

技術報告

測深光達原理、現有系統與服務

The Principles of the Bathymetric Lidar and the Current Systems and Services

史天元¹ 薛憲文² 王慧蓉³ 陳杰宗⁴ 陳佳勳⁵

Tian-Yuan Shih Shiahn-Wern Shyue Hui-Jung Wang Jie-Chung Chen Jia-Hsun Chen

摘要

地形測量所使用之空載光達系統多使用紅外波段 1064nm 波長之雷射光，該波段對水體之穿透力低，若經倍頻後所得 532nm 波長之雷射光，則屬綠光波段，具有透水能力。使用綠光波段構建之光達系統，可用以進行水深與水底地形測量。與聲波測深系統之成果相比較，其成果雖然尚不能達到 IHO 規範之特級要求，但是由測試案例與國外實測經驗顯示，目前空載測深光達已可達 IHO 規範之一級要求。雖然精度並非超越聲波測深系統，空載測深光達具有近岸淺水與礁石區作業之方便性，與船測相較，安全度高，而且作業速度亦高。相較於陸域之空載光達，測深光達之產品成熟度尚低。本研究分析現有商業性儀器，就儀器而言有三種系統，加拿大 Optech 之 SHOALS、澳洲 Fugro-LADS (Tenix-LADS) 之 LADS、瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye。而就研究性之系統而言，美國 USGS 使用中之 EAARL 為一具有未來性之作業中系統。就服務之提供而言，除澳洲 Fugro-LADS 本身亦提供測深服務，實質進行專案承包外，美國 Fugro-Pelagos 使用 Optech 之 SHOALS 系統，歐洲 BLOM 則使用瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye II，另一家歐洲公司，英國的 Pelydryn 則亦使用 Hawk Eye II 系統。本文謹就測深光達原理、現有系統與服務，歸納研究成果。

關鍵字：綠光雷射、沙奇盤深度讀數。

ABSTRACT

The most common wavelength of the laser beam used by airborne topographic lidar systems is 1064nm. This wavelength belongs to the infrared portion of the spectrum, which

¹ 交通大學防災工程研究中心教授
² 中山大學海洋環境及工程學系副教授
³ 交通大學防災工程研究中心研究工程師
⁴ 內政部地政司科長
⁵ 內政部地政司科員

does not penetrate the water well. The 532 nm laser beam generated from the 1064 nm utilizing the double frequency process, has good water penetrating capability. The bathymetric lidar systems utilize the 532 nm laser, which can be used for the bathymetric survey and substrate mapping. Validated with the sonar based bathymetric systems, the bathymetric lidar may not reach the IHO special order, but can fulfill the IHO specification of first order. The airborne lidar is not superior in accuracy than the acoustic based systems. But, the airborne system has many advantages for the operation in the shallow water area. Studying the current systems available commercially, there are three, namely, Optech SHOALS from Canada, Fugro LADS from Australia, Airborne Hydrography AB Hawk Eye from Sweden. In the non-commercial sector, EAARL system operated by USGS of the States is featured with advanced designs. Fugro-LADS is the only company which provides both systems and services. Besides Fugro-LADS, Fugro-Pelagos of the States operates with an Optech SHOALS, and BLOM from Europe and Pelydryn from U.K. operate with Airborne Hydrography AB Hawk Eye II. This paper introduces the bathymetric lidar system, including the principle, the systems, and the services.

Keyword: Green Laser, Secchi Disc Depth

一、前言

「空載光達」(Airborne Lidar)是一個系統，由數個不同功能的子系統構成。第一個是雷射測距系統，這個系統產生雷射脈衝、發射、接收、並且由發射與接收之時間間距計算出距離觀測量。第二個子系統是掃描系統，因為想要量測不只是一個點，而是要量測一個面，需要兩個維度分佈的量測點。藉由載台移動，可以涵蓋航線方向；提供垂直航線方向點位分佈的機制便是掃描系統。掃描系統不只是提供掃描的機制，還要提供掃描的角度。這個角度通常稱之為掃描角(Scan Angle)，由距離與掃描角，便可以計算三維空間中之坐標差。配合雷射測距時所在之位置與姿態，便可得到所測點的三維坐標。由於飛機在飛航時，「空載光達」的瞬間量測位置一直在改變，要知道雷射測距時原點在空間中之坐標，和雷射脈衝發射之方向，便需要第三個子系統：直接對位(Direct Geo-referencing)系統。「直接對

位」是由一組慣性導航儀(Inertial Navigation System, INS)與一組全球定位儀(Global Positioning System, GPS)組成。

因此，「空載光達」儀器組裝上分成兩個單元，綜合雷射、掃描、構成「雷射掃描儀」，直接定位系統則為另一單元。空載光達系統可進行快速、精確之地形測量，目前其應用正快速增加中。地形測量所使用之空載光達系統多使用紅外波段 1064nm 波長之雷射光，使用此一波段之原因與雷射產生器有關。Nd:YAG(neodymium-doped yttrium aluminum garnet; $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$; 鈷:鎳鋁石)可產生穩定、適當功率之脈衝雷射，其波長為 1064nm。但是該波段對水體之穿透力低，故無法應用於透水要求之作業。在非線性光學中發現，某些物質具有非彈性散射之性質，亦即其出射波之波長與入射波波長不同。其中，部分物質之出射波之波長為入射波波長之一半，亦即出射波之頻率為入射波頻率之一倍，

此稱倍頻現象。使用 Nd:YAG 為雷射產生器所得之 1064nm 波長之雷射波，若經倍頻後所得 532nm 波長之雷射波，則屬綠光波段，具有透水能力。使用綠光波段構建之光達系統，可用以進行水深與水底地形測量。倍頻過程並非效率百分之百，如其效率為百分之五十，則出射波中含有百分之五十綠光、百分之五十紅外光。同步射出後，在接收時分光，分別數化，可得各自之波形觀測量。紅外光之反向散射僅限於水面部分，可提供水面高程資訊，綠光可由波形辨識水面與水底，由而求得水深與水底地形。目前商業系統中，包含加拿大 Optech 之 SHOALS-1000T、澳洲 Fugro-LADS 之 LADS Mk-II、與瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye II 三種機型。

儀器製造與提供服務業務，往往具有彼此衝突之特性。因為，如果儀器製造商自身提供實做服務業務，則勢必將與購買其系統提供服務者產生競爭。但是，若就支援而言，儀器製造商提供服務業務，對其系統之維護與功能掌握應屬最為理想。而第二種狀況在系統相對上尚未完全成熟之際，更屬有利。基於這一考量，澳洲 Fugro-LADS (Tenix-LADS) 本身亦提供服務業務。但是，其他兩家製造商則專注於儀器之開發與製造。目前，美國 Fugro-Pelagos 使用 Optech 之 SHOALS 系統，歐洲 BLOM 以及英國的 Pelydryn 則使用瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye II 提供服務業務。因此，三套系統，各至少有一家提供商業性測繪服務。

二、測深原理

空載光達中雷射測距原理，與地面測量中之「電子測距儀」(EDM, Electronic Distance Meter)類似。雷射發射與

接收之時間差乘速度等於兩倍距離，因此，時間差是重要觀測量。而分析訊號之能力與回訊之訊雜比有絕對關係，要想將光束射得遠，返回的訊號強，需要使用「雷射」。要想能在單位時間內產生多發雷射脈衝，而且收到返回訊號，雷射產生器須穩定。而由空中量測數百到數千公尺的距離，需要能產生足夠能量強度的雷射脈衝。在這一些條件下，Nd:YAG 雷射產生器成為一項適當選擇。Nd:YAG 所產生之雷射波長是 1064 奈米，屬於近紅外光波長範圍。但是近紅外光波對水之穿透性相當低，藍綠光之穿透性相對上高許多。因此，解決方案是以 Nd:YAG 為雷射產生器，經倍頻後產生波長是 532 奈米，屬於綠光波段，故選擇以綠光雷射進行水深測量。雖然透射之程度不若藍光，但是較其他波長為佳，是綜合性考量之較佳選擇。

綠光水面頻道中之反向散射(Back Scatter)中，由於在水體與空氣界面之反向散射訊號，與水體中體散射(Volumetric Scattering)訊號相互疊置，故而無法對水面作高精度之定義，如圖 1 所示。因此，綠光水面頻道所提供之水面資訊不適用於高精度之量測。相對上紅外頻道無此一缺點，因為紅外光之體散射僅限於距離水表極短之部分，在水深測量應用中，可視為精確定義水面。基於此一考量，有部分系統除使用 532 奈米雷射外，亦使用 1064 奈米雷射。因此，出射波有兩種波長：1064 nm 及 532nm。前者之回訊用於水面之偵測，用以確定雷射到達水面之時間；後者之回訊用於分析水底所在。

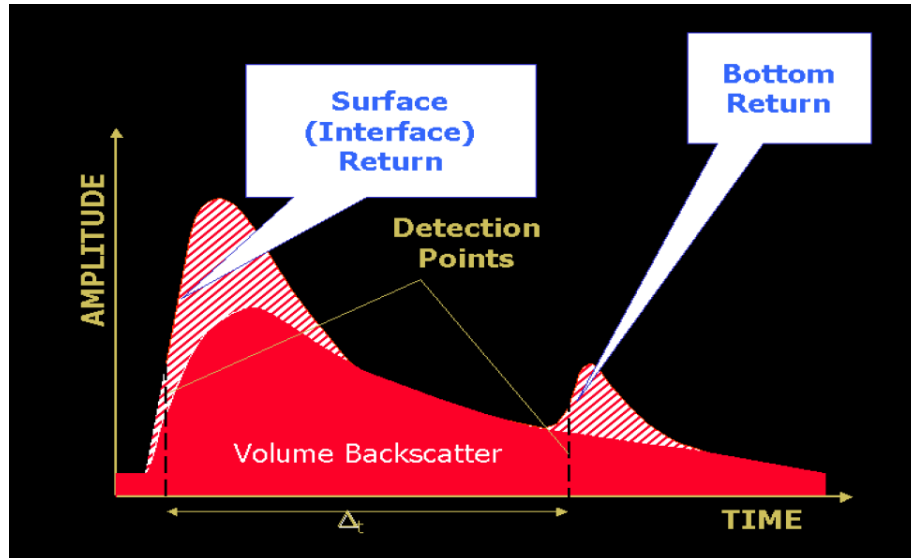


圖 1：綠光回訊(Guenther, et al., 2000)

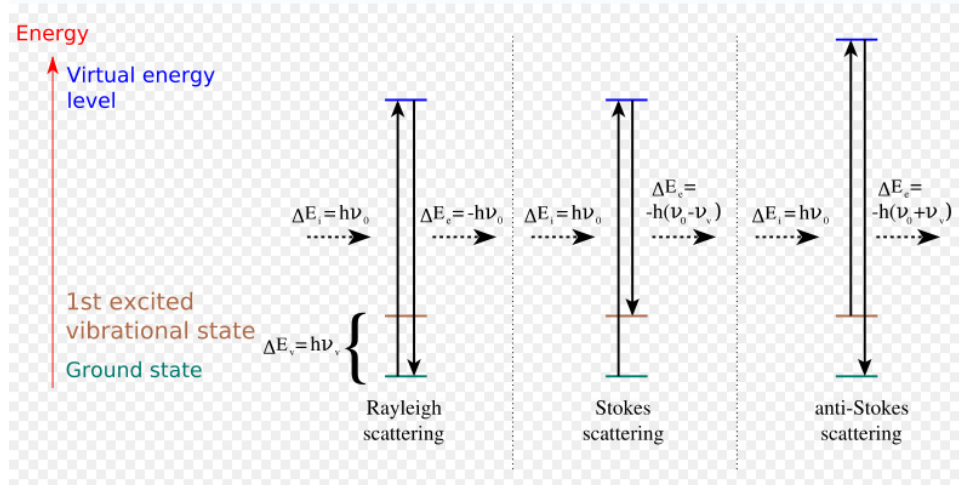


圖 2：拉曼散射(Wikipedia, 2008)

但是紅外訊號受水面狀態影響極大，若水面十分平靜，反向散射之分量甚小，大多之能量由反射方向射出，因而感測不到紅外訊號。而海鳥、浪花、浪沫，亦均會有紅外光反向散射訊號，因此會判釋錯誤，由而產生粗差(Gross Error)。再分析回訊接收之訊號，除出射之 1064 nm 及 532nm 兩種波長外，另有一紅光波段。此一紅光波段之產生來至於水體中氫氧鍵與綠光所發生之非彈性碰撞結果。亦即，入射綠光，但是散射之波長卻為 680nm，為紅光。此一散

射現象，稱為拉曼散射(Raman Scattering)，見圖 2。紅光波段之拉曼散射則具有不受水面狀況影響之優點，因其產生原因為水之氫氧鍵，其產生訊號強度穩定，值域不大，有利於訊號接收。更因為拉曼散射須有足夠之水分子才會產生，而海鳥、浪花、浪沫，或不具有水體之氫氧鍵，或含量過低，不會有拉曼散射訊號。綜合而言，綠光之水面反向散射、紅外光之水面反向散射、綠光之水面拉曼散射，均可提供水面高程資訊。故可以一先後、主從順序之邏輯，

分析水面高程，其順序通常為 RIG 或 I RG，均以綠光為最後考量(Guenther, et al., 1996; LaRocque, et al., 2004)。

水底部分回訊則僅限於綠光。由回訊波形，可辨識出水底之界面訊號，由之可求得水底量測點之三向坐標。同時，由於綠光之反向散射強度受到水之

深淺及水透明度之影響，變化極大，故以不同感測器接收，因此，儀器設計上可以有五個感測器系統，分別為紅外頻道、紅光(Raman)頻道、綠光水面頻道、淺水綠光水底頻道、深水綠光水底頻道。典型之波形如圖 3 所示。

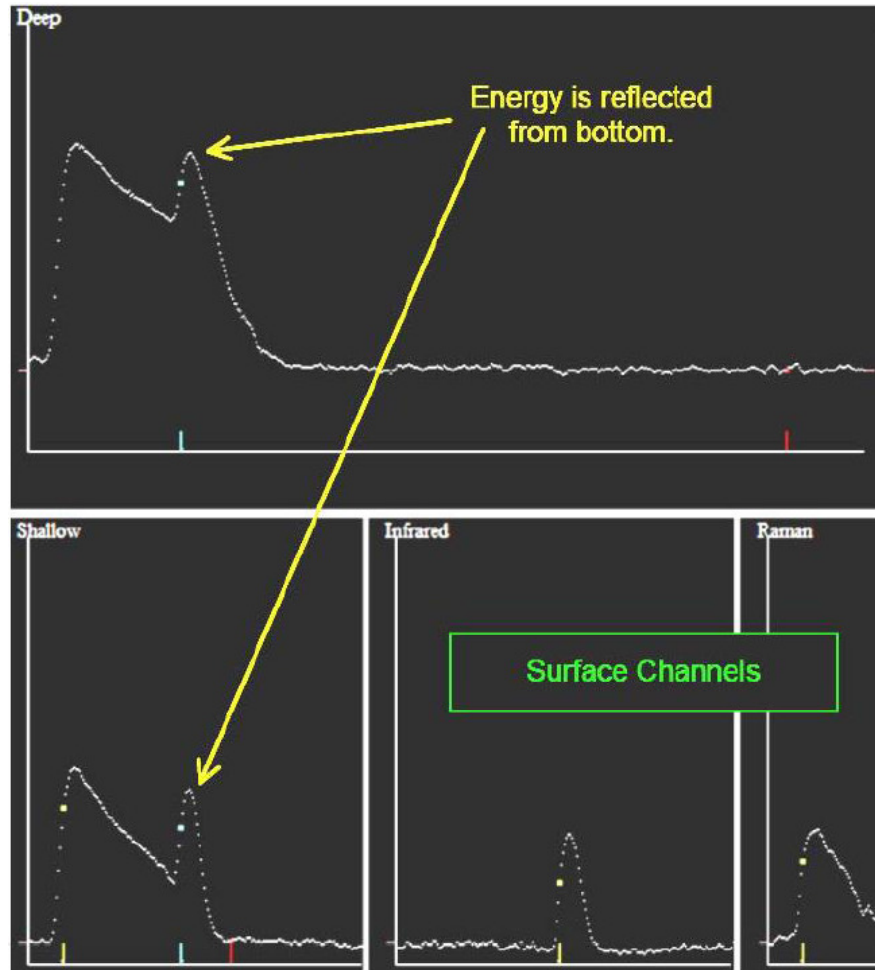


圖 3：波形(Wilson, 2008)

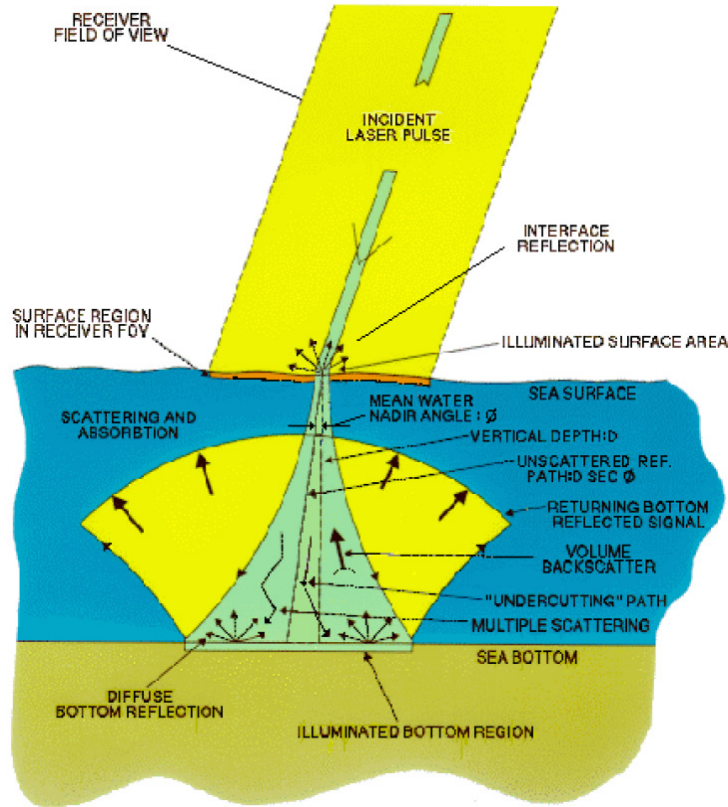


圖 4：綠光回訊因子(Guenther, et al., 2000)

接收頻道愈多，系統愈複雜，價格亦相對增加。而同時，藉由對訊號分析能力之增進，諸如水面狀態等，可以降低對測深成果之影響。因此，並非所有系統均使用綠光、紅光、紅外光。有僅使用綠光、紅光者，亦有僅使用綠光者。

由誤差因子分析，水中之光速與空氣中之光速相差極大，此一部分須由前述水面反向散射資料明確定義，以獲得光速與折射角度之改正。雷射光束之擴散角度甚小，但是進入水體後，擴散角度會增加，故水域越深，其足跡(footprint)面積越大。此一因素，亦對測深光達之平面解析度有所影響與限制。綠光回訊之主要組成，見圖 4。由訊號產生波形，由波形再分析水深，過程十分複雜，Wong et al. (1996)描述一個二維訊號分析之方法。

除雷射測距子系統外，雷射掃描系

統中另一個主要單元為掃描系統。與陸域空載光達不同處，測深光達之掃描機制均十分複雜，以盡可能規律地取樣。所以，測深光達之掃描鏡多配合慣性儀與 GPS，具有三軸補償之能力。也因此，測深光達之掃描頻率將低於陸域空載光達。另因測深光達之雷射回訊，受到水體散射之影響，其足跡較陸域空載光達大許多。因此，藉由對同一發雷射脈衝之回訊，在不同位置之偵測與數化，可以獲得多發之量測波形。

除前所述規律取樣之理由外，測深光達必須確保有適合分析之水底回訊。由於不同入射角度，其反向散射之強度不同，測深光達必須避免過大入射角度，以免無雷射光透射至水底；亦需避免垂直角度，形成水面之鏡面反射，強度過強，且透射比例過低。因此，就測深光達而言，保持某一最適雷射入射

角度，是一項十分重要的條件。這亦需具有三軸補償之能力之掃描鏡，方能達成。當然，海水面並非靜止，亦非平面。雷射光束與海水面間之入射角度，受到各種海水面特性與該時之浪與波之位向影響，此一議題，本文作者仍在蒐尋文獻與探討之中。

圖 5a 為 Optech SHOALS-1000T 之

掃描鏡設計，為採用兩組反射鏡組成，圖 5b 為 Fugro-LADS LADS-Mk II 之掃描鏡影像，採用單反射鏡設計。掃描鏡均為以鈹合金(Beryllium)製作，除其機械設計繁雜外，鏡體材質亦十分重要，除需具有良好反射機能外，亦必須具備輕且堅固、耐熱之特性。

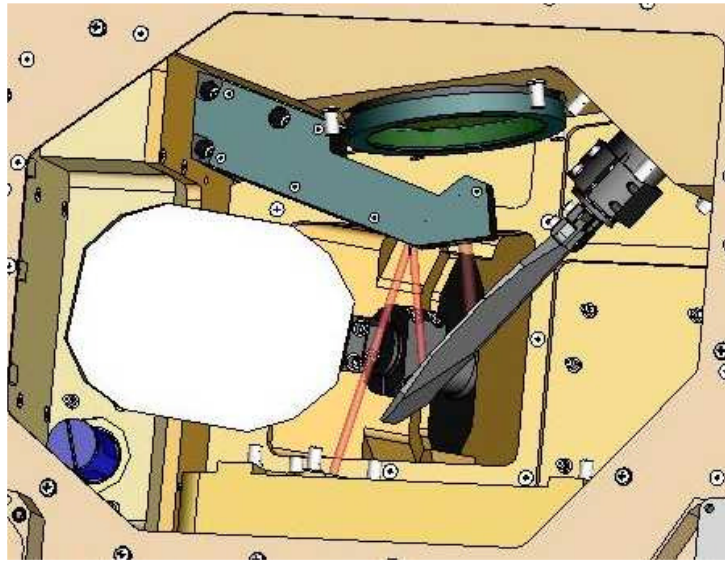


圖 5a：SHOALS 之掃描鏡(Courtesy of Optech)

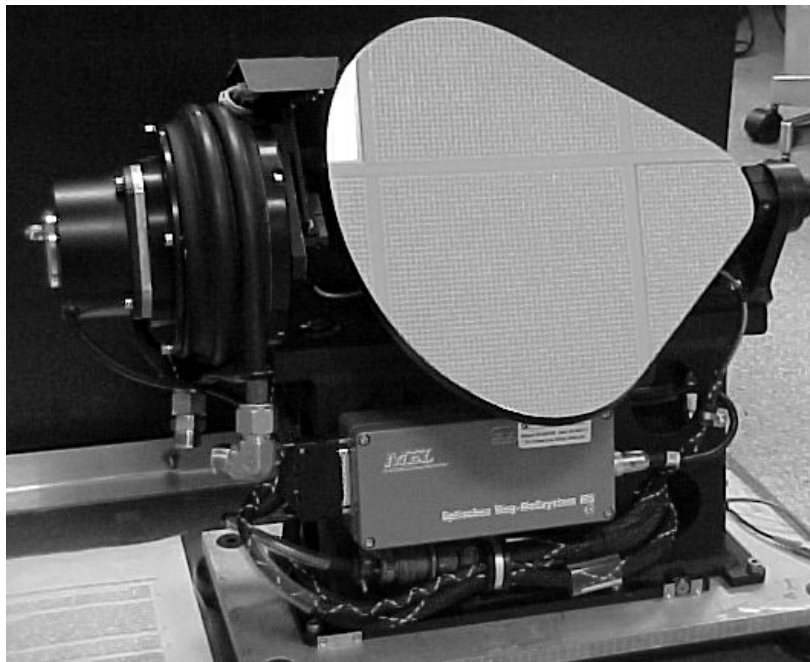


圖 5b：LADS 之掃描鏡 (Courtesy of Fugro-LADS)



圖 5c：Hawkeye-II 之掃描鏡 (Courtesy of AHAB)

三、商業系統

Optech SHOALS

Optech 公司為光達與空載光達發展與製造的主要公司之一，其測深光達之發展歷史長。第一代之 SHOALS 得名於 Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey 各字之第一個字母縮寫，該名稱為美國陸軍工兵署第一代進行測深光達研究之委員會名稱。第一代之 SHOALS 系統由 1994 年進入常

規作業，於 2003 除役，由 SHOALS-1000T 替代。SHOALS-1000T 為 2003 年推出，如圖六所示，其性能可參閱表 1，目前使用者包含日本海岸防衛隊、美國陸軍工兵署(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)、及 Fugro-Pelagos 公司。USACE 所使用之系統稱為 CHARTS，為一特化設計之系統(Wozencraft, 2002)。

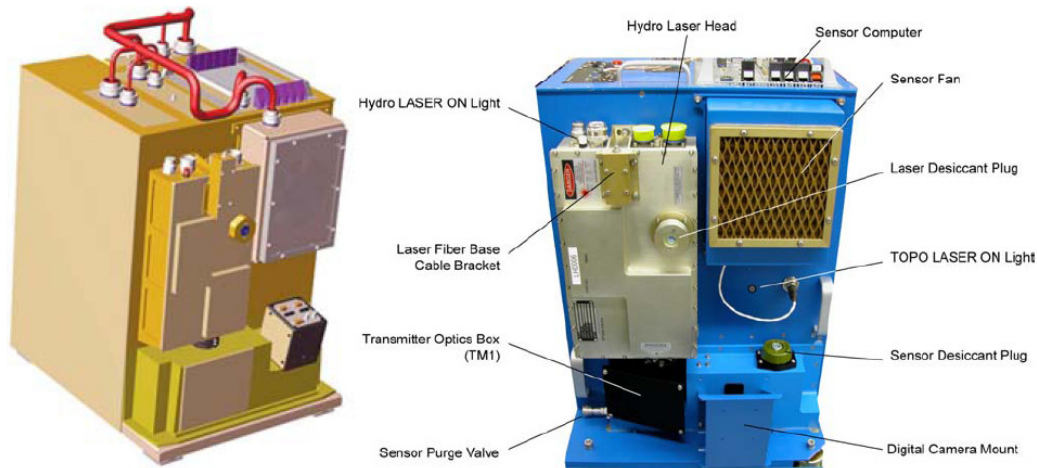


圖 6：SHOALS-1000T 元件設計與相片(LaRocque et al., 2004)

表 1：SHOALS-1000T 性能

	測深(水域)	測高(陸域)
波段	綠光	紅外光
取樣頻率	每秒 1000 次	每秒 10000 次
平面精度	2.5m	2 m
高程(深度)精度	25cm	25 cm

Fugro-LADS LADS 系統

澳洲 Fugro-LADS 是由於澳洲海岸線長，測深之業務需求大，在此一領域發展亦早。目前所使用之系統，為 LA

DS Mk II 系統。LADS 由 Laser Airborne Depth Sounder 之第一字母縮寫而來。



圖 7：Fugro-LADS LAD Mk II 系統(Permission of publication not confirmed)

Airborne Hydrography AB Hawk Eye

瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye II 有綠光與紅外回訊訊號之

接收，但是不採用拉曼散射之頻道。其儀器組裝於飛機上之情況如圖 8 所示。Hawk Eye II 兼具陸域與海域測量功

能，其性能可參閱表 2。作業時對地航高約為 200-500m，航速通常為 150knot，配有數位相機，單一像幅像元數為 40M，航帶寬約為航高之半。可測之最深深度，在波羅底海(Baltic Sea)估計為 15m，北海(North Sea)30m，地中海(Mediterranean Sea)為 40m，墨西哥灣(Gulf)為 50m。

表 2：Hawk Eye II 性能

	測深(水域)	測高(陸域)
波段	綠光	紅外光
取樣頻率	每秒 4000 次	每秒 64000 次
平面精度	1-2m	0.5 m
高程(深度)精度	20cm	15 cm



圖 8：Airborne Hydrography AB Hawk Eye II 系統(Courtesy of AHAB)

四、服務供應商

目前測深光達服務提供者中，美國 Fugro-Pelagos 使用 Optech 之 SHOALS

系統，歐洲 BLOM 與英國的 Pelydryn 則使用瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye II，澳洲 Fugro-LADS 使用自家生產之 LADS Mk II 系統，提供服務業務。因此，三套系統，各至少有

一家提供商業性測繪服務。在 2009 年以前，歐、美、澳之地理關係明確，但從 2009 年起，跨國企業所進行之併購組合，使得地理屬性有了不同意義。

Fugro-Pelagos 公司

Fugro-Pelagos 公司為 Fugro 企業下之一員，從 1992 年，Fugro-Pelagos 公司承接美國陸軍工兵署(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)之合約，操作 Optech SHOALS 200 系統以來，歷經 Optech SHOALS 400 及較小規模之儀器更新，現在操作 Optech SHOALS 1000T，並同時提供 USACE 操作 USACE 版本之 SHOALS 1000T 系統，CHARTS。CHARTS 系統包含一台 1,000-Hz 測深光達、一台 10,000-Hz 之陸域光達、以及一台 1-Hz 的數位相機 (Heslin, et al., 2003)。Fugro-Pelagos 公司所承接之測深案例可於該公司網頁獲得。

<http://www.fugro-pelagos.com/lidar/proj/index.html>。

根據該公司網頁資訊，Fugro-Pelagos 公司在 1994 年三月至 2004 年八月

間，承攬測深案件達 439 件。

Fugro-LADS 公司

如同 Fugro 公司一般，Tenix 是一個大型公司群組，其測深光達業務由 Tenix LADS 公司負責。從 2009 年六月起，Fugro 公司併購了 Tenix LADS，並更名為 Fugro LADS。公司網頁為

<http://www.fugrolads.com/>

該公司所發表之論文包含 Sinclair et al. (2003)，以在美國 Alaska 州所進行之業務為報告對象；Sinclair (2004) 亦針對 Alaska 州所進行之業務，內容較為簡要。Sinclair (2005) 內容為 2004 年在美國 Connecticut 州海岸所進行之測深作業。Tenix 作業對潮位之處理十分看重，因為其主要產出為以潮位為基準之深度。圖 9 為 Sinclair (2005) 中潮位分區與驗潮站分佈圖。該次作業之成果，陸域之測量基準為平均高潮位海面高(MHW, Mean High Waterlevel)，而海域則以海水的平均低低潮位面高(MLLW, Mean Lower Low Waterlevel) 為基準。

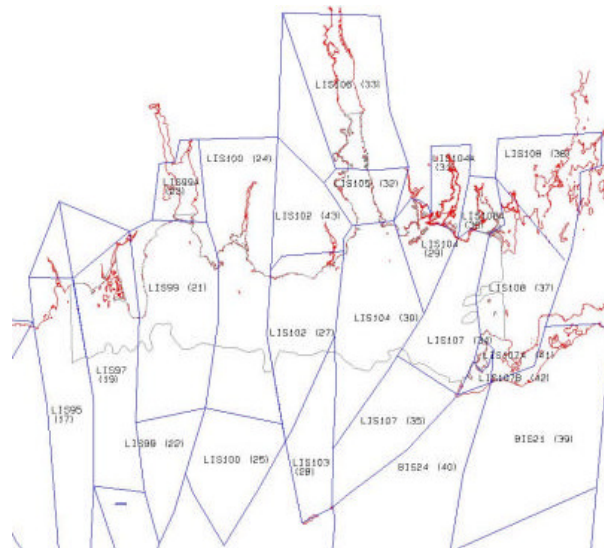


圖 9：Sinclair (2005) 潮位分區與驗潮站分佈

BLOM 公司

BLOM 是歐洲規模最大之航空測量公司，其工作項目包含傳統攝影測量、傾斜攝影測量、雷射掃描等業務，亦為一個大型公司群組。其測深光達業務由 BLOM Geomatics 公司負責。公司網頁為

<http://www.fm-kartta.fi/geomatics/en/products--services/laser-scanning>

BLOM 公司使用瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye II，相對上，BLOM 之測深業務經歷較為晚進，但是作業量成長快速。Danson (2006)提供 BLOM 測深光達系統與作業方式之簡要介紹。

英國 Pelydryn 公司

這是一家於 2009 年新組成公司，其網頁為

<http://www.pelydryn.co.uk/>

Pelydryn 公司為以海測為主體，該

公司為由前任英國國家海測人員 Wyn Williams 博士所成立，操作儀器為亦為瑞典 Airborne Hydrography AB 之 Hawk Eye II。該公司由 2009 年 9 月起開始提供商業性光達測深服務。

五、儀器與分析方法發展

綠光測深光達

美國 EAARL(Experimental Advanced Airborne Research Lidar)綠光測深光達(如圖 10)，為由美國太空總署(NASA, National Aeronautics and Space Administration)所開發，USGS (United States Geological Survey)實際操作中。此一系統之設計，代表一項儀器發展之新思考。因為，EAARL 以測淺水區為目的，而且接收訊號只有綠光波段。系統描述可參考 Brock et al. (2006)、Crane et al. (2002)。

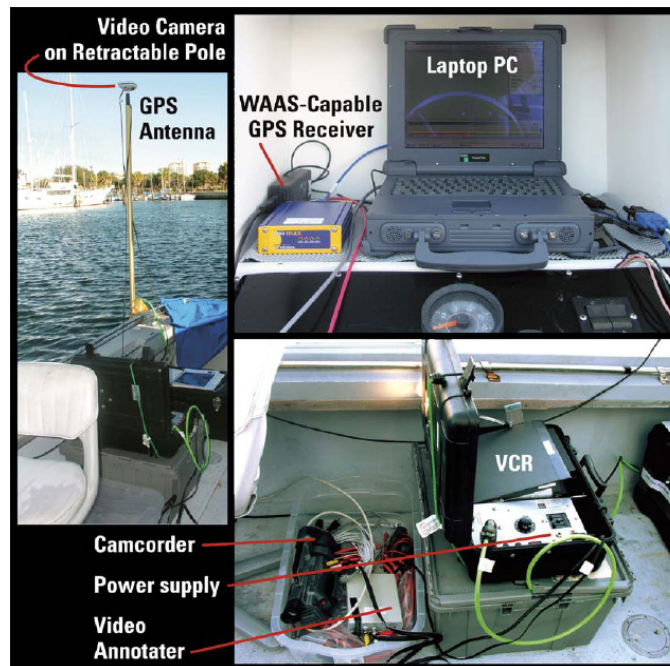


圖 10：EAARL 系統(Brock et al., 2006)

水底底質分析

綠光反向散射所提供之波形，不僅可提供時間之量度，其強度值亦可提供底質之影像。同時，由波形中強度遞減之坡度，亦可估算出漫射衰減係數(Attenuation Coefficient) K 值，近一步改正底質影像。此一影像雖僅單一波段，但是亦可對水底底質之種類提供資訊。Long et al. (2007)以 SHOALS 3000 之雷射訊號進行底質探討，並提出兩個分析模式。

若欲近一步完整分析水底底質，目前之發展為配合空載高光譜儀，同步獲得水深及高光譜影像。由於水域之高光譜影像，其輻射修正極為複雜，需要精確水深資料，故同步獲得之測深光達資料，可有效進行高光譜影像之輻射修正，從而提供底質分類之良好資訊。以不同種類之資訊整合進行分析，稱為數據融合。而同時操作不同之感測器，已獲取同步之不同種類資訊，稱之為感測器融合。Tuell et al. (2005)討論 CHAR TS 作業中整合 CASI 感測器作業之經驗，Wilson et al.(2003)描述結合音波測深設備、測深光達、與數位多光譜相機，之統合性作業。Conger et al. (2006)討論 QuickBird 衛星多光譜影像與 SHOALS 數據整合之分析，以夏威夷區域為試驗區。

淺水訊號分析

空載測深光達所記錄之訊號為全波形(Full Waveform)，需藉由對波形之分析以提取資訊，獲得水底之量測點。在水深小於 1.5m 時，由於訊號之堆疊，解析十分不易。其結果便是無法完成無縫之陸海連結，使得陸域光達與測深光達之量測點間有一無資訊帶。因此，淺

水訊號分析便成為一項急待解決之問題。目前，已有一些解決方案，但是更進一步之研究仍為必須。Pillai & Antoniou (1997)所建議者為一頻率域分析之方法，Pe'eri & Philpot (2007)提出在極淺區域使用紅光波段之方法。

點雲編修

空載測深光達所產製之點雲，如同陸域光達一般，需要經過人工編修，以去除非海底點。目前採用之軟體多為海測編修軟體如 CARIS HIPS，而編修去除之點位，依性質可分為海底植生、雜訊、漂浮物、以及有浪花發生之處。以數據生產過程而言，編修所需人工介入極多，為目前生產流程中之瓶頸。因此，如何發展有效過濾之方法，極有經濟效益。

六、結語

測深光達具有作業快速之優點，其成果與多音束測深系統相較，較差可達三十公分。但是仍有作業之限制，水質之透明度、作業所導致之環境影響、淺水區訊號分析困難等，均為其負面因素。未來與高光譜儀器之結合，似為發展趨勢，預期將可為水域之製圖與調查工作提供更豐富之資訊。

七、參考文獻

1. Brock, John C., C. Wayne Wright, Ilsa B. Kuffner, Raquel Hernandez, Philip Thompson, 2006. Airborne lidar sensing of massive stony coral colonies on patch reefs in the northern Florida reef tract, Remote Sensing of Environment, 104(2006):31-62.
2. Conger, Christopher L., Eric J. Hochberg, Charles H. Fletcher, III, and Marlin J. Atkinson, 2006. Decorrelating Re

- remote Sensing Color Bands From Bathymetry in Optically Shallow Waters, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6):1655-1660.
3. Crane, Michael, Tonya Clayton, Ellen Raabe, Jason Stoker, Larry Handley, Gerald Bawden, Karen Morgan, Vivian Queija, 2002. Report of the U.S. Geological Survey Lidar Workshop, Sponsored by the Land Remote Sensing Program and held in St. Petersburg, FL, November 2002, OF 2004-1456, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
 4. Danson, Edwin, 2006. Understanding LiDAR Bathymetry for Shallow Waters and Coastal Mapping, https://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts19/ts19_05_dans_on_0730.pdf, last accessed at 2008/9/1.
 5. Davis, P. A., F. M. Gonzales, K. M. Brown, T. S. Melis, 2005. Evaluation of the SHOALS 1000T Bathymetric LIDAR System for Monitoring Channel Sediment Within the Colorado River in Arizona, *Eos Trans. AGU* 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract H31E-1350
 6. Guenther, Gary C., Robert W. L. Thomas and Paul E. LaRocque, 1996. Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System, *Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice*, V.I. Feigels, Y.I. Kopilevich, Editors, Proc. SPIE, Vol. 2964, 54-71, 1996.
 7. Guenther, Gary C., A. Grant Cunningham, Paul E. LaRocque and David J. Reid, 2000. Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry, *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR*, Dresden/FRG, June 16 – 17, 2000.
 8. Heslin, James B., W. Jeff Lillycrop, R. W. Pope, 2003. CHARTS: an Evolution in Airborne Lidar Hydrography, http://www.thsoa.org/hy03/5_2.pdf, last accessed on 2008/09/01.
 9. LaRocque, Paul E., John R. Banic, and A. Grant Cunningham, 2004. Design description and field testing of the SHOALS-1000T airborne bathymeter, *SPIE conference*, Orlando Florida, April 13 -15, 2004.
 10. Long, B., A. Cottin, A. Collin, 2007. What Optech's bathymetric LiDAR sees underwater, *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007*, 3170 -3173.
 11. Pe'eri, Shachak and William Philpot, 2007. Increasing the Existence of Very Shallow-Water LIDAR Measurements Using the Red-Channel Waveforms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5):1217-1223.
 12. Pillai, S. Radhakrishnan, Andreas Antoniou, 1997. A Frequency-Domain Approach to Shallow-Water Depth Measurement, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3):540-545.
 13. Sinclair, M.J.; Stephenson, D.J.; Barker, R.M., 2003. Alaska Peninsula deployment of laser airborne bathymetric system; *Proceedings of IEEE OCEANS 2003*. 2:770 – 779.
 14. Sinclair, Mark, 2004. Hydrographic Lidar Operations in Alaska, *Sea Technology*, Oct 2004. http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5367/is_200410/ai_n21358498, last accessed at 2008/9/1.
 15. Sinclair, Mark, 2005. Hydrographic Lidar Survey – Experiences From Long Island Sound, http://www.thsoa.org/hy05/07_4.pdf, last time accessed at 2008/9/01.
 16. Tuell, G.H., V. Ramnath, J.Y. Park, V. Feigels, J. Aitken, Y. Kopilevich, 2005.

- Fusion of SHOALS bathymetric lidar and passive spectral data for shallow water rapid environmental assessment, Proceedings of IEEE Oceans 2005 - Europe, 2:1046 – 1051.
17. Wilson, J.C.; B. Gilmour, J. Liebster, 2003. Multi-sensor mapping of nearshore seafloor habitat for San Diego region, Proceedings of IEEE OCEANS 2003. 1:172.
18. Wilson, Jerry C., 2008. Using Airborne Hydrographic LiDAR to Support Mapping of California's Waters, Proceedings of IEEE OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 8-11 April 2008, 1 – 8.
19. Wikipedia, 2008. Raman Scattering, http://en.wikipedia.org/wiki/Raman_scattering, last accessed at 2008/8/29.
20. Wong, Henry C., and Andreas Antoniou, 1996. Two-Dimensional Signal Processing Techniques for Airborne Laser Bathymetry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34(1):57-66.
21. Wozencraft, J.M., 2002. Complete coastal mapping with airborne lidar, Proceedings of IEEE Oceans '02 MTS/IEEE, 2:1194 – 1198.