

應用不同模型於光達波形資料分解之比較

A COMPARISON OF LIDAR WAVEFORM DECOMPOSITION MODELS

王正楷

Wang, Cheng-Kai

王驥魁

Wang, Chi-Kuei

曾義星

Tseng, Yi-Hsing

國立成功大學測量及空間訊學系

摘要

具備全波形資料儲存的能力乃是當前光達系統發展之重要科技，此系統除了儲存傳統的三維點資訊外，尚紀錄了光達行進軌跡中的隨著時間變化的強度值，此強度訊號即所謂波形，而波形資料的出現提供了使用者透過分析波形資料來生產點雲之可能性。目前為止，仍未有一個波形分解的標準方法，而一個波形可能由一些明顯的響應以及微弱的響應或是重疊的響應所組成，波形的分解可能對於波形中明顯的響應較容易處理，然而對於重疊或是微弱的響應則常常有處理上之困難，而本文即著重在重疊響應之處理。首先要擬合一個波形必須先知道波形中有幾個響應，響應數目的取得通常可以透過簡單的偵測法來獲取，如區域最大值法，然而此方法較易受到雜訊之影響而造成判斷錯誤，因此，本文利用小波轉換的方法來進一步獲取響應之個數。而在波形的擬合中，須先定義一個響應數學模型，此模型通常為高斯函數，為了與高斯函數作比較，本文尚利用 log-normal 函數來進行。我們的初步結果顯示利用小波轉換的方法能夠得到較正確的響應個數同時具有偵測重疊響應之效力，而 log-normal 的模型其擬合的效果在森林的波形資料中，比利用 Gaussian 的擬合成果還要來的好，而透過我們的方法所萃取出來的點雲個數明顯多於傳統光達系統所提供之點雲數量，這些多出來的點雲預期將有利於未來之各項應用，尤其是森林之應用。

關鍵詞：全波形、光達、分解、小波

Abstract

The storage capability of full waveform is the state-of-the-art technology of LIDAR. In addition to the 3D point information recorded by conventional LIDAR systems, waveform LIDAR systems encode the intensity of returned signal along the time domain. This provides a user the possibility to decompose the waveform for the detection of illuminated target points. Therefore, the locations of the illuminated targets can be refined by analyzing the waveform data. So far, a standard approach to waveform decomposition is still not available. A waveform may be a composition of some prominent, overlapped and weak return pulses. A waveform decomposition method may easily detect a prominent return pulse, but it usually has some difficulties to deal with overlapped and

weak pulses. In this paper, a waveform fitting method which takes the overlapped pulses into consideration will be applied. To fit a waveform, the number of returns is needed. The initial number of returns commonly is determined by a simple way such as the number of local maximum of a waveform which is influenced by noises and overlapped echoes. For this reason, the wavelet transform is used to estimate the initial number of returns in this research. Moreover, compared with taking Gaussian as the fitting basic model, another basic model, log-normal is included. Our preliminary results show the effectiveness of wavelet transform to determine the initial number and the ability to detect overlapped pulses. The Log-normal model has better fitting results than Gaussian model in forest areas. As the results, the points extracted by our developed methods increase compared with the points extracted by commercial system. The increased points can be useful to future applications especially in a forest area.

Keywords : full-waveform, LiDAR, decomposition, wavelet

一、前言

近年來光達系統技術的演進，使得其具有儲存全波形資料之能力，其提供了使用者同時獲取三維的點資訊及相應的物理特徵。由波形所萃取之物理特徵是無法從以往的傳統光達(多回訊光達系統)系統所獲取，這些波形特徵諸如波形寬度(echo width)、回傳反射截面(back-scatter cross-section)等等，這些波形特徵進一步的提升分類之精度。目前為止，使用全波形的資料有三個重要應用：DTM 的生產、森林應用、城市區之應用，其他應用如機場障礙物之偵測(Parrish and Nowak, 2009)，其應用原理是根據有許多微弱的響應可以由波形資料中萃取出來，使得描述障礙物的點雲增多，如此即增加判斷障礙物之機率和能力。

而要從波形資料中萃取波形資訊，必須先經過波形的擬合和分解。儘管有許多的分解方法已經被提出，然而這些方法仍會遭遇到一些問題，其中，有兩種響應(echo)類型是難以被偵測出的，即弱響應(weak echo)和重疊響應(overlapping echo)。重疊響應會使得難以在一條波形中偵測出正確的響應數目，而微弱的響應則會使得偵測器將其偵測出來，此響應即為遺失而喪失此三維點資訊。Wagner, Roncat(2007)已指出波形形狀的複雜度使得要得到波形中響應的個數變得困難，假如波形中響應個數估計錯誤，那麼從中萃取的點雲即會產生錯誤(遺失或無謂的增加)即使擬合的成果可被接受。對於波形響應個數的偵測，一般有區最大值法、重心法、一階導數過零值法，這些方法對於複雜的重疊波形經常面臨到失敗之情形。因此，本文提出一個基於小波轉換的方法來估計波形個數，此方法已經在一些研究(Shao et al., 1998; Jiao et al., 2008)中被證實可有效的從重疊波形中偵測出響應個數。小波轉換可透過尺度之變換，在某個尺度中，尋找出一個最佳的響應個數之估計。

在本文中，我們將著重在重疊波形之響應偵測，並包含不同的測試區域(城市和森林)與不同的光達系統(Riegl 和 Leica)。

二、研究方法與材料

2.1 響應個數之估計

欲擬合一個波形，其波形中的響應個數必須先被估計出，然而，由於響應會有重疊的情況，使得個數的估計變得不那麼直觀。而小波轉換分析的方法提供了估計波形中響應個數的一個有效工具，其具有將波形之各成分響應獨自分解出之能力，在某個尺度下，可得到最佳的波形響應個數。圖一顯示利用小波偵測器估計響應個數之原理，圖 1(a)為模擬之波形，其由兩個響應組成，圖 1(b)為將此模擬波形進行小波轉換後得到的三個不同尺度下之小波係數值，有此可知在尺度 1 和 2 的係數值中可以得到正確之響應個數，然而尺度 1 較容易受雜訊影響，因此選擇尺度 2 的小波係數值可得到最佳的估計成果。而尺度 3 之小波係數值即無法正確估計出響應個數(僅有 1 個)。

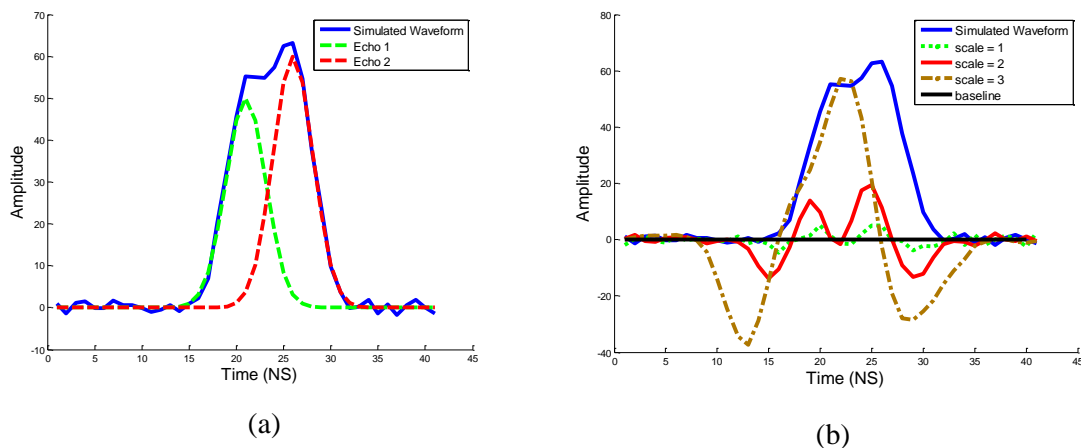


圖 1，(a)模擬之波形，兩個響應之距離為 5ns，FWHM 為 5ns。(b)模擬之波形及各尺度下之小波係數值

2.2 擬合模型

要擬合波形，首先必須先定義響應之基礎模型，才能進行模型與響應之擬合，一般來說，高斯函數是最常用來擬合光達波形的模型，其已經被證實高斯函數在 Riegl LMS-Q560 可以有效的進行響應之擬合(Wagner et al., 2006)，同時，假如目標反射物之反射截面函數亦符合高斯函數的話，那麼所接收到的響應波形也會成為一個高斯模型。

然而在本文中，我們選擇另一個模型來進行比較，其是因為透過實際波形資料的觀察，一個響應通常會有些微不對稱之情形，並形成右尾較長之形狀，因此選擇 log-normal 的模型來進行擬合，其 log-normal 與 Gaussian 函數如下式，並可表示如圖 2：

$$\text{Gaussian: } f(x) = ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$\text{Log-normal: } f(x) = ae^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

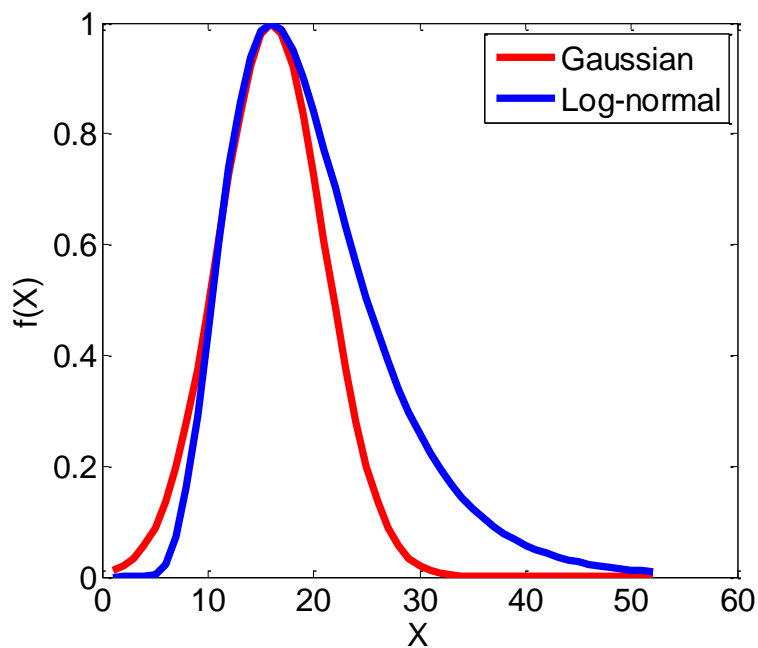


圖 2，高斯與 log-normal 函數模型之比較

2.3 擬合方法流程

圖 3 顯示波形擬合之程序，首先進行波形雜訊之估計，進而減輕雜訊之影響，接著利用小波轉換進行波形個數之估計，有了初始個數後，即可利用擬合模型與數學解算方法將波形進行擬合，得到各個響應。

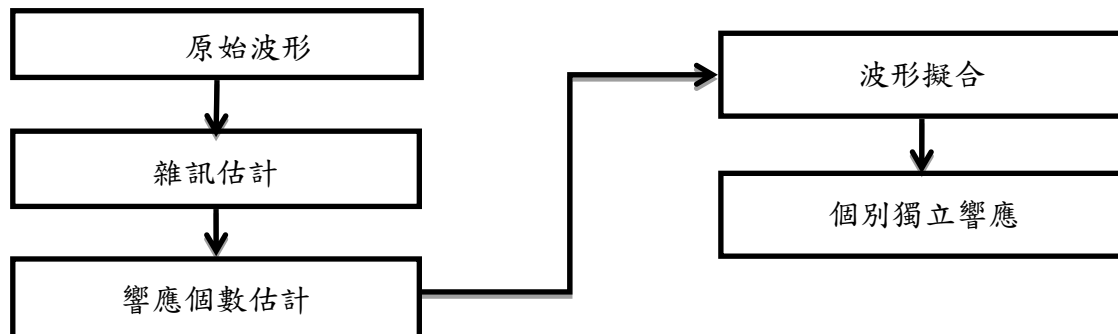


圖 3，波形擬合流程

2.3.1 雜訊估計

圖 4(a)顯示一個實際波形之範例，由圖可知回傳之響應與雜訊都同時被記錄，然而，通常感興趣的訊號(即響應)通常只有在某個區間，而他區間僅有雜訊分布，因此可以透過僅有雜訊分佈的區域，將雜訊估計出來。圖 4(b)顯示有 60 條雜訊重疊後的結果，由圖可知，在 200-256 區間的訊號，可視為只有雜訊，因此可利用此區間來估計整體的雜訊，計算雜訊之平均值 μ_n 即標準偏差 σ_n 。接著設定一個門檻值為 $\mu_n + 3\sigma_n$ ，將訊後低於此門檻值皆設為 0。

2.3.2 擬合程序

當完成前述之雜訊估計後，可將有效之回傳響應與雜訊分開，接著即可利用 2.1 節中所述的方法估計出響應個數。響應個數估計完後，即可利用下式進行波形之擬合：

$$y \cong f(x) = \sum_{j=1}^n f_j(x) \quad (3)$$

其中 y 代表原始的波形訊號， $f_j(x)$ 表示波形中各個獨立的響應， j 代表第 j 個響應， n 代表波形之個數， $f(x)$ 代表擬合之波形，即由全部的獨立響應的總和所構成。在此式中， $f_j(x)$ 分別利用 Gaussian 和 log-normal 函數來進行分解並比較成果。

而式(3)乃利用非線性的最小二乘來進行求解並反覆迭代，迭代的條件為 y 和 $f(x)$ 的差值須小於一個門檻值，若大於其門檻值，則在差值最大的地方新增一個響應(即響應個數為 $n+1$)，並求解之，直到擬合之差值小於門檻值或響應個數超過 6 個即停止。

2.3.3 參數限制

對於擬合之求解，為了讓求解的參數合理化，須對參數進行某些條件的限制，對於高斯函數模型，其未知數有均值、標準差和乘常數，其分別表示時間軸之位置、響應之寬度、和能量比值。因此均值可將其限制在響應之區間，而乘常數比須大於 0，而標準偏差乃式三種參數中最重要，其會根據地物的性質而有所差異，其限制條件可以下式來進行：

$$\left\{ \mu_{ground_width}^n - 3\sigma_{ground_width}^n < width < \mu_{tree_width}^n + 3\sigma_{tree_width}^n \right\} \quad (4)$$

2.3.3 擬合成果之評估

為了評估波形擬合之成果，我們使用下式來進行：

$$E_i = \sum_{x=1}^{n_i} \left(\frac{f_i(x) - y_i(x)}{\text{norm}(f_i(x))} \right)^2 \quad (5)$$

其中， i 代表第 i 個波形， n_i 代表一個波形中取樣個數。

三、結果和討論

3.1 資料

本文中所使用的資料有三，分別為 1.模擬資料、2.Leica 系統產生之資料、3.Riegl system 產生之資料。而模擬資料乃是參考 Leica 系統所得，其 FWHM 為 5ns。模擬資料乃作為驗證小波轉換估計回傳個數能力之用。而由 Leica 系統所得之資料是在森林區施測，Riegl 則在城市區中施測。

3.2 響應個數估計

圖 5 顯示響應個數估計的幾個例子，圖 5(a)-(b)表示由兩個響應構成之波形，其響應之間隔為 4ns 和 5ns。其解果顯示若兩個響應的間隔大於或等於 5ns，那麼其響應個數可以被正確估計出，圖 5(c)-(e)表示由三個響應所組成的擬合波形，其響應的區間在(c)中為 4ns(echo 1 和 echo 2), 4ns(echo 2 和 echo 3)，在(d)中為 4ns 和 5ns，在(e)中為 5ns 和 5ns。同樣的結果顯示當兩個區間大於或等於 5ns 時，可以成功的偵測出個別的響應，這樣的結果也印證了在(Wagner et al., 2006)論文所述：當兩個散射體之間的距離小於測距解析度時，其效應或使得兩個響應無法分離而被認為是同一個反射體。

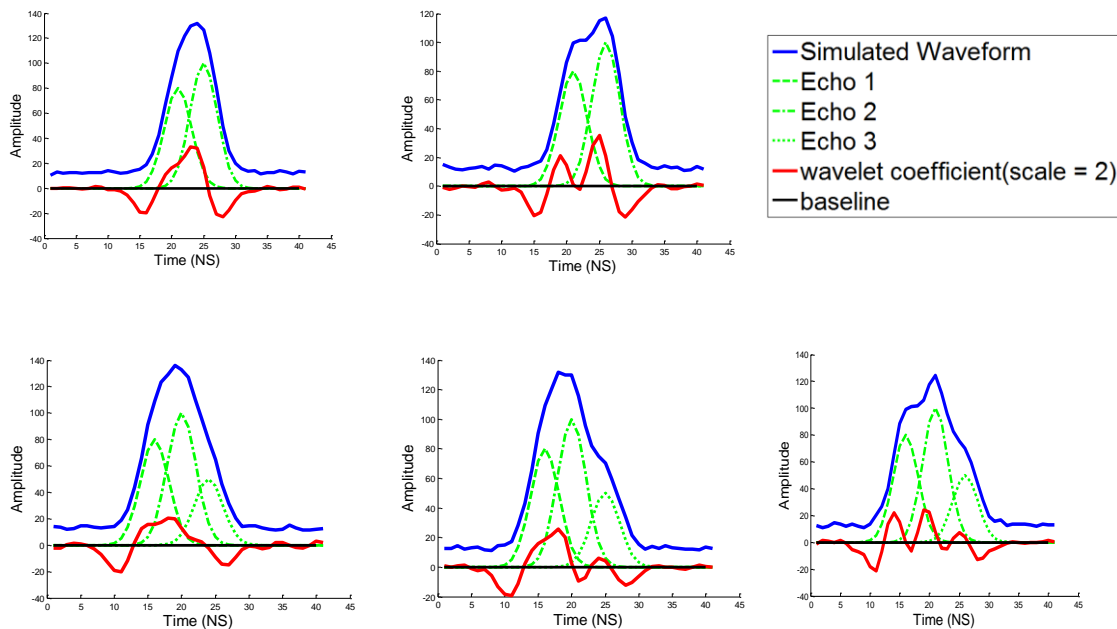


圖 5，模擬之波形，另 A_i 表示第 i 個響應之振幅乘常數， $D_{i,j}$ 表示兩個響應 i,j 之距離，
 (a) $A_1=80$, $A_2=100$, $D_{1,2}=4$; (b) $A_1=80$, $A_2=100$, $D_{1,2}=5$; (c) $A_1=80$, $A_2=100$, $A_3=50$;
 $D_{1,2}=4$, $D_{2,3}=4$; (d) $A_1=80$, $A_2=100$, $A_3=50$; $D_{1,2}=4$, $D_{2,3}=5$; (e) $A_1=80$, $A_2=100$,
 $A_3=50$; $D_{1,2}=5$, $D_{2,3}=5$

3.3 波形擬合成果

為了瞭解不同地物種類之波形擬合成果，我們分別利用人工擷取打在樹木和地面之波形各 50 個並進行波形之擬合。表 1 和表 2 表示兩測試區資料之擬合改正向量平均值，由表可知，對於森林區(表 1, Leica 系統)，利用 Log-normal 模型來進行擬合，不管在地面和樹木都可以得到較高的擬合精度，而對於城市區之測試資料(表 2, Riegl 系統)，兩者模型擬合之結果不管在地面和樹木都較無差異。

表 1，波形擬合改正量之平均值(Leica system)

改正向量平均值	Gaussian	Log-normal
地面波形	0.0094	0.0073
樹木波形	0.0103	0.0040

表 2，波形擬合改正量之平均值(Riegl system)

改正向量平均值	Gaussian	Log-normal
地面波形	0.0015	0.0016
樹木波形	0.0060	0.0055

接著，分別在兩個測試區中各擷取 10000 條波形資料，並且進行擬合，表 3 為擬合之改正向量平均值，由結果可知，對 Leica 系統而言，log-normal 模型在森林區中可得到較佳的成果，而 Riegl 系統則無差異，然而，這可能跟測試區有關，由於 Riegl 系統之測試區為都是區域，因此不對稱差異大之波形較少，使得 Log-normal 模型並無顯著之改進。

表 3，10000 條波形擬合改正量之平均值

改正向量平均值	Gaussian	Log-Normal
Leica 系統	0.0139	0.0083
Riegl 系統	0.0024	0.0024

四、結論

本文中我們提出一個估計全波形響應個數之方法，實驗結果得知，其具有偵測個數之可行性。對於波形擬合之測試，欲在森林區進行波形擬合，可採用 log-normal 模型。在擬合完成後，點雲可被萃取出，在我們的測試結果中，以森林區而言，可以多萃取 16% 之點數(相對於系統所萃取之點數個數)，而在城市區則可得到 11% 之點數，這些增加之點數將可在未來提升 DEM 及 CHM 應用之精度。

參考文獻

1. Jiao, Long, Suya Gao, Fang Zhang and Hua Li, 2008. Quantification of components

in overlapping peaks from capillary electrophoresis by using continuous wavelet transform method. *Talanta* **75**(4), pp. 1061-1067.

2. Parrish, Christopher E. and Robert D. Nowak, 2009. Improved Approach to LIDAR Airport Obstruction Surveying Using Full-Waveform Data. *Journal of Surveying Engineering* **135**(2), pp. 72-82.
3. Shao, Xueguang, Wensheng Cai and Peiyan Sun, 1998. Determination of the component number in overlapping multicomponent chromatogram using wavelet transform. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **43**(1-2), pp. 147-155.
4. Wagner, W., A. Roncat, T. Melzer and A. Ullrich (2007). Waveform analysis techniques in airborne laser scanning. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*.
5. Wagner, W., A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer and N. Studnicka, 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **60**(2), pp. 100-112.