

使用海面反射訊號遲延-督卜勒圖反演海面風速

葉文豪¹, 蔡永富¹, 林辰宗¹, 錢樺², 張琳²

¹國家太空中心, 國家實驗研究院

²水文與海洋科學研究所, 中央大學

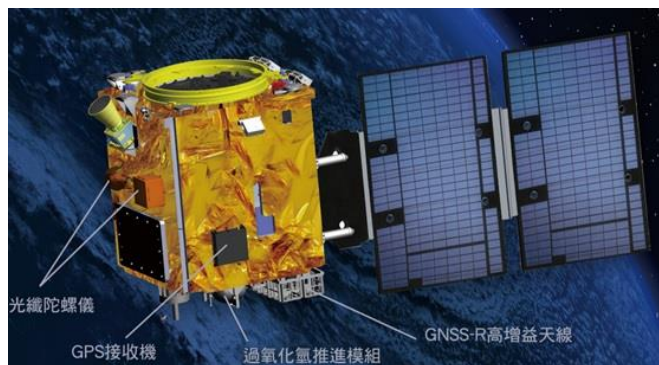
摘要

21世紀初開始, 有關全球導航衛星系統訊號, 經由地表反射後, 被近地表衛星接收後, 回推反射點的地表狀態的相關研究開始受到科學家的關注, 第一顆接收全球導航衛星系統反射訊號(GNSS-Reflectometry, GNSS-R), UK-Disaster Monitoring Constellation (UK-DMC)於2003年發射, 在UK-DMC上首先搭載了可以產出遲延-督卜勒圖(Delay-Doppler Map, DDM)的接收機, 接續UK-DMC的TechDemoSat-1(TDS-1)也於2014年發射, 美國也於2016年底發射Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS)衛星計畫的八顆衛星, 台灣也將在2022年發射一顆搭載產出遲延-督卜勒圖接收機的衛星, 名為獵風者衛星。獵風者衛星是由台灣自主發展的衛星計畫, 為了能夠處理台灣自主發展的GNSS-R接收機產出的DDM資料, 資料處理系統也由台灣自主發展, 在此報告中, 將介紹目前台灣自主發展的GNSS-R資料處理系統, 反演海面反射點風速的目前發展現況。

關鍵詞: 全球導航衛星系統反射訊號, 遲延-督卜勒圖, 獵風者衛星

1. 前言

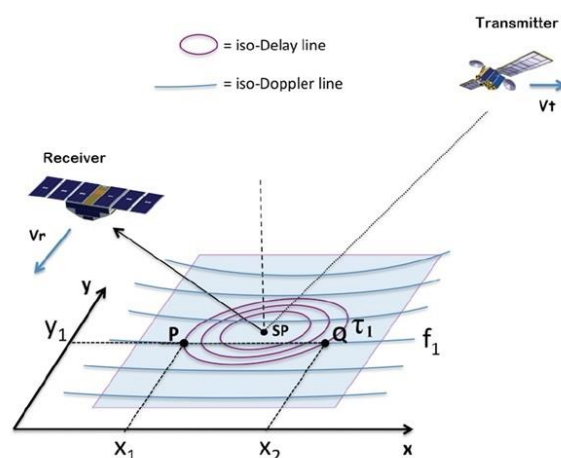
在20世紀後期以及21世紀初期, 已經有科學家使用地面全球導航衛星系統(Global Positioning System, GPS)接收站, 接收GPS訊號接收天線附近地表以及海面反射訊號, 來進行地表以及海面的變化(Belmonte Rivas and Martin-Neira, 2006; Small et al., 2010; Zavorotny et al., 2010; Larson et al., 2013)。隨著GPS技術發展趨近成熟, 便開始在衛星上架設GPS接收機, 因此在2003年英國發射了第一顆搭載接收海面反射GPS訊號接收機的衛星, UK-Disaster Monitoring Constellation (UK-DMC)來進行GPS反射訊號(GNSS-Reflectometry, GNSS-R)來進行海面風速的反演研究。



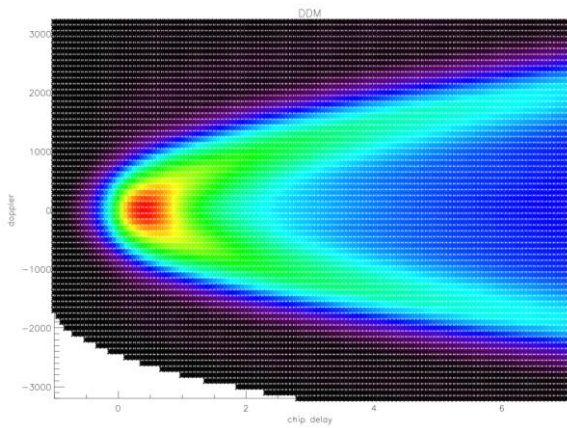
圖一, 獵風者(TRITON)衛星。

由於諸多考量, 在UK-DMC上的接收機產出的資料與一般的GPS接收機有所不同, 產出的資料為遲延-督卜勒圖(Delay-Doppler Map, DDM)(Clarizia et al., 2006)的格式, 經過使用DDM對於後續相關研究的評估後, 在2014年英國發射了UK-DMC的延續衛星計畫, TechDemoSat-1(TDS-1), 同樣搭載了產出DDM的接收機。在2016年, 美國也發射了八顆搭載DDM的接收機, 名為Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS)衛星計畫(Ruf et al., 2015)。

台灣規劃在2022年發射搭載台灣自主研发科學酬載GPS海面反射訊號接收機, 的獵風者(TRITON)衛星計畫(Juang et al. 2016)。獵風者衛星如圖一所示, 除



圖二, GPS 海面反射訊號觀測原理(Rose et al. 2014)。

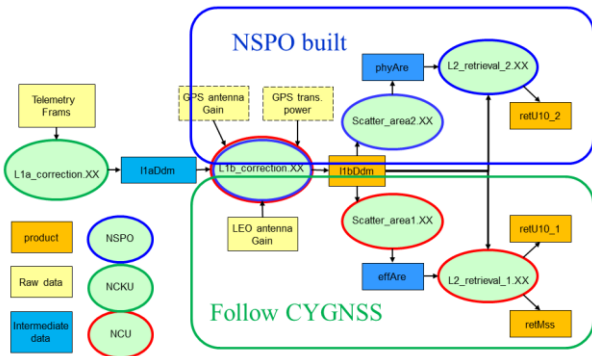


圖三，遲延-督卜勒圖(模擬)。

除了搭載自主研發的GPS海面反射訊號接收機之外，也搭載了台灣自主的光纖陀螺儀、GPS接收機、以及過氧化氫推進模組。為了能夠自主處理獵風者衛星的GPS海面反射訊號接收機的遲延-督卜勒圖觀測資料，台灣也將自主發展獵風者科學酬載資料處理系統，使用GPS海面反射訊號接收機的遲延-督卜勒圖進行海面風速反演。本報告將對目前獵風者科學酬載資料處理系統發展現況進行說明。

2. 海面反射訊號觀測原理

由於海面瞬息萬變，因此以傳統GPS的RINEX觀測資料格式無法表現出海面狀況，因此發展出不同於傳統GPS的遲延-督卜勒圖觀測資料。遲延-督卜勒圖的原理如圖二，由於GPS訊號的涵蓋範圍為整個地球，因此在接收機除了反射點的訊號之外，也會收到反射點附近散射到接收機的訊號，由於散射位置的不同，訊號所走的路徑長度也不一樣，加上GPS衛星與接收機之間帶有相對速度，不同行進方向的訊號也具有不同的督卜勒，接收機所接收到具有相同遲延以及相同督卜勒的訊號分別會呈現如圖二中所示，紫色的同心橢圓以及深藍色的雙曲線，由接收機所接收到的訊號藉由不同遲延以及督卜勒平移的交叉相關分



圖四，獵風者衛星資料處理系統架構。

析，便可得到接收訊號中不同遲延以及督卜勒的強度，也就是遲延-督卜勒圖。

遲延-督卜勒圖的理論方程式如下(Zavorotny and Voronovich, 2000)

$$\langle P(\tau, f_D) \rangle = T_i^2 \iint_S \frac{1}{4\pi R_0^2 R_T^2} D^2(r) \Lambda^2\left(\frac{\delta\tau}{T_c}\right) S^2\left(\frac{\delta f_D}{T_i}\right) \sigma_o(r) d^2r \quad (1)$$

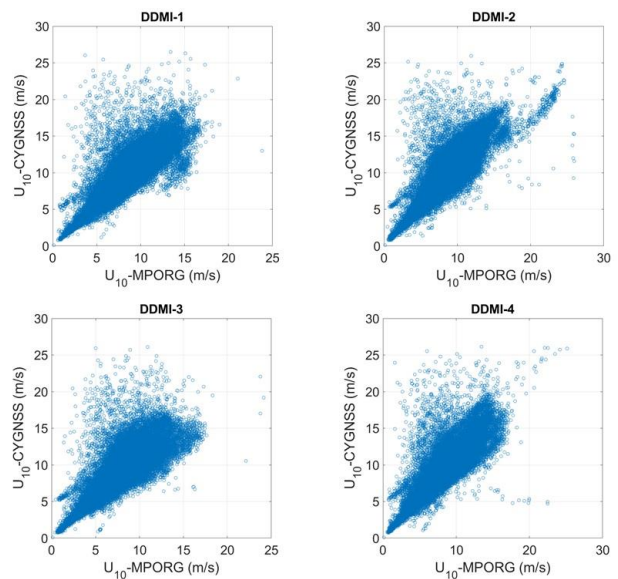
(1)式中， S 為訊號散射的面積， r 為 S 內的積分點， T_i 為積分時間， $1/4\pi R_0^2 R_T^2$ 為訊號衰減路徑， R_0 與 R_T 與分別為反射點到訊號發射端以及接收端的距離， $D(r)$ 為天線的場形增益， $\Lambda(\dots) \cdot S(\dots)$ 為C/A電碼的Woodward Ambiguity Function，而 $\sigma_o(r)$ 為歸一化的雷達散射截面(Bistatic Radar Cross Section, BRCS)。圖三便是使用(1)式，以CYGNSS衛星高度所模擬出的遲延-督卜勒圖。

3. 遲延-督卜勒圖反演海面風速

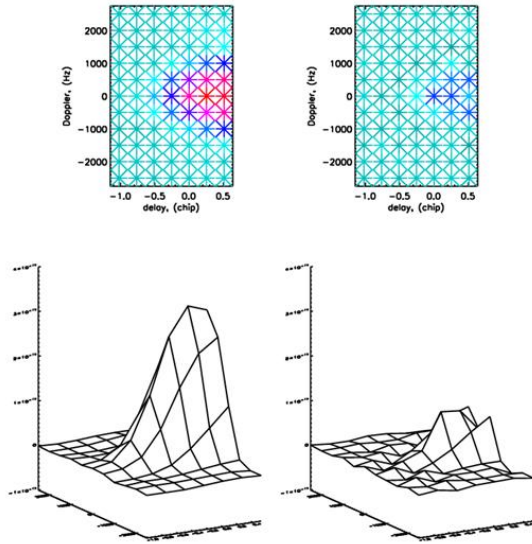
獵風者衛星資料處理系統架構如圖四，此系統由國立成功大學、國立中央大學、以及國家太空中心共同發展。國立成功大學主要負責消除硬體對遲延-督卜勒圖的影響、國立中央大學負責以CYGNSS反演方法為基礎進行遲延-督卜勒圖的風速反演、國家太空中心負責發展新的反演方法。

3.1 CYGNSS反演方法

CYGNSS反演方法使用DDM中擷取的兩個參數，建立與風場之間的關係來建立經驗模式，分別為遲延-督卜勒圖平均(Delay-Doppler Map Average, DDMA)，以及前邊斜率(Leading Edge Slope, LES)(Clarizia and Ruf, 2016)。



圖五，使用CYGNSS反演方法之反演結果(MPORG)與CYGNSS反演結果比較。



圖六，未消除(左)以及消除(右)Woodward Ambiguity Function 後之遲延-督卜勒圖比較。

DDMA之前，需使用(1)式把DDM轉換成BRCS，然後由以下公式得到DDMA

$$\sigma_{DDMA} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 d(i, j) \quad (2)$$

$$DDMA = \frac{\sigma_{DDMA}}{A_{eff}} \quad (3)$$

主要概念為以BRCS中最大值為中心，以遲延方向前後各一個格點，以及督卜勒方向前後各五個格點的範圍內BRCS的值再除以有效散射面積 (effective scattering area, ESA)。

LES的計算如下式

$$\alpha_{LES} = \frac{N \sum_{i=1}^3 x_i y_i - \sum_{i=1}^3 x_i \sum_{i=1}^3 y_i}{N \sum_{i=1}^3 x_i^2 - (\sum_{i=1}^3 x_i)^2} \quad (4)$$

$$LES = \frac{\alpha_{LES}}{A_{eff}} \quad (5)$$

主要概念為使用與DDMA同樣的DDM範圍，先進行都卜勒方向的積分，然後再進行遲延方向的計算，最後再除以ESA。

ESA的計算如下式

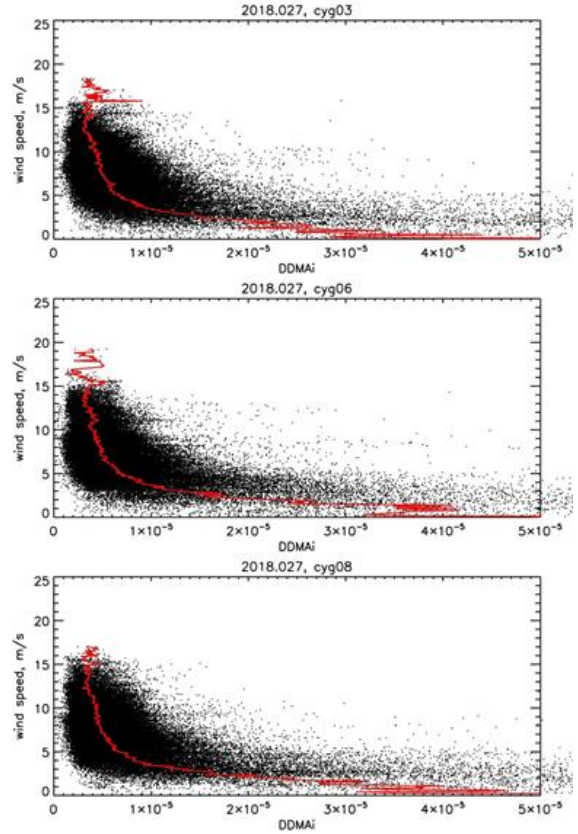
$$A_{eff} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 A_{id}(i, j) + \frac{1}{2} \sum_{i=1,3} \sum_{j=1,5} \Delta A(i, j) + \frac{1}{4} \sum_{i=1,3} \sum_{j=2,3,4} \Delta A(i, j) \quad (6)$$

$$\Delta A(i, j) = A_{eff}(i, j) - A_{id}(i, j) \quad (7)$$

分別以DDMA以及LES與風速進行比對，建立經驗模式之後，使用觀測的遲延-督卜勒圖分別得到DDMA以及LES之風速之後，再以最小變異數 (minimum variance) 來得到最後的風速結果。反演結果與CYGNSS之反演結果比較如圖五。

3.2 NSPO反演方法

計算



圖七，使用 NSPO 反演方法與 ECMWF 風速比較結果，紅線為兩者的迴歸曲線。

NSPO反演方法與DDMA類似，但在進行BRCS計算之前，會先把WAF之影響消除，把(1)式轉換成數值模式

$$\begin{aligned} \langle P(\hat{r}, \hat{f}^D) \rangle &= T_i^2 \iint_s \frac{1}{4\pi R_0^2} WAF \sigma_0(r) d^2 r \\ &\Rightarrow P_{\tau, \hat{f}^D} \approx T_i^2 \frac{1}{4\pi R_0^2} \sigma_0(r) A_{phy} \left(\sum_{\tau=-1}^1 \sum_{f^D=-n}^n WAF_{\tau, \hat{f}^D} \right) \\ &\Rightarrow P_{\tau, \hat{f}^D} \approx P_{\tau, \hat{f}^D} \left(\sum_{\tau=-1}^1 \sum_{f^D=-n}^n WAF_{\tau, \hat{f}^D} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

由於遲延-督卜勒圖可看成一矩陣形式，因此(8)式可寫成

$$\Rightarrow [P_i] \approx [WAF_{ij}] [P_j] \quad (9)$$

在(9)式的兩邊各乘以[WAF]⁻¹便可消除WAF的影響

$$[P_i] [WAF_{ij}]^{-1} \approx [WAF_{ij}] [P_j] [WAF_{ij}]^{-1} = [P_j] \quad (10)$$

使用(10)式消除WAF影響前後比較如圖六。(10)式所得到的[P_j]在消除(1)式中的訊號衰減路徑以及天線場

形增益影響之後，便可與風場進行比較，由於已經消除了WAF的影響，因此不須如CYGNSS反演方法中，擷取遲延-督卜勒圖中以最大值為中心擷取3×5的格點範圍，在NSPO反演方法中，直接擷取最大值的格點來進行後續反演，由於擷取的格點較少，反演結果所代表的空間解析度可比CYGNSS的二十幾公里好接近一倍，達到約十幾公里。

圖七為使用NSPO反演方法計算2018.027的CYGNSS 03、06、08衛星的結果與ECMWF風場資料進行比較，可看出兩者之間的關係，紅線為迴歸曲線，此迴歸曲線為使用NSPO反演方法的經驗模式，由於只使用一天的資料，所以迴歸曲線存在許多震盪，使用較長時間的資料後，迴歸曲線將趨於平滑。

4. 總結

使用衛星來接收全球導航衛星海面反射訊號，進行海面風速研究，是目前全球導航衛星訊號的新應用，台灣也將在2022年發射搭載自主發展的海面反射訊號接收機的獵風者衛星，並為了能處理獵風者衛星的觀測資料，由國立成功大學、國立中央大學、以及國家太空中心共同發展反射訊號資料處理系統也將在衛星發射後上線，提供獵風者衛星資料反演的風速，相信對於海洋科學以及大氣科學都能夠有所貢獻。

5. Reference

- [1] Small, E.E., K.M. Larson, and J. J. Braun, Sensing Vegetation Growth With Reflected GPS Signals, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 37, L12401, doi:10.1029/2010GL042951, 2010
- [2] Zavorotny, V., K.M. Larson, J. Braun, E.E. Small, E. Gutmann, and A. Bilich, A physical model of GPS multipath caused by land reflections: toward bare soil moisture retrievals, *IEEE J-STARS*, Vol. 3 (1), pp. 100-110, 10.1109/JSTARS.2009.2033608, 2010
- [3] Larson, K.M., R. Ray, F. Nievinski, and J. Freymueller, The Accidental Tide Gauge: A Case Study of GPS Reflections from Kachemak Bay, Alaska, *IEEE GRSL*, Vol 10(5), 1200-1205, doi:10.1109/LGRS.2012.2236075, 2013
- [4] Belmonte Rivas, M., Martin-Neira, M., Coherent GPS reflections from the sea surface. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 3, 28–31, 2006
- [5] M. P. Clarizia, C. P. Gommenginger, S. T. Gleason, M. A. Srokosz, C. Galdi, and M. Di Bisceglie, Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02608, 2006, doi:10.1029/2008GL036292.
- [6] Ruf, C., et al., New ocean winds satellite mission to probe hurricanes and tropical convection, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2015, doi:10.1175/BAMS-D-14-00218.1
- [7] Juang, J.-C., S.-H. Ma, C.-T. Lin, Study of GNSS-R Techniques for FORMOSAT Mission, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4582–4592. doi:10.1109/jstars.2016.2575069
- [8] Randy Rose, Scott Gleason, Chris Ruf, The NASA CYGNSS mission: a pathfinder for GNSS scatterometry remote sensing applications, *Proc. SPIE 9240, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2014*, 924005 (14 October 2014); <https://doi.org/10.1117/12.2068378>
- [9] Valery U. Zavorotny and Alexander G. Voronovich, "Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application", *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 38, NO. 2, MARCH 2000.
- [10] M.P. Clarizia and C. Ruf, "Wind Speed Retrieval Algorithm for the Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) Mission", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 8, August 2016.

Use Delay-Doppler Map Made by Oceanic Reflected GPS Signal to Evaluate Ocean Surface Wind

Wen-Hao Yeh¹, Yung-Fu Tsai¹, Chen-Tsung Lin¹, Hwa Chien², Lin Zhang²

¹ National Space Organization , National Applied Research Laboratories

² Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences , National Central University

Abstract

The research of GNSS-Reflectometry (GNSS-R) begins at the end of 20 century. As the first GNSS-R satellite mission, UK-DMC satellite carries an experimental payload to receive the reflected GNSS signal from ocean surface. The output of UK-DMC GNSS-R payload is Delay-Doppler Map (DDM), which is the cross-correlation results of received ocean surface reflected GNSS signal in different delay and Doppler. After UK-DMC, the follow on GNSS-R mission are TDS-1 and CYGNSS, which are the mission from UK and USA. In the second half of the year in 2021, the satellite of GNSS-R mission, TRITON, will be launched. TRITON also carries the Taiwan built GNSS-R payload to produce DDM. In order to retrieve the ocean surface wind from DDM, the system for DDM retrieving will be developed. In this study, the retrieval method will be introduced.

Key words: GNSS-Reflectometry, Delay-Doppler Map, TRITON