



淺析運用軟體定義無線電技術精進軍事通信效能之研究

作者/吳朝琴、李建鵬

提要

- 一、軟體定義無線電技術由美國學者Joseph Mitola於1992年提出，其特點為無線電「不需要更換任何硬體元件，僅需透過下載軟體的方式，即可控制、改變與提升通信機性能」，因此具有配置靈活、可支援多重通訊標準、快速功能擴充彈性等優勢。
- 二、當前軟體定義無線電技術的發展蔚為趨勢，其中美軍已透過聯合戰術無線電系統計畫發展，將軟體定義無線電技術應用於陸、海、空等不同型式的載臺，構成戰術無線電通信及作戰指管數據鏈路，而未來將更著重於衛星通信之領域發展，藉以建構更具彈性的戰略通信手段。
- 三、先進國家均已投入軟體定義無線電技術發展，結合商用通訊技術，並推廣至軍事領域運用，可藉此滿足各類型作戰需求。爰此，我國亦應持續將新式通訊技術納入軍事通信運用，藉此提升國軍聯合作戰決策及戰場應變能力，進而取得防衛作戰之戰場優勢。

關鍵詞：軟體定義無線電、軟體通訊架構、軍事通信

前言

軍事通信的發展，尤其是戰術通訊技術，影響著當代戰爭型態與部隊作戰方式。德軍在第二次世界大戰期間，運用「閃擊戰」席捲歐陸，該戰法的核心為運用無線電來保持各級部隊指揮官與空中戰機飛行員彼此之間的聯絡，遂行空中部隊與地面裝甲兵的協同作戰，有效發揮機甲部隊的快速運動戰力。到了1990年代初期的波灣戰爭，以美軍為首的多國聯軍在戰場上大量運用全球定位系統(Global Positioning System, GPS)等各類數據及資訊，構成盟軍作戰各國部隊行動所需的共同作戰圖像(Common Operational Picture, COP)情資，顯見現代化戰爭模式已朝高科技之聯合作戰面向轉變，¹然而盟軍各國在作戰過程中卻發現部隊的無線電通訊裝備型式不盡相同，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，因此保持第一線作戰部隊彼此之間的通訊相容，成為

1 羅伯特.M.奇蒂諾，《從閃電戰到沙漠風暴：戰爭戰役層級發展史》(臺海出版社，2019年5月)，頁14-16。



了其所面臨的主要問題。²因此美軍在戰後開始針對不同軍種之間的無線電互通聯進行研究，藉由美國學者Joseph Mitola所提出的「軟體定義無線電(Software-defined Radio, SDR)」概念—「透過下載軟體方式來控制、改變與提升無線電通信機的性能，並且可以彈性擴充功能」，最終於1997年展開「聯合戰術無線電系統(Joint Tactical Radio System, JTRS)」計畫，規劃研發新一代的各軍種通用無線電通信機，並將「軟體定義無線電」定位為未來無線電通信的發展基礎。³

對於我國軍地面無線電通訊而言，主用頻段在高頻(High Frequency, HF)至超高頻(Ultra High Frequency, UHF)之間，然而檢視部隊現行的VRC-174無線電機、37系列特高頻跳頻無線電機及GRC-406無線電機等裝備可以發現，各型通信機使用迄今至少已逾十餘年，裝備老舊、妥善率不佳造成通信效能不彰等問題顯著，而電臺廣播、數位電視、行動電話基地臺等多樣無線訊號所構成的複雜電磁環境，也嚴重影響、干擾著部隊通訊的品質，而無法滿足現今聯合作戰所要求的指管情傳需求，因此國軍無線電通訊裝備之檢討精進實屬必要。

當前歐美科技先進國家已在軟體定義無線電技術領域耕耘發展將近二十餘年以上，並藉著國內、外的國防工業廠商所製造的無線電通信機、波形軟體等相關產品，大量地將軟體定義無線電運用在國防軍事通信領域；除此之外，中共亦已將軟體定義無線電技術運用在衛星通訊領域，於2018年11月成功地發射試驗衛星，並且進入太空軌道進行運作，在在顯示了未來無線電通訊技術的發展將以軟體定義無線電為基礎。⁴本研究將簡析軟體定義無線電的技術與各國發展現況，探討國軍應如何借鏡歐美及中共等國家運用實例，強化部隊戰術無線電通訊發展策略與應用手段，期能提升部隊作戰指管情傳效能。

軟體定義無線電發展

無線電通信的運作可分為發射機及接收機等兩部分，發射機作業時會於天線上施加電流進一步產生輻射電磁場，將電流的能量轉變成無線電波以便把附載的資訊傳遞至遠方；至於接收機在運作時，則是由於天線受到周遭電場變化的影響，在天線內部產生電流電壓，並經過通信機的訊號放大、訊號過濾選擇、干擾排除以及訊號解調變等一連串處理之後，用戶便能夠接收遠端傳來的訊息(無線電收發運作架構如圖1)。⁵

2 鄭南宏、焦興也，〈淺談國防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8。

3 嚴筑平，〈導入軟體定義無線電於現代戰場之研究-以無線電通資系統為例〉(國防大學陸軍指揮參謀學院軍事專題研究，2019年6月)，頁2。

4 中國新聞網，〈中國首顆軟體定義衛星“天智一號”成功發射〉《中國新聞網》，<http://www.chinanews.com/gn/2018/11-20/8681059.shtml>，2018年11月20日，(檢索日期：2024年9月29日)。

5 N. Saifullah et al., “LOW NOISE AMPLIFIER APPLICATION USING NEGATIVE FEEDBACK FOR UL

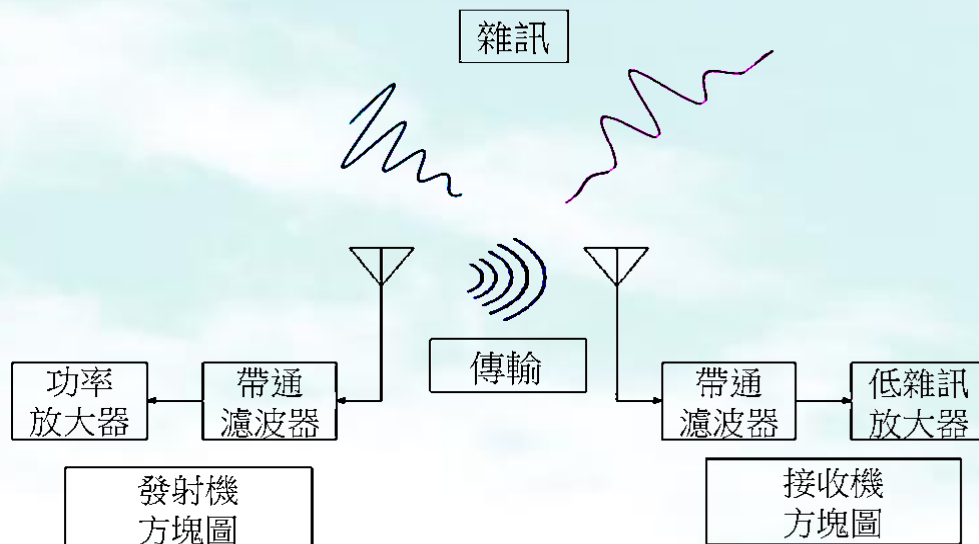


圖1 無線電發射接收運作架構

資料來源：作者整理，參考N. Saifullah et al, “ LOW NOISE AMPLIFIER APPLICATION USING NEGATIVE FEEDBACK FOR ULTRA-WIDEBAND APPLICATIONS, ” ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.11, No.5, (2016.3), p.3295

一、軟體定義無線電概念

美軍為了滿足在軍事無線電通訊作業時「不需更換硬體裝備即可快速且彈性地改變通信機性能」之使用需求，因而提出了「軟體定義無線電」之概念。其技術概念主要是透過軟體程式控制無線電通信機的所有通訊規格與功能，例如載波頻率、功率、訊號格式、頻寬及通訊協定等，而且就如同電腦執行不同軟體程式會有不同的功能，當通信機的相應程式更改後便能夠支援不同的通訊標準規格。⁶

無線創新論壇(Wireless Innovation Forum)將其定義為「部分或全部實體層功能由軟體定義之無線電」，⁷因此依照無線電通信機的技術，可以進一步地再細分成五個層級(如表1)

(一)傳統無線電(Hardware Radio)

整部通信機由傳統硬體元件組成，各項無線電功能均由硬體提供，因此裝備頻段、功率、調變解調等性能均為固定，除非進行元件更換，否則無法調整或變更其通信性能(如圖2)。

TRA-WIDEBAND APPLICATIONS,” ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.11, No.5 (2016.3), p.3295.

6 陳逸民，〈軟體定義無線電技術與平台架構〉《中國無線電協進會102年技術論文》，2013年11月，頁20-25。

7 《T&M solutions for software defined radios(SDR)》(München：Rohde & Schwarz, July 2018), p.5.



表1 軟體無線電技術發展分類

級別	名稱	描述
0	傳統無線電	以傳統硬體元件組成無線電，各項功能均為固定，例如現行使用的 VRC-174 無線電機及 GRC-406 無線電機。
1	軟體控制無線電	透過數位化介面來設定無線電通信機的部分功能，例如設定頻率等，現行使用的 37 系列特高頻跳頻無線電機即歸類於這個級別。
2	軟體定義無線電	透過軟體程式的設定來調整通信機的頻率頻寬、波形調變解調、通訊模式及安全性等功能。
3	理想軟體無線電	通信機的功能與組成元件均達到高度軟體化，而且天線性能也可透過軟體進行調整，但仍然具有少數的類比元件。
4	終極軟體無線電	通信機的所有元件與功能均能由軟體程式達成，並能支援廣泛的功能和頻率。

資料來源：Tricia J. Willink, “SDR and Cognitive Radio for Military Applications,” Emerging Wireless Technologies, 2007, pp. 8-1~20.

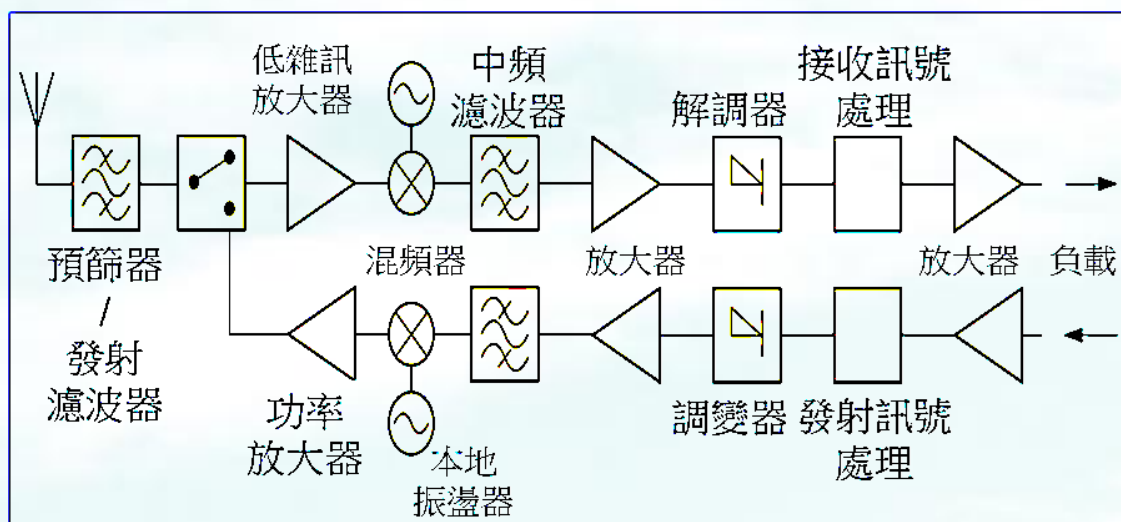


圖2 傳統(硬體)無線電組成架構示意

資料來源：作者整理，參考Rüdiger Leschhorn & Boyd Buchin, “Software defined radios - overview and hardware, ” News from Rohde & Schwarz, No.182(2004), pp.58-61

(二)軟體控制無線電(Software-Controlled Radio)

無線電通信機透過「數位化介面」來控制通信機部分或全部實體元件的功能，例如設定使用頻率、發射功率或加解密參數等，但通信機的性能提升仍需



藉由更換硬體元件來達成。

(三)軟體定義無線電(Software Defined Radio)

運用軟體程式來實現無線電通信機內大部分實體元件功能，特別是載波的頻率和頻寬、波形調變解調以及加解密等功能，皆可以使用軟體進行重新設定配置，然而受限於當前硬體技術，通信機的可用頻段仍然未能涵蓋整個頻譜。此外，通信機需要透過降頻、濾波等元件來還原及處理天線所接收到的類比無線電訊號，並透過類比數位轉換元件(Analog-to-Digital Converter, ADC)轉為數位訊號，接續再由「特殊應用積體電路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)」、「場型可程式化閘陣列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)」、「數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)」、「通用處理器(General-Purpose Processor, GPP)」等元件進行訊號處理 (如圖3)。

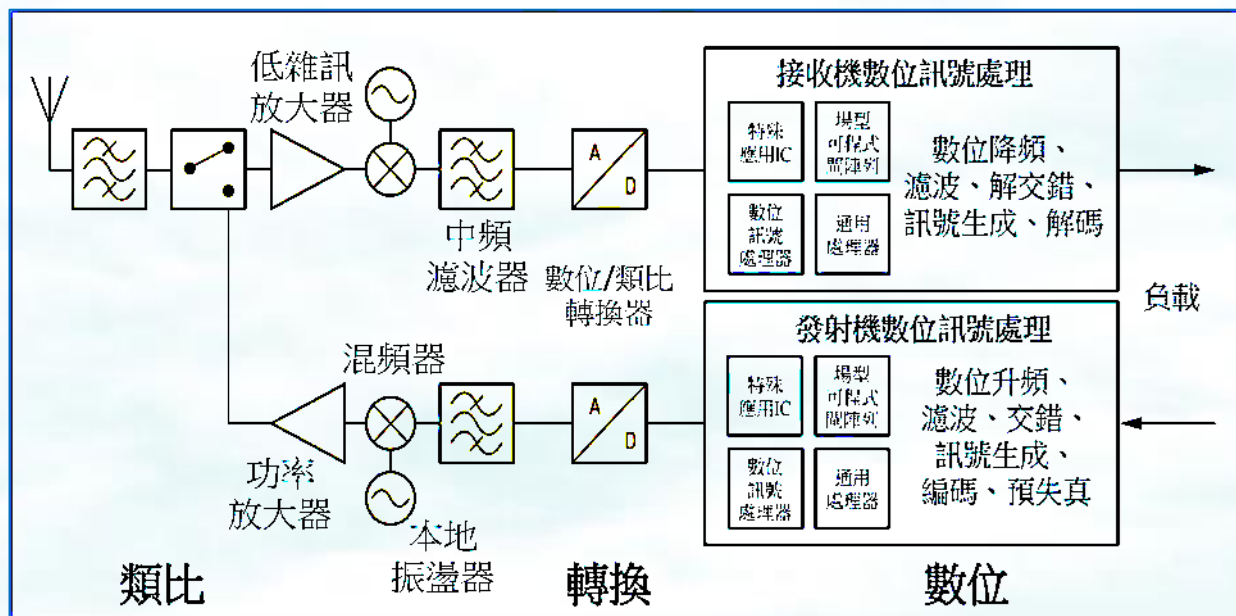


圖3 現行軟體定義無線電架構

資料來源：作者整理，參考Rüdiger Leschhorn & Boyd Buchin, “Software defined radios - overview and hardware, ” News from Rohde & Schwarz, No.182(2004), pp.58-61

(四)理想軟體無線電(Ideal Software Radio)

除了天線、功率放大器、收音與揚聲等類比式硬體設備外，通信機內其餘的無線電通信機功能均由軟體實現，除此之外，通信機的天線及射頻前端(RF Frontend)能直接處理接受到的類比訊號，不需要再透過元件進行降頻，所以在架構的設計上，類比數位轉換元件的配置與其處理作業會盡可能靠近天線端(如圖4)。

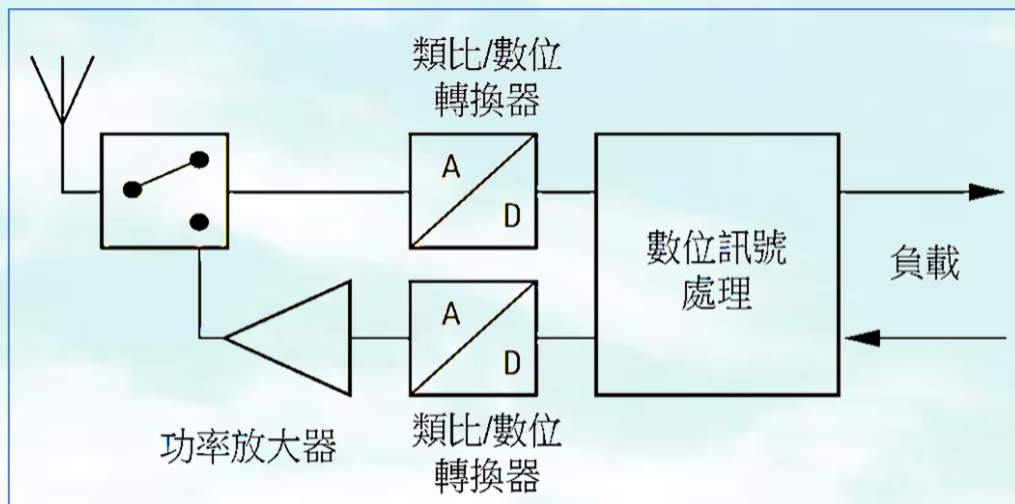


圖4 理想軟體無線電架構

資料來源：作者整理，參考Rüdiger Leschhorn & Boyd Buchin, “Software defined radios - overview and hardware, ” News from Rohde & Schwarz, No.182(2004), pp.58-61

(五)終極軟體無線電(Ultimate Software Radio)

無線電通信機的所有實體元件與功能皆能夠藉由軟體達成，同時可以支援廣泛的功能和頻率。在這個級別中，無線電發射接收等運作不再需要天線、話筒、揚聲器等元件，用戶只要透過裝有無線電應用軟體的設備進行無線電通聯，也就是說軟體即是無線電通信機。

二、技術框架標準

為了促進軟體定義無線電系統的軟體與硬體等模組元件的可移植性、互通性以及可配置性等特點，因此在其發展之初即由無線創新論壇(WInnForum)進行相關技術規範的制訂，並於1997年透過該論壇的技術報告正式發表「軟體無線電架構(Software Radio Architecture, SRA)」，後續該論壇與「模組化可編程軟體無線電聯盟(Modular Software Programmable Radio Consortium, MSRC)」及美軍等單位合作，建構了美軍「聯合戰術無線電系統軟體通訊架構(Joint Tactical Radio System Software Communications Architecture, JTRS SCA)」，並於2002年正式捨棄原有的軟體無線電架構規範，轉而支持公開可用的軟體通訊架構(Software Communications Architecture, SCA)，其要點在於「提供不同SCA實作產品之間應用軟體的可移植性」、「運用商規標準降低開發成本」、「透過設計模組重複使用縮短軟體開發時間」及「不斷發展商業框架和架構為基礎」。⁸

⁸ The Wireless Innovation Forum's Software Defined Systems (SDS) Committee, 〈History of the Forum and the SCA〉《SDR WInnForum Standards》, <https://sds.wirelessinnovation.org/history-of-the-sca>, (檢索日期：2024年9月29日)。



軟體通訊架構(SCA)規範自發展迄今，已由無線創新論壇(WInnForum)所成立的國際軟體通訊架構標準協調委員會(Coordinating Committee on International SCA Standards)發布數次更新，其最新版本為SCA 4.1。⁹SCA架構的系統主要可以區分成兩大部分(如圖5)：

(一)波形(Waveform)

這部分可視為系統中的應用程式，其可能由數個不同的波形程式物件組成，負責輸入數據的處理，並且決定這些數據輸出的型態。

(二)操作環境(Operating Environment, OE)

操作環境(OE)由裝置(Devices，在此代表提供存取系統硬體資源的軟體元件)與系統服務(Services)、核心框架控制(Core Framework Control)、操作系統(Operating System)及傳輸機制(Transfer Mechanism)等單元組成，為波形程式存取系統資源的中介軟體，主要作用為管理和執行SCA元件的能力。

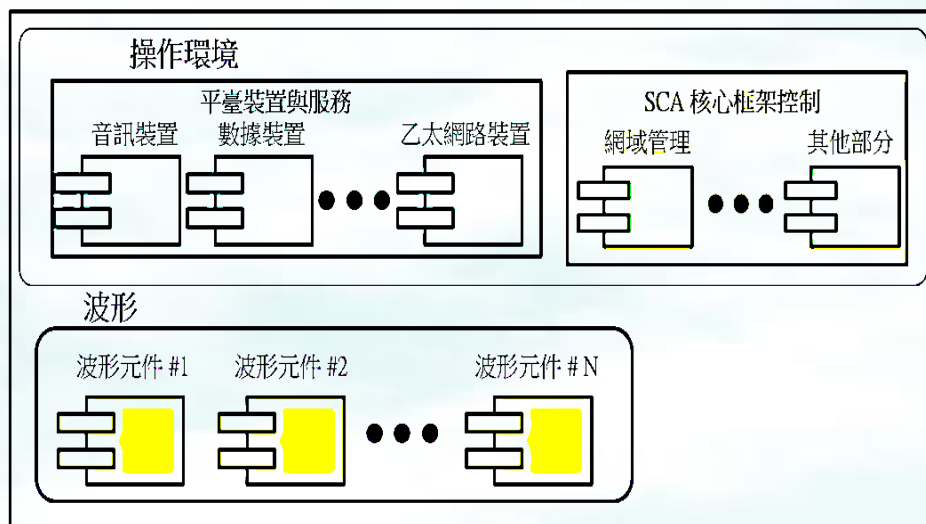


圖5 SCA-based系統組成

資料來源：JTNC，〈SOFTWARE COMMUNICATIONS ARCHITECTURE SPECIFICATION〉，《SCA4.1Final》，2015年8月發行，頁16-19。

三、未來技術發展趨勢

隨著科技的進步與民生電信需求的成長，軟體定義無線電的發展也從原來的國防通信領域，跨足到民營商用電信，其傳輸內容除了語音外，文字數據、圖像及影音等資料的需求也越來越大，再加上周遭的無線傳輸裝置數量也如雨後春筍般地快速增長，進而造成可用且適合的電磁頻譜資源逐漸減少，並讓當前的

9 同註8。



電磁環境更加複雜，使用者更容易遭受到干擾。

為了解決無線傳輸所遇到的問題，已從頻率、天線等面向提出許多解決方案，諸如多輸入多輸出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)系統天線、運用波束成形(Beam Forming)的指向性天線，甚至5G毫米波(Millimeter Wave)通訊技術以及感知無線電(Cognitive Radio)，¹⁰然而由於戰術無線電通訊的頻段主要落在高頻(HF)至超高頻(UHF)之間，因此軟體定義無線電在軍事運用領域的發展趨勢著重於提升跳頻(Frequency Hopping)技術與先進波形的研發。

(一)提升跳頻性能

跳頻技術是當前對抗敵方電子戰威脅與克服複雜電磁環境中無線電干擾的最重要手段之一，其與傳統無線電通訊的不同之處在於「跳頻採用了一種透過快速改變載波頻率的方式來發送無線電訊號」，因此如果將通信機的整個可用頻段和持續射頻時間劃分為二維網格，那麼通信機在每一個的時間點，將會使用頻段內的不同頻率進行通訊傳輸(如圖6)。¹¹

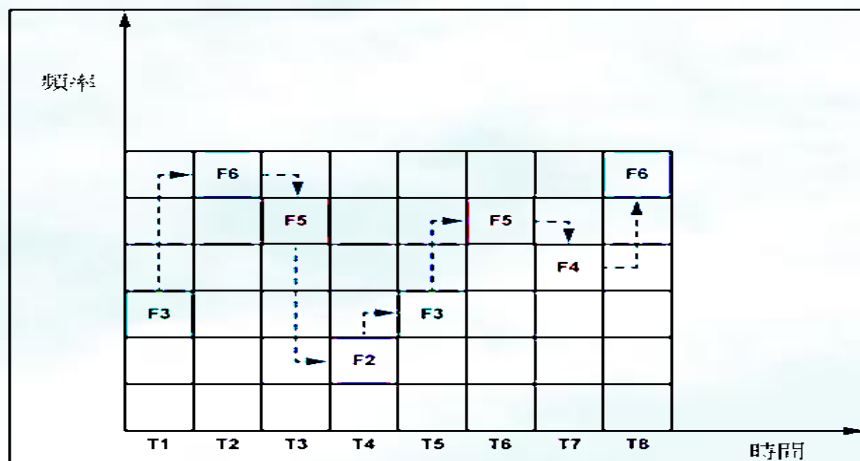


圖6 跳頻概念示意圖

資料來源：Mizhou(Michelle) Tan, “The Next-Gen, Software-Defined Radio(SDR) Transceiver Delivers Big Advances in Frequency Hopping(FH), ” AnalogDialogue, Vol. 55,No.4,(2021.10), p.12.

由於頻率跳變模式的隨機性使得有心者難以偵測、截獲並進行蓄意干擾，所以相比於傳統無線電的定頻通訊，其抗干擾的能力較高，且具有較強的抗惡

10蔡作敏，〈無線行動通訊—過去的發展以及未來的挑戰〉《科學月刊》，<https://www.scimonth.com.tw/archives/1780>，2017年10月1日，(檢索日期：2024年9月29日)。

11Mizhou(Michelle) Tan, “The Next-Gen, Software-Defined Radio(SDR) Transceiver Delivers Big Advances in Frequency Hopping(FH), ” AnalogDialogue, Vol. 55, No.4 (2021.10), p.12-18.



意攔截和封鎖的特性，同時此種方法也在發送端和接收端之間增添了一項只有雙方才能解碼的安全機制，相當於無形之間提升了通訊傳輸的安全。

就美軍Link-16而言，其瞬間跳頻速率為1/3微秒(Microseconds, μs)或每秒跳頻76,923次，具有高度的抗干擾能力，而北約目前使用的Link-22更是以Link-16為基礎所發展的最新技術，其跳頻速率更高、抗干擾能力更強，由此可見提高跳頻性能對軍事通信的重要性。¹²

(二)先進波形軟體研發

波形是訊號載波在傳遞過程中所形成的空間形狀，不同的波形在「穩定性暨移動性(Robustness and Mobility)」、「抗干擾性(Jam Resistance)」、「低偵測暨攔截率(Low Probability of Detection and Interception, LPD/LPI)」、「高數據速率(High Data Rate)」、「高覆蓋範圍(High Range and Coverage)」、「行動網路能力(Mobile Ad-hoc Network, MANET)」、「服務品質(Quality of Service)」及「適應性(Adaptability)」等特性上均有差異。¹³

2022年時，美軍除已經具備SINCGARS、Link11、Link-16、HaveQuick I/II等舊式波形外，更擁有SATURN、Link-22、Secure 4G/LTE Specifications、Soldier Radio Waveform(SRW)及Tactical Scalable MANET Waveform等多種先進波形，¹⁴2024年更投入56億美金的預算進行C⁴I系統的通信電子技術研發，而波形即是該研究的項目之一，其目的就是為了打造安全可靠且可信任的資通傳遞途徑，以獲取絕對C⁴I的優勢。¹⁵

四、優勢分析

綜前所述，可知軟體定義無線電已是無線電通訊發展的主流趨勢，其所具備的優勢分析如下：

(一)體積小、重量輕、配置靈活

相較於傳統硬體無線電，因為軟體定義無線電將原本傳統硬體無線電通信機當中負責等硬體元件透過軟體程式化，大幅降低通信機重量與體積，因此在當前半導體技術的日新月異發展之下，未來晶片元件體積將越來越小，除了傳統手持、背負、車載、機(艦)載等通信機型式外，甚至更可以裝配在穿戴式裝置，

12萬濟人，〈數據鏈路對空軍指揮管制系統運用之影響—以LINK-16為例〉，《國防雜誌》第二十卷第四期，2005年4月，頁109-112。

13Rohde & Schwarz，〈Waveforms for LOS/BLOS communications〉《Rohde & Schwarz》，https://www.rohde-schwarz.com/tw/solutions/aerospace-defense-security/defense/army-communications/technologies/technologies_250453.htm，(檢索日期：2024年10月13日)。

14JTNC，〈2022 DoD Communications Waveform Inventory〉《Joint Tactical Networking Center》，<https://www.jtnc.mil/Resources-Catalog/Resource-Catalog-Article-View/Article/3090092/2022-dod-communications-waveform-inventory>，July 2022，(檢索日期：2024年10月13日)。

15《UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE FISCAL YEAR 2024 BUDGET REQUEST》(Virginia：U.S. Department of Defense，March 2023)，p.2-1。



大大提高其機動性與部署運用效能。

(二)可支援多重通訊標準

軟體定義無線電的特性之一為「可重置組態(Reconfigurable)」，因此使用者可以依據各種任務環境、用戶層級與傳輸需求，透過程式化軟體的下載，達成不同的通信頻段、調變(解調變)方式、波形模態及通訊協定等通信機能調整，可以即時滿足作戰通信需求。

(三)具快速功能擴充彈性

軟體定義無線電通信機的硬體組成採模組化設計，各項功能採整合方式燒錄在FPGA、GPP、ASIC等各種通信機的模組元件內，因此在需要擴充通信機功能時，用戶只需更換(或新增)相關模組元件即可完成擴充。

(四)抗干擾及通訊安全能力較佳

從俄烏戰爭中可以發現，交戰雙方在戰鬥的同時會靈活搭配運用電子戰方式，對敵方進行電磁干擾、電子截收等措施，然而軟體定義無線電因為具備功能擴充彈性，並且能夠藉由軟體更新來調整通信機的通訊協定、波形、跳頻展頻以及加密編碼等性能，提升己方的通訊安全與通信機抗干擾能力。

SDR軍事應用現況

軟體定義無線電發展迄今已將近有30餘年，目前美、法、德、日、韓等多數國家已採用部署SCA架構的軟體定義無線電，並設置軟體研製與設備生產等相關技術發展機構(如圖7)，其在民間的主要運用是以消費型電子通信產品為大宗，以下茲針對美國、歐盟及中共等軍事大國與跨國組織的發展與軍事通訊方面運用進行簡要探討。



圖7 SCA-Based SDR的全球部署現況

資料來源：Lee Pucker，〈Wireless Innovation Forum contributions to SCA 4.1〉《Military Embedded Systems》，<https://militaryembedded.com/comms/sdr/wireless-contributions-sca-4-1>，October 2014，(檢索日期：2024年9月29日)。



一、美國

美軍鑒於第一次波灣戰爭中盟軍多國部隊的無線電通信機無法互通及相容的經驗，因此美國國防高等研究計畫署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)依據Joseph Mitola博士發表的軟體定義無線電概念，於1991年提出「SPEAKEasy計畫」，目的為研製一款無線電通信機以滿足地空部隊之通聯需求。該計畫共區分為兩個階段，第一階段在1994年成功研發出一套固定站台型式的大型軟體定義無線電通信機，因此美軍隨即開啟計畫的第二階段，發展各類機動載台型式的「可快速重新配置、具備多種不同通訊協定」之軟體定義無線電，最後以整個計畫的成果為基礎，於1997年展開「聯合戰術無線電系統(JTRS)」計畫。¹⁶

聯合戰術無線電系統(JTRS)計畫的目標是透過多頻段(Multi-band)、多模式(Multi-mode)及多波形(Multi-waveform)等軟體定義無線電系統取代傳統無線電系統，有效支援美軍單兵手持、車載、艦(機)載與固定站台等各式載台的無線電設備，達到整合美國全軍及北約盟軍之作戰管理、情報、防空和火力支援及海、空軍載臺等數據鏈路，滿足「網狀化作戰」所需。¹⁷

當前美軍部隊現行使用之聯合戰術無線電機，其技術標準規範是遵循JTRS計畫，並且相容於SCA架構的軟體定義無線電，主要區分成手持式(Handheld、Manpack & Small Form Fit)、地面機動(Ground Mobile Radio)、空海暨固定載台(Airborne Maritime Fixed)及多功能資訊分發系統(Multifunctional Information Distribution System)等四種不同型式(如表2)。¹⁸

表2 聯合戰術無線電機型式

項次	型式	說明
1	手持式 人攜式	主要有車載式(Small Form Fit)、手持式(Handheld)、單兵無線電(Rifleman Radio)及背負式(Manpack)等四型，並可視任務需求彈性調整無線電通道數量，並結合不同無線電機波形，使用戶彼此達到互相構連。
2	地面機動	藉由重新下載軟體來建置無線電通信機的網際網路協議規範、網路波形與自組建網能力，並透過路由和轉發功能，將不同頻段的各種波形鏈結在一起，整合成為一個網路。

¹⁶Wayne Bonser, 〈SPEAKEasy Military Software Defined Radio〉《Institute for Telecommunication Sciences》，https://its.ntia.gov/media/30649/bons_s.pdf(檢索日期：2024年9月29日)。

¹⁷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》(桃園)，第136期，2021年10月，頁62

¹⁸同註17，頁60-61。



項次	型式	說明
3	空海暨固定載台	可再細分為機載、艦載及站台固定等項目，並且具有多頻段、多模式及隨建即連網路(MANET)等功能。
4	多功能資訊分發系統	主要為機(艦)載數據鏈終端無線電通信機，具有 4 個全雙工通道，可形成戰術空中導航(TACAN)、戰術鏈路(Link-16)和 J 訊息語音(J-Voice)等連結運用。

資料來源：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月發行，頁60-61。

二、歐盟

歐盟於2009年初啟動「歐洲安全軟體定義無線電(European Secure Software Defined Radio, ESSOR)計畫」，其目的在為歐盟軍事部隊制定專用無線電的開發通用技術架構，凡是依據該技術標準生產製造的無線電裝備，無論是何家廠商、不同平臺，均能在統一的框架下，滿足歐盟部隊聯合作戰之語音與數據通信的互通需求，進而加強歐洲的戰略自主性。而負責管理ESSOR計畫的歐盟聯合軍備合作組織在2010年制訂了該計畫的結構框架，主要包括「核心架構(Core Framework)」、「GPP、DSP 和FPGA的操作環境」、「無線電裝置(Radio Devices)」、「無線電服務(Radio Services)」及「無線電安全性服務(Radio Security Services)」等五項領域，使其具有「靈活性(Flexibility)」、「可擴充性(Scalability)」及「波形可移植性(WF portability)」等三大優勢(如圖8)。¹⁹

2021年ESSOR計畫開始進行「新功能(ESSOR New Capabilities)專案」，目的在於開發新的波形，以提高歐盟部隊彼此的戰術地面(Land)、空地(Air-Ground-Air)以及衛星通信(Satellite Communications)等無線電通聯的相容性和安全性，到了2022年3月ESSOR計畫與相關測試已獲取部分成果，證明該計畫的確能使不同成員國的軍隊能夠使用各自的無線電在戰場上進行彼此通聯。綜合前述可知，目前由法國、芬蘭、西班牙、波蘭、瑞典、義大利、德國等國家共同推動執行的ESSOR計畫重點不僅是在戰術通訊方面，還包括如衛星通信之戰略通訊層面。²⁰

19 〈ESSOR Architecture - Motivation and Overview〉(Bonn/Germany：OCCAR，December 2010)，p.5。

20 THALES Group，〈A4ESSOR AND OCCAR SIGN ESSOR NEW CAPABILITIES (ENC) CONTRACTS, EMBARK ON NEW TELECOMMUNICATIONS PROJECTS FOCUSING ON ARMED FORCES INTEROPERABILITY〉《THALES》，https://www.thalesgroup.com/en/group/press_release/a4essor-and-occar-sign-essor-new-capabilities-enc-contracts-embark-new，November 2021，(檢索日期：2024年9月29日)。

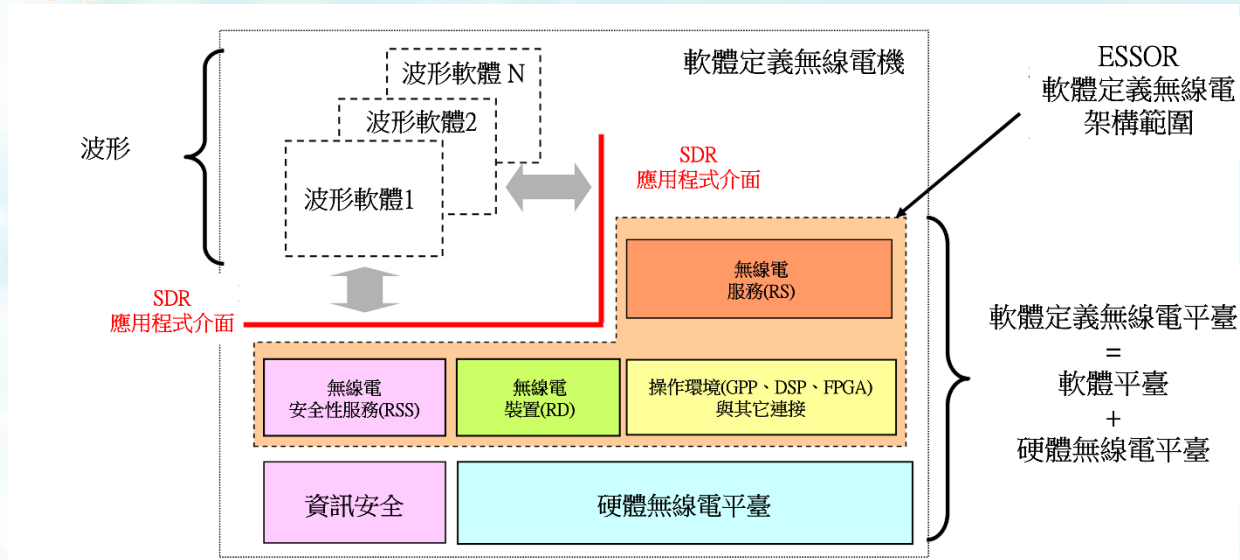


圖8 歐洲安全軟體定義無線電技術標準架構

資料來源：《ESSOR Architecture – Motivation and Overview》(Bonn/Germany：OCCAR，December 2010)，p.4。

三、中共

中共的無線電通信技術專家學者，如楊小牛、于全等人，在二十一世紀初便將軟體定義無線電概念引入中國大陸，並且陸續推出有關的著作。在2001年出版的《軟件無線電原理與運用》書籍中曾指出，軟體定義無線電應用的重點區分為民間與軍用，在民間的運用主要為個人行動通訊，因此相關論述著重在行動通訊基地臺的技術發展探討；至於在軍事領域方面，該書則再細分成「軍事通信」、「電子戰對抗」及「雷達探測」等三個面向。²¹然而中共技術經濟協會在2012年4月於《科學技術與工程》期刊中刊載一篇名為《軟體無線電技術及其在軍事領域的應用》文章，文中除了前述三種應用面向的介紹外，還增加在「導航」與「衛星」等兩個方面的運用，並且針對「軍事領域的SDR統一平臺開發」與「衛星通信平台波形開發」等議題加以論述探討。²²

由於軟體定義無線電技術在境內發展迄今已逾二十餘年，因此部分民營廠商如「介方信息」、「萬藍科技」等公司，已經能自行生產軟體定義無線電產品，其所使用技術標準除相容於國際的軟體通訊技術框架(SCA)之外，也符合共軍的軍事規範。該規範的核心框架採模組化設計，區分啟動元件、框架控制元件、框架服務元件與Xml文件解析元件等部分，是整個通信機操作環境的關鍵，提供無線電機內各項裝置資源與波形的調度管理等主要功能。²³此外從中共國家科技

21楊小牛、樓才義、徐建良，《軟件無線電原理與應用》(北京：電子工業出版社，2001年1月)，頁227-257。

22李飛等3人，〈軟體無線電技術及其在軍事領域的應用〉《科學技術與工程期刊》，12卷11期，2012年4月，頁2668-2670。

23上海介方信息技術有限公司，〈OpenSCA核心框架〉《介方信息》，<https://www.onetek.net/index.do?productID>



計畫年度執行報告中可發現，由國家主導高新通資技術研發項目已於2009年運用軟體定義無線電技術，自行成功研製衛星通信地面站與移動通信終端等設備產品，²⁴更於2018年發射衛星進行軟體定義無線電的衛星通信技術試驗。²⁵

因此就上述技術發展的概況，以及目前網際網路上已可搜尋到的中共自製商規手持式軟體定義無線電通信機產品，如「萬藍通信」的ANYMESH-SDR-A1 (1W)單兵手持型跳頻電台等產品來推論，當前中共極可能已將軟體定義無線電納入共軍戰術無線電通信應用，並且特別著重於航天衛星通信方面。

軍事通信未來發展芻議

一、現況分析

(一)裝備種類型式繁多，互通性不佳

長久以來，國軍無線電通信裝備主要可以區分為美製與國造等兩大類，由於獲得時間、使用階層與用途等差異，因此各式通信裝備(如表3)在作業頻段、加解密、通信模式(定頻／跳頻)等技術特性上均有不同，所以即便是工作頻段與調變模式均相同的通信機。例如連級(含)以上單位所使用的37系列跳頻無線電機與排(班)級的HR-93手持無線電機，仍會因為加解密的技術不同，以至於無法在加密模式下進行相互通聯。因此為了讓不同型式的通信機相互通聯，通信人員必須採用相同的工作頻率，以定頻、無加密方式實施無線電通訊，然而此種通信方式極易遭受敵方電子截收及干擾。

表3 國軍各軍種無線電通信裝備

項次	裝備類型	通信 頻段	安全性能		使用 軍種	使用層級
			跳頻	保密		
1	174 系列	HF	X	V (人工譯電)	陸	作戰區、旅
					海	艦艇
2	RT-7000	HF	X	X	陸	作戰區
					海	艦指部
					空	空作部

etail&id=6(檢索日期：2024年9月29日)。

24中華人民共和國科學技術部，〈2009年國家科技計畫執行概況〉《中華人民共和國科學技術部》，<https://www.most.gov.cn/ndbg/2010ndbg/201010/P020101015519918287667.pdf>(檢索日期：2024年9月29日)。

25同註4。



項次	裝備類型	通信 頻段	安全性能		使用 軍種	使用層級
			跳頻	保密		
3	LINK-11	HF	V	V	海	艦指部、艦艇
4	AN/VRC-100	HF	V	V	陸	航空部隊(旅、營、連)
5	AN/ARC-220	HF	V	V	陸	陸航直升機
6	HR-93	VHF	X	V (語音攪亂器)	陸	排、班
					海	岸勤部隊、 陸戰隊(排、班)
					空	地勤部隊
7	H-105	VHF	X	V (AES 256)	陸	排、班
8	37 系列	VHF	V	V	陸	作戰區、旅、營、連
					海	岸勤部隊、 陸戰隊(旅、營、連)
					空	地勤部隊
					憲	指揮部、隊
9	AN/ARC-201	VHF	V	V	陸	陸航直升機
10	AN/ARC-186	VHF	X	X	陸	陸航直升機
11	AN/VRC-92E	VHF	V	V	陸	航空部隊(旅、營、連)
12	TETRA P25	UHF	X	X	海	海軍岸勤部隊
					憲	憲兵部隊
13	GRC-406	UHF	X	X	陸	旅、營
14	LINK-16	UHF	V	V	陸	作戰區
					空	空作部、戰機
15	AN/ARC-164	UHF	X	X	陸	陸航直升機
16	RF-7800	VHF 及 UHF	V	V	陸	航空部隊(旅、營、連)
17	RT-8103	VHF 及 UHF	V	V	陸	作戰區、 航空部隊(旅、營、連)、 陸航直升機
					空	空作部、戰機

資料來源：作者整理，參考李書全，〈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》(桃園：陸軍司令部通信電子與資訊訓練中心，2021年10月)，頁68



(二)可用頻率不連續且頻寬不足

現行國軍無線電通訊的頻率主要在HF、VHF與UHF等三個頻段(3M至3GHz)，但經檢視我國數位發展部修正頒布之無線電特定用途頻段表，可知前述頻段大多數的用途，係以作為商業(行動通信及衛星通信)、導航及學術研究運用等用途，而供軍事、警消等公務部門使用的頻率多為不連續的頻段，進而影響軍事通信的可用無線電傳輸頻寬不足。如果單就人員語音通聯而言，這些零散的頻率或可滿足軍事通訊時所需的傳輸需求，然而對於指管系統數據鏈路所需的傳輸流量頻寬卻明顯不足，且難以和諧共用。

(三)無法滿足現代作戰指管需求

美軍早在第一次波灣戰爭便開始運用指管通情鏈路，雖然當時的前線部隊需在指揮官下達命令的三天後才能獲取相關訊息，但是到了第二次波灣戰爭時這一時間已能控制在十分鐘之內。²⁶反觀國軍從2007年前後開始建置迅安系統，主要運用在聯合作戰的指揮管制，然而該系統在地面部隊中卻僅建置到作戰區層級，迄今陸軍旅級(含以下)各部隊均無專屬的C⁴ISR系統，²⁷為使指揮官作戰命令快速傳達至第一線單位，國軍地面部隊發展其專屬指管情傳系統時，勢必需要具備高數據傳輸性能的可攜式無線電通信機，俾滿足分散式指管所需。

二、軍事通信精進策略芻議

(一)導入最新SDR通信技術

國軍無線電通訊應朝向軟體定義無線電領域發展，相關研發以國防部、中科院及國安局等三方分工合作為主，由國防部通次室負責制訂各型載台的無線電通信機性能需求與技術標準，中科院承包軟體定義無線電通信機與專屬先進波形軟體的研製，至於國安局則著重於無線電傳輸安全模組的設計與檢測驗證。在國防自主的發展過程中，亦可透過「商用現貨(Commercial Off-The-Shelf, COTS)」管道，從國內、外商業市場中採購具有高度可靠、抗干擾及高傳輸能力等符合國軍通信需求標準的產品，以迅速提升部隊通信戰力，並由此種方式降低軍事通信裝備研製與維護的成本，同時與國防工業承包廠商簽署合作，加快我國軍事通信技術發展的進程。

(二)強化空地作戰部隊無線電通聯

面對中共軍事威脅，國軍防衛作戰區分為整體防空、聯合截擊及國土防衛等三個進程，²⁸而地空整體作戰為未來臺澎防衛作戰的重要項目，²⁹其中「地

²⁶同註2，頁4-5。

²⁷同註17，頁69。

²⁸中華民國國防部，《中華民國112年國防報告書》（臺北：國防部，西元2023年9月），頁63。

²⁹王清安、黃基楨，〈以美軍地空作戰通資系統探討本軍地空作戰通資系統之發展〉，陸軍通資半年刊第128期



」指的是地面作戰部隊、「空」則是以陸航部隊為主，並結合空軍密支兵力所形成的空中作戰部隊，³⁰因此如要有效地發揮統合戰力，擁有良好的三軍通用無線電通訊是至關重要的。運用軟體定義無線電(SDR)透過波形軟體與通信機功能應用程式的安裝更新來改變頻率、定(跳)頻工作模式、抗干擾與低偵測截獲率(LPD/LPI)等特性後，陸軍地面部隊除可以和臨空的陸航直升機與空軍戰機進行通聯外，亦可降低敵軍對我無線電通訊的偵測截獲及干擾等效能，確保無線電通訊的穩定與安全，提升聯合作戰效益。

(三)建構地面部隊作戰指管情傳

共同作戰圖像情資分享為陸軍發展旅級(含以下)部隊C⁴ISR指管系統的主要目的之一，該系統中負責串聯起指管中心、前線部隊、武器載臺及感測器的通資鏈路必須依靠無線電來構成。由於民用行動通信於平時佔據大多數的無線電頻譜資源，因此國軍無法滿足部隊機動間所需的語音及資訊等傳輸頻寬。然而運用具有多個波道的軟體定義無線電，並搭配高數據傳輸波形，便能在平時有限的頻譜資源和諧共用，並於戰時依據國軍作戰需求，迅速重新調整SDR無線電通信機性能，滿足共同作戰圖像情資與作戰命令的直接傳遞頻寬需求。

結論

軟體定義無線電技術的發展初衷就是為了滿足軍事應用需求，在經過了科學家們幾十年的研發之後，目前已經取得相當成果，無線電通信機體積越來越小，但其所包含的功能卻越來越多，頻道數量也逐漸提高、抗干擾的能力與傳輸速率更是不斷地提升，亦因擁有良好性能與擴充彈性，因此越來越多國家採用軟體定義無線電作為公務、軍事及應急通信裝備，就連共軍也不例外。而有鑒於中共的國防預算與軍力均不斷提升，國軍戰備整備除了朝不對稱作戰思維發展外，更需要持續強化聯合作戰指通機制能力之提升。然而聯合作戰之首要，莫過於參與作戰行動的各部隊或載臺，不論其無線電通信機的品名程式與性能為何，均應能夠相互通聯，並且確保通聯的穩定性與安全性。因此國軍可藉由軟體定義無線電來達成此一目標，透過通用通信機將作戰中心、各類型感測器、野戰部隊及機動載臺等終端全數連結，構成防衛作戰指管網路系統，形塑戰場共同作戰圖像，以提升戰場透明度，縮短反應時間，加速作戰節奏，發揮三軍統合戰力，達到殲敵致勝之國軍作戰目標。

，2017年9月發行，頁60。

30陳文質，〈陸軍地空主戰部隊指管通裝整合之研析〉，陸軍通資半年刊第129期，2018年4月發行，頁6。



參考文獻

一、官方文件

- (一)〈中華民國112年國防報告書〉，2023年9月，頁63。
- (二)〈SCA4.1Final〉，August 2015，p.16-19。
- (三)〈UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE FISCAL YEAR 2024 BUDGET REQUEST〉，March, 2023，p.2-1。
- (四)〈ESSOR Architecture–Motivation and Overview〉，December, 2010，p.4。
- (五)〈中華人民共和國國家知識產權局發明專利申請-一種基於波形多級嵌套的波形部署實現方法〉，2020年7月14日，頁3。

二、書籍

- (一)羅伯特.M.奇蒂諾，《從閃電戰到沙漠風暴：戰爭戰役層級發展史》(台海出版社，2019年5月)，頁14-16。
- (二)楊小牛、樓才義、徐建良，《軟件無線電原理與應用》(北京：電子工業出版社，2001年1月)，頁227-257。

三、期刊

- (一)鄭南宏、焦興也，〈淺談國防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》(桃園)，第130期，2018年9月，頁8。
- (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》(桃園)，第136期，2021年10月，頁69。
- (三)王清安、黃基楨，〈以美軍地空作戰通資系統探討本軍地空作戰通資系統之發展〉《陸軍通資半年刊》(桃園)，第128期，2017年9月，頁60。
- (四)陳文質，〈陸軍地空主戰部隊指管通裝整合之研析〉《陸軍通資半年刊》(桃園)，第129期，2018年4月，頁6。
- (五)陳逸民，〈軟體定義無線電技術與平台架構〉《中國無線電協進會102年技術論文》，102年11月，頁20-25。
- (六)萬濟人，〈數據鏈路對空軍指揮管制系統運用之影響—以LINK-16為例〉《國防雜誌》，第20卷第4期，2005年4月，頁109-112。
- (七)N. Saifullah等6人，“LOW NOISE AMPLIFIER APPLICATION USING NEGATIVE FEEDBACK FOR ULTRA-WIDEBAND APPLICATIONS,” ARPN J ournal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11, No. 5(March 2016)，p.3295。
- (八)Rüdiger Leschhorn、Boyd Buchin，“Software defined radios – overview and hardware,” News from Rohde & Schwarz, No. 182(2004)，p.58-61。
- (九)Tricia J. Willink，“SDR and Cognitive Radio for Military Applications,” Emerging Wireless Technologies，2007，p. 8-1至8-20。



(十) Mizhou(Michelle) Tan , “The Next-Gen, Software-Defined Radio(SDR)Transceiver Delivers Big Advances in Frequency Hopping(FH),” Analog Dialogue, Vol. 55, No. 4 , October, 2021 , p.12 。

(十一)李飛等3人，〈軟體無線電技術及其在軍事領域的應用〉《科學技術與工程期刊》，12卷11期，2012年4月，頁2668-2670 。

四、軍事專題研究

(一)嚴筑平，〈導入軟體定義無線電於現代戰場之研究-以無線電通資系統為例〉，國防大學陸軍指揮參謀學院軍事專題研究，2019年6月發表，頁2 。

(二)葛鑑霆，〈行動通信技術發展對軍事應用之研究〉(桃園：國防大學空軍指揮參謀學院正規班軍事專題研究，2021年5月)，頁20 。

五、網際網路

(一)中國新聞網，〈中國首顆軟體定義衛星”天智一號”成功發射〉《中國新聞網》，<http://www.chinanews.com/gn/2018/11-20/8681059.shtml>，發行時間：2018年11月20日，(檢索日期：2024年9月29日) 。

(二)蔡作敏，〈無線行動通訊一過去的發展以及未來的挑戰〉《科學月刊》，<https://www.scimonth.com.tw/archives/1780>，2017年10月1日，(檢索日期：2024年9月29日) 。

(三)Rohde & Schwarz，〈Waveforms for LOS/BLOS communications〉《Rohde & Schwarz》，https://www.rohde-schwarz.com/tw/solutions/aerospace-defense-security/defense/army-communications/technologies/technologies_250453.htm，(檢索日期：2024年10月13日) 。

(四)JTNC，〈2022 DoD Communications Waveform Inventory〉《Joint Tactical Networking Center》，<https://www.jtnc.mil/Resources-Catalog/Resource-Catalog-Article-View/Article/3090092/2022-dod-communications-waveform-inventory>，July 2022，(檢索日期：2024年10月13日) 。

(五)Lee Pucker，〈Wireless Innovation Forum contributions to SCA 4.1〉《Military Embedded Systems》，<https://militaryembedded.com/comms/sdr/wireless-contributions-sca-4-1>，(檢索日期：2024年9月29日) 。

(六)The Wireless Innovation Forum's Software Defined Systems (SDS) Committee，〈History of the Forum and the SCA〉《SDR WinnForum Standards》，<https://sds.wirelessinnovation.org/history-of-the-sca>，(檢索日期：2024年9月29日) 。

(七)THALES Group，〈A4ESSOR AND OCCAR SIGN ESSOR NEW CAPABILITIES (ENC) CONTRACTS, EMBARK ON NEW TELECOMMUNICATIONS PROJECTS FOCUSING ON ARMED FORCES INTEROPERABILITY〉《THALE



S》，https://www.thalesgroup.com/en/group/press_release/a4essor-and-occar-sign-essor-new-capabilities-enc-contracts-embark-new，November 2021，(檢索日期：2024年9月29日)。

(八)上海介方信息技術有限公司，〈OpenSCA核心框架〉《介方信息》，<https://www.onetek.net/index.do?productDetail&id=6>(檢索日期：2024年9月29日)。

(九)中華人民共和國科學技術部，〈2009年國家科技計畫執行概況〉《中華人民共和國科學技術部》，<https://www.most.gov.cn/ndbg/2010ndbg/201010/P020101015519918287667.pdf>(檢索日期：2024年9月29日)。

作者簡介

吳朝琴少校，國防大學管理學院96年班、陸軍通資電正規班185期、陸軍指揮參謀學院113年班。曾任排長、訓練官、資訊網路官，現任國防部陸軍司令部通信電子資訊處有線電工程官。

李建鵬中校，中正理工學院電機系87年班、國管指參班101年班、國防大學理工學院資工所在職班108年班，曾任電子官、修護組長、通參官、科長、資參官、電戰官、教官。