

無線雷射通信運用於營級以下部隊之研究

作者/鍾勝杰少校

提要

- 一、正所謂「作戰靠指管，指管靠通資」，隨著軍事科技的日新月異，且因應現代戰爭型態改變，傳統語音或傳真通信已無法滿足，在持續數位化下，所需傳輸頻寬也越來越大，若能運用不占用無線電頻率資源、不干擾其他無線電傳輸且保密性強等特點之無線雷射通信，便可增加一種通信手段，進而提升戰場的存活率。
- 二、無線雷射通信為一種無線光通訊技術，具有高傳輸頻寬、保密性佳、快速架設、與光纖網路的高相容性且無通訊頻段執照限制等優勢。本文介紹無線雷射通信系統概要，包含雷射調變機制、光放大器、光檢測器及大氣通道特性等，雷射能量的衰減包含物性障礙、大氣擾動、吸收、散射及天候條件等因素。
- 三、關於無線雷射通信的發展，固定點對點視距傳輸的靜態系統已發展成熟，應用於光纖通訊的最後一哩路及備援網路，提升通訊網路密度；動態系統的計畫性發展包含陸用、艦用、空用及衛星等光通訊系統應用，建構出高廣度、高彈性及高密度性的光通訊傳輸網

關鍵詞：無線雷射通信、無線光通訊、視距傳輸

前言

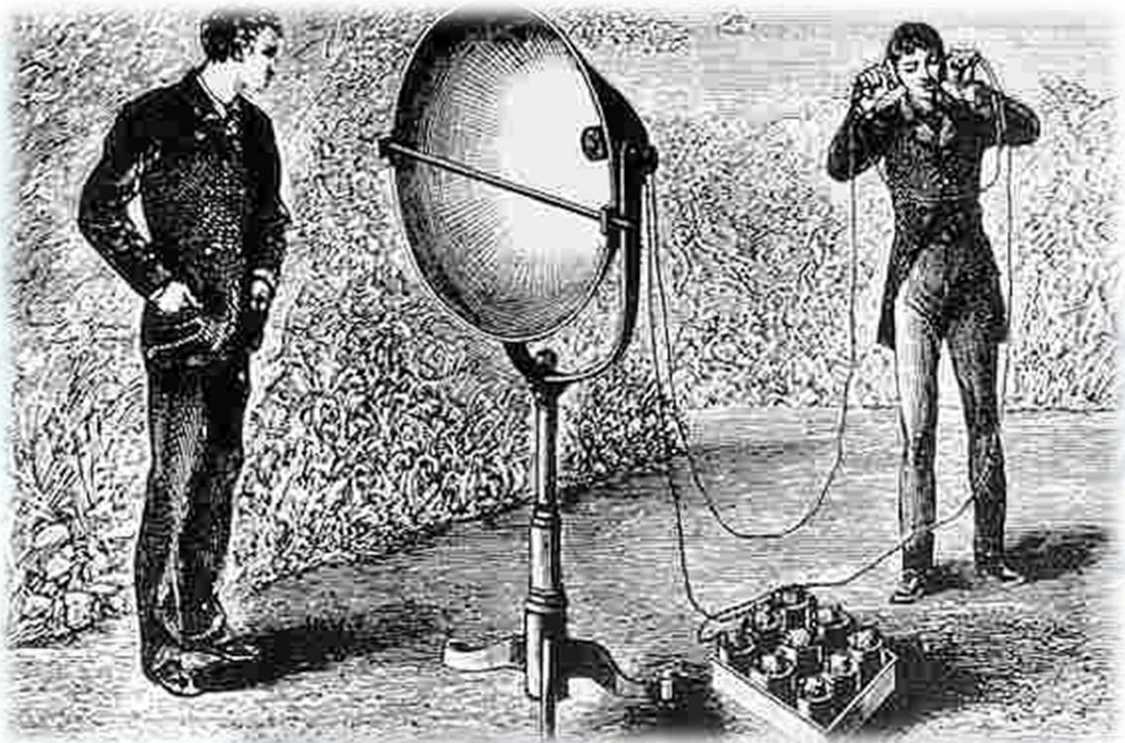
無線雷射通信，又稱自由空間雷射通訊，屬於一種無線電光通訊技術，無線光通訊的起源可追溯至19世紀，由貝爾(Alexander Graham Bell)所發展的光電話(photo-phone，如圖1)，但真正受到產學矚目的無線雷射通信技術，則是到了光纖通訊發展成熟的時期，隨著最後一哩路(The Last Mile)的議題而萌芽，若將光纖通訊稱為有線光通訊的話，無線雷射通信則可視為無線的光纖通訊，因為其與光纖通訊的相容性高，可適用光纖通訊領域的雷射、光放大器及訊號調變等技術，可在不易鋪設光纖網路的地區，延續光纖通訊的高頻寬傳輸，以視距(Line of Sight, LOS)點對點傳輸的概念，提升光纖通訊網路密度，形成連綿不斷的高速通訊網，甚至可多方面應用至陸、海、空及太空的視距傳輸鏈¹。

本文針對室外無線雷射通信的發展，主要分為兩部分作介紹。第一部分針對無線雷射通信系統說明及技術發展，接著介紹其架構與組成，包含發射端(Transmitter)、接收端(Receiver)及大氣通道特性(Atmospheric Channel)等；第二部分則針對無線雷射通信於各領域的應用及發展作介紹，主要分為靜態系統(Static System)及動態系統(Dynamic System)，結合陸用系統

¹林佳儒，〈自由空間光通訊發展現況〉，《新新季刊》，(桃園)，第48卷2期，國家中山科學研究院，民國109年4月，頁89

、水用系統、空用系統及太空衛星等光通訊網²，並介紹各國目前主要的無線雷射通信的發展計畫與現況，最後導入本軍無線雷射運用階層及其方式。

圖 1 貝爾的光電話



資料來源：林佳儒，〈自由空間光通訊發展現況〉，《新新季刊》，(桃園)，第 48 卷 2 期，國家中山科學研究院，民國 109 年 4 月，頁 89。

無線雷射通信系統介紹

無線雷射通信系統是以光纖通訊系統為基礎，主要的差別在傳輸通道並非光纖，而是自由空間介質，其介質包含水、大氣或太空環境，多數應用使用的通道為大氣，與光纖通訊相同無線雷射通信雖具有高傳輸頻寬、保密安全性高、便於攜帶、易於架設及無通訊頻段執照(Bandwidth License)限制等優勢，但能量衰減因素較多，包含大氣環境的衰減、雷射發散特性及視距傳輸光軸對準的準直性等，影響接收端的接收訊雜比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)大小，也限制了無線雷射傳輸率及傳輸距離。

一、簡介

無線雷射通信系統是以大氣作為傳輸媒質來進行光信號的傳送的。只要在收發兩個端機之間存在無遮擋的視距路徑和足夠的光發射功率，通信就可以進行，系統所用的基本技術是光電轉換。在點對點傳輸的情況下，每一端都設有光發射機和光接收機，可以實現全雙工的通信。光發射機的光源受到電信號的調製，並通過天線將光信號經過大氣傳送到接收端的天

² C.Casey,"Free Space Optical Communication in the Military Environment,"Dudley Knox Library, Naval Postgraduate School,2014,P7-9。

線，高靈敏度的光接收機，再將收到的光信號再轉換成電信號。

無線雷射與微波技術相比，它具有調製速率高、頻寬大、不占用頻譜資源等特點，與有線和光纖通信相比，它具有機動靈活、對建設影響較小、運行成本低、易於推廣等優點。它可以直接架設在屋頂，由空中傳送。既不需申請頻率執照，也沒有設置管道挖掘馬路的問題。使用點對點的系統，在確定發收兩點之間視線不受阻擋的通道後，一般可在半小時內安裝完畢，投入運行。在考慮到氣象條件後，光無線系統一般可得到99.9%的可用性。如果採用其他系統構成主備用，甚至可達到99.999%電信級的可用性要求，且容量與光纖相近，但建置價格卻低得多，可組成點對點、星形結構的網路，易於擴容升級，只需稍作接口的變動就能改變容量³。

二、系統組成

無線雷射通信系統一般由發射系統和接收系統組成，其中發射系統將信源產生的原始電信號變換成適合在通道中傳輸的信號；接收系統從帶有干擾的接收信號中恢復出相應的原始信號。

(一)發射與接收端

發射端由信源模組、調製模組、驅動電路和雷射光源等組成，其工作過程如下：原始射頻訊號經由調變器(Modulator)將訊號調變，載在雷射光波上，應用於光通訊的雷射訊號調變方式主要有兩種，分別為直接調變(Direct Modulation)及外部調變(External Modulation)，常見的訊號調變格式包含基本的開關鍵控(On Off Keying, OOK)、相位鍵移(Phase Shift Keying, PSK)、脈波振幅調變(Pulse Amplitude Modulation, PAM)及正交振幅調變(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)，調變技術利用正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)等技術，若考量降低大氣通道衰減的影響，在雷射調變輸出後，可再加上一級光放大器做雷射能量放大，再輸出至大氣通道，常見的光放大器為摻光纖放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)，其增益放大的波段為1,530~1,565nm(C頻帶)，可涵蓋光通訊常見1,550nm波段，經由大氣通道傳遞後，接收端鏡組收光聚焦於光檢測器上，將雷射訊號做光電轉換，光檢測器的選擇視傳輸波長而定，光電轉換後，經由低雜訊放大器(Low Noise Amplifier, LNA)等放大器將訊放大，最後由解調器(Demodulator)將原始射頻訊號解出還原，其調變方式區分如下：

1.直接調變

調變訊號直接輸入控制雷射的驅動，使雷射輸出功率依調變訊號作變化，一般雷射極體的驅動電流需操作在臨界電流以上，雷射輸出功率即隨著驅動電流大小而不同，藉由控制雷射偏壓，驅動電流也隨控制訊號改變，雷射輸出功率也跟著變化。由於直接調變是控制

³ C.Casey,C.Prince,P.Ateshian,G.Singh,and J.Gibson, "Suitability of Free Space Optical Communication in Military Environments," 20th International Command and Control Research and Technology Symposium,2015,P13-15。

雷射的驅動，因此調變速度會受雷射元件影響，限制了訊號傳輸率，較高規格是直接調變型雷射元件，其調變速度可達10~20GHz。

2.外部調變

雷射的外部調變是外部調變器，如電光調變器(Electro Optic Modulator, EOM)、電吸收調變器(Electro Absorption Modulator, EAM) 及聲光調變器(Acousto-Optic Modulator, AOM)等，改變雷射光波的特性(如:相位)，達到強度調變的效果，調變訊號是輸入至外部調變器，而非雷射本身，因此調變速度不會受雷射元件影響，可達 20~40 GHz以上，適用於高速訊號傳輸的應用⁴。

(二)大氣通道

大氣通道即為無線雷射通信的最大特色，但同時也是最具挑戰的議題，因光波在大氣傳遞，隨著距離增加會衰源再加上雷射本身的發散特性，限制了傳輸距離。大氣通道的衰減因子主要如下

1.物性障礙(Physical Obstruction)

無線雷射通信由於通訊雷射光源發散角及光束大小特性，屬於視距點對點通訊傳輸，在大氣通道上的任何遮蔽障礙物(例如:樹、鳥、建物等)皆會成能量損耗，接收端的接收能量降低，影響通訊品質，完全遮擋時會無法進行通訊傳輸，因此無線雷射通信的視距大氣通道須保持無遮擋的條件。

2.大氣擾動(Atmospheric Turbulence)

大氣擾動是天氣與環境交互作用而產生，其影響包含風及閃爍(Scintillation)現象等，閃爍的主要成因是大氣通道的溫度變化所造成的熱流擾動，包含不同空氣團之間的溫度差異及人為產生的熱擾流。空氣擾動會造成大氣通道的折射變化，使得接收訊號的振幅波動變化，幅度較大的情況下會影響傳輸品質。

3.吸收(Absorption)

吸收的成因為光子能量被大氣中的分子吸收，造成能量損耗，降低傳輸距離，主要的吸收分子為水分子(H₂O)及二氧化碳分子(CO₂)，可藉由提升發射端的雷射輸出功率來降低能量吸收衰減的影響。

4.散射(Scattering)

散射現象為光束與散射子碰撞所產生，總能量並無改變，而是傳遞方向打散，能量因而被分散，降低了目標傳輸方向的訊號強度。散射量與光波長有關，因此在相同能量下，不同波長在大氣通道的傳遞距離也不同，散射現象主要有雷利散射(Rayleigh Scattering)，稱分子散射，以及米式散射(Mie Scattering)，稱氣凝膠散射(Aerogel Scattering)。

⁴ C. Peucheret, "Direct and External Modulation of Light," Experimental Course in Optical Communication, Technical University of Denmark, 2009, P3-9。

5. 天候條件(Weather Conditions)

天候條件是影響大氣通道的主要衰減因素，越劇烈的天候條件，能量衰減越大，大氣通道主要考量的天候條件有霧(Fog)、霾(Haze)、煙霧(Smoke)、雨天(Rain)、雲(Cloud)、雪(Snow)及沙塵(Sandstorm)等。天候條件的影響是集合了散射及吸收等因素，如霧、霾及雨天等條件，且與能見度(Visibility)有關，在能見度極差的條件下，能量衰減可高達-100dB以上⁵。

三、技術發展

無線雷射通信為無線通信的一種，它以光信號作為傳輸通信的載體，在大氣中直接傳輸。由於是無線通信，故它可隨意移動到任何地點並實現移動溝通，這是它最大的軍用價值和優勢，就概念而論，大氣傳輸光學線路非常簡單，即用發射機將雷射束發射到接收機即可，然而在實際的大氣傳輸中，雷射狹窄的光束對準確的接收有很高的要求，因此系統還應包括主動對準裝置，雷射通信技術，由於其單色性好、方向性強、光功率集中、難以竊聽、成本低、安裝快等特點，而引起各國的高度重視。

1960年，美國海軍就開始了關於無線雷射通信的研究，1964年GLHarvey做了關於無線雷射通信關鍵技術的研究，1967年JASanderson 將其應用到實際的光通信實驗中。

1968年，麻省理工學院SESunstein 的學術論文中最早出現了關於無線雷射通信系統的具體實驗，研究了26公里範圍內基於大氣散射效應的無線雷射通信鏈路模型，實驗中採用大功率氙燈作為紫外光源，輻射出的光波為連續譜，波長最短為280nm，採用光電倍增管作為光電探測器。不久，Reilly研究了波長在200~300nm 範圍內的紫外光的大氣散射模型。

1976年，普林斯頓大學E.S.Fishburne等人採用汞弧光燈作為光源，載波調製速率為40kHz，實現了無線雷射通信系統在實驗室的非視距(None Line Of Sight, NLOS)通信，然而出了實驗室後，大氣通道即為最具挑戰的議題，因光波在大氣傳遞，隨著距離增加會衰源再加上雷射本身的發散特性，限制了傳輸距離，因此導致國際上大部分從事無線雷射通信技術研究的單位陸續停止了更進一步的研究，有的國家甚至宣布了無線雷射通信研究的路是一條「死胡同」，儘管如此各國仍依舊堅持不懈、探求解決無線雷射通信技術問題。

1988年，巴西AVIBRAS宇航公司公布了該公司研製的一種單人半導體無線雷射通信系統。這種利用雷射器聯通線路的軍用紅外通信裝置，其外形如同一架雙筒望遠鏡，安裝了雷射二極體與麥克風。使用時，一方把雙筒鏡對準另一方即可實現通信，通信距離作為1公里，假如把光學天線固定下來，通信距離可達15公里。

1989年美國FARANT1儀器公司順利地研製出一種短距離、隱蔽式的無線雷射通信系統，1990年，美國通用動力公司也試驗了適用特種戰爭與高強度戰爭需要的紫外光波通信，這種通信系統可以符合戰術任務的要求，通信距離作為2-5公里。再將光束進行適當處理之後，通

⁵ A. Malik, and P. Singh, "Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges," International Journal of Optics, 2015, P7-12。

信距離可達5-10公里。

1991年俄羅斯隨著其大功率半導體雷射器件的研製成功，也開始了無線雷射通信系統技術的實用化研究。隨後，便推出了新型的半導體無線雷射通信系統，並在莫斯科、瓦洛涅什、圖拉等城市得以應用。俄羅斯有關專家普遍認為，半導體無線雷射通信系統在一定視距內有效地實現全天候通信是完全可能的，很有軍事潛力。

無線雷射通信系統得以實用化涉及的關鍵技術，主要有連續波大功率雷射器、自適應變焦(Adaptive Zoom)、光波窄帶濾波(Optical Narrow Band Filters)、光源穩頻(Light Frequency Stabilized)、光學天線設計製作和安裝校準技術等。目前各國用於半導體雷射器和接收器件已實現了商品化，隨著雷射、光學和光電子元器件技術的發展進步，無線雷射通信技術不斷取得突破。按照系統功能劃分，無線雷射通信技術主要分為捕獲跟蹤(Capture Tracking)、通信收發、大氣補償(Atmospheric Compensation)和光機電設計類技術，具體介紹如下：

(一)捕獲跟蹤技術

無線雷射通信技術借助光源的小發散角波束提供高功率增益，這對光束的捕獲跟蹤提出了比微波通信更高的要求。實現快速且大範圍的光束捕獲和穩定的高頻寬、高精度光束跟蹤是無線雷射通信捕獲及跟蹤技術研究的核心目標。其中，光束捕獲採用雷射瞄準技術和粗糙與精密跟蹤相結合的體制，粗糙跟蹤由廣角相機和伺服轉台組成迴路，提供大範圍低頻帶伺服控制；精密跟蹤由高畫質相機和快速掃描器組成迴路，提供小範圍高頻帶伺服控制，從而有效抑制因光束大範圍運動和高頻率抖動引起的光束擾動。

隨著雷射技術的進步，受益於雷射光束智能變換、雷射相控陣等新技術的逐漸發展成熟，將其應用於無線雷射通信技術的捕獲跟蹤系統中，使傳統跟蹤瞄準模式發生改變，可提高空間光通信系統的跟蹤瞄準精度、速度和可靠性。同時，小型高效率雷射器的出現也使跟蹤瞄準系統向小型化、輕型化和一體化發展。另外，可採用粗精複合高精度跟蹤，通過雷射光束智能變換，在保證跟蹤性能的前提下，簡化雷射通信跟蹤瞄準系統。

(二)通信收發技術

無線雷射通信技術需要雷射器具有大頻寬和高發射功率等特點。具體來看，雷射調製技術的調製方式可以分為直接調變及外部調變，由於直接調製方式使帶寬和發射功率受限，目前主要採用小功率種子雷射源間接調製後通過高功率光纖放大器獲得高發射功率的方法進行調製；根據作用光束的參數不同（如強度、頻率、相位等），可分為調幅、調頻和調相等不同調製方式，由於不同波長系統相應器件的差異，調製方式也有所差別。目前無線雷射通信技術採用的雷射波長主要有800、1000和1550nm等3個波段，其中800nm波段的半導體雷射器一般利用強度調製直接檢測，1000nm波段的固體雷射器可採用各種調製方式，而1550nm波段的半導體雷射器與光纖通信系統兼容，可採用多種高速調製方式並利用光纖放大器實現高速、高功率發射。

雷射通信接收機的高速探測器均由光纖耦合以適應高速探測器的小探測截面，並有利於系統一體化。因此，無線雷射到光纖的耦合是雷射通信接收部分的關鍵技術之一，其中對光纖高效率耦合主要受模式匹配、對準偏差、吸收損耗、平台振動等影響。現有的光纖耦合方法主要採用的是光學自適應(Adaptive Optics)、錐形光纖(Tapered Optical fiber)、光纖章動(Optical fiber Nutation)等，尚未出現實質性突破，光纖高效耦合技術仍是當前無線雷射通信系統的主要難題之一。

(三)大氣補償技術

當無線雷射通信技術應用在地對空、空對空等鏈路時，雷射在穿越大氣層的過程中受大氣擾動影響，在傳輸時會出現接收功率抖動，導致系統出現位元錯誤，這在高速雷射通信中更加明顯。為解決這一問題，採用高精度波前失真校正技術是抑制大氣擾動對傳輸光束波前影響的有效方法，即通過波前分析儀進行探測，在一定程度上能夠矯正波前失真。但該技術的主要難點在於雷射到達角起伏補償、波面變形補償和空中飛行影響補償，可通過探測系統引入波前失真補償鏡技術進行聯合校正。

近年來有關大氣通道的研究成果頗豐。例如，2018年開展的的大氣高速傳輸研究，由新一代雷射器而產生的超連續譜光源作為部分同調高速載波，在1公里大氣擾動通道中，相比於同調光源，採用部分同調光載波源能有效抑制大氣擾動造成的光強閃爍。而後，證明了可將全光時分割多工技術，應用在部分相關光通信系統中，以提升傳輸速率，最高速率已達到了128Gbps。

(四)光機電設計技術

為減小自由空間的功率損耗，提高發射光學系統增益，需要通信光束以近繞射極限角發射。在保證發射光學口徑的基礎上，提高光束發射增益對光纖耦合技術、光束整形技術、望遠鏡面型設計提出了更嚴格的要求。為突破近繞射極限角發射的關鍵技術和高效率光纖耦合技術，需要通過雷射技術的發展，研究光纖不同芯徑、束散角與光學系統匹配的優化選取方法。

對於光學基台技術，要求對光學系統進行模組化、輕量化設計，且要能滿足未來無線雷射通信網絡一點對多點動中通同時傳輸。與此同時，雷射技術的廣泛應用促成了多行業的標準化，如基於雷射技術的雷射整形傳輸促成了元件的模組化和標準化，降低了整機體積與成本。

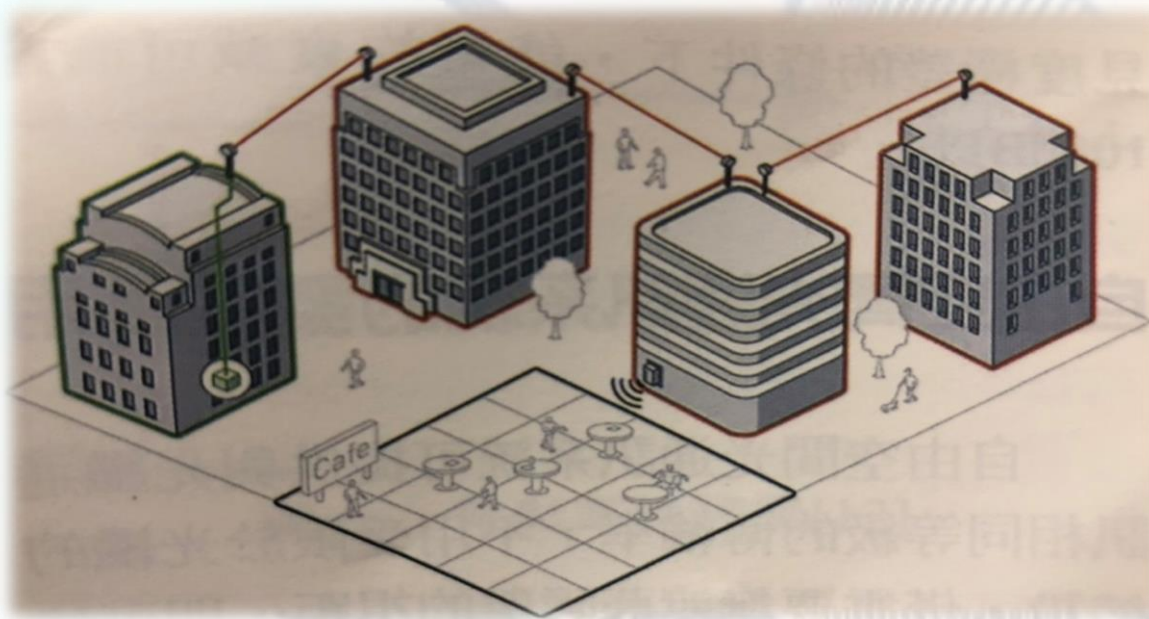
四、套用領域

無線雷射通信系統可提供與光纖通訊相同等級的傳輸率，不受限於光纖的鋪設，僅需要無遮蔽障礙的視距，即可建構一條高速傳輸鏈，因此具有延伸出高彈性及高廣度通訊傳輸鏈的可能性，本節針對靜態及動態系統的發展現況作介紹：

(一)靜態系統

靜態系統為最早發展的兩終端固定，點對點的視距傳輸，也是發展最為成熟，除了軍事通訊，也可應用於民用通訊環境。圖2為常見的靜態系統光通訊網的應用，目前光纖通訊網雖已普及，但還是有部分光纖不易鋪設的最後一哩路，無線雷射通信定點快速架設的優勢，於不同建築物間可快速搭設高速光通訊傳輸鏈，並與光纖網路連結，輔助光纖網路傳輸，作為備援的通訊網路，並可搭配Wi-Fi無線網路等射頻通訊的使用，提升通訊網的密度，降低通訊完全中斷的風險⁶。

圖 2 靜態系統通訊網應用



資料來源：Sonabeam Z，<https://www.fsona.com>，2021 年 2 月

目前歐美多國已有許多民用產品，製造商包含美國與加拿大的AIRLINX Communications、Light Pointe Wireless、Plaintree Systems Inc、Laserfire、fSONA Optical Wireless、Canon、俄羅斯的JSC MOSTCOM、英國的ablefreeWss、匈牙利的GeoDesy等等，具有多樣性傳輸規格，整體在5公里內可傳輸100Mbps至2.5Gbps不等，少數可達10Gbps，部分具有光軸視距自動追蹤(Auto-Tracking)功能。

(二)動態系統

與靜態系統相比，動態系統的兩通訊終端並非固定，可單終端動態移動，或終端皆移動，並維持住高速傳輸鏈，主要可分為地面對地面、船艦水下光通訊、空中對地面、空中對空中及太空光通訊等，以下介紹動態系統的相關發展：

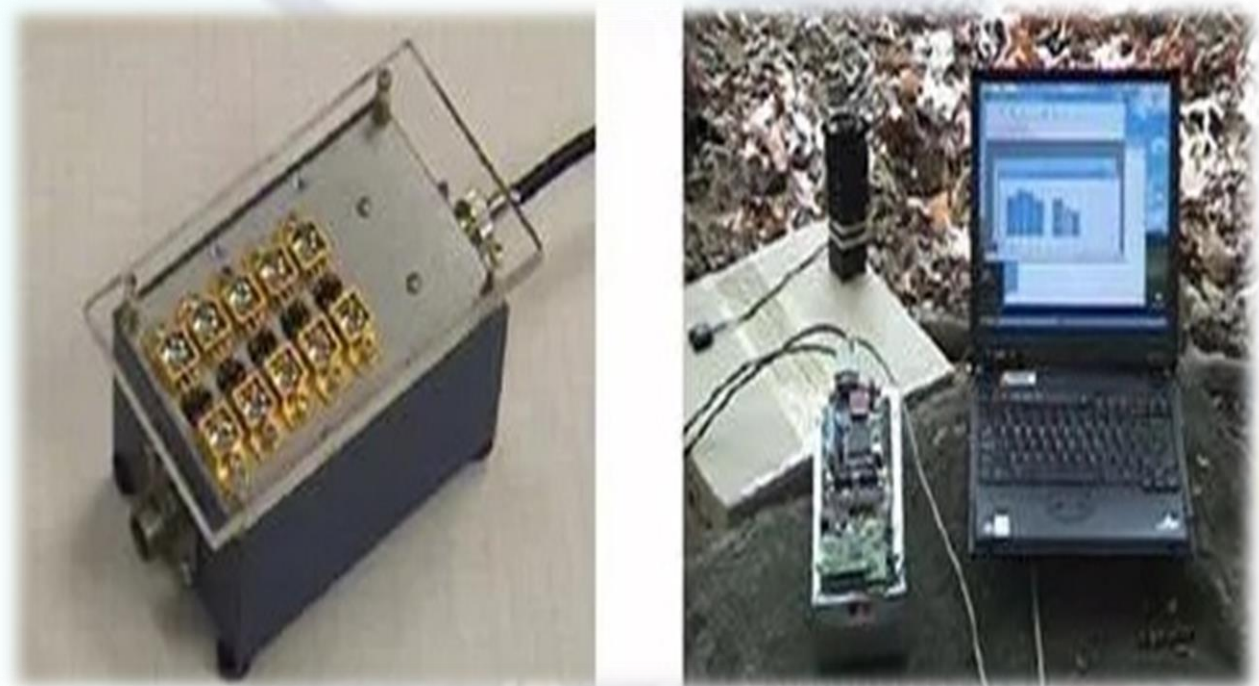
1.地面對地面

美國通用動力公司為美軍研製了一種實用的新型隱蔽式紫外光無線通信系統已裝

⁶ Sonabeam Z，<https://www.fsona.com>，2021 年 2 月

備至部隊，如圖3所示，該系統通信傳輸率提高到40Mbps，位元錯誤率達到 10^{-6} 等級，且該系統不易被探測和接收，適用於多種近距離抗干擾通信環境，尤其適用於特別行動和低強度衝突，可滿足戰術通信要求⁷。

圖 3 紫外光無線通信系統



資料來源：UV Light Communication System，<http://www.mwrf.net/tech/communications/2018/24098.html>，2021年2月。

2. 艦用與水下的光通訊

(1) 對潛通信

藍綠光的工作波段是海洋中光傳播的窗口，採用藍綠光通信，就可能與全球海洋中活動的潛艇建立起通信通道。這樣通信時，潛艇完全可以不用浮出水面而在巡航深度或更深的水中用自身殼體上的接收器抄收報文，絲毫不影響潛艇的活動，也不會暴露目標。

(2) 探潛及探水雷

隨著潛艇的發展、「寂靜」潛艇的出現、消磁技術及無磁性艇殼材料的採用、各種聲對抗武器的裝備，使潛艇的隱蔽性與機動能力進一步增強，另外水雷戰和反水雷戰也愈發重要起來。新的水下目標探測手段是利用藍綠光進行水下目標探測。

(3) 測深

複雜的聲波回聲測深技術發展迅速，但此測量方法不僅不能探測凸起于海床上的礁石或岩石，而且測量精度、測量點密度難以達到目前國際水文測繪的精度要求標準，滿足

⁷ UV Light Communication System，<http://www.mwrf.net/tech/communications/2018/24098.html>，2021年2月

不了進行符合水文測繪標準的大範圍海床水文地理測繪的要求。因此，人們對測量速度更快、精度更高的水文測繪技術的需求，直接推動了藍綠光測深技術的發展。實際上，以飛機為平台的機載藍綠光測深系統不僅單用於測深，繪製海底地貌圖，還可應用於新的海洋學研究，如：內波探測、海洋生物變化、污染監視，也可用於海軍陸戰隊對作戰島礁周圍海域地理環境態勢測繪。

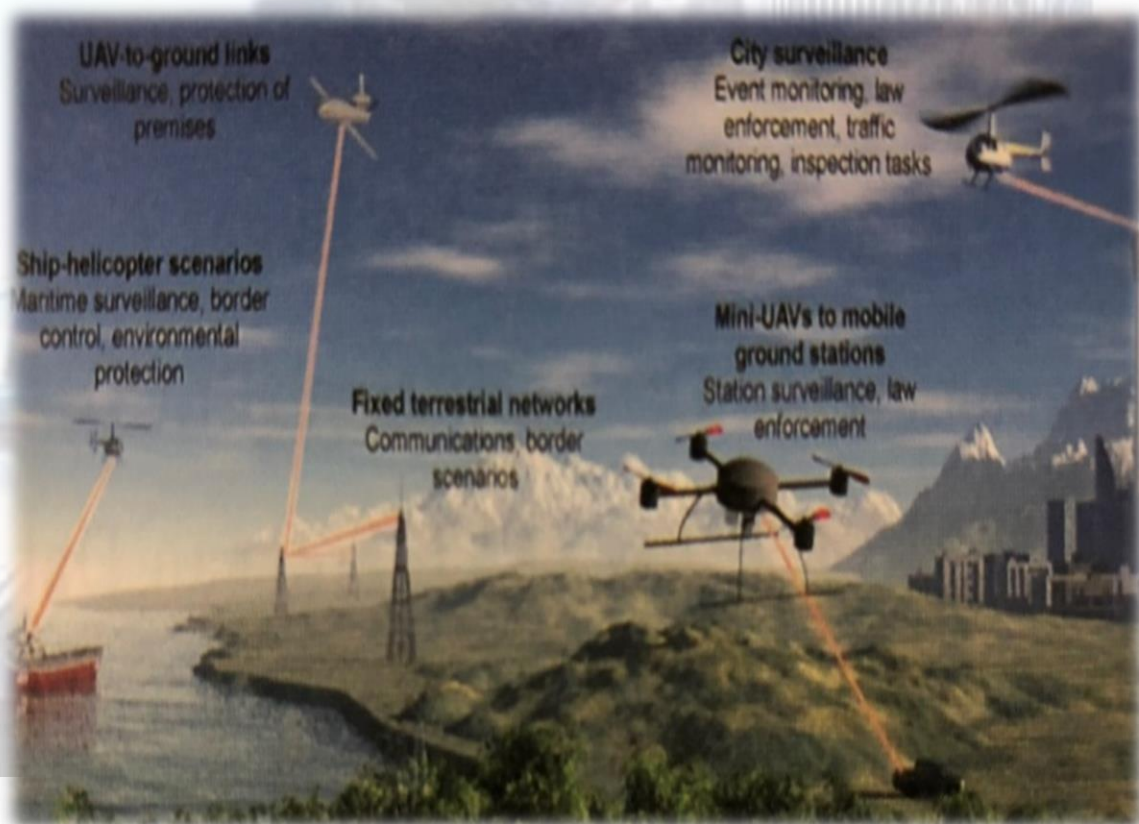
(4)水下傳感裝置

感測器是水下潛艇、水下機器人的耳目，要及時發現、準確識別水下威脅目標就必須裝備先進的傳感裝置。利用藍綠光水下傳感裝置，可獲得比其它水下感測器更高的識別精度和定位能力。

3.空中對地面

由德國的Via Light Communications公司所發展空對地的光通訊應用，MLT系列產品MLT-20及MLT-70，圖4為其光通訊模組應用概念，MLT-70傳輸距離大於200公里，雙向傳輸率可達40Gbps，其架構為地面(或船艦)通訊站與空中載具的視距傳輸鏈，空中載具包含直機及無人機，可執行監控等任務⁸。

圖 4 空對地光通訊模組應用概念



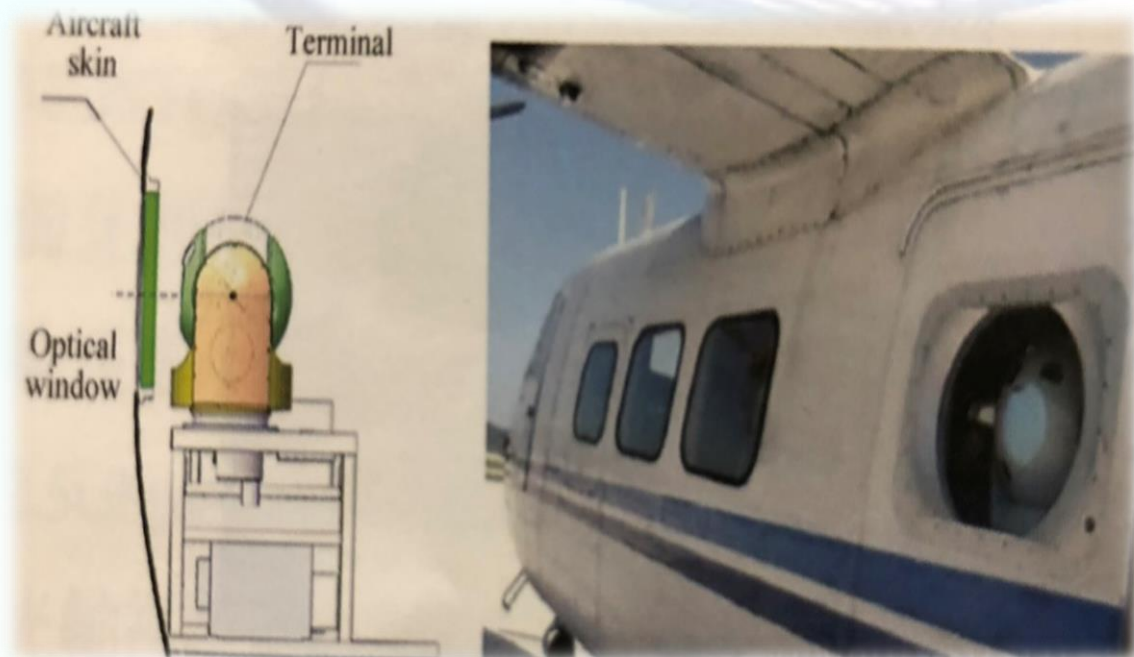
資料來源：ViaLight-Miniaturized Laser Terminals MLT for Constellations, <https://www.vialight.de>，2021 年 2 月。

⁸ ViaLight-Miniaturized Laser Terminals MLT for Constellations, <https://www.vialight.de>，2021 年 2 月。

4.空中對空中

美國Exelis公司與空軍研究實驗室(Air Force Research Laboratory)在架DC-3飛機間完成光通訊傳輸鏈，圖5為DC-3飛機上的光通訊收發機，數據傳輸達2.5Gbps，傳輸距離可達130公里，此收發機也可架設於陸面車輛載具，形成空對地的視距光通訊傳輸鏈，如圖5所示⁹

圖 5 空對空光通訊收發機



資料來源：L. X. Meng, "Airborne Laser Communication Technology and Flight Test," Proceedings of SPIE, Photoelectronic Technology Committee, 2015, P13。

(五)太空光通訊

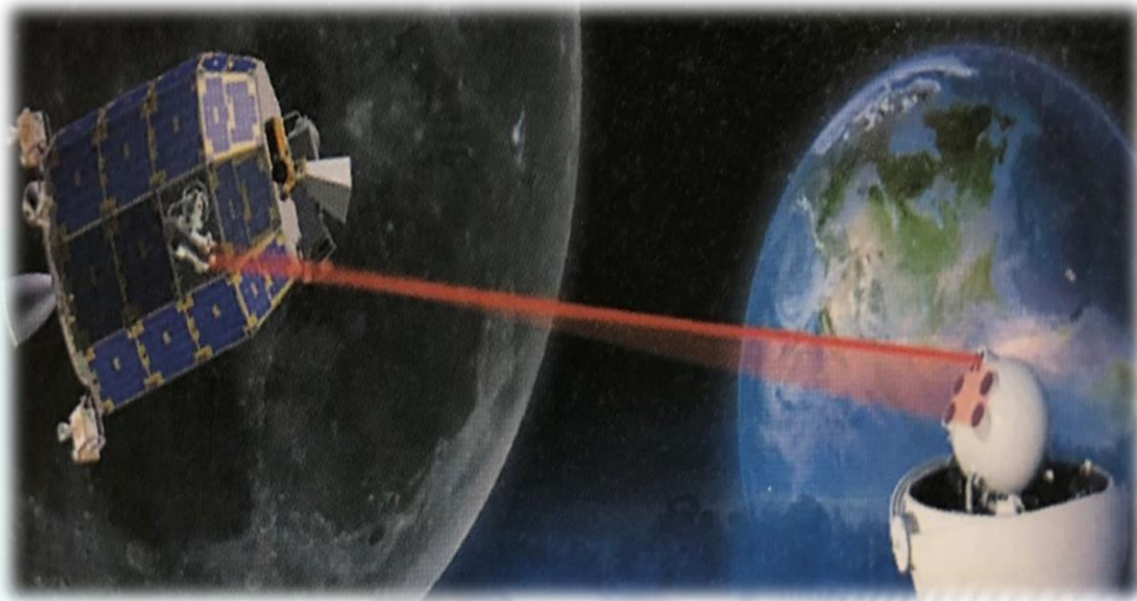
目前太空光通訊傳輸鏈的發展，主要有歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)與美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)，歐洲太空總署具有衛星間的光通訊收發機，傳輸距離可達8萬公里，並達到1.8Gbps傳輸率，也具有衛星對地通訊的能量，傳輸距離達1千2百公里，並達到10Gbps的傳輸率。

美國太空總署主要目的是建立月球對地表的光通訊視距傳輸鏈，如圖6所示，其發射月球軌道衛星，搭載光通訊收發機，與地面通訊站連結光通訊收發機，於2013年，以雷射功率0.5W的條件下，傳輸距離大約38萬公里，傳輸率達622Mbps，上網傳輸率約20Mbps¹⁰。

圖 6 月球對地表的光通訊視距傳輸鏈

⁹ L. X. Meng, L. Z. Zhang, X. M. Li, and H. L. Jiang, "Airborne Laser Communication Technology and Flight Test," Proceedings of SPIE, Photoelectronic Technology Committee Conference, 2015, P13。

¹⁰ Lunar Laser Communication Demonstration NASA's First Space Laser Communication system, <https://www.nasa.gov>, 2021 年 2 月



資料來源：Lunar Laser Communication Demonstration NASA's First SpaceLaser Communication System ,<https://www.nasa.gov>,2021 年 2 月。

各國無線雷射運用

無線雷射通信技術已在多種鏈路成功開展了試驗，如衛星對衛星、衛星對地面站台、衛星對飛機、飛機對飛機、飛機對地面站台及地面站台間等。美國、歐洲、日本、中國等國家在無線雷射通信關鍵技術領域均已取得突破，且進行了多項試驗驗證，積極推動無線雷射通信技術的實際應用如下：

一、美國

在美國空軍及其太空總署支持下，成為最早開展無線雷射通信技術研究的國家，其發展及運用如下：

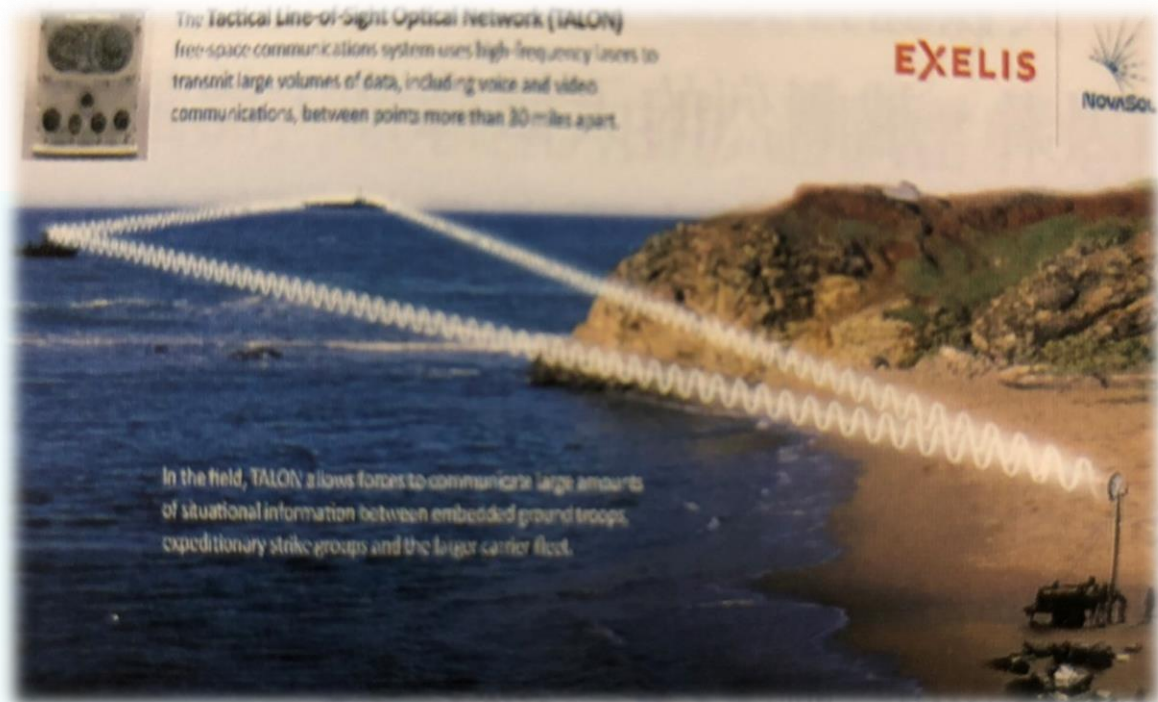
(一)地面及船艦運用

戰術視距光網路由美國Exelis公司及美國海軍實驗室(US Naval Research Laboratory)共同執行，圖7為戰術視距光網路應用概念，是艦用光通訊與地面通訊所形成的動態光通訊鏈，船艦不僅與岸邊的通訊主站行視距通訊鏈，也可與其他船艦作視距傳輸，形成一對多點的動態通訊網，採用人眼安全雷射，在50公里的傳輸距離下達到100Mbps傳輸率¹¹，動態的艦用光通信系統，由約翰霍普金斯大學的應用物理實驗室(Applied Physics Laboratory)於2017年所展示，如圖8所示，兩艘動態軍艦之間的自由空間光通訊傳輸，在相距25公里的距離下，可達2 Gbps的傳輸率¹²。

¹¹ TALON-Robust Tactical Optical Communications,<https://www.doncio.navy.mil/chips/ArticleDetails.aspx?ID=5550>,2021 年 2 月

¹² APL Demonstrates High-Bandwidth Communications Capability at Sea, <https://www.jhuapl.edu/PressRelease/17024b>,2011 年 2 月。

圖 7 戰術視距光網路應用概念



資料來源：TALON-Robust Tactical Optical Communications,
<https://www.doncio.navy.mil/chips/ArticleDetails.aspx?ID=5550>, 2021 年 2 月。

圖 8 動態艦用光通訊收發機



資料來源：APL Demonstrates High-Bandwidth Communications Capability at Sea,
<https://www.jhuapl.edu/PressRelease/17024b>, 2011 年 2 月。

(二) 太空運用

2000年美國太空總署實驗室完成了雷射通信演示系統試驗；2013年10月的月球雷射通信演示驗證計畫，實現了月球軌道與4個地面站台105公里的雷射雙向通信，月地最大下行和

上行速率分別達到4.9 Gbps 和160 Mbps；2017 年11 月，美國太空總署創新型立方體衛星的雷射通信與感測器演示項目對未來小型衛星的高速率雷射數據傳輸技術進行了驗證，星地鏈路下行速率最高達到20Gbps。

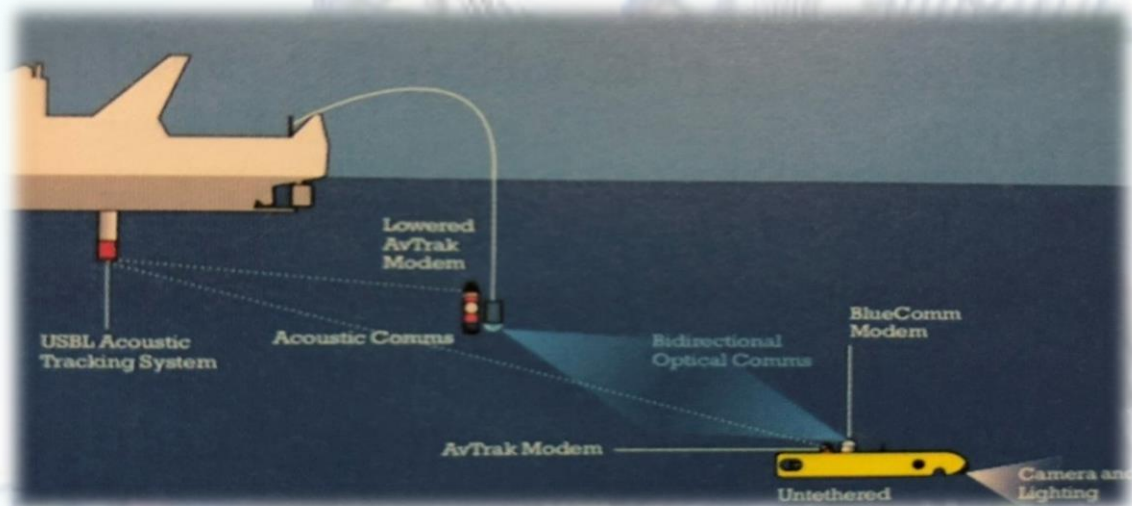
二、歐洲

歐洲的主要國家和地區也較早的開展了無線雷射通信技術的研究，其具體發展如下：

(一)水下運用

水下光通訊的部分，其傳輸通道介質為水，能量的衰減較大氣傳輸道高，因此限制了傳輸率及傳輸距離。水下光通訊多採用短波長400~500nm的藍綠光雷射作為光源，因為此波段在水下的損耗較低。英國Sonardyne公司開發出水下光通訊的BlueComm系列產品，於水下4公里的深處，傳輸可達12.5Mbps，傳輸距離約150m，由於水下環境限制，典型的應用為水下無人載具的控制指令傳輸，如圖9所示¹³。

圖 9 水下無人載具的應用



資料來源：Sonardyne BlueComm Underwater Wireless Optical Communication System,

<https://www.sonardyne.com>, 2021 年 2 月。

(二)太空運用

歐洲太空總署在2001年實施半導體雷射星間鏈路試驗（SILEX）項目，首次驗證了低軌道衛星至地球同步軌道衛星間的通信；2008 年，德國航空航天中心利用 Tesat 開展了GE O-LEO 遠距離無線雷射通信在軌原理試驗驗證，傳輸距離為4萬5000公里，天線口徑為135 mm，採用的是1.06 μm 載波的二進制相移鍵控（Binary Phase Shift Keying, BPSK）同調技術，最高速率達45Gbps，位元錯誤率小於 10^{-8} ；2015年德國建立了車載自適應光學通信地面站，實現了車載自適應雷射通信終端與低軌道衛星的高速率傳輸，傳輸速率為45Gbps，同時

¹³ Sonardyne BlueComm Underwater Wireless Optical Communication System, <https://www.sonardyne.com>, 2021 年 2 月。

實現了與地球同步衛星Alphasat 雷射通信終端之間帶寬為22.5 Gbps、有效速率為14.4Gbps的雙向雷射通信。

三、日本

日本已經開展了一系列星地雷射通信演示驗證，如工程試驗衛星（Engineering Test Satellite, ETS）計畫和光學在軌測試通信衛星（Optical Inter orbit Communication Engineering Test Satellite, OICETS）計畫，都完成了雷射通信測試，實現了世界首次低軌道衛星與移動光學地面站間的雷射傳輸。另外，日本的相關研究已逐步向雷射通信終端小型化、輕量化、低功耗方向發展，如通過空間光通信研究先進技術衛星計畫，並在2014 年完成了小型光學通信終端對地雷射通信在軌測試，總質量僅為5.8 kg，最遠通信距離達1000 公里，下行通信速率為80 Mbps。

四、中共

中共無線雷射通信技術領域的研究起步較晚，但近年來成果顯著，於2007年，首次完成了動中通無線雷射通信試驗，突破了雙動態光束瞄準跟蹤技術，傳輸速率達2.4Gbps，並逐漸將速率提高到12Gbps、20Gbps、80Gbps，陸續開展了空地、空空等鏈路的演示驗證。

2011年，通過“海洋二號”衛星開展了首次衛星對地雷射通信鏈路的數據傳輸在軌測試，最高下行速率為4 Gbps，2013 年完成了兩架固定翼飛機間遠距離雷射通信試驗，傳輸速率為20 Gbps，距離突破144 公里，超過了歐洲、美國等國家和地區同類型演示驗證的最遠距離。

2017年，搭載“實踐十三號”高通量衛星的星地雷射通信終端開展的中共首次高軌衛星對地高速雷射雙向通信試驗取得成功，4萬公里衛星對地距離最高速率為40 Gbps。同年，利用“墨子號”量子科學實驗衛星開展了中共首次星地高速同調雷射通信技術在軌試驗，最高下行速率達到41Gbps。

軍事運用方式

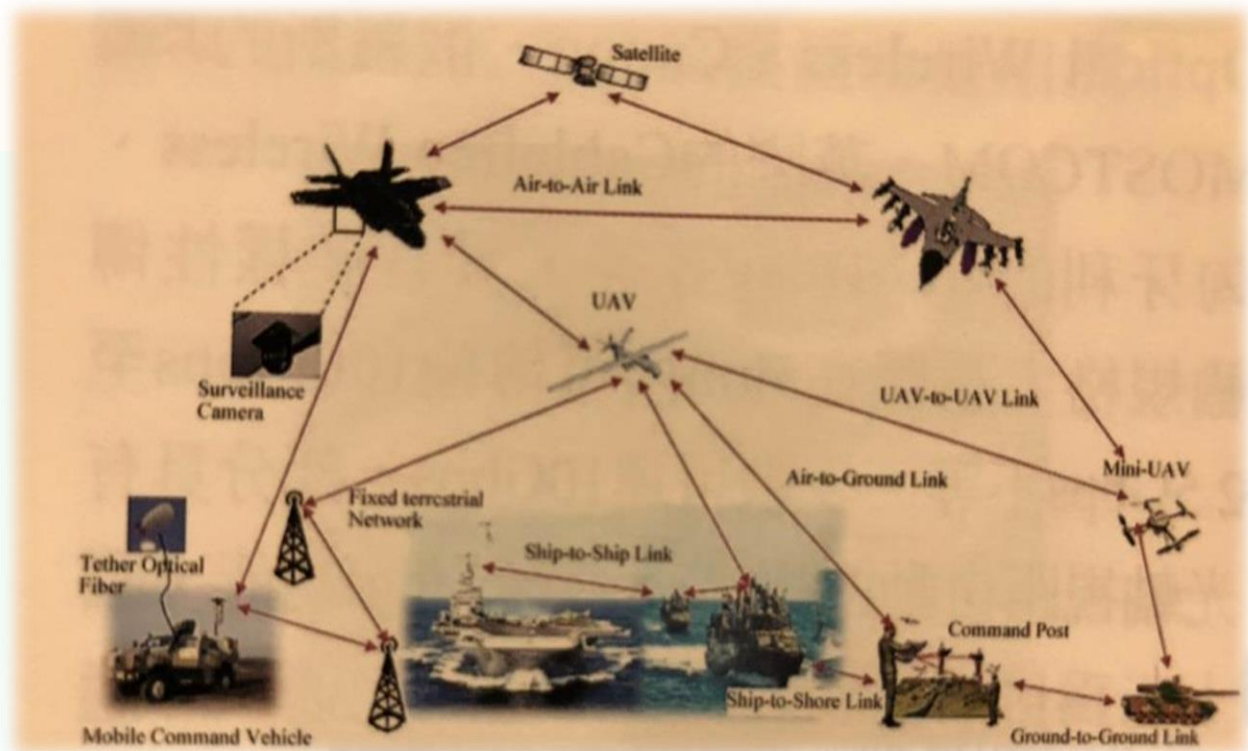
一、軍事運用上之優劣分析

軍事科技的迅猛發展要求人們尋找和發展更高頻率、更大容量、能快速架設、隱蔽性更好的通信系統，以適應密集技術條件下局部戰爭的要求。雷射通信技術由於其單色性好、方向性強、光功率集中、難以竊聽、成本低、安裝快等特點，而引起各國的高度重視。

無線雷射通訊系統可提供與光纖通訊相同等級的傳輸率，但不受限於光纖的鋪設，僅需要無遮蔽障礙的視距，即可建構一條高速傳輸鏈，因此具有延伸出高彈性及高廣度通訊傳輸鏈的可能性。圖10為無線雷射軍用通訊網的發展示意，鏈結了陸面的部隊、基地台、武器載具、水面的艦隊、空中的戰機與無人飛行器以及太空衛星，形成光通訊的高密度傳輸網路¹⁴

¹⁴ H. Kaushal, and G. Kaddoum, "Applications of Lasers for Tactical Military Operations," IEEE Access, IEEE Journals and Magazines, Vol. 5, pp. 20736-20753, September 2017.

圖 10 軍用通訊網的發展示意圖



資料來源：H. Kaushal, and G. Kaddoum, "Applications of Lasers for Tactical Military Operations," IEEE Access, IEEE Journals and Magazines, Vol. 5, pp. 20736-20753, September 2017.

這裡特別提出分析的是美軍地面部隊所採用紫外光通信系統，早期的紫外光通信系統多為視距通信，但隨著相關技術的演進突破，非視距紫外光通信技術也取得了長足的進步，從原本實驗性質到如今已可運用於戰場上，但紫外線通信還是有諸多限制及缺點，第一目前僅有美國掌握核心技術且列為機密難以了解相關投資金費及相關造價，其餘各國還在研究階段而我國目前尚無相關計畫，第二因其以散射方式傳播，故通信距離僅能達10公里。

紫外光通信是以大氣分子的散射與吸收為基礎，大氣層中的臭氧對波長在200nm到280nm之間的紫外光有強烈的吸收作用，這個區域被叫做日盲區，到達地面的日盲區紫外光輻射在海平面附近幾乎衰減為零，因為日盲區的存在，為工作在該波段的紫外光通信系統提供了一個良好的通信保密背景，選擇紫外“日盲”波段光波進行傳輸信號時，信號在傳輸過程中很少受到大氣背景雜訊干擾，同時也克服了其他無線雷射通信系統需在視距方式通聯的弱點，其特有的優勢如下：

(一)高保密數據傳輸和強抗干擾能力

紫外光通信主要基於大氣對紫外光的散射和吸收作用。紫外光信號在大氣傳輸過程中會呈現指數倍的衰減，傳輸距離一般不超過10公里，信號難以監聽和截獲。另外，紫外光通信系統的輻射功率可根據通信距離減至最小，無線電設備很難對其進行干擾和精確定位。

(二)可非視距通信

紫外光藉由大氣傳輸過程中會發生散射現象，其散射特性可以使紫外光通信系統能以非視距的方式通信，以適應複雜的地形環境，並克服了其他無線雷射通信系統必須採用視距工作方式的最大缺點。

(三)不需跟蹤瞄準

紫外光通信克服了其它無線雷射通信需要角度瞄準技術及系統，不僅大大節省系統的造價，也減少了通信設備開設所需時間。

(四)具有高訊雜比

由於大氣中的臭氧對200nm到280nm的紫外光有強烈的吸收作用，因而它具有日盲特性，採用這一波段紫外光進行通信，訊雜比高，相對提升其數據傳輸及通信品質。

綜合以上與傳統的無線電通信手段相比，具有安裝便捷、使用方便等特點，很適合於在特殊地形、地貌及有線通信難以實現和機動性要求較高的戰場；與光纖通信相比其維護費用低廉，可快速搶通並確保運行安全不易被竊聽等優點；與無線電通信手段相比，還具有不擠占寶貴的無線電頻率資源、抗電磁干擾能力強、且不干擾其他傳輸設備、保密性強等特點，並且在有效通信距離和寬頻等方面還蘊藏著巨大的發展潛力。

二、運用層級

無線雷射通信應用在軍事領域十分廣泛，本文主要探討的紫外光通信系統，其散射特性導致通信距離僅能到達10公里，但運用中繼台延伸距離至20公里，可滿足營級作戰範圍，且因其通信頻寬大可提供語音、資訊傳輸、視訊、傳真等功能，故可彌補目前營級以下資訊傳輸的不足。

聯合兵種營通資系統目前依作戰運用方式區分「主戰」、「輔助」及「備援」系統，依系統特性則區分「有線電、無線電、資訊、微波及衛星系統」等，聯兵營目前營通信網之構成，須併用多重系統及公、民營電信網路與資訊系統長短相輔並保持複式配置，建立營級對旅級、對連級及友軍（含作戰管制、陸空、陸海）單位間所需之有、無線電、傳真、文電及傳令等通資設施開設、作業與維護，然戰時機動數位微波可提供資訊傳輸及視訊服務至營級，營級(不含)以下僅能使用37系列無線電機實施小頻寬的資訊傳輸並無法提供視訊功能，更無法提供戰場共同圖像或回傳戰場即時影像給上級，戰場透明度不足。

再加入紫外光通信系統後，可將其配賦至營、連、排、班級，提供語音、資訊傳輸、視訊、傳真、戰場共同圖像、部隊動態管制等功能，於營、連級指揮所建置數位化「作戰指管系統」，藉紫外光通信系統實施資訊傳輸，可接收上級提供海、空情資以形成戰場共同圖像，在「各級指揮車」與「武器載台」上建置「部隊機動管制系統」，將我軍位置、敵情及命令自動傳送等，以提升作戰指管效益，通資指管系統運用規劃如表1。

表 1 聯兵營通資指管系統運用規劃

聯兵營通資指管系統運用規劃					
分類	系統名稱	使用裝備 (配賦層級)	提供服務	運用平台	作戰運用
有線電	六碼軍線	KY-1000、KY-32 等 交換及電話設備(各 層級)	語音、傳真	國軍光纖 、陸區、微波 骨幹電路	主戰
無線電	VHF 無線 電網	37 系列無線電機(戰 區、旅、營、連、 排)	語音、資訊傳 輸	獨立網路(指 揮官網)	
		HR-93、105 手持無 線電(排、班)	語音		
		GPS/GIS 部隊動態 管制系統	部隊動態管制	獨立網路(指 揮官網)	
資訊網路	軍網	資訊網路設備 (各層級)	語音、資訊傳 輸、視訊	國軍光纖 、陸區、微波 骨幹電路	主戰
微波系統	機動數位 微波	機動數位微波 (旅、營)	語音、資訊傳 輸、視訊	微波骨幹 電路	主戰
衛星系統	維星系統	固定、車載、可攜 式終端(戰區、旅、 特戰)	語音、傳真、 資訊傳輸、視 訊	中新二號 衛星	備援
公、民營	中華電信 軍租線路	KY-32 交換機、電話 及資訊網路設備 (營、連、排、班)	語音、傳真、 資訊傳輸、視 訊	中華電信	備援
無線雷射	紫外光 通信系統	紫外光系統 (營、連、排、班)	語音、傳真、 資訊傳輸、視 訊、戰場共同 圖像、部隊動 態管制	獨立系統(光 通信)	未來備援

資料來源：作者繪製

另依不同單位特性來運用無線雷射，聯兵旅可以臨時架設解決必要的通信及電腦連網或作為機動通信的中繼台；另架設於各級火協中心，可與艦船、旋翼機及定翼機上實現短距離保密通信；特戰部隊可以架在高山之間完成邊防哨所和森林觀察的通信；地區守備部隊可以架設在海岸、河川，同時還有方便攜行、架設快捷和保密性好的優勢，還非常適應戰場移動指揮的通信需要。

三、作戰指管效益

無線雷射通信中以紫外光通信最適合運用本軍營級以下部隊使用，紫外光通信既可以補足傳統光通信不能進行非視距通信，受氣候影響嚴重的缺陷，也可以彌補有線通信需要部署線路及傳統無線電頻寬不足的缺點，分析其作戰指管效益如下：

(一)保密性高

1.低解析度

紫外光是不可見光，肉眼很難發現紫外光源的存在；紫外光通過大氣散射向四面八方傳播信號，因而很難從散射信號中判斷出紫外光源的所在位置。

2.低竊聽率

由於大氣分子、懸浮粒子的強吸收作用，紫外光信號的強度按指數規律衰減，這種強度衰減是距離的函數，因此可根據通信距離的要求來調整系統的發射功率，使其在非通信區域的輻射功率減至最小，使敵方難以截獲。

(二)適應戰場環境

1.防自然干擾

由於日盲區的存在，近地面日盲區紫外光雜訊很小；另外，大氣散射作用使得近地面的紫外光均勻分布，在信號接收端反映為以直流為主的電流信號，可利用濾波的方式去除這些背景信號。

2.防人為干擾

由於系統的輻射功率可根據通信距離要求減至最小，敵方很難在遠距離對本地紫外光通信發射系統進行干擾；其它常規通信干擾對紫外光通信是無效的。

(三)全方位全天候性

1.全方位

不同於其他無線雷射通信系統必須以視距通信方式的弱點，紫外光的散射特性使紫外光通信系統能以非視距方式傳輸信號，進而克服複雜的地形環境。

2.全天候

日盲區的太陽紫外輻射強度在近地面十分微弱，無論白天還是夜晚都不會有太大的「雜訊」干擾。地理位置、季節更替、氣候變化、能見度等因素的影響和太陽輻射一樣，都可以看成是一種可忽略的背景「雜訊」。

(四)靈活機動可靠性高

1.靈活機動

紫外光通信平台在地面上可採用車載式，空中可採用機載式，海上可採用艦載式，可實現動中通通信，克服了傳統有線鋪設光纜、電纜或線路的缺點，能跟隨部隊快速機動，適應瞬息萬變的戰場環境。

2.可靠性高

傳統通信方式的電台或電纜線等一旦被摧毀將會導致通信徹底中斷，這在戰場環境是無法接受的；紫外光信號在戰場上很難被偵測到，作為攻擊目標的可能性小，且由於其體積小攜帶方便、機動性強，可快速搶通戰時通信。

結論

由本文可知世界各國在鑑於無線雷射通信巨大發展潛力下，皆已積極投入人、物力展開研究、實驗及提升相關技術，現已發展相當成熟，而我國尚未發展相關無線雷射通信技術，他山之石可以為錯，以各國在不同領域成功的經驗，可以讓我們在發展上少走很多錯路(例如：紫外光通信適用於營級以下地面部隊、藍綠光通信適用於水中...等)，相對可以節省巨額的前期研發經費，以達到「國防自主」的目標，為推動我國無線雷射通信技術的發展，提出如下政策建議。

建議

一、促進發展引導產業

隨著無線雷射通信技術的不斷進步和應用領域的不斷擴展，各國相關產業已逐漸形成，因此建議從國家層面為主導，整合中科院及其它科研機構、民間大學與企業展開產業合作，整合我國無線雷射通信技術領域的發展，利用我國在光纖通信技術和IC產業領域引領世界技術與產品創新優勢，面向未來通信網路應用，努力實現核心元件的自主權。

二、加強美方技術交流

無線雷射通信技術的發展沿用了許多光纖通信及光學設計的技術，但根據新的應用特點會形成新的顛覆性技術，以紫外光通信而言，美國是最早開發也是運用最成熟的國家，因此建議加強與美方技術交流，使科研單位、民間大學及企業掌握關鍵技術，並大力扶持技術成果轉化，並積極參與國際標準的製定，促進我國無線雷射通信技術和產業化的發展。

三、先期規劃複式配置

無線雷射通信技術日新月異，我通資電幹部需不斷吸收新知，了解系統諸元特性及其能力與運用限制，先期規劃作戰各時期通資電運用方式，在不影響現有各項通信系統(有、無線電、戰術區域通信、機動數位微波、維星系統等)下提供備援手段，以複式配置方式增加戰場存活率並強化指揮官應變制變能力。

參考文獻

- 一、林佳儒，〈自由空間光通訊發展現況〉，《新新季刊》，(桃園)，第48卷2期，國家中山科學研究院，民國109年4月，頁89-98。

- 二、A. Malik, and P. Singh, "Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges," International Journal of Optics, 2015, P7-12。
- 三、C. Casey, "Free Space Optical Communication in the Military Environment," Dudley Knox Library, Naval Postgraduate School, 2014, P7-9。
- 四、C. Casey, C. Prince, P. Ateshian, G. Singh, and J. Gibson, "Suitability of Free Space Optical Communication in Military Environments," 20th International Command and Control Research and Technology Symposium, 2015, P13-15。
- 五、Peucheret, "Direct and External Modulation of Light," Experimental Course in Optical Communication, Technical University of Denmark, 2009, P3-9。
- 六、L. X. Meng, L. Z. Zhang, X. M. Li, and H. L. Jiang, "Airborne Laser Communication Technology and Flight Test," Proceedings of SPIE, Photoelectronic Technology Committee Conference, 2015, P13。
- 七、H. Kaushal, and G. Kaddoum, "Applications of Lasers for Tactical Military Operations," IEEE Access, IEEE Journals and Magazines, Vol. 5, pp. 20736-20753, September 2017。
- 八、APL Demonstrates High-Bandwidth Communications Capability at Sea, <https://www.jhuapl.edu/PressRelease/17024b>, 2011年2月。
- 九、Lunar Laser Communication Demonstration NASA's First Space Laser Communication system, <https://www.nasa.gov>, 2021年2月。
- 十、Sonabeam Z, <https://www.fsona.com>, 2021年2月。
- 十一、Sonardyne BlueComm Underwater Wireless Optical Communication System, <https://www.sonardyne.com>, 2021年2月。
- 十二、TALON-Robust Tactical Optical Communications, <https://www.doncio.navy.mil/chips/ArticleDetails.aspx?ID=5550>, 2021年2月。
- 十三、UV Light Communication System, <http://www.mwrf.net/tech/communications/2018/24098.html>, 2021年2月。
- 十四、ViaLight-Miniaturized Laser Terminals MLT for Constellations, <https://www.vialight.de>, 2021年2月。

作者簡介

鍾勝杰，中正理工學院專科34期(95年班)、通資安全正規班24期(101年班)、健行科技大學電機所。經歷通信排長、通信官、教官、作戰科通信官；現職為陸軍通信電子資訊訓練中心通測中心戰術教官。