



從美軍指管系統發展規劃探討國軍行動隨意網路(MANET)軍事應用之研究

作者/魏君旭、林于令

提要

- 一、現今行動通訊技術與網際網路快速發展，行動隨意網路(Mobile Ad-hoc Network, MANET)是一種新興的無線網路技術，已受到越來越多關注和應用，廣泛應用於軍事和民間領域。
- 二、美軍為滿足在未來戰場上快速移動、即時通訊與傳輸數據需求，已開始廣泛運用行動隨意網路技術與設備，藉以實現高效的即時通訊、情資共享與精準定位等功能，達成「聯合全域指揮與管制(Joint All-Domain Command and Control, JADC2)」願景。
- 三、面對中共軍力持續發展及提升，國軍迫切需要引進新的技術與設備，改善現有老舊、功能受限之通資系統與裝備，實可參酌美軍行動隨意網路發展規劃與運用，籌建具行動寬頻、自動構網、自動中繼、強韌靈暢、穩定可靠之「行動寬頻資通系統」。
- 四、本研究歸納分析後以「異質網路整合，支持聯合全域指管」、「分散網路架構，強化系統數位韌性」、「動態頻譜管理，建構智慧安全連網」等面向，提出國軍通資系統精進策略芻議。

關鍵詞：行動隨意網路、行動寬頻資通系統、自動構網、自動中繼

前言

現今行動通訊技術與網際網路快速發展，帶給人們更多方便、可靠等應用體驗，相對國軍通資系統卻未與時俱進，與民用行動通訊技術傳輸速率、運用效能差異日漸擴大。迫切需要引進新的技術與設備，加速改善現有老舊、功能受限之通資裝備。目前國軍通資系統面臨須層層轉發，無法即時整合、互聯互通以及傳輸頻寬不足問題。

戰場上通資系統為指揮管制之中樞，發揮聯合作戰之必要工具，自古以來即是作戰成敗的關鍵因素。行動隨意網路(Mobile Ad-hoc Network, MANET)是一種新興的無線網路技術，具備行動寬頻、自動構網、自動中繼、強韌靈暢與高度可靠等優點，已受到越來越多關注和應用，廣泛應用於軍事和民間領域。

本研究藉行動隨意網路技術發展、美軍指管系統運用規劃與未來發展趨勢，



進而探討國軍運用行動隨意網路技術與設備，強化國軍通資平臺之效益，研擬國軍通資系統精進策略芻議，俾有效整合國軍各部隊指管系統、感測器與武器載臺為一體，提升戰場透明度，縮短反應時間，加速作戰節奏，有效發揮聯合作戰效能，期能達到殲敵致勝之目標。

行動隨意網路發展探討

一、技術概念與發展演進

(一)技術概念

行動隨意網路(Mobile Ad-hoc Network, MANET)，又譯行動隨建即連網路，或稱行動網狀網路(Mobile Mesh Network)，其最大特點為不需依賴固定式基礎設施(基地台)，各行動節點間可直接通訊，隨時隨地改變連結狀態、訊息交換與溝通，以無線方式自動組織網路，每一個行動節點都是中繼台透過多重跳躍(Multi-hop)功能，將封包自動中繼轉發到路徑中相鄰節點，對某一特定應用提供服務。近年MANET網路技術已廣泛應用於軍事、商業、工業應用、環境監測、災害救援通訊使用，亦常運用於空中機群、船隊及汽車間通訊使用。¹

(二)發展演進

最早可追溯到1968年ALOHA網路和1970年代美國國防先進研究計畫局(DARPA)所推動的「分組無線網路(Packet Radio Network, PRNET)」專案，隨後在1980年代演變為自適應、穩健和安全的網路演算法，並在PRNET基礎上，研究自組織和自我修復之移動網路。爾後由美國電機電子工程師學會IEEE 802.11標準委員會，將PRNET改稱為Ad-hoc網路，進一步推動自組織網路發展。“Ad-hoc”一詞源自拉丁文，原意是臨時、專用的意思，意指Ad-hoc網路無中心、自組織性、動態變化網路拓樸和多重跳躍路由特性。²

網際網路工程任務組(Internet Engineering Task Force, IETF)於1997年成立MANET網路技術開發小組，2000年成立MANET網路技術委員會，著手制定MANET網路標準與路由協議制定，例如2003年發布AODV規範，2014年發布OLSRv2規範，並探討MANET網路與其他網路技術的整合。³

DARPA近年持續致力於MANET網路技術研究，例如2010年與雷神公司

1 連耀南，〈隨意型網路Walkie-Talkie-Like緊急通訊系統〉，<https://www.cs.nccu.edu.tw/~lien/Pub/c81u1net.pdf>，(檢索日期：2023年12月7日)。

2 Humayun Bakht, “History of mobile ad-hoc networks,” Liverpool John Moores University School of Computing and Mathematical Sciences, <https://www.academia.edu/2558879/The_history_of_mobile_ad_hoc_networks> (檢索日期：2022年12月7日)。

3 “Mobile Ad-hoc Networks (manet),” IETF Datatracker, <<https://datatracker.ietf.org/wg/manet/documents/>> (檢索日期：2022年12月7日)。

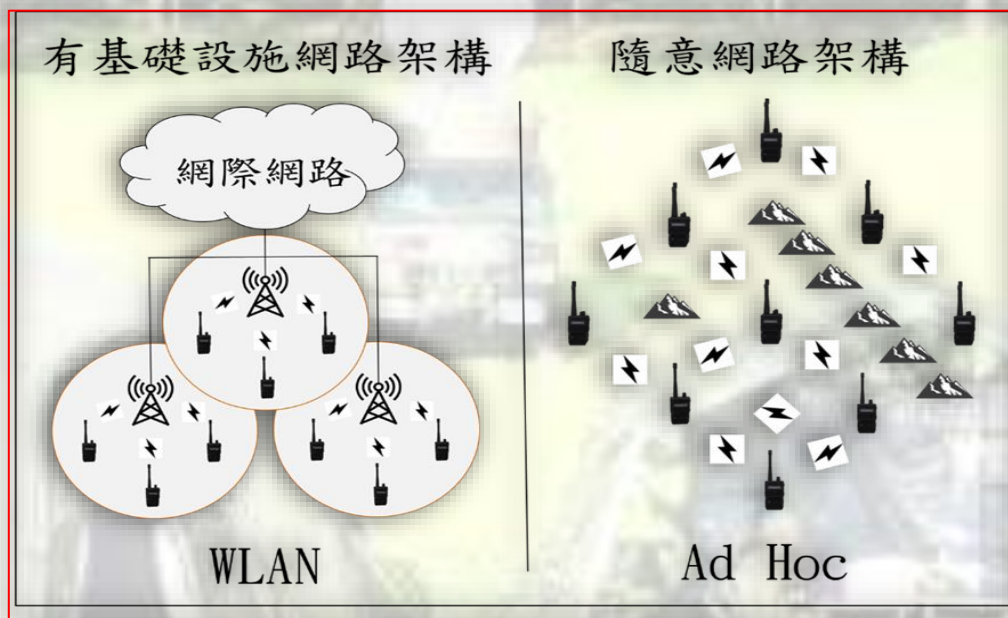
合作的Mobil Ad-hoc Interoperability Network GATEway計畫，實現高速、可靠和安全數據傳輸；於2013年Mobile Hotspots Program計畫達成無人機高數據無線鏈路，傳輸速率達1.8Gbps、傳輸距離達50公里；2018年Scalable Wideband Autonomous RF Mapping MANET計畫發展頻譜感知和管理能力；2021年Distributed Beamforming Solution計畫以分散式波束成形技術提高MANET網路效能、覆蓋率和抗干擾能力。⁴隨著MANET網路技術發展，已從初期簡單網路連接，持續優化協議、節點部署、路徑選擇，提升MANET網路運作效能，進化到現在複雜多層次網路結構，也加入軟體定義網路、網路功能虛擬化功能，進一步擴展MANET網路應用領域和發展前景。

二、網路架構與路由協定

(一)網路架構：根據IEEE802.11標準其網路架構(如圖1)⁵分別為：

- 1.有基礎設施：所有節點需經基地台(Access Point,AP)控制連線與資料存取。
- 2.隨意網路架構(Ad-Hoc Network)：各節點不需透過AP存取，透過連線直接通訊與資料存取，當超出傳輸範圍時，由鄰近節點採多重跳躍(Multi-hop)方式將封包轉送到目的地。

圖1：無線網路架構圖



資料來源：作者自行繪製。

4 “DARPA Awards Silvus Up to \$13.1M to Develop Distributed Beamforming Solution,” Silvus Technologies Inc. , <<https://apnews.com/article/technology-bb3422bce99983d6044a647d4bf1651a>>(檢索日期：2023 年 12 月 7 日)。

5 惠汝生，〈無線Ad Hoc行動隨意網路架構之技術發展評析〉，《中華民國電子零件認證委員會》，<<http://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-49-6.pdf>>(檢索日期：2022 年 12 月 14 日)。



在MANET網路中所有的行動節點都是完全自主，兼具終端與路由功能，各節點可直接與鄰近節點，透過無線方式進行通訊、轉發與路由，自動構網、自動中繼、自動繞徑(如表1)，因此MANET網路裡的節點均能沿著隨機方向移動，形成臨時、無中心、多跳之動態網路拓樸。⁶

表1：行動隨意網路特點

項次	特點	說明
01	無基礎設施	不須固定基礎設施(基地台)協助，由各行動節點直接通訊資料傳輸而形成，網路中所有節點都是對等無階層區分具有相同角色；每個節點是移動、臨時與自主的，兼具終端與路由器功能。
02	位置與動態拓樸	所有節點都可以自由移動、進出網路，具備自動構網(Self-forming)、自動復原(Self-healing)功能，不斷改變其鏈結狀態。
03	網路頻寬與傳輸問題	傳輸頻寬會比有線網路來的小。主要因為多路存取、多徑衰落、雜訊和信號干擾影響，會隨著時間、距離推移而下降。
04	多跳通信	支援多重跳躍(Multi-hop)通信建立網路繞徑(Routing)；當兩節點距離超出範圍或因地形導致阻通，能透過鄰近節點進行轉發。
05	高誤碼率	行動節點間路徑由多個工作階段共用。各節點間通訊受到雜訊、衰落和干擾影響。在某些情況下，移動節點間路徑遍歷多個無線鏈路，並且鏈路本身可能是異質的，容易導致高誤碼率。
06	網路安全性	MANET 網路具分散性，其路由、封包轉發等所有網路功能都由節點本身執行，因此須強化網路的安全性。
07	設備安全性	MANET 設備通常小巧便攜，不受位置限制。因此，這些設備容易丟失、損壞或被盜。
08	電源管理	大多數 MANET 設備都是小型手持設備，僅具有有限電源管理和儲存容量。因此 IEEE802.11 設計省電協議，以延長使用時間。

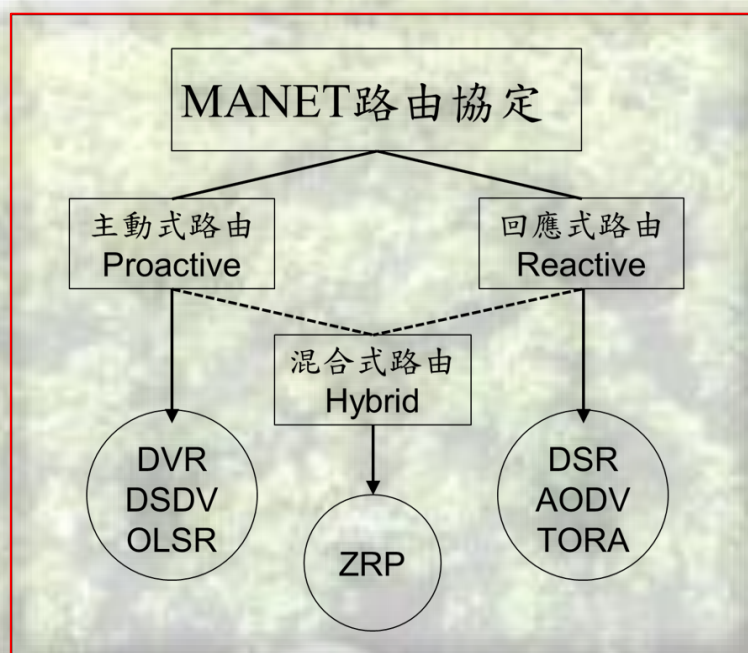
資料來源：作者參考D.E.Mustafa Ahmed and O. O. Khalifa,“An Overview of MANETs:Applications, Characteristics, Challenges, and Recent Issues,” International Journal of Engineering and Technical Research(IJETR),Vol.6 No.4,April 2017彙整製表。

6 D.E.Mustafa Ahmed and O.O. Khalifa,“An Overview of MANETs: Applications, Characteristics, Challenges, and Recent Issues,” International Journal of Engineering and Technical Research(IJETR),Vol.6 No.4,April 2017, pp 128-132.

(二)路由協定

在MANET網路中，所有行動節點既是資訊發送者、也是接受者，還要充當路由器功能，將收到的封包再轉發出去，其路由協定可區分為主動式(Proactive)、回應式(Reactive)及混合式(Hybrid)等三種路由方式(如圖2)。⁷

圖2：MANET網路路由協定



資料來源：作者自行繪製。

1.主動式路由：

(1)距離向量路由(Distance Vector Routing, DVR)：DVR利用距離向量方式，主動地將路由表給相鄰節點更新路由表，達到整個網路路由選擇。優點是容易實現和管理，適應動態拓撲變化。缺點是可能會難以收斂產生無限迴圈問題和廣播風暴問題等。

(2)表格驅動式路由(Destination Sequence Distance Vector, DSDV)：DSDV針對DVR進行修正而得。利用目的地循序號碼來判斷路徑是否需要更新，當網路拓撲結構改變時，透過週期性傳送廣播封包來告知新的路由資訊。

(3)優化鏈路狀態路由(Optimized Link State Routing, OLSR)：OLSR透過搜尋每個節點周圍的拓撲信息來獲得網路中各個節點之路由信息，並且利用這些信息建立路由表，以實現節點之間的通信。

⁷ 陳裕賢，《無線網路與行動計算》(全華圖書股份有限公司，2013年)，頁3-12~3-17。



2. 回應式路由：

(1) 動態來源路由(Dynamic Source Routing, DSR)：DSR每個節點僅儲存其直接相鄰節點路由信息，路由路徑的資訊附在封包表頭，中繼節點會按照該資訊，依序往目的節點轉送，其優點在不需要定期更新表格，適合小型和低流量的網絡。缺點為可能產生大量重複和無效封包、不適合大型和高流量網絡。

(2) 隨意網路需求距離向量路由 (Ad-hoc OnDemand Distance Vector, AODV)：AODV每個節點都可與其相鄰節點進行通信，需要時才進行路由查詢，不像其他路由協議維護整個網路路由表。可以節省路由維護的開銷，提高路由效率。

(3) 臨時排序路由演算法(Temporally Ordered Routing Algorithm, TOR A)：能計算出多條無迴圈路徑通往目的地，構成一個以目的地為導向的有向無迴圈圖。

3. 混合式路由：

分區路由協議(Zone Routing Protocol, ZRP)結合主動式與回應式路由協議特點，透過自適應切換決定使用那一種路由協議，能提高路由效能和網絡性能。例如在回應式路由AODV中加入類似DVR定期更新路由資訊，解決AODV非最佳路徑問題。

三、MANET網路關鍵技術應用

近年整合編碼正交分頻多工、波束成形、多輸入多輸出天線等技術，提供高速連接和良好服務品質(Quality of Service, QoS)，提升系統運用效能。

(一) 編碼正交分頻多工技術(Code Orthogonal Frequency Division Multiplexing, COFDM)：

一種多載波數位通訊調變技術，其原理是各子載波相互正交，降低相互干擾，抵抗多重路徑和頻率選擇性衰落，能根據環境變化自動調整傳輸參數，確保穩定連接與訊號品質。⁸

(二) 波束成形(Beamforming)技術：

利用天線陣列將無線電波聚焦在同一方向，透過信號相位調整和天線陣列設計，增強傳輸和接收訊號效能，並抑制來自其他方向干擾。可提高訊號傳輸品質、傳輸速率、傳輸距離和頻譜運用效率，減少多重路徑干擾。⁹

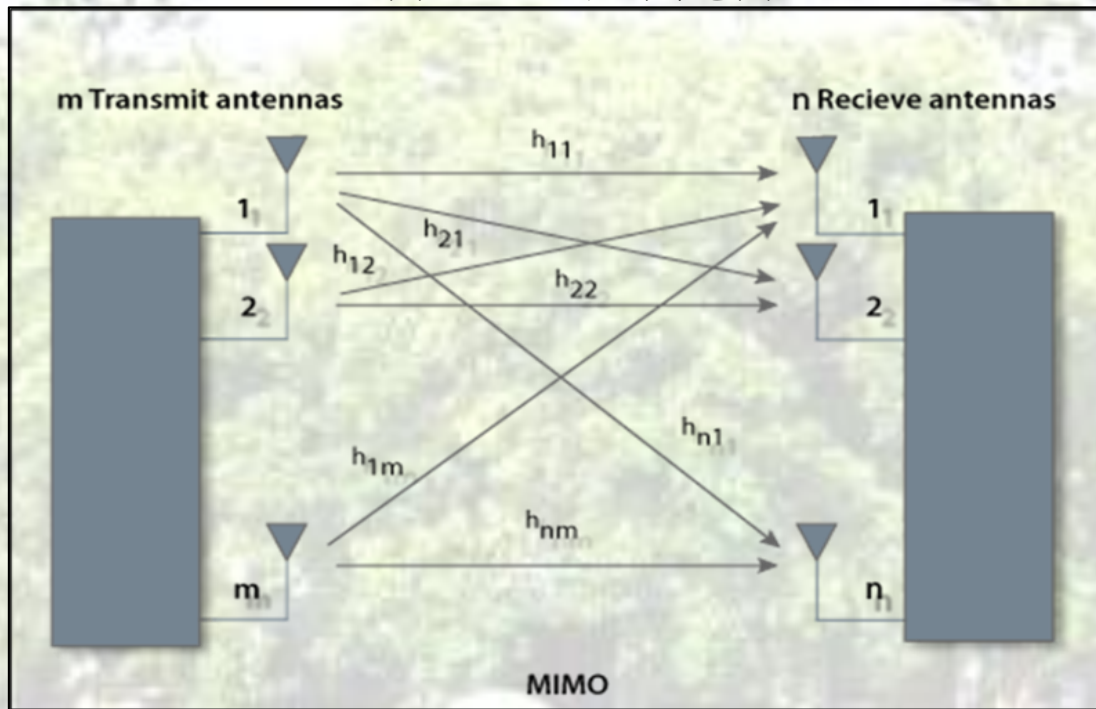
(三) 多輸入多輸出天線(Multi-Input & Multi-Output, MIMO)技術：

8 W.Y. Zou and Y.Y. Wu, "COFDM: an overview," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.41 Issue 1, Mar 2015, pp 1.

9 李建鵬、葛鍵霆，〈行動通信技術發展對軍事應用之研究〉，《空軍學術雙月刊第 683 期》，頁 95-98。

MIMO天線係指無線電發射、接受端分別使用多個發射與接收天線，利用多重路徑傳輸來抑制頻道衰落，可增強通訊品質、傳輸速率與資料吞吐量，提高通訊穩定性和可靠性(如圖3)。MIMO技術同時也是5G系統的重要組成。¹⁰

圖3：MIMO天線示意圖



資料來源：“INTRODUCTION TO MIMO”，<<https://silvustechologies.com/why-silvus/technology/introduction-to-mimo/>>

(四)多頻道網路：¹¹

為基於軟體定義無線電(Software Defined Radio, SDR)技術的系統，運作原理如下：

- 1.頻道分配：每個節點都可以使用多個頻道，這些頻道可以是實體上不同的頻段，也可以是時間上切換的頻道，節點之間需要進行頻道分配，以避免頻道競爭和干擾。
- 2.頻道切換：當節點在某個頻道上傳輸數據時，其他節點可以在空閒頻道進行傳輸。若頻道出現干擾或壅塞，節點可自動切換到其他頻道傳輸。
- 3.頻道同步：包括時序同步和頻率同步。
- 4.路由選擇：包括選擇最短路徑、避免壅塞、平衡網路負載等。

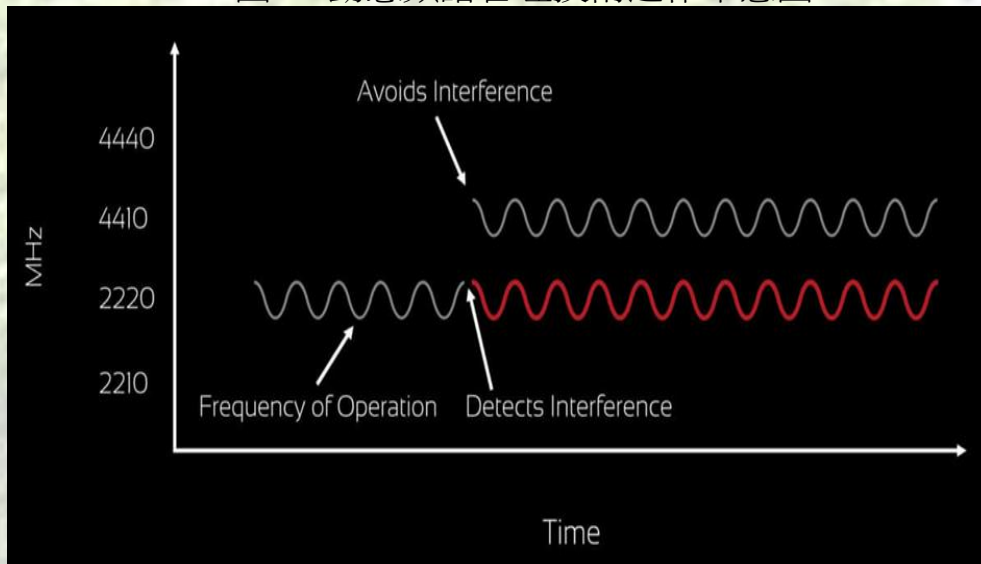
¹⁰林福林，〈從天線陣列/方位角到智慧型天線波束成形基本原理一次看懂〉，《新通訊元件雜誌》，2020年8月7日，<<https://www.2cm.com.tw/2cm/zh-tw/tech/A540D94709A74EF7BE05F4BFF1D54451>>(檢索日期：2022年12月28日)。

¹¹李書全，〈聯合戰術無線電機發展與運用之研究〉，《陸軍通資半年刊第136期》，2021年10月，頁70。

(五)動態頻譜管理：

在可用頻譜範圍內自動選擇最佳頻率和調變技術，提高傳輸速率和可靠性。¹²即時監測和分析無線頻譜，以便在受干擾或壅塞時更改頻率和調制方式，在無線電頻道中自適應地找到最佳路徑，確保高速和可靠數據傳輸(如圖4)。¹³

圖4：動態頻譜管理技術運作示意圖



資料來源：“MANET Interference Avoidance(MAN-IA) ,” Silvus Technologies Inc. ,<<https://silvustechologies.com/why-silvus/technology/manet-interference-avoidance/>>

三、我國發展現況與挑戰

資通訊技術蓬勃發展的今日，MANET網路技術與應用愈來愈受到重視，如Mesh Wi-Fi分享器已成為國內各大都市、熱點或區域重要無線網路建設。許多研究亦致力於MANET網路多重繞徑(Multiple Route)、多重跳躍(Multi-hop)技術，逐次運用於軍事、緊急救援與特定領域。

(一)發展現況：

1.軍事應用：近年國軍著手將MANET網路技術與設備，逐步導入軍種內兵科協同作戰運用，讓戰場上士兵、機動車輛、船艦、無人載具與岸台藉由自動構網、自動中繼功能有效延伸傳輸距離，建立即時通信網路與影像畫面，提高作戰效率和即時情報交換。¹⁴海巡署近年也將MANET網路技術運用於海巡智慧船舶指揮管理系統，配置於海巡安平級巡防艦(如圖5)，¹⁵依「國防法」第4條規範

12同註9，頁100。

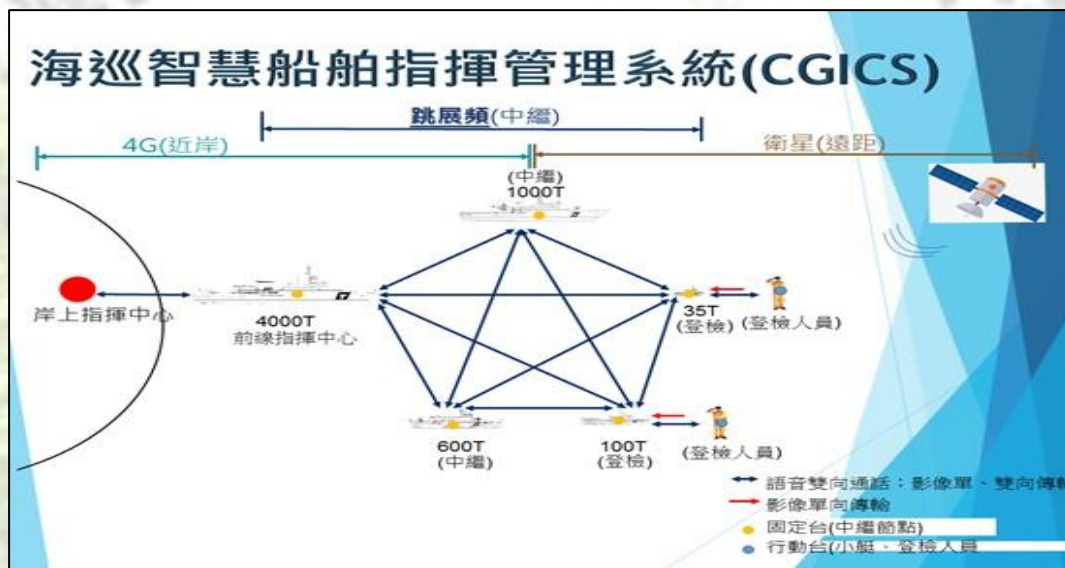
13“MANET Interference Avoidance(MAN-IA)”, Silvus Technologies Inc. ,<<https://silvustechologies.com/why-silvus/technology/manet-interference-avoidance/>>(検索日期：2022 年 12 月 28 日)。

14鄭南宏、焦興也，〈淺談國軍通信系統未來發展趨勢-以軟體定義無線電為例〉，《陸軍通資半年刊第 130 期》，2018 年 9 月，頁 11-13。

15朱明，〈海巡安平級雙船體巡防艦軍規指揮管理×偵蒐系統是最大亮點〉，《上報》，2020年12月11日，〈http

，戰時海巡署依行政院命令納編海軍作戰序列，進行監偵、搜救及聯合制海作戰等任務。

圖5：海巡署CGICS運用示意圖



資料來源：朱明，〈海巡安平級雙船體巡防艦軍規指揮管理×偵蒐系統是最大亮點〉，《上報》，2020年12月11日，〈https://www.upmedia.mg/news_info.php?Type=1&SerialNo=102004〉。

2.中科院：為我國國防科技研發單位，近年致力於「軟體定義無線電」與「單兵戰鬥系統」研發，朝自主開發跳/展頻、波束成形技術、MIMO天線、多頻道網路發展，搭配微型無人機通信中繼，建構國軍「戰鬥物聯網」，提升戰場感測、通信與資訊處理能力。¹⁶

3.學術研究：國內大學和研究機構在MANET網路領域進行許多研究和論文發表，包括路由協議、節點探索、電源管理等方面技術，定期舉辦「無線、隨意及感測網路」學術研討會和國際會議，以促進學術交流 and 技術合作。¹⁷

4.特定應用領域：例如智慧交通系統、物聯網(IoT)應用、無人機通信等。這些領域需要具有高度靈活性和移動性的通信系統，MANET技術能夠滿足這些需求。¹⁸

(二)挑戰：19

1.網路安全性：由於MANET是一個分散網路，沒有中央控制機構，較易

s://www.upmedia.mg/news_info.php?Type=1&SerialNo=102004>(檢索日期：2023 年 5 月 2 日)。

16徐方鴻，〈單兵戰鬥系統發展之研究-以美軍數位化戰士為例〉，《陸軍通資半年刊第131期》，頁93-106。

17<第十八屆無線、隨意及感測網路研討會(WASN 2023)>，2023 年 4 月 17 日，<<https://sites.google.com/view/wasn2023/index?authuser=0>>(檢索日期:2023 年 5 月 2 日)。

18<无线自组织网络简介>，2021年2月6日，<<https://zhuanlan.zhihu.com/p/348937900>>(检索日期:2023年5月2日)。

19同註 5，頁 42-43。



受到安全攻擊和惡意行為威脅，因此需針對MANET網路進行相應的安全防護和加密措施。

2.電源管理：有效地管理和節省節點能量，延長網路運行時間，須持續開發低功耗的路由協議和電源管理機制，提高網路效能和可持續性。

美軍指管系統發展規劃與運用分析

一、美軍C⁴ISR系統發展規劃

隨著近年新興通資技術快速發展以及戰爭環境與型態轉變，美軍提出聯合全領域指揮與管制、馬賽克戰、分散式作戰和等新型作戰概念，美軍C⁴ISR系統不斷地創新以適應現代化作戰需求，發展歷程區分「單系統」、「獨立系統」、「整合系統」、「網路中心化」、「聯合資訊環境發展」與「數位現代化戰略」等六個時期(如表2)，²⁰美國國防部2019年發布「數位現代化戰略(DoD Digital Modernization Strategy, DMS)」，提供美軍無縫、敏捷、彈性、透明和安全基礎設施與服務，確立其數位現代化戰略目標。²¹

表2：美軍C⁴ISR系統發展歷程

發展歷程	代表系統	核心能力/作用	主要特點
單系統時期 (1950-1962年)	SAGE	美空軍防空系統	網路化、半自動化
獨立系統時期 (1962-1992年)	ATTCCS、NTCSS TACS、 WWMCCS	國防部、陸、海、空軍部隊各自指揮管制	獨立、專用系統、縱向單線指管
整合系統時期 (1992-1997年)	GCCS	提供跨軍種聯合作戰指揮管制	相容性、互操性和整合性系統
網路中心化時期 (1997-2013年)	GIG	聯合作戰指揮、管制、通信和網路運作能力	網路為中心、安全、互通與共享
聯合資訊環境發展時期 (2013-2019年)	JIE	運用雲端運算實現國防部無縫、互通、高效的點對點資訊共享	數據為中心、企業及資訊環境安全性、互操作性更強
數位現代化戰略時期 (2019年迄今)	DMS	推進美軍數位環境、發展網路安全、實現敏捷而彈性的防禦態勢	實現了IT現代化、企業級服務和產品、作戰雲

資料來源：作者參考<深度研究：美軍通信网络与信息系统70年>，《安全內參》，2022年3月12日，<<https://www.secrss.com/articles/40178>>彙整製表。

²⁰<深度研究：美軍通信网络与信息系统 70 年>，《安全內參》，2022 年 3 月 12 日，<<https://www.secrss.com/articles/40178>>(檢索日期：2023 年 2 月 1 日)。

²¹DoD CIO,“DOD DIGITAL MODERNIZATION STR ATEGY,” DoD OFFICE OF PREPUBLICATION AND SECURITY REVIEW,2019, pp.39-52.



二、美軍通訊系統類型²²

(一)戰略層級：提供國防部快速準確地下達命令。

1.「國防資訊系統網(Defense Information System Network, DISN)」：美國國防部全球資訊傳輸的主幹網路，為美軍提供語音、無線電報、影像等形式的服務。

2.「國防衛星通信系統(DSCS)」：提供美軍加密且可靠的語音與視訊通訊服務。

(二)戰術層級：軍團以下各級作戰平台通訊系統。

1.「戰術數據鏈路(Tactical Data Link, TDL)」：Link16為美軍當前主要數據鏈系統，使用UHF特高頻段，具有加密、展頻、跳頻抗干擾能力。

2.「戰術電臺(SINCGARS)」：具跳頻及抗干擾能力，為戰術級單位傳輸加密語音、類比或數位信號、提供視距通信服務。

3.「聯合戰術無線電系統(Joint Tactical Radio System, JTRS)」：採用軟體定義無線電、抗電磁干擾、頻譜管理等技術。²³JTRS最終因當時MANET網路技術與可擴展性不成熟為由，已於2011年終止專案執行。²⁴

4.「新一代MANET無線電臺」：美軍2020年起緊急採購MANET無線電設備(如：AN/PRC-148c、158、162、163、169、MPU5、TSM 900/950無線電機)，投入美國陸、海、空軍、陸戰隊部隊，並運用空中繫留無人機中繼與自動跟蹤天線，增加通信距離與覆蓋率。²⁵

5.「移動設備系統(Mobile Subscriber Equipment, MSE)」：美國陸軍營級以上戰術區域通信系統，透過大、小延伸節點和無線電入口，提供用戶語音、數據服務。²⁶

6.「遠征信號營-增強型(Expeditionary Signal Battalion-Enhanced, ESB-E)」：美國陸軍可快速部署、撤離的戰術通信網路系統。提供數據、語音和視訊影像等通信方式。²⁷

7.「移動目標用戶衛星通信系統(Mobile User Objective System, MUOS

²²同註 20。

²³同註 11，頁 57-60。

²⁴John R. Hoehn, "Joint All-Domain Command and Control: Background and Issues for Congress," Congressional Research Service, Mar. 18 2021, p18.

²⁵<MPU5 電台：美軍新一代無中心自組網智能單兵電台>，《人人焦點》，2020 年 12 月 13 日，<[https:// ppfocus.com/0/di57243a6.html](https://ppfocus.com/0/di57243a6.html)>(檢索日期:2023 年 2 月 15 日)。

²⁶同註 11，頁 62。

²⁷Amy Walker, "Army fields first unit with TRILOS radio and other new expeditionary network capabilities," U.S. ARMY, July.12, 2018, <https://www.army.mil/article/208372/army_fields_first_unit_with_trilos_radio_and_other_new_expeditionary_network_capabilities>(檢索日期:2023 年 2 月 15 日)。



)」：透過星載多波束天線提升系統頻寬、保密抗擾性，覆蓋範圍與強韌性，為美國海軍全球部署重要通信。

8.「戰術級作戰人員資訊網(Warfighter Information Network-Tactical, WIN-T)」：美國陸軍建構高速、高容量與抗干擾之戰術通資系統，具備自動構網、自動中繼、行動中寬頻戰術網路。²⁸WIN-T最終未達成全網動中通目標，2017年9月被美國國會終止計畫。

9.「綜合戰術網(Integrated Tactical Network, ITN)」：美國陸軍2017年啟動ITN計畫，利用MANET網路技術、軟體無線電、人工智慧，提升作戰指揮、態勢感知效能，彌補連級作戰能力不足。為戰術邊緣提供寬頻、強韌、敏捷與可靠網路。²⁹

三、美軍行動隨意網路運用

(一)美國國防部：

2021年提出「聯合全領域指揮與管制(Joint All-Domain Command and Control, JADC2)」願景，將陸地、海洋、空中、太空與網路空間的感測器整合連接到同一網路。從前各軍種各自開發戰術網路與指管系統，彼此互不相容，未來在JADC2框架下，透過人工智慧、雲端環境與新的通訊方法，實現各軍種間數據共享、決策支援和協同作戰(如圖6)。³⁰衛星網狀網路是JADC2基礎建設之一，美國國防部2022年完成加密雷射通訊系統測試，準備建構低軌衛星網狀網路，首批衛星群從2024年開始發射升空。³¹

(二)美國陸軍：

2020年啟動「融合專案(Project Convergence)」，以實現「人機融合」建立一個靈活強韌、自主智能、快速反應的戰鬥系統。該專案以「試驗場」為概念，每年在亞利桑那州尤馬試驗場進行設備試驗與徵求回饋，快速地測評戰術與技術。³²融合專案中廣泛運用MANET網路技術，說明如下：

1.單兵戰鬥系統：

(1)奈特勇士計畫(Nett Warrior, NW)：2021年起運用AN/PRC-148C手

28“Warfighter Information Network-Tactical (WIN-T),”General Dynamics Mission Systems,<<https://gdmission systems.com/communications/warfighter-information-network-tactical>>(檢索日期:2023 年 2 月 15 日)。

29“Integrated Tactical Network (ITN),”<https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/FY2020/army/2020_itn.pdf?ver=-3GRf6wR9GagCdAbJI-bsw%3D%3D>(檢索日期:2021 年 3 月 4 日)。

30“SUMMARY OF THE JOINT ALL DOMAIN COMMAND AND CONTROL STRATEGY,” U.S. Department of Defense,Mar. 2022,pp3-5.

31Alan Chen, <美太空發展署加密雷射通訊系統測試成功，衛星網狀網路 2024 上線>，《TechNews科技新報》，2022 年 6 月 15 日，<<https://technews.tw/2022/06/15/northrop-grumman-successfully-tested-encrypted-laser-communication-system/>>(檢索日期:2023 年 2 月 22 日)。

32<美國態勢感知之「項目融合 (Project Convergence)」>，2023 年 3 月 7 日，<<https://inf.news/military/88a84b7de2d7170d4077d6205ad16d4d.html>>(檢索日期:2023 年 2 月 22 日)。

持雙通道無線電，搭配智慧型終端用戶設備(End User Device, EUD)與戰術突擊套件(Android Team Awareness Kit, ATAK)，提供步兵精準定位、態勢感知、指揮管制與火力支援。³³該設備相容美軍現行無線電(如U/VHF、L-Band及SINCGA RS波形)，資料傳輸率達10Mbps、網路節點由原先士兵無線電波形(SRW)的30-40人擴展到200人以上，能在機動中、惡劣環境與天候中，為戰術邊緣提供寬頻、強韌、敏捷與可靠網路。³⁴

(2)整合式目視增強系統(Integrated Visual Augmentation System, IVAS)：2021年起運用AN/PRC-169無線電機，整合指管系統、無人載具與武器載台，透過混合實境(Mixed Reality, MR)技術運用，強化戰場定位與態勢感知，並與史崔克甲車整合讓車內官兵透過IVAS系統掌握車外即時動態與敵軍位置，離車後也能連結車上指管系統(如圖7)。³⁵並由第82空降師士兵透過IVAS系統連接直升機上指管系統與情資整合，有效空地整合作戰通訊能力。³⁶

圖6：JADC2運作架構圖



資料來源：作者參考“SUMMARY OF THE JOINT ALL DOMAIN COMMAND AND CONTROL STRATEGY,” U.S. Department of Defense, Mar. 2022翻譯製圖。

33“Nett Warrior(NW),”Program Executive Office Soldier, Nov.16,2022,<<https://www.peosoldier.army.mil/Equipment/Equipment-Portfolio/Project-Manager-Integrated-Visual-Augmentation-System-Portfolio/Nett-Warrior/>>(檢索日期:2023年2月22日)。

34“AN/PRC-148C IMBITR,”THALES,<<https://www.thalesdsi.com/product/anprc-148cimbitr/>>(檢索日期:2021年3月4日)。

35編譯郭正原／綜合外電報導，〈美IVAS整合載具系統掌握戰場態勢〉，《青年日報》，2022年1月5日，<<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1477320&type=vision>>(檢索日期:2023年2月22日)。

36編譯劉孜芹／綜合外電報導，〈整合空地作戰通訊能力 美陸軍將擴大應用IVAS頭盔〉，《青年日報》，2022年7月4日，<<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1421292&type=international>>(檢索日期:2023年2月22日)。



圖7：美國陸軍IVAS整合式目視增強系統



資料來源：編譯郭正原／綜合外電報導，〈美IVAS整合載具系統掌握戰場態勢〉，《青年日報》，2022年1月5日，〈<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1477320&type=vision>〉

2.戰術無線電：

(1)TSM波形：提供士兵「敏感但非保密(Sensitive But Unclassified, SBU)」網路環境。採用TW-950、875無線電機，運用MANET技術、資料傳輸率達16Mbps，適用各種具挑戰通訊環境，提供美軍步兵旅戰鬥隊(IBCT)各營即組建一個由數百個無線電組成之戰術網路，具有戰術優勢、操作簡單、擴充性高、互通性高以及網路可靠性佳等優點。³⁷

(2)士兵增強型網路波形(WREN-TSM)：以TSM波形為基礎，提供士兵安全、可擴展、穩健通訊。美國陸軍2021年針對4款WREN-TSM先進波形無線電執行「初始作戰測評(IOT&E)」，已通過無線電性能、相容與互通性評估，2022年交付部隊使用。³⁸工作頻段從30MHz到1850MHz，相容美軍既有SINCGARS、HAVEQUICK與其他傳統無線電，獲美國國安局Type-1保密認證，擁有更佳之保密性。

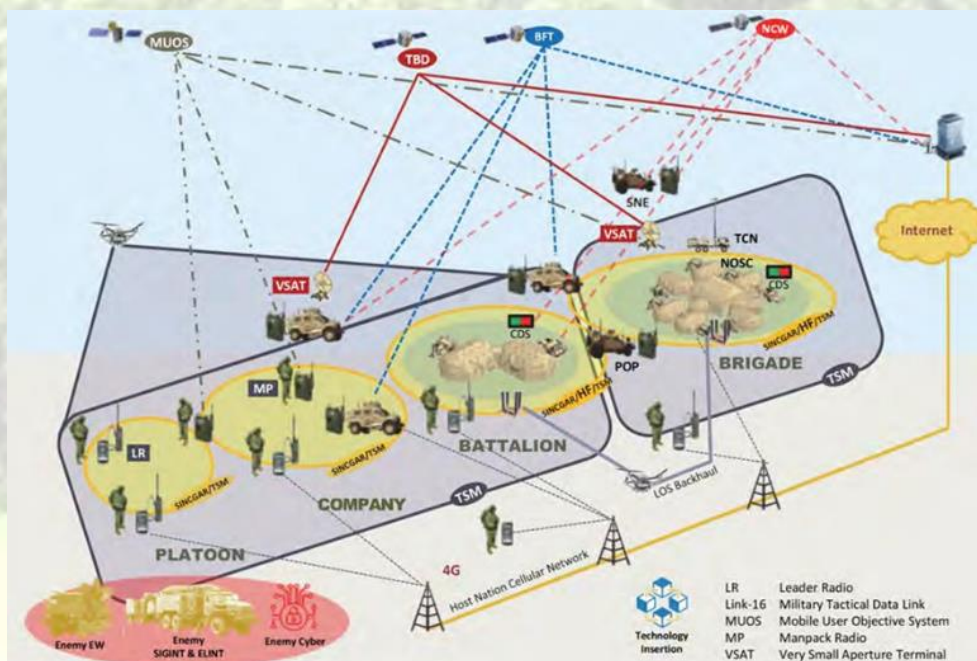
(3)綜合戰術網(ITN)：運用多項MANET網路技術與設備(如圖8)，除前述單兵戰鬥系統與戰術無線電外，在功能集21中運用AN/PRC-169連接步兵旅戰鬥隊旅、營指揮所，該型設備資料傳輸率(Data Rate)達200Mbps，在功能級23(C

³⁷“US Army to Field TrellisWare® Technology for All Tactical Radios that Comprise Integrated Tactical Network Capability Set 21,”businesswire,Oct.30,2020,<<https://www.businesswire.com/news/home/20201030005153/en>>(檢索日期:2023年2月22日)。

³⁸編譯郭正原／綜合外電報導，〈美陸軍將測評4款多波道網路無線電〉，《青年日報》，2022年12月20日，〈<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1301262&type=international>>(檢索日期:2023年2月22日)。

S23)中將大規模部署於史崔克旅戰鬥隊中。並以軍規級繫留型無人機，稱之「可變高度天線(Variable Height Antenna, VHA)」，可搭載美軍現有多款MANET無線電設備，VHA靠繫留繩控與供電，可連續飛行1500小時以上，高度達60公尺，可於10分鐘內完成開設，透過高空中繼提升數據傳輸量、涵蓋範圍與獲得情監偵。³⁹ITN中也運用多用途戰術運輸(Multi-Utility Tactical Transport, MUTT)無人載具，提供更高的機動性、投射戰鬥力，減輕作戰人員的負擔，美軍在MUTT上運用MANET無線電，連結ITN網路中接管系統、感測器與武器載台，提升作戰指揮、態勢感知效能。⁴⁰

圖8：美國陸軍綜合戰術網運用構想圖



資料來源：「Integrated Tactical Network (ITN),」<https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/FY2020/army/2020_itn.pdf?ver=-3GRf6wR9GagCdAbJI-bsw%3D%3D>

(三)美國海軍：

美國海軍優勢專案(Project Overmatch)旨在開發全新的戰鬥系統，運用MANET網路技術連結海軍、陸戰隊及海岸防衛隊艦艇、戰機、地面作戰單位與感測器，以有效地分享資訊、分配資源與適應變化，即時獲得作戰資訊、管理戰區，支持美國海軍近年所提出之「分散式海上作戰」(Distributed Maritime Oper

³⁹“VARIABLE HEIGHT ANTENNA(VHA)”, Hoverfly Technologies, <<https://hoverflytech.com/tethered-drones-uav-uas/livesky-sentry/>>(檢索日期:2023 年 2 月 22 日)。

⁴⁰“General Dynamics chooses wireless networking from Persistent Systems for unmanned vehicles streaming video,” Sep.24,2019, <<https://www.militaryaerospace.com/unmanned/article/14040546/wireless-networking-unmanned-streaming-video>>(檢索日期:2021 年 3 月 4 日)。



ations)概念，擴大偵蒐感知能力，實現「全領域聯合作戰」(Joint All-Domain Operation)願景。⁴¹

美國海軍2022年進行「數位地平線22」演習，投入14款無人艇與無人機(如圖9)，驗證無人水面艦隊整合發展與「網狀網路」及「人工智慧」科技整合。運用AN/PRC-169無線電機自動構網、自動中繼特性與頻譜優勢，遠程控制分散在水面無人艇與無人機，將各項數據和影像即時傳輸回控制中心，進而協助指揮體系研判敵情，並迅速調動部隊與裝備因應，展現了前所未有的數據整合與指管能量支援潛力。⁴²

圖9：美國海軍數位地平線參演無人載具裝備



資料來源：編譯賴明倫／綜合外電報導，〈美海軍「數位地平線」演習秀「網狀網路」、「AI」實力〉，《青年日報》，2022年12月16日，〈<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1553018&type=vision>〉

(四)美國空軍：

美國空軍「先進戰鬥管理系統」(Advanced Battle Management System, ABMS)是空軍下一代指管系統，旨在連結所有感測器及指管系統，整合成全領

41王臻明，〈正在成形的軍事革命：全領域聯合作戰與美軍轉型計畫〉，《鳴人堂》，2021年1月8日，〈<https://opinion.udn.com/opinion/story/120873/5154887>〉(檢索日期:2023年2月22日)。

42編譯賴明倫／綜合外電報導，〈美海軍「數位地平線」演習秀「網狀網路」、「AI」實力〉，《青年日報》，2022年12月16日，〈<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1553018&type=vision>〉(檢索日期:2023年2月22日)。



域的戰場圖像，以利共享情資、快速決策。ABMS以「meshONE」網狀網路，在其固定、移動、機載、海上資產以及徒步士兵之間提供連接能力，實現了多種平臺間的資料共享和傳輸，如F-22、F-35、B-1、B-2、E-3、E-8、KC-135等，也包括MQ-9、RQ-4無人機和無人地面車輛。

2020年引進半自動機器人「四足無人地面載具(Q-UGV)」，提升空軍基地防衛、巡邏偵察與運送物資等任務，Q-UGV搭載光學、熱顯像和聲音感測器等裝備，透過MANET網路連接，讓基地防禦作戰中心藉由頭戴式虛擬實境(VR)設備進行遠端操控，增強基地對周遭態勢異動感知能力。⁴³2023年運用MANET網路技術投入基地區域作戰網路(Regional Operation Network, IRON)，支援25,000平方英里的覆蓋範圍，連接75個運營中心和1,000多輛機動載台，形成世界上最大MANET網路(如圖10)；⁴⁴導彈場上作戰人員能透過IRON網路與行動中心通訊、精準定位，無縫共享關鍵戰術資料，強化部署與作戰彈性。

圖10：美國空軍IRON網路運作示意圖



資料來源：“The Air Force Is Building a Giant Panopticon to Protect Our Nuclear Missile Silos,” Mar.3,2023,<<[https://www. popularmechanics.com/military/a43170271/air-force-iron-wireless-network-protects-nuclear-missile-silos/](https://www.popularmechanics.com/military/a43170271/air-force-iron-wireless-network-protects-nuclear-missile-silos/)>>

(五)美國陸戰隊：

美國陸戰隊2030年兵力設計現代化計畫，聚焦在分散式殺傷、開發更多

43編譯劉孜芹／綜合外電報導，〈提升機場防禦 美空軍引進「機器狗」〉，《青年日報》，2020年11月14日，<<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1286799>>(檢索日期:2023年2月22日)。

44“The Air Force Is Building a Giant Panopticon to Protect Our Nuclear Missile Silos,” Mar.3,2023,<<[https://www. popularmechanics.com/military/a43170271/air-force-iron-wireless-network-protects-nuclear-missile-silos/](https://www.popularmechanics.com/military/a43170271/air-force-iron-wireless-network-protects-nuclear-missile-silos/)>>(檢索日期:2022年2月22日)。



無人系統，以強化指管通資網路情監偵與目獲(C5ISR)，建立長距離感測打造超速「擊殺鏈」能力，以實現「遠征前進基地作戰」(Expeditionary Advanced Base Operations)之目標。⁴⁵

美軍陸戰隊現用AN/PRC-148MBITR等多款通信機均具備MANET網路功能。2022年起採購AN/PRC-169無線電用於JLTV聯合輕型戰術車輛和ACV兩棲突擊車移動網路(Networking On-the-Move, NOTM)，具有動態抗干擾能力，可在擁擠和競爭激烈的頻譜環境中進行操作，讓陸戰隊員能夠使用NOTM向指揮官傳輸關鍵資訊。在ACV-C4/UAV指揮車上安裝光學、紅外線鏡頭及無人機、繫留無人機，提高戰場管理與態勢感知(如圖11)。⁴⁶未來將大量籌建無人機組成「感測器網格」(UAV Sensor Grid)，擔任戰場偵蒐與通信中繼，透過低軌衛星與MANET網路，鏈結高機動砲兵火箭系統與反艦飛彈等長程火力，構成強大的前進機動、遠程精準打擊能力，以「敵威脅區內部隊」的角色，在第一島鏈執行全天候、不間斷地警戒、偵察和反偵察任務，達成「偵察嚇阻」效果。⁴⁷

圖11：美國陸戰隊ACV指揮車運用示意圖



資料來源：“BAE Systems receives task instructions for new Amphibious Combat Vehicle variant,”BAESYSTEMS,Apr.7,2022, <<https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems-receives-task-instructions-for-new-amphibious-combat-vehicle-variant>>

45“FORCE DESIGN 2030,”U.S.MARINES,May 23,2022,< <https://www.marines.mil/Force-Design-2030/>>(檢索日期:2023年2月22日)。

46“BAE Systems receives task instructions for new Amphibious Combat Vehicle variant,”BAESYSTEMS,Apr.7,2022, <<https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems-receives-task-instructions-for-new-amphibious-combat-vehicle-variant>>(檢索日期:2023年2月22日)。

47謝沛學，〈「敵威脅區內部隊」、「偵察嚇阻」與美陸戰隊的轉型〉，《國防安全雙週報第44期》，2021年12月24日，頁57-59。



四、美軍行動隨意網路未來發展方向

美國首任太空作戰部長雷蒙德(Raymond)上將2020年說：「數據將成為未來戰爭的主宰。在戰場上能比敵人更快地蒐集、處理與共享數據，將擁有更強大地優勢」。⁴⁸美軍體認到在多域戰場中連結感測器、武器載台和戰場技術，即時蒐集與安全傳輸數據，以共享情資、提供指揮管制與決策輔助，將是今後作戰成功的關鍵因素。

本研究歸納後分析，美軍未來將更廣運用MANET網路技術與設備，提高通信效率，建立敏捷彈性、安全強韌、自主智慧之數據傳輸平台，其發展方向：

(一)就系統效能而言：

- 1.未來戰場將實現「以數據為中心」概念，需要更高速、即時的數據交換，連接感測器、武器載台與指管通情，朝更高的數據傳輸和更低延遲，持續強化網路連接穩定與可靠性。

- 2.透過改善網路拓樸、優化動態路由協議、自主故障復原技術來提高網路效能，增加通信頻寬、採用波束成形技術、MIMO天線等方式強化通信效能。

- 3.運用人工智慧和機器學習技術，持續優化頻譜、網路管理、故障檢測與自主復原，精進MANET網路中最大容納節點數量、網路運行效率與安全性。

(二)就系統安全而言：

- 1.運用加密、密鑰管理、流量分析、黑名單等方式來加強節點認證和身份驗證，防止節點被攻擊或節點假冒，確保系統安全性與網路隱私。

- 2.強化資料加密與傳輸保密措施，須具備資料加密標準(DES)、進階加密標準(AES256)，符合聯邦資訊處理標準(FIPS140-2 level 2)，依任務實需搭載安全認證保密裝備。

- 3.持續優化干擾檢測和抑制技術、自適應頻率、頻道選擇技術，提高MANET網路動態抗干擾能力。

(三)就系統運用而言：

- 1.需能應對多領域作戰場景，開發出各種適用構型設備(如手持/穿戴、背負、車/艦/機載、無人載具等)，滿足多種不同作戰任務所需。

- 2.透過無人機/艇/車、機器狗，增加戰場感知、延伸通信距離與覆蓋範圍，實現快速、可靠通信和數據共享，並支援無人載具遠程導引與控制。

(四)就系統整合而言：

⁴⁸“Craig Miller,“Data transport will decide the next conflict, not hypersonics,”C4ISRNET,Mar.2,2022,<<https://www.c4isrnet.com/opinion/2022/03/02/data-transport-will-decide-the-next-conflict-not-hypersonics/>>(檢索日期:2023年3月1日)。



- 1.以標準化和開放式架構，實現不同系統之間的互操作性和整合性。
- 2.整合多種通信技術與標準化通信介面，滿足不同場景下的通信需求。

(五)就系統維運而言：

- 1.透過人工智慧與機器學習，加強網路自適應和優化，降低操作與維護成本，提高可靠性和穩定性。
- 2.透過供應商意見回饋與提高參與意願，提供定期維護、軟硬體更新與升級，以更經濟、敏捷之方法來快速部署和支援新的無線電功能。

五、小結

美軍數位現代化戰略(DMS)利用先進技術和網路系統，確保作戰效能的提升。而聯合全域指管(JADC2)則是推進DMS具體作法。MANET網路技術已成為美軍積極投入的重要通信方式。

國軍通資系統精進策略芻議

一、現況分析

C⁴ISR系統建設是一種循序漸進、逐步發展的過程，期間需投入相當資源，如財力、技術、人力等方面，⁴⁹雖然我國現代化程度和技術水準已明顯提升，國軍近年亦逐步導入MANET網路技術與設備，惟仍侷限於軍種內兵科協同作戰運用。整體而論，國軍通資系統在規劃與執行上仍存窒礙難行之困境，近年許多專家就指管通聯的脆弱度及備援手段的有效性提出其見解，⁵⁰針對國軍通資系統現存之窒礙歸納說明如後：

(一)傳輸機制彈性不足，聯戰指管功能受限

檢視國軍通資系統平、戰時指管通聯機制，以環島骨幹光纖、數微系統與軍租電路為主要手段傳輸資訊，以高頻、超高頻等戰術無線電語音通信為輔，並以頻寬受限之衛星通信作為系統備援，一旦面臨通資系統遭敵干擾、攻擊、中斷等現象，在備援手段接替前，即時戰情指管命令將無法情傳，且「共同作戰圖像」喪失功能。⁵¹各軍種所使用之通裝、網路各有差異及通信協定複雜缺乏互通性等問題，進而導致聯戰指管功能受限。

(二)機動通信能力欠佳，數位韌性亟待精進

部分通信裝備面臨老舊屆壽、消失性商源等問題，無線電傳輸頻寬不足

49蔡志銓，〈國軍應用C⁴ISR系統強化作戰整合之研究〉，《國防雜誌第三十五卷第二期》，2020年6月，頁118-119。

50黃天成、李建鵬，〈從新興科技應用探討國軍聯戰指管系統精進策略之研究〉，《空軍學術雙月刊第694期》，2023年5月，頁133-135。

51同註11，頁56、67-71。

、系統功能受限，且未具自動組網、自動中繼功能，機動通信易受限於地形、環境與人為等複雜電磁環境影響，致使通信阻通或傳輸品質不佳，須開設固定、機動中繼臺確保通聯品質，衍生人力耗用、作業時間冗長且機動性受限地形等問題，運用彈性、備援手段及應變方案受限，難以有效提供作戰部隊即時、高效與可靠的通信服務。⁵²

(三)用頻裝備效能不彰，抗擾能力仍需強化

用頻裝備型式、種類繁多，通信規範未建立完善體制，無線電波型、信號調變、擴展頻及加密等技術均相異，僅能在相同工作頻段下，採定頻、無加密方式實施互通，戰時易遭受敵電子戰干擾，須朝向提高擴頻(跳/展)、自適應技術、動態頻譜感知與管理、發展智慧聯網之多頻段通用平臺方向持續精進，⁵³提供高寬頻、高傳輸、高品質、多功能之行動寬頻網路。

二、精進策略芻議

面對中共軍力持續發展及提升，國軍迫切需要引進新的通訊技術與設備，改善現有老舊、功能受限之通資系統與裝備，本研究爰以美軍行動隨意網路發展規畫與運用，籌建具行動寬頻傳輸、自動構網、自動繞徑、自動中繼、高穩定與高存活之「行動寬頻資通系統」。經筆者歸納分析後以「異質網路整合，支持聯合全域指管」、「分散網路架構，強化系統數位韌性」、「動態頻譜管理，建構智慧安全連網」等面向，提出國軍通資系統精進策略芻議。

(一)異質網路整合，支持聯合全域指管

為達成三軍部隊聯戰指管需求，國軍須持續精進通資基礎設施，各通資系統與裝備應以標準化介面、開放性架構及軟體定義(Software Defined)之概念，朝向寬頻網路、IP網管、多頻段、全網域整合互通之目標，並研製具自動構網、自動中繼之新一代MANET行動寬頻無線電機，透過IP-base網路介面連接軍網，並運用無線電語音IP化技術(Radio over Internet Protocol, RoIP)與通信整合系統，將類比語音轉為SIP數位封包，以整合國軍與公民營之VoIP網路電話、數位交換式電話、無線電通信、衛星電話與行動通信等異質網路與系統，⁵⁴進行訊令互通與語音交換，形成一相容互通的高速資訊網路，快速部署於作戰、救災與反恐場域需求之中繼設備，進而提高整體作戰效能和戰場優勢。

運用「行動寬頻資通系統」高度靈活與自組織網路特點，連結國軍各軍種間指管系統、感測器與武器載台，戰場通訊會受到地形阻隔、地球曲度與大氣

⁵²同註 9，頁 98-99。

⁵³同註 14，頁 7-9。

⁵⁴王岳吉，〈通信整合系統運用與發展〉，《陸軍通資半年刊第 125 期》，2016 年 4 月，頁 73-76。



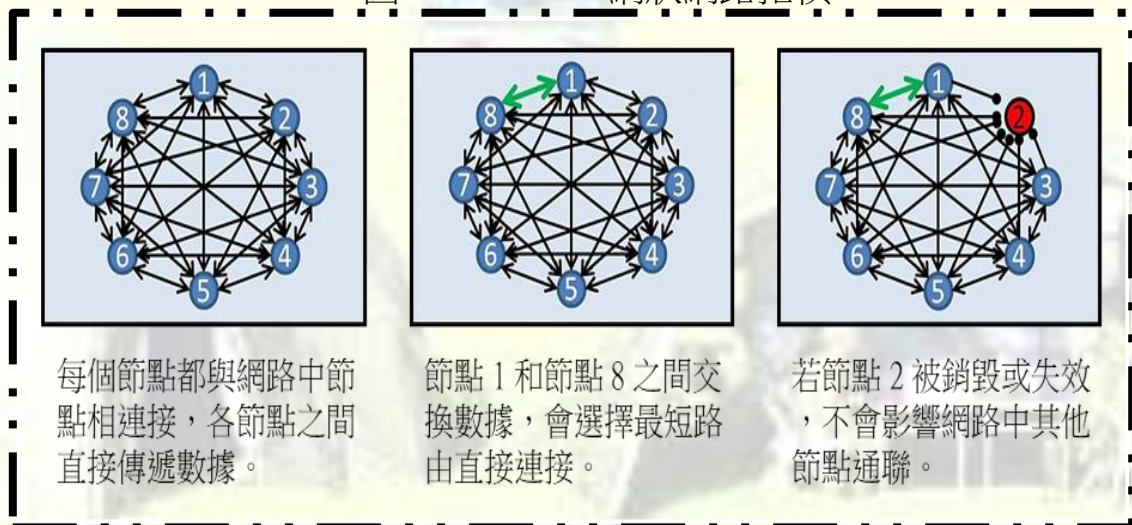
環境影響，參考美軍運用VHA繫留無人機搭載MANET無線電設備，不僅可快速部署建立機動通信中繼，克服陸上複雜地形及海上、空中遠距通訊不繼狀況，取得更高的視距通信(Line of Sight, LoS)傳輸距離與覆蓋率，建立安全可靠及機動彈性之通資傳輸平台，以提升地面、海上、空中作戰部隊間之聯繫，⁵⁵並結合數位圖資系統顯示各個行動節點動態位置，透過各項感測器獲取、整合與分享情報偵資訊，實現即時通信與數據共享，提升戰場透明度，縮短反應時間，加速作戰節奏，以有效發揮聯合作戰效能，支持聯合全領域指揮與管制。

(二)分散網路架構，強化系統數位韌性

MANET是一種行動節點間自我組織而成的分散式網路架構，網路拓模形狀會隨著行動節點移動或傳遞訊息的需要而動態調整，相鄰節點之間可以直接通聯，即使某些節點受到敵攻擊或干擾而失效，其他節點仍能保持通聯不中斷(如圖12)，避免單一節點失效而影響整體網路運作。

相較國軍現有微波系統之中心化架構，MANET網狀網路更加適應戰場上動態環境，充分利用頻率資源，自主地重新組織網路，做出最佳路由決策進行動態路由，透過標準化與模組化結構，具有手持/穿戴、背負、車載、機載、艦載等多種構型。可透過同頻網路中任一行動節點開啟圖形化網管介面，即時監控與管理網路運作狀況，介面操作簡單、功能擴充方便、便於維護。讓作戰部隊能在機動間與惡劣環境條件下保持穩定通信避免中斷，以改善國軍機動通信能力欠缺之問題。並搭配「低軌道衛星」與大量無人載具與固定/機動雷達組成「感測器網格」，串連起戰場上所有武器平臺，有效提升戰場指管效能。

圖12：MANET網狀網路拓模



資料來源：作者自行繪製

⁵⁵曾怡碩，〈無人機與戰場通訊中繼〉，《國防情勢特刊第 16 期》，2022 年 3 月，頁 27-30。

我國首任數位發展部長唐鳳先生曾指出：「韌性(Resilience)指的是在任何時候遭受不利影響，透過完善機制的即時應變並快速恢復；甚至從被攻擊經驗中學習、強化自身體質」。⁵⁶鑑於國軍環島光纖、數微系統、雷達站與公民營通信多屬固定設施，戰時若遭網路攻擊與電子干擾或敵特工、導彈攻擊而戰損，將影響整體指管能力，因此各級指揮所、通資電站臺與雷達站須採「主動式防禦」概念，預先做足各項準備方案與應變方案，並採複式配置、異地備援及分散部署原則，運用多元異質通資手段，來建立備援與應變機制，定期實施狀況演練來思考應變對策。

積極發展強化國軍C⁴ISR系統，籌建戰術層級之「行動寬頻資通系統」，運用MANET網狀網路架構快速建立旅級至連級與機動雷達、飛彈車組之野戰資傳平臺，並運用5G通訊及低軌衛星等科技，結合民間通資資源納入整體通信架構規劃，發展多元異質通資傳輸平臺，俾有效應對平、戰時各項異常、威脅或攻擊事件，提升通訊網路系統之數位韌性。

(三)動態頻譜管理，建構智慧安全連網

面對戰場複雜電磁環境，MANET網路與設備具備動態頻譜管理能力，以美軍現役AN/PRC-169無線電為例，該型設備以SDR為基礎，結合COFDM調變、MIMO天線陣列與MANET網路技術開發出低可偵測(Low Observable)波形，發展多頻段通用平台，導入人工智慧自動判斷並累積智慧，可自適應地調整傳輸參數、路由協定與選擇最佳頻率，提高資料傳輸率與良好的服務品質(QoS)。

運用MIMO天線陣列、低截收/偵測率技術(Low Probability of Intercept/Low Probability of Detection, LPI/LPD)與頻率捷變(Frequency Agility)等抗干擾技術，⁵⁷能夠即時監測並分析電磁頻譜，透過MIMO天線陣列信號與相位調整，自動控制各行動節點發射功率與方向，以抑制並濾除干擾信號，當系統遭受嚴重干擾時，會透過網管通報所有行動節點，自動採適應性換頻，切換至最佳頻道，以確保高速和可靠數據傳輸，提供靈活地動態頻譜管理效益，建構智慧安全與穩定可靠的連網。

結論

面對中共軍力持續擴張，對我國家安全造成嚴峻挑戰，我國《110年國防報

56唐鳳、彭筱婷，〈強化全民數位韌性〉，《行政院公共數位創新空間》，2022年8月2日，〈<https://pdis.nat.gov.tw/zh-TW/blog/強化全民數位韌性/>〉(檢索日期:2023年3月5日)。

57The Impact of LPI/LPD Waveforms and Anti-Jam Capabilities on Military Communication,"Set.24,2020,<<http://modernbattlespace.com/2020/09/24/impact-lpi-lpd-waveforms-anti-jam-capabilities-military-communications/>>(檢索日期:2023年3月5日)。



告書》指出：「為使國軍建構完整作戰指揮體系，藉由網路數據整合，精進指管效能、聯合情監偵及指管通資情監偵系統反制及應變能力，同步運用民間能量，強化各級共同作戰圖像，提升戰場透明度，使部隊同步掌握戰場景況，精進作戰指揮能力，俾利三軍聯合作戰任務遂行」。為達成此目標，故當前亟需整合國軍指管系統、武器載台與感測器，朝具行動寬頻傳輸、自動構網、自動中繼、全網域整合互通、動態頻譜管理與抗干擾能力目標精進，以建構一個快速部署、強韌靈暢、高存活之通資傳輸平臺，為當前不可或缺的制勝條件。

本文從行動隨意網路技術發展及美軍指管系統規劃運用與趨勢分析，研究發現美軍因應新興科技進步，為滿足未來瞬息萬變的戰況所需，推出「聯合全域指揮與管制(JADC2)」策略，促成各軍種指管系統之整合互通性，確保美國與盟邦合作無間，爰將MANET網路技術與設備廣泛運用於美軍戰術層級通訊系統，基此，建議應掌握敵情威脅、科技發展趨勢及國家軍事戰略，可運用MANET網路技術與設備，達成「動中通、擾中連、指管情傳網中銜」之目標，強化國軍通資傳輸平臺整體效能，提供國軍通資電整體規劃與建軍整備之參據。

我國民間通資科技方面能量充足，須持續配合國防自主政策，有效運用有限資源，強化與中科院合作，發展未來各項武器系統關鍵技術，提升我國國防科技實力，藉以帶動國軍武器系統整體的進步。

參考文獻

一、官方文件

(一)國防報告書編纂委員會，《中華民國110年國防報告書》(臺北：國防部，2021年10月)，頁66。

(二)DoD CIO, "DOD DIGITAL MODERNIZATION STRATEGY," DoD OFFICE OF PREPUBLICATION AND SECURITY REVIEW, 2019, pp.39-52.

(三)John R. Hoehn, "Joint All-Domain Command and Control: Background and Issues for Congress," Congressional Research Service, Mar 18 2021, p18.

(四)"SUMMARY OF THE JOINT ALL DOMAIN COMMAND AND CONTROL STRATEGY," U.S. Department of Defense, Mar 2022, pp.2-5.

(五)"FORCE DESIGN 2030," U.S. MARINES, May 23, 2022, pp.2-4.

二、書籍

陳裕賢，《無線網路與行動計算》(全華圖書股份有限公司，2013年)，頁3-12~3-17。

三、期刊

(一)王岳吉，〈通信整合系統運用與發展〉，《陸軍通資半年刊第125期》，2016年4月，頁73-76。

(二)李書全，〈聯合戰術無線電機發展與運用之研究〉，《陸軍通資半年刊第136期》，2021年10月，頁56-60、62、67-71、98-99。

(三)李建鵬、葛鍵霆，〈行動通信技術發展對軍事應用之研究〉，《空軍學術雙月刊第683期》，頁95-100。

(四)徐方鴻，〈單兵戰鬥系統發展之研究-以美軍數位化戰士為例〉，《陸軍通資半年刊第141期》，頁93-106。

(五)曾怡碩，〈無人機與戰場通訊中繼〉，《國防情勢特刊第16期》，2022年3月，頁27-30。

(六)黃天成、李建鵬，〈從新興科技應用探討國軍聯戰指管系統精進策略之研究〉，《空軍學術雙月刊第694期》，2023年5月，頁133-135。

(七)蔡志銓，〈國軍應用C4ISR系統強化作戰整合之研究〉，《國防雜誌第三十五卷第二期》，2020年6月，頁118-119。

(八)鄭南宏、焦興也，〈淺談國軍通信系統未來發展趨勢-以軟體定義無線電為例〉，《陸軍通資半年刊第130期》，2018年9月，頁7-9、11-13。

(九)謝沛學，〈「敵威脅區內部隊」、「偵察嚇阻」與美陸戰隊的轉型〉，《國防安全雙週報第44期》，2021年12月24日，頁57-59。

(十)D. E. Mustafa Ahmed and O.O. Khalifa ,“An Overview of MANETs : Applications, Characteristics, Challenges, and Recent Issues ,” International Journal of Engineering and Technical Research(IJETR) ,Vol.6 No.4 ,April 2017 ,pp 128-132.

(十一)W.Y. Zou、Y.Y. Wu ,“COFDM : an overview,” IEEE Transactions on Broadcasting,Vol.41 Issue 1,Mar 2015,pp 1.

四、報刊

(一)編譯郭正原／綜合外電報導，〈美IVAS整合載具系統 掌握戰場態勢〉，《青年日報》，2022年1月5日，〈<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1477320&type=vision>〉(檢索日期：2023年2月22日)。

(二)編譯郭正原／綜合外電報導，〈美陸軍將測評4款多波道網路無線電〉，《青年日報》，2022年12月20日，〈<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1301262&type=international>〉(檢索日期：2023年2月22日)。

(三)編譯賴明倫／綜合外電報導，〈美海軍「數位地平線」演習 秀「網狀網路」、「AI」實力〉，《青年日報》，2022年12月16日，〈<https://www.ydn.com.tw>〉



/news/newsInsidePage?chapterID=1553018&type=vision>(檢索日期：2023年2月22日)。

五、網路

(一)王臻明，〈正在成形的軍事革命：全領域聯合作戰與美軍轉型計畫〉，《鳴人堂》，2021年1月8日，<<https://opinion.udn.com/opinion/story/120873/5154887>>(檢索日期：2023年2月22日)。

(二)林福林，〈從天線陣列/方位角到智慧型天線波束成形基本原理一次看懂〉，《新通訊元件雜誌》，2020年8月7日，<<https://www.2cm.com.tw/2cm/zh-tw/tech/A540D94709A74EF7BE05F4BFF1D54451>>(檢索日期：2022年12月28日)。

(三)唐鳳、彭筱婷，〈強化全民數位韌性〉，《行政院公共數位創新空間》，2022年8月2日，<<https://pdis.nat.gov.tw/zh-TW/blog/強化全民數位韌性/>>(檢索日期：2023年3月5日)。

(四)惠汝生，〈無線Ad Hoc行動隨意網路架構之技術發展評析〉，《中華民國電子零件認證委員會》，<<http://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-49-6.pdf>>(檢索日期：2023年2月22日)。

(五)連耀南、祁立誠、邵玉晟，〈隨意型網路 Walkie-Talkie-Like 緊急通訊系統〉，<<https://www.cs.nccu.edu.tw/~lien/Pub/c81u1net.pdf>>(檢索日期：2023年12月7日)。

(六)〈MPU5電台：美軍新一代無中心自組網智能單兵電台〉，《人人焦點》，2020年12月13日，<<https://ppfocus.com/0/di57243a6.html>>(檢索日期：2023年2月15日)。

(七)〈深度研究：美军通信网络与信息系统70年〉，《安全內參》，2022年3月12日，<<https://www.secrss.com/articles/40178>>(檢索日期：2023年2月1日)。

(八)〈美國態勢感知之「項目融合(Project Convergence)」〉，2023年3月7日，<<https://inf.news/military/88a84b7de2d7170d4077d6205ad16d4d.html>>(檢索日期：2023年2月22日)。

(九)〈无线自组织网络简介〉，2021年2月6日，<<https://zhuanlan.zhihu.com/p/348937900>>(檢索日期：2023年5月2日)。

(十)Amy Walker, "Army fields first unit with TRILOS radio and other new expeditionary network capabilities," U.S.ARMY, July.12,2018, <https://www.army.mil/article/208372/army_fields_first_unit_with_trilos_radio_and_other_new_expeditionary_network_capabilities>(檢索日期：2023年2月15日)。

(十一)“AN/PRC-148C IMBITR,” THALES, <<https://www.thalesdsi.com/produ>

t/anprc-148 cimbitr/>，(檢索日期：2021年3月4日)。

(十二)“BAE Systems receives task instructions for new Amphibious Combat Vehicle variant ,”BAESYSTEMS ,Apr.7,2022 ,<<https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems-receives-task-instructions-for-new-amphibious-combat-vehicle-variant>>(檢索日期：2023年2月22日)。

(十三)Craig Miller ,“Data transport will decide the next conflict, not hypersonics ,”C4ISRNET ,Mar.2,2022,<<https://www.c4isrnet.com/opinion/2022/03/02/data-transport-will-decide-the-next-conflict-not-hypersonics/>>(檢索日期：2023年3月1日)。

(十四)“DARPA Awards Silvus Up to \$13.1M to Develop Distributed Beamforming Solution》,” Silvus Technologies Inc. , <<https://apnews.com/article/technology-bb3422bce99983d6044a647d4bf1651a>>(檢索日期：2023年12月7日)。

(十五)Humayun Bakht ,“History of mobile ad-hoc networks ,” Liverpool John Moores University ,School of Computing and Mathematical Sciences ,<https://www.academia.edu/2558879/The_history_of_mobile_ad_hoc_networks>(檢索日期：2022年12月7日)。

(十六)“MANET Interference Avoidance(MAN-IA) ,” Silvus Technologies Inc.,<<https://silvustechnologies.com/why-silvus/technology/manet-interference-avoidance/>>(檢索日期：2022年12月28日)。

(十七)“Mobile Ad-hoc Networks(manet) ,” IETF Datatracker ,<<https://datatracker.ietf.org/wg/manet/documents/>>(檢索日期：2022年12月7日)。

(十八)“Nett Warrior(NW) ,” Program Executive Office Soldier ,Nov.16,2022 ,<<https://www.peosoldier.army.mil/Equipment/Equipment-Portfolio/Project-Manager-Integrated-Visual-Augmentation-System-Portfolio/Nett-Warrior/>>(檢索日期：2023年2月22日)。

(十九)“The Air Force Is Building a Giant Panopticon to Protect Our Nuclear Missile Silos ,” Mar.3,2023,<<https://www.popularmechanics.com/military/a43170271/air-force-iron-wireless-network-protects-nuclear-missile-silos/>>(檢索日期：2022年2月22日)。

(二十)“The Impact of LPI/LPD Waveforms and Anti-Jam Capabilities on Military Communication ,” Set.24,2020 ,<<https://modernbattlespace.com/2020/09/24/impact-lpi-lpd-waveforms-anti-jam-capabilities-military-communications/>>(檢索日期：2023年3月5日)。



(二一)“US Army to Field TrellisWare® Technology for All Tactical Radios that Comprise Integrated Tactical Network Capability Set 21 ,” Businesswire,Oct. 30,2020,<<https://www.businesswire.com/news/home/20201030005153/en>>(檢索日期：2023年2月22日)。

(二二)“VARIABLE HEIGHT ANTENNA(VHA) ,”Hoverfly Technologies ,<<https://hoverflytech.com/tethered-drones-uav-uas/livesky-sentry/>>(檢索日期：2023年2月22日)。

(二三)“Warfighter Information Network-Tactical (WIN-T) ,” GD Mission Systems ,<<https://gdmissionsystems.com/communications/warfighter-information-network-tactical>>(檢索日期：2023年2月15日)。

作者簡介

魏君旭中校，中正理工學院90年班、國軍電子戰正規班98年班、海院指參班陸戰組104年班、管院戰略班112年班。曾任通資排、連長、通信官、電戰官、資參官、莒拳隊長；現職為海軍陸戰隊指揮部通資處中校副處長。

林于令上校，國防管理學院88年班、國軍電子戰正規班96年班、管院資管系碩士98年班。曾任財務官、資處官、資參官；現職為管理學院國管中心上校戰略教官。