

# 評估航高及雷射脈衝頻率參數對於森林光達穿透率之影響

## Assessment of The Influence of Flying Altitude and Pulse

## Repetition Frequency on LiDAR Penetration of the Forest

主管單位：內政部地政司

王驥魁<sup>1</sup> 朱宏杰<sup>2</sup> 林志交<sup>3</sup> 曾義星<sup>4</sup>

Wang, Chi-Kuei<sup>1</sup> Chu, Hone-Jay<sup>2</sup> Lin, Chih-Chiao Tseng, Yi-Hsing

<sup>1</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系副教授

<sup>2</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系助理教授

<sup>3</sup> 中興測量有限公司技師

<sup>4</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系教授

### 摘要

空載光達具有短時間獲得大量點雲資料的能力，點雲資料包含三維坐標與反射強度值，且隱含著豐富的高程資訊。藉由地面點以及地物點之分類作業，可用於森林區域的DEM(數值高程模型)製作。產製良好之DEM，點雲穿透率為重要影響因素，在掃描作業之設計，亦必須有相對應之規劃。本研究目的為，探討不同航高及雷射脈衝頻率掃描參數對森林區空載光達點雲穿透率之影響。本研究應用ATLM Pegasus光達系統，以曾文水庫上游森林區域規劃單一航線為測試區域，測試5組不同航高與5組不同脈衝頻率對光達資料獲取之差異進行比較。成果顯示，降低飛航高度或雷射脈衝頻率，皆可增加光達對於森林之穿透率，明確而言，航高降低1,000 m可以提高約0.1之穿透率；當雷射脈衝頻率每減少100kHz時，可增加約0.04之穿透率。比較不同地物類型對於穿透率的影響，穿透率最低為森林，其次是竹林，高穿透率為檳榔。

**關鍵字：**空載光達、穿透率、飛航參數

### Abstract

Airborne laser scanner is capable of acquiring 3D point data, which also includes intensity information, within a short turnaround time for a large area. For a forest area, the DEM (digital surface model) can be obtained by using the 3D point clouds that are classified as ground points after the airborne survey. The more 3D point clouds collected by an airborne survey, the more accurate the DEM should be, as a consequence that more ground points can be obtained. However, the LiDAR penetration is an important factor in the design of the scan must also have the corresponding planning. The purposes of this project are to understand how the settings of the airborne survey affect the LiDAR penetration of the forest. An ALTM Pegasus LiDAR system was employed to acquire the data for same area of different flying altitudes and repetition frequency on the upstream of Tseng-Wen Reservoir. Our results

showed that the LiDAR penetration increases with either decreasing flying height or decreasing laser repetition rate. Specifically, the LiDAR penetration increase 0.1 whenever the flying height decreases 1000 m; the LiDAR penetration increase 0.04 whenever the laser penetration rate decreases 100kHz. Among the three types of land covers, areca has the highest LiDAR penetration rate, bamboo has the second, and forest has the lowest.

**Keywords : airborne LiDAR, penetration rate, flight parameters**

## 一、前言

空載光達(Airborn LiDAR)為近年遙測領域的一項新技術，可用於大面積之地形測繪作業。高精度與高空間解析力的優勢，更能將其產製成品廣泛用於森林經營、坡地監測、災害模擬，數值地形建模等後端應用研究。空載光達具有短時間獲得大量點雲資料的能力，點雲資料包含三維坐標與反射強度值。光達的雷射光能穿透樹冠層遮蔽到達地表，且隱含著豐富的高程資訊，包含地面點以及地物點，因此可用於森林區域的 DEM(數值高程模型)製作。

目前已知較高密度的點雲資料可產出較高精度之 DEM，然而要獲取高密度之光達點雲需花費較多經費並且有計畫執行時程之限制，因此光達點雲穿透的高低則成為產製良好 DEM 的重要因素，故在掃瞄作業之設計，亦必須有相對應之規劃。空載光達設定及飛航參數設計上，許多研究中指出，飛行高度(Flying altitude)的差異(Goodwin et al., 2006; Hopkinson, 2007; Morsdorf et al., 2008; 發展先進空載光達科技與應用工作案，2011)、雷射脈衝頻率之高低(Pulse repetition frequency)(Chasmer et al., 2006; Hopkinson, 2007)、雷射光束發散角(Beam divergence)(Andersen et al., 2006; Hopkinson, 2007)及掃瞄角度之大小(Scan angle) (Morsdorf et al., 2008; 黃清美、史天元, 2008), 為主要影響因子。依照上述歸納的影響因子，雷射光束發散角為光達系統之固定參數，不易做調整；掃瞄角度固然有影響，但依目前國內之執行案例而言，此參數常多由業主制訂規範，因而，此二項因子不列入本研究討論。因此，為獲得良好數值高程地形模型之產製，本研究依上述原因，挑選航高及雷射脈衝頻率為研究項目，探討不同航高與不同雷射脈衝頻率對森林覆蓋區域光達資料獲取的影響。

## 二、研究地區、材料與研究方法

### 2.1 研究區域

本研究選定曾文水庫上游森林區規劃單一航線為測試區域，掃瞄範圍如圖 1，測試 5 組不同航高與 5 組不同脈衝頻率參數對光達資料獲取之差異進行比較。

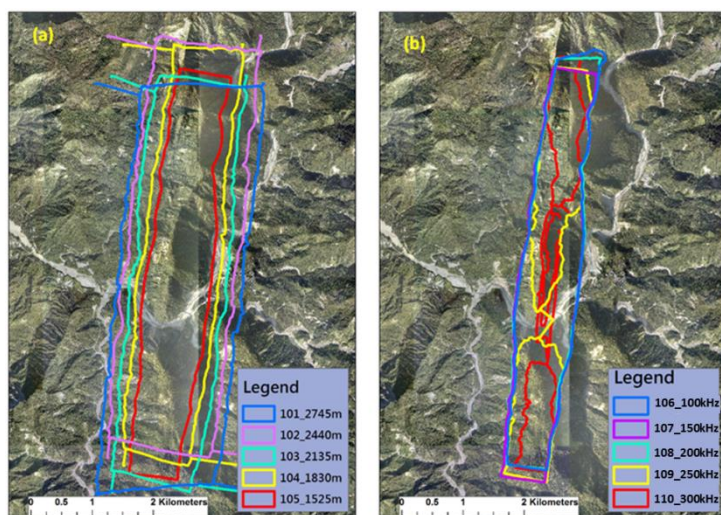


圖 1 單一航帶掃瞄範圍圖(a)不同飛航高度(b)不同雷射脈衝頻率

## 2.2 研究材料

本研究飛航掃瞄使用之全波形空載光達儀器為 Optech ALTM Pegasus，並搭配 Dimac Ultralight + 60MP 進行航拍工作。全波形光達系統主要包含：「雷射掃瞄組件」以及「定位與定向組件(Position and Orientation System, POS)」二大部分。其中雷射掃瞄組件之性能如測距範圍、掃瞄寬度(掃瞄角)、點位密度(掃瞄頻率)等，直接影響施測之能力；定位與定向組件之性能，則是影響測點精度之關鍵。目前一般全波形紀錄器所紀錄之回波強度的取樣頻率( $f$ )為 1GHz (即每秒光達可記錄 109 次)。ALTM 全波形紀錄器為每個光束記錄 440 個 samples 值，因此回波紀錄約為 66 公尺。本研究使用之全波形光達儀器掃瞄航線參數如表 1 所示。

表 1 空載光達單一航線飛航掃瞄參數

航線編號	掃瞄角度(deg.)	掃瞄頻率(Hz)	雷射脈衝頻率(kHz)	航高(m)	航向(deg.)	航速(Knots)
101	±20	40	100	<b>2745</b>	185	100
102	±20	40	100	<b>2440</b>	5.8	100
103	±20	40	100	<b>2135</b>	185	100
104	±20	40	100	<b>1830</b>	5.8	100
105	±20	40	100	<b>1525</b>	185	100
106	±20	40	<b>100</b>	1403	5.8	100
107	±20	40	<b>150</b>	1403	185	100
108	±20	40	<b>200</b>	1403	5.8	100
109	±20	40	<b>250</b>	1403	185	100
110	±20	40	<b>300</b>	1403	5.8	100

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 航高對於光達雷射光的影響

雷射光從發射到接收，中間經歷過許多能量損耗的過程，其雷射光能量的耗損，如上述公式 1 內容所示，當所有參數均為定值時，接收器與地物之距離( $R$ )，當飛航高度越高時，能量的衰減是呈現平方倍的變化，航高為嚴重的影響光達能量的變化因素(Baltsavias, 1999; Heritage, 2009)，故本研究將針對不同航高探討對於穿透率的影響。

$$P_r = P_t \frac{D_r^2}{4R^2} \rho \eta_{atm} \eta_{sys} \cos\alpha \quad (\text{式 1})$$

$P_r$  為感測器接收的能量； $P_t$  為雷射發射能量； $R$  為目標物到感測器的距離； $D_r$  為感測器光圈的截面積； $\eta_{atm}$  為大氣穿透率； $\eta_{sys}$  光達系統衰減係數； $\rho$  為接觸物體之反射率； $\alpha$  雷射光對地物之入射角。

### 2.3.2 雷射脈衝頻率對於光達雷射光能量的影響

空載光達以快速且大量之雷射光束對地面進行掃瞄，雷射經過大氣長距離耗損與目標物反射後的能量損失，回到感測器時仍需要一定的能量，方能被感測器接受，並記錄

其能量。因此光達掃描作業規劃，需考慮單發雷射之能量，以確保在森林地區的光達資料，能保有足夠之地面點資訊。

圖 2 為光達系統發射多個雷射脈衝之示意圖，此處假設雷射光為完美方波型式，單發雷射的能量是雷射脈衝時間乘上雷射最大功率，即方波的面積。  $E_{pulse}$  為單發雷射光束之能量，其與雷射最大功率  $P_{T-peak}$  及雷射脈衝時間寬度  $t_{pulse}$  (單一脈衝的經歷時間) 之關係可以表示為式 2：

$$E_{pulse} = P_{T-peak} \times t_{pulse} \quad (1) \quad (式 2)$$

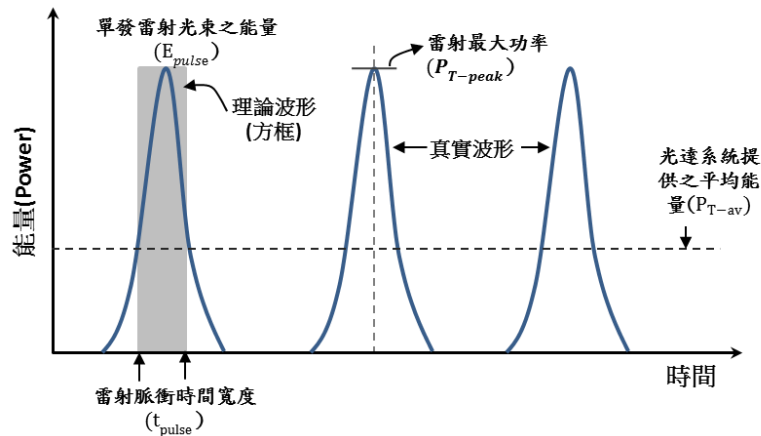


圖 2 雷射發射能量最高值與時間的變化差異

光達系統能提供之平均能量為  $P_{T-av}$ ，此為一固定數值，與光達系統使用之雷射光源有關。當雷射光束以  $f_{pulse}$  之發射頻率掃描地面，其與  $E_{pulse}$  之關係為式 3：

$$E_{pulse} = \frac{P_{T-av}}{f_{pulse}} \quad (式 3)$$

綜合式 2 與式 3，可得下式式 4：

$$P_{T-peak} = \frac{P_{T-av}}{t_{pulse} f_{pulse}} \quad (式 4)$$

此式中，因  $P_{T-av}$  與  $t_{pulse}$  為光達系統中之不可調整之參數，故可見  $P_{T-peak}$  與  $f_{pulse}$  為反比關係。當頻率越高，單發雷射能量將越低(Baltsavias, 1999)。本研究將探討不同的雷射脈衝頻率對於光達穿透率的變化。

### 2.3.3 穿透率計算

計算穿透率之前必須將完整的地面點搜尋出來，由於人工編修的方式，並非所有地面點會被分類到，如下圖 3 橘色點為人工分類之地面點，從圖中顯示並非所有的地面點被選取到，故本研究以 DEM 為底層搜尋 2 m 厚度之範圍為全部地面點，國外文獻以 1.25 m 為搜尋厚度(Morsdorf et al., 2006)，但本測試區處於低海拔森林植被覆蓋較複雜，故以 2 m 為搜尋厚度，綠色點為處理過後的地面點較完整，可以進行穿透率的評估。

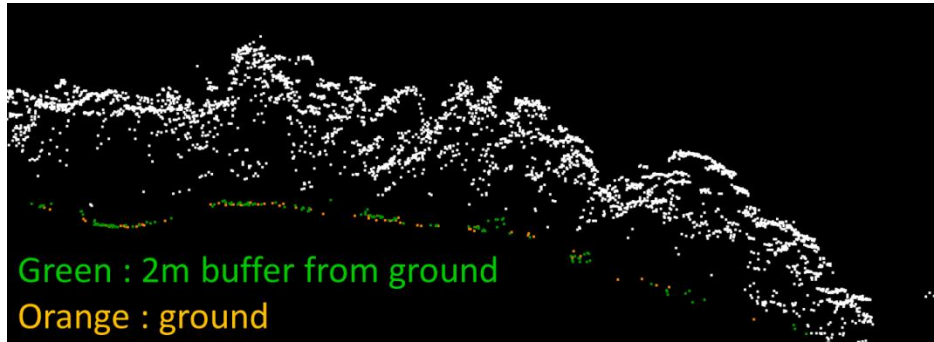


圖 3 以 2m 厚度搜尋完整地面點之示意圖

本研究以網格 10×10 m 大小，統計網格範圍內的雷射發射數量與接觸地面的雷射數量比例，因考慮此次研究光達具多重回波的特性，故以雷射數量計算穿透率，而非點雲數量，雷射發射數量可由空載光達的記錄檔取得；而地面點雲數量則受到分類判斷規則的影響。當樹冠層愈蓊鬱，雷射不易穿透至地表，則地面點雲數量較少，故穿透率低，反之則越高。其穿透率計算如公式 5 所示：

$$\text{穿透率} = \frac{\text{穿透森林冠層雷射數量}}{\text{森林冠層區之雷射發射數量}} \quad (\text{式 } 5)$$

### 三、研究成果

#### 3.1 航高對於穿透率的影響

本研究測試 5 種不同的飛行高度對於穿透率的影響，各航線間大約相差 300 m 的飛行高度，計算 10×10 m 網格大小的穿透率，5 個單一航帶間互相重疊的區域約 5.1 km<sup>2</sup>，總共有 50,708 個網格數量，並比較區域內的穿透率差異。統計結果如下表 2，由於穿透率為 1 的區域，多為建物與空曠地，對於穿透率的探討並無意義，故不在統計的成果中，在最高航高的 2745 m，平均的穿透率為 0.299，標準差為 0.260，當在最低航高 1525 m，平均穿透率為 0.416，標準差為 0.260，表示較低的飛行高度可以提高雷射光之穿透率。成果如圖 4 所示，紅色為穿透率較高，綠色區域為穿透率較低的區域，森林區域在降低航高後，有明顯的增加穿透率，從 2745 m 降低到 1525 m 的飛行高度，紅色或黃色高穿透率的區域有明顯增加。

表 2 不同航高其穿透率差異之統計

航線編號	飛航高度(m)	點雲密度 (pts/m)	點雲密度 標準差	穿透率最 大值	穿透率 最小值	平均穿 透率	穿透率標 準差
101	2745	1.35	0.69	0.996	0	0.299	0.260
102	2440	1.92	1.13	0.994	0	0.316	0.260
103	2135	2.26	1.43	0.995	0	0.363	0.269
104	1830	2.81	1.30	0.997	0	0.389	0.262
105	1525	3.80	1.67	0.997	0	0.416	0.260
Cellsize=10×10m ; n=50,708							

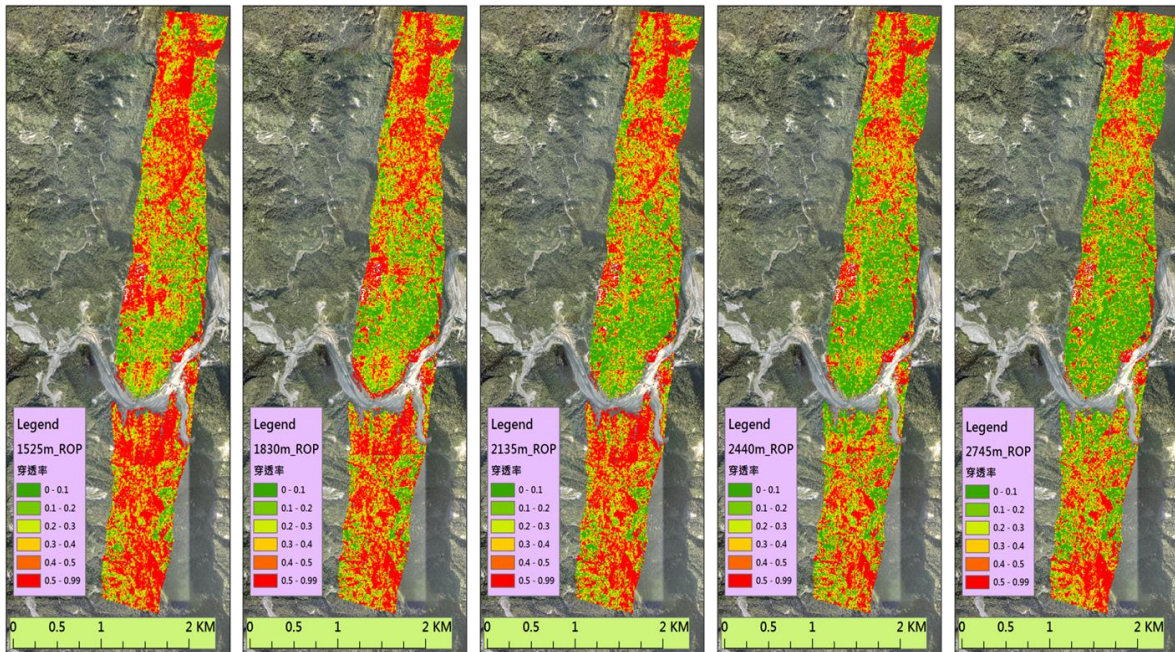


圖 4 不同航高之穿透率結果

本研究以盒形圖統計資料的最大值、最小值、中位數、下四分位數及上四分位數，如下圖 5 不同航高的穿透率統計結果，在航高為 1525 m 時，平均穿透率為 0.42，隨著航高增加時，平均穿透率有明顯下降的趨勢。為瞭解航高與穿透率的變化，利用線性迴歸探討航高對穿透率的影響。當航高增加時，樣區內平均穿透率明顯減少，而資料之分布呈現線性迴歸的趨勢，表示該 5 組不同航高資料影響穿透率，並且從線性迴歸方程式中得知，每增加 1000 m 航高時，平均穿透率減少約 0.1。當飛行高度越高時，資料的分布在較低的穿透率，當飛行高度降低時有明顯提高穿透率的值，表示如欲求得較高的森林穿透率，可以降低航高來達成。

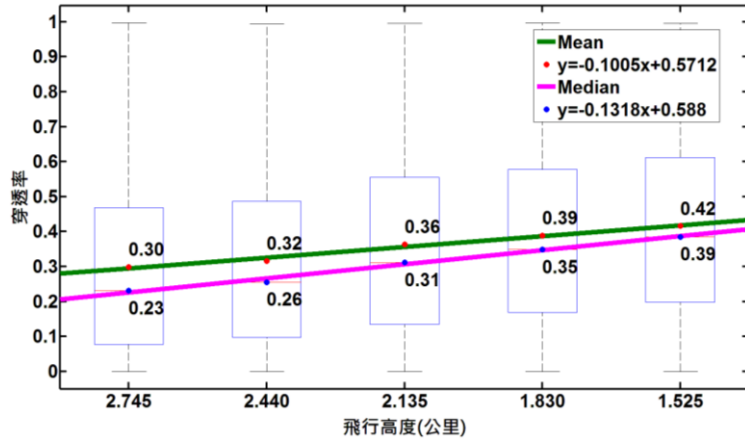


圖 5 不同飛行高度數值分布盒形圖

由次數百分比統計結果(圖 6)顯示，航高 2745 m 在穿透率小於 0.2 有較高的次數百分比，航高 1525 m 在穿透率小於 0.2 有較低的次數百分比，且在穿透率大於 0.2 以上，均高於其餘 4 個航線的穿透率，表示如欲得到較多的地面點，降低航高有其必要性。

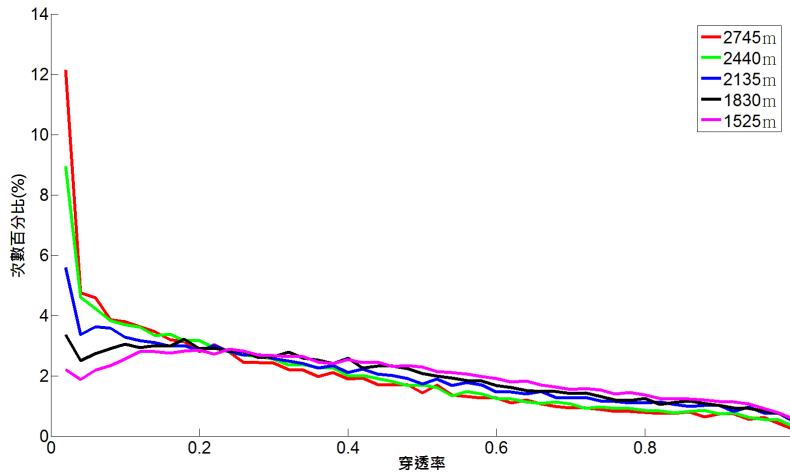


圖 6 不同航高穿透率分布次數百分比

### 3.2 雷射脈衝頻率對於穿透率的影響

本研究規劃另一 5 組單一航線，主要是針對不同的雷射脈衝頻率測試穿透率的差異，雷射脈衝頻率愈高時，受限於儀器雷射發射與接收時需間隔一段待雷射光反射回感應器，當雷射脈衝頻率過高時，發射的雷射尚未回到感測器，隨即發射雷射光，會造成感測器誤判雷射的行走距離，會有許多錯誤點雲產生。

本研究所規劃航線 109 與 110，其雷射脈衝頻率分別為 250kHz 與 300kHz，由於脈衝頻率高於飛航高度限制，產生較多的雜訊點，需進行點雲慮除，110 航線過濾錯誤點後，只剩餘小部分的航帶重疊區域可以進行比較，故本研究不就 300kHz 之資料進行比較。另外 4 組不同雷射脈衝頻率的航帶中，總共有 3.6 km<sup>2</sup> 重疊面積，計算 10×10 m 網格數共有 35,618 個。不同雷射脈衝頻率穿透率差異之統計結果如下表 3 所示，在航線編號 106，脈衝頻率為 100kHz，平均穿透率為 0.437，標準差為 0.235，而在航線編號 109，脈衝頻率為 250kHz，平均穿透率為 0.381，標準差為 0.239，單就統計資料有明顯的差



異，平均穿透率差約 0.056，但從趨勢而言 4 組航線在提高雷射脈衝頻率時，平均穿透率有明顯遞減的趨勢。

表 3 不同雷射脈衝頻率穿透率差異之統計

航線編號	雷射脈衝 頻率 (kHz)	點雲密度 (pts/m)	點雲密度 標準差	穿透率最 大值	穿透率最 小值	平均穿透 率	穿透率標 準差
106	100	6.49	2.41	0.997	0	0.437	0.235
107	150	9.41	3.78	0.997	0	0.401	0.239
108	200	11.20	4.61	0.998	0	0.391	0.237
109	250	14.55	5.42	0.999	0	0.381	0.239
Cellsize=10×10m ; n=35,618							

成果如圖 7 所示，雷射脈衝頻率在 100kHz 與 200kHz 可以看出明顯的差異，相較於 100kHz，200kHz 的資料有較少的高穿透率(紅色或黃色區域)，表示雷射脈衝頻率會影響到穿透率的大小。

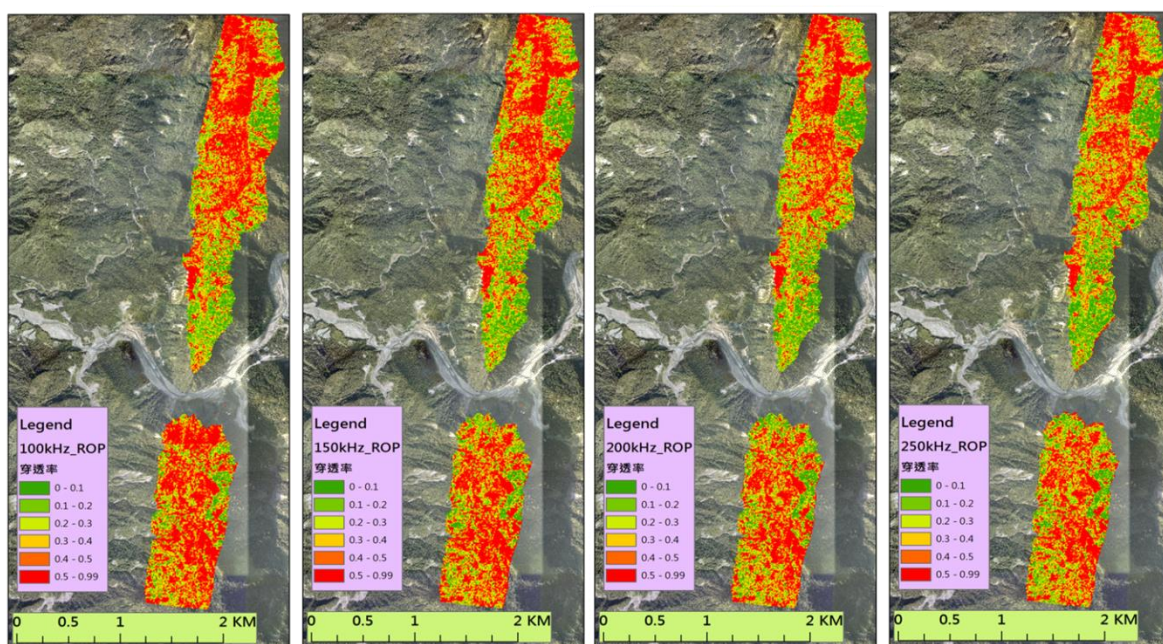


圖 7 不同雷射脈衝頻率之穿透率結果

由盒形圖統計資料(圖 8)顯示，穿透率資料分布呈現下降的趨勢，即雷射脈衝頻率愈高時光達的穿透率就愈低，其原因推測為當雷射光發射的次數越高時，單發雷射的能量將越低，故如欲得到較高穿透率的光達資料，降低雷射脈衝頻率為重要的參數之一。

本研究測試 4 個不同雷射脈衝頻率的參數，分別為 100、150、200 與 250kHz，所使用之空載光達掃描儀為 Optech HD400，其最高的雷射脈衝頻率為 400kHz。利用各雷

射脈衝頻率的平均穿透率統計其線性回歸方程式，斜率為-0.0004，當每增加 100kHz 時，穿透率會減少約 0.04，因此增加雷射脈衝頻率亦會使穿透率下降，但相較於航高對穿透率的影響，雷射脈衝頻率影響平均穿透率的程度較小。故在航線規劃時如果同時提高航高與雷射脈衝頻率，將會使穿透率在累積某程度上的減少。

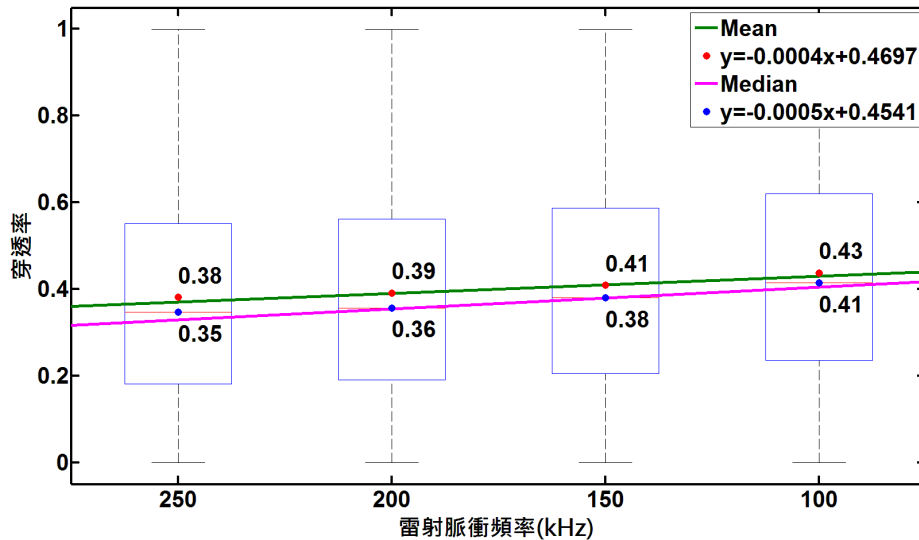


圖 8 不同雷射脈衝頻率數值分布盒形圖

經由不同雷射脈衝頻率之穿透率分布次數百分比之統計結果(圖 9)，紅色曲線為 100kHz 的脈衝頻率，而黑色曲線為 250kHz 的脈衝頻率，高脈衝頻率的黑色曲線，在低穿透率部分數值高於其他兩組資料，並呈現一個雷射脈衝頻率越低，穿透率越高的情形。

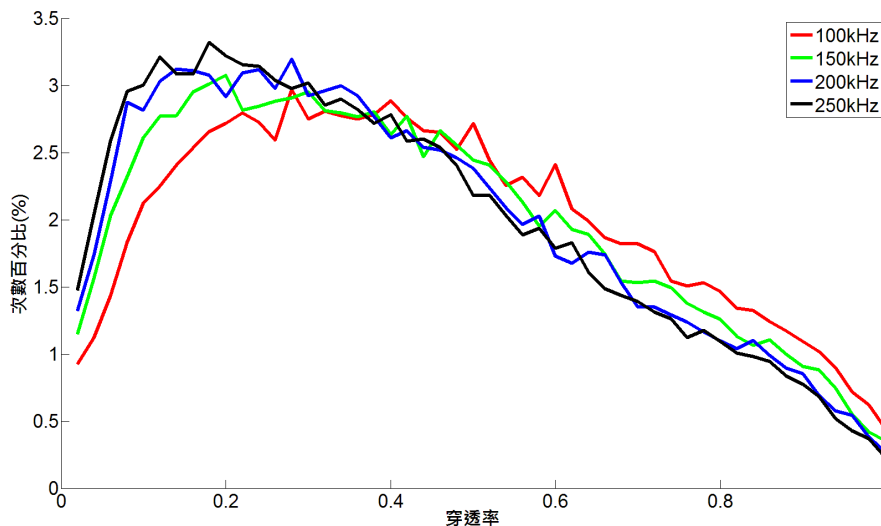


圖 9 不同雷射脈衝頻率之穿透率分布次數百分比

### 3.3 不同地物類型對於穿透率的影響

本研究單一航線不同航高範圍內，總共有建地、裸露地、河床地、檳榔園、竹林和森林，由於建地、裸露地和河床地屬於高穿透率的區域，因此不將此區域進行探討，本案將該區域分成檳榔園、竹林和森林，其分類圖如圖 10。

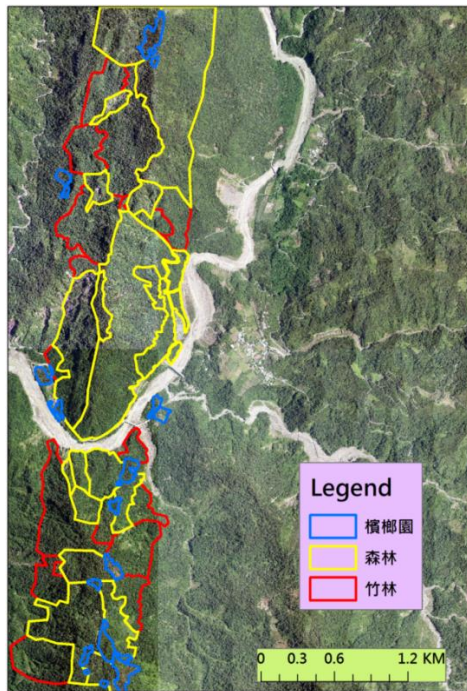


圖 10 單一航帶範圍內之植被分類圖

不同的航高與地物類型穿透率資料分布結果如圖 11，從圖上顯示，在相同航高下不同地物分類有其穿透率的差異，分別比較竹子、森林與檳榔園的穿透率，其中以森林穿透最低，穿透率分布在 0.15~0.5 左右，其次為竹子的穿透率，數值分布界於 0.2~0.5 左右，穿透率最好的為檳榔園，數值介於 0.6~0.9 左右，屬於較高的穿透率的地物。

在不同航高相同的地物類型，如森林區域隨著航高增加穿透率有減少的趨勢，並且差異的幅度相較於竹子與檳榔高，表示調整航高的參數可以增加森林穿透率，是有效的方法之一。

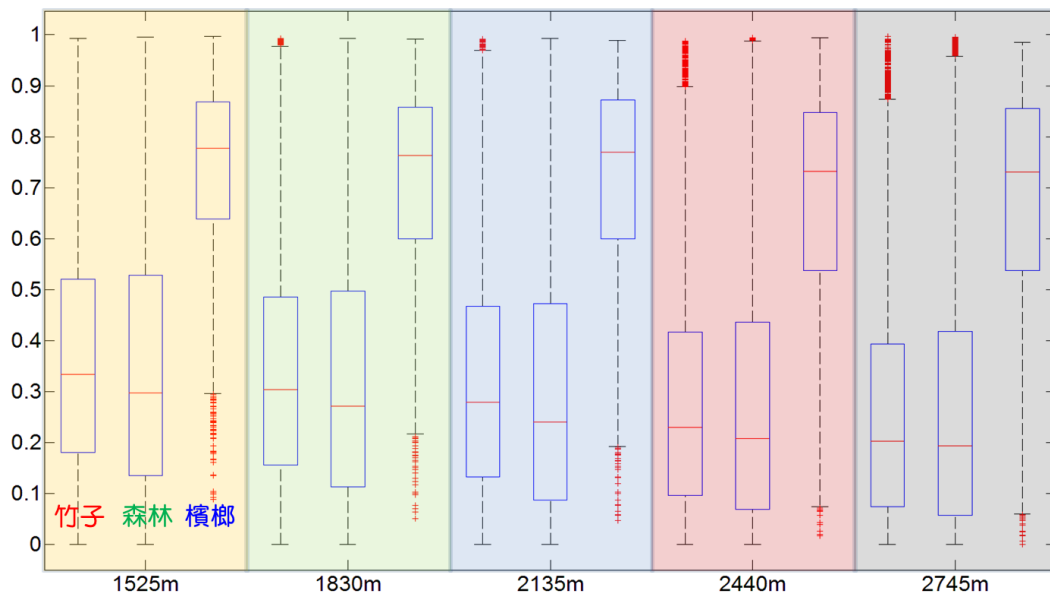


圖 11 不同航高與不同地物之穿透率資料分布盒形圖

#### 四、結論與建議

影響穿透率的兩個重要的飛航參數為「飛行高度」與「雷射脈衝頻率」，從結果顯示當航高降低時穿透率會增加，由於森林區域穿透率不高，當穿透率增加 0.1 時地面點雲數量將倍數增加。另外雷射脈衝頻率對於穿透率的影響，當雷射脈衝頻率越高時穿透的情形不如低脈衝頻率的資料，由雷射脈衝頻率與平均穿透率統計顯示，當每增加 100kHz 時，穿透率會減少約 0.04，故減少雷射脈衝頻率可以提升穿透率。不同的地物會影響穿透率，從結果顯示森林的穿透率最低，其次是竹林，最高穿透率為檳榔，故在航線規劃時除了地形為考慮因子外，必須要將地物類型列入考慮。當測區均為森林時，飛航參數必須考慮到航高與雷射脈衝頻率，主要是為提升森林的穿透率，由於兩的參數是獨立的變項，故在飛行安全許可下，盡量降低飛行高度，如無法過低飛行時，可以考慮降低雷射脈衝頻率來達成提高森林穿透率的目標。

實際執行飛航計畫時，無法先行掃瞄並計算穿透率，本研究顯示，不同樹種具有不同之穿透率，故建議未來應探討獲取高精度 DEM 之航線規劃，應用衛星影像推估植物指標參數(如葉面積指數 LAI)作為基本資料之可行性。

#### 參考文獻

1. 黃清美、史天元 (2008) 雷射入射角與空載光達穿透率關係探討。航測及遙測學刊 13(1): 67-73。
2. 100 年發展先進空載光達科技與應用工作案 (2011) 工作總報告書。內政部
3. Andersen, H. E., Reutebuch, S. E., & McGaughey, R. J. (2006) A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 355-366.
4. Baltsavias, E. P. (1999) Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, *Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing*, (54)2-3, 164-198.
5. Chasmer, L., Hopkinson, C., Smith, B., & Treitz, P. (2006) Examining the influence of changing laser pulse repetition frequencies on conifer forest canopy returns. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 1359-1367. Hopkinson, 2007) 、
6. Goodwin, N. R., Coops, N. C., & Culvenor, D. S. (2006) Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment*, 103, 140-152.
7. Heritage, G. L., D. J. Milan, A. R. G. Large and I. C. Fuller (2009) Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112: 334-344.

8. Hopkinson, C. (2007) The influence of flying altitude, beam divergence, and pulse repetition frequency on laser pulse return intensity and canopy frequency distribution. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 33, 312-324.
9. Morsdorf, F., Frey, O., Meier, E., Itten, K. I., & Allgöwer, B. (2008) Assessment of the influence of flying altitude and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1387–1406.
10. Morsdorf, F., Kotz, B., Meier, E., Itten, K. I., & Allgower, B. (2006) Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104(1), 50-61.