



水下無線光通訊系統技術（UWOC）

劉彥良*

工業技術研究院資訊與通訊研究所光通訊網路技術部技術經理

摘要

本篇報告針對水下無線光通訊技術進行說明，編排分為現行水下無線通訊類型，並針對水下無線光通訊分析國際案例以及工研院過去與未來發展。我們透過通道量測和水下直播應用技術開拓水下大頻寬通訊契機，設計了一個水下無線光通訊系統，製作了一個 20 公尺水下測試平臺，並在臺灣北部的野柳港進行實驗。使用頻譜正交頻分多工調變和位元分載演算法，驗證水下 3 公尺，收發距離 10 公尺傳輸系統，並實現白天 158 Mbps 和夜間 205 Mbps 的傳輸速率。未來我們將蒐集更多通道數據，建立訓練數據的標記、篩選以及預處理機制，針對光訊號在海水中的非線性失真效應進行訓練與補償機制，目標降低無線光通訊系統 50% 誤碼率。

關鍵詞：水下無線光通訊系統、正交頻分多工、位元分載演算法、非線性失真、基於神經網絡的非線性補償

* 通訊作者：劉彥良

電子郵件：liuyenliang@itri.org.tw

（收件日期：2018 年 7 月 23 日；修正日期：2018 年 9 月 12 日；接受日期：2018 年 9 月 13 日）



Underwater Wireless Optical Communication System Technology (UWOC)

Yen-Liang Liu^{*}

Technical Manager, Division for Broadband Network & System Integration Technology-Optical Communication & Networking Department, Industrial Technology Research Institute

Abstract

In this report, we introduce current communication technology on underwater wireless communication technology, including underwater wireless optical communication (UWOC). Additionally, analyzing international cases, we also present ITRI's (Industrial Technology Research Institute) development of UWOC technology over the past and the future. Aiming at large bandwidth communication demands through underwater channel measurement and underwater live broadcasting applications. First, we designed and fabricated an UWOC testing platform with a maximum distance of 20 m. Then, we conducted experiments in Yehliu Harbor in northern Taiwan. Using spectrum orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation and bit allocation algorithm, we achieved a transmission rate of 158 Mbps during the daytime and 205 Mbps during the nighttime at a transmission distance of 10 m. In the future, we will collect more channel data, establish the marking, screening and preprocessing mechanism of training data, and train and compensate the nonlinear distortion effect of the optical signal in seawater, aiming to reduce the 50% error rate of the wireless optical communication system.

Keywords: underwater wireless optical communication (UWOC), orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM), bit-loading algorithm, Nonlinear distortion, neural network-based nonlinear equalizer (NN-based NLE)

^{*} Corresponding Author: Yen-Liang Liu
E-mail: liuyenliang@itri.org.tw

壹、前言

目前水下無線通訊主要有聲學通訊、射頻 (Radio Frequency, RF) 通訊和無線光通訊三大技術 (如表 1 所示)，其中以聲學通訊發展最為成熟，應用較為廣泛，舉凡潛艦之間的通訊、海域地形掃描、水下物體偵測和水下載具定位，皆透過回波方式量測物體距離和尺寸。而以通訊角度來看，聲學和 RF 通訊波段大多使在 KHz 頻段，傳輸上將受限於訊號格式 (僅文字等)，但優越的高穿透性將可使訊號傳輸至公里 (Kilometer, km) 外的裝置；光學通訊部分由於使用在高頻波段 (THz)，傳輸訊號將可以涵蓋即時影像等級，速度甚至可達 Gbps，但受限海水濁度對光學特性干擾，傳輸距離也將不及聲學通訊，技術獨特性和唯一性 (指向性、天線面積小、大頻寬等) 在日後也將廣泛運用。本篇文章也將針對水下無線光通訊技術 (Underwater Wireless Optical Communication, UWOC) 進行說明。

表 1 水下無線通訊技術比較表

Parameters	Acoustic	RF	Optical
Attenuation	Distance and frequency dependent (0.1 ~ 4 dB/km)	Distance and conductivity dependent (3.5 ~ 5 dB/m)	0.39 dB/m (Oceam ~ 11 dB/m [turbid])
Speed	1,500 m/s	$\sim 2.255 \times 10^8$	$\sim 2.255 \times 10^8$
Data rate	~ Kbps	~ Mbps	~ 100 Mbps
Latency	high	moderate	low
Distance	Up to km	Up to 10 m	~ 10 ~ 100 m
Node array density	low	low	high
Resilience to Bio-fouling & turbidity	high	high	low
Node space savings	low	low	high
Bandwidth	Distance dependent: 1,000 km < 1 kHz 1 ~ 10 km ~ 10 kHz < 100 m ~ 100 kHz	~ MHz	10 ~ 15 MHz
Frequency band	10 ~ 15 kHz	30 ~ 300 Hz (ELF, for direct underwater communication system) or MHz (for buoyant communication system)	$10^{12} \sim 10^{15}$ Hz
Transmission power	Tens of watts	Few mW to hundreds of watts (distance dependent)	Few watts
Antenna size	1.0 m	0.5 m	0.1 m
Efficiency	~ 100 bits/joule	–	~ 30,000 bit/joule
Performance parameters	Temperature, salinity, and pressure	Conductivity and permittivity	Absorption, scattering/ turbidity, and organic matter

資料來源：Kaushal 與 Kaddoum (2016)。

由於可見光頻譜在水下具備一個低吸收窗口（高穿透性），而高頻段通訊範圍（400 ~ 789 THz）將可提供高速率傳輸，這也是目前水下唯一可執行無線且高速率通訊技術（約為 RF 訊號之 10 萬倍）（如圖 1 所示），更是唯一可以實現跨介質（空氣和海水）的通訊技術。

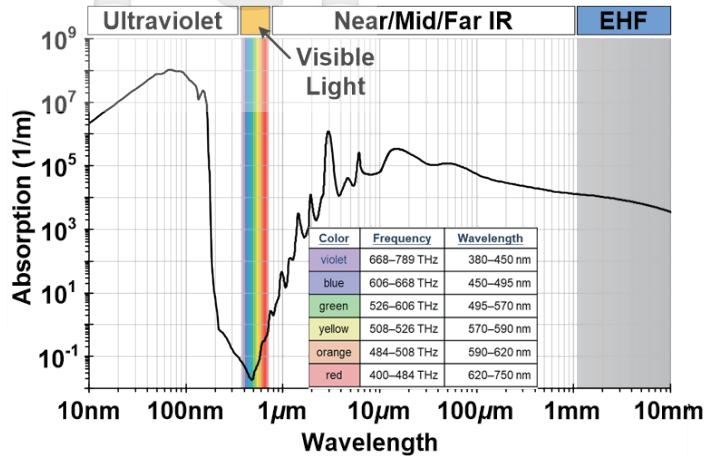


圖 1 通訊頻譜對應海水吸收率

資料來源：Chaplin (2018)。

工業技術研究院資訊與通訊研究所從 2016 年開始研究 UWOC，從乾淨淡水介質至岸邊海水介質的驗證，從點對點光機系統至整合水下載具雛型驗證，目的都是為了開啟臺灣發展水下大頻寬通訊的新頁。資通所將以研究水下藍綠光通訊技術為出發點，進一步帶動周邊系統整合的解決方案，期望能滿足水下應用場域需求，如水下監控、水下載具間的資訊傳遞、養殖漁業監控與水下聯網通訊系統等等；此外，透過海域通道數據分析與補償，將可為水下收發系統或數位訊號處理技術帶來高可靠度與穩定通訊傳輸，渴望協助國內廠商爭取水下無線聯網通訊市場，提升臺灣在水下通訊的國際地位。

由於目前水下可見光大頻寬通訊在全球研發仍處於萌芽階段，但早在 1995 年國際學術期刊就已經有多位學者發表關於水下可見光通訊技術。Bales 與 Chrysostomidis (1995) 提出水下無線光通訊的潛力，此研究實現了 20 公尺 (meter, m) 距離下傳輸 10 Mbps 以及 30 m 下傳輸 1 Mbps。此外，最近在高功率 LED 和半導體雷射方面的進展也加快技術的發展。Doniec、Detweiler、Vasilescu 與 Rus (2010) 使用 6 個 5 瓦特 (Watt, W) 的 480 奈米 (nanometer, nm) 波長 LED 和雪崩光電二極體 (Avalanche Photodiode, APD)，在 7 m 距離內以 600 Kbps 的速度在港口水域展示了一個水下光學通訊系統。B. Tian、Zhang 與 Tan (2013) 使用 1 W 470 nm LED 和矽光電二極體，在 7 米距離的池水中提供了 38 Kbps 的水下光學通訊系統。Pontbriand、Farr、Hansen、Kinsey、Pelletier 與 Ware (2015) 在 2,400 m 深處使用 LED 和光電倍增管 (Photomultiplier, PMT) 展示 1 Mbps 和 138 m 長的無線光學傳輸。近年 P. Tian 等 (2017) 利用 440 nm MicroLED 以及 OOK-NRZ UWOC 系統在 5.4 m 的傳輸距離傳輸速率達 200 Mbps。大頻寬調變 (> 1 GHz)，窄光譜寬度 (< 5 nm) 和相干輸出的雷射二極體 (Laser Diode, LD) 也被視為 UWOC 技術的替代方案 (Cheney, 2005; Kong

et al., 2017; Li et al., 2017; Oubei, Li, Park, Ng, Alouini, and Ooi, 2015) 。Hanson 與 Radic (2008) 使用 532 nm LD，在傳輸距離為 2 m 的情況下以 1 Gbps 的傳輸速率實現 UWOC 系統。

Oubei 等 (2015) 使用 520 nm LD 和 APD 在 7 m 距離內展示了 2.3 Gbps OOK-NRZ UWOC。Kong 等 (2017) 使用正交振幅調變 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 正交頻分多工調變 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)，在 10 m 的傳輸距離上以 9.51 Gbps 的總傳輸速率展示紅／綠／藍 (RGB) LD 的 WDM UWOC 系統。Li 等 (2017) 使用具有注入反饋技術的 488 nm LD，在 10 m 距離內以 16 Gbps 的高傳輸速率展示四級脈衝幅度調變 (Pulse Amplitude Modulation, PAM-4) UWOC 系統。

貳、發展動機

水下通訊長期以來多以聲學或超音波作為通訊主流，因為低頻率在水下具低吸收特性，因此傳輸距離可達公里等級，由通訊角度來看大約在 32 KHz 左右，低頻率操作下僅只能傳輸 Kbps 速率，大多應用於裝置定位或控制為主，技術應用多集中於軍事或是科普研究上，而近幾年隨著水下休閒觀光興起，潛水人員間通訊或定位也大多利用超音波進行語音通訊，無形中開啟水下應用新商機。

大頻寬傳輸，避免以纜線方式進行訊號傳輸是未來水下通訊發展趨勢，「無線光通訊系統」開啟水下大頻寬傳輸新頁，該技術頻率為 400 ~ 789 THz (380 ~ 750 nm)，其中藍—綠波段 (526 ~ 668 THz) 在水下具備低吸收特性，雖然穿透性不如聲學通訊具備 km 等級，但高頻特性也驅使具備 Gbps 等級傳輸速率，無形中也提高水下施工的安全性。早年 1963 年 S. A. Sullian 及 S. Q. Dimtley 等人研究光波在海洋中的傳播特性時發現，海水對可見光頻段衰減比其他 RF 頻率要來得低，此研究證實在海洋中亦存在一個類似大氣中的透光窗口，這一個物理現象的發現將解決長期水下高頻寬目標探測需求 (王全喜, 1994)。由於海下通道是時變的，會受到不同氣候和深度改變原有系統參數，而影響通訊系統效能主要取決於海水被溶解物 (有機物和無機物)、懸浮物和純水對光束吸收和散射，表現出的特徵是衰減機制，如圖 2 所示，散射指的是光子傳輸的方向產生變化，而不改變光子的其他特性的隨機過程，也就是被散射的光子並未消失，而是偏離准直方向；吸收部分則是光通過光合作用向化學位能的轉變，對海洋生物 (浮游生物或藍綠藻等等) 來說至關重要，因此通過吸收過程，光子就消失了。由於水分子是經過極化的，因此水分子在紫外和紅外頻譜上有共振，而產生強烈的吸收，紫外的共振起因於電子激發，而紅外的共振起因於分子激發；再者，RF 電磁波在海水中的衰減非常快，例如：常見 2.4 GHz 頻段的藍芽技術、ZigBee、WiFi 等無線傳輸訊號在海水中的衰減大約是 1,695 dB/m，而在純水的衰減量約 189 dB/m，因此過高的衰減量也使得這些常用的無線通訊技術在海下也難以實現高速長距離傳輸。再者海水通道中存在水多不同大小的粒子，光源一但接觸到粒子將會偏離原先的光軸，而造成不同程度的散射，或許最終回到光軸，但無形中也造成多重訊號干擾，大幅降低訊號可靠度。

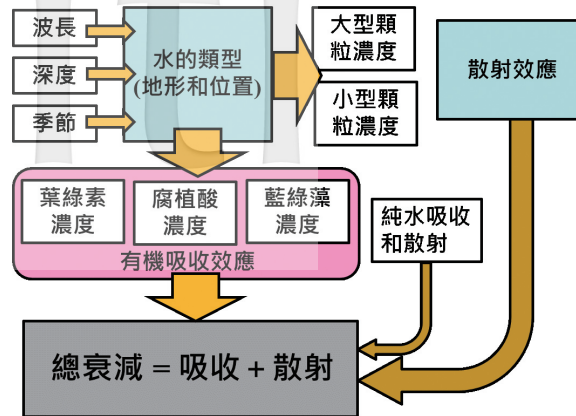


圖 2 海水介質訊號傳輸總損失架構圖

資料來源：參考 Cheney (2005)，本研究繪製。

爵若夫 (Jerlov) 分析指出海水的光學性質可以分為內在光學性質和外在光學性質。在描述海水內外光學性質時，常常涉及一些光學參數，如輻射通量、輻射強度、輻射亮度、輻照度等等 (Cheney, 2005)。臺灣在開放性海域 Jerlov 類型上在 IA~II 範圍中，如圖 3 所示，並依混濁度區分，較清澈且深的海水以 450 nm 光波長通訊為主，中重度濁度海水下（近海或港灣）以綠光 530 nm 光波長為主要通訊頻譜。

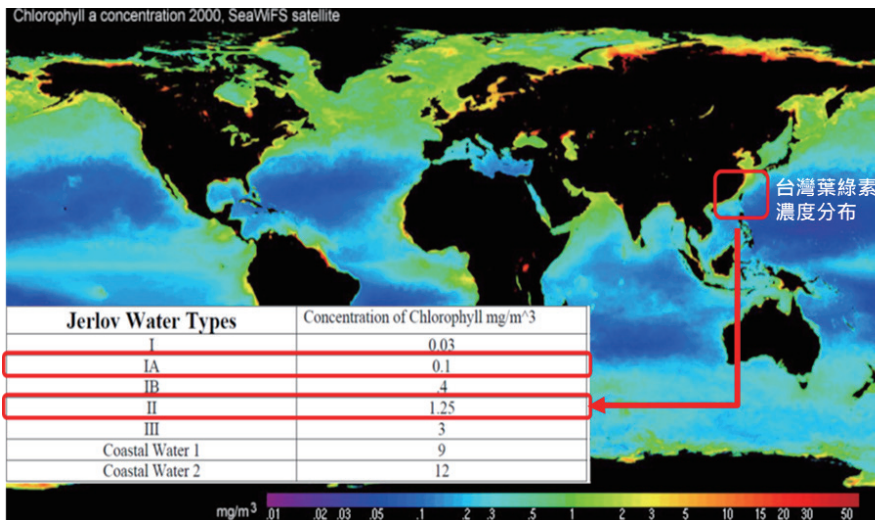


圖 3 衛星遠程傳感器讀取全球葉綠素 -a 濃度 (mg/m^3)

資料來源：Cheney (2005)。

一、國際發展趨勢

目前投入 UWOC 的廠商，主要集中日本、英國與美國，發展應用方向各有不同，日本主要鎖定在休閒潛水與水下探勘等應用，如潛水人員間的通訊、水中攝影資料傳輸與水下管

線維護與檢修等；而英國與美國鎖定工業和軍事目的應用，如海中工程建設、海底油田開發，及水下軍事設備傳輸等。各國投入研發與商業應用說明如下：

(一) 日本 Nakagawa Laboratories 水下語音通訊

日本 Nakagawa Laboratories 針對水下環境，研發適合潛水員使用的通訊系統，結合潛水面罩與手持式的 LED 訊號收發器（如圖 4 所示），讓潛水人員活動範圍在不受限的狀況下進行對話，且能清楚判別聲音的來源方向及發出訊號者，解決使用有線通訊與超音波通訊廣域的困擾。

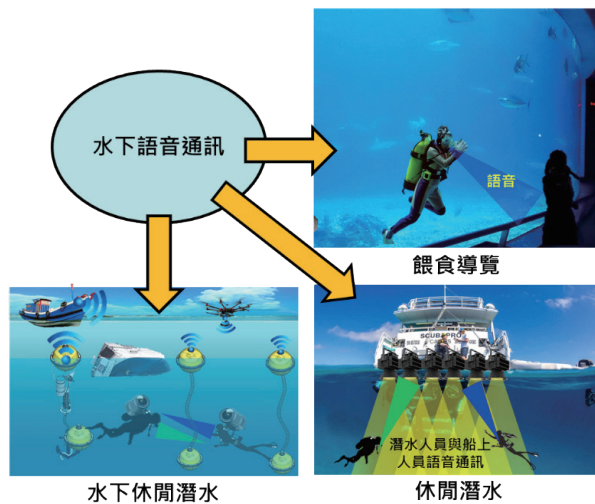


圖 4 可見光源通訊設備實現潛水人員通訊應用情境

資料來源：株式会社マリコムズ琉球（2015）。

(二) 日本東洋電機水下高速通訊應用方案

2014 年 10 月，日本太陽誘電（Taiyo Yuden）與東洋電機（Toyo Denki）發表共同合作開發，外型尺寸大小為直徑 235 mm、長度 377 mm 的水下無線光傳輸系統工具，採用在水下環境衰減較低的藍光 LED 作為訊號發射光源，在水中傳輸速率最高可達 50 Mbps，傳輸距離最遠可達 50 m。2015 年已經成功於日本琉球海域測試成功，但公司表示未來這項產品將持續朝向小型化與輕量化發展，並積極開發各項應用；同年參加日本可見光通訊協會所舉辦之研討會之際，進行相關技術展示。此外水下無人載具，目前相關通訊皆透過有線方式傳輸，然而，無人載具與水下固定位置之探測設備則以可見光通訊方式進行訊息傳輸，由於水下固定探測設備以電池驅動，因為必須長期在海底，因此無通信狀況下，將進入休眠狀況。當無人載具接近之際，會以超音波通訊方式喚醒水下固定探測設備。未來，也將針對相關水下固定設備與海面船通訊方面或是船與船之水平面可見光通訊等技術進行相關技術開發。2017 年東洋電機將以發展深海可見光通訊技術，應用於海底地震探勘與研究，研究地震周期，做為日後地震預警機制（如圖 5 所示）。

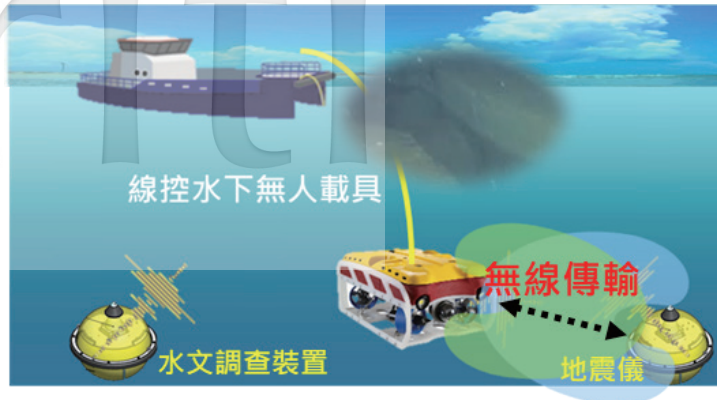
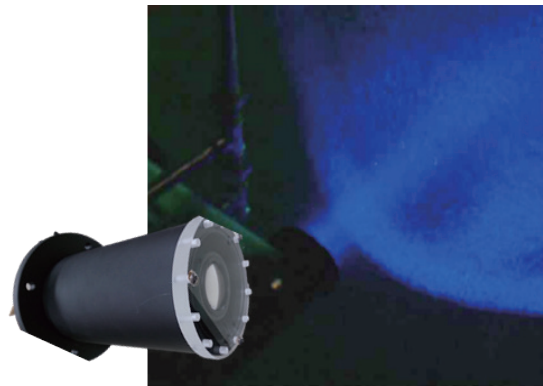


圖 5 日本太陽誘電與東洋電機合作開發水下無線光通訊系統

資料來源：可視光通信研究俱樂部（2017）。

（三）美國 Ambalux 水下可見光通訊系統

美國 Ambalux 針對水下通訊，鎖定高速寬頻的無人設備傳輸應用，推出高頻寬水下收發器（High-Bandwidth Underwater Transceiver）Model 1013C1（如圖 6 所示），資料傳輸速率最高可達到 10 Mbps，傳輸距離可達到 40 m。與聲學通訊系統不同的是，這套系統不會受到海水溫度與鹽度的影響，也沒有衍生聲波反射雜訊的困擾，惟由於是利用可見光進行通訊，仍會受到水質的清澈程度和周圍陽光所影響。



單一光源色溫發射模組示意圖

圖 6 High-Bandwidth Underwater Transceiver: Model 1013C1

資料來源：Scribd（n.d.）。

（四）英國 Sonardyne 水下無線光通訊系統與應用方案

目前水下環境能使用的唯二無線通訊技術，無論是聲納還是無線光傳輸，都是 Sonardyne 已經涉足且持續進行優化的產品。在聲納技術部分，Sonardyne 已經能提供長

距離 ($> 4 \text{ Km}$) 且傳輸速率最高可達 6 kbps 的解決方案；而在水下 UWOC 部分，目前 Sonardyne 也已經能提供傳輸距離 150 m ，傳輸速率最高可達 500 Mbps 的解決方案，其中推出的水下 UWOC 系統稱為 BlueComm 系列，皆採用 450 nm 的藍光波長進行傳輸，又主要依據光源類型、傳輸速率與傳輸距離的不同區分為 BlueComm 100、BlueComm 200 與 BlueComm 5000 三種型號。BlueComm 100 主要針對短距離與高系統可靠度的需求，採用高功率的藍光 LED 光源，搭配 PIN 檢光二極體 (Photodiode, PD) 作為光源接收器，最高傳輸速率可達 5 Mbps ，傳輸距離可達 10 m ；BlueComm 200 採用的是陣列式排列的藍光 LED 模組，並搭配光電倍增管作為光源接收器。因為光電倍增管的感光轉換效率比 PIN 檢光二極體更高，除了能使傳輸距離更遠外，訊號發射光源也必須分開設計以避免互相干擾，整體系統的傳輸速率可達 12.5 Mbps ，傳輸距離可達 150 m ；而 BlueComm 5000 為了讓系統可同時雙向傳輸，並讓速率有更大幅度的躍進，因此傳輸光源使用藍光雷射，使最高傳輸速率可達 500 Mbps ，傳輸距離可達 7 m 。此技術應用在水下環境具備超高速傳輸的優勢，最適合應用的場域環境應該是在深海中或海底。原因在於，當海水深度達到一定程度時，許多設備有高速傳輸的需求，且海水的濁度會下降至極低的水準，使用 UWOC 系統所擔心的周遭環境光干擾的問題也可完全避免，完全是理想的應用環境（如圖 7 所示）。



圖 7 Sonardyne 的 BlueComm 水下無線光傳輸系統使用情境

資料來源：Sonardyne International Limited (2016)。

（五）日本海洋研究開發機構水下可見光通訊技術

國立海洋研究開發機構在 2017 ~ 2018 年發表水下可見光通訊技術，並進行實測研究。研究表示，光波在海洋中的傳播特性以 $450 \sim 550 \text{ nm}$ （藍—綠光）波段內的衰減要比其他頻率波段要來的低，因此是水下唯一可實現無線高速傳輸解決方案，實測過程完成 120 m 雙向水下無線光通訊系統技術，並實現 20 Mbps 的數據傳輸（如圖 8 所示），構築水下 LAN（區域網路）通訊形成的無線網路。

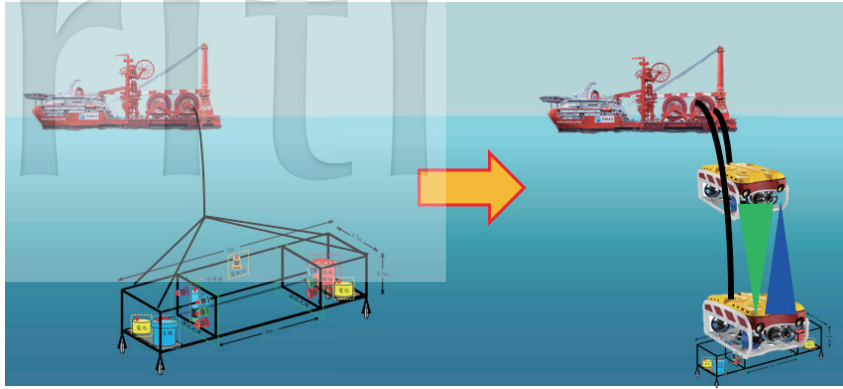


圖 8 日本海洋研究開發機構水下載具之間無線光通訊傳輸系統

資料來源：野口剛（2017）。

（六）美國 QinetiQ 水下通訊應用方案

目前唯一發展空氣至水下以及水下通訊以美國 QinetiQ 公司研發最為積極，透過不同技術（RF 電磁波、聲納和可見光雷射）使用軍事用途上，發揮彼此技術特性應用於協同作戰戰場中。此公司研發水下傳輸載具，使用藍—綠光波段，提供按單向和雙向通信，此產品應用於空氣和水下間（Air-Through-Water）傳輸速率約 1~10 Mbps，水下間（Through-Water）傳輸速率約 1~100 Mbps（如圖 9 所示）。

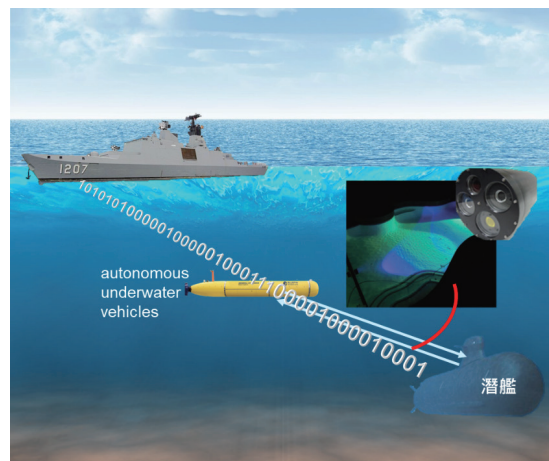


圖 9 QinetiQ 公司應用於軍事海／空無線光通訊系統技術

資料來源：QinetiQ North America（n.d.）。

（七）日本川崎重工水下 AUV 新未來

川崎重工也於 2017 年 11 月發表一款水下自主載具（Autonomous Underwater Vehicle, AUV），並透過可見光通訊進行水下大容量資訊傳輸，為此在光學部分設計全向性，以避免載具飄移影響通訊品質，此外為了提供載具長時間於水下運作，也以水下非接觸式充電進行技術研發，此系統預計 2020 年商業化，在 2025 年在日本水下管線進行維護與檢修，並提供水下節點監控與載具整體解決方案（如圖 10 所示）。

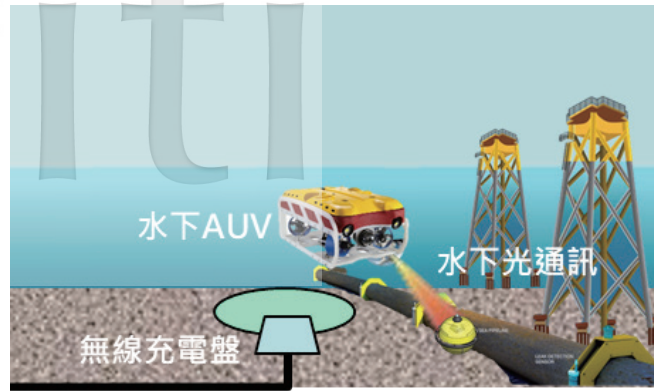


圖 10 川崎重工 AUV 整合可見光通訊系統與非接觸式無線充電技術

資料來源：川崎重工工業株式會社（2017）。

二、臺灣發展水下光通訊之重要性

臺灣為一海島型國家，四周海域不但提供了國防戰略上的防禦縱深，同時也提供豐富的資源，例如：漁業資源、優異的風場、海底礦藏、黑潮洋流潛在發電效益……等，但是，臺灣在海事相關科學與產業卻遲遲未有相對應的投資與發展，近年來在政府部門、學術單位與產業合作下，知名大學（如：海洋大學、中山大學、臺灣大學……等等）成立海洋研究所，進行海洋探測相關研究，並建立許多重要的技術成果，若能進一步設立探測節點及設立載具，並將節點與水下載具聯網，進行快速資訊蒐集與傳輸，將是強化應用競爭力很重要的一環，故發展節點間與載具間融合通訊技術（聲學為窄頻控制定位技術，可見光為高速率資料傳輸訊號），進行海洋研究是不可或缺關鍵技術，同時，這對政府宣示國防自主之潛艦國造、海洋資源的探勘……等的應用目標尤為重要。

此外臺灣是資通訊、機械和光電產業強國，而且水下通訊技術是一個高度跨領域整合技術，對水下產業長期發展上極具優勢。臺灣發展水下可見光通訊利基點為：

- （一）臺灣發展海下無線光通訊技術研發能量雖然落後國際歐、美、日約 2～3 年時間，但是臺灣具先天地理優勢（四面環海），且具多樣式應用服務（箱網養殖、生態復育和離岸風電海下作業等），都亟需系統級海下監控或感測解決方案。
- （二）海下無線光通訊技術屬於專網、私有通訊協定、唯一可實現海下高速無線傳輸技術，由於技術門檻高，屬於新型態通訊藍海產業，可使產品維持高質化、高單價，免於低價競爭。
- （三）可見光也是唯一可以海／空通訊技術，技術發展上不會隨著時間演進而淘汰或更新規範，由於現階段也沒有通訊標準的問題，更不會受限國際廠商通訊晶片，屬於全自主性通訊系統。

綜合上述國際各大系統廠皆都競相發展水下大頻寬無線通訊技術，為的是在所謂有內太空之稱的海下技術能占有一席之地，而身為四面環海，又是資通訊發達的臺灣，豈能置身事外，應該要強化海洋技術發展。

參、無線光通訊系統測試架構與實驗結果

在此章節中將以工研院資通所執行水下無線光通訊研究計畫進行概要說明，主要分為通道量測技術和水下監控應用技術，並透過擴展適合臺灣發展水下應用服務，淬煉關鍵技術和系統解決方案；最後針對未來資通所在水下無線光通訊技術布局做簡要說明。

一、海水通道量測技術

首先通道量測部分，如上所述海域通道一年四季變化劇烈，且海域地點和深度對參數皆有不同，因此為了能永續針對通道進行量測，資通所將分階段進行治具設計開發。首先在 2017 年以固定基座的方式針對北海岸港口邊進行初步實證，測試時間 7 月，測試時間為期 2 周並驗證藍綠光在白天和晚上參數變化，並驗證濁度對藍綠光傳輸效能分析，本實驗在水下布建 20 公尺移動式軌道，並將發射光機（LED）和接收模組分別架設在兩端，並透過防水線材將電源和訊號接至儀器端，因此僅只有光機在水下，儀器放置在岸邊，透過不同調變訊號和光譜色溫，量測通道濁度對系統最大傳輸距離和傳輸速率，實驗設置和測試環境如下圖 11 和圖 12 所示。訊號部分使用 Matlab 軟體產生基頻（OFDM）調變信號，參數設置採用 256 大小快速傅立葉變換（Fast Fourier Transform, FFT），50% 的循環前綴（Cyclic Prefix, CP）和 20 根副載波數，並透過任意波形發生器（Tektronix®AWG7102）實現，以 625 MSample/s 的取樣速率，對應於 48.8 MHz 的信號頻寬，並且經由數位類比（D/A）轉換解析度和輸出峰值對峰值電壓（Vpp）分別為 10 bits 和 1V，再者使用電子放大器（Mini Circuit LZY-22+）和衰減器來優化 LED 的光調變指數（Optical Modulation Index, OMI）。然後將 OFDM 信號藉由 Bias-T，並經過 39 V 的偏壓點（Vbias），以 AC 和 DC 方式饋入 LED。在水下光傳輸之後，透過光電倍增管直接檢測光 OFDM 信號，並使用示波器（Tektronix®CSA7404）以 1.25 GSAMPLE/s 的取樣速率對 OFDM 信號進行數位化。最後使用 Matlab®DSP 程序進行解調變，並估算信號雜訊比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）。



圖 11 工研院水下可見光通訊通道量測架構

資料來源：作者研究整理。

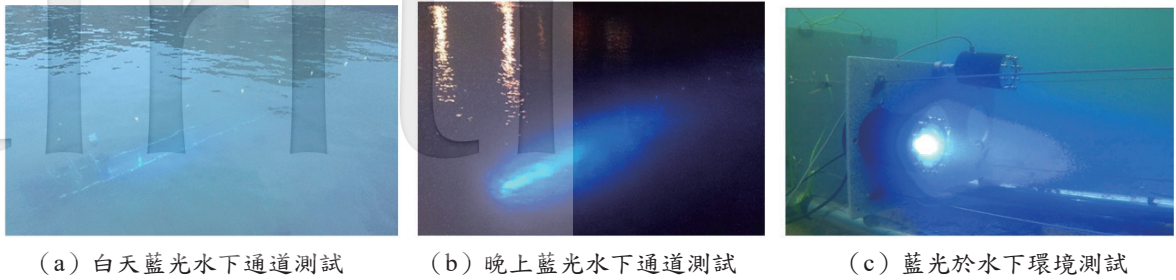
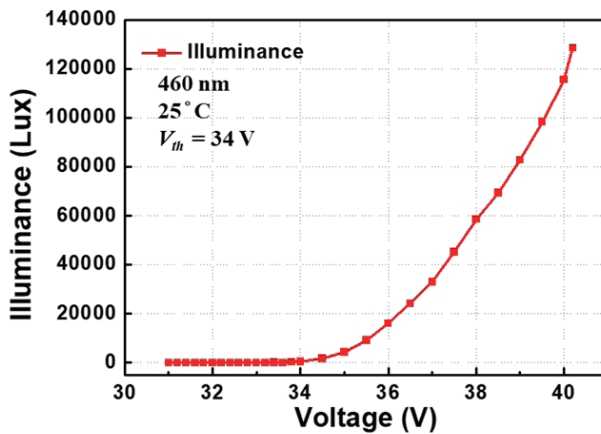


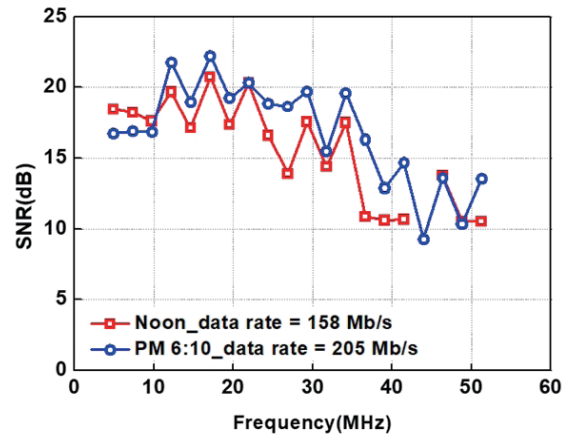
圖 12 水下藍光 LED 通道量測架設圖

資料來源：作者研究整理。

圖 13 分別繪出了 25°C 下 460 nm LED 的照度—電壓特性。臨界電壓 (V_{th}) 也在圖 13 (a) 中 OFDM 調變有較大的峰均功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)，這可能導致電光轉換期間的嚴重非線性失真。因此，在自由空間 (Free Space) 點對點配置下確定了 LED 操作在 39 V 的 V_{bias} 和 9 V 的信號峰對峰值 (V_{pp})。圖 13 (b) 主要是白天 (中午) 和夜間 (PM 6: 10) 淺水中，發射光機和接收光機傳輸距離為 10 m 的 OFDM 信號的 SNR 與頻率的關係。可以看出，由於沒有環境光線，夜間的 SNR 比值遠優於白天。透過將 OFDM 調變與 bit-loading 演算法相結合，我們實現白天 158 Mbps 和夜間 205 Mbps 的傳輸速率，並且 BER (Bit Error Rate) 低於 3.8×10^{-3} 的 FEC (Forward Error Correction) 臨界值。



(a) LED 的照度—電壓特性



(b) 在白天 (中午) 和夜間 (PM 6: 10)，水下 3 m 傳輸距離為 10 m 的 bit-loading 演算法 OFDM 信號與 SNR 與頻率的關係比較

圖 13 系統於通道環境下訊號雜訊比與傳輸速率關係

資料來源：作者研究整理。

圖 14 顯示數據速率和照度與時間的關係。可以看出，隨著時間的推移，照度會下降，但是在 PM 4: 30 之前數據速率降低到 50 Mbps，在 PM 17: 40 之後數據速率增加到 205 Mbps。這可能是因為在 PM 4: 30 之前的環境光被光接收機折射並直接接收，導致更大的雜訊功率並因此降低傳輸速率。

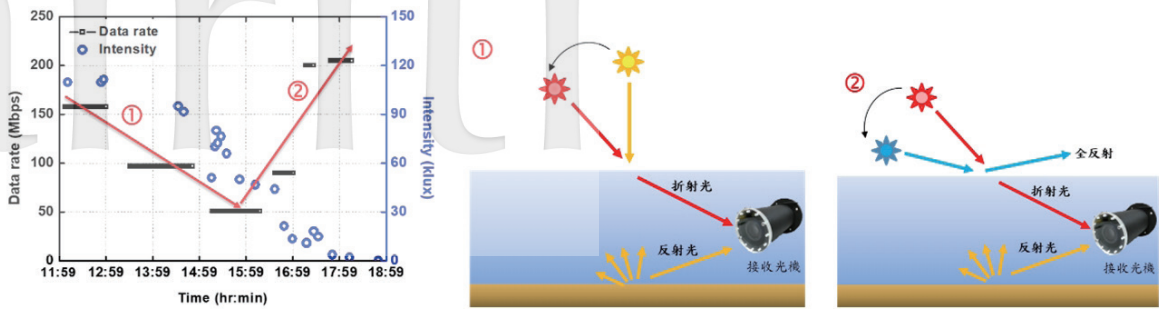
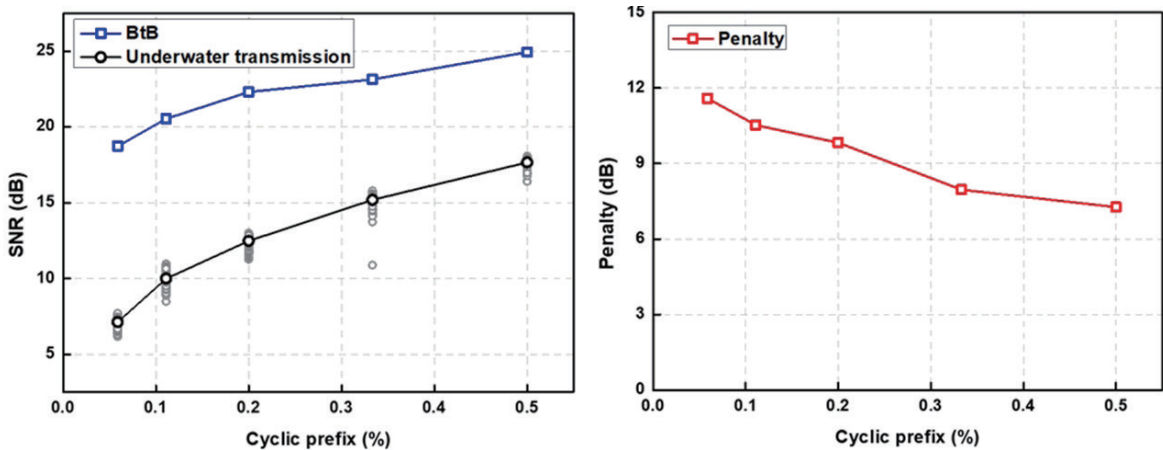


圖 14 傳輸速率和日光照度與時間的關係

資料來源：作者研究整理。

圖 15 (a) 描述了 SNR 與傳輸距離為 10 m 的循環前綴 (Cyclic Prefix, CP) 的各種百分比之間的關係。可以看出，藍色曲線顯示在背靠背 (Back to Back) 配置下，隨著 CP (從 6% 增加到 50%)，SNR 增加 (從 18.7 dB 到 24.9 dB)。這可能是本系統採用 LED 模組所產生多重路徑效應 (4 個並聯和 14 個串聯)，可能導致符號間干擾 (Intersymbol Interference, ISI) 並因此降低 SNR。如圖 15 (a) 中灰點所示，我們測量了多個接收到的光信號在不同 CP 百分比下的 SNR，從而得到平均 SNR 與不同 CP 百分比的關係，如黑色曲線所示。可以看出，當水下傳輸中 CP 從 6% 增加到 50% 時，黑色曲線顯示 SNR 從 7.1 dB 增加到 17.7 dB。圖 15 (b) 說明了傳輸 SNR 容忍誤差相對於各種 CP 的百分比，可以看出，隨著 CP 從 6% 增加到 50%，容忍值從 11.6 dB 降低到 7.3 dB。這可能是由於天然海水中富含顆粒物造成的額外 ISI。換句話說，OFDM 信號受到 LED 模組的多路徑效應，並且在天然海水中被大小不等的顆粒散射，導致更大的 ISI。結果，隨著 CP 增加到 50%，誤差可以降低到 7.3 dB。再者，吸收引起也將導致功率損失。



(a) CP 與訊號雜訊比關係

(b) 不同 OFDM 的 CP 百分比

圖 15 不同 OFDM 的 CP 百分比與訊號雜訊比關係

資料來源：作者研究整理。

二、水下直播應用技術

除了通道量測外，如何藉由研發技術衍生出具有商業價值應用著實重要，因此透過可見藍綠光實現水下直播應用技術，將可充分展現此技術在水下的優勢，由於可見光譜在水下具備低吸收，大頻寬特性，因此足以傳輸 Mbps 等級以上訊號，諸如感測、聲音和影像訊號都足以透過光源方式傳輸至終端。直播系統架構分為通訊分機、通訊主機和水面浮筒三大部分，系統供電以三元鋰電池為主，並將系統整合至防水機構以及框架中，以防止碰撞造成裝置進水，驗證地點為北海岸港口邊，測試時間 7 月，系統布建於水下 3 m。裝置架構圖如圖 16 所示。

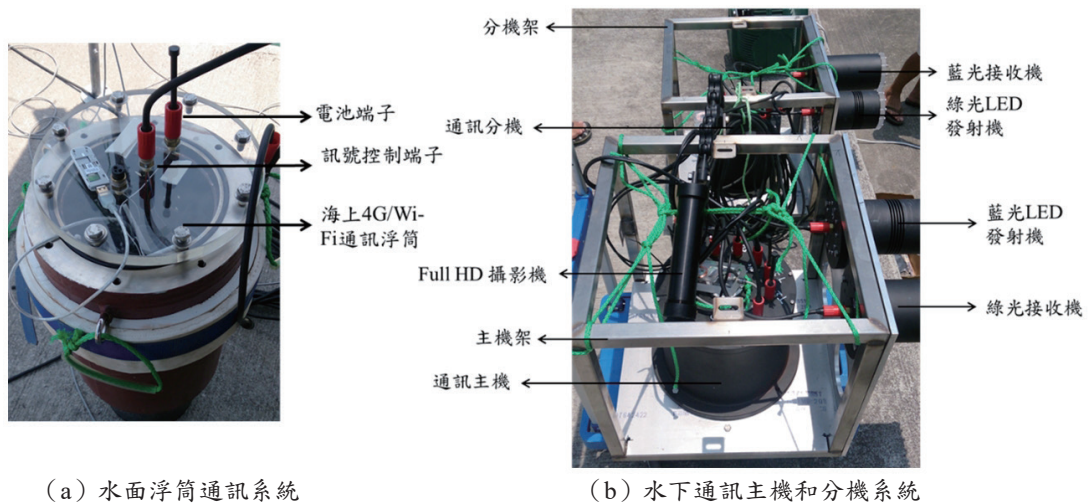


圖 16 水下直播系統實體模組架構圖

資料來源：作者研究整理。

在水下直播系統解決方案中，融合 RF (WiFi/4G) 通訊和無線光通訊系統，連結部分通訊主機透過可見光通訊方式傳輸至通訊分機，兩者距離約 2 m，以 5 W LED 進行雙向傳輸，再者通訊分機由有線方式連接至水面浮筒。各單元內部架構如圖 17 所示。

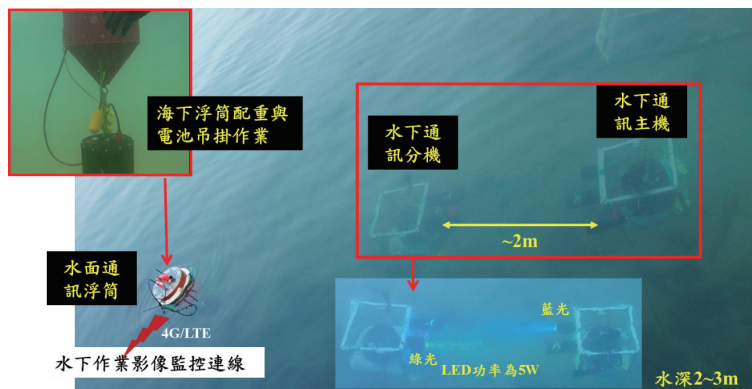


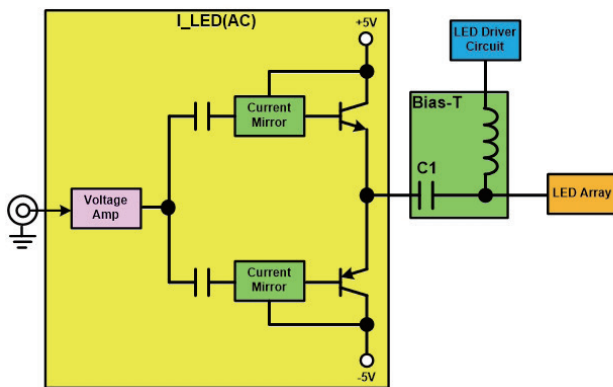
圖 17 水下直播系統解決方案

資料來源：作者研究整理。

首先在水面浮筒部分，內部整合電力線網路、GPS 和 4G 網路並透過外部三元鋰電池供電方式提供模組所需，此裝置目的是將水下直播的訊號透過 4G 網路推播至終端系統（如手機或平板），機構部分透過錐形設計方式藉由外部配重，使裝置能穩定浮在水面上。

再者是在水下通訊分機部分，內部整合電力線網路、12 V 鋰電池和數位解調變／調變模組，透過防水線材連接至可見光發射裝置和可見光接收裝置，此部分主要扮演中繼站角色，其中在 LED 光通訊傳輸技術系統中，高速高頻寬數位調變／解調變模組扮演重要角色，主要分為兩個部分，一者是數位調變／解調變電路設計，另一是類比－數位轉換電路設計。此設計重點為提供較佳通訊品質，包含信號雜訊比、自動增益控制等等，並經由數位 OFDM 調變提高系統速率傳輸，也就是假設 1 MHz 狀態下不經數位化的系統僅有 1 Mbps，但經數位化後同樣 1 MHz 的頻寬可提高大於 4 Mbps 的傳輸速率，過程中取決調變格式決定傳輸速率；由於目前應用皆以數位化的方式傳輸，對雜訊容忍度也較高，而為了降低背景光雜訊對通訊所造成信號品質劣化，載波調變頻率將操作在 2 MHz 以上，通訊架構上為雙向半雙工傳輸，介面為 10/100 Base-T 屬於 TCP/IP 的系統。

此外可見光發射端機構內部整合類比驅動電路、高功率 LED 和 16 度光學透鏡所組成，目的是將信號耦合至 LED 光源（如圖 18 所示），使能成功將電訊號轉換成光信號，以光源為媒介傳輸至接收端。電路設計上，由雙級放大器所組成，第一級採用 DSL 電壓放大器，目的是放大微小輸入信號源，但輸出增益取決於數入信號大小，當輸入信號越大將造成失真問題，因此設計輸入準位範圍操作在 400 ~ 800 mV (Vpp) 則有較佳信號放大品質；第二級則是透過雙級性電晶體組成 Class-AB 型電流放大電路。再者，T 型偏置器為一個三端阜的模型，一端串接電容用以阻隔直流信號，藉由此設計可以將交流調變信號載在 LED 光源。（如圖 18 所示）可見光接收模組部分，整合高感光檢光電路、光功率微控制電路和聚光光學透鏡，電路內部主要由轉阻放大器（Transimpedance Amplifier, TIA）、高通濾波器和前置放大器（Post Amp）組成，第一級放大器為轉阻放大器（操作頻寬需在 20 MHz 範圍），主要功能是將微小的電流轉換成電壓，而第二級為前置放大器主要以提高電壓增益（如圖 19 所示），使得訊雜比提高至 20 dB。



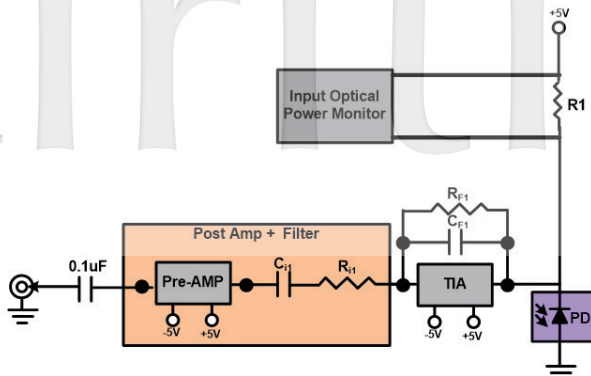
(a) 左可見光發射電路架構模組



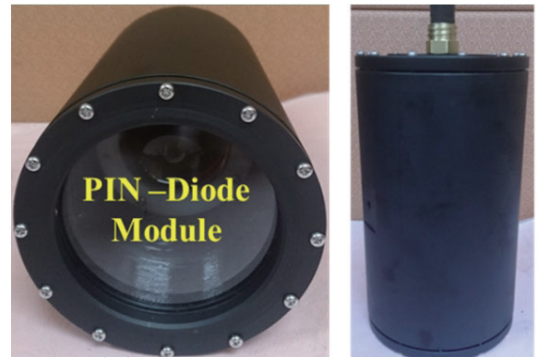
(b) 右可見光發射端機構外觀

圖 18 水下可見光發射端模組架構與實體圖

資料來源：作者研究整理。



(a) 左可見光接收電路架構模組



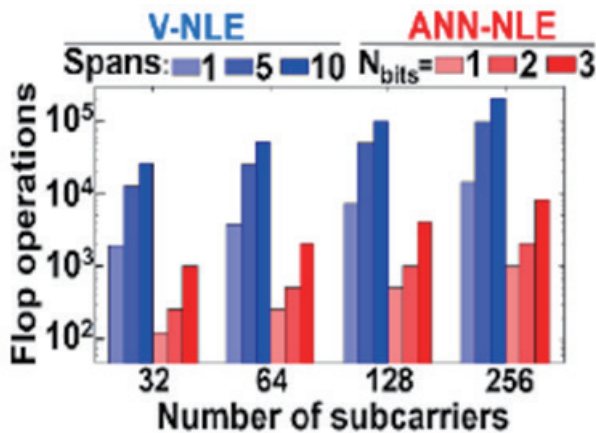
(b) 右可見光接收機構外觀

圖 19 水下可見光發射端模組架構與實體圖

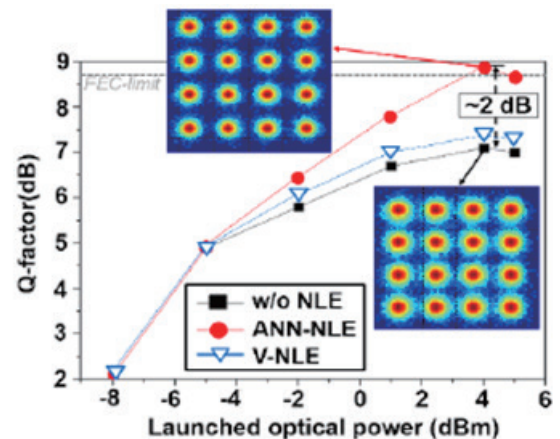
資料來源：作者研究整理。

三、時變通道訊號補償技術

展望未來在通道自適性演算法，團隊將蒐集更多水下通道數據，這些數據所表示的是對光傳輸的影響，之後透過分析提供具有效率的補償機制。目前國際上已有越來越多的研發團隊投入研究 NN-based NLE (Chuang et al., 2017)，與 Volterra Nonlinear Equalizer (NLE) 比較，NN-based NLE 有更好的補償效能，同時具有較低的複雜度，如圖 20 所示。在訓練通道模型的過程中，訓練數據具有關鍵性的影響，亦決定了 NN-based NLE 的效能。值得注意的是實體線路通道變化小，所蒐集的訓練數據特徵穩定，易於用以訓練模型，因此在通道中 NN-based NLE 容易達到最高的補償效能。然而，在海水通道所蒐集之訓練數據將會受到自然環境變化的影響，若直接用以訓練模型會有不容易收斂的問題，進而限制了 NN-based NLE 的補償效能。



(a) NN-based NLE 與 Volterra NLE 的複雜度



(b) 與補償效能比較

圖 20 系統訓練通道補償比較模型

資料來源：Giacoumidis 等 (2016)。

2018 年驗證將分為兩階段進行設計開發。第一階段將建立訓練數據的標記、篩選以及預處理機制。首先，透過監測主要的環境參數如濁度、環境雜訊、葉綠素等，在訓練數據上標記這些環境資訊，再透過篩選，對類似的環境參數進行分類，並且剔除掉不良數據，例如強度飽和、生物遮蔽等，如圖 21 所示。再者，對篩選後的訓練數據進行預處理（Pre-Processing），包含使用低通濾波器濾除高頻雜訊，並使用 Feed-Forward Equalizer (FFE) 降低線性失真，如圖 22 所示，藉此凸顯訓練數據的非線性失真特徵，讓模型更容易學習。

為了驗證所建立之訓練數據標記、篩選與預處理機制，可透過使用深度類神經網路（Deep Neural Network, DNN）進行驗證：使用隨機選取的訓練數據（剔除飽和訊號）與經過標記、篩選與預處理機制的訓練數據，進行 DNN 模型訓練，透過測試數據比較兩種 DNN 模型訓練後的誤碼率，第一階段目標為降低 50% 誤碼率。第二階段將使用預處理之訓練數據以訓練海下通道模型，將使用蒐集之訓練數據，建立海水通道模型（Learning From Data），在訓練通道模型的過程中，訓練數據具有關鍵性的影響，亦決定了補償機制的效能。由於在海水通道所蒐集之訓練數據將會受到自然環境變化的影響，若直接用以模型會有不容易收斂的問題，進而限制了補償機制的效能。透過建立數據標記、篩選與預處理機制，針對光訊號在海水中的非線性失真效應進行訓練，提升模型的收斂性，目標降低 50% 誤碼率。



圖 21 訓練數據標記機制與篩選機制

資料來源：作者研究整理。

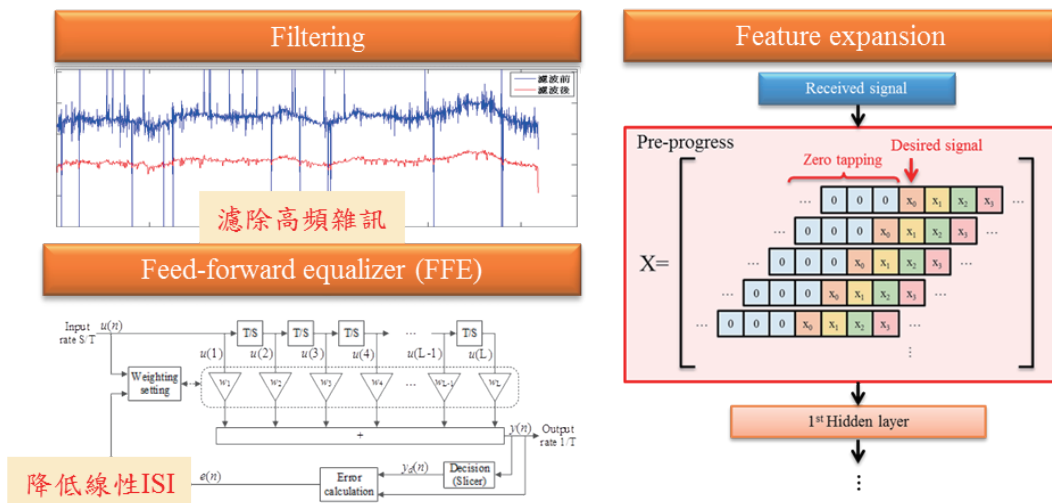


圖 22 訓練數據與處理機制

資料來源：Müller、Estarán 與 Renaudier (2017)。

肆、結論與未來展望

臺灣是一個四面環海的國家，海洋前瞻技術更是不可或缺，工研院資通所是臺灣第一個以可見光源方式進行海水大頻寬 ($> \text{Mbps}$ 等級) 實驗的研究單位，目的是提供水下長時間監控、水下安全施工和即時影像傳輸系統。因此首要量測針對通道進行訊號補償，以得到最適應時變通道的演算法技術，目的是提高系統穩定性與可靠度；再者，發展關鍵應用服務技術將可帶動臺灣水下產業鏈，因此建立臺灣在水下大頻寬通訊關鍵核心技術至關重要。在本文中，我們透過北海岸海水通道進行水下 3 m 水下無線光通訊技術測試，並透過 off line 的方式驗證 OFDM 調變和 bit-loading 演算法，成功實現了收發距離 10 公尺，系統於白天 158 Mbps 和夜間 205 Mbps 的傳輸速率；於此同時以需求為導向建立系統解決方案，實現水下即時直播應用技術（收發距離約 2 m），藉由技術淬鍊開啟創新水下互動直播新應用。

參考文獻

- 王全喜, 1994, 〈藍綠激光在海軍裝備中的應用〉, 《現代艦船》, 1994 (6), 頁 31-33。
- Bales, J. W., and Chrysostomidis, C., 1995, "High-Bandwidth, Low-Power, Short-Range Optical Communication Underwater," in *Proceedings of 9th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Lee, NH: Autonomous Undersea Systems Institute, 406-415.
- Chaplin, M., 2018, "Water Absorption Spectrum," *Water Structure and Science*, http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_vibrational_spectrum.html (accessed July 1, 2018).
- Cheney, M. A., 2005, *Short Range Underwater Optical Communication Links*, unpublished master thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Chuang, C. Y., Wei, C. C., Lin, T. C., Chi, K. L., Liu, L. C., Shi, J. W., Chen, Y. K., and Chen, J., 2017, "Employing Deep Neural Network for High Speed 4-PAM Optical Interconnect," paper presented at the European Conference on Optical Communication, Gothenburg, Sweden. doi:10.1109/ECOC.2017.8346205
- Doniec, M., Detweiler, C., Vasilescu, I., and Rus, D., 2010, "Using Optical Communication for Remote Underwater Robot Operation," paper presented at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan. doi:10.1109/IROS.2010.5650224
- Giacoumidis, E., Le, S. T., Aldaya, I., Wei, J. L., McCarthy, M., Doran, N. J., and Eggleton, B. J., 2016, "Experimental Comparison of Artificial Neural Network and Volterra Based Nonlinear Equalization for CO-OFDM," paper presented at the Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Anaheim, CA. doi:10.1364/OFC.2016.W3A.4
- Hanson, F., and Radic, S., 2008, "High Bandwidth Underwater Optical Communication," *Applied Optics*, 47(2), 277-283. doi:10.1364/AO.47.000277
- Kaushal, H., and Kaddoum, G., 2016, "Underwater Optical Wireless Communication," *IEEE Access*, 4, 1518-1547. doi:10.1109/ACCESS.2016.2552538
- Kong, M., Lv, W., Ali, T., Sarwar, R., Yu, C., Qiu, Y., Qu, F., Xu, Z., Han, J., and Xu, J., 2017, "10-m 9.51-Gb/s RGB Laser Diodes-Based WDM Underwater Wireless Optical Communication," *Optics Express*, 25(17), 20829-20834. doi:10.1364/OE.25.020829
- Li, C. Y., Lu, H. H., Tsai, W. S., Cheng, M. T., Ho, C. M., Wang, Y. C., Yang, Z. Y., and Chen, D. Y., 2017, "16 Gb/s PAM4 UWOC System Based on 488-nm LD with Light Injection and Optoelectronic Feedback Techniques," *Optics Express*, 25(10), 11598-11605. doi:10.1364/OE.25.011598
- Müller, R. R., Estarán, J. M., and Renaudier, J., 2017, "Experimental Estimation of Optical Nonlinear Memory Channel Conditional Distribution Using Deep Neural Networks," paper presented at the Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Los Angeles, CA. doi:10.1364/OFC.2017.W2A.51

- Oubei, H. M., Li, C., Park, K. H., Ng, T. K., Alouini, M. S., and Ooi, B. S., 2015, “2.3 Gbit/s Underwater Wireless Optical Communications Using Directly Modulated 520 nm Laser Diode,” *Optics Express*, 23(16), 20743-20748. doi:10.1364/OE.23.020743
- Pontbriand, C., Farr, N., Hansen, J., Kinsey, J. C., Pelletier, L-P., Ware, J., 2015, “Wireless data harvesting using the AUV Sentry and WHOI optical modem,” paper presented at the OCEANS 2015—MTS/IEEE Washington, Washington, DC. doi:10.23919/OCEANS.2015.7401985
- QinetiQ North America, n.d., “Underwater Optical Communications,” https://www.qinetiq-na.com/wp-content/uploads/data-sheet_underwater-optical-communications_web.pdf (accessed May 1, 2017).
- Scribd, n.d., “1013C1 High-Bandwidth Underwater Transceiver,” <https://zh.scribd.com/document/46389353/AMB-1013-Brochure-1> (accessed April 1, 2018).
- Sonardyne International Limited, 2016, “Sonardyne BlueComm Underwater Wireless Optical Communication System,” <https://www.sonardyne.com/app/uploads/2016/06/BlueComm.pdf> (accessed April 20, 2018).
- Tian, B., Zhang, F., and Tan, X., 2013, “Design and Development of an LED-Based Optical Communication System for Autonomous Underwater Robots,” paper presented at the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Wollongong, Australia. doi:10.1109/AIM.2013.6584317
- Tian, P., Liu, X., Yi, S., Huang, Y., Zhang, S., Zhou, X., Hu, L., Zheng, L., and Liu, R., 2017, “High-Speed Underwater Optical Wireless Communication Using a Blue GaN-Based Micro-LED,” *Optics Express*, 25(2), 1193-1201. doi:10.1364/OE.25.001193
- 川崎重工業株式会社, 2017 年 11 月 21 日, 〈英国海域における自律型無人潜水機 (AUV) の実証試験に成功〉, 《Kawasaki》, https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20171121_1.html (瀏覽日期: 2017 年 11 月 28 日)。
- 可視光通信研究倶楽部, 2017, 〈拡大する可視光通信の役割～ CEATEC JAPAN 2017 レポート～〉, <http://www.kashikou.jp/event/post-4458> (瀏覽日期: 2018 年 3 月 25 日)。
- 株式会社マリンコムズ琉球, 〈「第 6 回ものづくり日本大賞 特別賞」を受賞致しました〉, 2015 年 11 月 13 日, http://www.mcrcvlc.jp/index.php?page_id=67 (瀏覽日期: 2015 年 5 月 20 日)。
- 野口剛, 2017 年 10 月 2 日, 〈水中光無線通信による 100 m 超の 20 Mbps 双方向通信に成功～水中光 Wi-Fi の構築及び水中観測機器の IoT 化へ大きく前進～〉, 《国立研究開発法人海洋研究開発機構》, http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20171002/#z1 (瀏覽日期: 2017 年 10 月 5 日)。