

微衛星星系之規劃與應用

太空科技之發展趨勢是小衛星、高性能、自動化、模組化及國際化。近年來由於衛星的電子元件愈做愈小且製造成本降低，同時發射載具一次可施放多顆衛星，於是微衛星的發展已朝向星系任務規劃，甚至不限於繞地軌道。星系規劃最重要的因素是對地涵蓋性，本文依據星系任務規劃之原則，探討涵蓋台灣地區之低軌道衛星星系，評估我國發展通訊衛星星系之各種任務概念。由於台灣位於低緯度地區，當考慮通訊用途時，地球同步軌道通訊衛星仍是第一選擇。圓形軌道高度 800 公里、地面仰角 10 度以上涵蓋台灣地區之低軌道通訊衛星星系最少需 36 顆，即在 3 個傾角為 31.74 度之軌道面上分別部署 12 顆微衛星。

吳岸明

一、引言

世界上太空工業發展至今逾四十年，總計發射上天約五千多顆衛星。人類日常生活已與衛星息息相關，包括氣象預報、資源探勘、影像監測、電視轉播、越洋通訊及導航測量等。

目前衛星技術已經成熟，同時太空環境的掌握、高科技的應用、民生需求、成本限制及講求時效等因素，使衛星設計更精巧、實用、成本低、時程短。發展趨勢是小衛星、高性能、自動化、模組化、國際化。早期太空投資昂貴，衛星元件體積龐大，通常一個任務只做一顆衛星。近年來由於衛星的電子元件愈做愈小且製造成本降低，同時發射載具一次可施放多顆衛星，於是微衛星的發展已朝向星系 (constellation) 任務規劃。1991 年時就有超過 10 項星系任務三百多顆衛星進行規劃⁽¹⁾，2001 年

時有超過 57 項星系任務或已發射、或發展中、或規劃中，包括 Iridium、ORBCOMM、Teledesic、中華衛星三號 (ROCSAT-3) 等⁽²⁾。

典型的星系概念例如 1945 年 Clarke 所提出的，相對於地面是靜止的地球同步軌道衛星只要三顆便可涵蓋全球中低緯度地區⁽³⁾。1970 年 Walker 證明全球涵蓋的最少衛星數是五⁽⁴⁾，開啟了星系設計的系統性研究^(5,6)。星系設計在滿足任務需求，例如通訊、導航、遙測、偵察或科學實驗等，考慮衛星的時空涵蓋特性、地面站的配置、發射載具的升重能力，任務操作的需要等，進行多顆衛星部署 (deployment) 或編隊 (formation) 的軌道設計。

本文首先簡介星系任務規劃之原則，然後探討涵蓋台灣地區之低軌道衛星星系，最後評估我國發展通訊衛星星系之各種任務概念。

二、星系任務規劃之原則

星系規劃最重要的因素是對地之涵蓋

吳岸明先生為國立台灣大學機械博士，現任國科會太空計畫室籌備處研究員。

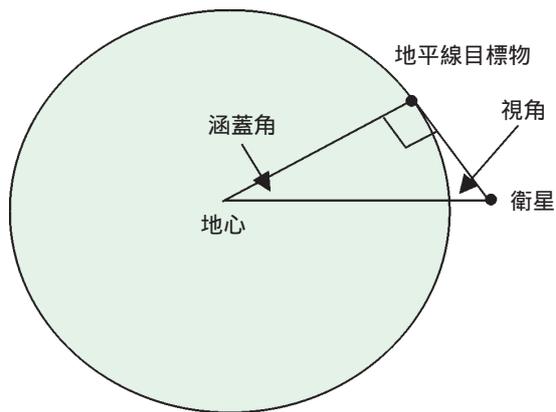


圖 1. 衛星涵蓋幾何。

(coverage)。低軌道衛星高度 (altitude) 在 400 公里至 1000 公里之間，週期 (period) 約 100 分鐘，通過地面站的時間一次約 10 分鐘。高度愈大，瞬間涵蓋愈大，但觀測解析度 (resolution) 愈低，微波傳送的功率通量密度 (power flux density) 也愈低。如圖 1 所示，1000 公里高的衛星，對地平線目標物的視角 (view angle) 為 60 度，距離約為 3700 公里；涵蓋角 (coverage angle) 為視角之餘角，即 30 度。傾角 (inclination) 愈大，衛星所通過的緯度愈高，故衛星所能涵蓋之地區愈大，適合全球探測需

要。空間涵蓋之衡量標準包括涵蓋角、視角、衛星與目標物之距離及衛星所能涵蓋之地區等。時間涵蓋之衡量標準包括最大間隙 (maximum gap) 或平均間隙 (mean gap) 等指標，須依據任務特性選取適當的指標據以研判。

一般星系的設計大多採用圓形軌道，軌道高度一樣，傾角也一樣。衛星間之差異主要在升點赤經 (right ascension of ascending node, RAAN) 及升點幅角 (argument of latitude)。升點赤經表示星系沿著東西向之分布，升點幅角表示星系沿著南北向之分布。Walker⁽⁵⁾ 採用 $t/p/f$ 之記號表示均勻星系，其中 t 表示總衛星數， p 表示軌道面數， f 表示間隔數。例如全球定位系統 (global positioning system, GPS) 共有 24 顆衛星，高度 20200 公里，傾角 55 度，均勻分布在升點赤經相差 60 度的 6 個軌道面上，相臨兩個軌道面上衛星的升點幅角差 60 度 ($= 360 \text{ 度} / 24 \times 4$)，這樣的星系是 24/6/4 的 Walker 星系。

GPS 使地面上任何一點在任何時刻均可收到 4 顆以上衛星的訊號，然後求解出空間三個座標和時間從而定位。Iridium 共有 66 顆衛星分布在 6 個低地軌道面上，軌道高度 780 公里、傾角 86.4 度，其地面涵蓋型樣有如蜂窩一般布滿全球，藉由衛星間之互相收送功能實現全球行動通訊。3 個

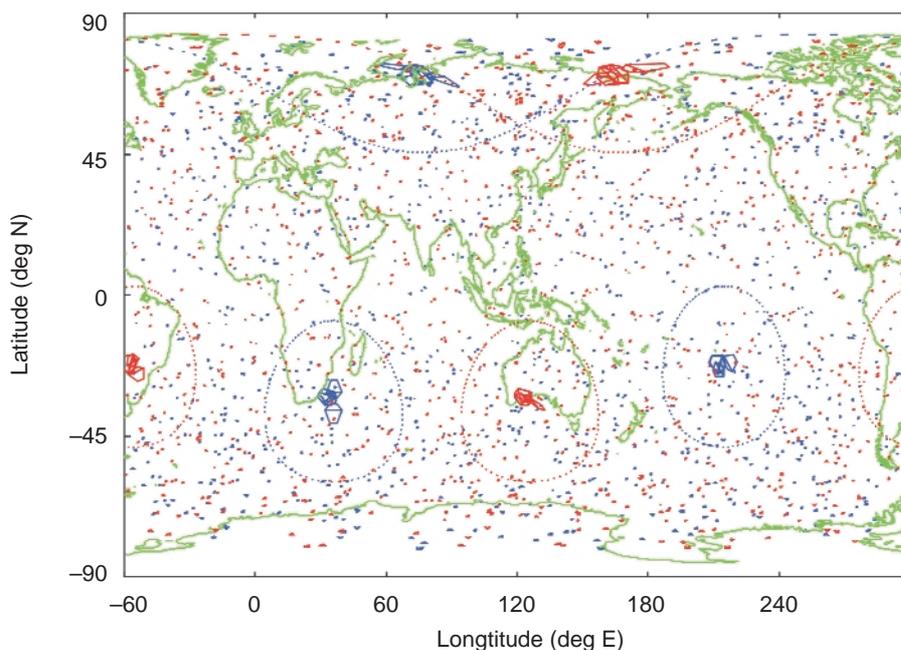


圖 2.
中華衛星三號遙測星系：6 顆、
高度 700 公里、傾角 72 度。

Altitude (km)	Elevation (deg)				
	0.	5.	10.	15.	20.
No. of Sat.	0.	5.	10.	15.	20.
3	7930	10980	15778	24614	46877
4	3741	4963	6549	8728	11969
5	2467	3279	4272	5535	7226
6	1886	2527	3290	4226	5424
7	1565	2117	2761	3537	4506
8	1368	1865	2440	3123	3963
9	1238	1699	2228	2852	3611
10	1147	1583	2081	2664	3368
11	1081	1499	1974	2528	3194
12	1032	1436	1894	2426	3063
13	993	1387	1832	2348	2963
14	963	1348	1783	2286	2884
15	939	1318	1744	2237	2821
16	919	1292	1712	2196	2770
17	903	1272	1686	2163	2728
18	890	1254	1664	2136	2693
19	878	1240	1646	2112	2663
20	868	1227	1630	2092	2638

表 1. 涵蓋南北緯 27 度範圍的最少衛星數通訊星系。

Molniya 軌道面 (軌道遠地點高度 39464 公里、近地點高度 1000 公里、傾角 63.4 度)，每個軌道面一顆衛星，即可提供俄國地區全天候通訊，但此為橢圓高軌道。

中華衛星二號為低軌道高解析度之陸地影像衛星，通過台灣之時間為上午 10 點鐘，未來衛星可規劃為通過台灣之時間在上午 7 點鐘、下午 1 點鐘、下午 4 點鐘等之 3 顆以上衛星星系。密集重訪之衛星系可滿足民生需求，亦可確保國防安全。中華衛星三號計畫為利用部署在高度 700 - 800 公里、傾角 72 度的 6 顆微衛星星系，接收 GPS 訊號以測量大氣及電離層之性質，屬衛星氣象、雷達氣象、觀天氣象、數值氣象之綜合先進技術。6 顆微衛星分布在 6 個軌道面上，以致在一個軌道週期 (約 100 分鐘) 裡便可全球涵蓋⁽⁷⁾。中華衛星三號之衛星部署及一天內之掩星點分布如圖 2 所示。

星系不只用在繞地軌道上，亦用在繞日軌道上。雷射干涉儀太空天線 (laser interferometer space antenna, LISA) 利用 3 顆衛星放在 3 個相同離心率的繞日橢圓軌道上，以不同的近點幅角 (argument

of periaapse) 與真近點角 (true anomaly) 形成一個三角形，建構量測重力波之基線⁽⁸⁾，如圖 3。

星系的發射方式有並列式、堆疊式及搭載式三種。並列式將幾顆衛星沿著發射載具護罩內環放置，堆疊式則將衛星一個一個疊起來，搭載式則搭

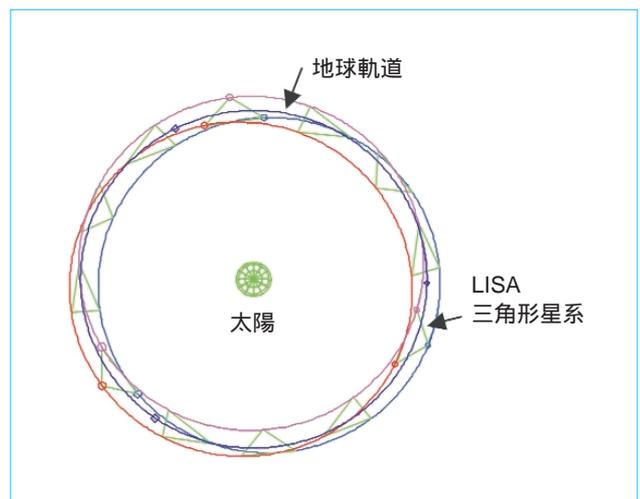


圖 3. LISA 繞日星系：3 顆、距離太陽 1 AU、對黃道面之傾角 0.957 度。

圖 4.
涵蓋南北緯 27 度範圍的軌道
高度對最少衛星數。

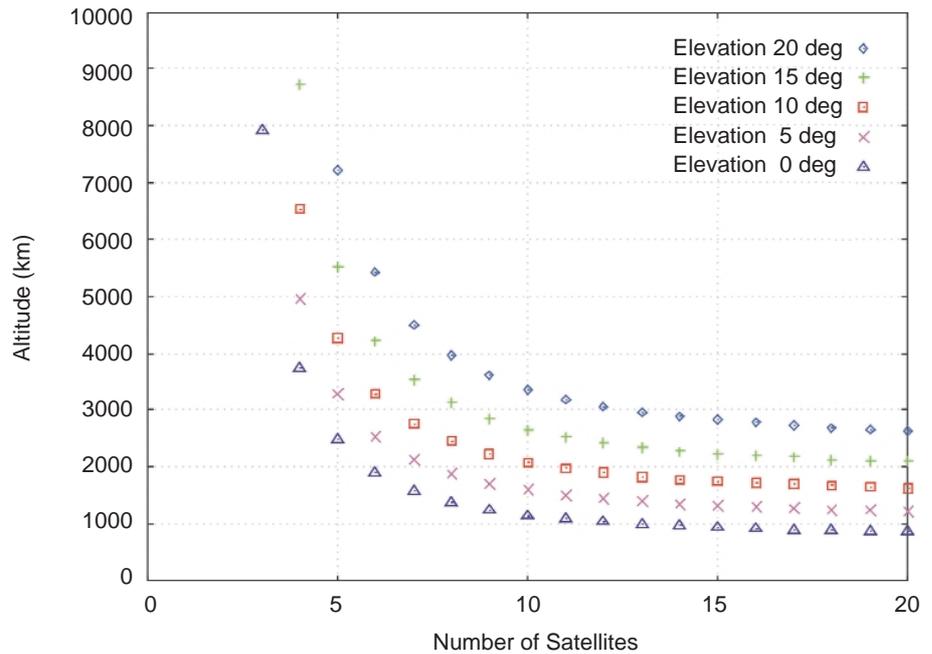
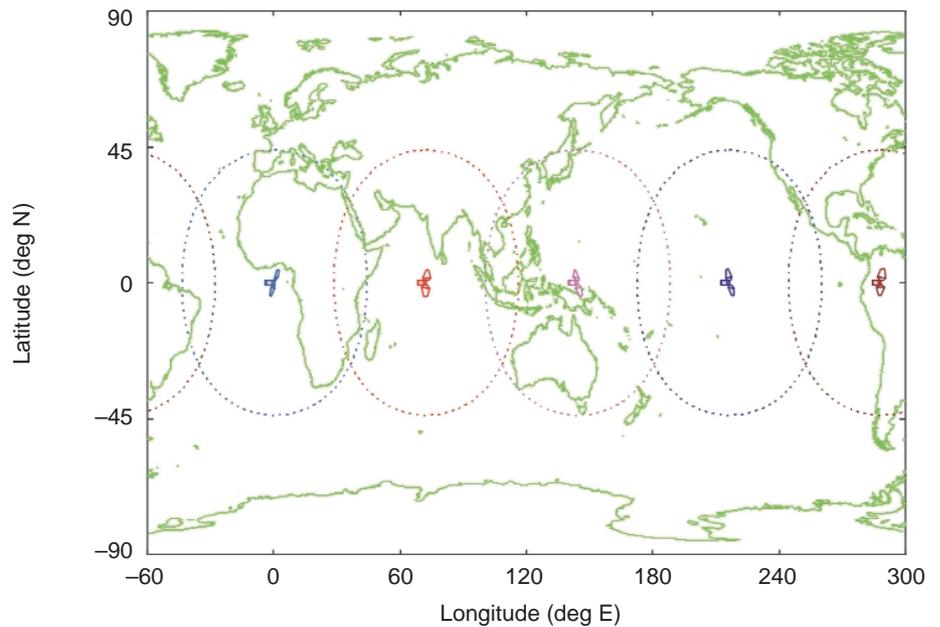


圖 5.
適合台灣地區之中軌通訊星
系：5 顆、高度 4272 公里、
傾角 0 度。



大衛星發射的便車，放在發射載具護罩裡的角落位置。一起發射之衛星基本上是部署在同一軌道面上。對於同一軌道面上之不同高度衛星，可透過發射載具分段釋出衛星達成。不同軌道面上之衛星也可一起發射，但必須利用衛星之高度差，產生地球扁球效應之軌道進動 (orbit precession) 差，以使衛星部署在不同軌道面上。中華衛星三號便是利用這種星系部署方式。

三、涵蓋台灣地區之低軌道衛星星系

全球涵蓋或高緯度地區涵蓋之低軌通訊星系設計，通常需要幾個軌道面，每個軌道面且需幾顆衛星，例如 Iridium 需 66 顆，Molniya 需 3 顆。對於低緯度地區 (例如台灣)，低軌通訊星系之最少衛星數問題可從不限軌道高度與固定軌道高度兩方面來看。

軌道高度 (km)	地面仰角 5 度以上			地面仰角 10 度以上		
	傾角 (deg)	(衛星, 軌道面)	總衛星數	傾角 (deg)	(衛星, 軌道面)	總衛星數
1500.	42.29	(8, 2)	16	40.66	(10, 2)	20
1400.	40.76	(8, 2)	16	40.70	(11, 2)	22
1300.	41.69	(9, 2)	18	31.48	(8, 3)	24
1200.	41.87	(10, 2)	20	33.61	(9, 3)	27
1100.	41.58	(11, 2)	22	31.35	(9, 3)	27
1000.	32.47	(8, 3)	24	32.25	(10, 3)	30
900.	33.92	(9, 3)	27	32.28	(11, 3)	33
800.	31.05	(9, 3)	27	31.74	(12, 3)	36
700.	31.31	(10, 3)	30	30.75	(13, 3)	39
600.	30.63	(11, 3)	33	30.41	(15, 3)	45
500.	30.85	(13, 3)	39	29.93	(18, 3)	54
400.	30.57	(16, 3)	48	27.54	(19, 4)	76

表 2. 涵蓋北緯 20 度至 27 度範圍的最少衛星數通訊星系。

1. 涵蓋南北緯 27 度範圍的最少衛星數通訊星系

考慮台灣地區最北端不超過北緯 27 度，地面與等間隔分布在赤道上空之星系中任一顆衛星通訊。表 1 列出最少衛星數所對應的軌道高度，軌道高度對最少衛星數如圖 4 所示。對於同樣的最少衛星數，若地面要求較高的仰角，則軌道高度便需較高。對於同樣的仰角，若最少衛星數愈大，則軌道

高度便愈低。以仰角 10 度的情形來看，4 顆衛星之軌道高度比 3 顆者顯著降低，但 10 顆以上效果便不顯著。最佳選擇應在 4、5、6、或 7 顆衛星，軌道高度約四、五千公里。5 顆適合台灣地區仰角 10 度以上的中軌通訊星系 (軌道高度 4272 公里、傾角 0 度) 如圖 5 所示。圖中圓圈表示一顆衛星的瞬間通訊範圍，星系的瞬間通訊範圍為圓圈聯集而成之鏈形。當考慮地球自轉或衛星在軌道上運行

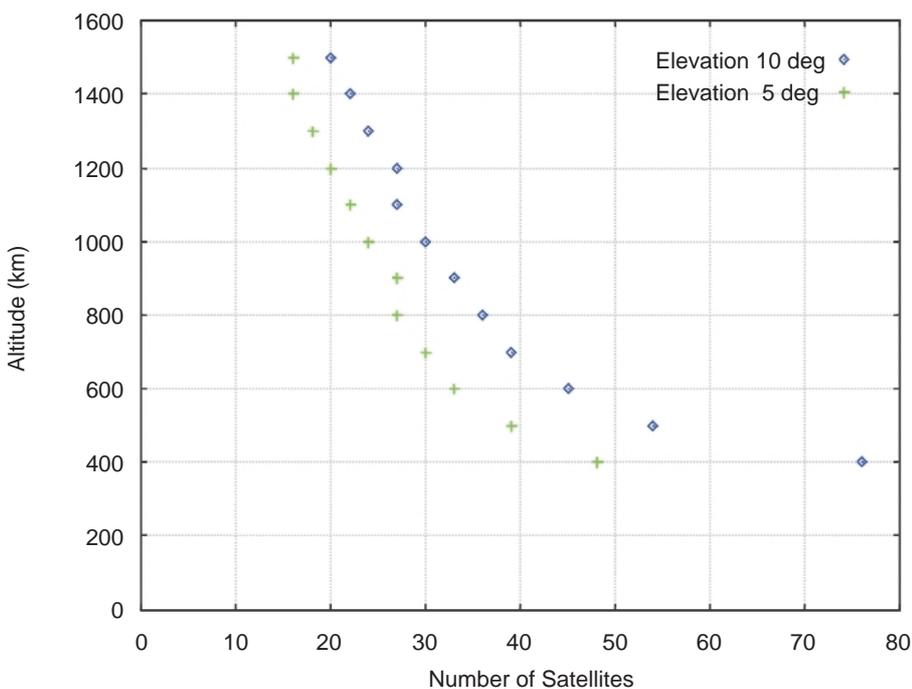


圖 6. 涵蓋北緯 20 度至 27 度範圍的軌道高度對最少衛星數。

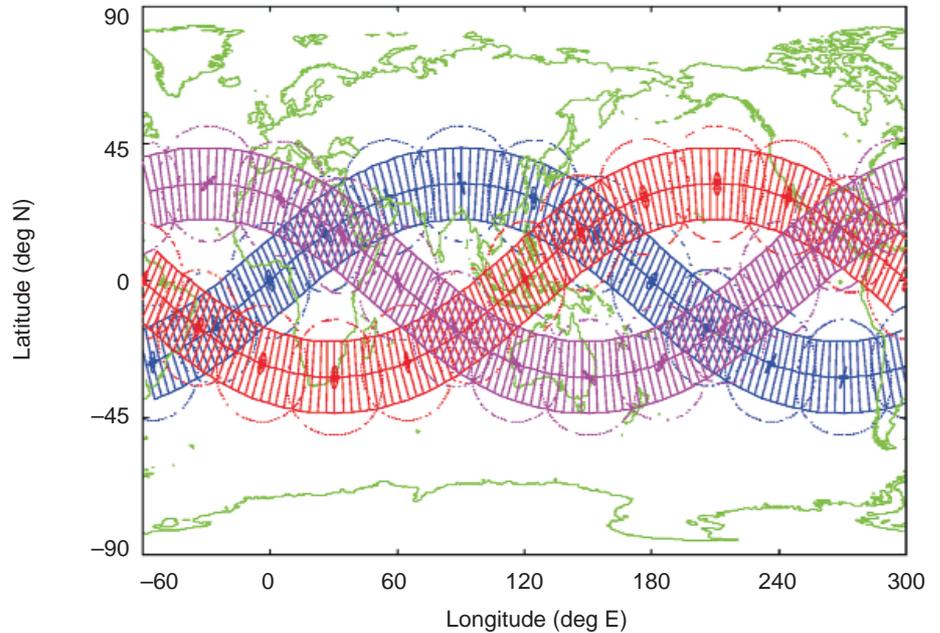


圖 7.
適合台灣地區的低軌通訊星
系：36 顆 (12 × 3)、高度 800
公里、傾角 31.74 度。

時，鏈形所提供持續涵蓋之區域為去掉凸出部分之帶形，稱作涵蓋街 (street of coverage)。

2. 固定高度涵蓋北緯 20 - 27 度範圍的最少衛星數通訊星系

當軌道高度受限於衛星通訊功率時，可考慮固定軌道高度下適合台灣地區之低軌通訊星系最少衛星數。在此以較實際之情形當條件：台灣地區 (台澎金馬) 位於北緯 20 - 27 度之間、地面仰角 5 度或 10 度以上，則對應於固定圓形軌道高度下的最少衛星數通訊星系之軌道傾角、每個軌道面衛星數、軌道面數、總衛星數如表 2 所示，軌道高度對最少衛星數如圖 6 所示。36 顆適合台灣地區仰角 10 度以上的低軌通訊星系如圖 7 所示，此為圓形軌道高度 800 公里之最少衛星數通訊星系，分布在 3 個軌道面，每個軌道面有 12 顆衛星，軌道傾角為 31.74 度。36 顆低軌通訊星系的三條涵蓋街之立體圖如圖 8 所示。

上述在 3 個軌道面分別部署 12 顆微衛星之星系，涵蓋全球中緯度地區，可作為對可移動物體及固定位置物體之「位移監控星系系統」(constellation system for displacement monitoring, CSDM)，利用連續涵蓋之低軌道微衛星星系蒐集地面、海面及空中物體所接收之 GPS 資料，分別

傳送至各種不同用途之地面監控站進行即時監測；亦可由監控站送出短訊息，透過星系分發至各物體進行即時指揮。在台灣地區之應用至少包括：車隊 (計程車、公車、貨運)、船隊 (貨櫃、油輪、漁船)、機隊 (客機、貨機、輕型機) 之管制與調度；電塔、水庫、土石、建物之坍塌監測與預警；車輛、設備、物品之竊盜預防與追蹤。

四、各種通訊衛星星系任務概念之評估

涵蓋台灣地區之低軌道通訊衛星至少需 36

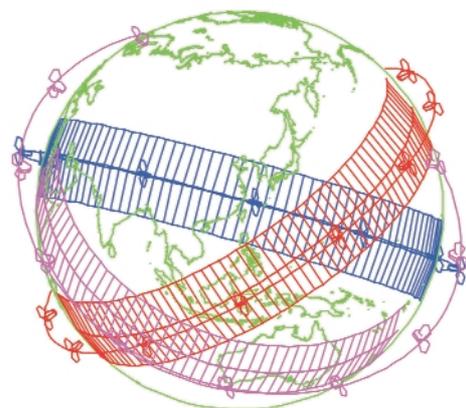


圖 8. 適合台灣地區的低軌通訊星系的三條涵蓋街立體圖。

類，相對於鈹計畫的 66 顆可全球涵蓋並不經濟，原因是台灣的緯度不高。鈹計畫全球涵蓋需 6 個軌道面 (軌道高度 780 公里、傾角 86.4 度)，每個軌道面 11 顆衛星，共 66 顆，相對於涵蓋台灣地區就需 36 顆，其實衛星數目不算多。台灣不應獨力發展低軌道通訊衛星星系，即使參與也應像鈹計畫 (Iridium) 之類可全球涵蓋的衛星星系。

高緯度地區之通訊軌衛星至少需 3 顆，分布在三個 Molniya 橢圓軌道面上。Molniya 軌道傾角 63.4 度、最高約 40000 公里、最低約 1000 公里。軌道週期為 12 小時，其中有八小時衛星出現在高緯度地區，可用以通訊。台灣的緯度雖不高，但可適用此類通訊衛星星系。Molniya 通訊衛星有 Doppler 效應，但不致造成問題。主要問題在其涵蓋區域隨時變化，頻率協調複雜。以台灣地區的通訊需要而言，此類衛星不如地球同步軌道衛星。

由於台灣地區緯度不高，適合通訊之軌道除了地球同步軌道外，還有一種週期八小時、固定太陽時、傾角零度之橢圓軌道，最高 226892 公里、最低 966 公里。每顆衛星每圈軌道可用以通訊的時間為六小時，四顆即可全天候通訊。

分布在赤道上空高度 4272 公里之五顆中軌道衛星星系亦適合台灣地區通訊，為地球同步軌道之替代方案。低緯度地區都在涵蓋範圍內，大部分的海洋也在涵蓋範圍內，參見圖 5。

衛星通訊之一種替代方案為利用高升力之飛機在高度約 20 km 之同溫層繞圈飛行，可對方圓 400 km 之局部地區通訊，任務期可長達半年。台灣人口稠密且氣候不穩，不適合發展。主要原因是飛機起飛及降落均極易受氣流影響，必須對周邊地區封鎖，以免民眾受到飛機起降失敗所波及。

「地球同步軌道通訊衛星」仍是台灣的第一選擇。台灣發展地球同步軌道衛星，除了通訊用途，

亦可考慮警戒用途。如果地球同步軌道沒有空位可用，台灣發展通訊衛星之第二選擇為「中軌道五顆通訊衛星星系」，「週期八小時固定太陽時之橢圓軌道四顆通訊衛星星系」為第三選擇，「Molniya 三顆通訊衛星星系」為第四選擇，「低軌道 36 顆通訊衛星星系」為第五選擇，同溫層繞圈飛行飛機為第六選擇。

五、結語

微衛星的發展已朝向星系任務規劃，甚至不限於繞地軌道。本文依據星系任務規劃之原則，探討涵蓋台灣地區之低軌道衛星星系，評估我國發展通訊衛星星系之各種任務概念。由於台灣位於低緯度地區，當考慮通訊用途時，地球同步軌道通訊衛星仍是第一選擇，第二選擇為中軌道五顆通訊衛星星系。圓形軌道高度 800 公里、地面仰角 10 度以上涵蓋台灣地區之低軌道通訊衛星星系最少需 36 顆，即在 3 個傾角為 31.74 度之軌道面上分別部署 12 顆微衛星。

參考文獻

1. J. E. Hatlelid and D. E. Sterling, *AIAA/Utah State University Conference on Small Satellites* (1991).
2. L. Wood, <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/background.html>, May 29 (2001).
3. A. C. Clarke, *Wireless World*, **51** (10), 305 (1945).
4. J. G. Walker, *Journal of the British Interplanetary Society*, **37**, 559 (1984).
5. J. G. Walker, *RAE Technical Report 70211* (1970).
6. W. S. Adams and L. Rider, *J. Astronautical Science*, **35** (2), 155 (1987).
7. L. C. Lee and C. Rocken, *Applications of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*, ed. by R. Kursinski, Springer (2000).
8. P. Bender, et. al., *LISA Pre-Phase Report*, Second Edition, MPQ 233 (1998).