

# 電離層 GNSS 訊號相位擾亂 ROTI 之全球分佈

吳世安<sup>1</sup> 劉正彥<sup>1</sup>

國立中央大學 太空科學與工程研究所<sup>1</sup>

## 摘要

利用全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)地面接收機資料紀錄，推演計算電離層全電子含量(Total Electron Content, TEC)擾動指數(Rate of TEC Index, ROTI)，以探討電離層電子密度不規則體的日、季、太陽活動與全球分佈。分析國際 GNSS 服務(International GNSS Service, IGS)所公佈地面 GNSS 接收機 L1 和 L2 波段訊號資料，並藉此計算每 5 分鐘內 TEC 變化率的標準偏差，即是 ROTI，其相當於 TEC 電波相位擾動。目前全球約有 2000 座以上的地面接收機台站，其 GNSS 訊號可用以計算每 30 秒一筆 TEC 資料。分別針對太陽極大期(2000 年)、太陽極小期(2009 年)與太陽中強期(2013 年)ROTI 研究其日、季、太陽活動、經度與緯度變化。結果顯示中低緯度 ROTI 主要發生在磁緯度 $\pm 30$ 間，日落後 1900LT 開始出現、夜間 2100LT 達到最大、最終於子夜後 0200LT 消失，其於春和秋季至為明顯，且在南美洲上空最為強烈。除了太陽極小期外，磁緯度 $\pm 30$ 之 ROTI 通常會出現明顯雙峰現象，其中心位置集中於  $20^{\circ}\text{N}$  和  $20^{\circ}\text{S}$ 。一般而言，極區 ROTI 會比中低緯度的強烈，尤其是南極地區。此外，利用中央氣象局 1999 至 2019 年之 GNSS 接收機紀錄資料，研究台灣 ROTI 之日、季、太陽活動變化。

關鍵字：閃爍, GNSS, ROTI

## 一. 前言

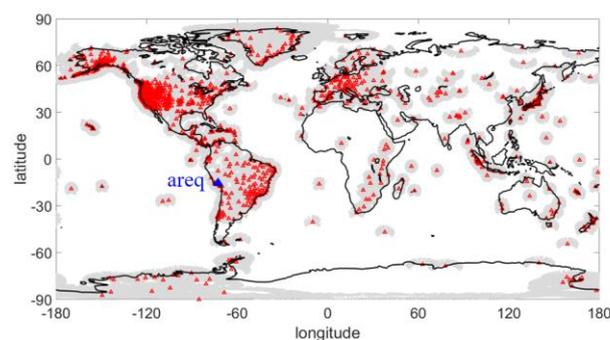
科學家自 1930 年代起即利用電離層探測儀(Ionosonde)觀察電離層，並發現赤道地區與南極區極易發生電離散狀 F 層(Spread F)現象。在極區，頻率散狀(frequency spread)；在赤道地區，則是區間散狀(range spread) (Davies et al., 1989)。科學家利用秘魯 Jicamarca 背向式雷達發射 3 米波，發現入夜之後 150-600 km 電離層 F 層區域出現羽冠狀強烈回波。Basu et al. (1988) 利用地球同步衛星(1.54 GHz 的 Marisat 衛星、250 MHz 的 polar beacon 衛星、

244 MHz 的 Fleetsatcom 衛星，以及 137 MHz 的 wide band 衛星) 觀察歐洲與美洲區域，太陽活動極大和極小時期之夜間電離層閃爍變化。Liu et al. (2016) 與 Chen et al. (2017)則利用福爾摩沙衛星三號掩星接收 GNSS (Global Navigation Satellite System)衛星廣播 L1 頻段(1.5 GHz) 訊號，進行全球閃爍觀測，並建立全球 S4-index 三維閃爍經驗模型。以往電離層不規則體觀測大多是計算電波振幅閃爍指數 S4-index，因此，採樣頻率至少需要 50Hz 以上。Pi et al. (1997)發展一種名為 ROTI (Rate of TEC Index)的方法，則利用較低的採樣頻率 30 秒觀察 GNSS 衛星訊號相位擾亂。Krankowski

et al. (2017) 使用歐洲 700 多座 GPS 接收站紀錄資料並計算 ROTI，監測該地區的電漿不規則體變化。本文針對太陽極大期(2000 年)、太陽極小期(2009 年)與太陽中強期(2013 年) ROTI 研究其日、季、太陽活動和地理分佈。

## 二. 儀器與方法

衛星導航系統 GNSS 包含美國的全球定位系統 (GPS)、俄羅斯的格洛納斯系統 (GLONASS)、中國的北斗衛星導航系統 (BDS) 和歐洲聯盟的伽利略定位系統 (Galileo)。GNSS 對於現今人類生活之定位和導航極為重要，例如手機定位、交通導航、精準時刻等，為生活帶來許多便利和實用。



本文將分別利用國際 GNSS 服務 (International GNSS Service, IGS 與中央氣象局 (Central Weather Bureau, CWB)所提供的 GPS 數據及高精度的衛星星曆資料，研究全球與台灣之相位擾亂。Pi et al. (1997) 針對訊號相位擾動提出 ROTI (Rate of TEC index) 算法公式，

$$ROT = TEC_{t_3} - TEC_{t_1}$$

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}$$

將  $\Delta TEC/min$  (即 ROT) 在 5 分鐘的時間間隔內取標準偏差即為 ROTI 的定義。圖 1 為 IGS 與台灣地面接收站分佈與其接收範圍。因仰角越低，電波訊號則越容易產生折射、散射等干擾，故只使用仰角  $30^\circ$  以上的資料用以計算。

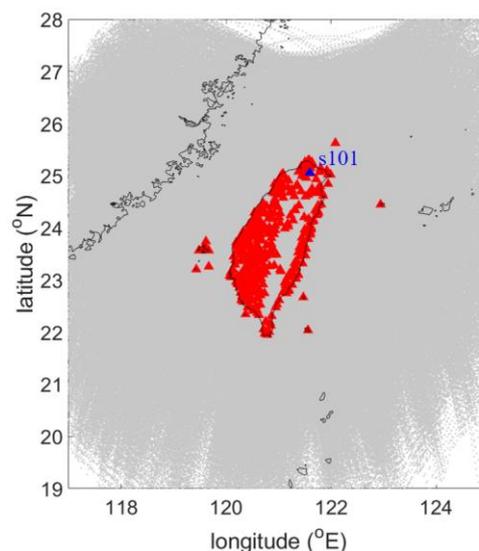


圖 1、全球 IGS 與台灣 CWB 地面接收站分佈與其接收範圍。紅色三角形為接收站位置、灰色區域為仰角  $30^\circ$  以上的接收範圍。(左)全球接收機，(右)台灣接收機。

## 三. 觀測與結果

圖 2 顯示 2013 年 9 月 22 日南美地區 areq 接收機(-17.02 N; -71.62 E; -9.16° dip)所觀測之 TEC 和其差分 dTEC 以及對應之 ROTI。dTEC 和 ROTI 在 2000LT~0200LT 出現明顯強烈擾動，尤其 ROTI 於其他時刻幾乎都小於 0.1。

進一步利用全球 2000 餘座和台灣 400 餘座 GNSS 接收機，建構 ROTI 日變化之全球分佈。圖 3 呈現 2000 年、2009 年和 2013 年全天 24 小時 ROTI 季變化。不論太陽活動強弱，低緯度 ROTI 皆明顯出現於 1800LT 至 0300LT 之磁緯度  $\pm 30^\circ$  內，亦說明白天電離層極為穩定。低緯度 ROTI 於 3、9 和 10 月出現在赤道兩側，並具有相同強度之雙峰結構，其於 10~11 月達

全年最強。台灣 ROTI 亦於春、秋兩季更為強烈且傾向發生於夜間；12 月至 2 月，則發生於 1200-1800LT。利用南美 areq 與台灣 s101 兩座接收機，分析 2000-2019 年 TEC 和 ROTI 隨太陽活動變化(圖 4)。TEC 於南美和台灣皆與太陽活動趨勢非常吻合，且 s101 整體大於 areq。而 ROTI 在 areq 對於太陽活動有較明顯之響應；相反地，在 s101，普遍都維持在 0.05 附近，說明電波訊號在台灣比南美更為穩定。

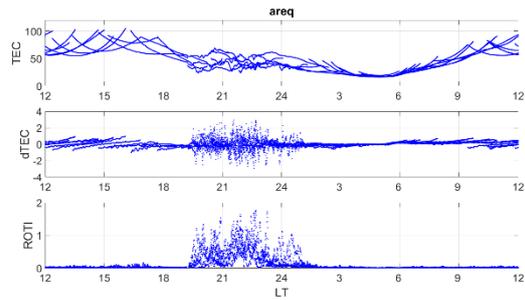


圖 2、TEC、dTEC 與 ROTI 日變化示意。日期為 2013 年秋分日。接收機 areq 位於經度-71.62°，緯度-17.02°，磁緯度-9.16°。

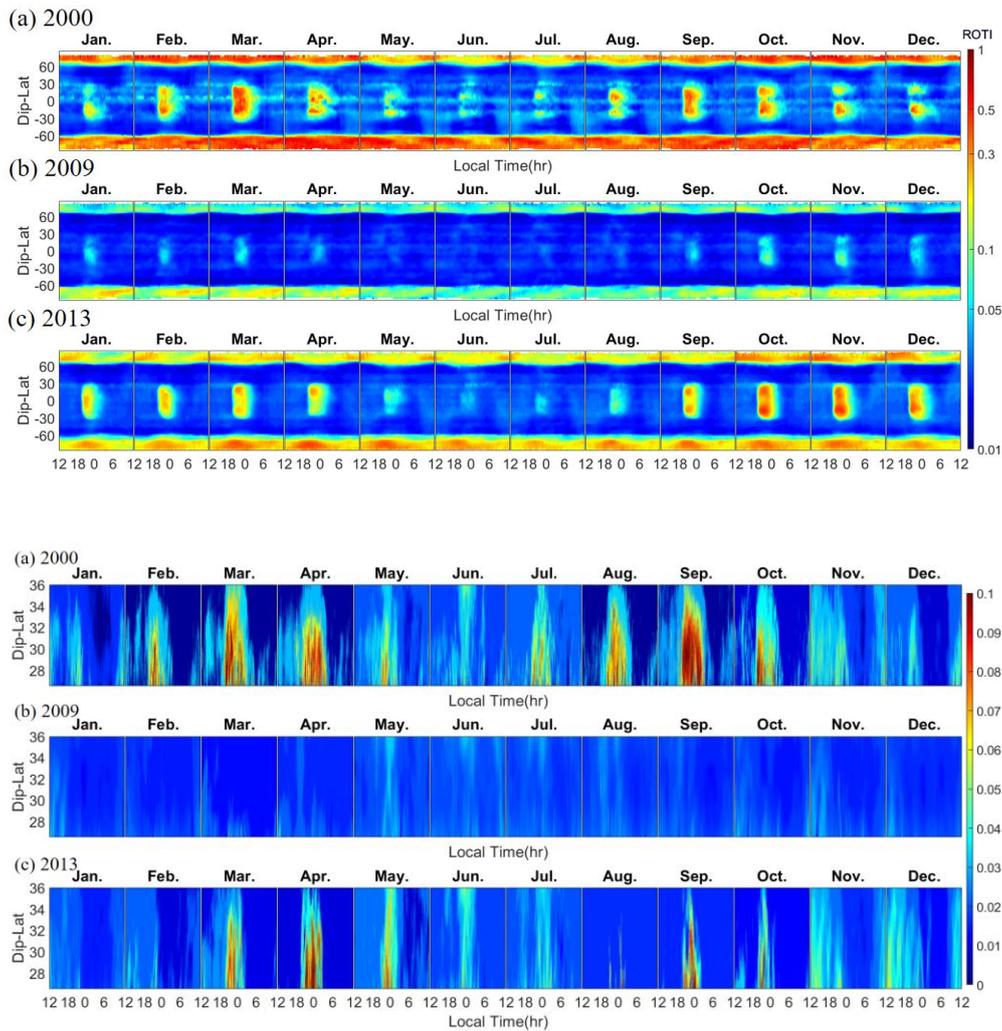


圖 3、全球與台灣 ROTI 之月變化。上、下版面分別代表全球與台灣 ROTI 分佈。(a)2000 年，(b)2009 年，(c)2013 年。

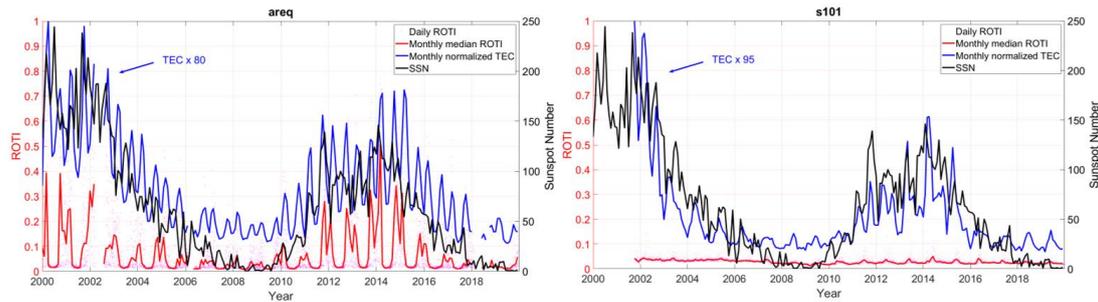


圖 4、areq 和 s101 接收機 ROTI 隨太陽活動變化。接收機 areq 鄰近磁赤道，而接收機 s101 位於經度 121.61°，緯度 25.04°，磁傾緯度 33.57°。紅點為每日的 ROTI 值，紅線為 ROTI 月中位數，黑線為太陽黑子數，藍線為 TEC。

#### 四. 討論與結論

整體而言，低緯度 ROTI 主要好發於夜晚 (1800-0200LT) 磁緯度 $\pm 30^\circ$ 內，尤其以春秋兩季特別明顯，且整體形態於太陽活動強烈時呈現雙峰結構。台灣雖位處赤道異常區，但其磁傾緯度大多落於中緯度地區，故不像低緯度地區，ROTI 相對非常穩定。一般而言，極區 ROTI 比低緯區更強烈，而南極區於各季節皆高於北極

區。此結果說明採樣頻率每 30 秒的 ROTI 可清楚描述電離層之閃爍現象。由於地面接收機相較於衛星觀測，更能提供長時間且穩定的紀錄資料，未來若加入海上船艦或飛機 GNSS 接收機資料，將能完整且即時監測全球訊號擾亂，更進一步達到不規則體預報。

#### 五. 參考資料

- Basu, S., E. MacKenzie, S. Basu. (1988). Ionospheric constraints on VHF = UHF communication links during solar maximum and minimum periods. *Radio Science*, **23**, 363-378.
- Chen, S. P., D. Bilitza, J. Y. Liu, R. Caton, Loren C. Chang and W. H. Yeh. (2017). An empirical model of L-band scintillation S4 index constructed by using FORMOSAT-3/COSMIC data. *Advances in Space Research*, **60**, 1015-1028. doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.031.
- Davies, K. (1989). *Ionospheric Radio*, Peter Peregrinus Ltd.
- Krankowski A, Iurii Cherniak, and Irina Zakharenkova. (2017). The new IGS ionospheric product - TEC fluctuation maps and their scientific application. 19th EGU General Assembly, EGU2017, Vienna, Austria, 23-28 April 2017.
- Liu, J. Y., S. P. Chen, W. H. Yeh, H. F. Tsai, and P. K. Rajesh. (2016). Worst-case GPS scintillations on the ground estimated from radio occultation observations of FORMOSAT-3/ COSMIC during 2007-2014. *Surveys in Geophysics*, **37**, 791-809. doi:10.1007/s 10712-015-9355-x.
- Pi, X., A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, C. M. Ho. (1997). Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophys. Res. Lett.* **24**, 2283-2286.

## **Abstract**

This study examines the diurnal, seasonal, solar activity and geographic variations of ionospheric irregularities by means of Rate of TEC Index (ROTI) derived by measurements of worldwide ground-based GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers. Routine observations of the ionospheric propagation effects upon GNSS satellite signals are available online from International GNSS Service (IGS). With data over 2000 ground-based IGS stations of the globe, ionospheric total electron content (TEC) with the 30-sec time resolution can be derived. The standard deviation of TEC variations in a 5-minute interval is further computed to obtain ROTI around each receiving station. Variations in diurnal, seasonal, solar activity and geographic distribution of ROTI are examined during the solar maximum year of 2000, solar minimum year of 2009, and solar median year of 2013. Results show that intense ROTIs frequently appear in the low-latitude ionosphere within  $\pm 30$ -degree magnetic dip; start at 1900 LT (Local Time), reach their maximum at 2000-2100 LT, and vanish by about 0200 LT, especially prominently in the spring and autumn seasons. The region experiencing the most intense ROTI is the low-latitude ionosphere in South America. ROTIs often exhibit a double-peaked structure at  $20^{\circ}\text{N}$  and  $20^{\circ}\text{S}$  geomagnetic except in the solar minimum year. It is interesting to find that ROTIs in high-latitude region, especially in the southern polar region are much more intense than those in low- and mid-latitude region. Moreover, GNSS data recorded by CWB (Central Weather Bureau) is used to examine variations in diurnal, seasonal, solar activity and geographic distribution of ROTI during 1999-2019.