

析論「全球定位系統」(GPS)

作者：耿國慶備役中校

提要

- 一、「全球定位系統」(GPS)係以衛星為基礎之無線電導航系統，於1993年10月系統全面運作後，可提供全球持續、全天候、三維之位置資訊。因GPS本質上為軍用系統，故其軍事運用甚為廣泛；惟GPS之運用，存在「一國擁有與國際共享」之間的矛盾，且美國防部始終堅持對GPS行使管理與控制之權力，鑑於部分砲兵幹部對GPS瞭解有限，不僅將GPS功能無限上綱，甚至誤認可取代「定位定向系統」。基此，深入瞭解GPS限制與弱點，分析比較GPS與定位定向系統兩者差異，建立正確運用觀念，實為當前重要課題。
- 二、GPS計畫從執行之初，即受美國軍方主導與控制，美國防部投注於研究、開發與後續監控、調整與補強之經費極為龐大。基於軍事與經濟之雙重考量，美國國會與國防部針對GPS之運用，制定了保密、控制、干擾與民用政策，其制定精神為「美國軍方堅持對GPS行使控制權力，惟在不危害美國防安全利益之前提下，始鼓勵對民間開放。」。基此限制與顧慮，警惕他國在軍事運用時，絕不可過分依賴。
- 三、GPS (GARMIN-60CS)與「定位定向系統」(ULISS-30、SPAN-7)皆具備定位功能，前者配賦於砲兵觀測組，後者則為測地之主要裝備。特就工作原理、裝備組成、作業自主性、定位定向精度、系統功能、投資效益、發展趨勢與美軍運用方式等八項，分析比較兩者之差異後，可證實定位定向系統在砲兵定位定向（測地）作業上之優勢。
- 四、鑑於GPS之運用確實存在「受制於人」、信號易受干擾與精度不佳等弱點，警惕國軍砲兵在運用時，絕不可心存僥倖與過分依賴。測地作業仍須以自主性高、精度佳之「定位定向系統」為主，傳統測量為輔，建立測地統制或提供射擊單位符合精度需求之測地成果；當狀況緊急且GPS可用時，始可暫用GPS定位，待測地成果獲得後再迅速更新，俾確保射擊精度。

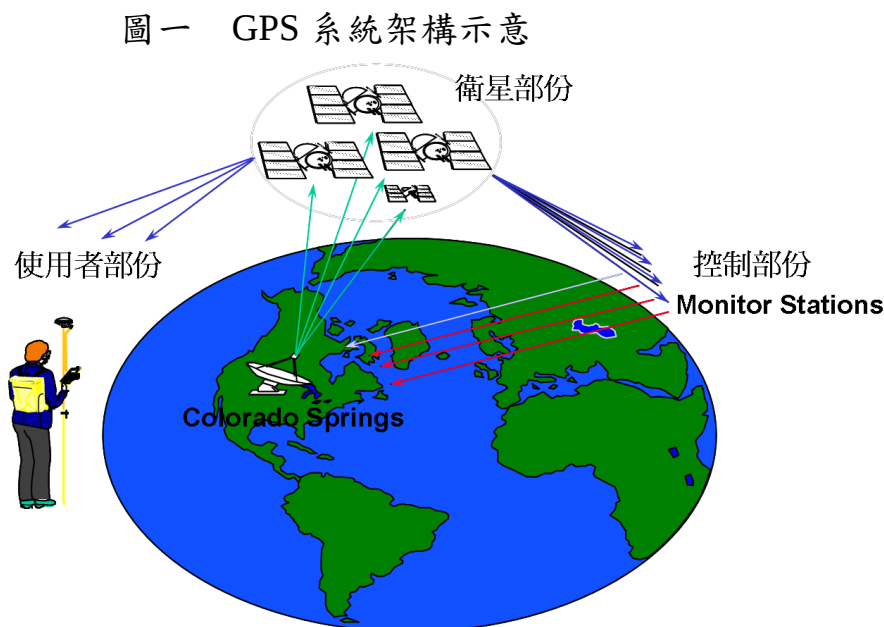
關鍵詞：全球定位系統、定位定向系統、慣性導航系統、單點定位、衛星測量

壹、前言

「全球定位系統」(Global Positioning System, GPS) 係以衛星為基礎之無線電導航系統，於 1993 年 10 月系統全面運作後，可提供全球持續、全天候、三維之位置資訊。因 GPS 本質上為軍用系統，故其軍事運用甚為廣泛。1991 年第一次波灣戰爭期間，美軍在中東部署了數以萬計的 GPS 接收機，其運用範圍從載具導航、飛彈尋標、測量定位、精密校時、高空跳傘、傷患搜救至追蹤補給等，幾乎無所不在，且對地空聯合作戰之成功居功厥偉，致掀起全球研究 GPS 運用技術之風潮，俾達到「為我而用」之目的。惟 GPS 之運用，存在「一國擁有與國際共享」之間的矛盾，且美國防部始終堅持對 GPS 行使管理與控制之權力，鑑於部分砲兵幹部對 GPS 瞭解有限，易陷入其簡便、低廉與普及化等表象迷思，不僅將 GPS 功能無限上綱，甚至誤認可取代「定位定向系統」，致漠視「過分依賴」與「受制於人」之危機。基此，深入瞭解 GPS 限制與弱點，分析比較 GPS 與定位定向系統兩者差異，建立正確運用觀念，實為當前重要課題。

貳、「全球定位系統」(GPS) 系統架構

GPS 系統架構主要包括衛星、控制與使用者三部分（如圖一）。



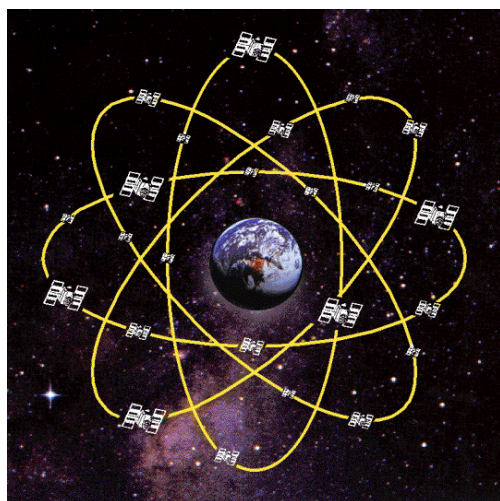
資料來源：陳國華，〈GPS 全球定位系統〉《國立臺北大學不動產與城鄉環境學系教學投影片》。

一、衛星部分

全系統共計 24 顆衛星，平均分布在距地面高度約 11,000 英里之六個橢圓

形軌道上，每個軌道面互成 55 度角，每顆衛星在軌道上之運行周期為 12 小時（如圖二）。此設計可使地球上任何地點、任何時間至少都能同時收到 4 顆衛星之直射信號，有時可能同時出現 4 至 7 顆衛星運行於觀測者的地平面上，使用者可選擇其中 4 顆衛星接收定位信號，俾獲得最精確之導航資料。¹

圖二 GPS 衛星軌道與分布示意



資料來源：陳國華，〈GPS 全球定位系統〉《國立臺北大學不動產與城鄉環境學系教學投影片》。

二、控制部分

依工作性質 GPS 系統區分下列三種控制站：

（一）監測站（Monitor Station）

目前在阿拉斯加、關島、夏威夷與加州范登堡設有四個監測站，當衛星進入其測量範圍時，各站將觀測該衛星之運行位置與時間，並進行追蹤直至衛星脫離視線為止。

（二）主控站（Master Control Station）

設於加州范登堡空軍基地，係將各監測站所測得衛星（與各站）之距離資料，蒐集並轉換成新導航信號，再傳送至地面控制站。

（三）地面控制站（Ground Control Station）

附設於主控站內，將來自於主控站之導航信號，以每日為基準，向太空發射輸入各衛星之記憶單元。主要目的在使各衛星「運行位置之推算」與「計時誤差」保持在精度範圍內，即使資料無法上傳，系統仍能維持

¹ 何志宏、黃思芬著，〈全球衛星定位系統（GPS）在公路行車路線導引系統中之研究〉《1992 年遙測與地理資訊系統應用研討會論文集》（臺中市），國立中興大學土木工程學研究所，民國 81 年 4 月，頁 516。

數日正常操作。

三、使用者部分

典型的 GPS 使用者裝備由天線、接收器、計算器（處理器）、輸入與輸出裝備等。

參、GPS 限制政策

GPS 計畫從執行之初，即受美國軍方主導與控制，美國防部投注於研究與開發之經費高達 100 多億美元，爾後為執行系統監控、調整與補強，每年至少需支付 5 億美元維護費，基於軍事與經濟之雙重考量，美國國會與國防部針對 GPS 之運用，制定了一系列政策，主要區分為保密、控制、干擾與民用政策，其制定精神為「美國軍方堅持對 GPS 行使控制權力，惟在不危害美國防安全利益之前提下，美國始鼓勵對民間開放。」。故美國以外之國家在運用 GPS 於軍事用途時，至少存在「始終受制於衛星發射國與必須依賴接收機、衛星間完整信號」兩項明顯致命傷。²基此限制與顧慮，警惕他國在軍事運用時，絕不可過分依賴。

一、保密政策

GPS 在提供測量定位、導航、速度與時間數據上之軍事價值，儼如一把「雙刃劍」，其可提供我方戰略與戰術上勝過對手之優勢，相對而言，敵方亦可能運用之。此為美國防部所不樂見，致基於安全考量，對 GPS 制定了相對應之保密政策，包括：「標準定位服務」、「精確定位服務」、「選擇性使用」與「反欺騙」等。

（一）「標準定位服務」與「精確定位服務」

GPS 本質上是一種軍用系統，基於軍事優勢之考量，美國國防部刻意在 GPS 系統中區分「標準定位服務」（SPS）與「精確定位服務」（PPS）兩種不同等級之定位服務，俾限制其他國家軍事使用。³

1. 標準定位服務（SPS）

「標準定位服務」（Standard Positioning Service, SPS）直接免費提供一般民間商業與科學等之應用，在 GPS 兩種（L1、L2）載波信號中僅由 L1 頻率傳送，任何使用者皆可利用接收機之 C/A 碼（Clear/Acquisition Code）進入，取得定位相關數據（如圖三）。由於近期發射之導航衛星

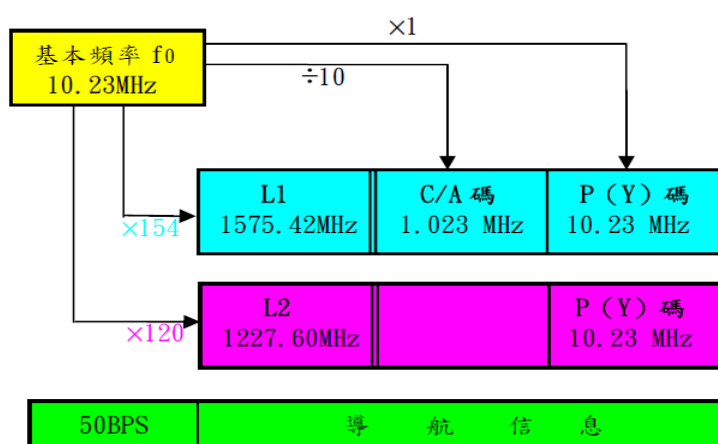
² 柯星，〈圍繞 GPS 應用的控制與反控制〉《現代軍事》（香港），現代軍事雜誌社，1994 年 6 月，頁 25。

³ 許國楨，〈GPS—現代武器系統作戰效能倍增器〉《現代軍事》（香港），現代軍事雜誌社，1994 年 6 月，頁 21。

中，皆附有使信號失真之電子干擾，致 C/A 碼接收機獲得偏離實際位置之信號。目前國軍「愛國者」與「復仇者」飛彈系統所配備之「精確輕型 GPS 接收機」(PLGR+96，如圖四)，以及戰、技術射擊指揮系統配發觀測人員之 GARMIN-60CS (如圖五)，即屬「標準定位服務」。

1998 年，GPS 基於現代化之民用目標，美國前副總統高爾宣布第二個民用信號電碼將加入 L2，使民用者能有一更安全定位系統。此外，第三個特別為民用所設計之 L5 於 1999 年元月確定，其 1176.45Mhz 頻率於 2005 年加入 GPS 定位服務 (如圖六)。⁴

圖三 GPS 衛星信號示意



資料來源：陳文豐，〈全球定位系統之單點定位〉《測量學術發表會專輯》(臺中市)，第 30 輯，民國 91 年 9 月，頁 150。

圖四 國軍「愛國者」與「復仇者」飛彈系統所使用之「精確輕型 GPS 接收機」(PLGR+96)



資料來源：作者自製

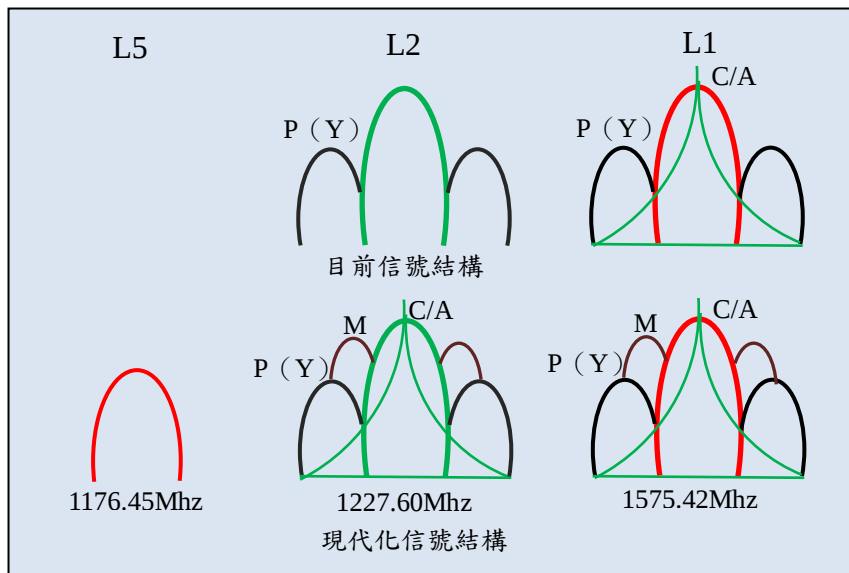
⁴陳文豐，〈全球定位系統之單點定位〉《測量學術發表會專輯》(臺中市)，第 30 輯，民國 91 年 9 月，頁 154。
第 5 頁，共 24 頁

圖五 砲兵觀測人員配發之 GARMIN-60CS



資料來源：作者自製

圖六 GPS 目前與現代化信號結構



資料來源：陳文豐，〈全球定位系統之單點定位〉《測量學術發表會專輯》（臺中市），第 30 輯，民國 91 年 9 月，頁 150。

2.精確定位服務（PPS）

「精確定位服務」（Precise Positioning Service，PPS）使用 P（Precision Code）碼傳送，因 L1、L2 載波均調制 P 碼，接收機可經由雙頻觀測進行電離層折射改正，因而獲得較高之定位精度（平均之平面定位與標高精度約 10 公尺）。PPS 專門為提供美國軍方與經過授權使用者所設計，並防止敵方對 GPS 不當使用，以確保美國與盟軍之優勢。

（二）選擇使用性（SA）

美國防部設計 GPS 初衷，即不希望「標準定位服務」（SPS）之精度優於 100 公尺。惟民用 C/A 碼接收機定位精度通常可達到 20 至 40 公尺，足夠滿足軍事使用之需求。1990 年 3 月美國防部為確保精確、即時之 GPS 數據僅能使用於經過核准之用戶，開始啟用「選擇使用性」（Selective Availability，SA），在衛星發射軌道與時間資料中加入些許誤差，企圖藉此降低 SPS 之精度，經過 SA 處理過之信息，可使 SPS 其 95% 的精度重返 100 公尺範圍，高度、速度與時間分別劣化至 150 公尺、0.3 公尺/秒與 50 奈秒（ns），亦強調從國家安全利益出發，軍方保持隨時施加 SA 之權利。⁵

1.SA 於 1990 年 3 月開始啟用，惟第一次波灣戰爭期間，美國為使聯軍緊急部署之 C/A 碼接收機可獲得較佳之定位精度，暫時關閉 SA。1991 年 11 月波灣戰後，再度開啟。目前 SA 暫訂精度為 200 公尺，最大可使 C/A 碼接收機之誤差達到 4,000 公尺。

2.2000 年 5 月美國前總統柯林頓下令關閉 SA，使 SPS 定位精度通常優於 10 公尺。惟保守估計，在「95 % 的圓形公算偏差」（95%，CEP）平面定位精度約為 22 公尺，標高精度則為 33 公尺（有 SA 與無 SA 效應之 GPS 誤差分析，如表一）。⁶

（三）反欺騙（A-S）

1993 年美國防部「反欺騙」（Anti-Spoofing，A-S）措施啟用，將 P 碼加密成 Y 碼，目的在防止友軍遭敵方發送之假 GPS 信號所欺騙。因加密方式係使用一種無規律之時間變量，故難以解密。除非接收機裝置「保密鍵」，否則無法解讀加密之 P/Y 碼。

1.新一代的 Block II 衛星已具備反欺騙能力，當 1993 年 GPS 進入全面運作

⁵ 同註 3，頁 21-23。

⁶ 同註 4，頁 155。

後，將成為永久性之措施。

2.未來以防衛為導向之 GPS 現代化，則在原本 L1 與 L2 頻率上，再提供一個新的 M「軍事電碼」(Military Code, M-code)，以提供信號加密保護。另基於軍事上較高信號功率之需求，M 碼將比現行的 P (Y) 碼大上 1 百倍 (20dBW)，俾使美國及其盟邦具有更強之 GPS 信號反干擾能力，同時確保全球軍事行動的安全。⁷M 碼目前精度約 6 公尺，仍須視接收衛星數與信號強度而定。⁸

表一 標準定位服務時，有 SA 與無SA 效應之GPS 誤差分析

誤 差 來 源		標 準 定 位 服 務	
		有 S A 效 應	無 S A 效 應
選擇使用性 (S A)		24.0公尺	0.0公尺
大 氣 效 應	電離層傳播延遲	7.0公尺	7.0公尺
	對流層傳播延遲	2.0公尺	0.2公尺
時 錶 與 星 曆 誤 差		2.3公尺	2.3公尺
接 收 機 雜 訊		0.6公尺	0.6公尺
多 路 徑 效 應		1.5公尺	1.5公尺
使用者等量距離誤差		1.2公尺	1.2公尺
平面精度因子 (HDOP)		1.2公尺	1.2公尺
單機平面精度 (CEP, 95%)		75.0公尺	22.5公尺

資料來源：陳文豐，〈全球定位系統之單點定位〉《測量學術發表會專輯》(臺中市)，第 30 輯，民國 91 年 9 月，頁 155。

二、控制政策

美國軍方一向堅持對 GPS 控制為合法措施，亦聲稱即使至 21 世紀，國防部仍是 GPS 的管理者。特對 GPS 接收機制定分類計畫，加強出口管制，尤其是 GPS 天線技術之控制。1993 年 6 月美國成立國防部與運輸部聯合特別工作小組，對 GPS 之運用展開聯合評審，該小組建議仍由國防部繼續維護 GPS 正常運作，運輸部則承擔開發「差分 GPS」(Differential GPS, DGPS) 之任務，且軍方有權對某些民用 GPS 技術進行檢查。1993 年 7 月起，GPS 將在軍用、民用之間區分成「初始工作能力」與「全部工作能力」，前者在規範 SPS 等級，後者則針對經核准之軍事用戶，美國防部

⁷ 同註 4，頁 155。

⁸ Mr.Scott McClellan, "GET A GRID Excellence in Precision Targeting," Fires (OK), March-April, 2013, p27.

企圖透過此種劃分進一步控制 GPS 技術，使其無法向未經核准之軍事用戶擴散。⁹

三、干擾政策

如同所有的軍、民兩用技術一般，GPS 之商業價值極大，向全球擴散之危險性亦高。美國防部情報部門發現中共、伊朗、印度、北韓之軍事科技人員，將 GPS 技術運用於新一代導引飛彈。既然嚴格控制 GPS 運用領域已日形困難，美國軍方將使用「干擾」進行制壓，列入考慮之手段包括：關閉 GPS 衛星、關閉或干擾差分台與施放電子干擾等。¹⁰

四、民用政策

1991 年 9 月美國政府代表在國際民航組織會議上宣布：美國政府將從 1993 年起至少 10 年，向全球民航提供「有限精度」之全球導航服務，且不向用戶收取任何費用。2000 年 5 月，美國前總統柯林頓下令關閉 SA，惟強調「當美國安全遭受威脅時，國防部將保留關閉部分區域 GPS 信號之權利。」¹¹此舉無形中激勵全球運用 GPS 風潮，惟在高度擴張之際，軍事使用者仍不可忽視隱藏背後「受制於人」之危機。

肆、衛星測量、單點定位與 DGPS

GPS 係以空間為基礎之導航系統，在全球各地可全天候提供陸地、海上與空中高精度之三維位置、速度與時間等信號（如圖七）。惟三維位置之決定，由於儀器性能與作業方法不同，區分為高精度之「衛星測量」、精度有限的「單點定位」與「差分 GPS」（DGPS）。基於「衛星測量」精度可高於五萬分之一，「單點定位」可能出現數十公尺之誤差，「DGPS」則需參考站與相關之數據通信設備始可到達 2 至 5 公尺精度，鑑於三者定位結果相去甚遠，使用者應有所認知。

一、衛星測量

GPS 衛星測量乃是利用接收機收錄得之衛星信號（電碼或載波相位）及衛星之時間關係，並將錄得信號轉換為距離觀測量，以「空間後方交會法」¹²定出接收機之點位座標及其他相關未知數之測量技術（如圖八）。¹³衛星測

⁹ 同註 2，頁 26。

¹⁰ 同註 2，頁 26。

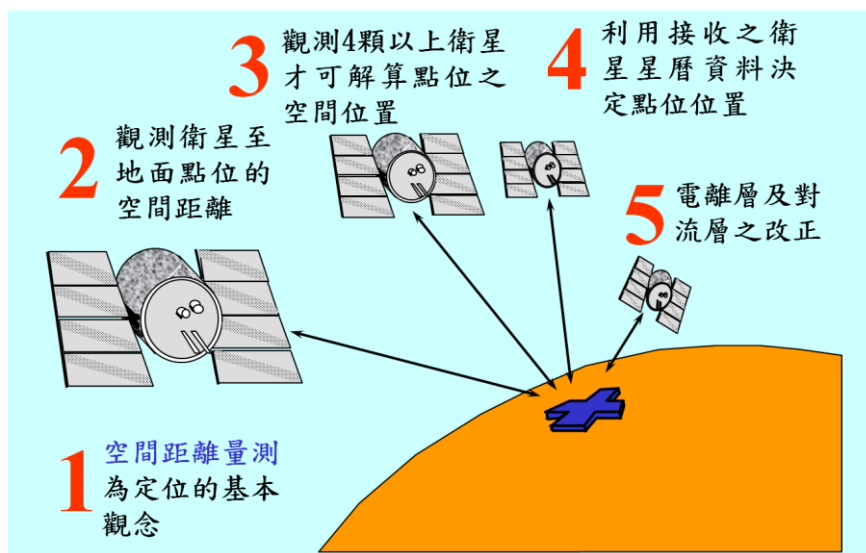
¹¹ 華盛頓外電報導，〈柯林頓下令軍方解除 GPS 精確通訊管制〉《聯合報》（台北市），民國 89 年 5 月 1 日。

¹² 「空間後方交會法」係 GPS 接收機於某點同時接收 3 顆衛星信號，等於在空間測得 3 段距離（信號時間×光速），再由 3 顆已知衛星點按空間距離交會法，即可計算出接收機座標；如接收 4 顆衛星信號，另可計算標高。

¹³ 周龍章等，〈GPS 衛星測量重點規範研議〉《第一屆 GPS 衛星定位技術研討會論文集》（臺南市），國立成功大學，民國 83 年 3 月，頁 211。

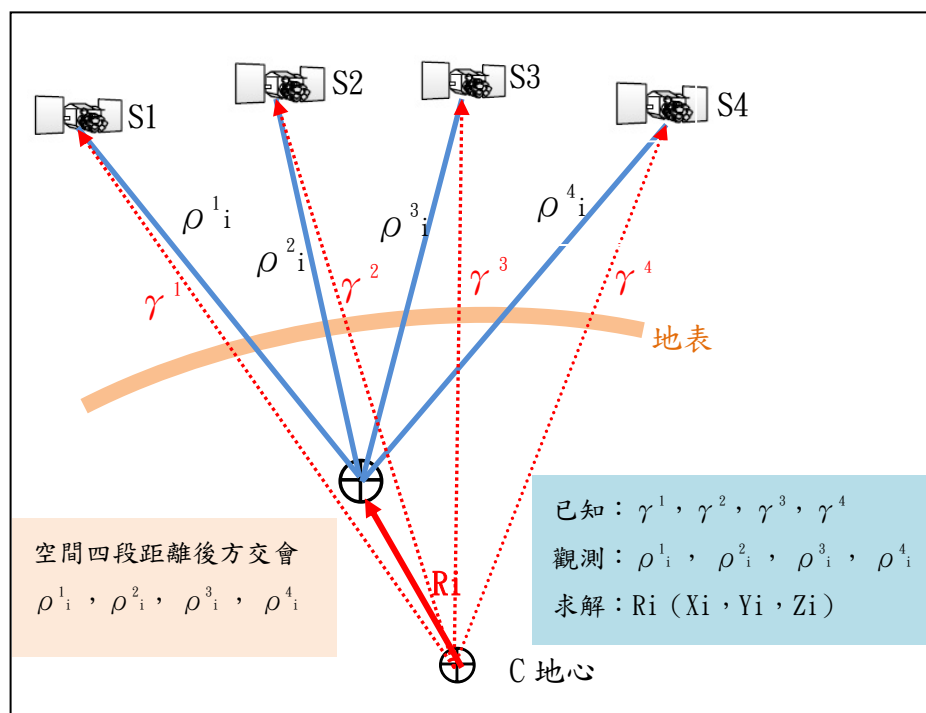
量通常用於「控制測量」(如圖九)，按「接收機在點位上停留測量之時間長短」來區分，其作業方法、觀測時間、測量精度與器材性能，均不相同(如表二)。¹⁴目前美軍僅陸戰隊砲兵依據其特殊需求編制 Trimble 4000MSGR 衛星測量儀，遂行衛星測量。

圖七 GPS 定位程序示意



資料來源：陳國華，〈GPS 全球定位系統〉，《國立臺北大學不動產與城鄉環境學系教學投影片》。

圖八 空間後方交會法示意



資料來源：作者自製

¹⁴同註 13，頁 214。

圖九 利用 GPS 衛星測量建立控制點



資料來源：[Trimble Navigation Geodetic Surveyor Technical Specifications](#),
(North America: Trimble Navigation Limited Land Survey Systems Division,
6/1997)。

表二 衛星測量方法、觀測時間與精度對照

測量方法	觀測時間	精度	儀器性能
靜態	至少需要 1 小時，常採用 24 小時之持續觀測。	百萬分之一至千萬分之一 (1-0.1ppm)	單、雙頻均可
快速靜態	需 5 至 15 分鐘，視基線長短與衛星幾何分布狀況而定	十萬分之一至百萬分之一 (10-1ppm)	須雙頻 L1 與 L2 整波長
虛擬靜態	須重複擺站兩次，間隔 1 小時，每次 3 至 5 分鐘。	五萬分之一至五十萬分之一 (20-2ppm)	單頻
半動態	可短於 10 秒鐘	十萬分之一至五十萬分之一 (10-2ppm)	單頻
純動態	5 秒鐘以內	五萬分之一至五十萬分之一 (20-2ppm)	須有通信設備

資料來源：周龍章等，〈GPS 衛星測量重點規範研議〉《第一屆 GPS 衛星定位技術研討會論文集》（臺南市），國立成功大學，民國 83 年 3 月，頁 214。

二、單點定位

GPS 衛星提供不同之觀測量，當使用電碼距離為觀測量，應用於即時導航定位時，因僅採單一觀測站（測站）接收信號獲得定位結果，稱之為「單點定位」或「絕對定位」（Absolute Positioning）或「導航定位」

(Navigation Positioning)，因此單點定位是直接確定觀測站相對於座標系原點（地球質心）絕對座標之一種定位方法。¹⁵目前國軍「愛國者」與「復仇者」飛彈系統所配備之「精確輕型 GPS 接收機」(PLGR+96)，以及戰、技術射擊指揮系統配發觀測人員之 GARMIN-60CS，即屬「單點定位」裝備。

GPS 取消 SA 效應之後，單點定位通常精度優於 10 公尺，惟就衛星追蹤站實際觀測資料計算得知，即使設置於對空通視良好，遠離其他電磁波且近距離內無反射體之衛星追蹤站（如陽明山、北港、墾丁、太麻里、鳳林等五處），¹⁶其單點定位誤差仍會出現超過 30 公尺或甚至 115 公尺之大誤差；¹⁷如使用於接收條件較差之觀測所、砲陣地等，誤差將更為可觀。影響 GPS 單點即時定位精度之原因甚多，主要原因列舉如後：

（一）衛星星曆誤差

GPS 控制部分在確定與預報衛星軌道過程中，基於監測站座標誤差、定軌模型與程式不夠完善、大氣延遲改正模型誤差、測量噪音以及對影響衛星運動之各項攝動因素變化規律掌握不全等因素，致所得廣播星曆中產生不可避免之誤差。SA 效應啟用後，廣播星曆中又加入大量人為誤差，致精度更大幅下降。在「空間後方（距離）交會」中衛星星曆誤差屬於起始數據誤差，將影響定位結果，影響方式與程度取決於使用者與 GPS 衛星間所構成之空間幾何圖形。¹⁸

（二）電離層延遲

電離層為高度 50 至 1000 公里間之大氣層，在陽光作用下，電離層中部分氣體分子被電離形成自由電子與正離子，無線電信號通過電離層時傳播速度將發生變化，因而傳播時間（ Δt ）與真空中光速（C）所求得之距離，與真正幾何距離間產生差異，即為「電離層延遲」。利用雙頻 GPS 接收機可消除電離層延遲，¹⁹惟輕便廉價的單頻 GPS 接收機，消除效果

¹⁵ 同註 4，頁 150。

¹⁶ 內政部以 82-83 年度分別於金門、陽明山、鳳林、北港、太麻里、墾丁、馬祖、東沙設置八個衛星追蹤站為基礎，爾後依空間分布之均勻性，並可持續分析觀測資料之原則，增選成功、成功大學、宜蘭、竹南、高雄港、埔里、臺中港、外坵、武陵及霧鹿等 10 站，合計選取 18 站。全天候 24 小時連續不斷接收衛星資訊，經由與國際追蹤站聯測解算可精確求得 18 衛星追蹤站絕對座標，作為各等級衛星控制點測量之依據。〈內政部衛星追蹤站及衛星控制點測量成果說明〉，〈公告內政部大地基準及一九九一坐標系統 2010 年成果〉，《內政部公告》，（臺北市：臺內地字第 1010137288 號，民 101 年 3 月 30 日），頁 3。

¹⁷ 同註 4，頁 158。

¹⁸ 洪本善，〈差分 GPS 定位原理概述〉《測量技術通報第 98 期》（臺中市），測量技術通報出版委員會，民國 85 年 6 月，頁 98。

¹⁹ 同註 18，頁 99。

不彰。

（三）對流層延遲

對流層係高度在 45 公里以下較稠密之大氣層，無線電信號在對流層之傳播速度（ V ），取決於大氣折射率（ n ），兩者關係式： $V=C/n$ ，其中 C 為真空中之光速。在標準大氣狀下 n 為 1.0002876，惟 n 隨氣溫、氣壓與相對濕度而變化。因此依據信號傳遞時間（ Δt ）與真空中之光速（ C ）所求得距離與真正幾何距離之間將有所差異，此原因引起之誤差稱之為「對流層延遲」。雖然較電離層延遲小，惟因靠近地面，大氣狀態受地形、地貌、植被與人類活動之影響更為顯著，變化更為複雜。對流層延遲雖可依據測站上量測之氣象元素採用改正模型方式計算，惟多數接收機僅採簡略方法計算，因而造成重大誤差。²⁰

（四）時錶與星曆誤差

GPS 接收機大多配備石英鐘（時錶），其穩定性較差。衛星雖配備穩定性極高之銨或鉀原子鐘，惟在 SA 效應下，原子鐘頻信號已加入誤差，且誤差將迅速變化，致對廣大使用者產生較大的時錶誤差，如無法精確決定，將影響「虛擬距離」（Pseudo range）²¹觀測值之精度。

（五）多路徑效應誤差

GPS 接收機收到 GPS 信號經由建築物、水面或其他反射物表面反射抵達接收機之干擾信號，經反射之信號路徑增長了其虛擬距離存在系統誤差，致定位結果不精確。「多路徑效應」（Multipath effect）為 GPS 測量中干擾測量品質主要原因之一，類似回聲現象，在接收機收到眾衛星直接發射信號之同時，亦接收到其他物體反射之衛星信號。多路徑效應僅可減弱，目前無法消除。

三、差分 GPS（DGPS）

造成 C/A 碼 GPS 接收機單點定位之各種誤差，整體上皆具備較好之空間相關性，亦即對於相距有限之測站而言，前述誤差造成之影響大致相同。DGPS 係在精確已知位置上設置 GPS 接收機（基站），並與其他使用者同時進行 GPS 觀測，即可求得每一觀測瞬間各種誤差造成之影響。如將 GPS 定位結果，與已知位置比較，即可求得各種誤差對其座標之影響，再將此偏差值透過無線

²⁰ 同註 18，頁 99。

²¹ GPS 接收機利用本身所產生之 GPS 複製電碼，與其所接收之 GPS 衛星信號電碼進行相關性比對而得到時間延遲，再將其乘以光速，即得虛擬距離。惟虛擬距離並非真實的衛星距接收機之直線距離，而是包含了衛星與接收機兩個時錶讀取之差值，以及傳播信號通過大氣層受對流層與電離層之影響。陳文豐，〈全球定位系統之單點定位〉《測量學術發表會專輯》（臺中市），第 30 輯，民國 91 年 9 月，頁 151。

電傳輸，即刻提供附近其他使用者之接收機進行改正，將可提高定位精度。利用 DGPS 定位技術可將使用者之即時定位精度由原本的 100 公尺範圍（SA 效應下），縮小至 2 至 5 公尺以內。DGPS 大致可區分為單基站 DGPS、多個基站之局部區域 DGPS 與廣域 DGPS。目前我國所開發應用皆為單站 DGPS，優點為結構與計算皆簡單，技術亦成熟。惟精度隨使用者與基站間距離增加而迅速降低，且使用者僅依據一個基站所提供之改正信號，致精度與可靠性較差。²²

伍、GPS 之弱點

GPS 因具備龐大商業利益，致相關業者對其優點（如表三）過分強調，弱點則甚少著墨，且在未經戰場驗證下，易誤導軍事使用者。美軍砲兵於 1991 年即開始使用 GPS 接收機，歷經沙漠風暴、阿富汗、科索沃與伊拉克自由作戰等戰爭，深感 GPS 之運用雖日趨廣泛，仍存在諸多問題。尤當 2000 年美國前總統柯林頓解除 SA 效應後，如何提升 GPS 運用安全與技術，充分掌握作戰優勢，成為美軍亟需解決之問題。就其戰場運用經驗歸納 GPS 之弱點如下：

一、信號干擾

GPS 架構類似目前普及化的行動電話，由衛星（基地台）、地面控制站（網路資料處理中心）、接收機（手機）等組成，故 GPS 具備行動電話類似的優點與弱點，其中對干擾極為敏感為首要弱點，其次則為信號衰減。GPS 工作所需之衛星信號強度，如同將 100 瓦燈泡光源放射至 300 英里遠，因此到達 GPS 接收機之信號強度，甚至比 1 瓦低功率干擾機所產生之信號還弱。目前功率 1 瓦的 GPS 干擾機，在無遮蔽狀況下，至少可使 12 英里範圍內之 C/A 碼接收機失效。當衛星頻率公布與開放後，僅數百美元即可製造廉價且有效之干擾裝置。事實上，所有合格之 GPS 製造商，皆有能力研發與銷售 GPS 干擾裝置。

- （一）2000 年的俄羅斯航太展中，Aviaconversia 公司即公開展示一種 4 瓦功率之 GPS 干擾機，可干擾 200 海浬半徑之 GPS 信號，且此裝置價格低廉僅需 4,000 美金，目前已升級至第四版且功率增強至 8 瓦。據調查，尚有數個國家在公開市場販售干擾裝置，此種外型類似「雀巢」（Nestea）易開罐，內藏 1 瓦功率之干擾器，影響距離達 20 至 40 英里，可輕易散佈戰場，妨礙美軍使用 GPS。²³

²² 同註 18，頁 104。

²³ Chief Warrant Officer Three W. Mark Brans, "Artillery Surveyors Nomads of Battlefield," Field 第 14 頁，共 24 頁

表三 業者過度強調 GPS 之優點

項次	G P S 業者宣傳之優點	備考
1	精確定位	
2	24 小時全天候服務	
3	無使用者數目限制	
4	即時定位服務	
5	全球覆蓋	
5	無需付費	
6	定位精度不受天候、地形限制	

資料來源：作者自製

- (二) 2001 年 3 月美伊戰爭期間，美國務院抗議俄羅斯航空轉換公司在開戰前將干擾戰機與炸彈上 GPS 系統之裝置售予伊拉克。美國政府指控俄羅斯技師在巴格達建立複雜之 GPS 干擾系統，並協助其操作，以類似「蓋台」進行干擾，即利用與美軍 GPS 同頻率之電波，蓋過衛星發射之定位電碼，使利用 GPS 導引之精準武器產生誤差而錯失目標，²⁴其影響層面甚至涵蓋其他使用 GPS 之地面部隊。
- (三) 1994 年中共鑑於絕大多數之衛星導航軍民運用範疇，皆建立在美國 GPS 之上。一旦發生戰爭，美國關閉 GPS 或加大「標準定位服務」(SPS) 誤差，對中共影響甚鉅，致其未雨綢繆發展自主之「北斗衛星導航系統」，同時研發攻擊衛星相關技術²⁵與北斗、GPS 之雙模系統。國軍目前尚無攻擊北斗系統能力，僅能以干擾方式反制。惟干擾北斗系統時，GPS 即可接替；²⁶如干擾 GPS，則同時影響國軍使用。

二、信號欺騙

欺騙手段係將先側錄之 GPS 信號，間隔若干時間後再以較高功率播放，造成定位錯誤，且因偽冒與錯誤之舊信號以高功率播放，致使用者接收機無法察覺。目前軍用 GPS 在製造時雖已先行加密，惟欺騙技術已顯著提升，仍對砲兵定位造成威脅。據瞭解，國際上某些軍事工業正致力於欺騙軍用 GPS 接收機相關技

Artillery (Fort Sill, OK) (1-2/2001), p44.

²⁴ 忠頻，〈反制中共「北斗」衛星導航系統〉《軍事家》(臺北市)，197 期，軍事家出版社，2001 年 1 月，頁 91。

²⁵ 《中華民國九十八年四年期國防總檢討》，(臺北市：國防部，2009 年)，頁 23-24。

²⁶ 同註 24，頁 91。

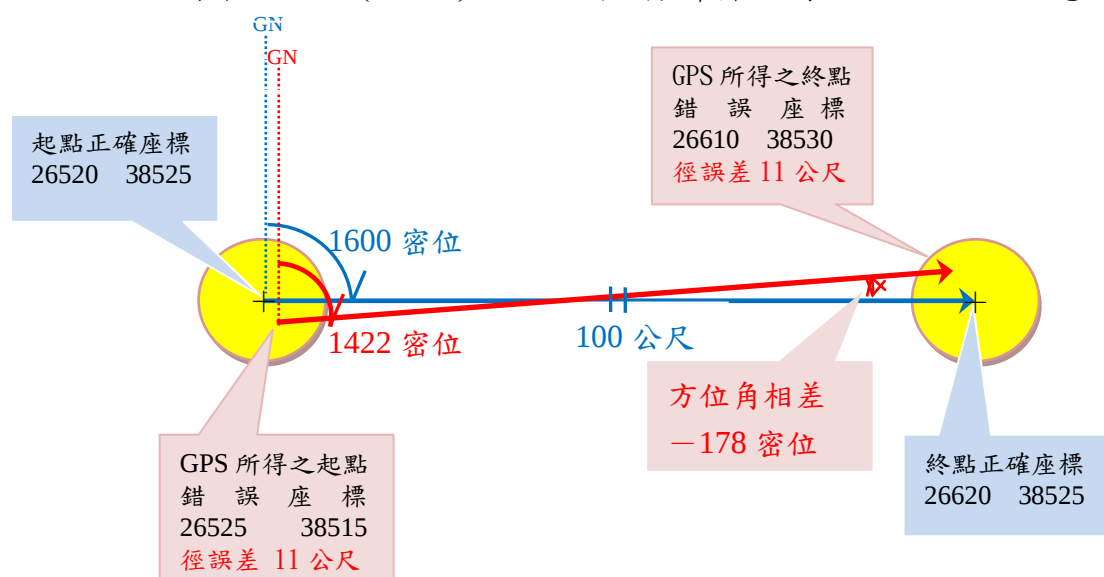
三、信號遮蔽

使用 GPS 時，接收機與衛星間須確保通視。如接近濃密樹葉、建築物、峽谷、載具等可能遮蔽衛星信號之物體，致衛星可用數少於 4 顆或幾何分布不佳時，將嚴重影響定位精度。

四、無法定向

基於 GPS 定位所得之點位座標，存在若干（並非常數）誤差，如以兩點座標方式計算地線方位，將產生不正確之結果（如圖十）。依據美國砲校射擊組測地小組 2003 年之研究報告，證實使用「精確輕型 GPS 接收機」（PLGR）決定之方位甚難達到穩定狀態，其誤差範圍通常在 0.7 至 50 密位之間，²⁸致美軍絕不允許以 PLGR 決定射向或設置方位，測地人員應使用方位精度符合 ± 0.4 密位之「定位定向系統」（PADS）決定（美軍管式砲兵、多管火箭與目標獲得裝備標準位置精度需求，如表四）。

圖十 GPS（PLGR）以兩點座標計算地線方位之誤差示意



資料來源：作者自製

²⁷ 同註 23，p44。

²⁸ AN/PSN-11 Precision Lightweight GPS Receiver (PLGR) Used for Artillery Positioning— White Paper ATSF-GC, (Fort Sill, OK: US Army Artillery School, 2/2003), P1.

表四 美軍管式砲兵、多管火箭與目標獲得裝備標準位置精度需求

精度 項目 區分	座 標 公尺 (CEP)	標 高 公尺 (PE)	方 位 密位 (PE)
105 牽引榴砲	17.5	10	0.4
155 牽引榴砲	17.5	10	0.4
155 自走榴砲	17.5	10	0.4
多管火箭系統 (MLRS)	20	10	1
戰場火力支援與打擊偵察組 (BFIST/Striker)	30	20	2
反迫砲雷達 (AN/TPQ-36)	10	10	0.4
反砲兵雷達 (AN/TPQ-37/AN/TPQ-47)	10	10	0.4
活動目標定位雷達 (AN/TPS-25A, AN/TPS-58B)	43.7	10	3
氣象探測系統 (MMS)	114	10	9

資料來源：AN/PSN-11 Precision Lightweight GPS Receiver (PLGR) Used for Artillery Positioning— White Paper ATSF-GC, (Fort Sill, OK: US Army Artillery School, 2/2003), P2.

陸、GPS 與定位定向系統分析比較

「全球定位系統」(GPS) 與「定位定向系統」(ULISS-30、SPAN-7) 皆具備定位功能，前者配賦於砲兵觀測組，後者則為測地之主要裝備。基於 GPS 簡便、低廉與普及化等優點，致部分砲兵幹部忽視其弱點，甚至誤認可取代「定位定向系統」。特將兩種裝備逐項分析比較（如表五），俾供參考。

一、就工作原理而言

GPS 係以衛星為基礎之無線電導航系統，須依賴 4 顆以上 GPS 衛星信號行「空間後方交會」，決定接收機位置。其工作原理基於衛星導航與「無線電導航」²⁹之組合，因人造衛星可嚴格依據已知軌道規律運動，亦能在任何瞬間精確計算其在空間之位置，如能測出（電波觀測）衛星與用戶間相對位置，即可完成導航與定位任務。就原理而言，GPS 與無線電導航相同，差別為 GPS 將「地面送訊局」移至衛星上，形成一個活動的空中發射網路。³⁰

²⁹ 無線電導航係由地面設置若干送訊局，藉測量三個局以上送訊抵達時間差，來決定船舶或航機位置。無線電導航為 1950 年之前常用方法，區分：LORAN、VOR、DME、TACAN（泰康）、Doppler（都卜勒）、OMEGA。

³⁰ 同註 3，頁 20。

「定位定向系統」則屬「慣性導航系統」(Inertial Navigation System, INS)，係當前唯一自我包容式、獨立源可提供所有導航資料（包括位置、速度、姿態與航向等），³¹實與 GPS 工作原理差異甚大。「慣性導航系統」須具備由基本感測元件「陀螺儀」(Gyros)、「加速儀」(Accelerometers) 所組成之「慣性平臺」(穩定參考平臺) 與電腦。³²陀螺儀可在慣性空間中維持一固定角度，使慣性平臺保持水平，俾利加速儀測量三軸加速度。而陀螺儀與電腦所產生之信號，除提供慣性平臺之加速儀保持相對於地球表面之水平外，更利於加速儀精確測量載具加速度，並經由電腦將加速度二次積分後，獲得精確之導航資料。目前國軍砲兵兩型定位定向系統分別使用不同的陀螺儀，ULISS-30 使用 2 個傳統「機械陀螺儀」(如圖十一)，SPAN-7 則使用 3 個「光纖陀螺儀」(FOG)。

表五 GPS 與「定位定向系統」綜合比較

比較 項目	區分	全 球 定 位 系 統 (GARMIN-60CS)	定 位 定 向 系 統 (ULISS-30、SPAN-7)
工 作 原 理		以衛星為基礎之無線電導航系統	利用慣性原理之慣性導航(測量)系統
裝 備 組 成		衛星、地面控制站與使用者接收機	慣性測量儀、控制顯示器、電源供應器為主，SPAN-7 增加：載具移動感測器、RTK 天線模組。
自 主 性		受美國防部管理與控制	完全獨立自主，無環境與人為干擾顧慮
定 位 (單 點) 定 向 精 度		定位：通常<10 公尺 最大 115 公尺 定向：0.7 至 50 密位	定位：<7 公尺 定向：<1 密位
系 統 功 能		定位	定位、定向、俯仰角、側傾角、航向角
投 資 效 益		價格數萬元，惟戰時使用能力堪虞	價格千萬元，使用能力不受平、戰時限制
發 展 趨 勢		內建至慣性導航系統，成為 GPS/INS 之輔助裝備	內建 GPS 晶片，成為 GPS/INS 整合系統之主體
美軍運用方式		測地輔助裝備	測地主要裝備

資料來源：作者自製

³¹ 黃國興，《慣性導航系統原理與應用》(臺北市：全華科技圖書股份有限公司，民國 80 年 6 月)，頁 3。

³² 同註 31，頁 5、9。

圖十一 ULISS-30 之慣性平台與電腦



資料來源：作者自製

二、就裝備組成而言

GPS 架構主要包括衛星、控制站與使用者接收機三部分，於計畫執行之初，即受美國防部管理與控制。「定位定向系統」(ULISS-30、SPAN-7)則區分為純慣性與慣性整合系統，裝備組成分述如下：

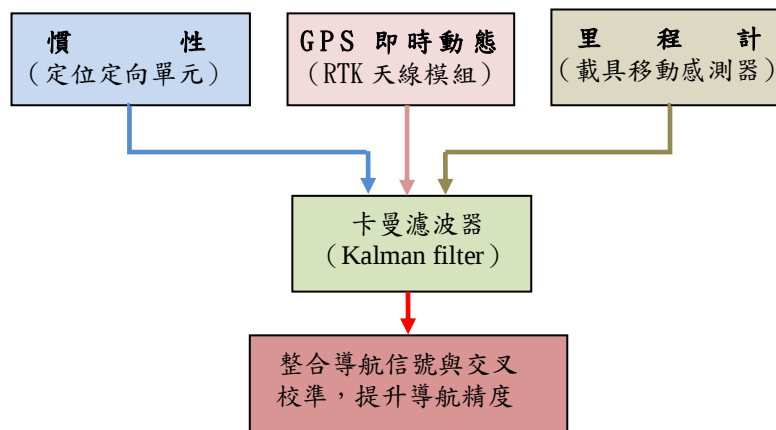
(一) ULISS-30

組成包括：慣性測量儀、控制顯示器與電源供應器，無其他輔助裝備，完全獨立自主，屬「純慣性」系統。

(二) SPAN-7

組成包括：定位定向單元(慣性)、控制顯示與電腦單元、電池與充電單元、載具移動感測器、RTK 天線模組(GPS)等，為涵蓋「慣性」、「GPS 即時動態」(RTK)與「里程計」(Odometer)等三種感測器之「慣性整合系統」。惟系統仍以慣性為主，藉由「卡曼濾波器」(Kalman filter)整合多重感測器之導航信號與交叉校準(如圖十二)，俾提升導航精度。即使 GPS 與(或)里程計失效，慣性系統亦可獨立作業。

圖十二 SPAN-7 系統整合技術示意



資料來源：作者自製

三、就自主性而言

「自主性」為軍事運用極重要之考慮因素。GPS 基於軍事與經濟之雙重考量，美國國會與國防部制定一系列限制政策，堅持對 GPS 行使控制權力，即使目前暫時關閉 SA，惟當美國安全遭受威脅時，美國國防部仍將保留關閉部分區域 GPS 信號之權力，且 GPS 存在「始終受制於衛星發射國與必須依賴接收機、衛星間完整信號」兩項致命傷。

就中共為例，其為擺脫美國 GPS 的箝制與自我掌控軍機與飛彈之定位精度，已自力研發「北斗衛星導航系統」，³³足以警惕國軍不可忽視「受制於人」之隱憂。另 GPS 信號易受干擾、欺騙與遮蔽，除受美國之管理與控制外，中共威脅亦難以避免，實缺乏自主性與可靠性。就本軍僅使用 GPS 導航之「中翔二號」(UAV) 為例，當 GPS 信號遭受干擾，UAV 即無法作業，僅能依據原設定路線返航。

「定位定向系統」則無需其他輔助裝備，完全自我包容，使用時無環境與人為干擾顧慮，不僅具備充分自主性，且較 GPS 擁有運用優勢。

四、就定位、定向精度而言

GPS 單點定位通常精度優於 10 公尺，惟仍會出現 30 公尺甚至 115 公尺之大誤差，且誤差以不規律之「變數」出現，致定向誤差範圍在 0.7 至 50 密位之間，其定位與定向精度皆不符合砲兵射擊需求。如觀測官再使用雷觀機決定目標位置，誤差傳播與累積將更為嚴重（如圖十三）。

³³ 同註 24，頁 86。

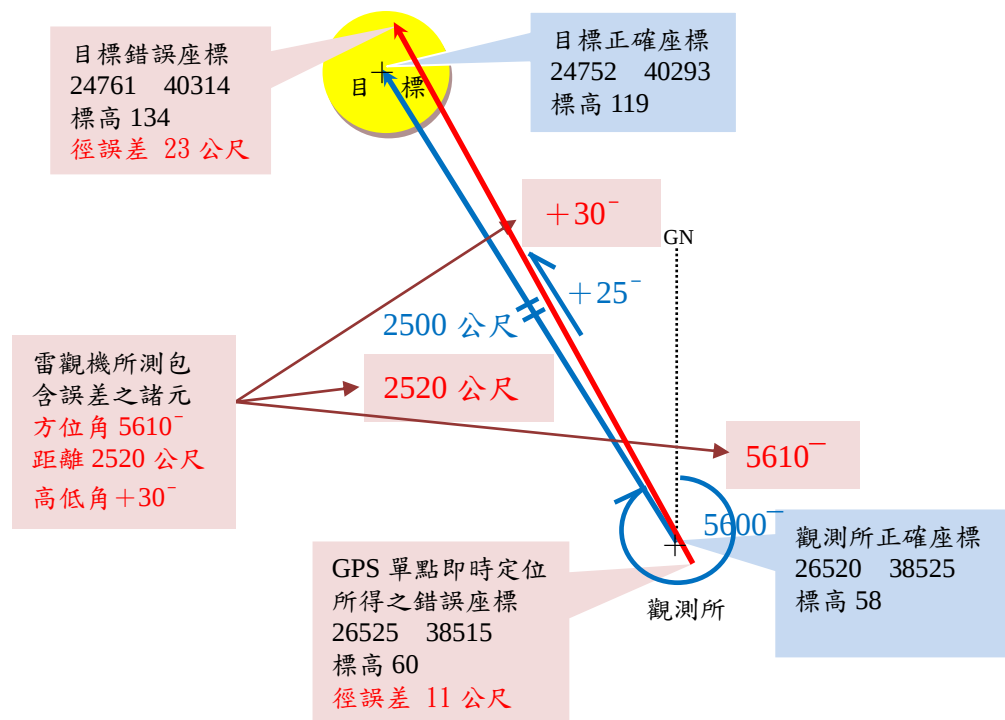
「定位定向系統」無論 ULISS-30 或 SPAN-7，座標精度皆小於 7 公尺，標高小於 3 公尺；因座標誤差呈現規律之「常數」，致方位誤差小於 1 密位，均符合砲兵測地與射擊需求（作業模式與精度對照，如表六）。

表六 「定位定向系統」作業模式與精度對照

精度 項目	區分	U L I S S - 3 0		S P A N - 7		
		零 速 更 新		零 速 更 新		GPS 輔助
		4 分鐘	10 分鐘	4 分鐘	10 分鐘	無限制
作業最大範圍		30 公里	75 公里	30 公里	75 公里	無限制
作業最大時間		2 小時	5 小時	7 小時	8 小時	無限制
座 標 (C E P)		3 公尺	7 公尺	3 公尺	7 公尺	1 公尺
標 高 (P E)		1 公尺	3 公尺	1 公尺	3 公尺	1 公尺
方 位 (P E)		0.4 密位	1 密位	0.5 密位	0.5 密位	0.3 密位
備 考		CEP 與 PE 均為 50%。				

資料來源：作者自製

圖十三 觀測所使用 GPS 定位與雷觀機決定目標位置之誤差傳播、累積示意



資料來源：作者自製

五、就系統功能而言

定位定向系統除具備定位、定向功能外，其慣性平臺亦可輸出「姿態」，包括「俯仰角」(Pitch)、「側傾角」(Roll)與「平臺航向角」(Heading Pointing)，³⁴故可安裝於武器（目標獲得）系統，提供射角、兩輪傾角與射向方位角（如雷霆 2000 火箭砲之 SIGMA-30、M109A6 自走砲之 MAPS-H）。GPS 則僅可提供定位資料，無法輸出「姿態」，功能不如定位定向系統。

六、就投資效益而言

任何軍事投資，皆以「作戰效益」為前提。投資額度即使較高，如能獲得實質效益，仍可列入考慮；反之，則投資價值堪虞。GPS 單點定位型接收機（GARMIN-60CS）基於原理、結構簡單且自主性、可靠性有限，價格僅數萬元。「定位定向系統」則屬高科技產品，價格高達千萬元，幾乎為 GPS 接收機的數百倍。當承平時期，GPS 接收機之投資報酬似乎遠高於定位定向系統，惟一旦臺海發生戰事，美國防部局部關閉 GPS 衛星或中共干擾 GPS 信號時，GPS 接收機將失去功能，具備完全自主性之定位定向系統則仍可執行測地任務，其投資效益顯而易見。

七、就發展趨勢而言

GPS 基於諸多便利性致運用日趨廣泛，惟作為資源條件之衛星、地面控制站與各類型接收機，皆受限於美國之管理與控制，且敵方亦可能實施干擾，故運用 GPS 須謀求有效之因應之道。「GPS/INS 整合系統」為先進系統之發展趨勢，其利用 GPS 與慣性導航系統（定位定向系統）兩者之「互補性」，當 GPS 信號良好時（PDOP<6），³⁵可更新整合系統之慣性資料；如 GPS 信號遭受干擾或衛星接收數低於 4 顆時，慣性導航系統仍可依據記憶或慣性資料執行任務（如國軍砲兵使用之 SPAN-7 與雷霆 2000 火箭砲之 SIGMA-30）。

當 GPS 納入不受電磁干擾之慣性導航系統後，成效極為明顯，多數製造商在組裝慣性導航系統時內建 GPS 晶片板，亦有採「混合體」(Hybrid)方式，將微型 GPS 裝置在慣性導航系統之「動態參考器」內（如美軍 M109A6 自走砲使用之 MAPS-H）。惟無論如何整合，仍以「慣性導航系統」(定位定向系統)為主體，GPS 僅為輔助裝備。

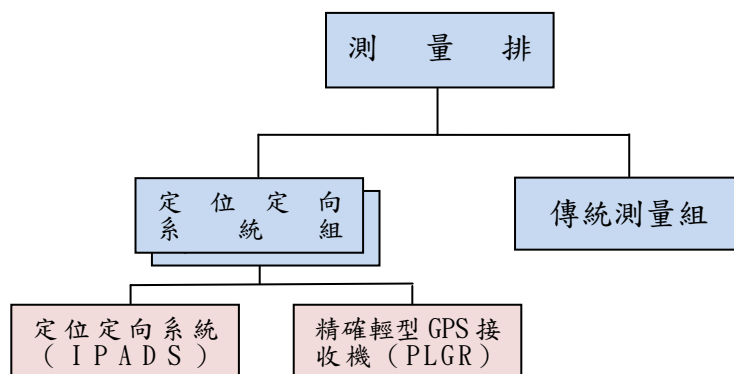
八、就美軍運用方式而言

³⁴ 同註 31，頁 24。

³⁵ PDOP 值（位置精度因子）表示統計測量三度空間位置精度之指標，受衛星分布太空之幾何位置影響。如 PDOP 值變大，表示位置誤差也變大，通常 PDOP 值應小於 6，方可獲得較佳之定位結果。

美國無疑為世界上少數擁有足夠財力與科技條件，可依據實際作戰需求研發所望戰具之國家，即使全權掌握 GPS 之管理與控制，美軍砲兵自 1981 年迄今，為確保測地任務之達成，仍堅持使用「定位定向系統」（1981 年 PADS、2008 年 IPADS）作為主要裝備（如表六）。此舉除可提供國軍砲兵借鏡外，亦充分顯示 GPS 之弱點，即使擁有系統所有權的美軍亦無法倖免。

表六 美軍 3x8 砲兵營測量排編組



資料來源：作者自製

柒、結語

1991 年第一次波灣戰爭為 GPS 重要性之分水嶺，其地位由「可有可無」的奢侈品，躍升為「不可或缺」之必需品，目前已廣泛運用於軍、民用導航、定位、測量與校時等領域。惟 GPS 之運用，始終存在「一國擁有與國際共享」之間的矛盾，任何美國以外的國家，實難以藉由 GPS 獲得預期之軍事優勢。

鑑於 GPS 之運用確實存在「受制於人」、信號易受干擾與精度不佳等弱點，警惕國軍砲兵在運用時，絕不可心存僥倖與過分依賴。測地作業仍須以自主性高、精度佳之「定位定向系統」為主，傳統測量為輔，建立測地統制或提供射擊單位符合精度需求之測地成果；當狀況緊急且 GPS 可用時，始可暫用 GPS 定位，待測地成果獲得後再迅速更新，俾確保射擊精度。

參考文獻

- 一、何志宏、黃思芬著，〈全球衛星定位系統（GPS）在公路行車路線導引系統中之研究〉《1992 年遙測與地理資訊系統應用研討會論文集》（臺中市），國立中興大學土木工程學研究所、民國 81 年 4 月。
- 二、柯星，〈圍繞 GPS 應用的控制與反控制〉《現代軍事》（香港），現代軍事雜誌社，1994 年 6 月。

- 三、許國楨，〈GPS—現代武器系統作戰效能倍增器〉《現代軍事》（香港），現代軍事雜誌社，1994 年 6 月。
- 四、陳文豐，〈全球定位系統之單點定位〉《測量學術發表會專輯》（臺中市），第 30 輯，民國 91 年 9 月。
- 五、周龍章等，〈GPS 衛星測量重點規範研議〉《第一屆 GPS 衛星定位技術研討會論文集》（臺南市），國立成功大學，民國 83 年 3 月。
- 六、洪本善，〈差分 GPS 定位原理概述〉《測量技術通報第 98 期》（臺中市），測量技術通報出版委員會，民國 85 年 6 月。
- 七、忠頻，〈反制中共「北斗」衛星導航系統〉《軍事家》（臺北市），197 期，軍事家出版社，2001 年 1 月。
- 八、《中華民國九十八年四年期國防總檢討》（臺北市：國防部，民國 98 年）。
- 九、Chief Warrant Officer Three W. Mark Brans, “Artillery Surveyors Nomads of Battlefield,” Field Artillery(Fort Sill, OK), 1-2/2001, (January, 2001)。
- 十、AN/PSN-11 Precision Lightweight GPS Receiver(PLGR)Used for Artillery Positioning— White Paper ATSF-GC, (Fort Sill, OK: US Army Artillery School, 2/2003)。
- 十一、The Army Positioning & Navigation Master Plan (Washington DC : United States Army Combined Arms Combat Developments Activity, 9/1990)。
- 十二、黃國興，《慣性導航系統原理與應用》（臺北市：全華科技圖書股份有限公司，民國 80 年 6 月）。
- 十三、Tactics, Techniques, and Procedures for FIELD ARTILLERY SURVEY (FM6-2) (Washington, DC : HEADQUARTERS DEPARTMENT OF THE ARMY, 9/1993)。
- 十四、〈公告內政部大地基準及一九九一坐標系統 2010 年成果〉《內政部公告》（臺北市），臺內地字第 1010137288 號，民 101 年 3 月 30 日。
- 十五、Mr. Scott McClellan, “GET A GRID Excellence in Precision Targeting,” Fires (Fort Sill, OK) 2013 March-April, (2013)。

作者簡介

耿國慶老師，陸軍官校正 66 年班畢業，經歷排長、測量官、連、營長、主任教官，民國 86 年退伍，現任職於砲訓部目標獲得組。