

微衛星地面系統簡介

近年來微衛星科技發展與應用已受各國重視並有長足發展，微衛星具有體積小、重量輕、發展時程短、設計精簡、操作容易及低成本等優點，微衛星地面系統之建構需求亦相對簡化，小規模的人力與物力投資即能應付自如。本文主要在介紹一般衛星地面系統架構、資料處理流程與微衛星地面系統之組成，並簡述業餘通訊微衛星之應用。

張桂祥

一、前言

自蘇聯於 1957 年發射第一枚史波尼克號 (Sputnik) 後，人造衛星歷經 40 多年的發展，已由初期實驗型的小衛星，發展到多功能酬載與設計複雜的大型衛星。此項趨勢的形成，一方面肇因於使用者需求的增加，歐美先進國家更基於國防與民生用途考量，投注大量人力與財力，造成衛星科技的蓬勃發展。另一方面，衛星任務的需求考量，亦帶動了發射載具的長足進步，其能將重達數噸重的衛星送上預定的軌道，以執行各項先進的任務。再者，由於太空計畫所費不貲，尤其是發射費用昂貴，往往一項任務必須攜帶十多項的實驗酬載 (科學衛星) 或多功能超容量的轉頻器 (通訊衛星)，加上衛星生命週期與安全係數的考量，相對使得衛星的設計更趨複雜，發展時程更長，造成衛星的成本亦節節升高。

近年來，由於科技的發展，人類已能應用比以前更小的體積而達到比以往更佳功能的太空元件。

張桂祥先生為美國阿拉巴馬大學工程力學博士，現任行政院國家太空計畫室籌備處地面系統組組長。

龐大的太空計畫成本，亦讓大部份的國家或研究機構望星興歎。傳統太空計畫的發展模式與觀念已逐漸被單一任務、設計簡化、操控容易、發展時程短與低成本的微衛星所挑戰，因而有近年來各國爭相投注微衛星研究發展的風潮。雖然微衛星並不能取代所有的太空任務，但對於從事太空科技研究人員，卻提供了另一條思路，在低成本、小規模的人力物力下，達到擁抱太空科技的捷徑。

上述微衛星發展之趨勢，使得微衛星地面系統亦相對朝向由繁入簡之設計，應用現成商品規格以降低成本，簡化操作程序與操作自動化等方向，皆是努力的目標。

近年來，許多業餘衛星 (amateur satellite) 更攜帶通訊平台，提供業餘通訊愛好者使用，例如儲存後下傳 (store & forward)、電子郵件 (e-mail) 及語音傳輸 (audio) 等功能。除此之外，這些業餘微衛星更被廣泛應用在教學方面，讓學生能在動手做之餘，達到學習衛星科技與其地面站研製之目的，成效卓著⁽¹⁾。

本文將針對微衛星地面系統作一通盤性介紹，依序將概述衛星地面系統之任務需求與一般基本功能、遙傳追蹤指令站、任務操控中心、微衛星系統

地面站與業餘微衛星地面站等。

二、衛星地面系統功能

1. 地面系統功能

一般而言，無論是大型衛星、小型衛星或微衛星，甚至星系系統 (constellation system)，地面系統的基本功能是相同的。地面系統最主要的功能，即是 (1) 支援衛星本體與酬載的運作及 (2) 將接收到的任務資料傳輸給使用者。地面系統可能依不同的任務需求，而有不同的設計，例如通訊任務與遙測任務在使用通訊頻段與資料處理上有極大的不同，但基本的地面系統功能架構是相同的。基本地面系統之功能與其它介面之關係，如圖 1 所示⁽²⁾。

在衛星地面系統兩項主要功能中，任務資料傳輸之架構設計與任務之選擇有非常直接之關係，依任務性質的不同及使用者接收資料的需求有非常大的差異，因此本文將著重於支援衛星本體與酬載運作功能之闡述。

2. 地面系統組成元件

衛星地面系統主要由兩大單元所組成，一是衛星遙傳追蹤指令站 (telemetry tracking & command station)，即一般簡稱為 TT&C 地面站，另一單元為任務操作控制中心 (mission operations control center)，即一般所稱 MOCC，此兩大單元藉由網路及必要之通路處理器 (gateway processor) 來串接介面。此兩單元可能位於同一地方或不同地方，其選擇則端賴任務需求或設施與人員配置的考量。其中 TT&C 地面站可能有許多個，一般低軌衛星之 TT&C 站則以位於較高緯度者較佳，以確保地面通

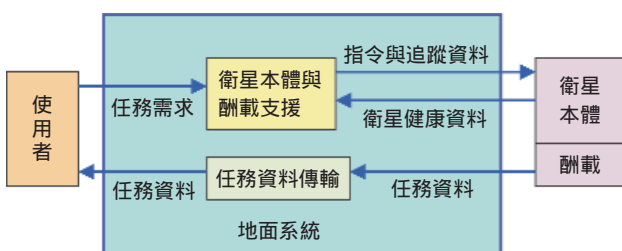


圖 1. 基本地面系統功能圖。

訊範圍能涵蓋較多的衛星軌道。另外，為保持與衛星的通訊不受 TT&C 地面站地理位置之限制，選擇多個互補的 TT&C 站成為地面站網路亦是一項選擇，惟操作成本也會相對增加。至於任務操作中心則只需一固定設施，一般皆選擇在工作人口多，維護機能不乏的都會區。另外，使用者地面站用來接收或上鏈指令 (主要指酬載部份)，則視衛星任務而定，只要在任務軌道通訊範圍內，皆可設置運作，並無限制。以下就 TT&C 地面站與任務操作控制中心 (MOCC) 之功能與資料傳輸流程，作一概述。

三、遙傳追蹤指令站 (TT&C 地面站)

TT&C 地面站主要任務乃在提供衛星與地面系統的直接通訊介面，包括遙傳資料 (telemetry) 接收、衛星追蹤 (tracking)、衛星指令 (command) 傳送等功能。TT&C 地面站主要是由任務操控中心來操控，透過網路亦可遙控 (remote control) 位於遠端的地面站。一般設計，在緊急狀況下也可以由操作人員駐站控制衛星，所以 TT&C 地面站也可用來作任務操作中心的備用設施。

一般 TT&C 地面站之功能設施可參閱圖 2 所示。依據功能來區分可分為三個部份，包括 (1) 遙傳接收、(2) 指令傳送與 (3) 追蹤及天線控制。

1. 遙傳接收

地面系統最重要的功能之一就是接收與處理衛星傳輸下來的下鏈訊號。如圖 2 所示，依訊號處理流程，當天線系統接收到衛星下傳訊號時，依序經過接收射頻設備 (receiving RF equipment)、資料恢復設備 (data recovery equipment) 及遙傳資料轉換處理器 (telemetry decommutation process) 等，再經由介面通路 (gateway) 將遙傳資料傳送到任務操控中心，供進一步運用。遙傳訊號處理流程簡述如下。

(1) 接收射頻設備：當天線接收來自衛星下鏈訊號後，首先送至接收射頻設備，進行信號之放大與濾波，同時將訊號自載波 (carrier) 解調變 (demodulation) 下來，並對都卜勒頻率漂移 (Doppler frequency shift) 進行補償。相關儀器設

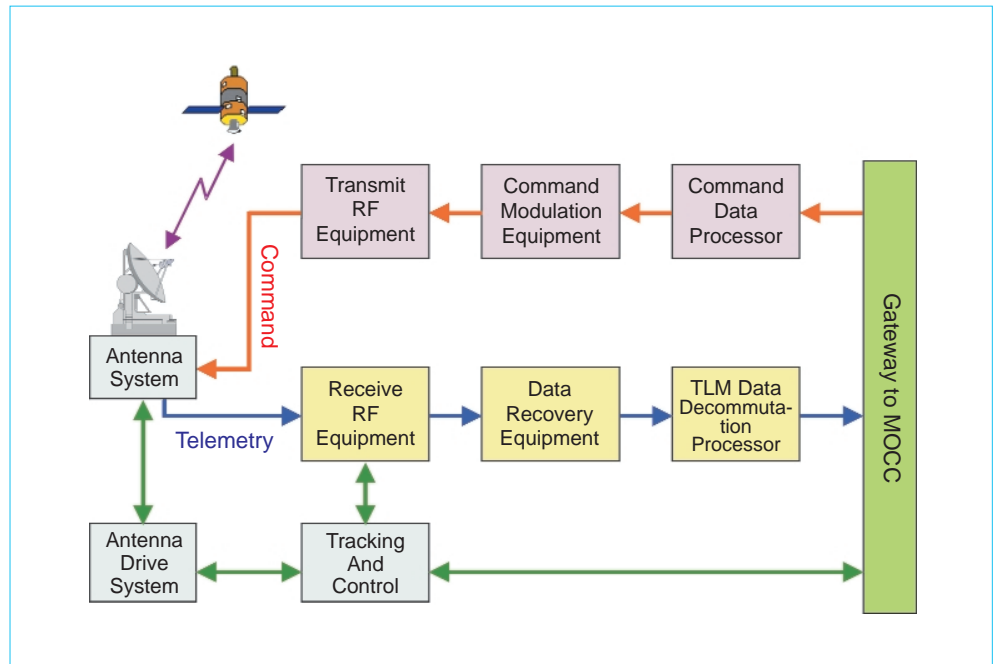


圖 2.
TT & C 地面站架構與資料流程。

備包括：極化器 (polarizer)、雙工器 (diplexer)、低雜訊放大器 (low noise amplifier)、多重耦合器 (multi-coupler)、接收機 / 解調變機 (receiver/demodulator) 及結合機 (diversity combiner) 等。一般又稱此部份為射頻次系統 (RF subassembly)。

- (2) 資料恢復設備：當資料進入到此部份時，主要是接收並處理遙傳資料匯流 (bit stream) 及傳送虛擬通路資料位元 (virtual channel data unit, VCDU)，包括將序向位元資料流依其現有頻率回復過來，進行框架 (frame) 同步動作，移除擬亂編碼 (pseudo random coding)，進行 Reed Solomon 解碼及更正，並提供正確的 VCDU 等。相關儀器設備有：位元同步器 (bit synchronizer) 與資料框架同步器 (frame synchronizer) 等。此部份亦可稱為基頻次系統 (baseband subassembly)。
- (3) 遙傳資料轉換處理器：當資料進入此部份時，處理器負責框架的存取資料和維持品質，同時提供資料分配與傳輸給任務操控中心。其主要功能有處理衛星健康資料，包括資料的回復 (decommutation)、工程單位轉換 (engineering unit conversion) 及參數限值之查核等。通常此

設備為一工業級電腦，或稱前端處理器 (front end processor)。

2. 指令傳送

TT&C 地面站另一主要功能即是上鏈指令給衛星，以操控衛星。這些指令可能是一個特定指令或一組指令集。因此，當操作員鍵入一指令時，指令信號就會從任務操控中心透過地面通訊網路傳送到所指定的 TT&C 地面站，進而經由天線系統上鏈給衛星。如圖 2 所示，其間指令流程與處理架構可概分為：(1) 指令資料處理器 (command data processor)、(2) 指令調變設備 (command modulation equipment) 及 (3) 傳輸射頻設備 (transmit RF equipment)。茲將各部份功能簡述如下。

- (1) 指令資料處理器：當指令經由 MOCC 透過區域網路送至此處理器時，指令訊號將會被格式化為指令鏈路傳輸單元 (command link transmission unit, CLTU)。指令訊號再經過序列介面卡 (serial interface)，送到指令調變設備。實務上，此處理器與遙傳資料轉換處理器統稱為前端處理器 (FEP)。
- (2) 指令調變設備：在這裡，指令訊號經過序列化介面卡後，形成序列資料，送到指令資料調變

器 (command modulator)。指令基頻訊號和經調變後的測距信號 (range tones) 再一起被送到結合器 (combiner) 中結合，然後就送到傳輸射頻設備，此部份設備屬於基頻次系統之一部份。

- (3) 傳輸射頻設備：在這裡，發射機將上鏈訊號結合器的資料送到上鏈頻段載波上，接著被送入功率放大器 (power amplifier)，將上鏈頻段的射頻訊號放大至足夠的功率後，發射至衛星上。此部份功能設備包括：發射機 (exciter)，功率放大器、雙工器等，以上皆屬於射頻次系統之一部份。

3. 天線系統

天線系統主要負責將射頻訊號發射至衛星與接收來自衛星之射頻訊號，天線系統主要是由天線、天線轉動機構及追蹤控制迴路等組成。天線的選擇主要與衛星通訊架構設計有直接關係，例如使用上下鏈頻段、接收的 G/T 值與傳送的 EIRP 值等。另外，由於低軌衛星之特性，地面站天線必須能提供在地面站視野內半球型的通訊涵蓋範圍 (如圖 3 和 4 所示)。因此，必須具有提供仰角 (elevation angle) 及方位角 (azimuth angle) 之雙軸轉動機構，才能使天線追蹤衛星。一般的天線追蹤功能又分自動追蹤 (autotrack) 與程式追蹤 (program track) 兩種。其中自動追蹤乃是較先進的功能，即天線能利用接受信號來自動轉動天線追蹤衛星。另外，程式追蹤則是利用已知的衛星軌道參數 (NORAD two-line

elements)，經由程式計算預估衛星位置，以驅動天線達到追蹤衛星之目的。

四、任務操作控制中心

任務操作控制中心 (MOCC) 乃衛星地面系統另一重要單元，其功能架構與資料流程如圖 5 所示。MOCC 最主要功能在監控衛星的健康資料與規劃執行衛星的任務，同時，MOCC 有時亦要負責處理或儲存任務資料規劃及酬載儀器操作，並分送給使用者應用。典型的 MOCC 必須具備下列四項功能設備，即 (1) 遙控 / 指令工作平台 (telemetry & command workstation)、(2) 任務規劃工作平台 (mission planning workstation)、(3) 軌道支援工作平台 (orbit support workstation) 及 (4) 資料儲存工作平台 (data archive workstation)。上述工作平台透過區域性網路 (LAN) 來聯結，提供相互間資料之傳送。其中，遙傳 / 指令工作平台經由前端處理器 (FEP) 與 TT&C 地面站構成介面，資料儲存平台則提供與使用者的介面，其遙傳資料處理與指令產生流程可參考圖 5。

1. 遙傳資料處理流程

遙傳資料一般有兩種：衛星健康資料與任務資料。當 TT&C 地面站將遙傳資料傳到 MOCC 時，遙傳 / 指令工作平台會將衛星健康資料顯示在終端

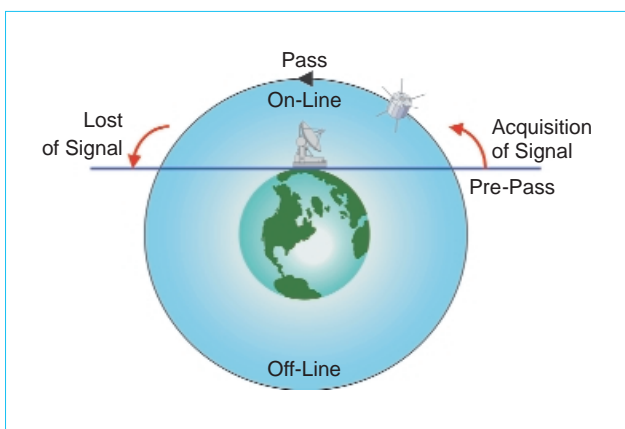


圖 3. TT & C 地面站與衛星通訊示意圖。

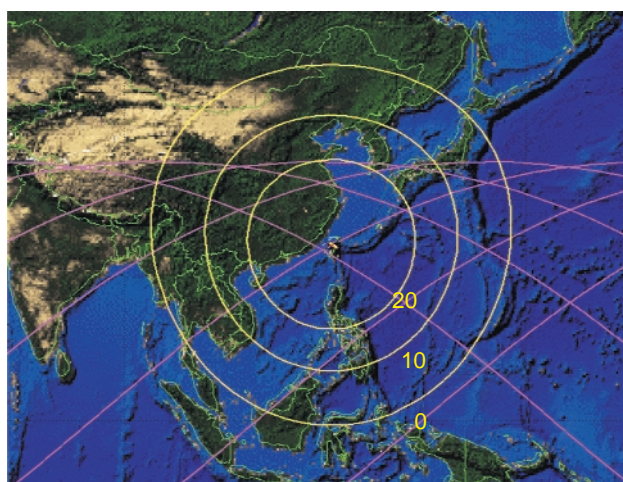


圖 4. TT & C 地面站通訊涵蓋圖。

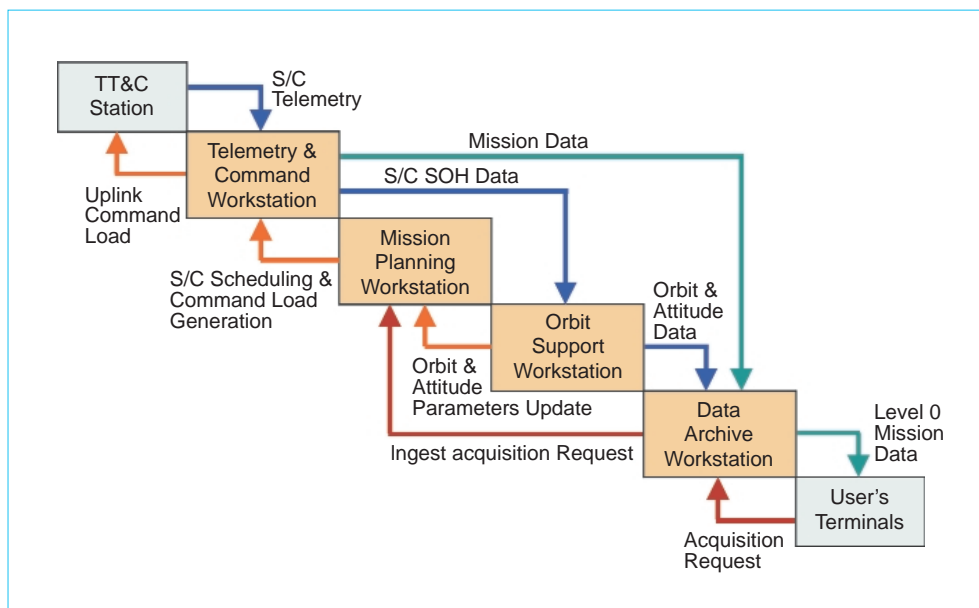


圖 5. 任務操作控制中心架構與資料流程。

機前，提供操作人員作即時監控之用。同時，下鏈資料中會包含過去衛星的健康狀態紀錄，此平台亦負責處理這些紀錄資料，以提供操作人員進行衛星狀態趨勢分析 (trend analysis)。另外，此平台也負責提供衛星下鏈的姿態與位置參數給軌道支援工作平台，以作為軌道預測分析之依據。結合任務資料與軌道參數，資料儲存工作平台再負責處理完整的任務資料，提供給使用者應用。

2. 上鏈指令處理流程

在上鏈指令方面，MOCC 一般兼負兩種任務，即操控衛星本體與執行酬載儀器操作。使用者透過資料儲存工作平台介面提出酬載操作需求，這些需求會被傳送到任務規劃工作平台進行任務時程規劃，軌道支援工作平台亦會傳送更新的軌道與姿態參數值給任務規劃平台。任務規劃平台綜合衛星本體操控需求，酬載儀器執行需求與更新的軌道參數，再經過排程後，即產生指令集 (command load) 準備上鏈給衛星。這些指令集再送到遙傳 / 指令平台，經由操作人員鍵入傳送至 TT&C 地面站，即時上鏈給衛星，完成指令之流程。

五、微衛星地面系統

無論是小型衛星或微衛星之地面系統，其功能

與資料傳輸與處理流程基本上是一致的。其最主要的不同乃在於微衛星之通訊架構和操控設計較為簡單，地面系統之建構需求亦相對簡化，往往以很低的成本及現成軟硬體即能應付自如。比較上，微衛星之地面系統必須具備一般衛星地面系統之一般功能，可謂麻雀雖小，但五臟俱全。

在微衛星領域中，完整的微衛星地面系統，應具備有上下鏈、調變解調、低軌道衛星追蹤與都卜勒效應補償及資料處理之能力。由於微衛星通訊傳輸資料速率有限 (業餘通訊衛星通常小於 38.4 kbps)，所使用頻段 (VHF、UHF、L、S band) 也相對較低，且是既有廣泛商用器材存在使用之頻段，因此能以相當低成本 (約數萬美金)，即可建立簡單但功能完整的地面系統。一般的微衛星地面系統大致可區分為：(1) 天線系統、(2) RF 設備及 (3) 電腦系統三部份，典型的系統功能與設備組成如圖 6 所示。

1. 天線系統

天線系統可概分為天線 (antenna)、天線驅動器 (rotor) 與追蹤電腦 (tracking computer) 等三部分。

(1) 天線：在 VHF、UHF 與 L 頻段通訊，可採用八木天線 (Yagi antenna)，其優點是結構簡單、重量輕、風阻小。而在使用於 S 頻段以上時，則適合採用碟型天線 (dish antenna)。因為碟型天

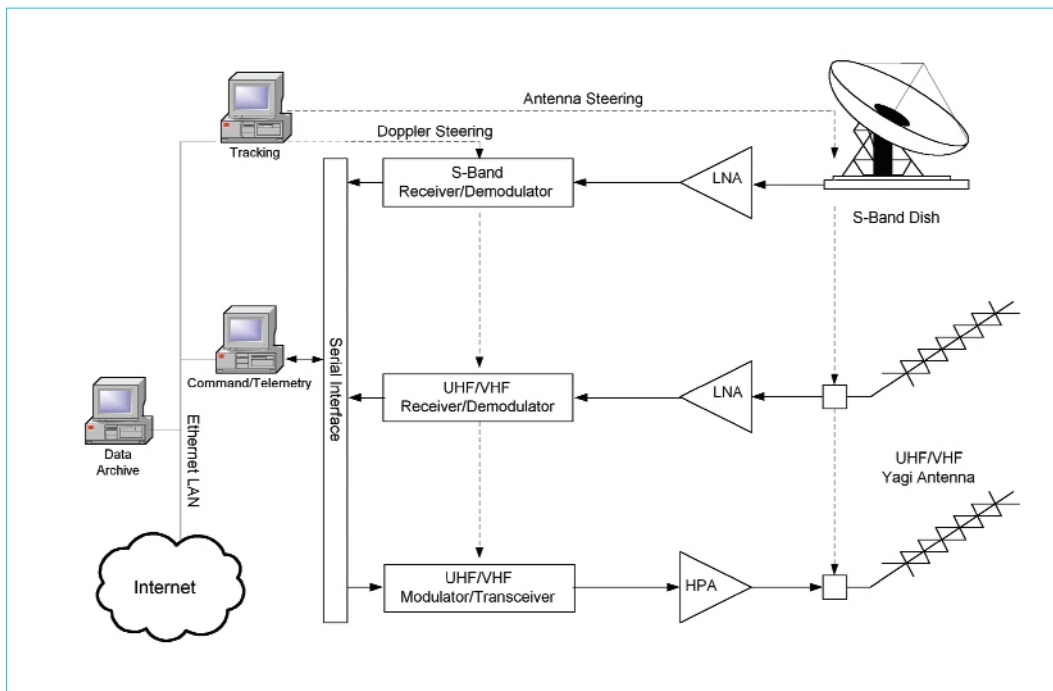


圖 6. 典型微衛星地面系統架構。

線在低頻段使用時，需要天線盤面尺寸大，較不實用；但在高頻段使用時，則在可接受的天線盤面尺寸下即能具 high gain 之性能。

- (2) 天線驅動器：接受追蹤電腦之控制，可同時驅動方位角 (azimuth) 與仰角 (elevation) 二軸向，其移動範圍分別為 0 - 360° 與 0 - 90°。
- (3) 追蹤電腦：依據衛星之軌道路徑，控制天線驅動器使天線保持對準衛星，此外並調整 transceiver 與 receiver 之發射與接收頻率設定以補償低軌道衛星之都卜勒效應。

2. RF 設備

- (1) 發射設備：以 modulator/transceiver 為主，具訊號調變與放大功能，如須發射較大功率可於後級增置功率放大器以加大發射功率。業餘通訊微衛星常用的調變方式為 PSK、FSK、AFSK、SSB，以及以 Morse code 編碼的 CW 方式通訊。
- (2) 接收設備：包含前置放大器 (pre-amplifier 或 LNA) 與 receiver/demodulator，其功能是将訊號放大再依發射端之調變方式進行解調變。

3. 電腦系統

通常以數部 PC 組成並透過 Ethernet 相連結成

LAN，做為整個地面系統之設備控制、通訊協定編解碼與資料處理中心，並與電腦上適當軟體之配合，將可使本系統具備相當程度自動化的功能。此外，透過 Internet 並可與遠端控制站連結而達成遙控目標。

六、業餘通訊用微衛星

許多微衛星上載有轉頻器 (transponder) 可提供業餘通訊愛好者使用⁽³⁾，例如：AO (Amsat OSCAR)、FO (Fuji OSCAR)、KO (Kitsat OSCAR)、LO (Lusat OSCAR)、RS (Radio Sport Satellite)、UO (UoSAT OSCAR)、WO (Weber OSCAR) 等系列衛星，其中 OSCAR 是 Orbital Satellite Carrying Amateur Radio 的簡稱。這些衛星所提供之上下鏈通訊參數如表 1，簡單型的業餘通訊微衛星地面站可參考圖 7⁽⁴⁾。

1. 業餘衛星通訊使用頻率

ITU 與 IARU (International Amateur Radio Union) 對業餘衛星服務規範使用的頻率有 VHF/UHF/L/S 等頻段，依使用的上下鏈頻段範圍可分為下列幾種模式：

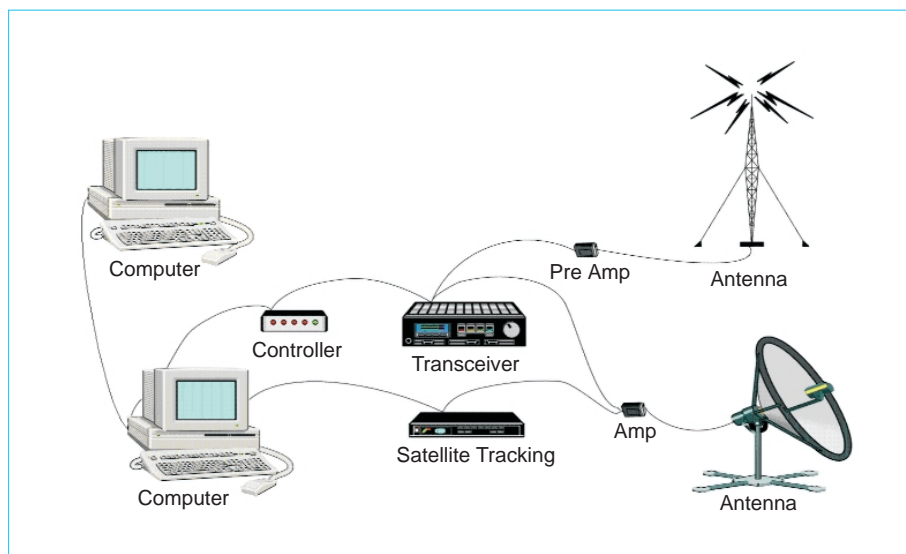


圖 7. 業餘通訊微衛星地面站設備。

模式	上鏈頻段範圍	下鏈頻段範圍
A	144 - 146 MHz	28.0 - 29.7 MHz
B	435 - 438 MHz	144 - 146 MHz
J	144 - 146 MHz	435 - 438 MHz
K	21.0 - 21.450 MHz	28.0 - 29.7 MHz
L	1260 - 1270 MHz	435 - 438 MHz
S	435 - 438 MHz	2400 - 2450 MHz
T	21.0 - 21.450 MHz	144 - 146 MHz

2. 業餘無線電通訊協定 (Protocol)

通行的業餘無線電通訊協定為 AX.25⁽⁵⁾ 與 PACSAT。其中 PACSAT 是以 AX.25 為基礎，而增訂廣播通訊協定 (broadcast protocol) 與檔案伺服器 (file server) 功能規範。

AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio (version 2.2) 是由 ARRL (American Radio Relay League) 與 TAPR (Tucson Amateur Packet Radio Corporation) 所公佈。

依 ISO 所定義的網路通訊規範，在開放系統互連基本參考模型 (OSI reference model) 的七層 (seven layers) 通訊協定標準中，AX.25 制定資料鏈結層 (data link layer) 與實體層 (physical layer) 二層規範而形成通訊協定標準。

OSI 開放系統互連基本參考模型七層功能簡述如下：

(1) 第七層：應用層 (application layer)，支援使用者

應用作業，如檔案傳輸、電子郵件、虛擬終端、名錄服務及訊息處理系統。

(2) 第六層：表現層 (presentation layer)，確認使用者應用作業格式以使其能夠彼此交換資料，如信息處理系統、ASN.1。

(3) 第五層：會談層 (session layer)，提供使用者應用作業同步及控制。

(4) 第四層：傳輸層 (transport layer)，隔離使用者應用作業於網路實體之外，並提供多線之可計數的資料傳遞。

(5) 第三層：網路層 (network layer)，指定使用者資料轉送至網路的界面，同時也定義網路資料轉換路徑選擇。

(6) 第二層：資料鏈結層，網路資料傳送流程控制以保證資料轉送的正确性。

(7) 第一層：實體層，傳送及接收實體網路訊號，如 EIA-232、V.22 bis、V.35 等。

AX.25 通訊協定具下列特點：

(1) 適用於業餘無線電台間，以點對點或對網路間之數位通訊環境。

(2) 僅規範 OSI 模型中的實體層與資料鏈結層功能，對第三層以上並未規範。

(3) 適用全雙工 (full duplex) 與半雙工 (half duplex) 之業餘無線電通訊環境。

(4) 通訊二端具相同權限等級，並無主從之分 (master/slave)。

表 1. 業餘無線電通訊衛星使用頻率。

衛星	模式	上鏈頻段範圍	下鏈頻段範圍
RS-13	K	21.260 - 21.300, CW/SSB	29.460 - 29.500, CW/SSB
	A	145.960 - 146.000, CW/SSB	-
	T	-	145.960 - 146.000, CW/SSB
	-	Beacon	29.458, CW
	-	Beacon	29.504, CW (Robot)
	-	145.840, CW(Robot)	-
UO-14	J	145.975, FM Voice	435.070, FM Voice
RS-15	A	145.858 - 145.898, CW/SSB	29.354 - 29.394, CW/SSB
	-	Beacon	29.352, CW
FO-20	J	145.900 - 146.000, CW/SSB	435.800 - 435.900, CW/SSB
	-	Beacon	435.795, CW
AO-27	J	145.850, FM Voice	436.795, FM Voice
FO-29 (Fuji-OS CAR 29)	J	145.900 - 146.000, CW/SSB	435.800 - 435.900, CW/SSB
	-	Beacon	435.795, CW
	-	Beacon	435.910, FM Voice digitalker
	-	Beacon	435.795, 12 WPM CW telemetry
	J	145.870, 1200 bps AFSK FM	435.910, 1200 bps PSK SSB
	J	145.870, 9600 bps FM	435.910, 9600 bps FM
SO-35	B	436.291, FM Voice	145.825, FM Voice
AO-16	J	145.900/145.920/145.940/ 145.960, 1200 bps AFSK FM	437.025/437.051, 1200 bps PSK SSB
	-	Beacon	2401.14280, 1200 bps PSK SSB (Usually off)
LO-19	J	145.840/145.860/145.880/ 145.900, 1200 bps AFSK FM	437.150, 1200 bps PSK SSB
	-	Beacon	437.125, CW
UO-22	J	145.900/145.975, 9600 bps FM	435.120, 9600 bps FM
KO-23	J	145.900, 9600 bps FM	435.175, 9600 bps FM
KO-25	J	145.980/145.850, 9600 bps FM	436.500, 9600 bps FM
TO-31	J	145.925/145.975, 9600 bps FM	436.900/436.925/436.950/ 436.975, 9600 bps FM
UO-36	J	145.960/145.500, 9600 bps FM	437.025/437.400, 9600/38400 bps FM
AO-10	B	435.030 - 435.180, CW/SSB	145.825 - 145.975, CW/SSB
	-	Beacon	145.810, CW

AX.25 之框架結構 (frame structure) 形式如下
(以資料框架 (information frame) 為例) :

Flag	Address	Control	PID
01111110	112/224 bits	8/16 bits	8 bits
Info	FCS	Flag	
N*8 bits	16 bits	01111110	

七、結語

微衛星具備設計簡單，操作自動化，任務簡化與低成本的優點，除了能執行各項科學實驗與業餘通訊任務外，近年來微衛星星系應用在操作實用型計畫也愈來愈多，例如：我國太空計畫室所主導的

華衛三號計畫(氣象遙測)、美國 OSC 的 ORBCOMM(通訊)、英國 Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL) 所發展的 DMS⁽⁶⁾(災害遙測監控) 和 GANDER⁽⁷⁾(海洋遙測) 等計畫。由於衛星系統的簡化, 地面系統亦相對的走向低成本平民化的趨勢。傳統的衛星發展程序與模式或許讓許多人覺得太空計畫遙不可及, 但微衛星的研發尤其適合小規模、低成本的團隊, 譬如大學或研究單位。最重要者, 微衛星之地面系統, 其技術層面與成本投資較衛星本體或發射系統更容易切入, 實值得大家重視。俗語說「萬事起頭難」, 個人認為微衛星地面系統是一個很好的切入點, 讓有興趣從事太空科技的研究人員達到擁抱衛星科技的夢想。

誌謝

本文作者感謝太空計畫室地面組同仁曾俊凱先生與楊儒木先生提供技術參考文件與諮詢, 更感謝何鳳珍小姐與劉苑亭小姐提供文書處理協助。

參考文獻

1. F. B. Hsiao, H. P. Liu, and C. C. Chen, *Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations*, J. J. Miao and R. Holdaway eds., Kluwer Academic Publishers, 275 (2000).
2. W. J. Larson and J. R. Wertz, *Space Mission Analysis and Design*, 2nd ed., Microcosm, Inc., 584 (1992).
3. G. B. Rogers, *Working the Easy SATE - An Informal Introduction to the Amateur Satellite Program Plus Hints on Using the More Easily Accessed Satellite*, Rev. 3.5 (2000).
4. USC μ -Sat Ground Station, <http://ae-www.usc.edu/ug/scsat/ground.html>.
5. AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio, Version 2.2, Published by the American Radio Relay League (ARRL) and the Tucson Amateur Packet Radio Corporation (TAPR).
6. J. Ward, S. Jason, and M. Sweeting, Microsatellite Constellation for Disaster Monitoring, *Proceedings of the 13th AIAA/USU Conference on Small Satellite* (1999).
7. M. Sweeting, *Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations*, J. J. Miao and R. Holdaway eds., Kluwer Academic Publishers, 169 (2000).