



軍 事 科 技

DOI:10.29683/AFOB.202202\_222.0003

# 無人機技術發展和應用 美國無人機軍民通用技術實況與推估

軍事科技作者 耿志雲

## 提 要

十幾年來，美國國防部主持的反無人機計畫，已撥給各軍火廠商鉅額研究經費，以期與駐防在全球各地的美軍部隊合作，以資證明無人機系統各種實戰用途與之可行性評估，並且重新定義了情報獲得的監視與偵察技術，與保衛營區和巡邏邊界時的可能性。事實證明，簡稱UAS的無人機系統在最重要的時刻都能發揮既定的作用，是現代軍事科技朝未來人工智能化戰場邁進的一大成就。

在過去的幾年中，全世界的無人機市場取得了顯著增長，業餘愛好者和專業用戶都對探索這些設備必須附帶的功能非常感興趣。這種增長將持續到可預見的2030年，屆時將有750萬架新無人機銷往歐洲。無人機被廣泛採用，有可能使未來新產業發生革命，並帶動數十億美元的經濟增長。但是，隨著無人機技術的成熟並進入主流，用戶和企業界將對新產品的性能和可靠性寄予更高的期望。

關鍵字：無人機系統、解析度、合成孔徑雷達、電漿奈米塗層

## 壹、前言

伊朗於2019年6月20日前在霍爾姆茲海峽(Strait of Hormuz)附近以自製的防空飛彈擊落一架美國「全球鷹」(Global Hawk)無人機<sup>[註1]</sup>，此役對於長航程無



人機的支持者而言，可以看成一項警訊。間接透露了「以無人機擔任戰爭主要工具的時代還未到來」，因為目前可用於軍事目的各種無人飛行載具，在和裝備精良的對手戰鬥時，生存的能力仍舊很有限。

當今，以美國雷神公司 (Raytheon) 為代表的「旗艦」無人機偵察探測技術，已經在美國軍備市場中居領先地位，據稱，它可以為使用單位顯示出單一架無人機的高解析度，和操作性能清晰程度，「Ku波段射頻系統多功能同步雷達」或稱為 KuRFS，已經於2019年6月份達到了初始作戰能力階段，並且已經被美國陸軍採用。它與從火箭管發射的「郊狼」(Coyote) 自殺式無人機搭配，成為反制對手的偵測、追蹤、摧毀專用無人機團隊的先驅。以廉價消耗性無人機配合特定專用電戰波道，可作為美軍在特種戰區內消滅對手無人機基地的策略之一。雷神專門研發高能雷射器和反無人機的業務部門，也比較了五角大廈近幾年來為克服無人機威脅而進行的歷場海外戰鬥，以及在伊拉克和阿富汗戰爭中的價格因素，以期能超越那些難以發現且具有破壞性的簡易爆炸裝置 (IED)，從而獲得美軍的大量應用與採購。

無人機已和高解析度微型相位陣列雷達技術結合，例如在地面移動目標指示 (GMTI) 模式下運行的多功能合成孔徑雷達 (Synthetic Aperture Radar—SAR)，分析度從0.1到3公尺。還可以掃描特定區域的移動中人、車，以普通車輛行進的速度 (10~70kph) 探測。當參數傳遞到地面站時，移動目標數據覆蓋在數位化地圖上，產生可參考的態勢感知 (Situational Awareness—SA)。未來將包括以和光電感測器的偕同運用功能 SAR/EOIR (Electro Optical Infra-Red) <sup>[註2]</sup>。本文描述近年美國對無人機應用策略發展和反思，與未來在城市產業經濟上的蘊藏潛力。

## 貳、無人載具實戰啟示

早年無人機在美國軍隊開始流行，是因為美軍通常面對缺乏攔截機或防空系統的對手，出動無人機就可以占盡優勢。這導致當時一些軍武專家高估了無人機在現代戰爭中的效用。目前，隨著美國國防戰略從關注非正規部隊 (如 ISIS) 逐漸轉向大國競爭，如果僅只部署無人機系統，想藉此贏過對手，那麼科技和戰略發展的關聯性就會變得脫節。另一方面，人工智能和相關技術的最新進展，卻有可能提高自

註1 Tara Law, "Iran Shot Down a \$176 Million U.S. Drone. Here's What to Know About the RQ-4 Global Hawk", Politics, Time, 2019/6/20, 檢索日期2021/4/3, <https://time.com/5611222/rq-4-global-hawk-iran-shot-down/>。

註2 "SAR & GMTI: Tow Great Radar Modes That Go Great Together (On-Demand Recording)", Association of Old Crows, 2015/7/9, 檢索日期2021/3/30, <https://www.crows.org/page/sar-and-gmti-two-great-radar-modes>。



動化或長航程的無人機系統性能，無論它們是在空中、海底還是在地表上運行。但相對而言，新的AI技術也可被對手用於反制無人機的武器之上。從伊朗擊落美國最先進RQ-4「全球鷹」無人機的實例，吾人可以推論出5點關於應用無人機系統的觀念啟發，讓無人機系統的支持者們進一步反思「偏重於發展某一項軍事科技的得失」。

### 一、 對應防空系統挑戰

首先，無人機基本上沒有防禦能力，美國的「全球鷹」於20多年前還在發展時，是對未來的模擬戰區內，面對各種假想對手的威脅時，推估構思出來的各種作業場域，當年這些對手的軍武實力還不成氣候。由於「全球鷹」機身比其他無人機更大、操作成本更高，因此被設計成可以探測和干擾對手的雷射導引飛彈。但是，實際部署時在有限的機艙空間內，已經擠進了3,000磅的電子模組裝備，如果想再加上其他的功能，就會讓它變得相形見肘。

其次，目前世界上一些軍事力量較小的國家卻也正在透過各種途徑，獲得強大的防空裝備，像伊朗「革命衛隊」(IRGC)用來擊落「全球鷹」的武器，就是1枚由其自行研發的「Khordad 3型」防空飛彈。Khordad 3是一種藉由公路移動的車載防空系統，於2014年首次亮相，是伊朗自製的「雷電」(Raad)防空系統的最新衍生型。配備功率強大的相位陣列雷達，可以同時接戰多達4個目標，總共可發射8枚飛彈，作戰半徑在50~75公里，能攔截高達25~30公里的空中目標，射程為50英里，可接戰高度比任何美國軍用機的升限多出90,000英尺<sup>[註3]</sup>。像伊朗這樣被歐美孤立的國家竟然可以發展出這樣一套飛彈系統，這一個事實，說明了先進防空技術在全球普及化的現象。另外，中共從2018年開始測試俄羅斯製造的S-400防空系統，以及土耳其也快要進行試射的防空飛彈，它們的性能都要比伊朗強得多，還可對200英里範圍內任何非匿蹤飛機構成威脅。

美軍官員證實，海軍的MQ-4C「崔萊頓」(Triton)無人機在波斯灣霍爾姆茲海峽附近的「國際空域」被擊落。「崔萊頓」是「全球鷹」的略微修改版本，主要仍由其零組件組成，大多用於非軍事任務的巡航，但是伊朗「革命衛隊」稍早在一份聲明中卻宣稱「該架無人機為軍用的RQ-4『全球鷹』」。伊朗

註3 Ehsan Ostadrahimi, “Sevom Khordad Medium-range air defense missile system”, Military Today.com, 檢索日期2021/4/3, [http://www.military-today.com/missiles/sevom\\_khordad.htm](http://www.military-today.com/missiles/sevom_khordad.htm)。



外交部長穆罕默德·賈瓦德扎里夫 (Mohammad Javad Zarif) 當晚宣布，伊朗已在其領海內標定了該架無人機的零件殘骸。雖然面臨歐美「制裁」和國際經濟封鎖，伊朗近年在其國防科技仍舊取得了重大突破，在生產軍事裝備和武器方面實現了自給自足。伊朗稱，軍事力量僅用於防禦目的，不會對其他國家構成任何威脅<sup>〔註4〕</sup>。這讓美國對伊朗的「抵近偵察」手段顯得幾分理虧。(圖1)



圖1. 駐防在關島的美國海軍MQ-4C「崔萊頓」高空無人機，編制屬第19無人偵察機中隊(VUP-19)

資料來源：<https://news.northropgrumman.com/news/features/mq-4c-triton-deployed-quickly-became-an-invaluable-asset>。

## 二、在空載具相輔相成

第3點要考慮的是，載人飛機的續航力雖然較差，但某些性能卻仍然不是目前的無人機可以相比的。例如：「全球鷹」雖然可以比任何載人飛機飛的更高，在不間斷飛行中也曾保持了34小時的續航紀錄。然而，它原本想取代的載人U-2S高空偵察機，在飛行速度、升限高度、有效載重、機身防護和推進動力等方面都比「全球鷹」優越，這也是美國聯合作戰準則中，仍將U-2S列入不汰換裝備的原因。就算在製造了數十架「全球鷹」之後，美國空軍仍然需要繼續操作U-2S，例如現在仍然在南韓烏山基地部署U-2S<sup>〔註5〕</sup>，因為目前的自動化技術對無人機的性能還有太多限制，包括它在惡劣天氣下飛行可能會影響任務的達成率。至於像F-35這樣的第5代載人戰鬥機，已經能比無人機更能安全地穿透「有爭議」的空域，而且偵察能力也越來越多樣化。

第4點要想到的是，現在的人工智能(Artificial Intelligence)技術還無法增加飛行載具的速度和機動性能。在美國的軍事學術研究界，近年關於「

註4 Nasser Karimi and Jon Gambrell, “Iran Shots down U.S. Surveillance Drone, heightening tension”, AP, 2019/6/21, 檢索日期2021/4/6, <https://apnews.com/article/e4316eb989d5499c9828350de8524963>。

註5 Benjamin Sutton, “Osan U-2s celebrate nearly 40 years surveillance”, 51st Fighter Wing Public Affairs, 2015/10/28, 檢索日期2021/3/31, <https://www.osan.af.mil/News/Article/640094/osan-u-2s-celebrate-nearly-40-years-of-surveillance/>。



藉自動演算法驅動的人工智能，如何改善收集和處理情報的無人機性能」這個範疇，已經有很多論文評述。然而，像「全球鷹」這樣價值1億多美元的軍用無人機，最重要的指標性功能，就是長時間滯留在空中巡航的機動性和飛行速度。事實上，這已經是「全球鷹」在今年6月間連續3次告訴美軍「敵人不是唯一的問題」。因為有近1/5的美軍無人機隊礙於裝備故障而折損。對此，人工智能儘管可能有助於防止無人機在任務中墜毀，但是在「有爭議」的空域中(臨近假想敵國領空邊界的航路)，還是無法擺脫容易被對手防空系統追的事實，雖然它具有適度的機動飛行能力，飛行速度卻比最新款的波音737慢了200哩，在防空系統日趨精良的對手領空附近，它就像是一隻移動緩慢的飛靶。

對此，正確的解決方案，應該是將各種資料鏈路網路化偵察所獲得的情報，匯成多樣化組合，即時提供給己方的戰略決策者參考。吾人可以想像，當伊朗這樣世界三流的軍事力量，都能擊落美國高科技無人機時，前述的策略是顯而易見且合理的，尤其在陌生空域不應當過分依賴無人機來擔任作戰計畫的主角。

### 三、部署戰區情報網路

第5點是學術和輿論的綜合評估，美國空軍的「科學顧問委員會」曾在2016年做出了這樣的結論：「找出低地軌道衛星和各種機載系統的混合部署方法，包括使用部分AI技術的F-35戰鬥機，可以達成立體化空間內最全面、最具彈性的部署樣態」。這項研究也曾在《國防消息》網站(Inside Defense.com)上報導，以各種情報收集單元串聯成的「系統家族」戰區戰略部署，將可能對偵察中共等對手國家的「區域拒止」(Aerial Deny)任務，形成有效的情報收集網路<sup>[註6]</sup>。

以上這些軍事理論都沒有否定未來無人機的作戰潛力，特別是當它們一旦具有更靈活的空氣動力性能，配備先進的任務軟體，還可以讓機載人工智能裝備透過任務同步學習，無人機的價值又會被美國軍方肯定。畢竟無論軍民通用科技裝備發展的高度「自動化」和「智能化」已經是一種普遍的趨勢，尤其是美軍，將來會把它們頻繁用於非傳統安全的「救人救命」任務。雖然無人機當下的性能仍有限制，但就算是「全球鷹」這樣昂貴的裝備，也讓美國必須繼續

---

註6 Justin Doubleday, "Joint AI Center preps multiple award contract for test and evaluation services", Inside Defense, 2021/2/17, 檢索日期2021/4/18, <https://insidedefense.com/insider/f-35-?page=17>。



冒著高風險成本操作無人機，因為時間和經驗會告訴無人機的使用者，在大國博弈的時代可以做出什麼貢獻，在可以預見的未來如何贏得軍事上的優勢。

## 參、無人機戰場模擬推演

### 一、無人機推演新技術

美國的國防工業巨擘雷神公司(Raytheon)曾於2020年1月底，選在華府五角大廈附近的辦公室對「反制無人機」這一項題目進行了模擬場景沙盤推演，以展示其反無人機的真正實力。雷神公司提出的反制無人機解決方案系列，滿足了各軍種單位的需求，可以幫助軍方和民間部門有效防範與採取反制措施，做到盡早發現對手的無人機信號源、精確識別目標，然後根據其當下的環境和周圍的環境，選擇適當的方法摧毀或抵銷它的信號。模擬場景猶如：

「時間接近晚上11時許，位在東歐的某個美國軍事邊境哨所，值班員似乎感到有一些雜波干擾了夜晚的安靜，軍用雷達屏幕上顯現一批電波信號。以前都可能被視為「鳥群」的信號，現在開始受到更多的重視。如今，無論什麼出現在雷達屏幕上，都會以穩定、持續的速度越來越近。然後，大批雷達信號分為3批飛向不同目標，每批都帶有毀滅性的任務…」

在無人機技術越來越便宜，易於獲取且有利於武器化的現代世界中，以上這種假想情況是美軍很可能面對的。無人機可以成群飛行，也可以互相通聯、攜帶武器有效載重，甚至可以反制傳統的電波干擾技術。隨著美國國防部將可靠和全面的反制無人機技術，作為一項「迫切的聯合作戰需求」(Joint Urgent Operational Need—JUON)的認可資格，國際軍備市場上便開始充斥著各種聲稱的解決方案，這些技術多半來自於干擾槍，直接把對手的無人機瞬間擊落到防範空中入侵者的「電磁力場」當中<sup>[註7]</sup>。

在某個美國海外軍事基地中，如有一個美軍反無人機單位擁有KuRFS雷達，會是同類最佳的雷達系統，它即使在超過10公里的範圍內，也可以探測到對手無人機的雷達旁瓣信號，它甚至還可以分辨出是否為飛鳥。至於前文所描述的「邊境前哨」的模擬場景，美軍根據專業廠商的建議部署KuRFS，藉以提高威脅的警覺並及時做出適當的回應<sup>[註8]</sup>。雷神提出的另一個模擬場景，就可能

註7 Gregory Prothero, "Urgent Acquisition - A JUON Case Study", DAU, 2019/6/19, 檢索日期2021/4/3, [https://media.dau.edu/playlist/dedicated/62963351/1\\_y02fqy52/1\\_kr8r8uet](https://media.dau.edu/playlist/dedicated/62963351/1_y02fqy52/1_kr8r8uet)。

註8 "US Army to receive Raytheon's KuRFS Multi-Mission Radar", Army Technology, 2018/11/2, 檢索日期2021/4/3, <https://www.army-technology.com/news/us-army-ku-rfs-radar/>。



讓最高階的戰場指揮官感到棘手：

「一小批對手的無人機朝著美軍基地飛來，這批無人機有如小型飛機的尺寸，雷達上還可見搭載武器；另一批稍微小一點的無人機轉向水力發電廠，預計在數分鐘內就可抵達；第三批仍然較小的無人機，轉向一個住滿著平民沉睡中的小鎮…」

美國軍備廠商提出以上的虛擬的情況看似緊張，但卻不能保證哪個海外基地的夜晚就不會沒有相似的場景。因此，雷神建議部署同樣由該公司研發的傳統「國家先進防空飛彈系統」(由AIM-120研改成的陸基National Advanced Surface to Air Missile System—NASAMS)，以對付懷有敵意，迅速擊落推進到美國軍事哨所附近的大型無人機<sup>[註9]</sup>。對於第二批較小目標的應對，圍繞著發電廠的小型無人機，可以由雷神的Phaser高功率微波發射器，發射一陣高爆能量並將其大量摧毀<sup>[註10]</sup>。至於最後一批朝城鎮推進的小型無人機，藉由高能雷射武器系統(High Energy Laser Weapon System—HELWS)單獨瞄準，該系統可以安裝在南北極地專用Polaris MRZR全地形車上，並藉由集中各輛載具的雷射光束擊落無人機<sup>[註11]</sup>。

## 二、微型無人機技術發展

代號「黑黃蜂」(Black Hornet)是世界上最小的情報收集(ISR)無人機運用載具<sup>[註12]</sup>。該架載具改變了原本光電(E0)和紅外線(IR)技術的遊戲規則，它既可用於模組化戰鬥載具的單兵個人偵察系統(PRS)，也可用於裝甲或機械化車輛(VRS)的車載系統，可彌補空中和地面傳遞感測器之間的信號情資空白地帶。即時獲取戰場有關情況的實時情報(尤其是在視線範圍之外時)尤其重要。如果使用「天空遊騎兵」(Sky Ranger)小型無人機，只需點擊幾下鍵盤即可查詢相關資料，只要戰區指揮官確實知道對手目標在做什麼時，仔細計畫下一個步驟就變得容易<sup>[註13]</sup>。(圖2~3)

---

註9 Joseph Trevithick, “SAM System That guards Washington DC Just made its lowest ever Intercept of A mock Cruise Missile”, The Drive, 2020/9/24, 檢索日期2021/4/13, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/36728/sam-system-that-guards-washington-dc-just-made-its-lowest-ever-intercept-of-a-mock-cruise-missile>。

註10 “Phaser High-Power Microwave System”, Raytheon Missile & Defense, 檢索日期2021/4/1, <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/capabilities/products/phaser-high-power-microwave>。

註11 John Keller, “Air Force Asks Raytheon to provide additional laser-weapon all-terrain vehicle for defending against UAVs”, Military and Aerospace Electronics, 2019/12/6, 檢索日期2021/4/21, <https://www.militaryaerospace.com/power/article/14073194/laser-weapons-uavs-allterrain-vehicle>。

註12 “PD-100 Black Hornet Nano Unmanned Air Vehicle”, Army Technology, 檢索日期2021/4/9, <https://www.army-technology.com/projects/pd100-black-hornet-nano/>。



美軍最新的觀念甚至認為，在某些戰區的特殊情況下，最好的作戰策略反倒是部分公開己方行動，這是希望潛在的對手知道自己已在監視他們。為了確保前線作戰基地安全，在邊境巡邏或管理大批人員部署，最好的預防措施是持續不斷地公開技高一籌的監視能力。至於Sky Ranger可以讓美軍指揮官預先計畫其飛行路線，並且同時以特定波道控制無人機，從而可以提供一致而且持久的無人機滯空安全性。當美軍部隊在地面上執行任務時，需要迅速而果斷地做出戰場決策。Sky Ranger就可將空中情報的全盤狀態直接傳遞給地面決策單位，藉由方便操作的觸控屏幕界面，任何士兵都能成為戰場戰術監視的專家<sup>〔註14〕</sup>。



圖2~3. 美國陸軍大量採用的「黑黃蜂」(Black Hornet)微型無人機可彌補空中和地面感測器之間的信號情資空白地帶，即時獲取戰場有關動態的實時情報。

資料來源：Marek Dabrowski, “Microdrones for Military. Black Hornet for polish Commando Unit, Defense 24.com, 2019//16, 檢索日期 2021/4/15, <https://www.defence24.com/microdrones-for-military-black-hornet-for-polish-commando-unit>。

### 三、定向能反制無人機

雷神已經與美國空軍簽訂合約，生產帶有10千瓦雷射的HELWS，用於評估

註13 “Aeryon Sky Ranger sUAS”, Air Force Technology, 檢索日期2021/4/4, <https://www.airforce-technology.com/projects/aeryon-skyranger-suas/>。

註14 Betsy Lillian, “Aeryon Debuts New Sky Ranger R80 Drone”, Unmanned Aerial Online, 2018/4/27, 檢索日期 2021/4/20, <https://unmanned-aerial.com/aeryon-debuts-new-skyranger-r80-drone>。



和測試，它正在與另一家國防承包商諾斯洛普·格魯曼(Northrop Grumman)競爭，為陸軍開發車載50千瓦雷射系統<sup>[註15]</sup>。至於高功率微波系統也將由部隊評估，美國空軍也已與部署的系統簽定合約，將在未公開的海外地點進行測試。而與此同時，雷神還計畫即將推出「郊狼」Block 2的消耗無人機，該機具有改良的感測器和渦輪發動機，使其飛行速度比前代產品快4倍<sup>[註16]</sup>。同等級技術也會像「郊狼」一樣，可以想見對手的無人機技術也會變得越來越快，也會變得更加智能化，和更具彈性部署的能力。雖然雷神宣稱，其整合型態的防空解決方案，是在眾多的反無人機技術市場上最具競爭力的先進裝備，但其描述的模擬場景，卻讓反制對手無人機的操作者面臨更為緊湊的決策時間。

即使提供了應對未來威脅的干擾器和相位雷達裝備，在講究實際的戰場部署環境，美軍最佳的選擇仍然是採用動態的消耗性反制無人機。這些應對無人機的場景沒有簡單的答案，也沒有黃金的解決方案，皆有待新的戰場技術，予以證明其效果與堪用程度。

## 肆、無人機載合成孔徑雷達

美國對無人機的廣泛運用，目前已和高解析度偵察雷達技術結合，例如「山貓」(Lynx) AN/APY-8微型相位陣列雷達，是在地面移動目標指示(GMTI)模式下運行的多功能合成孔徑雷達(SAR)。雷達信號的回波由系統處理成高解析度圖像，並通過數據鏈路傳送到地面遙控偵察站。Lynx由雷達的電子模組和安裝在總重52公斤的機載零組件天線組成。Lynx可以提供一般照片品質的地面圖片，分析度範圍從0.1到3公尺。這型雷達還可以掃描較大或較小區域的移動物體，以普通車輛移動的速度(10~70 kph)檢測目標。當參數傳遞到地面站時，移動目標數據通常會覆蓋在數位化地圖上，產生可讓戰情單位參考的態勢感知地圖。

### 一、輕量雷達便於整合

軍用型號AN/APY-8的Lynx II是在美國空軍「掠食者」RQ-1無人機上運行的Lynx的輕型化版本。增程型的Lynx ER是為了在延展航程和高海拔上運行而設計的新版本，目前與美國空軍「掠食者」B型MQ-9搭配使用。Lynx II計

註15 Nathan Strout, "Raytheon Awarded \$15.5 million to upgrade laser weapon", Unmanned, C4ISR, 2021/4/7, 檢索日期2021/4/18, <https://www.c4isrnet.com/unmanned/2021/04/07/raytheon-awarded-155-to-upgrade-laser-weapon/>。

註16 Barry Edwards, "Coyote Block 2 Counter-drone Weapon Approved for International Sales", Enhanced System Destroys Drones, 2020/3/17, 檢索日期2021/4/6, <https://raytheon.mediaroom.com/2020-03-17-Coyote-Block-2-counter-drone-weapon-approved-for-international-sales>。



畫於2007年起在多種載具上與美國陸軍一起部署，包括「火斥候」Fire Scout (FCS IV級)，ER/MP和「獵手」Hunter。所有Lynx型號都提供幾種操作模式，包括「帶狀」(Strip)、「聚束」(Spot)和MTI幾種掃描技術。Strip模式用於對大面積覆蓋。Lynx II以70浬的速度飛行，每分鐘可以覆蓋25平方公里的區域，解析度為1公尺。Lynx ER是為可以飛得更高的載具(45,000英尺以上和RQ-1的25,000英尺)而設計的，用於更快的載具(掠食者B以250浬的速度飛行)，能夠將速率提高一倍，達到每分鐘約60平方公里。當需要近距離觀察時，可以利用Spot模式將雷達對準特定的位置或目標；在Spot模式中，Lynx可以提供面積300×170公尺目標區域的詳細圖像，以40公里的距離顯示細節小至10公分的物體。

早在2006年8月，「通用原子」(General Atomics)和「貝宜」(BAE Systems)就完成了搭載在F-16戰鬥機上飛行的合成孔徑雷達(SAR)莢艙所能展示的第一階段，該具莢艙安裝了以前在無人機上使用過的Lynx SAR雷達的衍生產品。後續示範將包括SAR/E0IR光電感應器的偕同運用功能。這次飛行示範，是GA-ASI的偵察系統子公司和BAE Systems進行為期兩年的合作研究工作中的關鍵里程碑。這項研究的最終目標，是為美國空軍和空中國民兵提供「融合」單一偵察莢艙中的兩個高解析度感應器產品的功能。融合產品目的，在為戰鬥機提供偵察目標和地理位置優勢，這些優勢超越了個別使用每具感應器的效果。下一階段，將展示SAR和光電與紅外線(E0 / IR)偵察參數組合。此數據將使用BAE Systems開發的最新感應器融合演算法進行參數編程。通用原子航空系統公司附屬的偵察系統集團總裁林登·布魯(Linden P. Blue)表示，「該團隊已經總共收集並處理了74張圖像，包括高解析度聚束圖像以及各種解析度的寬視場圖像」。BAE Systems正在建造和維持目前由美國空軍和空中國民兵使用的戰區機載偵察系統(TARS)，預計會和Lynx系統安裝在同一具莢艙中。

## 二、增加航程擴大範圍

通用原子的「山貓」(Lynx)多模式雷達，可穿透雲層、雨水、灰塵、煙霾和霧氣，提供高解析度的攝影品質圖像。Lynx雷達目的在滿足遙控飛機(RPA)系統環境的機載挑戰，盡可能減少了尺寸、重量和功率(SWAP)的消耗，同時提供了精確的空對地瞄準精確度，和出色的大面積偵察能力，具有合成孔徑雷達(SAR)，地面／步行移動目標指示器(GMTI/DMTI)和強大的海上大面積搜索(MWAS)模式。搜索模式可為任何整合感測器套件提供廣泛的覆蓋範圍，



從而可以跨接到較窄的視場(FOV)用的光電和紅外線(E0/IR)感測器。

多模式雷達繼續在RPA和載人飛機上部署。美國空軍，英國皇家空軍、義大利空軍和法國空軍都已在MQ-9 / Reaper RPA機上搭載，以及美國「國土安全部」的「掠食者B」飛機上都使用該雷達。美國陸軍已將Lynx部署在其「A型天空戰士」(Sky Warrior Alpha)和「灰鷲」(Gray Eagle)無人機系統上，以及各種載人飛機上，包括C-12，U-21和DH-7慢速定翼機。此外，伊拉克空軍在其「和平龍」載人情報、監視和偵察(ISR)飛機上也使用了Lynx<sup>[註17]</sup>，可以視之為微型相位陣列天線成功裝置在無人機上的實用化飛行載具。

### 三、偵察模式效益倍增

以RQ-9機搭載的Lynx包括兩個「聚束」和兩個「帶狀」SAR影像模式。聚束模式可在標註的目標記號上產生高解析度圖像。帶狀模式將多個SAR圖像拼接在一起，形成一個大圖像。使用SAR圖像，通過疊加在不同時間拍攝的兩個圖像，可以觀察到場景中的細微變化。相干變化檢測(CCD)，幅度變化檢測(ACD)和自動人為檢測(AMMOD)演算法，可快速突出顯示第一和第二個SAR圖像之間的差異，從而提供了出色的圖像分析工具。(圖4)

地面／步行移動目標指示器(GMTI)模式提供了一種快速簡便的方法來定位移動的車輛。GMTI模式為現役機載SAR雷達的重要技術，但數位化DMTI象徵著真正的偵察模式技術升級。DMTI使操作員能夠檢測到以1mph的速度行駛的非常慢速的車輛和人員(步行)，已整合美國空軍MQ-9和美國海關與邊境管制局(CBP)的MQ-9B機上，使操作員能夠發現行動緩慢的重要人員



圖4. 可對移動中目標鎖定顯示的合成孔徑雷達實測影像。

註17 Lynx產品系列目前由AN / APY-8A Block 20A(系統重量<80磅，具備拆卸和航海能力)組成，AN / DPY-1 Block 30雷達(系統重量<85磅，可在海上航行使用)和原始AN / APY-8 Block 20雷達(系統重量120磅)。



或車輛。

以海上大範圍搜索的 (Maritime Wide Area Search—MWAS) 模式<sup>[註18]</sup>可檢測各種海況下的船舶運輸；它還整合了船舶自動識別系統 (AIS) 資訊，用於目標辨識。MWAS在對海岸監視、毒品攔截、長程觀測、小型目標以及搜救行動等任務中表現出色。2014年夏季時，MWAS在代號「三叉戟勇士」的實驗中成功執行了許多沿海任務，展示了在各種天氣條件下探測水面艦艇的性能，還可以借助EO/IR感測器進行交叉識別，從而進行目標分類和識別。以下各點優勢(表1)

表1. Lynx合成孔徑雷達的效益

(1)高解析度圖像品質
(2)距離長達 80 公里
(3)高可靠性的封閉式底盤
(4)重量輕，體積小
(5)即時偵察地面人車運動
(6)自動傳遞到光電與紅外線英艙
(7)可作為現成的商業用途感測器
(8)用於遙控系統和有人駕駛飛機

製表：筆者

## 伍、電漿奈米塗層增加效率

最近幾年，美國的無人機專業廠商對其航空產品進行了大筆投資，但是空氣中的水份和其他自然環境因素，可能會影響無人機搭載精密的電子設備。由於目前使用的普通防水技術，會增加機身重量並縮短電池壽命，而電漿奈米塗層可能是解決方案。

### 一、小型無人機的前景

有鑒於小型無人機技術已經受到業餘愛好者和特殊產業的關注，但來自美國專業市場分析公司Gartner的研究顯示，全球各國在建築、應急服務、保險和物流領域的應用都非常廣泛。這些普遍而多樣的使用範例，都給無人機性能和可靠性帶來了獨特的挑戰，敦促各家製造商不斷創新，以確保在蓬勃發展的市場份額。隨著新興技術發展和外形尺寸的擴大，以及各國的法規、政策向各個無人機持有者開放管制頻率的可能趨勢，全世界無人機的產業創新，自然也為消費者對於投資無人機領域帶來經濟利益<sup>[註19]</sup>。

儘管建築業和其他的主要物流業在稍早很長的一段時間內，一直在悄悄地

註18 Armin W. Doerry, “Performance Limits for Maritime Wide Area Search (MWAS) Radar”, OSTI.GOV, 2020/5/1, 檢索日期2021/4/21, <https://www.osti.gov/biblio/1631080>。

註19 Laurence Goasduff, “Gartner Forecasts Global IoT Enterprise Drone Shipments to Grow 50% in 2020”,



購買無人機，但增長潛力最大的行業還是物流和電子商業。亞馬遜和DHL等全球品牌一直在吹捧「無人機交貨服務即將到來」的概念，但是直到現在，這些計畫才逐漸開始實現，並且嘗試在全球某些特定都會型城市開始推廣。為什麼大規模地運用無人機，落後於其他行業的商務程序？因為由大型無人機交貨的服務，對其性能和可靠性的要求與其他運輸行業完全不同。在全天候交付物件的互聯網世界中，零售商會需要龐大的無人機交貨機隊，這些無人機遍布在市區的各個物流站據點。為了讓無人機交貨在商業上變的可行，需要將飛行時間和航程最大化，並將補給和維修的停機時間降至最低。大型城市範圍內交貨無人機的機隊，對可靠性的要求非常嚴格，因為它們將持續受到各種因素和不斷變化的天氣狀況的影響。各個地方政府和國家層級將進行有力的監管，以確保交貨無人機的製造商和運營商，可以證明其機隊絕對安全可靠。

## 二、電漿奈米塗層技術

美國電商現在準備大規模推廣無人機，以便在廣闊的環境中進行頻繁和長期的自主運行，因此，電子零組件的可能故障必須排除。沿海地區的環境濕度、雨水、鹽霧，甚至城市地區的酸雨和其他大氣污染物，都具有造成短路和腐蝕的高風險。無人機技術看似日趨成熟且使用案例有限，但通常既有的經驗足以警告消費者，「不要在氣象不佳的條件

下操作無人機」。顯然，這並不是像「亞馬遜」、「DHL」、「谷歌」這種全球性的物流品牌會採用的正式解決方案，這些品牌會向客戶保證無論雨、雪或熱等天氣都不會延遲交貨。

今日，無處不在的旋翼無人機的外形尺寸

表2. 2019~2023年全球出貨量排名前5位的IoT企業無人機用例(千終端)

用例	2019	2020	2021	2022	2023
施工監控	141.1	209.8	294.2	394.3	509.5
消防監控	32.7	48.5	58.2	63.7	67.0
保險調查	31.8	46.4	67.2	96.3	135.8
警察取證	26.8	45.1	60.4	72.0	80.7
零售履行	12.9	24.9	44.4	75.1	122.0
其他用例	106.2	150.8	206.5	275.3	356.5
全部的	351.5	525.6	730.9	976.7	1,271.6

註：Gartner在其「物聯網預測」數據庫中預測了超過25個用例的企業無人機。由於四捨五入的原因，總計可能未加總。

資料來源：Gartner(2019年12月)

EGHAM, U.K., News Room, Gartner, 2019/12/4, 檢索日期2021/4/18, <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-12-04-gartner-forecasts-global-iot-enterprise-drone-shipmen>。



，使得機身全面的防水工作面臨挑戰。無人機無法像其他智能設備(如智慧手機)那樣被密封在水密盒中，或者長時間關機。如果內部密封或在外部加上「潛水衣」式防水會增加機身的重量，並限制了最大航程、飛行速度和有效載重。美國最新的技術是直接

在電路板和零組件上塗漆或噴塗的較厚適型防水塗層，可以防止雨水滲入，但還不能用於遙控連接器，因為它們會抑制導電性，並且隨著時間的流動變得易於破裂和脆質化。所以這就是「電漿奈米塗層技術」為無人機製造商提供理想解決方案的重點。



圖5. 2019~2027全球無人機市場增長潛力預測

資料來源：<https://www.transparencymarketresearch.com/inspection-drones-market.html>。

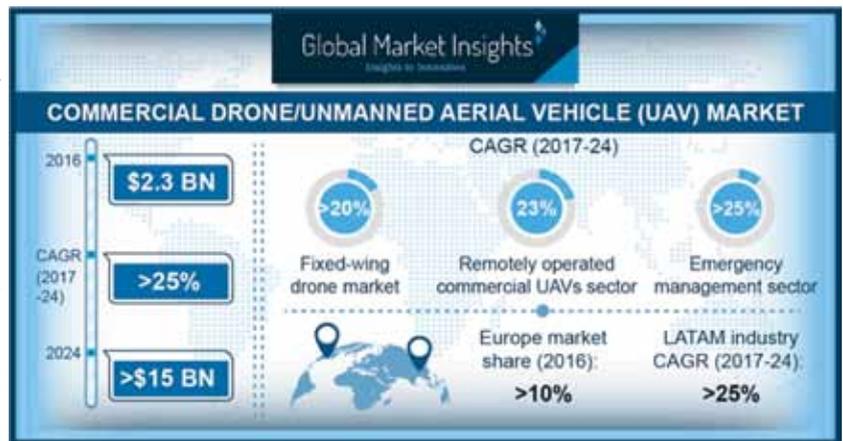


圖6. 2017~2024固定翼、商用遙控、應急無人機市場增長潛力預測

資料來源：<https://www.gminsights.com/industry-analysis/unmanned-aerial-vehicles-UAV-commercial-drone-market>。

### 三、奈米塗層減輕重量

電漿奈米塗層技術已廣泛應用於消費性電子行業，也可能已經保護了人們現用的智慧手機或藍芽無線耳機，該技術使用電漿融合，將看不見的超薄聚合



物薄層粘合到電子零件的表面。奈米塗層可實現無人機的全面部署工作和維修，但是與其他防水方法(如易裂紋的適型塗層)不同，奈米塗層可在產品的整個生命週期中，為電漿處理過的電子零組件設備提供持續的保護。從微觀上推論，薄的塗層還可以節省甚多重量，在中等重量的無人機上也可以進行奈米塗層保護，重量僅為半公克，而採用「潛水衣」或類似的機械屏障則需要170公克以上。

實際上，某些常用的防水方法會使無人機的重量增加多達12%。研究顯示，無人機的重量與預期的電池壽命有關，而性能的減低幾乎與重量的增加成了正比。最好的情況是每架無人機每次充電可將電池續航時間提高12%，這已經是令人非常滿意的結果，但是在全球機隊中擴大規模時，還可節省更多的費用。例如，依專業行家預測，美國商用無人機的機隊可能接近200萬架，每架無人機一次充電即可飛行24公里。使用超輕型奈米塗層，可以將飛行時間縮短相當於每天在美國境內進行多達30,000次旅行的距離，或每年在全球範圍內超過100萬次的旅行。大型跨國零售商和物流公司已經在無人機技術上進行了大量投資，以確保在迅速崛起的市場中佔據主導地位，因此利用高科技解決方案(如奈米塗料)的收益實在是不容小覷。(表2)(圖5~6)

### 陸、結語—軍民通用技術存在巨大商業潛力

從科技發展的歷史進程分析，無人機的問世，就在凸顯自動化技術向人工智能化過渡的一種趨勢，以「節約成本」、「降低風險」為基本考量的各種型號無人機趨附應用市場的需要，結合「模組化」工業概念，配合軍民通用技術發展，開拓更廣泛、更便利的實用化途徑，已經成為必然的基本型態。然而，在無人機越趨普及化的潮流下，城市型都會高度發展的國家和地區，卻未必能有可供本質上為「遙控載具」的無人機無限發揮的空間，由於世界主要大國仍然掌握頻譜的使用權力，因此，無人機技術也將持續由軍備大國主導，以因應強權維護傳統安全與利益的高科技工具資本，所謂「科教興國是大主題、科技強軍是真道理」這一點，是任何企圖發展無人機的科研單位必須認清的大前提。

由於無人機的應用也跨足到民用範疇，歐美的軍事智庫地位也跟著水漲船高，開始從向「全球鷹」提供技術支援的各家國防系統廠商，和提供替代解決策略的系統公司，分別獲得研究資金，這兩個維持美國與其盟國無人機先進技術的關鍵單位，今後將會更倚重諮詢的專業評估，例如「國際電子與電機協會」(IEEE)，加大



產、官、學之間的聯繫，開發更多的無人機軍民通用技術商機。

隨著無人機開始被世界上許多頂級行業廣泛使用，製造商和第一線用戶面臨著嚴峻的新挑戰。下一代商用無人機將需要在全天候條件下運轉飛行，並在運輸各種有效承載的同時盡可能地漫遊。隨著電池技術和人工智能(AI)的進步，可將無人機帶來的「全球社群」夢想變成現實，製造商不應忽視奈米技術幫助無人機實現從利益好奇心，到全球經濟不可缺少的巨大潛力<sup>[註20]</sup>。

## 參考資料

期刊：

1. S. I. Tsunoda, F. Pace, J. Stence, M. Woodring, “Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar”, General Atomics, (Orlando, FL : SPIE Aerosense, Vol. 3704, 1999)pp.1-8.

網路：

1. Hope Hodge Seck, “How to Defeat a Drone Attack: Raytheon Shows Off New Tech in Tabletop Exercise”, Military.com, 2020/1/24, <https://www.military.com/daily-news/2020/01/24/how-defeat-drone-attack-raytheon-shows-new-tech-tabletop-exercise.html>。
2. General Atomic, “Lynx Multi-Mode Radar”, Surveillance, Tracking, Targeting for Manned and Unmanned Mission, <https://www.ga-asi.com/radars/lynx-multi-mode-radar>。

---

## 作者簡介

軍事科技作者耿志雲，國防大學復興崗政治研究所中共解放軍研究組100年班軍事學碩士，國際電子戰協會會員，曾任軍事專欄作者、軍事刊物編輯

---

註20 電漿(Plasma)技術基於電暈處理(corona treatment)。與技術難度較小的電暈處理系統相比，電漿處理在氮氣環境中進行。在標準電暈處理中，電漿放電會在電暈電極和用於電極的零組件之間的氣隙中點燃。電漿放電會導致電極間隙環境中的空氣與材料表面之間發生不同的化學反應。周圍空氣由大約78%的氮氣，20%的氧氣，1%的氫氣和少量的多種不同氣體組成。在許多電暈處理應用中，可以藉由增加環境中氮的比例來優化處理的結果。電漿處理站可以向排放間隙注入氮氣來實現這一點：更精確地控制排放氮氣和處理結果。電漿是濕化學底漆應用的現代替代品，排除了存儲和處置化學品的高成本，以及消除了噴塗底漆和乾燥工藝步驟的高消耗和時間消耗。該系統使用的是氮氣，它的特色在於不是濕化學藥品，對環境絕對無害。