

射頻解決方案為機載平台 帶來 SWaP 的優勢

■作者：Jarrett Liner/ADI 亞德諾半導體射頻系統應用工程師

摘要

商業和防禦型機載平台 (defense airborne platform) 在很多方面都不同，商用飛機高度重視安全和系統冗餘，而防禦型平台則可能較著重於多功能系統和電源管理。但是，將有用負載效率 (payload efficiency) 最大化卻是商業和防禦型機載平台所共同關注的一個領域。重量上的每一盎司、空間中的每一立方公分，和電力上的每小時毫瓦數，都要經過仔細地計算與規劃。尺寸、重量和功率 (size, weight, and power, SWaP) 都是它們兩者的重心。不管是載人的還是無人的，射頻技術的進展都可以為商業和防禦型機載平台提供一種飛躍式的優勢。本文將把重點聚焦於這些射頻技術的進步，帶領讀者從高空的觀點來檢視此一問題，隨後還會詳細探討幾種解決方案。多功能雷達、電子戰、和無線感測器技術等是文中所討論到的一些系統。

飛行的歷史

太空梭是美國太空計畫的主力，而且，坦白地說，它也是全球太空探索和衛星執行的計畫項目。太空梭或軌道飛行載具 (orbital vehicle, OV) 的設計始於 1969 年，並在 1981 年飛抵低軌道。具體來說，電力系統 (electrical power system, EPS) 是應該要深入考慮的因素。電力系統包括電源反應物的儲存和配送、燃料電池的動力設備 (電力的產生)，和電氣配電和控制。為了將 28 VDC 和 115 VAC 電源軌提供給軌道飛行載具，會在電力系統花許多的時間和精力。這些系統和子系統都很複雜，也很重，

且效率低，但電氣系統是總體有效負載計算中重要的一部分。

將時間快轉到 2015 年，有幾個無人飛行載具 (unmanned aerial vehicle, UAV) 的專案正處於開發階段，這些專案都屬於一種特殊的類別：高空長續航力 (high altitude long endurance, HALE)。特別的是，有一個專案設下了一個目標：5 年不補充的 (unreplenished) 飛行。環境、機身和動力設備系統需求所面臨到的挑戰十分令人生畏，而要讓這些專案成功的關鍵是，要把注意力放在電力的產生、電力的輸送及電力的重載獲 (recapture)。通信系統在設計時就要將尺寸、重量和效率列為最高的考慮事項。幸虧有像亞德諾半導體 (Analog Devices, Inc, ADI) 這樣的公司，一直都在為能提供這一類的元件而在積極地努力研究開發相關的技術。

ADI 公司的收發器產品組合就是一個好例子；它們非常多樣化，具有完整的光譜覆蓋範圍，是高度整合的解決方案，適合低功耗且占位面積小的元件。相關的詳細討論及其他的元件解決方案將會在本文中交錯地出現。

此處所提出的很多問題和解決方案都會以機載平台為例；其他的則會以艦載平台 (shipboard platform) 為例。讀者應該了解，基於空中和基於海洋平台的問題陳述和相關解決方案有著非常密切的關係，但相同的系統也經常有所差異。

什麼是 SWaP？

在新產品、專案或平台的定義中，尺寸、重

量和功率 (SWaP) 可說是最重要的規範，這點毋庸置疑。不管是艦載、機載、陸地上的 (terrestrial)、可供人攜帶的 (man carried) 或隨身型的 (hand carried)，幾乎所有新的開發計畫都有一個共同的要求，那就是要讓它更小，讓它所用到的可用資源要更少，和讓它對系統總體功能的貢獻程度要更高。最近曾有一個機會讓筆者可與一位雷達系統架構師交換了一些意見，我們討論到了有關相列雷達 (phased array radar) 和視野從 50 到 1000 英尺的主動電子掃描陣列 (active electronically scanning array, AESA)，以及設計工程師如何讓一個很聰明的構想來提高系統的精度、範圍和資料傳輸。但 SWaP 的挑戰卻毀了他所有經過仔細考慮的計算。在當前社會、經濟、政治和全球環境的氛圍之下，精簡的系統才比較合乎需求。SWaP 在最近也更經常被認為是關鍵的驅動因素，從而為系統性能增強功能和多功能架構的考量帶來了難以取舍的抉擇。

找出罪魁禍首

在我們討論一些 SWaP 問題的解決方案之前，讓我們先來探討一些犯錯的行為、可恥的違法者，和非常惱人的特性。

銅！銅是電力傳輸首選的導體。一千英尺沒有絕緣的 AWG 5 號銅線之重量接近 100 磅 (50 公斤)。但雪上加霜的是，銅線固有的阻抗會讓電流以耗散熱的形式浪費掉。另一個不利的因素是固有的元件尺寸。例如，讓我們檢視一下艦載雷達本地振盪器 (local oscillator, LO) 的使用案例。本地振盪器的輸出會饋送給發射機和接收機。所以本地振盪器必須要產生一個穩定的頻率，且諧波要低；而高穩定性的要求則必須要考慮到溫度、電壓和機械漂移等。該振盪器必須要能產生足夠的輸出功率，以有效地推動後續階段的電路，如混頻器或倍頻器等。它的相位雜訊必須要低，其中信號的定時 (timing) 十分重要。傳統上，本地振盪器是由一個單獨和專門設計的子系統所產生的及分配的。對機載系統而言，其情況相同或類似，也有著尺寸大、用電量大和重

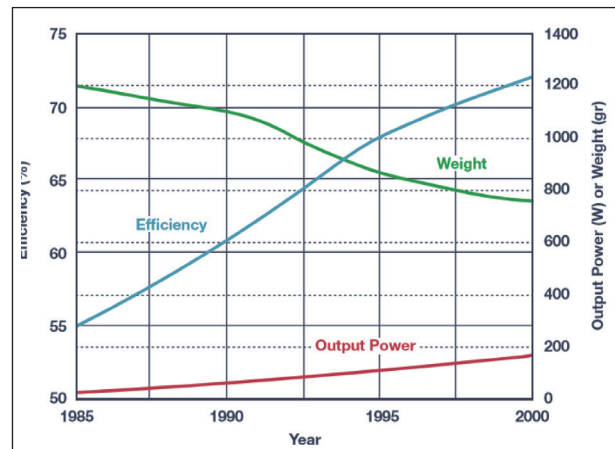
量很重的情況，因為內部採用的是固態元件。

行波管 (traveling wave tube, TWT) 是為系統提供高功率射頻的舊式元件。太好了，它是不會斷開的，為什麼要修理它？什麼是行波管？行波管是一種特殊的真空管，常在電子設備中使用，以放大微波範圍內的射頻 (RF) 信號。雖然調諧過的 (窄頻帶) 版本較為常見，但寬頻行波管的頻寬可以如一個倍頻程 (octave) 那麼高；而 300 MHz 至 50 GHz 則是工作頻率的範圍。這些行波管系統在某種程度上是有效的，但它們都是一種單點失效 (single point of failure)。可靠性是行波管的重要考量。微波管 (microwave tube) 的可靠性強烈地依賴著三項因素。第一，在製造過程中引入的缺陷會對可靠性產生不利的影響。生產問題、不良的技藝，以及缺乏程序控制是造成製造缺陷的主要來源。第二，微波管的可靠性在很大程度上是取決於操作程序和處理能力。最後，為了要有可靠的運作，在操作點和最終設計能力之間必須要有適當的設計餘裕。這些只是 SWaP 許多危害因子中的三個例子。

SWaP 的超級英雄

每一個反派的角色都需要有一相關的超級英雄。在 SWaP 減量的過程中，半導體技術和元件整合的進步都在其中扮演著重要的角色。本文的下一節將會重點討論那些直接影響到 SWaP 方程式的主

圖 1：圖中說明了隨著時間的演進，行波管在效率、輸出功率和重量方面的改善。



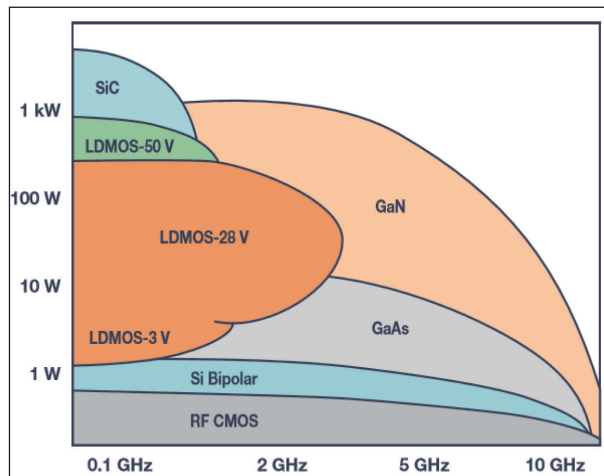
要成就，而這些成就也成就了從今天開始及可預見未來在技術上的飛躍式進步。固態功率放大器、元件整合，和無線感測器技術將是這一節會討論到的三種技術。

固態功率放大器 (Solid-state power amplifier, SSPA) 並不算是一種新的技術。多年來，砷化鎵 (gallium arsenide, GaAs) 和橫向擴散金屬氧化物半導體 (laterally diffused metal oxide semiconductor, LDMOS) 就一直被應用在高功率的放大器之中。基於矽的 LDMOS 場效應電晶體 (FET) 則被廣泛地應用在基地台的射頻功率放大器，因為其需求是高輸出功率，同時要帶有相應的汲極，以獲得擊穿電壓——通常要高於 60 V。相較於其他的器件，如砷化鎵場效應電晶體 (GaAs FET)，它們則有較低最大功率增益頻率的表現。LDMOS 場效應電晶體可在 5 GHz 之下以最高的效率運作。砷化鎵場效應電晶體是一種特殊型態的場效應電晶體，會應用在微波無線電頻率的固態放大器電路中。這橫跨了從大約 30 MHz 到毫米波頻段的頻譜。

砷化鎵場效應電晶體以其敏感性而聞名，特別是它會產生的內部噪音很少。功率密度會受到擊穿電壓的限制。正常的话，你可以以 GaAs 金屬半導體場效應電晶體 (MESFET) 得到 20 V 的擊穿電壓。讓我們回顧一下，行波管具有可用的高頻率和功率，但可靠性、重量和所需支援的子系統讓它們不符需求。LDMOS 可以有高功率，但卻是在 5 GHz 以下運作。GaAs MESFET 可在非常高的頻率上運作，但擊穿電壓低卻將它們限制在 10 W 功率的範圍。在這些情況下是否會誕生一位英雄？固態功率放大器是否會有飛躍式的技術進展來拯救這個世界？SWaP 喜歡碳化矽基氮化鎵 (GaN on SiC)。氮化鎵和碳化矽兩者皆是寬頻隙材料，這意味著其合併的擊穿電壓可高達 150 V。這讓它可以有更高的功率密度，以及一條低的負載線，以便易於進行阻抗匹配。在毫米波波段 ($f_t \sim 90$ GHz, $f_{max} \sim 200$ GHz) 的頻率情況下，碳化矽基氮化鎵可以有功率增益。

市場對碳化矽基氮化鎵的接受度有助於填補

圖 2：根據處理製程所繪製的電源與頻率間的關係圖。



晶圓廠的產能和壓低晶圓的成本。射頻電晶體的器件結構意味著功率密度可以達到 5 W/mm。碳化矽基氮化鎵的 MSL 等級已接近或達到業界可以接受的評等。對於碳化矽基氮化鎵可以是一種中斷技術 (interruptive technology)，國防和商業市場較為需要它的看法，已廣為大家所同意。碳化矽基氮化鎵的性能多半會受到熱傳送 (thermal transfer) 的限制：讓這些熱從器件散出是最後一個要解決的問題。我們已經在矽基氮化鎵 (GaN on silicon) 上看到一些成功的成果了，但傳熱性降低後會將輸出功率限制在接近 10 W 之處。最佳的性能是來自於金剛石基氮化鎵 (GaN on diamond)。科學上的計算指出，功率密度將比現今的碳化矽基氮化鎵高 10 倍。

雖然已經有人展示了氮化鎵可在單晶金剛石上直接成長，但當前可用單晶金剛石襯底的最大尺

圖 3：KHPA 0811 8 kW HPA。



寸限制了市場對該技術的採用。金剛石基氮化鎵聯盟的早期採用者只有政府和國防承包商。與砷化鎵 (GaAs) 在 1980 年代的情況相似，金剛石基氮化鎵將由政府機構率先採用及檢核，之後，商用市場則會在可靠性增加和相關成本降低後跟進。行波管有一個整合式的固態功率放大器代替物。ADI 公司可提供一款高達 8 kW 的高功率放大器 (HPA)，它將許多的氮化鎵基氮化鎵之固態功率放大器結合在單一的一個單元中。這款 KHPA-0811 採用了一種小型的十二面體 (dodecahedron) 封裝，以便在小小的體積中裝滿可觀的電量，並涵蓋寬廣的頻寬範圍。

以整合丟棄船錨

為了讓說明更清楚起見，先解釋一下這裡的船錨 (boat anchor) 指的是什麼。在美國海軍，當大型電子 (或其他) 設備變得過時和成為系統資源的一種負擔時，它就會被稱為是 “船錨”。不管是載人的或自主的，在機載平台上會有許多種形式的通信。這些通訊連結會因語音、導航、數據連結、機載上的感測器連結、雷達、軍用品跟蹤 (munition tracking) 而發生改變，而隨著天空變得更加擁擠和戰爭的戰場變得更加複雜，此一列表中的項目也會變得更多。在過去，任何一種這種系統都需很大的空間、電力資源，和支援的子系統。機載平台實際上就是機載的這樣的一個事實，實在很令人驚訝。每一盎司都要考慮到，每一毫瓦也都要計算到，實體系統的設計更是要充分考慮，才能適合所被分配到的空間。應該有一種更好的方式可以完成這樣的設計工作。

積體電路 (IC) 設計上的進步，再加上系統級封裝 (SiP) 和系統單晶片 (SoC) 兩者技術上的進步，讓以前那些臃腫的系統成為船錨。讓我們仔細看看一個很好的系統整合的例子。ADI 先前曾發表過一款業界領先的收發器，它在一 10 mm × 10 mm 的封裝中放進了令人印象深刻且對電力渴求的通訊連結。這款編號為 AD9361 的收發器是一款高性能、高度整合的射頻 (RF) Agile Transceiver。ADI 還有一款 AD9671，它是針對低成本、低功耗、小尺寸

所設計的產品。其原先的設計是要用於 8 通道超音波的實現，但是由於整合的程度、更低的成本和可用性，許多商業和國防系統的設計師都在尋求使用商用現成的元件。而超寬頻、低功耗、低成本的收發器 ADF7242 則是另一個整合式設計的例子，一些原先設計範圍之外的系統也都在考慮要採用它。現在就讓我們拋下船錨，捲起 SiP 和 SoC 吧。

剪斷銅的臍帶

不管是載人的或是無人的，商用和國防用飛機上的感測器數量，若不是數以千計，也是數以百計，而且許多還有冗餘和備用的支援系統。這些感測器的範圍包括襟翼和副翼的定位感測器、導航和定位感測器、發動機的振動、制動器的溫度等，表列中的項目很多，且還在繼續增加之中。這些感測器中的每一個和其相關的冗餘都會經由一條又大又重的電纜而連接到一個中央處理器，這條又大又重的電纜是由銅佈線和由不銹鋼製或鋁製的連接器所組成的。關鍵是，有效的平台資源都會被用來支援這些電纜和互連。射頻技術的進步再一次拯救了 SWaP，因為它可降低對這些電纜的依賴。許多主要的飛機製造商正密切合作，尋找合格的商用現成 (COTS) 技術，以便可開發出一種成本低且可靠的技術，來替代銅互連技術。

以一款輸出資料頻寬要求小於數十 kHz 的慣性測量單元 (IMU) 感測器，並結合一款 ADI 內含 ARM Cortex M3 與射頻收發器的精準類比微控制器為例。這顆精準的類比微控制器 ADuCRF101 是一款完全整合的資料擷取解決方案，是專為低功耗無線應用所設計的。它的設計就是在強調靈活性、穩健性、易用性，和電流消耗低。這樣的結合純粹只是假設，但卻是一個航空電子感測技術與現成射頻元件配對使用的例子。稍微等一下，等這種類型的射頻實現，可在不久的將來拯救 SWaP。

結論

今天的社會、政治和經濟環境要求機載平台的

設計工程師把更多的精力放在縮小尺寸、減輕重量和降低功率。系統資源所減輕的負載將可帶來更長的飛行時間，降低燃料需求，和更有效的可運送之最大載重量 (payload allowance)。可 SWaP 減量的最重要和最有趣的進步是直接來自射頻社群的技術進步。最有益的進步包括從行波管縮小到固態功率放大器的尺寸、元件整合，和減少對銅電纜互連的依賴。射頻技術將在未來許多年都讓航空工業保持在翱翔在高空的狀態。可提供尺寸縮小、重量減輕和功率降低的解決方案就是射頻技術。

關於作者

Jarrett Liner 是 ADI 位於美國北卡羅來納州

格林斯伯勒的航空航太和國防事業群旗下的一名射頻系統應用工程師。他擁有豐富的射頻系統和元件之設計經驗。在此之前，Jarrett 曾在一家軍事和航空航太領域中的公司擔任碳化矽基氮化鎵放大器的應用工程師。他先前的 13 年工作經驗也包括射頻 IC、WLAN 功率放大器和前端模組的設計與測試。他曾在美國海軍服役 6 年，擔任電氣工程員。Jarrett 於 2004 年取得位於北卡羅來納州格林斯伯勒的北卡羅來納農業與技術州立大學之電機工程學士學位。在工作之餘，Jarrett 喜歡騎登山自行車、在健身房教騎腳踏車、跑步、或在院子裡與他的 4 個小孩相互追逐。他的電子郵件信箱為：jarrett.liner@analog.com。CTA

英飛凌安全晶片與參考設計協助輕鬆快速取得 FIDO 認證

英飛凌科技加速推動安全晶片解決方案，協助安全、輕鬆取得 Fast Identity Online (FIDO) 開放式標準的線上認證。透過英飛凌 FIDO Certified USB Token 參考設計，動信科技股份有限公司 (Go-Trust) 的 U2F (通用第二要素) 驗證器得以於一個月內在通過 U2F 互通性測試認證——若非採用英飛凌的參考設計，所耗費的時間將長達三倍。



英飛凌的 FIDO Certified USB Token 參考設計及經認證的安全晶片受到廣大 FIDO 驗證裝置製造商所採用。該 U2F 參考設計曾被 Google/Gmail 及其他 U2F 參考伺服器用於互通性測試。英飛凌提供所有與 U2F 相關的原始碼與文件，讓開發人員能全心開發針對 U2F 憑證所需的其它功能。

英飛凌身為 FIDO 的創始會員和董事會成員，同時也是保護個人身分與電腦資料的安全晶片技術龍頭的供應商，對 FIDO 規格的開發不遺餘力，並已推出多款符合該標準的產品。參考設計與安全晶片包括：

- 應用說明：以 SLE 78 安全晶片為基礎的 FIDO Certified USB Token U2F (通用第二要素) 驗證器
- 以 SLE 78 安全晶片為基礎的 FIDO certified NFC U2F (通用第二要素) 驗證器
- 以 OPTIGA Trust P 安全晶片為基礎，業界首款通過 FIDO 預先發行互通性驗正的 BLE U2F 驗證器參考設計
- 相容於 UAF 驗證器解決方案的英飛凌可信賴平台模組 (TPM)
- 客戶解決方案：以 SLE 97144 安全晶片為基礎的 SD 外型 UAF (通用驗證架構) 驗證器