網通次世代防務：從波音無人機研究看軍用通信技術的演進與變革

月刊編輯組

科技在變，打仗的方式也在變。從美國波音公司（Boeing）最近的研究可以發現，現代軍用無人機的「通訊技術」已經有了翻天覆地的改變。過去的無人機就像「遙控汽車」，只要訊號被敵方蓋掉就會當場迷路；但現在的次世代無人機，已經進化到大腦內建AI、就算沒有 GPS 和基地台，幾十架無人機自己也能在空中「手牽手」組成一個摔不爛、斷不了的超級通訊網路。

軍用通訊的三大革命：從「遙控木偶」到「自主思考」

如果把戰場比喻為一個演算法的競技場，無人機的通訊技術一共經歷了三個階段的進化：

發展階段	通信特徵與技術架構	代表性波音研究與產品	核心戰術侷限/突破
第一代：視距/無線電操控	就像傳統無線電，必須在看得到、沒有遮蔽物的地方「一對一」直接控制。	ScanEagle 掃描鷹無人機	致命弱點： 只要飛得太遠、遇到複雜地形，或者被敵方用電子干擾，無人機就會立刻斷線失控。
第二代：衛星中繼與載人網絡	引入了衛星通訊和寬頻網路，讓前方無人機與後方載人飛機可以互相傳遞情報。	MQ-25 刺鰩無人加油機	仍有風險： 雖然飛得遠，但如果後方的指揮母艦為了躲避敵人而關閉無線電，前方的無人機還是會面臨斷鏈危機。
次世代：AI去中心化蜂群組網	無人機之間自己就能「平台對平台」互相溝通，不再依賴單一指揮官或衛星。	MQ-28 Ghost Bat 幽靈蝙蝠 平台試驗	突破點：不依賴單一指揮官或衛星，遭電子干擾時可自主協同、持續維持定位與通聯。

剖析次世代軍用電信的四大關鍵變革

波音透過其最頂尖的先進技術部門（如Phantom Works），在多次實戰化測試中展示了以下四項顛覆傳統無線電邏輯的電信技術突破：

1. 頻寬與速度的極限：高動態定向網路波形（DNW）民用5G追求高頻寬以滿足影音串流，而軍用通信則在追求頻寬的同時，更要求極致的抗干擾能力。波音開發的DNW（Directional Network Waveform，定向網路波形）技術，能建立高速、高動態的空中戰術IP網路。其數據傳輸率比傳統戰術數據鏈快上1,000倍。它能將寬頻訊號聚焦並精準定向發射，不僅減少訊號外洩的風險，更能確保多架無人機所蒐集的4K戰場影像、雷達點雲（Point Cloud）等大數據能即時、無延遲地同步給整個編隊。
2. 擺脫電信導航依賴：「無訊號環境」的認知無線電與生存直覺在電子戰最強烈的爭奪性戰場中，敵方會釋放涵蓋全頻段的強大干擾雜訊，導致GPS訊號與傳統通訊頻段全面失效（類似全頻段蓋台）。次世代無人機對此導入了「認知無線電（Cognitive Radio）」與新型AI搜索演算法。當偵測到某個頻段遭干擾時，系統會自

動在微秒內跳頻至乾淨的頻段；即使面對全頻段徹底阻絕、完全沒有任何無線電訊號的極端狀態，無人機也能切換至內建的多光譜機器視覺，靠著智慧型「圖形識別」自行判別相對位置並追蹤敵方射頻源，展現出「斷網狀態下」的自主生存直覺。

3. 空中無盲區Wi-Fi：去中心化的蜂群網狀網路（Mesh Network）現代家庭常用「Mesh Wi-Fi」來消除透天厝的訊號死角，其原理是讓多台路由器互聯，哪一台斷線，其他台就自動補上。次世代軍用通信正是將這項技術搬上了天空。在「去中心化蜂群智慧」的架構下，每一架無人機都是一個會飛的「行動基地台兼路由器（Router Node）」。它們在空中透過動態多跳傳輸（Multi-hop）互相傳遞封包。如果其中幾架無人機遭到擊落，剩餘的節點會在千分之一秒內重新計算最佳路由、自主補位，整體戰術網路的拓撲結構與傳輸功能依然完好如初。
4. 底層硬體的絕對資安：網通晶片的非紅供應鏈韌性在電信世界中，硬體層（Hardware Layer）的安全是一切資安的根本。如果晶片或網通設備在製造過程中被植入惡意後門、硬體木馬或間諜晶片，軟體再怎麼加密都無濟於事。隨著全球地緣政治緊張，美軍在發展先進網通技術的同時，正全面啟動網通硬體的「去風險化（De-risking）」。美方正逐步將關鍵的通訊零組件、射頻晶片與半導體供應鏈移向具備資安優勢與頂尖製程的信賴夥伴——其中，台灣憑藉著完整的半導體生態圈與高資安標準的在地網通廠商，正扮演著構築這道「非紅硬體資安護城河」的核心關鍵角色。

結語：網絡韌性決定未來防務的勝負

從波音無人機的通訊演進中不難發現，現代國防的競爭維度已經從傳統的「火力、速度、裝甲」硬體比拼，全面提升為「頻譜控制權、演算法與網絡韌性」的資通訊科技對決。

次世代網通防務的成功，本質上就是將脆弱的「單點星狀拓撲（Star Topology）」網路，轉化為具備自我修復能力的「分散式網狀拓撲（Mesh Topology）」。這種去中心化、內建認知跳頻與 AI 自主思考的通信架構，讓傳統以「切斷傳播媒介」為手段的電子蓋台戰術逐漸失靈。

這場軍用電信技術的變革，也正在重塑全球高科技產業的結盟版圖。台灣在 5G、衛星通信硬體、半導體晶片製造以及硬體資安領域積累的深厚實力，讓我們在這場「高韌性信賴供應鏈」的重組中，成為國際安全合作中不可或缺的科技巨擘。未來的無線通信，不僅要在民用市場追求 6G 的超連結，更將在軍用防務中，築起一道由 AI 與堅韌網通科技打造的數位鋼鐵防線。

科技名詞隨身卡（科普小結）

MANET（行動自組網）：一種不需要固定基地台的無線網路，每個移動設備（如無人機）都能當路由器，自己連成一個網路。

DNW（定向網路波形）：如同無線電界的「雷射光束」，把訊號精準射向隊友，傳得快、不容易被偷聽、也不容易被干擾。

認知無線電（Cognitive Radio）：會自己「聽」空中哪裡在塞車（被干擾），然後自動跳到最順暢、最安全的頻道去溝通。

非紅供應鏈：排除特定地緣政治風險區域的硬體製造鏈，確保晶片從設計到封裝都沒有被偷塞惡意後門。