

水象粒子對 TRMM/TMI 之敏感度分析

葉南慶¹ 陳萬金²

空軍航空技術學院飛機工程系¹

大華科技大學²

摘要

TRMM 衛星上搭載之被動微波輻射計 TMI 對於各種水象粒子相當敏感，包含固態及液態水象粒子，例如雨水、冰、雪及軟雹。本研究利用區域數值預報模式(Weather Research and Forecasting, WRF)及輻射傳遞模式(Radiative Transfer Model, RTM)來分析探討上述 4 種不同水象粒子對分別對 TMI 各頻道的影響程度。

結果顯示雨水對於低頻(10 GHz)的影響最明顯，軟雹則是對高頻(85 GHz)扮演最重要的角色，冰及雪對於高、低頻的都沒有明顯的影響。由此測試可知軟雹也對 85 GHz 有非常大的影響，而通常較強降雨的對流雲系都發展較高，也都有軟雹的存在，故 85 GHz 較適用於估算較大的降雨強度。

關鍵字：TRMM/TMI，輻射傳送模式，水象粒子

一、前言

衛星被動微波遙感的理論基礎是輻射傳送方程。換句話說，也就是能量守恆。輻射傳遞的過程包括發射(emission)，吸收(absorption)和散射(scattering)。下雨時，雨滴因為吸收了來自海面上的向上輻射，再發射至衛星感測器，因此，亮度溫度(Brightness Temperature, TB)會隨著降雨強度的增加而上升。除了雨滴的發射之外，雨滴不斷的成長或是有固態水象的存在時，就會有散射的機制，此時的 TB 則會隨著降雨強度的增加而下降，主要是因為頻道已經達飽和。Hu et al. (2009)[1]模擬出地面降雨強度與 TB 間的關係。衛星的輻射計接收到的輻射總量就是經過輻射傳送到達感測器，其接收的能量再轉換為 TB，所以 TB 的大小就代表感測器接收能量的多寡，其頻率、能量與 TB 之間的關係可以普朗克(Planck)函數表示。

自 1990 年代開始，被動微波已經應用在降雨的估算方面，例如 Wilheit et al. (1994) [2], Petty (1995) [3], Levizzani et al. (2002) [4], Chen and Li (2002) [5], Kidd et al. (2003) [6] and Hu et al.(2009)[1]. Prabhakara et al.(1998) [7]指出由於 6.6~85.5 GHz 的 TB 都含有降雨與降冰資訊，所以皆可用來反演降雨量，但是並非某單一頻率都可以適用於各種型態的降雨，以頻率特性概分為三類進行探討：第一類、10~20 GHz：有較寬廣的降雨強度動態區間且達飽和前降雨強度與 TB 具線性相關的優點，但缺點為訊號雜訊比(signal-to-noise)相對於高頻小且視場解析度差。第二

類、20~50 GHz：優點為相對於 20 GHz 以下而言，對小雨較為敏感，且視場解析度較佳，但卻有比低頻較快飽和的缺點，下章節會利用實際例子說明此特性。第三類、80~90 GHz：觀測視場內有稍許液態水則迅速飽和，與低頻不同的是並非以發射為主，而是以散射為主，在降雨強度較大時，冰晶或是大雨滴造成的散射效應會減少到達地面的輻射，進而造成 TB 的降低，所以較適用於有冰晶或是大粒徑雨滴的強降雨。不同的被動微波頻道具有不同的物理特性及降雨估算的限制。故 Liu et al. (2002) [8]和 Joyce et al. (2004) [9]結合了不同的頻道來估算降雨，目的即要結合不同頻道的優點。

即便被動微波已廣泛使用於降雨估算，但輻射的變化不是僅單由液態降水為主。輻射信號反映出是從地面至衛星感測器的水氣的累積量，包括固態降水和液態降水。本研究的目的是探討 TRMM 衛星的 TMI 被動微波感測器對於各種水象粒子的敏感度。

二、研究方法

(一)實驗設計

本研究為探討各種水象粒子對於 TMI 各頻道的影響程度，利用 WRF 輸出 4 種水象粒子的垂直分布，分別為雨(rain)、冰(ice)、雪(snow)及軟雹(graupel)，首先將 4 種水象粒子輸入輻射傳送方程(Radiative Transfer Model, RTM)運算出 TMI 各頻道的 TB(實驗組)。接下來分別將各種水象粒子單獨刪除，也就是將單一水象粒子設為 0，其它所有的垂直剖面的大氣環境皆不變輸入 RTM 模擬各頻道 TB，再實驗組所模擬

的結果比較，以便探討該水象粒子對 RTM 的感敏程度。

第一組對照組為將整個垂直結構中的雨滴去除，其餘水象粒子皆不變；第二組對照組去除的水象粒子為冰；第三組對照組去除的水象粒子為雪；最後一組對照組去除的水象粒子則為軟雹。最後分別將 4 組對照組與實驗組的結果區分為定性分析與定量比較。

(二)測試之水象粒子

為了解各類水象粒子對於 TMI 各個頻道的貢獻，包含正、負貢獻及所占比重大小，本研究的 RTM 敏感度測試對象分別為雨、冰、雪及軟雹等 4 類水象粒子，以下對各類水象粒子做簡單介紹。

雨滴相較於雲滴就是體積大到足以往下掉，一般而言，分辨雲滴和雨滴的門檻為 $100\ \mu\text{m}$ ，所以雨滴並不像雲滴適用瑞立散射(Rayleigh scattering)，而是適用米氏散射(Mie scattering)。一般而言，捲雲(cirrus)中冰粒子體積太小，以致吸收及發射機制都較弱，所以對於一般微波頻道觀測的輻射強度並沒有太大的影響。可是當冰粒子體積夠大時，例如在積雨雲砧(cumulonimbus anvils)的邊角部分常有較密的捲雲，對於微波頻道觀測的輻射值就有影響，尤其在高頻部分。雪晶的成長過程與環境的溫度、濕度有高度的相關，例如在較溫暖的溫度及樹狀突(dendritic)的冰晶結構，冰晶較可能聚集成為雪片。而雪片的密度通常都非常低，組成雪片的冰和空氣的比例大約為 1 比 10 或 10 以上且大多為非球型(non-spherical)且形狀高度不規則，少部分的雪片直徑可達數公分。軟雹與雪片可由沒有結晶狀的外觀(non-crystalline)、體積大至肉眼可見、較大的密度及緊實外型等來區分。一般來說，軟雹呈現不規則的塊狀或球體狀，其直徑由 0.1 mm 至數公分都有可能，由水和冰組成，冰的比例約占 80%-90%。

三、 結果與討論

(一)定性分析

圖 1 為利用 WRF 及 RTM 模擬 2010 年 10 月 17 日 0800 地方時 TRMM/TMI 的 10 GHz 垂直極化亮度溫度，即 10 GHz 實驗組。圖 2(a)-(d)分別為移除雨滴、雪、冰及軟雹後，模擬 2010 年 10 月 17 日 0800 地方時 TRMM/TMI 10 GHz 的 TB 對照組。圖 3 為模擬 85 GHz 垂直極化 TB 的實驗組。圖 4(a)-(d)為移除 4 種水象粒子後的 85 GHz 的 TB 對照組。

比較圖 1 的實驗組 TB 與圖 2 的對照組可知，在移除雨滴後，颱風主體的 TB 有明顯的下降，而晴空部分則沒有明顯變化。而在移除固態水象粒子後，不論颱風雨帶或是晴空皆沒有明顯變化。造成以上變化主要原因為低於 30 GHz 的頻道以發射機制為主，當移除雨滴，向上發射的電磁波自然就變少，故 TB 降低。而晴空地區本來就沒有雨滴的存在，故將雨滴移除並不會改變其 TB。

比較圖 3 的實驗組與圖 4 的對照組發現，在移除軟雹後，颱風主體的 TB 明顯的上升，而晴空部分則沒有改變。而在移除水滴後，不論颱風雨帶或是晴空皆沒有明顯變化。造成以上變化的原因是 85 GHz 以散射機制為主，當將造成散射的軟雹移除之後，颱風雨帶的 TB 即明顯的上升。

冰粒子體積較小，以致不論吸收、發射及散射機制都較微弱，所以不管在颱風雨帶區域或是晴空區域，且不論以發射機制為主的低頻或是散射機制為主的高頻都沒有太大的影響。雪晶的體積小，與冰粒子一樣，吸收、發射及散射機制都較微弱，對於 TB 的影響不大。即使經過成長過程後可能聚集成為直徑較大的雪片，但其密度通常都非常低(大約為 1 比 10 或 1 比 10 以上)，故對於 RTM 模擬 TB 的影響相當有限。

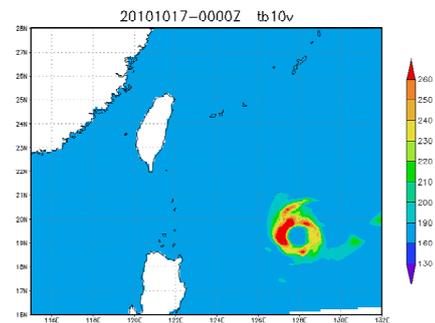


圖 1 模擬 2010 年 10 月 17 日 0800 地方時 10 GHz TB

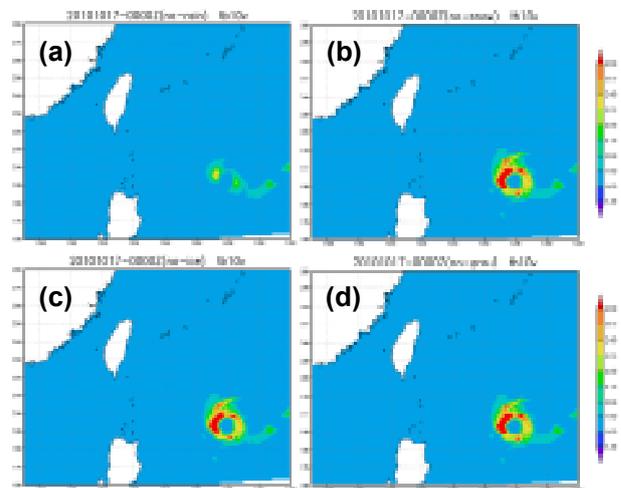


圖 2 利用 WRF 模擬 2010 年 10 月 17 日 0800 時大氣環境，並將(a)雨滴，(b)雪，(c)冰，(d)軟雹 移除後，以 RTM 模擬 TRMM/TMI 10 GHz 亮度溫度

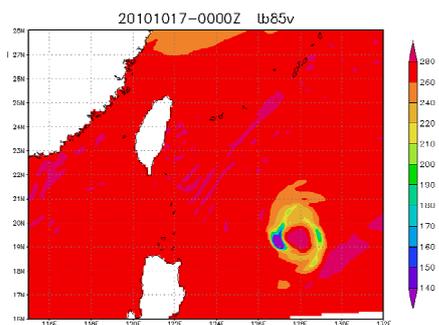


圖 3 同圖 1，更改為 85 GHz 垂直極化 TB

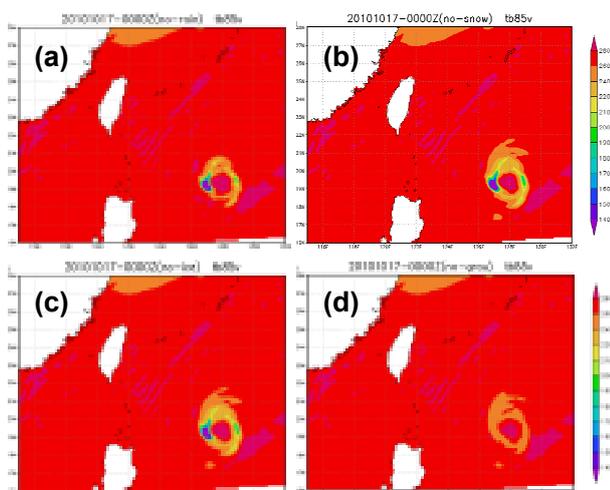


圖 4 同圖 2，更改為 85 GHz 垂直極化 TB

(二) 定量分析

為了更明確區分雨滴、冰、雪及軟雹對 TRMM/TMI 的影響，以下區分為低頻與高頻來進行定量分析。為明確的表現其變化，故定量分析僅著重於颱風主體而非晴空地區，也就是說，10 GHz TB 大於 210 K 以上，85 GHz TB 小於 240 K 以下區域。

圖 5 及圖 6 的橫座標為 TB，縱坐標個數，每個同 TB 的組群最左側為 WRF 模擬真實大氣狀況下，RTM 所模擬出的 TB，依序向右則為移除雨滴、雪、冰及軟雹後 RTM 所模擬的 TB。

從圖 5 可以看出，移除了雨滴後，較高 TB 個數有減少的情形，因為 10 GHz 是以發射機制為主，少了雨滴發射電磁波，TB 當然就下降。但是值得注意的是在移除軟雹後的大於 270 K 的 TB 個數有增加的情形，這意味著以發射機制為主的 10 GHz，仍有些許散射機制，才會導致高 TB 的個數增加。

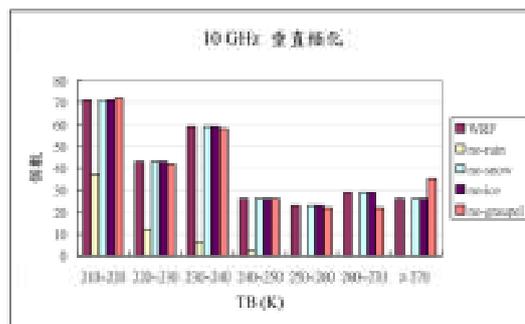


圖 5 實驗組與對照組 10 GHz TB 直方圖

從圖 6 可以看出，移除軟雹後，較低 TB 個數都減少到零，因為 85 GHz 是以散射機制為主，少了軟雹散射電磁波，TB 當然就上升而沒有較低 TB 的存在。圖 6 中 TB 小於 180 K 的 3 個區間如圖 7 所示，值得注意的是在 180 ~ 160 K 兩區間 TB 在移除雨滴後的個數，也有下降的情形。這意味著雨滴雖然對 10 GHz 的影響較大，但對散射機制為主的 85 GHz 也有影響力。

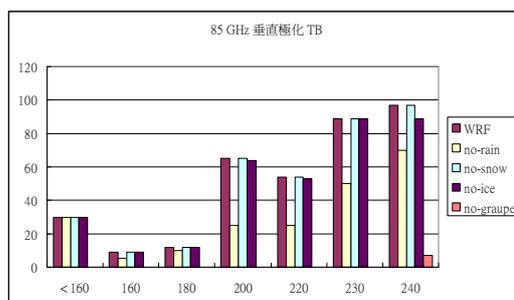


圖 6 實驗組與對照組 85 GHz TB 直方圖

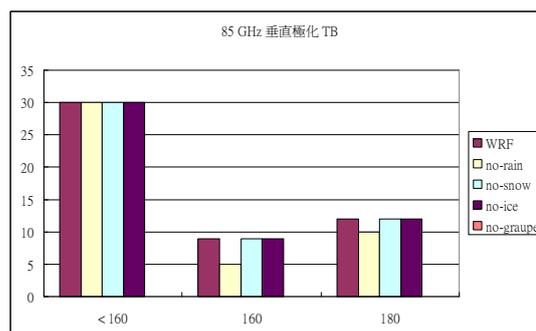


圖 7 圖 6 TB 小於等於 180 K 之直方圖

從圖 5 至圖 7 的分析可以看出，在移除冰與雪的 TB 僅些微改變，也就是說，冰與雪對於 10 及 85 GHz 影響不大，這於 Petty et al. (2001) [10] 探討冰及雪影響輻射傳遞方程之結論一致。

四、 結論

本研究使用 WRF 及 RTM 模擬 TRMM/TMI 的 TB 探討 TRMM/TMI 各頻道對於各種水象粒子的敏感度發現，雨水對於低頻(10 GHz)的影響最明顯，軟雹則是對高頻(85 GHz)有舉足輕重的影響，至於冰與雪則因為體積較小或密度小，對於發射機制為主的低頻及散射機制為主的高頻，都僅有些微的影響。

本研究模擬移除軟雹後的 10 GHz 發現，10 GHz 除了發射機制外，亦具有散射機制，才使得讓 TB 大於 270 K 的個數有增加的情形。模擬移除雨滴後的 85 GHz 也發現，在 TB 介於 180~160 K 的個數有減少一半的現象，這說明雨滴雖然對低頻的 10 GHz 影響較明顯，在強降雨區域內，也有散射機制存在並使得低 TB 區間的個數有下降的情形。

五、 參考文獻

- [1] Hu J.C., Chen W.J., Chiu, J.C., Wang J.L., Liu, G.R., 2009: "Quantitative Precipitation Estimation over Ocean Using Bayesian Approach from Microwave Observations during the Typhoon Season," *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol.20, No.6, pp.817-832.
- [2] Wilheit, T., Adler, R., Avery, S., Barrett, E., Bauer, P., Berg, W., Chang, A., Ferriday, J., Grody, N., Goodman, S., Kidd, C., Kniveton, D., Kummerow, C., Mugnai, A., Olson, W., Petty, G., Shibata, A., and Smith, E., 1994: "Algorithm for the Retrieval of Rainfall from Passive Microwave Measurements" *Remote Sensing Reviews*, Vol.11, pp.163-194, 1994.
- [3] Petty, G. W., 1995: "The Status of Satellite-Based Rainfall Estimation Over Land," *Remote Sensing of Environment*, Vol.51, pp.125-137.
- [4] Levizzani, V., Amorati, R., and Meneguzzo, F., 2002: "A review of Satellite-based rainfall estimation methods," *European Commission Project MUSIC Report*, pp. 1-66.
- [5] Chen, W. J. and Li, C. C., 2002: "Rain Retrievals Using Tropical Rainfall Measuring Mission and Geostationary Meteorological Satellite 5 Data Obtained during the SCSMEX," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, pp. 2425-2448.
- [6] Kidd, C., Kniveton, D. R., Todd, M. C., and Bellerby, T. J., 2003: "Satellite Rainfall Estimation Using a Combined Passive Microwave and Infrared Algorithm," *Journal of Hydrometeorology*, Vol.4, pp.1088-1104.
- [7] Prabhakara, C., Meneghini, R., Short, D. A., Weinman, J. A., Iacovazzi, R. J., Oki, R., and Cadeddu, M., 1998: "A TRMM Microwave Radiometer Rain Retrieval Method Based on Fractional Rain Area," *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 76, pp. 765-781.
- [8] Liu, G. R., Liu, C. C., and Kuo, T. H., 2002: "A Satellite-Derived Objective Potential Index for MCS Development during the Mei-Yu Period," *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 80, pp. 503-517.
- [9] Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., and Xie, P., 2004: "CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution," *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 487-503.
- [10] Petty, G. W., Boukabara, S. A., Snell, N., and Moncet, J. L., 2001: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the Conical-Scanning Microwave Imager/Sounder (CMIS) Environmental Data Records (EDRs), Volume 5: Precipitation Type and Rate EDR, Atmospheric and Environmental Research, USA, pp. 1-112.