

海底地震觀測平台之研發

Development of the Platform for the Ocean Bottom Earthquake Observation

主管單位：財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心

蕭毓宏¹ 陳柏棋¹ 張家溥¹ 張旭光¹

Hsiao, Yu-Hung Chen, Po-Chi, Jang, Jia-Pu, Chang, Hsu-Kuang

¹財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心

摘要

由於台灣四面環海且位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，地震發生頻繁，約有七成地震發生在海域，對於海洋地震的觀測研究已成為科學家重點項目之一。海底地震儀（Ocean bottom seismometer, OBS），是將地震儀沉降坐落於海床的地震觀測平台，可研究海底地質構造特性或天然氣水合物等資源探勘。長久以來我國所使用的海底地震儀仰賴進口，因此，若想建立密集之長期海底地震觀測站，自主研發海底地震儀已是勢在必行。然而投放儀器於海底需考慮海上作業及深海壓力需求，因此低成本、小型化、易回收、能長期置放於海底的地震儀設計將是最重要的課題。有鑑於此，本計畫針對量測頻寬為 0.05~40Hz、佈放深度為 5000m 的寬頻海底地震儀進行設計開發。

關鍵詞：海底地震、地震監測、海底地震儀

Abstract

Taiwan is located on Circum-Pacific seismic zone, therefore ocean-earthquake observation is become one of definite research. The ocean bottom seismometer is to fling seismometer in the ocean to observe not only the characteristics of geology structure, but also natural resource of hydrate. In addition, nowadays we use ocean bottom seismometer almost import from oversea, it costs quite expensive; that was why we using not frequently. If we would like to make more long-term ocean earthquake observation station or survey more natural resource with limit budget. Developing relevant facility will become critical. However, Ocean bottom seismometer device in maritime operation and ocean requirement is focused on low cost, miniature, recyclable and durable particularly in ocean. Due to those concerns, our OBS development measurement of bandwidth is from 0.05 to 40Hz, depth in 5000m to device.

Keywords : Ocean Bottom Earthquake Observation, Ocean Bottom Seismometer.

一、前言

在天然災害中，地震對人類所產生的影響與衝擊可以說是難以預估的，與其他天然災害現象相比，其主要原因除了地震發生時會對人類的生命與財產安全，帶來嚴重的威脅外，以目前的科技而言，並無法準確地預測何時、何地，會發生多大的地震。因此，為了進一步了解地震生成之原因，世界上大部分陸地區域已經建立了大量的地震觀測站，且透過長期觀測，取得了豐富的地震資料。然而佔全球面積70%及地震主要發生地點的海洋地區卻非常少有長時間的觀測站。因此，建立適合於長期海洋地震觀測的設備，一直是地球科學界的重要目標之一。而在眾多的相關地震觀測設備中，以海底地震儀（Ocean Bottom Seismometer, OBS）更顯的重要，海底地震儀是一種直接把感震器放置在海底的地震觀測系統，在海洋地球物理調查與研究中，既可以用於海洋人工聲源對於地殼剖面的探測，也可以用於對天然地震觀測，其探測與觀測結果可以用於研究海洋地殼地幔的結構與天然地震的地震層析成像。因此，以美、日、德、法等先進國家而言，其發展已有超過20年的歷史，且種類不只一種。

一般以地震儀量測型態或功能而言，主要可區分成：長週期地震儀、短週期地震儀、強震儀、寬頻地震儀四種。其中，短週期地震儀在設計上只接收頻率在1 Hz以上的地震波，所以其所收集資訊大多為海底局部或小地震及餘震等資料，其雖有助於了解局部海底地震帶的細微構造，但若要研究海底地震對板塊的影響或遠距離地震，就必須靠寬頻地震儀來補足。以我國而言，由於四面環海且位處環太平洋地震帶上，對於海洋地震的觀測已成為研究地球科學學者的重點項目之一。但是長期以來所使用的海底地震儀均仰賴進口，由於造價昂貴（每套造價60萬到數百萬不等），所以數量不多。在開發及引進相關海底地震儀方面，海洋大學在1990年曾自德州大學奧斯汀分校引進6部短週期海底地震儀，為我國最早之海底地震觀測設備，其雖具有3軸向速度型感震器與水聽器，但此型地震儀由於儲存裝置的限制，最長記錄時間僅有30小時，並不適合用來觀測天然地震。因此，自2005年開始海洋大學從法國海洋探勘研究中心(IFREMER)引進輕巧型短週期海底地震儀(MicroOBS)，而此型地震儀亦具備有3軸向感震器及水聽計，其儲存裝置為4GB，且整體耗電量為0.7W，可連續紀錄15天。但其所採用的感震器基頻為4.5Hz，其感測頻率仍然偏高，因此並無法收集到較遠之地震資料。然而在寬頻海底地震儀使用上，中研院地科所曾於2005年與美國木洞海洋研究院(WHOI)進行合作，引進四組寬頻海底地震儀，且於2006年開始部署於東部海岸。此外，本中心於2009年由德國KUM公司引進3部寬頻地震儀並於同年5月於東南海域開始收集地震資料。整合上述所引進之地震儀可以發現，短週期地震儀由於缺乏感震器平衡裝置，容易造成所量測到地震之水平訊號與垂直訊號相互干擾，進而使所收集到的地震訊號處理困難，且因電源供應及儲存裝置限制，佈放期限無法達數月或一年之久。然而寬頻地震儀雖較靈敏，但測點附近有較大之地震發生時則容易使訊號失真。除此之外，由於海底地形及環境的高度不確定性，長期佈放容易增加海底地震儀回收風險。因此，依據上述之問題點及海上作業與深海壓力需求，寬頻、低成本、小型化、易回收、能長期置放於海底的地震儀設計將是地球科學研究者最殷切期盼的。因此，若想在有限經費下建立較密集之海底地震長期觀測

站，則相關設備之開發已是勢在必行。

綜觀上述，本計畫希望藉由建立海底地震儀系統，整合國內相關的儀器設計、製作、研發等技術，根植台灣自行研發海底地震觀測儀器的能力。

二、海底地震儀設計

海底地震儀長期佈放在海底，因此設計時必須要滿足下列要求：（1）要保證海底地震儀與海床有良好接觸，同時要使感震器直接接觸海床，以避免地震訊號傳遞因結構物阻隔而失真。（2）海底地震儀需具高度靈敏度；感震器架設在平衡機構上，因此除了考慮機械結構的共振因素，在訊號解析度上必須加以提高。（3）要確保海底地震儀系統之穩定性與耗能；因海底地震儀在海底獨立運作，當系統發生故障時無法由人為加以排除，因此系統穩定性在設計時為最重要的需求。此外，系統亦朝向低功耗方向加以設計，以延長觀測時間。（4）海底地震儀必須要有可靠的回收裝置；水下觀測儀器大多在回收後才能取得資料，能否順利回收是重要關鍵之一，因此海底地震儀必須要有釋放機構及海面搜尋輔助裝置等以提高回收率。（5）海底地震儀必須要減少體積及重量；由於海上作業的特殊性，海底地震儀在設計時必須要儘量減少其體積與重量，除方便佈放及回收外，過大的體積與重量會因為海底壓力因素使結構件設計更為困難。

在考慮其操作特性及觀測範圍及目標需求後，海底地震儀之設計目標如下所示。

Weight	in air	in water	Dimensions	
YardBird OBS	114kg	-16kg	With anchor	220cm X 68cm X 95cm
YardBird OBS + Ancher	172kg	42kg	Without anchor	220cm X 68cm X 90cm
Sensors	Geophone	Hydrophone	Datalogger	
Configuration	3 Axis	1 Channel	Seismic Channel	4
Frequency	4s~40Hz/20s~40Hz		A/D Converter	24 bits
Sensitivity	400 V/m/s		Voltage Range	±3V
Memory	32GB SDHC		Sampling frequency	100Hz
Batteries (for 1 year)			Synchronization interface	Seascan time base
Lithium	3.6V/19Ah x 45 pcs		Accessories	
Alkaline	D-Type x 22 pcs		Radio beacan	
Operating depth	2000m / 5000m		Flash beacan	

圖1、海底地震儀設計規格

2.1 感震器設計

為達到0.05Hz~40Hz設計目標，採用由中研院地球所開發之感震器，其採用I/O Sensor所生產的SM-6 速度型地震感測器為拾震裝置，但由於其基頻為4.5Hz，對於寬頻地震儀所強調的低頻特性並無法滿足。因此利用射極隨藕（Emitter Couple）及迴授（Feedback）電路和感震器本身的電磁阻尼特性，達到力平衡的伺服效果，再利用非線性放大器來加強長週期信號的放大倍率來增加低頻（長週期）的感測能力，把Geophone原本在4.5Hz頻帶以下極小的感測輸出信號提升為長週期（Wide band）速度式感震器。此種設計的優點是用低成本的Geophone來取代高價位的寬頻地震儀(Broadband

seismometer)，其缺點是儀器的頻率響應曲線並非線性，因此在前處理時需對儀器進行校正。

2.2 平衡機構設計

因海底地震儀之感震器與海床之接觸面需為平行，因感震器採XYZ三軸相互垂直排列，當海底地震儀著陸海床時，感震器亦要能被驅動改變姿態，才能獲得較為乾淨之水平分量之地震波(如S波)。傳統的平衡機構是以平衡環概念搭配煞車裝置來達到感震器水平，但其利用重力達到平衡的方式所要求的加工精度較高，長久運作後重力會被機構結合的摩擦力耗損以至於精度無法達到理想範圍。

新型的被動式平衡機構利用馬達驅動平衡載台(圖2)，並在載台上加裝水平感應器，此水平載台設計在感震器擺放任何角度之下皆能將感震器調整回水平位置。被動式平衡機構由齒輪傳動，利用齒輪與馬達鎖住平衡載台進而簡化平衡步驟。被動式平衡機構特點在於其沉充性與泛用性可程式化依照需求調整水平角度外，更可以搭載其他設備來進行實驗或校正，不會因為搭載多於零件改變重心而對於平衡造成不良影響。

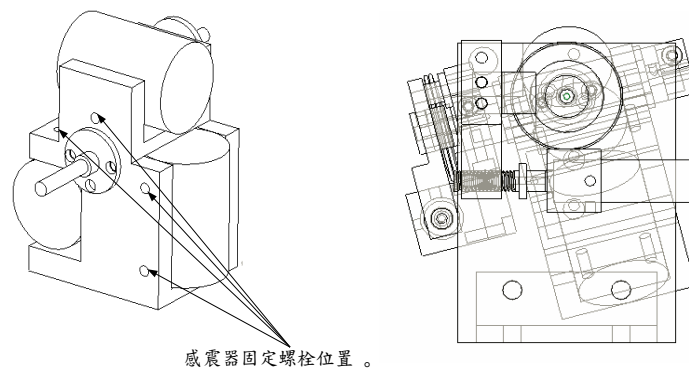


圖2、平衡機構與感震元件機構設計

2.3 記錄器與人機介面設計

對於需長期於海底佈放之儀器裝置，其最重要的部分來自於能量的供需。因監測裝置無法藉由外部纜線獲得能量，系統於設計時便須考慮到其功耗率。因此我們採用Texas Instruments所生產之低功耗單晶片MSP430F169為系統主控IC，透過其UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)傳輸模式讓使用者能透過PC來對記錄器執行GPS時間校正與資料擷取之功能。搭配低功耗A/D轉換晶片ADS1222來獲取高解析度之地震資料，最後再以SPI(Serial Peripheral Interface)傳輸模式將地震資料寫入SD記憶卡內部，系統架構如圖3所示。因為記錄器需長期記錄資料，且水下並無GPS時間可供校時，為了確保記錄器時間能於低溫之環境下穩定且精準，因此記錄器所選用的計時來源為Seascan的SISMTB Ver4.1時基電路模組。

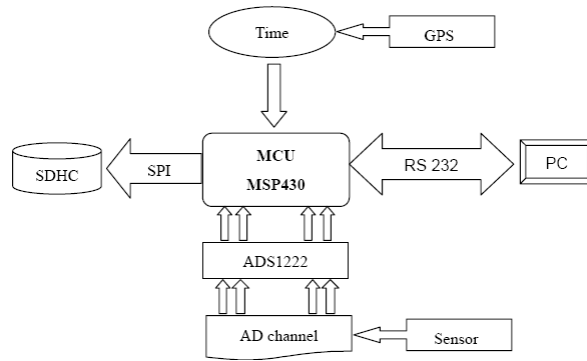


圖3、記錄器架構圖

地震觀測資料每秒約120筆，當三個波到同時記錄其資料容量每日約120MByte，若不將資料進行空間壓縮，則以目前市面上最大容量之FAT32格式SD記憶卡支援到32GByte，只能提供連續記錄約8個月。如需長期記錄地震資料則勢必要對資料進行壓縮，以資料連續之觀念來看，由於我們的地震資料短時間內(1/120S)震幅變化並不大，因此提出一簡單壓縮方法，每區段時間內只記錄第一筆地震資料，並以RAW形式寫入，後續資料則只記錄有變化的bits位元組，如圖4所示。變化的位元組資訊與值會被記錄下來，使用該方式壓縮資料好處在於不需要額外的資料暫存區，壓縮率最高可達40%。

所儲存於SD卡內之數位資料為二進制之格式如圖4所示，圖中0~7byte代表資料時間，其後每4個byte為一筆資料，若以每軸(XYZ)120Hz之採樣率則每日約使用掉120MB資料空間。透過格式轉換將原本二進制檔轉成MiniSEED (Mini Standard for the Exchange of Earthquake Data)，除可減少資料儲存空間外，亦能方便地震學者使用。

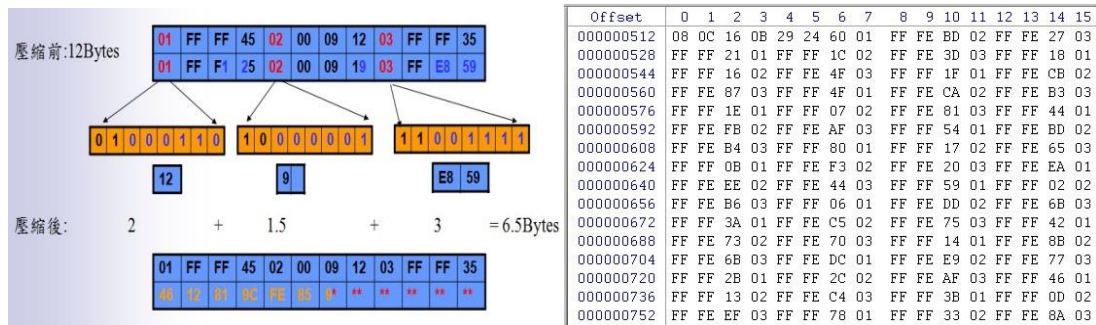


圖4、資料壓縮方式與RAW資料

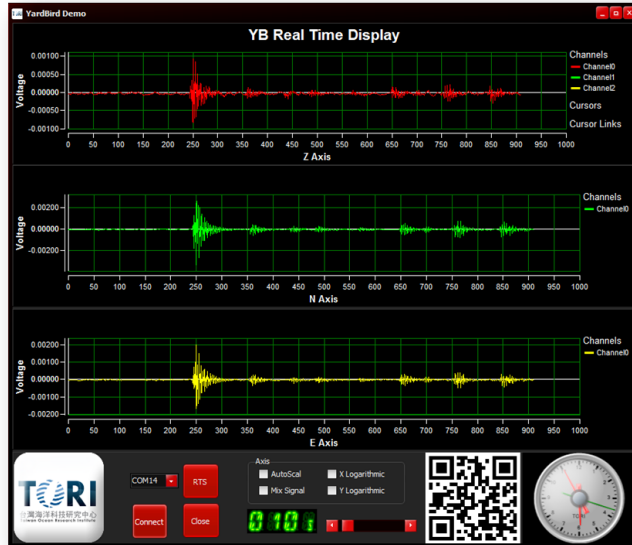


圖5、使用者人機介面



圖6、海底地震儀實體

三、實海域測試

對於臺灣東部具海洋研究價值之海域，其水深幾乎皆在5000公尺以深。為克服此嚴苛之環境因素，101年完成5000米深海水密關鍵技術研發，提升現有海底地震儀作業深度。海底地震儀耐壓艙體由鋁合金更改為鈦合金，其重量輕、強度高、抗壓性、耐腐蝕等特性可使殼體在深海環境更加耐用可靠。由於重量及浮力的改變，3月份於小琉球海域重新進行5000米海底地震儀水下位態與配重測試。在20米水深海域處派遣潛水人員拍攝海底地震儀下沉姿態，並且經實驗量測海底地震儀下沉速度每秒約1.1公尺，上浮速度每秒為0.7公尺。

在往年計畫執行成果裡，2000米海底地震儀的發展已經進入量產階段，並長期提供技術服務支援中研院地球所在台灣周圍進行相關海底地震研究，如圖7所示。在7月份回收100年於台灣東北外海沖繩海槽所佈放之海底地震儀，共計11台。佈放點位如圖8所

示，其中包含了6台寬頻海底地震儀(Lobster)以及5台Yardbird 2K海底地震儀。圖9為其中一台海底地震儀所收到的地震訊號波形，這些資料將能夠提供地震專家學者作後續海底地震相關研究。9月份亦於台東外海佈放12組海底地震儀，佈放地點如圖8，其中包括3組寬頻海底地震儀(Lobster)以及9組YardBird 5K海底地震儀，預計102年7月份回收。此行除支援中研院地球所收集海底地震資料外，亦為5000米深海水密技術的長期驗證實驗。



圖 7、海上作業—海底地震儀佈放及回收

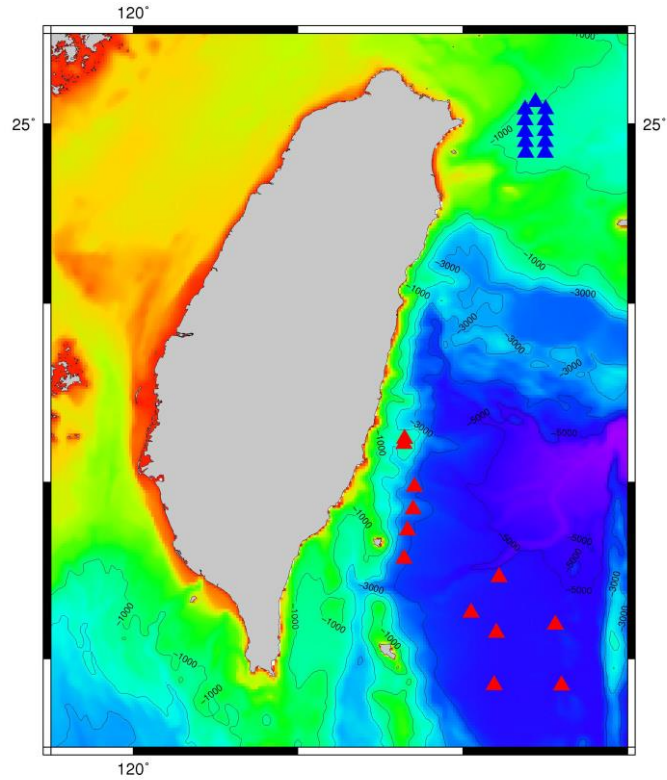


圖 8、回收 100 年於沖繩海槽之海底地震儀點位(藍色)
101 年於台東外海佈放海底地震儀點位(紅色)

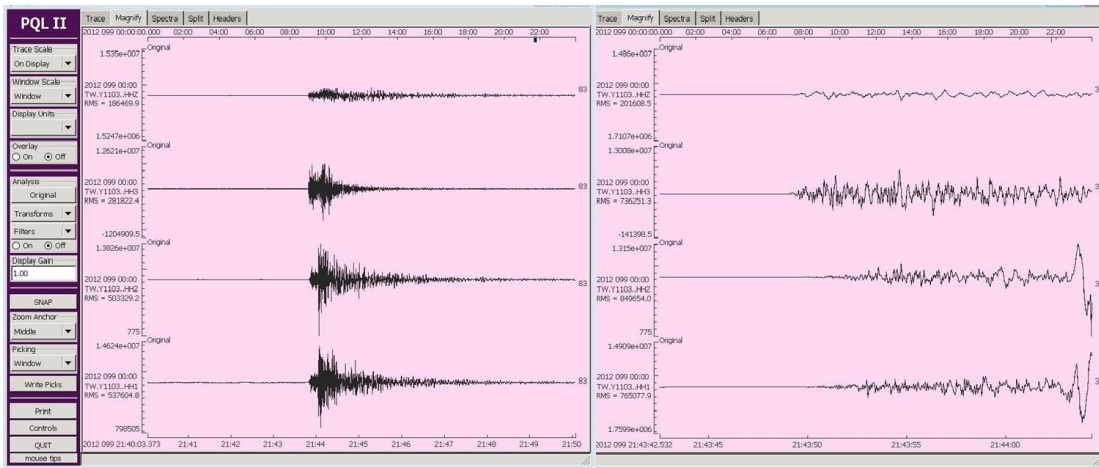


圖 9、海底地震儀所記錄之地震訊號

日期 101 年 4 月 9 日 5 點 43 分；北緯 24.04 度，東經 122.36 度；

芮氏規模：5.7；深度：29.2km

四、結論與建議

台灣四面環海且位於環太平洋地震帶，但長期缺乏自製海洋地震觀測設備，因此，建立長期海洋地震觀測設備一直是研究地球科學學者所期盼。本計畫整合國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心、中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所與中央研究院地球科學研究所組成海底地震儀研發團隊，針對海底地震儀進行設計與研發。其主要成果如下：

1. 完成佈放時間9個月、量測頻率範圍20sec~40Hz(需經儀器校正)及佈放深度5000m 之海底地震儀。
2. 完成傾角調整範圍 ± 45 度及最小調整角度 ± 2 度之感震器平衡機構。
3. 完成佈放深度5000m之水密艙體。
4. 完成數位解析度20bit、3通道、時間誤差小於3 秒/年及耗電量小於0.3W之記錄器。
5. 在感震器頻率響應分析上，感震器平衡機構系統高頻截止頻率為26.3Hz及系統共振頻率為33.7Hz，其兩樣結果均能滿足地震觀測儀器之需求。
6. 完成地震數據分析之相關人機介面。

歷經三年時間所共同研發之海底地震儀，經過多次實海域實驗，包括耐壓水密艙體與系統穩定測試，往後將持續以改良海底地震儀為目標，包含：提升感震器的頻率響應範圍以量測更低頻的地震訊號；提升紀錄器的動態量測範圍避免地震過大訊號飽和的問題；提升紀錄器的類比數位取樣解析度以量測更精準的地震訊號；設計能裝載商用感測器的平衡機構。

謝誌

感謝海底地震儀研發團隊—中央研究院地球所郭本垣研究員，以及中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所王兆璋教授、陳信宏副教授所做的貢獻。

參考文獻

1. 李昭興(1994)，「海底地震儀在地震監測的應用」，海洋技術季刊，Vol. 13，No.4，第8-11頁。
2. 林慶仁(2009)，「台灣東部海域地震觀測研究暨儀器研發」，博士論文，國立中央大學地球物理研究所。
3. 陳松春、王詠絢(2007)，「天然器水合物探勘技術」，科學發展，412期，第26-31頁。
4. Chen, C-H. and Lin, S.B. (2002) Eruptions younger than 20Ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Sungshan Formation in Taipei Basin. *Western Pacific Earth Sciences*, 2, pp.191-204.
5. Kuo Ban-Yuan, (2010) “Yardbird : a short-period ocean-bottom seismometer developed by IES-AS, IUT-Natl Sun Yat-sun U, and TORI-Natl Applied Res Labs”, 2009 annual

Congress of Chinese Geophysical and Geological Society of Taiwan, Taipei, Taiwan, 29 Apr. ~ 30 Apr. 2010.

6. Dorman L. M., (2003) "Seismology Sensors", Encyclopedia of Ocean Sciences, pp. 2737-2744.
7. Webb Spahr C., Deaton Thomas K., and Lemire Jacques C., (2001) "A Broadband Ocean-Bottom Seismometer System Based on a 1-Hz Natural Period Geophone", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91, No. 2, pp. 304–312.
8. L. M. Dorman, (2003) "Seismology Sensors" ,Encyclopedia of Ocean Sciences, pp.2737-2744.
9. Spahr C. Webb, Thomas K. Deaton, and Jacques C. Lemire, (2001) "A Broadband Ocean-Bottom Seismometer System Based on a 1-Hz Natural Period Geophone" , Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91, No. 2, pp. 304–312.
10. F. T. Thwaites, F. B. Wooding, J. D. Ware, K. R. Peal and J. A. Collins, (2005) "A Leveling System for an Ocean-Bottom Seismometer", OCEANS,. Proceedings of MTS/IEEE, pp.1268-1272.
11. http://www.kum-kiel.de/frameset_eng.htm
12. http://www.ifremer.fr/drogm_uk/Realisation/Vulgar/OBS/obs.html
13. <http://www.geophone.com/Category.asp?CatID=2&SubCatID=11>
14. <http://www.vti.fi/en/products/inclinometers>
15. <http://www.guralp.com/support/manuals/pdf/1OBS.pdf>