

2019年6月25日，由臺灣的國家太空中心所主導的福爾摩沙衛星七號（以下簡稱為福衛七號）終於順利地從50年前阿波羅11號前往月球的發射地，位於美國佛羅里達州的甘迺迪太空中心SLC-39A發射臺升空。國家太空中心在發射後173分鐘也陸續接收到福衛七號6顆衛星的訊號，為臺灣太空史又寫下新的一頁！

福衛七號是臺灣與美國共同合作的氣象衛星計畫，目的是接替即將退役的福衛三號衛星。自2010年簽署合作協定以來，由臺灣自行進行衛星設計與開發控制軟體，並由美國提供關鍵儀器、英國SSTL（Surrey Satellite Technology LTD）製造零組件，耗費近十年才終於完成。究竟，總耗資32億新臺幣的福衛七號能帶給我們什麼貢獻，本期專文就從科學發展的角度來分析。

福爾摩沙衛星七號大解密

courtesy of SSTL



圖1. 福衛七號隨著獵鷹重型火箭發射升空！ © 國家太空中心

高空氣象的百年追求

許多人對氣象衛星的第一印象就是每晚新聞一定會看到的衛星雲圖，也因此認為福衛七號會拍照。但實際上這是一個誤會，福衛七號並不會拍照，他所獲得的氣象資料是大氣的垂直溫度、濕度與氣壓變化剖面。

為什麼氣象預報員除了衛星雲圖，還需要知道大氣的垂直溫、濕度變化呢？也許對於一位天文迷來說，觀察衛星雲圖就足以判斷今晚是否適合出外觀星。然而雲的種類有百百種，並不是所有的雲都會下雨，降下毛毛雨的雲和滂沱大雨的雲就有很大的差異。

雲是因為空氣塊被抬升後，空氣塊隨著環境氣壓降低而膨脹、降溫（過程中空氣塊與環境熱交換可忽略，因此可視為絕熱膨脹），溫度下降使得空氣塊內的水氣凝結而形成。至於，雲會發展成哪一種形態，除了取決於空氣塊上升時本身的濕度，同時也取決於環境的溫度，當空氣塊溫度高於環境時，空氣塊的密度較環境低，因此會傾向於繼續上升，若水氣亦相當充沛，則會非常有利於積雨雲的形成，最近在午後降下大雷雨的雲就是這樣來的。

由於大氣環境的垂直溫濕度變化對於了解雲會如何發展相當重要，因此氣象觀測員會利用各式各樣的方法進行測量。探空氣球便是目前氣象觀測的主流方法之一，19世紀末期法國的氣象學者首先將自記式溫度計、氣壓計與濕度計綁在氣球上升空，再透過回收儀器的方式記錄高空的氣象資料。不過由於氣球往往會飛到數十公里外造成回收不易，於是在1929年法國氣象學家Robert Bureau發明了以無線電將資料回傳地面的方法。探空氣球所收集到的資料，會將結果繪製成斜溫圖以利判讀。

不過，由於探空氣球施放後幾乎不可能回收的特性，加上每次施放探空氣球的成本都高達數千元台幣，成為觀測機構不小的負擔。另一方面，目前探空氣球的施放都是由設在陸地上的氣象站負責，對於大洋中的大氣狀況幾乎無法掌握。尤其是颱風的形成地點多半遠離陸地，氣象觀察員無法在颱風生命初期獲得詳細的資料，便難以預測其走向與發展。

圖3. 斜溫圖是氣象預報員判讀大氣穩定度的重要觀測資料。©中央氣象局

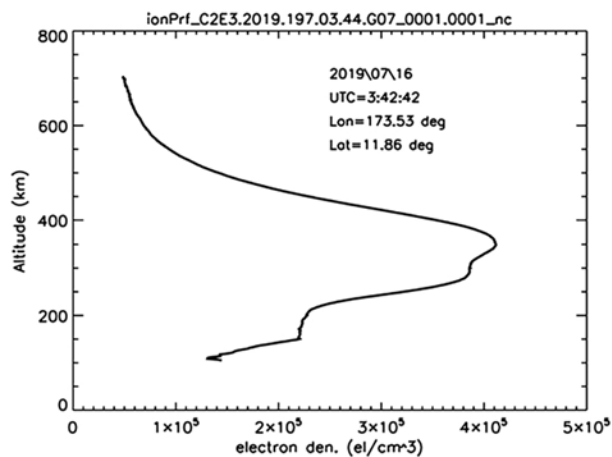
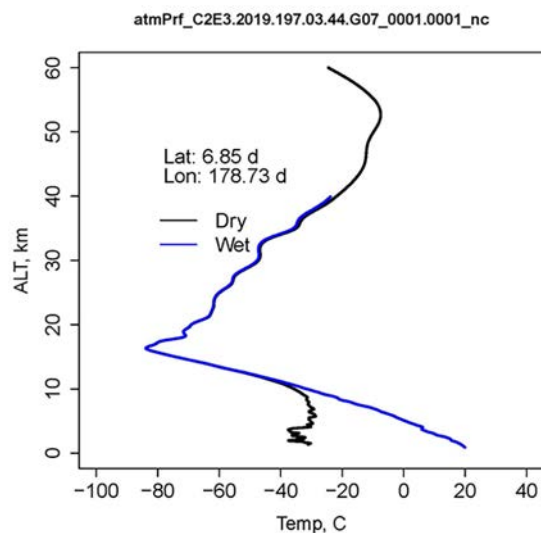
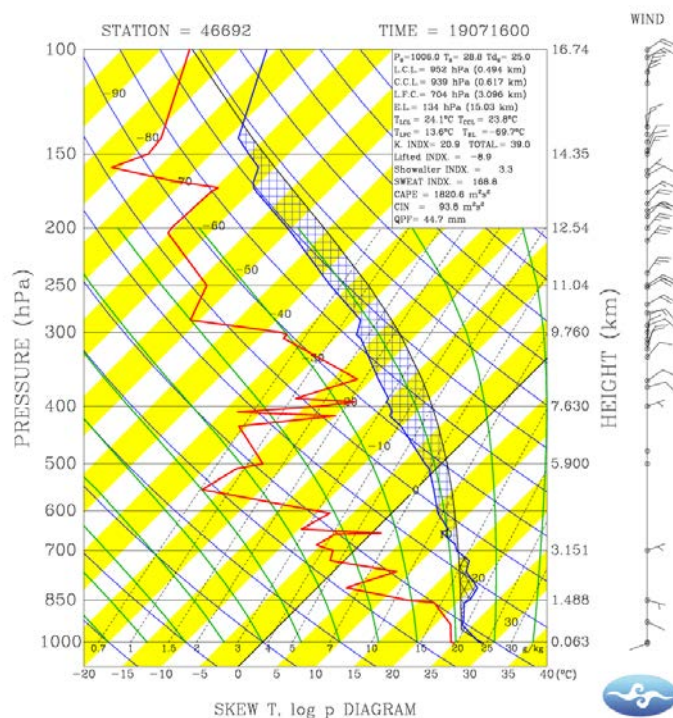


圖2. 福衛七號成功在7月16日回傳了第一筆觀測資料
© 國家太空中心



ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Temp

21/Nov/2014; 00 UTC

Total number of obs = 652

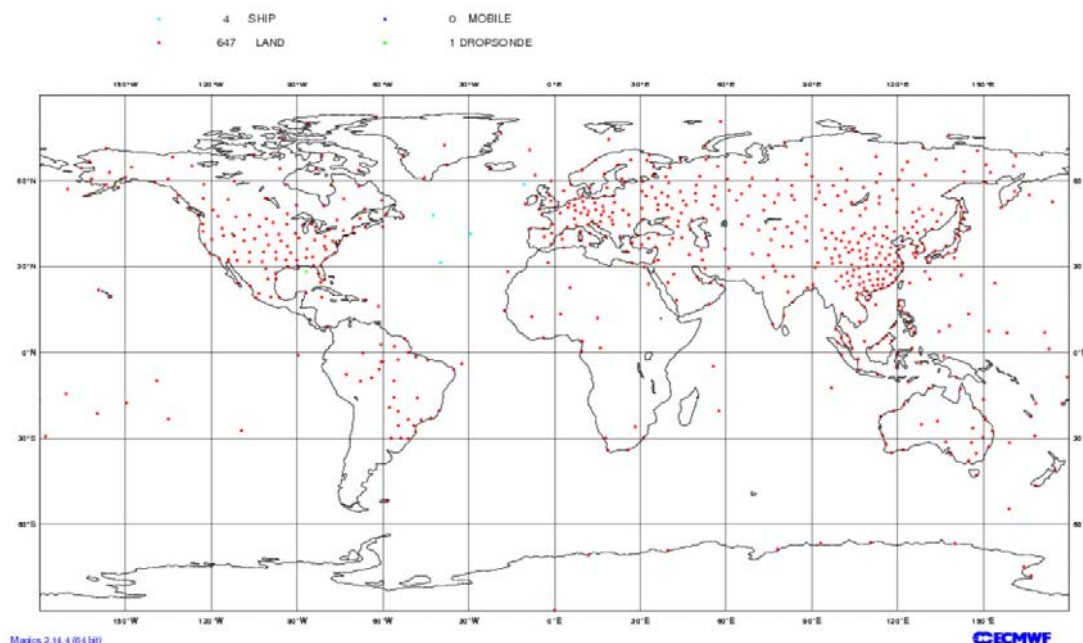


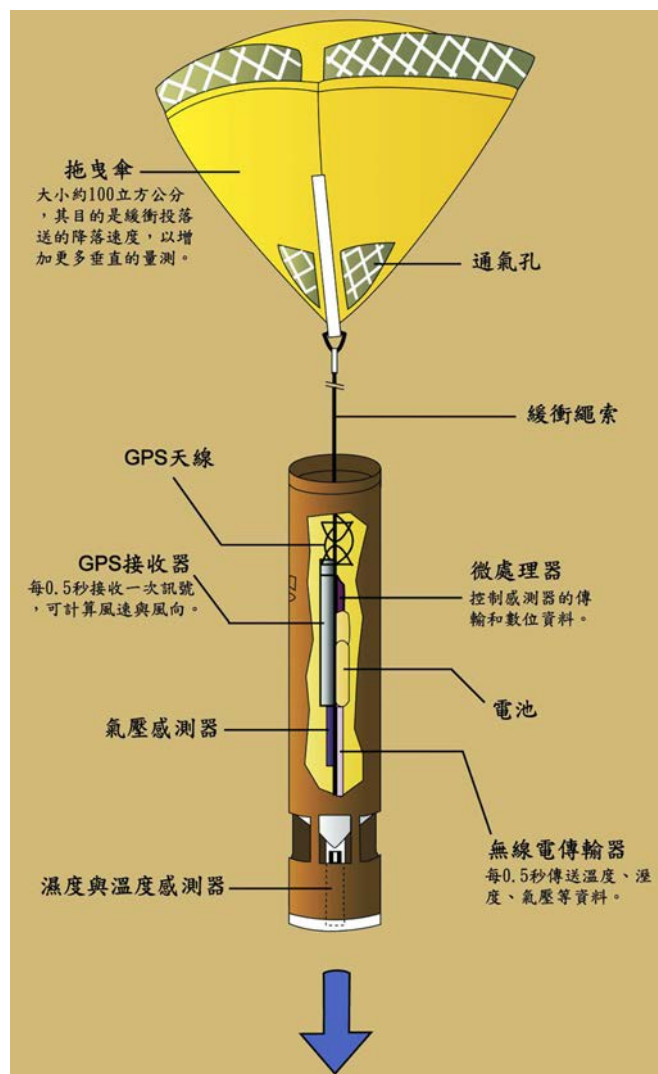
圖4. 探空氣球的觀測點幾乎全分布於陸地，海上的觀測資料付之闕如。

隨著航空器的發明，取得海洋上空的大氣資料成為了可能。1944年美國空軍成立第三氣象偵查中隊（該中隊於1945年改編為第53氣象偵查中隊），並以「颶風獵人」作為任務代稱，擔負起於空中追蹤，甚至是穿越颶風收集資料的任務。1970年代，颶風獵人開始將無線電探空設備以「投落送」的方式丟進颶風內，藉此獲得颶風內部的垂直結構資料。臺灣也在國科會與國立臺灣大學的支持下，於2003年開始執行「追風計畫」，透過在重點地區投放投落送獲得預報所需的資料。



圖5. ↑→ 探空氣球與投落送是目前最實用的大氣溫、濕度垂直剖面觀測工具 © 中央氣象局。

即便後來氣象衛星取代了利用飛機追蹤熱帶氣旋動向的任務，但時至今日要獲得海面上颶風內部的詳細風場、溫度與濕度分布仍仰賴飛機的直



接觀測。雖然飛機能帶著觀測人員取得第一手的直接測量資料，但受限於飛機性能，能夠直接穿越風暴中心的飛機相當稀少，更不要說光是在外圍繞飛就是一件非常危險的事情。最後，人們終於找到了能在太空中測量大氣垂直溫度分布的方法，那就是無線電掩星技術。

太空中最精準的溫度計

在太空中接收其他人造衛星發出的無線電訊號時，若地球擋住訊號使得接收方無法接收，這便稱為無線電掩星現象。雖然訊號的發射方與接收方在連線上看似被地球擋住了，但因為地球外圍有大氣層，大氣層會使無線電波產生折射，讓接收方就算看不到發射方一樣可以接收到訊號。無線電波偏折的角度與大氣的密度有關，只要能知道兩顆衛星的正確位置，就能透過無線電波偏折的角度回推大氣的氣壓與溫、濕度垂直分布。

無線電掩星技術最初使用在1965年的火星任務上，1995年美國大氣研究大學聯盟的微實驗衛星1號（Microlab 1）初次將這項技術應用在地球大氣研究，之後包括德國的CHAMP任務、阿根廷的SAC-C任務、美德合作的GRACE任務都曾利用過無線電掩星測量地球大氣。然而只有一顆衛星仍無法即時掌握大範圍的大氣層資料，因此國家太空中心與美國合作開發的福衛三號，便是一次發射6顆衛星組成衛星星系涵蓋全球，將這項技術實際應用到氣象觀測任務。

福衛三號可說是無線電掩星技術應用於氣象觀測的先驅，其在2006年發射升空後，以傾角72度的軌道環繞地球。藉由接收並測量美國全球定位系統（GPS）衛星訊號在大氣層中的折射情形，每天可提供涵蓋全球共2500筆大氣層氣壓、溫、濕度與電離層電子濃度垂直剖面資料。而在福衛三號正式運作8個月，福衛三號資料庫便被納入了歐

洲中期天氣預報中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）的超級電腦，顯著提升預報準確度6%，為全球氣象預報帶來莫大貢獻。

因著福衛三號的成功，福衛七號計畫於2010年正式啟動，預計發射由12+1顆衛星組成衛星星系，不過因美國合作單位經費無法到位，因此取消高傾角軌道的6顆衛星。剩下的6顆衛星將放置在軌道傾角24度、高550公里的圓形軌道上，由於軌道傾角較小，因此觀測範圍相較福衛三號會較集中在臺灣所在的中低緯度。另一方面，福衛七號不只接收美國的GPS衛星訊號，同時還可接收俄羅斯的全球導航衛星系統（GLONASS）和歐洲的伽利略定位系統，因此每天將能提供4000筆觀測資料，將大幅提升預報準確度10%，因而獲得「太空中最精準的溫度計」的美名。尤其是對於難以取得的海洋上空、颱風生成熱區的資料，福衛七號將對臺灣的氣象預報產生相當大的助益。

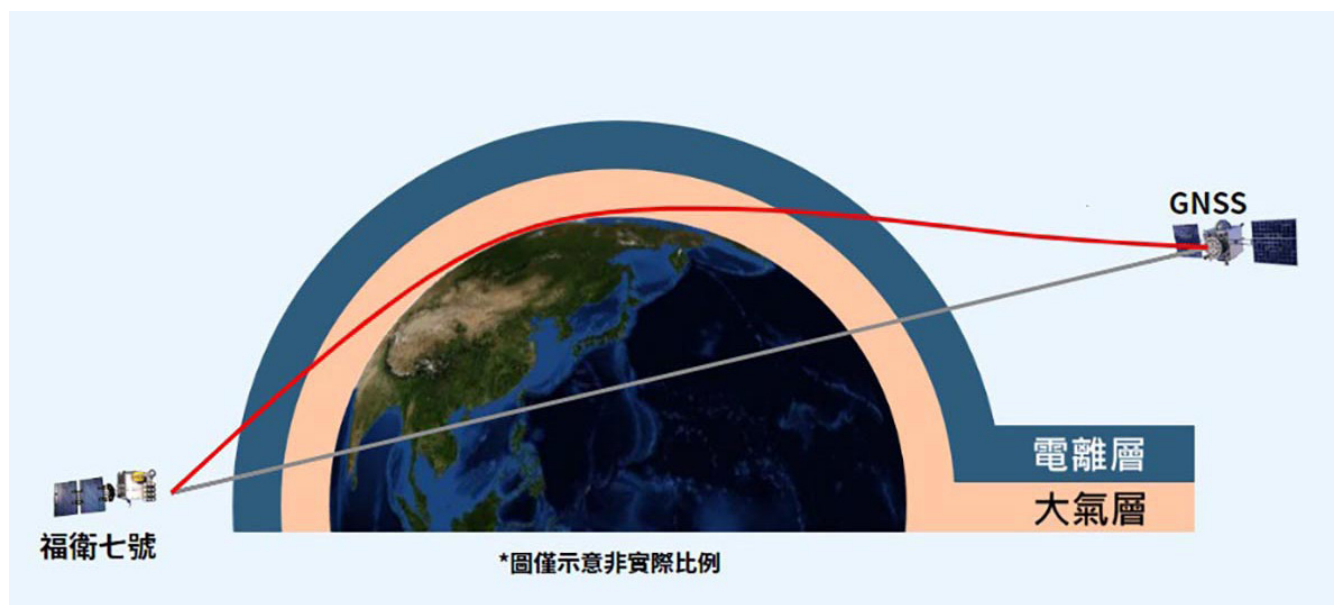
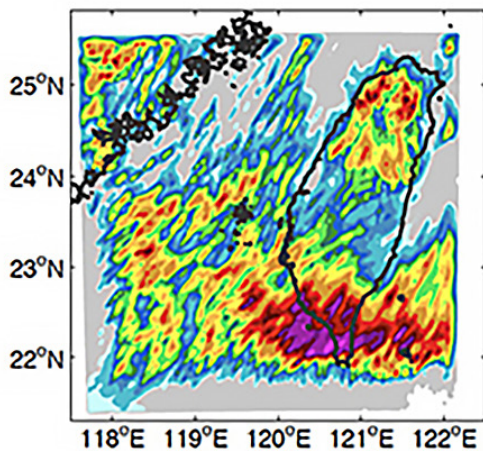
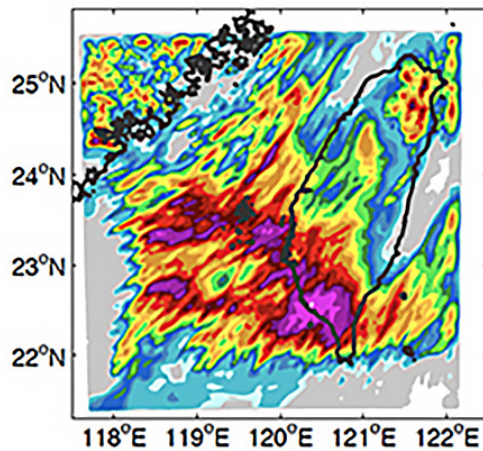


圖6. 利用觀測無線電訊號在大氣中的偏折情形就能回推大氣溫、濕度變化 © 國家太空中心

無福三資料



有福三資料



觀測

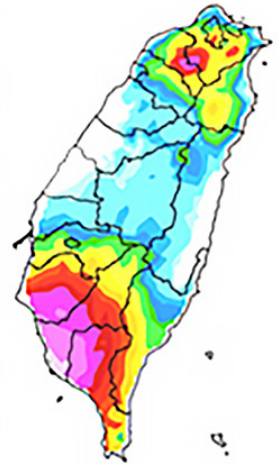


圖7. 2008年6月16日的梅雨強降雨個案，加入福衛三號資料後，才能預測台灣西南沿岸會降下豪大雨 © 國家太空中心

離正式部署完成 還要一年半

這次搭載福衛七號的火箭是由美國SpaceX公司研發的獵鷹重型火箭，上頭包含福衛七號在內共承載了24顆衛星，可以像公車一樣讓衛星在各自的目標軌道上「下車」。不過受限火箭的發射路徑，6顆衛星得先放在高度720公里的暫駐軌道上，再慢慢地讓6顆衛星軌道分開成不同的軌道面並降低高度至目標軌道。

要讓衛星移動到目標軌道的方式可以依動力來源分為兩種，一種是利用衛星自身攜帶的燃料推進，另外一種則是利用空氣阻力或軌道進動。前者的優點是衛星部署的時間比較短，但相對的需要攜帶更多燃料；後者不需要燃料推進，但相對的部署時間也會拉長，而福衛七號將會利用這兩種方式進行操縱。

首先是利用「霍曼轉換（Hohmann transfer）」降低軌道高度，原理和本刊90期〈前往月球之路〉介紹的類似。衛星先沿圓形軌道切線方向進行第一次逆向推進減速，這時衛星會由初始軌道進入平均半長軸小於原來軌道半徑的橢圓轉換軌道。當衛星在橢圓轉換軌道運行至近地點、與目標圓形軌道相切的位置時，再進行第二次逆向脈衝推進減速後，

衛星將會進入目標圓形軌道。

至於要如何讓6顆衛星的軌道面分開，則要利用軌道面進動的現象。由於地球的重力分布不平均，因此衛星的軌道面與地球赤道面的交點會移動：當衛星是由西向東環繞地球時，這個交點則會由東向西移動。而這個交點的移動速度，與軌道傾角和軌道半徑有關。

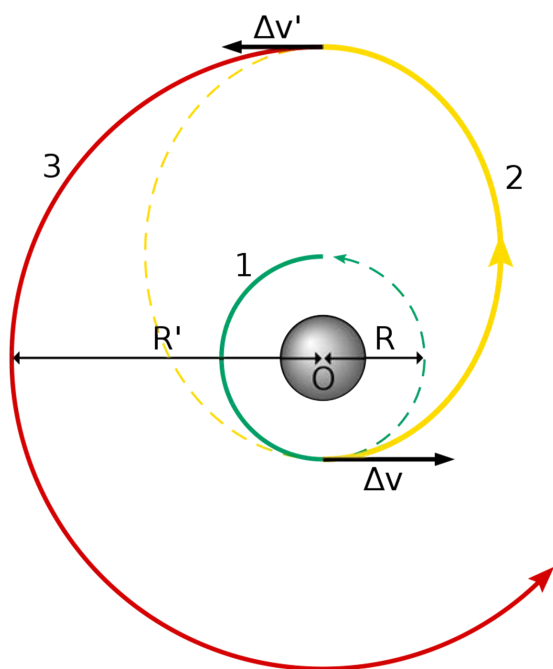
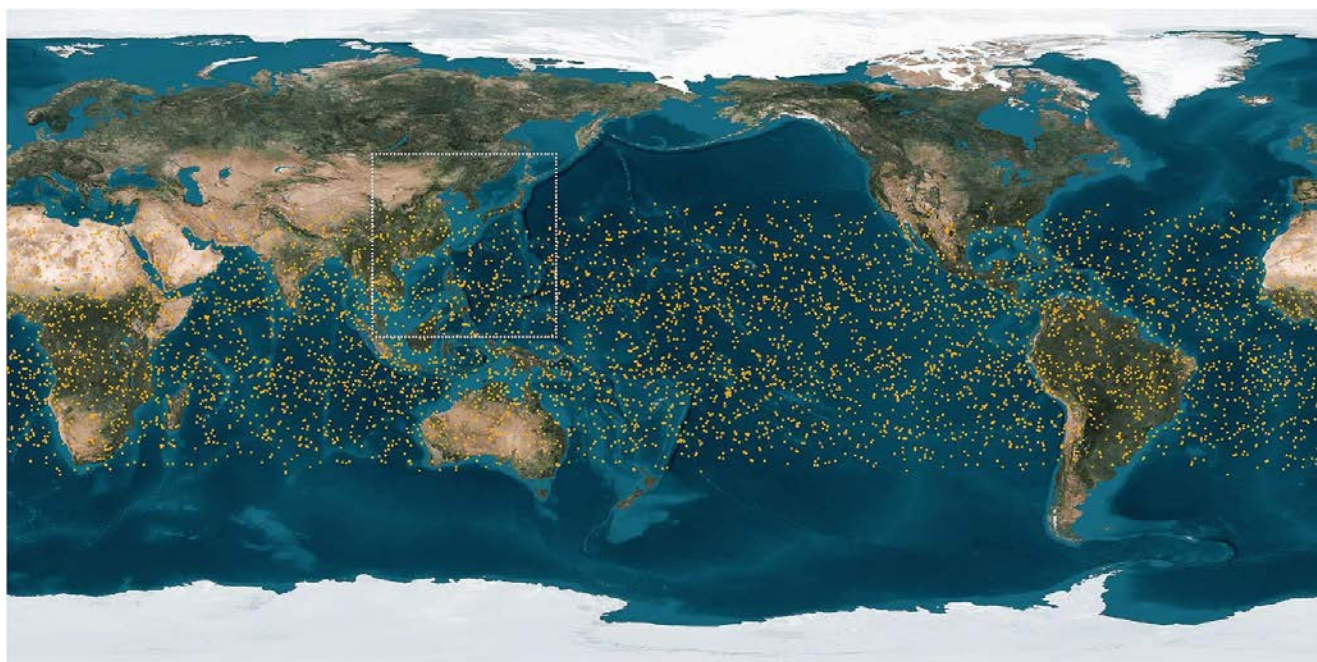


圖9. 由小半徑軌道移動到大半徑軌道的霍曼轉換過程
圖片來源：WIKI



→圖8. 福衛七號將以傾角24度的軌道環繞地球，每天可提供4000筆觀測資料，白色方框為台灣周邊觀測區域。 © 國家太空中心

綜合上面的方法，國家太空中心在完成福衛七號的性能測試之後，將會讓一顆衛星藉由霍曼轉換由高度720公里的暫駐軌道先降低到高度550公里的目標軌道上。之後利用不同高度的衛星軌道進動速度不同的現象，經過108天，第一顆衛星與其他衛星軌道在地球赤道的交點相差60度後，再進行第二顆衛星的軌道移動。如此重複操作，才能讓6顆衛星順利地分開，完整涵蓋預定的觀測範圍。雖然距離完成部署還要一段時間，但在這段時間國家太空中心的科學家也正在進行最後的調整與資料最佳化，預

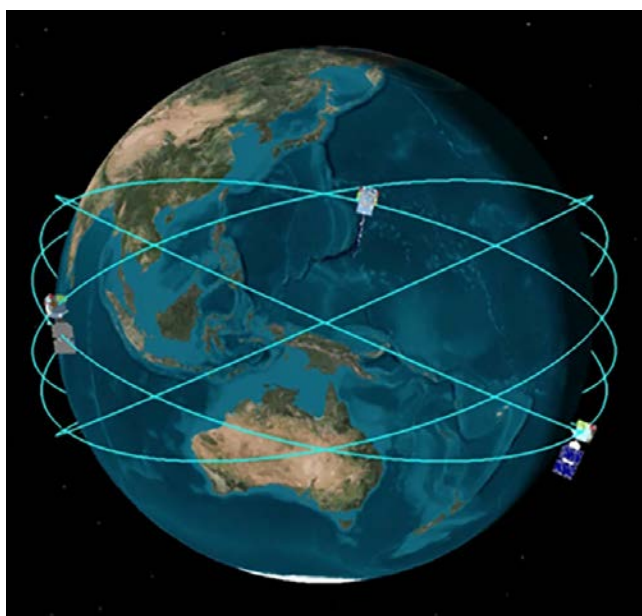
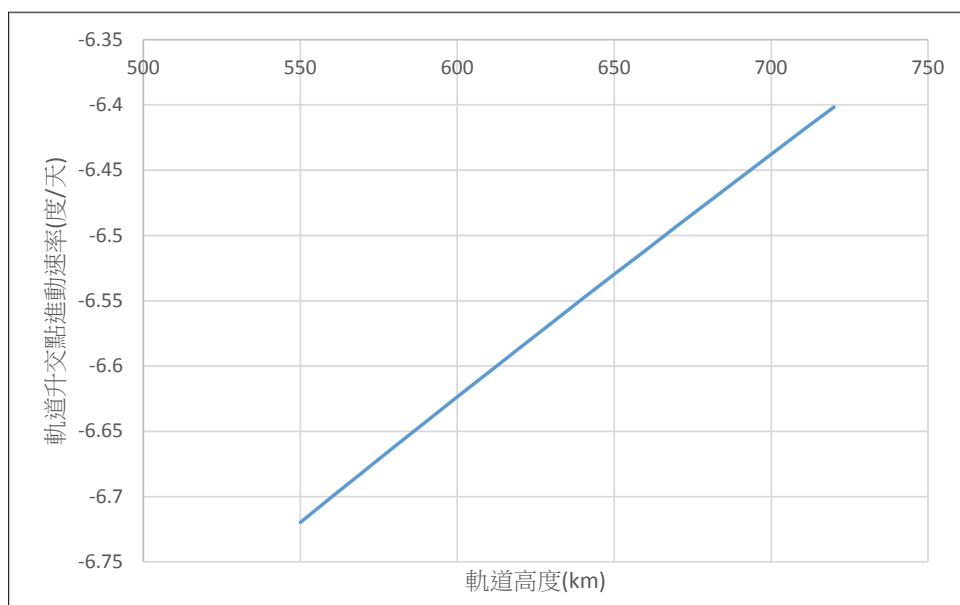


圖10. 軌道傾角24度的圓形軌道升交點赤經速率隨高度不同而變化，橫軸為軌道高度（公里），縱軸為變化速率（度／天）。



計2020年1月底就能正式加入氣象觀測的行列。

邁向太空第三期計畫

福衛七號的故事到此還沒結束。除了6顆測量大氣層溫、濕度的衛星之外，國家太空中心正在自主研發、製造與福衛七號搭配的獵風者衛星，並預計最快在2021年發射。與福衛七號不同的是，他上頭搭載了由臺灣自主研發的全球衛星導航系統反射接收儀（GNSS-R），可以同時接收GPS衛星直射以及從海面反射的訊號，藉由測量海面浪高來推算海面風場分布，與福衛七號相互合作之下相信能提升我們對颱風的預報準確度。

2019年1月15日，行政院核准了國家太空中心的第三期「太空科技長程發展計畫」。預計投入

新台幣251億元，在福衛五號及獵風者衛星的研發基礎上發展6枚先導型高解析度光學遙測衛星、2枚超高解析度智能遙測衛星、2枚合成孔徑雷達衛星。這一系列衛星將與福衛五號合作，提供更高解析度以及更密集觀測的衛星影像與資料，可以在重大天災發生時提供即時影像以及滿足對環境的長期監測需求。

這些結合國內產官學界的太空科技，未來也能應用到日常生活。例如：福衛五號等遙測衛星的高解析度感光元件，未來就有機會應用在相機與智慧型手機上；合成孔徑雷達衛星高頻寬固態高功率放大器晶片將是未來5G通信技術的重要元件。衛星元件除了需要極高品質之外，更需要擁有能在極端環境下運作的能力，研發過程往往需要極高標準的技術力，而這些技術也將是

臺灣未來科技的領頭羊。期盼福爾摩沙衛星未來不但是臺灣的驕傲，更是帶領臺灣走向世界的重要夥伴！

資料來源

1. 李奕德、劉正彥，〈GPS不再只是定位和導航〉，《科學發展》521期（2016年5月），頁6-11。
2. 謝銘恩、陳御群，〈用於天氣預報的全球定位系統〉，《科學發展》521期（2016年5月），頁12-16。
3. 方振洲，〈進一步探索福衛七號衛星〉，《科學發展》521期（2016年5月），頁26-33。
4. 黃楓台，〈六顆衛星乾坤大挪移〉，《科學發展》521期（2016年5月），頁34-38。
5. 國家太空中心：<http://www.nspo.narl.org.tw>

王彥翔：臺北市立天文科學教育館



圖11. 讓我們對國家太空中心團隊獻上最熱烈的喝采！圖為福衛七號團隊於發射前與福衛七號合影
© 國家太空中心

YouTube相關影片：



【志祺七七】「福衛七號」如何幫台灣征服宇宙？台灣的太空科技竟然有世界前10名？
<https://youtu.be/L16k9TT7BXE>



【完整公開】LIVE 航向天際 福衛七號發射全紀錄
<https://youtu.be/zCJN8hg6ass>