

淺談國防通信系統未來發展趨勢—以軟體定義無線電為例

作者／鄭南宏中校、焦興也

提要

- 一、美伊戰爭後，各國深切體會到未來任務與作戰需求須朝「立體化數位戰場」及「網狀化聯合作戰」方向革新，在現代戰場上，任何武器裝備離開通信系統就不能發揮其效能與作用，無通信系統C⁴ISR就不能正常運作。
- 二、軍事通信系統發展朝向建立陸海空及水下一體化協同通信能力、提升軍用通信網絡存活抗毀能力、開發抗干擾能力強之通信裝備及重視戰場頻譜管理方向進行。
- 三、國防軍用通信技術必須自主研發才能達成立體化與網狀化作戰理想，國防研發必須自主掌握才能不受制於人。

關鍵詞：通信系統、軟體定義無線電、Ad Hoc網路。

前言

無線通信的發展向來與國力強弱息息相關，而且通信運用能力已是評估國家競爭力的重要指標；對於國防、經濟與民生發展均有重要影響。隨著科技快速發展，通信系統已朝向單晶片設計、軟體定義無線電、IP-Base通信網路及先進鏈路運用等方向發展，而通信系統從過去戰爭中單純的戰鬥支援功能，逐漸進化成為現代戰爭中與主戰裝備和指揮系統相緊密結合的聚合劑，並成為主宰現代戰場的主導性裝備。在現代戰場上，任何武器裝備離開通信系統就不能發揮其效能與作用，無通信系統C⁴ISR系就不能正常運作。

未來任務與戰場運用需求

傳統通信網絡所面臨的最大問題之一就在於仰賴通訊轉發，資訊要經過層層轉送，在戰況激烈時，光是蓋台和互相干擾的狀況就足以阻礙重要情資無法即時送達需要被傳遞知會的單位，前線部隊所需要的情資早已過時，而部隊長在下達決心時所依賴的資訊也失去時效。美軍在波灣戰爭(1990年8月至1991年2月)中，訊息在指管通情鏈路中需要經過3天的傳遞後，指揮官才能下達攻擊命令。因此，美軍即使透過偵查發現機動導彈發射車，也無法即時實施打擊。波灣戰爭後，美軍深刻體會到現代化戰場需仰賴完善的通信網路構聯，方能克服地形、地物與地表曲率限制，用以收集情報、傳遞



資訊、管制部隊與指揮作戰。經過多年的變革，在科索沃戰爭(1999年3月至6月中)，這一時間縮短至2小時，使得相當一部分空襲任務可以在飛機升空後重新調整。阿富汗戰爭初期(2001年10月至2002年3月)的時間進一步縮短至19分鐘，攻擊的即時性大大提升。而伊拉克戰爭(2003年3月至4月)中，這一時間控制在10分鐘之內。2003年3月起，美軍通過打造全球指揮控制系統(Global Command and Control System, GCCS)、全球信息網格(Global Information Grid, GIG)¹如圖一、美軍空間探測與跟蹤系統(Space Detection and Tracking System, SPADATS)、空中預警與控制系統(Airborne Warning and Control System, AWACS)等，從感知、到通信、再到指揮控制的完備C⁴ISR體系，將於2020年建成全球性的信息網格系統，使得作戰反應時間縮短至1.2秒。

圖一 全球信息網格

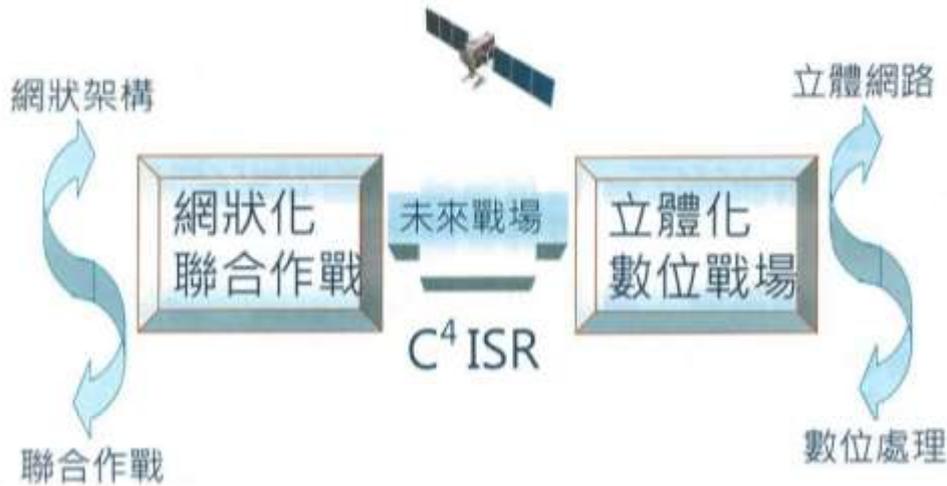


資料來源：Wikipedia, “Global Information Grid,” https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Information_Grid, 2017/9/26.

現在，各國深切體認到未來任務與作戰需求，須朝「立體化數位戰場」及「網狀化聯合作戰」方向革新(如圖二)。

¹ 樂晴智庫，〈美國軍事「信息化電子戰」探秘〉《軍事》，<https://kknews.cc/military/nkak65.html>，2017年9月26日下載。

圖二 未來任務與作戰需求

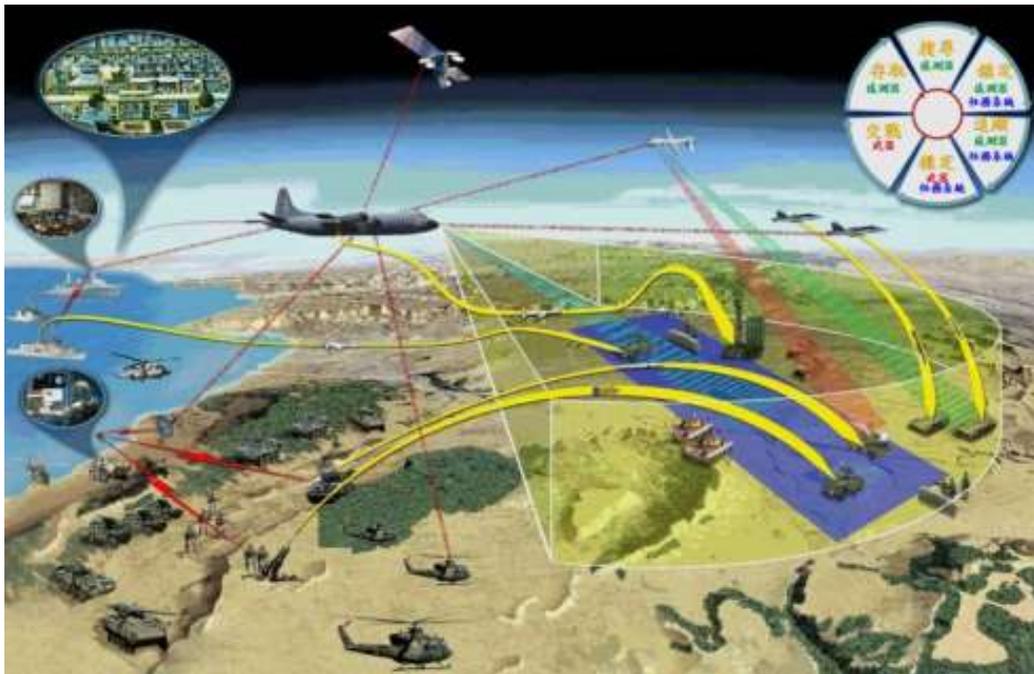


資料來源：作者繪製。

一、立體化數位戰場

現代化戰爭複雜多變，要求陸空軍實施聯合作戰，這就要求將太空、空中、地面、海上甚至地下、水中通信與指管通資情監偵系統結合，構成立體化C⁴ISR系統運用，為己方部隊創造全面、即時的感知戰場狀況，從而達到指揮控制準確、快速、高效、暢通，以取得最佳作戰效果(如圖三)。此外未來戰場上除了語音外，還有大量影像、郵件訊息需要傳送，所有情資需以數位化處理來收發與運用，才能滿足多個使用者在保密鏈路下同時互相溝通等優點。

圖三 立體化數位戰場



資料來源：蘭順正，〈陸軍：戰爭形態演進及戰鬥力生成模式思考〉《壹讀》，
https://read01.com/0EQm0z.html#.Wcm_jdKwfIV，2017年9月26日下載。

二、網狀化聯合作戰

網狀化聯合作戰是一種具備「資訊優勢」的作戰概念，藉由鏈結偵測系統、指管系統及武器系統成為網狀脈絡(如圖四)，以達成情資共用、加快指管速度、提高作戰效能等目標。最終，乃在於實現「比敵人先看見目標、比敵人先了解戰況、比敵人先計畫決策及比敵人先發動作戰」的關鍵作為。

在現代化戰場上，要做到立體化、數位化及網狀化作戰，都離不開通信系統。因此，通信系統是：

- (一)整合指管系統的聚合劑。
- (二)提高聯戰效能的倍增器。

圖四 網狀化聯合作戰



資料來源：Kevin Benedict, “Enterprise Mobility, Netcentric Operations and Military Mobility,” The Center for Digital Intelligence™ Blog, <http://mobileenterprisestrategies.blogspot.tw/2011/08/enterprise-mobility-netcentric.html>, 2017/9/26.

國防通信系統發展趨勢

資訊化時代的國防通信系統有別於以往的發展趨勢，前述未來任務與戰場運用需求走向立體化及網狀化的作戰模式，其中通信系統是貫穿整個戰場的主角，也是連結各式武器載台的神經網絡；而軍用無線電通信具備無可替代的靈活性與機動性，也成

為戰場上不可或缺的主要通信手段。本文就國防無線電通信系統重要發展趨勢進行研析：

一、建立地空一體化協同通信能力

隨著現代戰爭立體化程度的增強，目前已呈現出太空、陸、海、空及電磁、網路一體聯合作戰的多維特徵。參戰人員來自多個軍種，甚至多個國家，通信系統要讓這些來自各方且立體分佈的軍事裝備之間達到資訊能互連互通，組成一個協同的整體，就必須制定統一的標準協定、介面等措施來實現通信系統、裝備之間的互連互通。美軍在波灣戰爭中，就用單通道地空無線電系統(Single Channel Ground and Airborne Radio System, SINCGARS)、聯合戰術資訊分配系統(Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS)和定位回報系統(Position Location Reporting System, PLRS)等三軍共用的系統，實現多軍種的協同通信，保障了三軍協同作戰所需資訊的暢通。然而盟軍中，法國使用TRC-950跳頻無線電機、英國使用Jagur-V跳頻無線電機等，雖可有效的藉抗干擾措施保護盟軍的正常通訊，但是多國部隊的跳頻無線電機卻不能完全相容，只能以定頻通訊方式通連。到了1999年科索沃戰爭及2003年伊拉克戰爭，多國部隊已能利用標準協定克服跳頻不能相容的缺點，這必須經由交換統一的標準協定技術來達成。

二、提升軍事通信系統存活能力

軍事通信系統對作戰指揮十分重要，也是敵人攻擊及干擾的主要目標。因此，在規劃建置時，應考量系統的存活率，包括採取系統網路化、通信手段多樣化和通信網路智慧化等多重手段，來克制敵人的攻擊。

(一)軍事通信系統網路化

新一代的軍事通信系統是藉由多個通信節點形成整體通訊網路骨幹，開發能夠自動重新組織的分散式網路，以適應戰時網路拓樸結構的變化，這種設計的最優點就是降低脆弱性，就算其中任何一個節點癱瘓，其他鄰近節點也能夠再自動連接，形成旁通鏈結，讓使用者依然能夠傳遞訊息，提高通信系統的抗毀性和通信的可靠性。

(二)通信手段多樣化

使用不同頻段的無線電通信手段，或利用光纖、電纜等有線通信手段達到通信目的，以多重備援通信手段來提高通信系統的抗摧毀、抗干擾能力，提高通信的可靠性。

(三)通信網路智慧化

通信網路智慧化，進一步提高網路管理水準，提高網路的靈活性，增強通信網路應付複雜之對抗形勢的能力。

三、開發抗干擾能力強之通信裝備

開發抗干擾能力強之通信裝備，包括：



(一)提高擴頻(跳/展頻)能力

擴頻是在軍事通信中應用較多的反對抗技術，採用跳頻作為反對抗措施的通信設備，其跳速已提高到每秒千跳，能夠對抗頻率跟蹤干擾。

(二)小型化、標準化、模組化及整體化

通過微電子化等途徑，降低通信設備的功耗、重量與體積，使設備小型化，並具有手持/穿戴、背負、車載、機載和艦載等多種配置形式，提高其機動性，增加對抗硬摧毀的能力。通過標準化和採用模組式結構，提高通信裝備的互換性和靈活性，使其操作簡單、功能擴充方便、容易維護，能迅速地部署、撤收，從而降低其易損性，提高其受損後修復的快速性。通信裝備整體化是提高通信裝備作戰效能的重要途徑，也是減少通信裝備構型的一種重要方法。採用整體化設計的通信裝備電磁相容性和可靠性獲得提高，減少了相同功能組件的重複，降低了通信裝備的壽命週期費用。因此，研製類似JTIDS(整合了通信、導航和識別功能)的電子設備、開發能在高頻到極高頻寬頻帶上工作的多頻段電台等，已經成為軍事通信裝備的一個發展趨勢。

(三)發展自適應技術

現代戰場電磁環境惡劣，採用自我調適技術可以使通信系統、設備的性能隨時處於最佳狀態，特別是傳輸條件多變的通信系統；例如，高頻通信系統中採用工作頻率自我調整、傳輸速率自我調整、功率自我調整和自我調整天線等調適性技術的裝備，就能隨時維持通信品質。

四、重視戰場頻譜管理

由於無線通信的快速發展，電磁頻譜成為激烈爭奪的寶貴資源。可茲利用的頻譜範圍不能任意擴展，但可以通過監管使之有效利用。現代戰場電磁頻譜管理技術包括：頻率規劃、頻率指配、頻率監管及干擾分析等。

國防通信技術自主研發

一、目的

我國國軍長久以來採購各型機、艦、戰甲車，隨同引進各式通信裝備，這些裝備分別由不同製造商所研製，波型(包括頻段、信號調變、擴展頻及保密方式等技術)相異，僅在相同工作頻段下始有可能以定頻無密方式通連，作戰時這種通信鏈路可輕易為敵所阻絕。因此，只有：

(一)通信自主研發才能達成立體化及網狀化作戰。

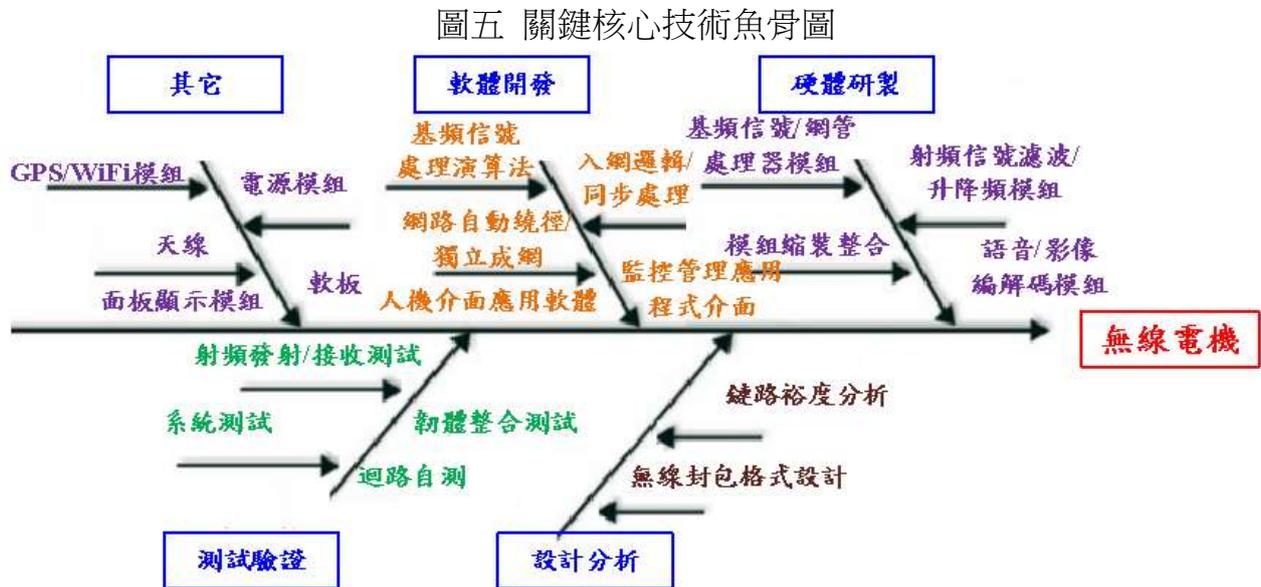
(二)通信自主研發才能達成通信保密及安全要求。

(三)通信自主研發才能達成國防自主不受制於人。

二、關鍵核心技術

一個完整的通信系統包括射頻模組、基頻模組、鏈路處理模組及保密模組，還有相互配合的介面與頻率管理功能，主要的關鍵核心技術魚骨圖如圖五。

有些技術已經有成熟元件或軟、韌體套件支援，有些關鍵技術則需要自主研製以免受制於人：



資料來源：作者繪製。

(一)軟體定義無線電技術

1997年美軍便已啟動「聯合戰術無線電系統(Joint Tactical Radio System, JTRS)」計畫，²確立了將「軟體定義無線電」引入戰場的概念，得力於先進微電子技術日新月異的進步和軟體演算法開發平台的成熟，軟體定義無線電有千變萬化的靈活性，它的出現使得新舊兩代通信機得以通連，數種不同波型的通信能力得以整合在一部小小的通信機內，系統可以隨時燒錄更新功能，還具有網路機能。

軟體定義無線電的硬體平台採用模組化設計，是一個具有開放性，可擴展性和相容性的通信平台(如圖六)。基於這一相對通用的硬體平台，通過載入不同的軟體來實現不同的通訊功能。使用軟體定義無線電，可以快速改變通道接入方式或調變方式，利用不同軟體即可適應不同標準，構成具有高度靈活性的通信平台。圖七為土耳其Aselsan電子系統公司所生產研製的一系列軟體定義無線電通信機。

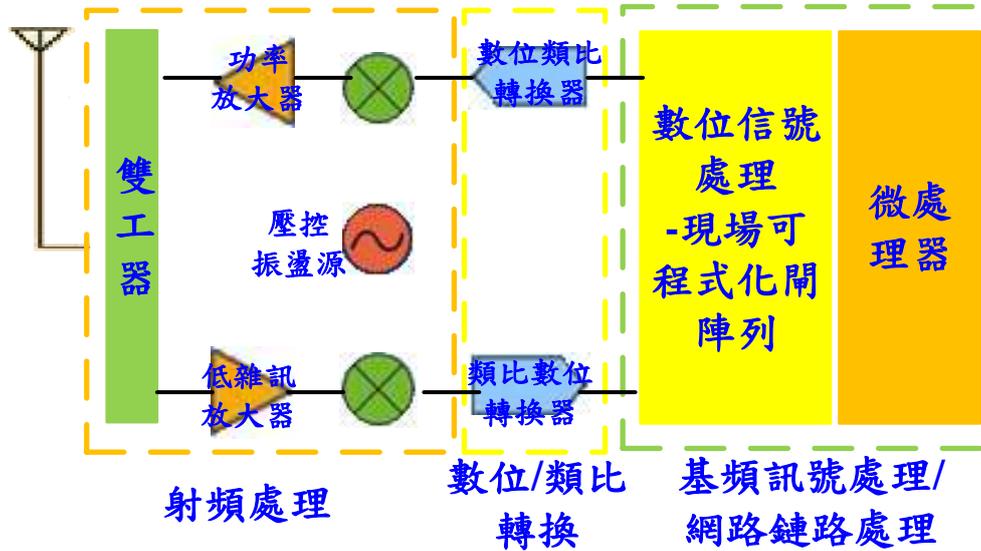
(二)高速跳/展頻技術

通信系統還應能抵禦敵方的電磁干擾，抗電磁干擾技術包括如何使己方信號不被對方發現，降低被截獲概率，例如使用展頻技術；如何從時間、空間或頻率上躲開對方的干擾，例如使用高速跳頻技術等等。新一代「HF/VHF/UHF通信系統」均已納入

² Wikipedia, "Joint Tactical Radio System," https://en.wikipedia.org/wiki/Joint_Tactical_Radio_System, 2017/9/26 下載。

跳展頻通信需求，且為國防自主所必須。

圖六 軟體定義無線電硬體平台簡易方塊圖



資料來源：本研究繪製。

圖七 土耳其Aselsan電子系統公司所生產研製的一系列軟體定義無線電通信機



資料來源：“Radio Programmes,” Tactical Radio, 2016/1/7, pp.17.

(三)多頻段通用平台技術

基於操作簡便、互連互通、整合運用等考量，各頻段(如HF/VHF/UHF)通信機，在共通標準開放架構及軟體定義無線電之概念下，朝整合成單一多頻段通用平台發展，在某一頻段遭受電磁干擾時，可改換至其他頻段繼續通信，或可作為不同頻段通信的中繼站台，達到一機多功能用途。

(四)通信鏈路處理技術

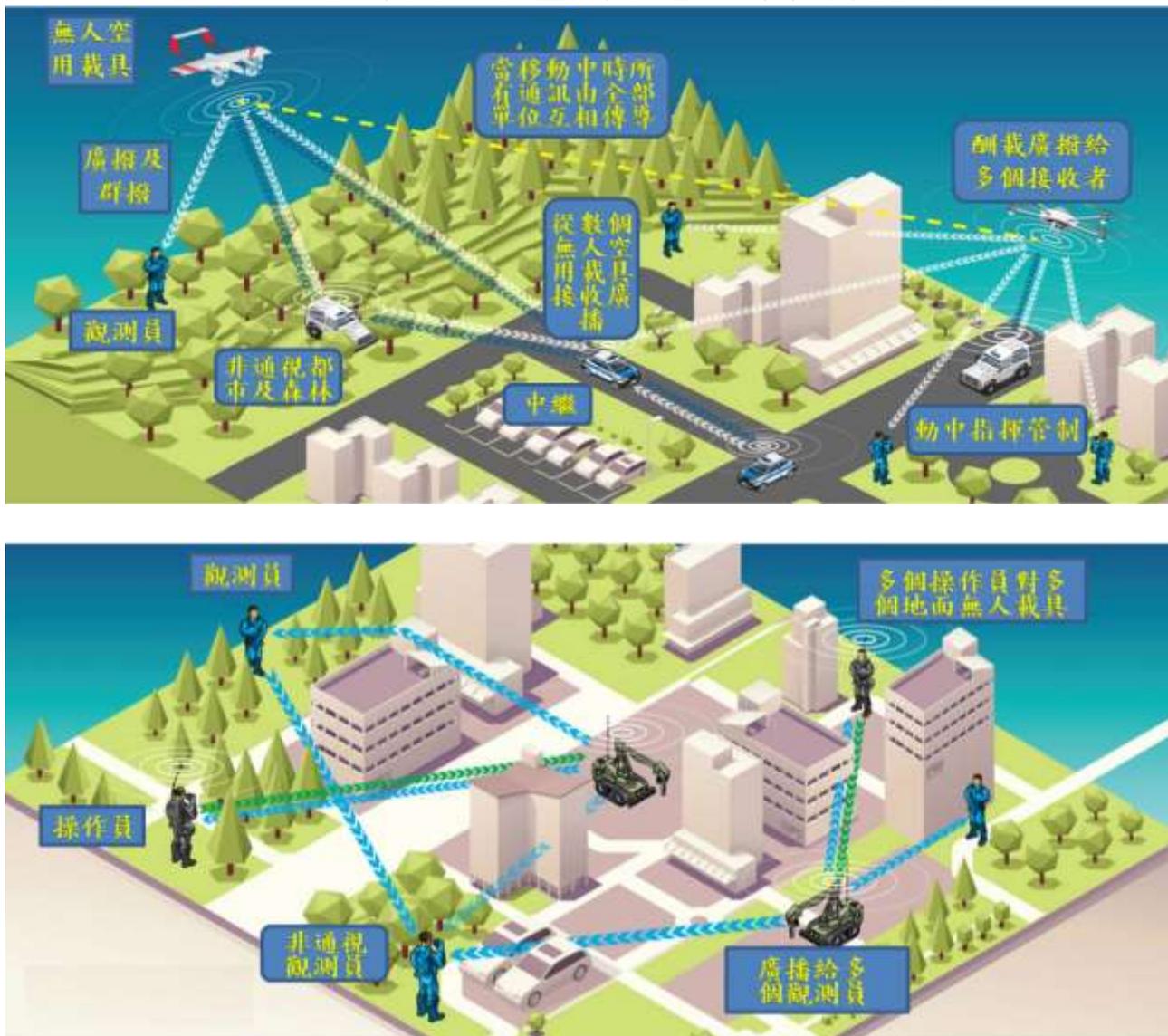
配合戰場機動、彈性、靈活運用需求，野戰行動隨意(Ad Hoc)網路(如圖八)是一種藉由通信中繼的合作機制，來克服地形限制、確保通信鏈路暢通、延展通信距離的技術，這是一種無集中式管理所形成的無線區域通信網路，使用者能隨時隨地加入無

線通信網路，而每個節點都具有繞送的功能，能夠主動去尋找和維護其所繞送的資料，每個移動的節點，會一直不斷地改變整個網路的拓樸，不難看出行動隨意網路在未來軍事應用之重要性。

(五)TDMA分時多工存取技術

解決讓通信機在行動隨意網路多跳中繼間，彼此仍可以保持時槽的同步和資源有效的分配。

圖八 無人地面載具及無人空用載具運用野戰行動隨意場景圖



資料來源：Mobilicom , “MCU 30 Data Sheet,” 2017/9/26.

三、通信系統整體發展策略

軟體定義無線電的發展為未來戰士開啟了以網際網路方式傳送語音、資訊及影像的一種全新方法，未來新一代軍事無線電機將會朝戰術手機方向邁進。

軟體定義無線電重新編譯就能更新通信功能的特性，可更改通信協議達成不同軍

種、國家間無線電互通的能力，這種可程式化設計取代過去硬體設計後不易更改的缺點，將更多的功能實現在一台無線電機之上，這種全新的系統、全新的設計方式適合開發中國家迎頭趕上時代潮流；非洲納米比亞共和國³SAT-COM公司曾來亞洲推銷該國獨立研製完成代號美洲豹Leopard的通信機如圖九，該通信機已具備整合多頻段(HF/VHF/UHF，1.6~512MHz)於一機功能、可機動更換跳頻速率(最高每秒600跳)等等能力，據悉該研究團隊由十餘位工程師以七年時間，從無到有研發完成此通信機，並於歐洲「國防與安全裝備展」(Defense and Security Equipment International Exhibition, DSEI)上獲得好評。雖然該通信機仍有一些成長空間(如無網路功能、無保密器功能等)，但證明在現今電子開發平台、數位技術突飛猛進的環境，發展新一代軍事通信系統不是遙不可及的。

圖九 納米比亞SAT-COM公司研製美洲豹Leopard通信機



資料來源：SAT-COM, “Leopard Data Sheet,” <https://en.wikipedia.org/wiki/Namibia>, 2017/9/27下載。

軟體定義無線電技術是實現新一代軍事無線通信機所必須，相關硬體與發展平台漸趨成熟，為達到國防技術自主研發目的，整體發展策略建議如下：

(一)成立專責研發團隊，以軟體定義無線電發展架構為基礎，整合國內、外先進通信技術，例如國內的電子製造技術、國外的數位信號處理「知識產權核」(Intellectual Property Core, IP)⁴等等，以縮短自行研發期程。

(二)透過軟體定義無線電平台設計經驗、自行開發關鍵核心技術，包括跳/展頻、嵌入式保密模組、行動隨意網路等，必要時可將之移植嵌入任一軍種自行籌獲之外購或商購通裝，確保國防通信自主與安全。

(三)我國國防部以中科院為首或委具國防工業能力公司主導整合無線電各式機種研

³Wikipedia, “Republic of Namibia,” <https://en.wikipedia.org/wiki/Namibia>, 2017/9/27 下載。

⁴Wikipedia, “Semiconductor intellectual propertycore,” https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_intellectual_property_core, 2017/9/27 下載。

製，建置自主研發能量，並統合國內下游供應商(本國獨資)，建立全系列產品供應鏈，以創造局部優勢的軍事通信系統，達成通信機由國內自製目標。

(四)未來我國資通電發展將涵蓋陸、海、空、太空，在自主通信發展下，可透過軟體定義無線電技術建置衛星-地面通信機、Ad Hoc衛星星間通信鏈路與對地鏈路等，以實現隨時隨地連接的移動通信環境，使得資通電整體發展得以支持國防戰略。

結論

美國的軍事通信系統是當今世界上最先進的，但仍然無法做到全面「立體化數位戰場」及「網狀化聯合作戰」的目標，主要與美國實施全球戰略，需支援海外作戰，裝備、通信節點過多，全面換裝所需要研發及生產的裝備預算龐大，只能優先配賦給現役一線部隊。美國尚且如此，國防預算不如先進國家的我們，應尋求發展合乎我國國情的通信系統，例如：

一、按照我國「防衛固守，確保國土安全；重層嚇阻，發揮聯合戰力」的戰略方針，確定資訊化和軍事通信系統建設的目標及範圍，制訂通信協議、介面、機械標準；檢討通信體制，制定扁平化及網狀化架構，實現互連互通目的。

二、對我國軍正服役之C⁴ISR系統及欲規劃構建之新一代數據鏈路系統來說，努力引進國外先進技術，而非購買裝備。惟有從研製新一代的軟體定義無線電通信機開始，建立自主研發能量，才能逐步發展出適應我國之數位化、網路化通信系統；基本的立足點還是要自力更生。

三、在非對稱局勢下發展能創造局部優勢的軍事通信系統，例如建置地下光纜、電纜網路等有線通信手段及整合民用手機系統。未來我國軍環島光纖汰換案預劃執行在即，可利用通信手段的冗餘度來增強我通信系統的抗毀能力，提高我軍事通信的可靠性。

四、國軍刻正執行C⁴ISR系統，與未來即將展開之光纖、總機汰換，亦即為有效支撐與強化關鍵基礎設施之防護，建立寬頻、數位化平台，有效確保指管通連暢通之具體作為。

五、前瞻未來我國在資通電軍成立基礎下，各類指管系統將持續不斷提升構建，國軍災害防救是核心任務，籌建由軟體定義無線電技術實現具Ad Hoc網路功能之無線電通信系統亦佔有重要角色，以其技術提供工作頻段、數據傳輸速率、波形、調變和糾錯機制方面強大的靈活性與可重配置能力串聯整合，能為系統提供更強性能，讓已部署的通信收發機可隨演算法和通信標準的發展進行軟體升級，提升無線電機抗干擾、地障，延伸通信距離，使國軍運用高性能裝備不致僵化無彈性，進而能發揮應有效益。



參考文獻

- 一、楊千里，〈現代軍事通信發展中的熱點問題〉《現代軍事》，2003年8月。
- 二、譚華有，〈軍事通信裝備發展趨勢〉《通信技術與發展》，第5期，1995年10月。
- 三、鳴海裕，〈現代數位化戰場通信系統〉《軍事家》，2012年12月。
- 四、Duncan Bosworth, “Multiband military communications challenges overcome by software-defined Radio,” Military EMBEDDED SYSTEM, 2014/10.
- 五、John Mchale, “The SDR technology evolution continuous,” Military EMBEDDED SYSTEM, 2012/10.

作者簡介

鄭南宏中校，國防大學中正理工學院電機工程學系正63期92年班、國軍電戰正規班98年甲班、中央大學通訊工程學系博士資格候選人，曾任中科院資通所技士、小組長，現任國家中山科學研究院資通所技正。

焦興也，交通大學計算機工程碩士，曾任中科院資通所電子戰組組長、玄武計畫總工程師、玄武計畫主持人、通資電研發技術長。