

GPS 不再只是 定位和導航

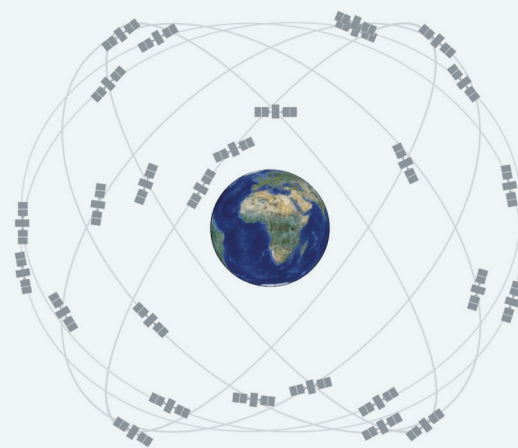
李奕德、劉正彥

「哎呀，好像迷路了！」「快點拿出你的 GPS 來導航啊！」
在我們的生活中，GPS 這個名詞似乎已經和導航劃上了等號。不過，
GPS 到底跟導航有什麼關係？除了導航外，GPS 還有什麼不為人知的功用？

定位與導航

GPS 是 global positioning system（全球定位系統）的簡稱，是由美國所發射多達三十餘顆的一群人造衛星，均勻散布在 6 個距離地表約 20,200 公里的軌道上，朝著四面八方不斷發送帶有時間編碼的訊號。均勻的衛星分布讓地面接收訊號的設備不論在任何地方，都能在同一時間接收到 5 顆以上來自 GPS 衛星所發射的訊號。藉由類似三角測量法的方式，把訊號處理後便可以概略定位。若能接收到更多顆的衛星訊號，則能分組計算，提升定位的精準度。

如果接收器本身又有電子羅盤，不僅可以利用 GPS 訊號提供使用者的經緯度位置與海拔高度，還可以判斷前進的方向，形成了最早期的 GPS 導航系統。靠著衛星與電子元件所提供的精準資訊，搭配手上的一紙地圖，就不會在高山深谷中或茫茫大海上誤判自己的位置，甚至迷失行進的方向。



全球定位系統衛星遍布在高度約 20,200 公里的軌道上，提供高精準的定位服務。（圖片來源：www.gps.gov）

隨著科技的進步，利用 GPS 訊號所得到的位置可以直接標示在數位化的地圖上，不僅可以標定所在位置，還能夠顯示周遭的資訊。使用者在選擇目的地之後，迅速計算最佳路徑並且導引使用者一路抵達目的地。

利用掩星技術量測地球大氣， 遍布四處的 GPS 衛星自然成了最佳的訊號來源。

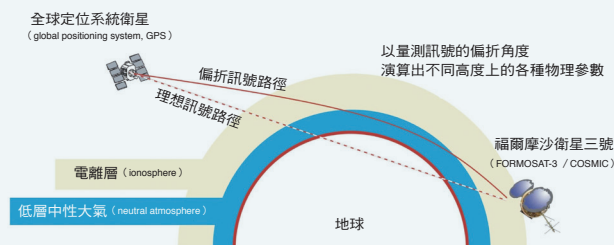
漸漸地，螢幕上的畫面愈來愈精美，地圖中的資訊也愈來愈詳細，並且走向可攜式行動裝置，變成了今日幾乎人人都會安裝在車上或智慧型手機中的導航系統。GPS 自此也就和「導航」一詞密不可分，讓世人淡忘了 GPS 原本只具有單純的定位功能。

電波掩星觀測

但 GPS 可不僅僅提供定位的服務！近年來，靠著均勻分布的定位衛星，以及全球無線電掩星觀測網的建立，也提供高時間與空間解析度的氣象與太空天氣觀測。

「掩星」一詞最早出現在天文觀測時所記錄到的一種現象，指的是離觀察者較遠的恆星所發出的光被距離較近的月球、行星或小行星所遮掩。如果遮掩住遠方恆星的星體有大氣層，即使星體阻擋在觀察者和恆星之間，恆星所發出的光線會在穿過星體的大氣層時產生偏折現象，然後繞過星體傳達到觀察者眼中。這種光線（電磁波）傳播路徑因受到介質條件改變而偏折的物理現象，便促成了無線電掩星觀測的發展。

利用兩顆人造衛星分別擔任恆星（訊號源）與觀察者（接收器），當發射的無線電波穿過星球的大氣層後，便會隨著大氣層中各種條件的改變而產生不同程度的訊號偏折現象。這些受到偏折的訊號透過計算後成為有用的資訊，而能夠演算出大氣中的物理參數。這個觀測技術其實早在 1965 年的水手四號任務中就已應用在火星



福衛三號上所酬載的無線電掩星實驗儀器，是利用 GPS 發出的無線電波在通過不同條件的環境時所產生的偏折現象進行地球大氣與電離層的觀測。

大氣的觀測上，只是直到 1995 年才應用於地球大氣的觀測。

利用掩星技術量測地球大氣，遍布四處的 GPS 衛星自然成了最佳的訊號來源。不過，一開始的衛星任務規畫都只有單一顆人造衛星接收眾多的 GPS 訊號，雖然觀測資料的品質很好，但能夠提供的資料很少。再加上時間與空間解析度較差，無法有效提供氣象作業單位使用，也難以廣泛應用在大氣和太空科學的研究中。

利用掩星技術觀測地球大氣結構，在初期並沒有受到重視。直到 2006 年，在國家太空中心與美國大氣研究大學聯盟合作的福爾摩沙衛星三號（福衛三號）升空後，才為掩星觀測開創了嶄新的一頁。

不同於先前的科學任務，以作業需求為任務導向的福衛三號，一口氣把 6 顆帶著掩星實驗酬載的微衛星送入 6 個不同的軌道中。6 顆微衛星搭配多達 30 顆的 GPS 衛星，大幅提升了掩星觀測的資料密度。

福衛三號每天可以提供將近二千多筆的掩星觀測，這些資料經過演算後成了均勻分散在全球的低層大氣與電離層剖線，提供了溫度、壓力、溼度、電子密度等物理參數隨高度的變化。

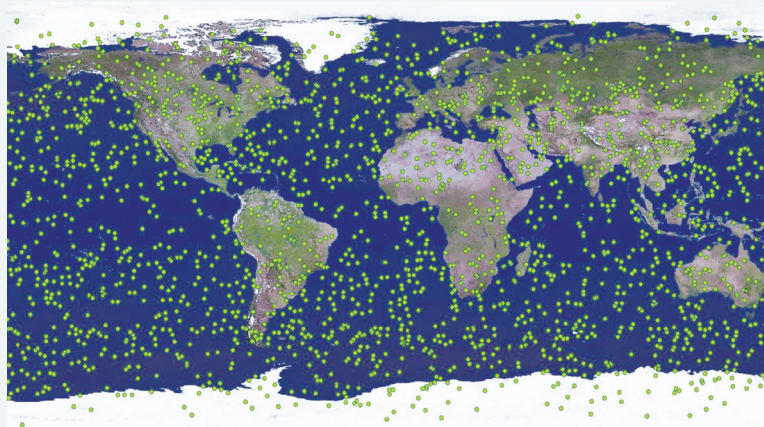
層層剖析

地球大氣層中的物理參數會因地點和高度而不同，也會隨著時間逐漸改變，如何單靠人造衛星接收 GPS 的訊號得到最新的地球大氣狀態呢？

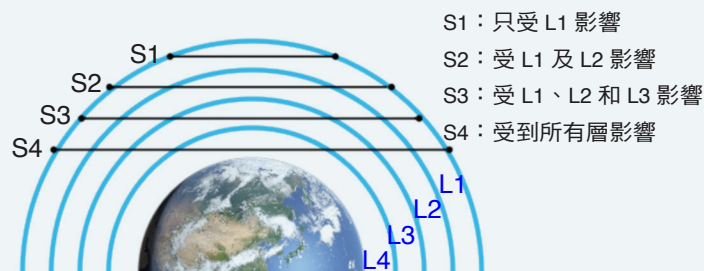
當 GPS 的訊號自衛星發射後，穿越了不同條件的大氣，經歷了數次偏折後才能被人造衛星上的天線接收。接收到的訊號其實已經受到了許多因素的影響，因此單靠一次的掩星資料，最多只能知道訊號所經過的大氣環境中對訊號影響的總量，無法知道訊號傳播的詳細過程。但如果假設地球大氣層是個均勻的層狀結構時，訊號只需偏折兩次（進入大氣層和離開大氣層），就能夠簡化問題並且求得所需要的參數。

為了能解析衛星所觀測到的掩星資料，科學家假設地球大氣是個球狀對稱分布的結構，由一層層的薄層向上堆疊而成，每一個薄層內的溫度、溼度、氣體密度、電子密度都是均勻分布的。由於地球大氣的密度隨高度逐漸減少，因此愈高的大氣對訊號的偏折也愈小，甚至幾乎沒有偏折現象。在這樣的假設條件下，從一連串的掩星觀測資料中，就能夠以離地表最高的資料為基準開始層層剖析。

首先得到最外層的物理參數做為基準，再由下一筆觀測資料搭配上一層的物理參數，推算向內一層的物理參數。一層層地向內演算，直到最後一筆的觀測資料結束，



福衛三號在 24 小時內（2009 年 1 月 22 日）累積的觀測資料（綠點），均勻分布在世界各地的觀測點提供了更多地球大氣層與電離層的資訊。



把地球大氣假設成如同洋蔥般的層狀結構，便可以層層解析連續的掩星觀測，演算出地球大氣層與電離層中各種物理參數隨高度的變化。

就可以獲得物理參數隨高度的變化。這些隨高度連續變化的數據稱為大氣剖線或電離層剖線，可以用來了解地球大氣中的溫度、溼度，以及電子濃度隨高度和經緯度的分布。

上述的演算過程就像是把地球大氣假設成洋蔥般的層狀結構，然後再把洋蔥由外而內地一層一層剝開，因此這樣的反

演技術另外有一個有趣的名稱，叫做「洋蔥剝皮法」。

卓越貢獻

即便氣象觀測站陸續增加，多數的觀測資料也都集中在人口稠密地區，對於廣大的海洋或不利於居住的區域，只有少數的觀測資料可供參考。另一方面，多數的觀測資料僅能提供地面上的氣象資料，高空的氣象資料只能仰賴數量更少的探空氣球觀測。至於能夠提供電離層電子濃度隨高度變化的觀測資料，在世界上更是少之又少，更何況是全球的三維電漿結構。

已經在太空中運作長達 10 年的福衛三號，掩星觀測提供了來自全球均勻分布的大氣與電離層剖線。目前全球總共有超過 70 個國家的使用者，把觀測結果應用在各種領域中。廣布的掩星資料補足過去缺乏觀測站點的區域，除了我國的中央氣象局外，包括美國、日本、韓國、歐盟等主要的氣象作業單位，都把這寶貴的觀測資料納入氣象作業系統中，以提升對氣象預報的掌控。

根據歐洲中期天氣預報中心的資料，福衛三號的觀測資料對其降低預報失準的貢獻度可達 20%，顯著提升預報的準確性。而國內學術機構、中央氣象局與國研院颱風中心的分析報告中，也驗證福衛三號的掩星觀測資料可以有效提升颱風路徑與劇烈降水的預報能力。

另一方面，福衛三號的掩星觀測資料增進了電離層太空天氣監測的可能性。累積 1 個月、1 季，甚至是 1 年的長期觀測資

料，更可以幫助科學家了解特定地區或特定物理參數的長期變化情形。像是南、北極區的電子濃度變化、全球三維電離層電子濃度分布、中緯度槽及電漿洞等嶄新發現，讓我們能夠更深入且精準地了解電離層的結構與變化。

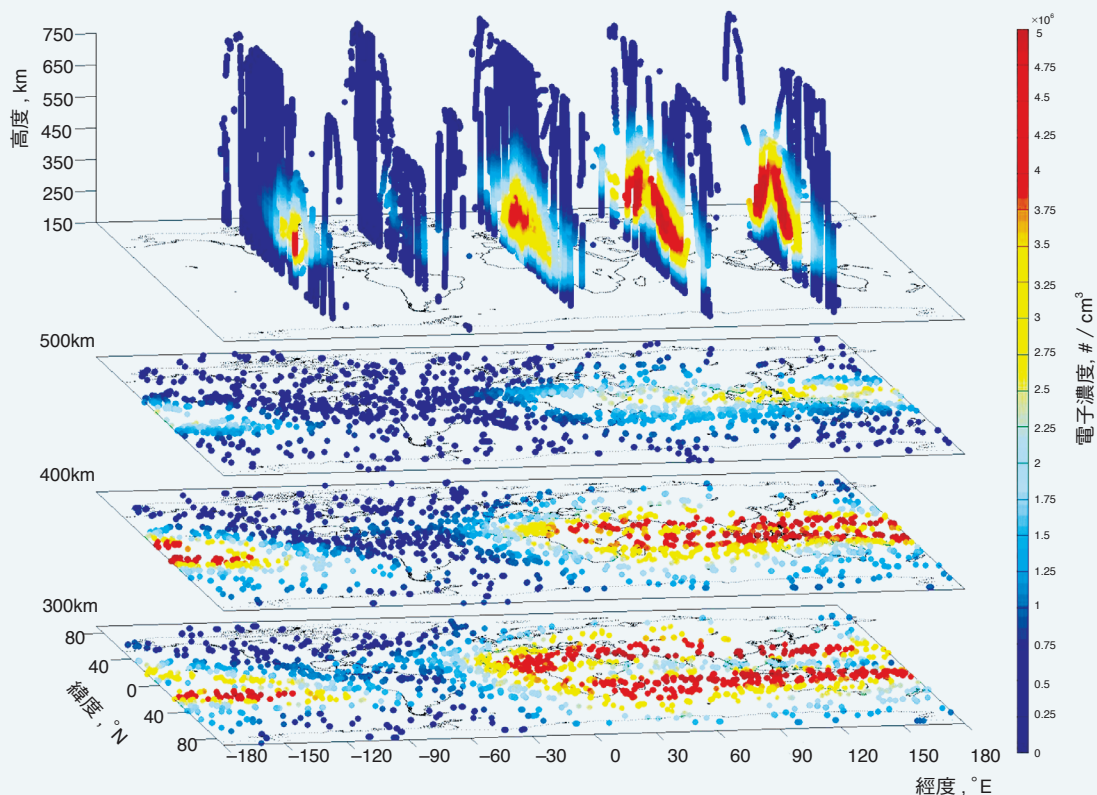
台灣的科學團隊也利用福衛三號觀測資料，首次建構出完整的全球閃爍指數分布，做為無線電通訊品質與干擾的重要參考。在科學團隊的努力下，近年來由這些寶貴的電離層資料發展出全球電離層太空的天氣監測與預報模式，未來將在掩星資料的輔助下，提供穩定的預報資料，改善衛星定位誤差，避免劇烈太空天氣變化所造成的無線電電波強度衰減與傳播路徑的急遽改變。

新發展

環繞著地球的定位衛星系統，除了屬於美國的 GPS 以外，大陸的北斗系統、歐盟的 Galileo 系統與俄羅斯的 GLONASS 系統也將陸續投入服務，建構出全球導航衛星系統（global navigation satellite system, GNSS）。為了提高掩星觀測資料的數量和品質，新一代衛星任務除了要能夠接收來自不同系統的訊號以及提升衛星的數量外，也需要讓衛星分布在適合的軌道上，才能讓掩星觀測資料的空間與時間解析度大幅提升。

有鑑於各界對於掩星資料的需求以及福三計畫的卓越成就，國家太空中心與美國海洋暨大氣總署合作規劃新一代掩星星

福衛三號的掩星觀測資料增進了電離層太空天氣監測的可能性。



透過福衛七號的 12 顆人造衛星，接收來自全球導航衛星系統的訊號，大幅提升掩星觀測的資料量，可在短時間內重建電離層三維電漿結構。圖中顏色表示表示電子濃度的數值。

系一福爾摩沙七號衛星（福衛七號）計畫。預計透過 2 次發射任務，把 12 顆微衛星送入兩組不同傾角的軌道。第 1 批發射的 6 顆衛星將停留在傾角 20 度、飛行高度 520 ~ 550 公里的 6 個軌道面上運行，提供中、低緯度的掩星觀測資料。第 2 批發射的 6 顆衛星將與福衛三號軌道條件相似，傾角提高到 72 度、高度維持在 720 ~ 750 公里，接替福衛三號提供觀測資料。

不僅如此，酬載著新一代掩星觀測天線的福衛七號，將可接收來自全球導航衛星系統的訊號，大幅提升掩星觀測的資料量。當福衛七號完全調整至任務軌道後，預期每日可提供約 8,000 點的觀測資料，成為世界上最先進且精準的即時氣象與太空天氣監測衛星。

GPS 從設計之初迄今，已經不再只是原來字面上單純的定位功能。在科技的輔

當福衛七號完全調整至任務軌道後，預期每日可提供約 8,000 點的觀測資料，成為世界上最先進且精準的即時氣象與太空天氣監測衛星。

演算方法的改善與太空工程技術的精進，
加速了 GPS 無線電掩星技術的發展與應用範圍。

助下，舉凡陸海空運輸、大地量測、國防科技等領域都需要 GPS 的協助，才能讓一切精確可靠、有條不紊。演算方法的改善與太空工程技術的精進，加速了 GPS 無線電掩星技術的發展與應用範圍，讓 GPS 不再只是 GPS。

現今，大量且即時的掩星觀測資料不僅受到全球各界的矚目，也讓台灣藉由福衛三號太空任務一舉躍上國際舞台。萬眾矚目下，即將發射的福衛七號，期盼能有

更多的掩星資料為氣象與太空天氣的監測和預報作業開啟全新的一頁。

李奕德

中央氣象局科技中心

劉正彥

中央大學太空科學所

