船舶資料及固定浮標之觀測）已經不太適合用來當作檢驗衛星遙測海面溫度的標準了。他們曾將衛星遙測之海面溫度和24小時以內距離不到 50 km 的船舶，固定浮標及漂移浮標作比較，其結果詳列於表四。由該表可以看出，MCSST/ 漂移浮標的均方根差比 MCSST/ 固定浮標小 0.4°C ，而比 MCSST/ 船舶的均方根差小 1.1°C 。船舶之海面溫一向被公認不甚可靠，而固定浮標大部份位於溫度梯度較大的沿海地區，所以 MCSST 求出之海面溫度與漂移浮標的觀測最為接近。

七、MCSST 之綜合評估

如果就現行衛星遙測全球海面溫度例行作業之成效，作綜合評估，可得以下各重要結論：

(1) 涵蓋區域：因為現行作業只分析視角小於 45° 之資料，單獨一天分析所得之海面溫度不能涵蓋全球，而有若干空隙區，原則上每經過三天就能涵蓋到全球各區域。但是由於受到雲和太陽閃耀反射 (sun glint) 的影響，實際涵蓋範圍並沒有那麼大。不過，若以月份為對象， 65°S 至 65°N 之間每 $2\frac{1}{2}^{\circ} \times \frac{1}{2}^{\circ}$ 經緯度區內，都可獲得十次以上的海面溫度觀測值。唯一的例外是持續有雲覆蓋的赤道附近區域。

(2) 時效性 (Timeliness)：按目前 NOAA 使用的電子計算機 (IBM 360/195) 及現行作業程序，衛星將其所儲存之觀測資料傳回地面後，八小時以內就能處理完 78% 的資料，而將各有關海面溫度值，存放到附有地理標示而可提供給應用者取用的資料庫 (geographic user accessible data base) 內。未來的目標是要在 8 小時以內處理完 95% 的資料。

(3) 可重覆性 (Repeatability)：衛星遙測海面溫度的一大特點就是全球之觀測都是利用同一個儀器，因此只要儀器穩定且經過適當的訂正，重覆幾次觀測同一地點的結果，其偏差必定比其他傳統方法為小。由最近一年實驗的結果發現，若每個月根據各點的月平均海面溫度求出海面溫度的標準偏差，則衛星遙測海面溫度的標準偏差值在各地均小於 1.5°C ，而船舶海面溫度的標準偏差通常均大於 1.5°C 。由此可知，衛星遙測之海面溫度有較高的可重覆性。

(4) 絕對精確度：我們可以利用兩種方式來探討衛星遙測海面溫度的絕對精確度：(i) 當天與船舶及浮標等傳統觀測比較，(ii) 將衛星求得之海面溫度的月平均值與傳統觀測的月平均值作比較。

根據 Pichel (1982) 的分析，將 1981 年 11 月至 1982 年 4 月的衛星遙測海面溫度與 24 小時以內距離不到 25 km 的浮標之觀測值比較結果，發現其差之平均值，在白天與夜間分別為 -0.03°C 及 -0.42°C 。衛星遙測海面溫度，夜間顯著偏低的原因，可能是夜間所採用的多頻道迴歸方程式裏的係數沒有足夠的代表性。此項懷疑還有待進一步驗證。

另一方面，月平均值的比較發現，衛星遙測之海面溫度與傳統海面溫度的差值，除了墨西哥灣西邊，聖羅倫斯灣及 40°N 以上的北太平洋東部區域以外，一般均在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 之間。

此外，夜間的差值也比白天為大。這可能是因為傳統的海面溫度比表層溫度偏高，以及夜間的多頻道迴歸方程式求出之衛星遙測海面溫度值偏低所造成的結果。

八、氣懸膠體之影響 (Contamination of aerosol)

1982 年三、四月間墨西哥的艾爾其克火山 (El-Chichon) (17.33°N , 93.20°W) 爆發後，往平流層噴出了大量氣懸膠體。這些氣懸膠體一方面反射太陽的可見光輻射，另一方面也大大減少了衛星所收到來自地面的紅外線輻射。接着兩、三個月多頻道海面溫度作業受到了很大影響。白天所採用的判別雲之程序，自動將這些氣懸膠體所覆蓋之區域，視同雲覆蓋區，因而能求出海面溫度的晴空區域之範圍便大為縮小。夜間的判別方法比較不靈敏，因此將氣懸膠體覆蓋區，誤當作晴天而求出偏低 2°C 到 3°C 的海面溫度。進一步考察發現，在不受氣懸膠體影響的區域，衛星遙測的海面溫度仍然保持火山爆發以前的精確度。此外，過了 1982 年夏天，這些氣懸膠體逐漸稀薄後，多頻道衛星遙測作業的功能也逐漸恢復了原狀。

美國海洋與大氣總署海面溫度研究小組的研究人員正在研究，如何將氣懸膠體的效應納入多頻道衛星遙測海面溫度例行作業 (MCSST)。如果成功，將來一旦有火山氣懸膠體，仍然能獲得精確可靠的海面溫度值。不過要實現這一目標，還需要一段相當的時間。

表四 MCSST 求得之海面溫度與船舶及浮標資料之比較

比較對象	觀測次數	BIAS*	RMSD*
船 舶	24,792	-0.43°C	1.81°C
固 定 浮 標	240	-0.47°C	1.05°C
漂 移 浮 標	472	-0.22°C	0.68°C

* BIAS=(MCSST 海面溫度—傳統方法海面溫度)之平均值

** RMSD=MCSST 海面溫度與傳統方法海面溫度之均方根差

參 考 文 獻

- Anding, D. and R. Kauth (1970): Estimation of sea surface temperature from space. Remote Sensing of Environment, 1, 217-220.
- Anding, D. and R. Kauth (1972): Reply to the comments by G. A. Maul and M. Sidran. Remote Sensing of Environment, 2, 171-173.
- Barnett, T. P., W. C. Patzert, S. C. Webb and B. R. Bean (1979): Climatological usefulness of satellite determined sea-surface temperatures in the tropical Pacific. Bull. Am. Meteorol. Soc., 60, 197-205.
- Barton, I. J. (1983): Dual channel satellite measurements of sea surface temperature. Quart. J. R. Meteorol. Soc., 109, 365-378.
- Brower, R. L., W. G. Pichel, C. C. Walton and T. L. Signore (1975): Current status and quality of global operational sea surface temperatures from satellites infrared data. Proceedings of 10th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, p. 1405.
- Brower, R. L., H. S. Gohrband, W. G. Pichel, T. L. Signore and C. C. Walton (1976): Satellite derived sea surface temperatures from NOAA spacecraft. NOAA Tech. Memo. NESS 78, 74pp.
- Cogan, J. L. and J. H. Willard (1976): Measurement of sea surface temperature by NOAA-2 satellite. J. Appl. Met., 15, 173-180.
- Curtis, W. R., R. William and P. K. Rao (1969): Gulf Stream thermal gradients from satellite, ship and aircraft observations. J. Geophys. Res., 74, 6984-6990.
- Davis, P. and W. Vievee (1964): A model for computing infrared transmission through atmospheric water vapor and carbon dioxide. J. Geophys. Res., 69(18), 3785-3794.
- Deschamps, P. Y. and T. Phulpin (1980): Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperatures using channels at 3.7, 11 and 12 μ m. Boundary Layer Meteorol., 18, 131-143.
- Ewing, G. and E. D. McAlister (1960): On the thermal boundary layer of the ocean. Science, 131, 1374.
- Flittner, G. A. (1969): Sea-temperature structure and its relation to the United States Tuna Fisheries in the Eastern Pacific ocean. WMO Tech. Note No. 103, Geneva, WMO, 37-78.
- James, R. W. and P. T. Fox (1972): Comparative sea-surface temperature measurements. Reports on Marine Science Affairs, Report No. 5, Geneva, WMO, 1972.
- Kalinowski, J. K. et al. (1977): Present and future operational NOAA satellite oceanographic products: an introduction. Proceedings of 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, MI, 625-633.
- Legeckis, R. (1977): Oceanic polar front in the Drake Passage satellite observations during 1976. Deep Sea Research, XXIV, 701-704.
- Legeckis, R. (1983): Comparison of the TIROS-N satellite and aircraft measurements of Gulf Stream surface

- temperatures, *J. Geophys. Res.*, 88 (No. C8), 4611-4616.
- Maul, G. A. and M. Sidran (1972): Comments on "Estimation of sea surface temperature from space" by D. Anding and R. Kauth. *Remote Sensing of Environment*, 2, 165-169.
- Maul, G. A. and M. Sidran (1973) Effects on ocean temperature sensing from the NOAA satellite scanning radiometer. *J. Geophys. Res.*, 78(12), 1909-1916.
- McClain, E. P. (1980): Multiple atmospheric-window techniques for satellite-derived sea surface temperatures. *Oceanography from Space* (J. F. R. Grower, Editor), 73-85, Plenum, N. Y.
- McClain, E. P., W. Pichel, C. Walton A. Ahmad and J. Sutton (1982): Multi-channel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures, Reprint, XXIV COSPAR, Ottawa, 22-29, May 1982.
- McClain, E. P. (1981): Operational implementation of AVHRR-only multichannel sea surface temperature products, internal memorandum, NESS, Nov., 19, 1981.
- McMillin, L. M. et al. (1973): Satellite infrared sounding from NOAA spacecraft, NOAA Tech. Report NESS 65, Washington, D. C., NESS, NOAA, U. S. Dept. of Commerce, 1973.
- McMillin, L. M. (1975): Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *J. Geophys. Res.*, 80, 5113-5117.
- Morcrette, J. J. and J. G. Irbe (1978): Atmospheric correction of remote measurements of Great Lakes surface temperature. *Proc. 5th Canadian Symp. Remote Sensing*, 579-585, Aug., 1980, Victoria, B. C.
- Namias, J. (1969): Use of sea-surface temperature in long-range prediction. WMO Tech. Note No. 103, Gsneva, WMO, 1-18.
- Pichel, W. (1978): Satellite and conventional mean monthly sea surface temperatures for the eastern North Pacific—a comparison, Master Thesis, 189pp, University of Hawaii, Honolulu.
- Pichel, W. G., F. E. Kniskern and R. L. Bower (1979): NOAA/NESS operational satellite oceanographic products. WMO Seminar on Oceanographic products and IGOS data processing and service system, Moscow.
- Pichel, W. G. and B. A. Banks (1982): Reliability of operational sea surface temperatures derived from NOAA satellite infrared data. Workshop on satellite and air-craft infrared sea surface temperature. Joint Oceanographic Assembly, Halifax, Nova Scotia, Aug. 2-3, 1982.
- Prabhakara, C., G. Dalu and V. G. Kunde (1974): Estimation of sea surface temperature from Remote Sensing in the 11 to 13 m window region. *J. Geophys. Res.*, 79, 5039-5044.
- Rao, P. K. (1968): Sea surface temperature measurements from satellites. *Mariners Weather Log*, 12, 152-154.
- Rao, P. K., W. L. Smith and R. Koffler (1972): Global sea surface temperature distribution from an environmental satellite. *Mon. Weath. Rev.*, 100, 10-14.
- Shenk, W. E. and V. V. Salomonson (1972): A multispectral technique to determine sea surface temperature using Nimbus-2 data. *J. Phys. Oceanography*, 2, 157-167.
- Smith, W. L., P. K. Rao, R. Koffler and W. R. Curtis (1970): The determination of sea surface temperature from satellite high resolution infrared window radiation measurements. *Mon. Weath. Rev.*, 98, 604-611.
- Strong, A. E., R. J. DeRycke and H. Stumpf (1972): Satellite detection of upwelling and cold water eddies. *Proceedings of the 8th international symposium on remote sensing of environment*, 2-6, October, 1972, Ann Arbor, Michigan, 1069-1081.
- Stumpf, H. G. (1974): A satellite derived

ved experimental Gulf Stream analysis. Mariners Weather Log, XVIII, 149-152.

Tabata, S. (1978): Comparison of observations of sea surface temperatures at ocean station P and NOAA buoy stations and those made by merchant ships traveling in their vicinities in the Northeast Pacific Ocean. J. Appl. Meteor. XVII, 374-385.

Vukovich, F. M. (1971): Detailed sea-surface temperature analysis utilizing Nimbus HRIR data. Mon. Weath. Rev., 99, 812-817.

Walton, C. (1980): Deriving sea surface

temperatures from TIROS-N data. Remote Sensing of Atmospheres and Oceans, Academic Press, 547-579.

Walton, C., R. L. Brower and T. L. Signore (1976): Satellite-derived sea surface temperature by multi-channel regression. Proceed. of COSPAR Symposium on Meteorological Observations from Space, COSPAR XIX, Philadelphia, Pa., 8-10 June 1976, 155-159.

Yates, H (1981): The United States operational polar-orbiting satellites. series, TIROS-N. Adv. Space Res., 1, 55-71.

氣象學報徵稿簡則

1. 本刊以促進氣象學術研究為目的，凡有關氣象理論之分析與應用之論文，均為歡迎。
2. 本刊稿件分為四類：(1)研究論文(2)報告(3)綜評(4)最新重要論著綱要。
3. 本刊文字務求簡明，文體以白話或淺近文言為主體，每篇以五千字為佳。
4. 稿件之題名、作者真實姓名、服務機關及職稱均須以中、英文註明。
5. 中文稿件在參考文獻之後，應附英文摘要。
6. 研究論文之圖表名稱及各欄細目，均須以中英文對照說明。
7. 惠稿如有附圖務請用墨筆描繪，以便製版，如圖表不夠清晰，本刊得徵得作者同意後，僱員代為另行重繪，所需費用由作者負擔或由稿費中扣出。
8. 稿件內容過長或內容、文字、圖片有修改之必要時，得請投稿人修正之。本刊亦得做必要之刪改，若作者不願刪改時，請先聲明。
9. 來稿如不刊登，則退還原著者。
10. 稿件經刊印後，非經本刊同意，不得在他處刊印轉載。
11. 來稿請逕寄中華民國臺北市公園路64號，中央氣象局氣象學報社收。

(請參閱補充稿約)