

卡爾曼濾波應用於潮位實測數據分析 之初步研究

吳立中¹ 滕春慈² 林燕璋³

¹ 國立成功大學近海水文中心副研究員

² 中央氣象局海象測報中心主任

³ 中央氣象局海象測報中心副主任

摘要

潮汐是海洋環境的重要現象之一，其水體運動主要是受天體引力影響，因而產生一定規律的漲落變化。臺灣早在日據時代就已有進行岸邊潮位的監測。時至今日，環臺已有超過 20 座岸邊潮位觀測站。潮位觀測也從早期的類比紀錄演進至現今的高精度數位觀測技術。然而潮位站設置於野外，平常無專人看管，自然外力或是人為影響作業化潮位觀測的情形在所難免，進而可能造成潮位站觀測所得資料偶有異常之情形。資料品質為確保潮位觀測資料品質之重要關鍵。本研究嘗試引入卡爾曼濾波器(Kalman Filter)作為解析潮位觀測數據的方法，並透過初步之檢討發現，該法有助於抑制實測潮位資料的高頻擾動以及可即時檢測潮位資料所可能發生的基準異常現象。

關鍵詞：卡爾曼濾波、卡爾曼平滑、潮位資料

Preliminary Study on the Tide Data Analysis Using Kalman Filter

Li-Chung Wu* Chuen Teyr Terng Yen-Chang Lin

* Associate Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Coastal tide gauges have provided data on the sea level which are necessary for coastal flood warning and engineering. Data quality check procedures are necessary to ensure the accuracy of tide measurement. This paper presents the preliminary study of tide data quality check and data analysis using Kalman filter and Kalman smoother. The results show that the Kalman methods are capable of real-time tide data quality check and reduction of high frequency noises.

Keywords: Kalman Filter; Kalman Smoother; Tide Data

一、前言

根據聯合國的統計，全球約有 75% 的人口集中於近海或是臨海區域(Reeve et al., 2004)。長期以來，隨著人類大量從事海上或岸邊之相關活動，潮汐資訊已成為吾人生存發展的重要憑藉。舉凡海象研究、海洋生態管理、海岸工程規劃、漁撈及養殖、

劇烈天氣災防等海域活動，都有必要掌握此一海水長週期漲落之特徵。

針對潮汐現象的科學研究，科學家在很久以前就已注意到海水位有其規律之漲落變化。到了牛頓提出萬有引力定律時，則開始有系統地透過數學方法解析潮汐現象(Boon, 2004)，並解釋造成潮汐現象的基礎力量，透過了萬有引力定律計算出由太陽和月球吸引造成的潮汐。Pierre-Simon Laplace 則進一

步導入了流體動力學理論，將潮汐視為引潮力作用下所引起的強迫振動，進而建立起潮汐動力學方程。後續在許多科學家的持續努力之下，描述潮汐現象的數學理論漸趨成熟，開始有學者透過電腦數值模擬的技術來研究潮汐現象。潮汐數值模式能夠模擬出不同海域的半日潮、全日潮以及更低頻的長週期天文潮等潮汐現象，有助於不同海域之潮位預測。目前常見的全球潮汐模式、POM 以及 ROMS 等數值模式都目前學界或是業界所廣為使用的海洋數值模式(Kantha, 1995；葉，2002；馮，2006)。

然而針對潮汐現象的研究，無論是透過觀察歸納、理論推導或是數值模式等方式來進行，最終目標還是希望能實際應用到現場海岸環境當中。相較於數值模擬，現場觀測則直接紀錄了大自然現象的真實變化。此外，為能更準確模擬出局部小尺度海域的潮汐特徵，潮汐之數值模擬通常也需要現場的潮位資料進行數值模擬結果的校驗。

除了潮汐特徵之記錄外，岸邊潮位站長期間作業觀測資料中也常記錄到一些特殊的海水位波動現象。例如颱風期間所產生之暴潮、海底地震所形成的海嘯波等，也都有可能產生相對較潮汐波動高頻的震盪現象。也因此，潮位站觀測資料往往也是岸邊的水災害預警以及防治工作的重要依據。

臺灣早在日據時代開始就已有進行岸邊海水位的監測，藉以確認潮汐的漲落，並作為船隻進出港的依據。後期在政府跨部會的努力之下，在臺灣環島建置了超過 20 座岸邊潮位觀測站。如圖 1 所示，為中央氣象局於臺灣環島所建置之潮位觀測站。其潮位觀測之頻率已達每秒鐘就紀錄 1 筆原始水位觀測資料。如圖 2 所示，為中央氣象局成功潮位站時序序列，其資料長度為 12 小時。從圖中可發現資料中除了可看到低頻的潮汐變化特徵之外，還包含有許多的高頻擾動。這樣的高頻擾動現象從圖 3 相對較短期的時序序列可更明顯被發現。造成這些高頻擾動訊號的原因有可能是因為港內風浪或是港池震盪所造成之影響。再加上潮位觀測站設置於岸邊，平日必須承受自然環境的風吹、日曬、雨淋、溫差、鹽蝕等影響。此外，岸邊也曾發生過人為或船艦撞擊潮位觀測設備，進而造成潮位站觀測所得資料異常之情形。如音波式或壓力式儀器不穩定或故障，造成資料異常。也有可能發生測站設置於潮間帶或受

泥沙淤積影響，造成測值無法呈現潮型特徵。有鑑於此，資料品質為觀測資料品質之重要關鍵，考量引用錯誤資料的危險比沒有資料更為嚴重。作業化海象觀測資料都須經過一套品質控管之流程來維護品質。

一般而言，潮汐資料品質可透過資料時序序列的連續性與合理性等進行之。本研究則嘗試引入卡爾曼濾波器(Kalman Filter)作為解析潮位觀測數據的方法。卡爾曼濾波器應用於解析潮汐資料的優點在於僅需要輸入當前時刻的潮位測量結果與前一時刻的估計值就能估算出當前時刻的潮汐特徵。本文後續章節將針對我國現有潮位觀測技術、本文之研究方法以及分析結果等內容進行說明與討論。



圖 1 中央氣象局環島潮位站分布 (底圖來源：GoogleEarth)

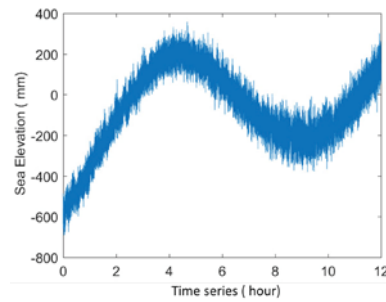


圖 2 成功潮位站時序序列(資料長度 12 小時)

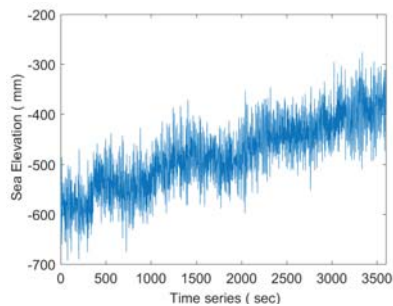


圖 3 成功潮位站短期之時序序列(資料長度 1 小時)

二、現有潮位觀測技術之檢討

為能有效紀錄潮位隨時間之漲落特徵，早在久遠以前人類就已開始記錄潮汐之垂直水位變化。在海洋觀測技術尚未完全成熟之前，早期有些位置點的潮位觀測是採用人工記錄的方式，例如透過測潮桿作為觀測工具。因測潮桿上設有刻度可透過人工目測的方式記錄潮位高度。此法雖然可量化出潮位之特徵，但人力成本花費較高，且於夜間或是光源不足時不易進行觀測紀錄工作。此外，由於早期的潮位觀測儀器缺乏自主之技術，且儀器缺乏定期檢校，量測數據之準確性較無法確切掌握。部份測站也缺乏數據自動傳輸技術，無法在時效內取得潮位資訊，致使在早期國內的海水位量測精度還無法達到國際級之標準，也侷限了相關潮位資料的應用。

隨著海洋環境觀測技術的持續進步，諸如壓力式潮位儀與超音波式潮位儀等設備已具有自動化以及作業化觀測作業之能力。壓力式感測器之作業原理為將感測器放置於水下固定位置，透過量測海面因潮汐漲落所產生之海水壓力變化，再由量測之壓力並依壓力公式或轉換函數轉換成水深。因感測器設置之高程已知，當獲取水深資訊後，水位資訊即可得知。

政府相關部門在十年前與國內學界合作，引進美國最新的海水位自動觀測系統技術。相較於傳統的目視水尺、浮筒式以及壓力式等觀測方式，新型的潮位觀測方式則是透過超音波技術進行量測。此技術之關鍵在於大幅改進超音波測距儀受溫度影響所引起之誤差，因而有效提升了量測精度。依臺灣特有的海洋環境條件進行技術移轉與系統整合等工作，現已建立出本土化的自主觀測技術(圖 4)，將岸邊水位量測的精確度提升到公厘等級。

超音波式潮位儀則透過是在海水面之上方架設超音波發射與接收儀器，儀器發射超音波脈衝接觸水面後，反射回原超音波接受器。由發射與接收訊號之時間差可計算出來回之距離，進而可轉換得知水面之高程。為能移除重力波造成水位波動之影響，潮位觀測站通常會設置靜水井，藉以抑制短週期之高頻擾動(謝，2011)。

新型的觀測技術搭配有通訊設備，系統自動完成量測作業後，隨即可將觀測數據發送至指定位置，以利海岸災害預警之研判以及人員疏散等緊急

因應措施之用。此一潮位觀測設備及技術之開發已達到完全的自主，無須再仰賴國外廠商的技術支援(吳等，2018)。

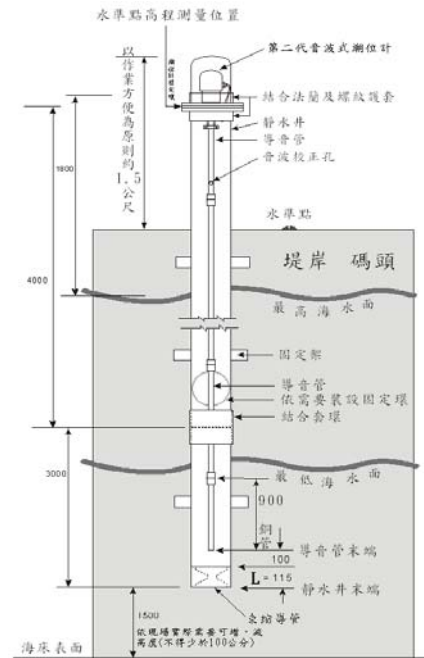


圖 4 潮位站設置技術之說明

三、分析方法討論

本研究嘗試引入卡爾曼濾波器作為解析潮位觀測數據的方法。卡爾曼濾波器為匈牙利數學家卡爾曼所提出之方法(Kalman, 1960)。該法在演算過程中，若取得新的觀測資料，就會結合當時的預報值和觀測資料估算其誤差協方差(Error covariance)，並同時對誤差協方差進行分析和預測。

卡爾曼濾波器主要是由一些數學公式所構成的遞迴演算方法，能有效的評估資料過程中的狀態，並且將誤差降至最低。可針對過去、現在甚至是未來的狀態進行估測。如圖 5 所示，卡爾曼濾波器的演算過程包括了預測與校正兩種階段。針對預測階段，濾波器會使用前一時刻狀態的估計，對當前狀態進行估計。針對校正階段，濾波器則利用對當前時刻狀態的觀測值改進在預測時刻獲得的預測值，藉此獲得一個更準確的估計值。整體資料分析流程簡述如下：

1. 利用 $t-1$ 時刻的資料，加上變化量，預估出 t 時刻的資料。

2. 利用 $t-1$ 時刻的誤差協方差，配合前述所預估 t 時刻的結果，預估出 t 時刻的誤差協方差。
3. 權重值可由前述之步驟(2)中的 t 時刻的誤差協方差與測量誤差協方差，經計算而求得。
4. 利用所預估出的 t 時刻結果與 t 時刻的測量資料，進一步搭配權重值(Kalman Gain)，更新 t 時刻結果。
5. 利用權重值更新 t 時刻的誤差協方差。

整體而言，卡爾曼濾波器假設每一個時刻的雜訊，其彼此之間都互相獨立。只要能掌握前一時刻的估計值與當前時刻的觀測值，儘管觀測數值含有雜訊於其中，仍可透過卡爾曼濾波方法計算出當前狀態的估計值，經過每次的遞迴演算可讓估計值離動態系統狀態更為接近。

由於卡爾曼濾波器主要是由一連串數學公式構成之遞迴演算法，本文將相關數學關係彙整於圖 6。如圖 6 所示，預測階段步驟(1)的數學關係式中， \hat{S}_{t-1} 為前一($t-1$)時刻之潮位； \hat{S}_t^* 則是透過前一時刻潮位 \hat{S}_{t-1} 進一步推估當前時刻(t)之潮位結果； u_{t-1} 為 $t-1$ 時刻對系統的控制量，若無控制量，可設為 0。A 與 B 則為系統參數。預測階段步驟(2)的數學關係式中， P_{t-1} 為 $t-1$ 時刻的誤差協方差；Q 是系統運算過程的誤差協方差(process noise covariance)；上標 T 則代表轉置矩陣； P_t^* 為當前時刻(t)之誤差協方差推估值。

當預測階段完成後，演算流程會進入校正階段。如圖 6 所示，校正階段步驟(1)的數學關係式中， K_t 為當前時刻(t)之權重值； H 為測量系統的參數； R 為測量的誤差協方差(measurement noise covariance)。校正階段步驟(2)中， M_t 為是 t 時刻的潮位實測值。演算至此一階段，系統結果已經更新了，但仍需要更新 t 時刻的誤差協方差，藉此讓演算法就可以一直遞迴下去，對下一($t+1$)時刻的潮位資料進行預測。因此，圖 6 校正階段步驟(3)的數學關係式中， P_t 即為 t 時刻的誤差協方差更新結果。

除前述之卡爾曼濾波方法之外，資料分析還可進一步導入卡爾曼平滑(Kalman Smoother)之分析技術。關於卡爾曼平滑之詳細理論基礎可參考 Yu et al. (2004)。相較於卡爾曼濾波屬於前向遞迴的資料分析技術；卡爾曼平滑則屬於反向遞迴的資料分析技術。

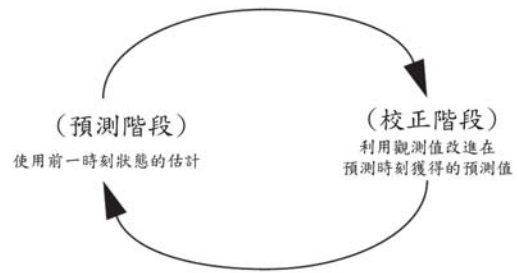


圖 5 卡爾曼濾波的資料遞迴演算之概念

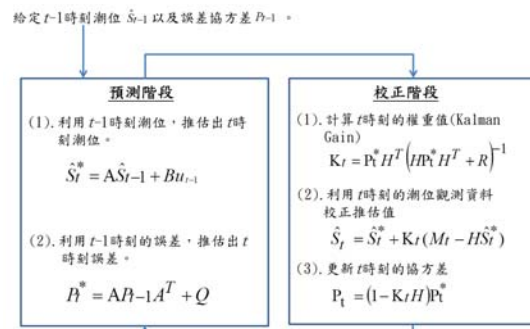


圖 6 卡爾曼濾波的資料分析之數學過程

四、觀測資料分析與討論

本研究針對中央氣象局的成功潮位觀測數據進行分析。如圖 7 所示，為從成功潮位觀測數據所擷取出一段 300 秒的時序列。該潮位站的觀測方式為每秒透過音波式感測器量測一次。從原始潮位資料可發現，雖然潮位站設置有靜水井，但潮位的震盪現象仍難以避免。其高頻震盪之振幅可超過 5 公分。透過卡爾曼濾波針對逐秒資料進行處理，可抑制逐秒潮位資料的震盪現象。儘管如此，卡爾曼濾波對資料震盪的抑制效果仍屬有限。本研究進一步導入卡爾曼平滑的資料分析技術，發現可大幅改善潮位資料的震盪現象，得到相對平滑之結果。

本研究進一步模擬潮位站之基準點突然偏移之情境。這樣的情形可能發生於潮位站維護前後或是外力撞擊所產生的測計位置偏移。如圖 8 所示，為本研究將原始潮位觀測時序列於 1800sec 開始模擬基準點突然發生偏移，造成水位資料隨之偏移之特徵。這樣的潮位觀測數據經卡爾曼濾波與卡爾曼平滑分析之結果則如圖 9 所示。可看出卡爾曼濾波與卡爾曼平滑分析之結果雖然整體趨勢與原始潮位資料相近，但在細部之特徵仍有所差異。

本文進一步將圖 9 之結果進行分析。如圖 10 所示，為原始潮位數據與卡爾曼濾波序列之差值。可看出於時序列的 1800sec 處發生有明顯的差值。從圖 11 的原始潮位數據與卡爾曼平滑序列之差值也可觀察到類似的現象。利用這種差異特徵可即時檢測出潮位站之基準點突然偏移所造成之資料異常現象。有助於判斷資料之異常與否。可做為未來潮位觀測資料品質的檢測依據。

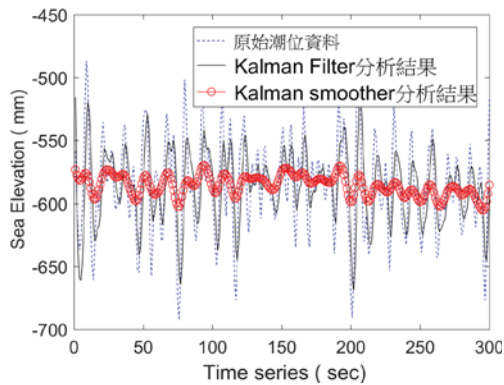


圖 7 潮位觀測數據經卡爾曼濾波與平滑之結果

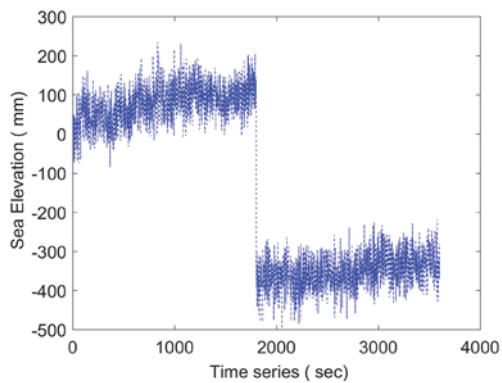


圖 8 模擬潮位觀測數據基準點改變之時序列

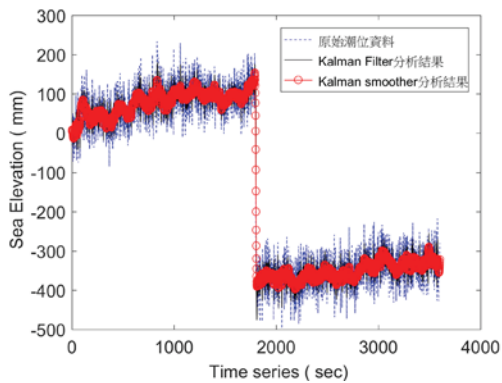


圖 9 上圖(圖 8)潮位數據經濾波與平滑之結果

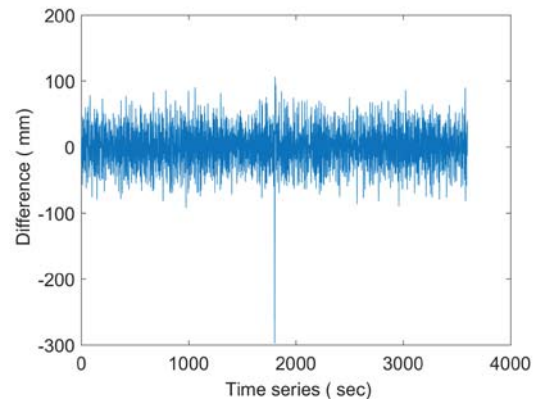


圖 10 原始數據與卡爾曼濾波序列之差值

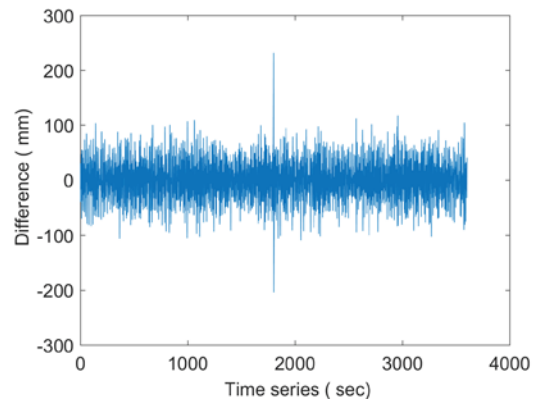


圖 11 原始數據與卡爾曼平滑序列之差值

五、小結

潮汐是海洋水體受天體引力所產生具有一定規律的漲落變化。舉凡涉及海象研究、海洋生態管理、海岸工程規劃等海域活動，都需要掌握此一海水漲落之特徵。岸邊的現場觀測為最直接掌握海水水位特徵的方法之一。潮位站觀測資料往往也是岸邊的水災害預警以及防治工作的重要依據。

考慮到潮位觀測作業所可能面臨的自然環境與人為影響，資料品質為確保觀測資料品質之重要關鍵。一般而言，潮汐資料品質可透過資料時序列的連續性與合理性等進行之。本研究則嘗試引入卡爾曼濾波器作為解析潮位觀測數據的方法。卡爾曼濾波器應於解析潮汐資料的優點在於僅需要輸入當前時刻的潮位測量結果與前一時刻的估計值就能估算出當前時刻的潮汐特徵。相較於大多濾波方法是基於頻率域的資料處理方法，卡爾曼濾波僅須在時間域進行演算，大幅減低了資料演算的複雜程度。

經潮位觀測資料之初步研究與檢討發現，由於現行潮位站的觀測方式為每秒透過音波式感測器量測一次，原始潮位資料的高頻擾動現象明顯。利用卡爾曼濾波與卡爾曼平滑等資料分析技術可改善潮位資料的高頻擾動現象，得到相對平滑之結果。藉此降低高頻擾動對於判斷潮位特徵所造成之影響。此外，本研究進一步考慮到潮位站之基準點突然偏移之情境。經檢討發現，利用卡爾曼濾波與卡爾曼平滑分析資料有助於判斷資料之異常與否。可做為未來潮位觀測資料即時品質的檢測依據。

謝誌

本文所使用潮位站資料為交通部氣象局海象測報中心所提供。

參考文獻

1. 葉姍霽(2002)臺灣海域高解析度潮汐模式之建立—敏感度試驗，國立成功大學碩士論文。
2. 馮智源(2006)應用 ROMS 海洋模式模擬南灣海域潮流流場，國立成功大學碩士論文。
3. 謝幸君(2011)應用雷達影像分析潮位之研究，國立成功大學碩士論文。
4. 吳立中、高家俊、滕春慈、林燕璋(2018)「2018年2月花蓮地震所引發港池盪漾之研究」，107年天氣分析與預報研討會。
5. Boon, J.D. (2004) *Secrets of the Tide: Tide and Tidal Current Analysis and Predictions, Storm Surges and Sea Level Trends*, Horwood Publishing Limited, England.
6. Reeve, D., Chadwick, A.J., Fleming, C.A. (2004) *Coastal Engineering: Process, Theory and Design Practice*, Spon Press, Oxon.
7. Kalman, R.E. (1960) A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
8. Kantha, L.H. (1995) Barotropic tides in the global ocean from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tide, part I model description and results, [Http://www.cast.msstate.edu/Tide2D](http://www.cast.msstate.edu/Tide2D)
9. Welch, G., Bishop, G. (1995) *An Introduction to the Kalman Filter*, University of North Carolina at Chapel Hill.
10. Yu, M.B., Shenoy, K., Sahani, M. (2004)