

3-D 掃描式光學雷達

3-D Scanning LIDAR

江智偉、達斯、廖煌時、倪簡白

Chih-Wei Chiang, Subrata Kumar Das, Huang-Shih Liao, Jan-Bai Nee

隨著人口與經濟成長，所製造的污染物增加，已儼然對於空氣品質及環境造成衝擊。而目前的環境監測技術主要仍以地面被動式監測系統為主，對於污染物即時的傳輸與空間分布等空氣污染問題仍然相當棘手。有鑑於此，利用雷射遙測技術所涵蓋面積廣泛且具有即時之特性，成功地開發了台灣第一台 3-D 掃描式雷射遙測系統，並針對大氣的局部環流特性和空氣污染物之傳輸與濃度的相關變化等重要資訊進行收集，這將有助於增強對環境監測的能力。

The population and economic growth have resulted in a profound deterioration of air quality. Nevertheless, there is very less effort to monitor and understand the air pollution on different scales both spatially and temporally. In this paper, we overview the remote sensing details along with the newly developed 3-D scanning LIDAR system, designed for the information of temporal and spatial variability of atmospheric pollutants which is lacking in passive ground-based measurement. This technique will strengthen the capability of the environmental monitoring.

一、簡介

空氣中懸浮的固態、液態或氣固態共存的微粒皆稱為氣膠 (aerosols)，氣膠是大氣污染的關鍵組成，它們可以作為異質 (heterogeneous) 化學的催化劑或為吸附致癌物種的載體。不同的氣膠來源有不同的氣膠型態，其物理與化學特性也會有很大差異，環境中有各種不同粒徑和不同化學組成的氣膠微粒，對於氣候、能見度及生活品質可造成不同程度的影響^(1, 2)。此外，對於人體健康的影響也不容忽視，可能會引起哮喘、心血管疾病等，嚴重者甚至引發癌症⁽³⁾。

氣膠對於光所造成的效應和微物理性質都會隨著時間和空間的變化而有所不同。目前對於大氣中

氣膠的研究，大部分侷限於地面被動式監測系統或利用飛機和氣球等搭載測量儀器做實際採樣的觀測⁽⁴⁾，但這些方法都受限於時間和空間的限制，無法發揮對氣膠研究的最佳效能。

本文的研究動機與方法，主要是利用雷射遙測與差異吸收技術所自行開發的掃描式光學雷達 (光達，light detection and ranging, LIDAR)，針對大氣的局部環流特性、局部環流對於空氣污染物傳輸、邊界層高度演化、空氣污染物排放與濃度等重要資訊進行收集，這將有助於增強地面被動式監測系統對環境的監測能力和使環保單位在實際監測作業過程中能有更多的參考資訊，用以擬定相關政策和維護空氣品質。

二、光學雷達系統

光學雷達最早是由 1962 年 McClung 與 Hellwarth⁽⁵⁾ 等人開始，之後光學雷達技術不斷地推陳出新，光學雷達系統也從定點式改良到移動式(如汽車、飛機搭載) 增加其監測範圍。光學雷達為直接利用待測位置的介質作為散射體，接收其背向散射光訊號，達到測量介質特性的目的(如圖 1 所示)。由於不需外加任何反射裝置，因而系統具有遙測的功能。概括而言，散射光訊號僅能提供兩種訊息，一為接收訊號的相位，一為接收訊號的強度。前者訊號包含待測位置距離或速度之性質，而後者則為成分分析之依據。由於散射訊號中帶有光與介質交互作用機制的訊息，若能探討該種作用對於訊號強度所造成之影響，再經由適當之儀器予以接收、處理、分析後，便能測知待測位置介質的物理特性(如吸收率、粒子大小、濃度等)、化學組成或待測環境的大氣參數(如風速、溫度、能見度、雲層高度等)。如何在待測性質或參數與接收訊號強度變化之間尋求適當之交互作用機制，是雷射遙測系統設計與應用的原則。事實上，能夠產生而且目前廣被採用的雷射光與待測介質交互作用的機制相當多，由於使用之作用機制不同，各種型態的雷射遙測系統在設計與用途上亦有很大差異。

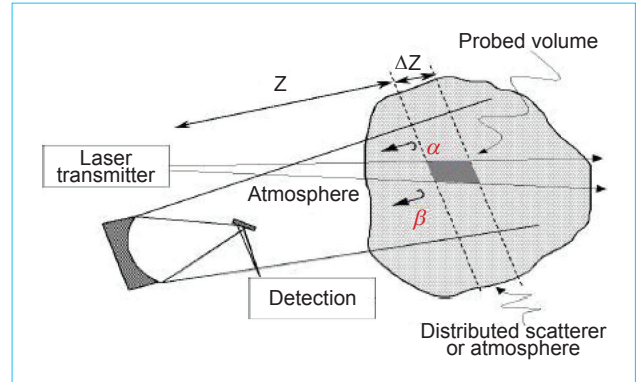


圖 1. 光學雷達量測原理示意圖，圖中 Z 為待測物與雷射發射器之距離， α 、 β 分別為待測物消光與散射係數。

由於此等遙測設備造價昂貴，即使相關設備用途廣泛，一般在成本考量下因而大大降低對此儀器設備之投資與研發興趣，且目前全世界相關之光學雷達設備大部分都是垂直固定式。而在本研究中自行開發之 3-D 掃描式光學雷達系統，主要藉由光路設計、自動控制與機構設計，進而輕量此系統至 30 公斤內。光路採用多軸同心式設計，而全系統採用伺服運動控制，機構設計採用萬向式機構。藉由此等設計將賦予以往單調固定式之光學雷達系統全方位之監測能力。

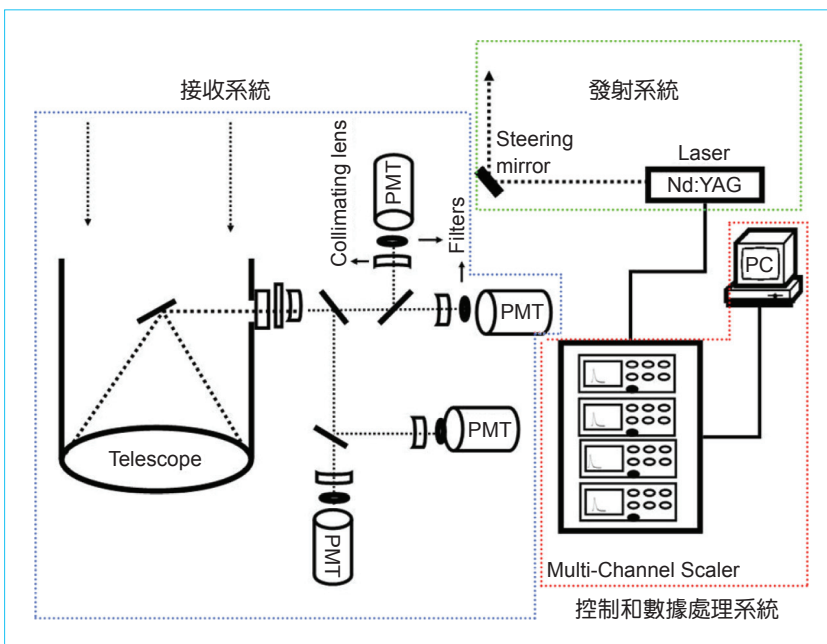


圖 2. 光學雷達基本架構分別為發射系統(綠色點線)、接收系統(藍色點線)、控制和數據處理系統(紅色點線)三部分。

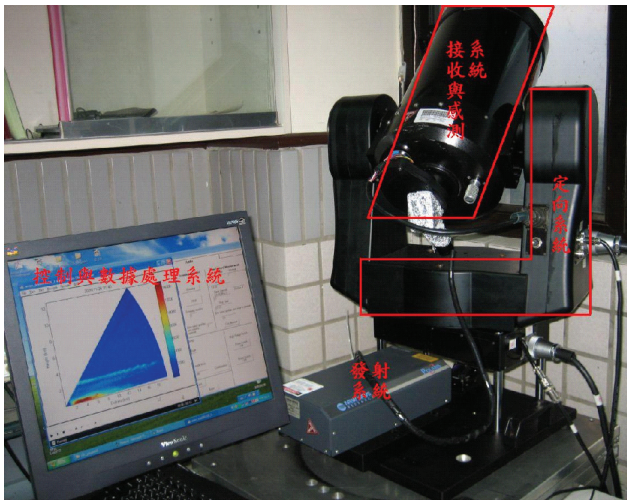


圖 3. 掃描式光學雷達系統配置圖。

三、系統之架設與量測理論

1. 系統裝置

無論光學雷達系統設計有何差異，基本上所有的光學雷達系統均可分成發射系統、接收系統、控制和數據處理系統三部分，如圖 2 所示。

發射系統包含雷射發射器及操控雷射光束之

反射鏡，雷射發射器係發射雷射光束至一待測空間。接收系統包含望遠鏡、光圈及透鏡。望遠鏡接收經待測物在空間中之散射光訊號，其散射光訊號依序經由光圈、透鏡及濾鏡 (filter) 至光電倍增管 (photomultiplier tubes)。光電倍增管將接收之散射光訊號放大，且轉為電流之脈衝訊號，並藉由鑑別器 (discriminator) 將光電倍增管產生的光電子訊號轉成電壓脈衝訊號 (以利訊號的遠距傳輸與計數) 後，傳送至多頻道分析儀。多頻道分析儀將光電子脈衝訊號累加之後，按照接收的時間置放在對應的時間頻道中，如此就可得到在不同時間返回望遠鏡的散射光強度，由於光子是以光速折返，因此在不同時間所得到的訊號，就是不同高度的散射光強度。光電子脈衝訊號在累積至一定時間之後，傳送至個人電腦 (PC) 予以儲存及運算。

本光學雷達之設備如圖 3 所示，主要包含下列子系統：發射系統、接收與感測系統、定向系統和數據處理系統。其中與舊有光學雷達系統之差異在於發射系統中採用光路多軸同心式設計，如圖 4 或圖 6 所示，此種光路設計在光學雷達系統進行 3-D 空間掃描時並不會改變其光路，永遠使望遠鏡之光

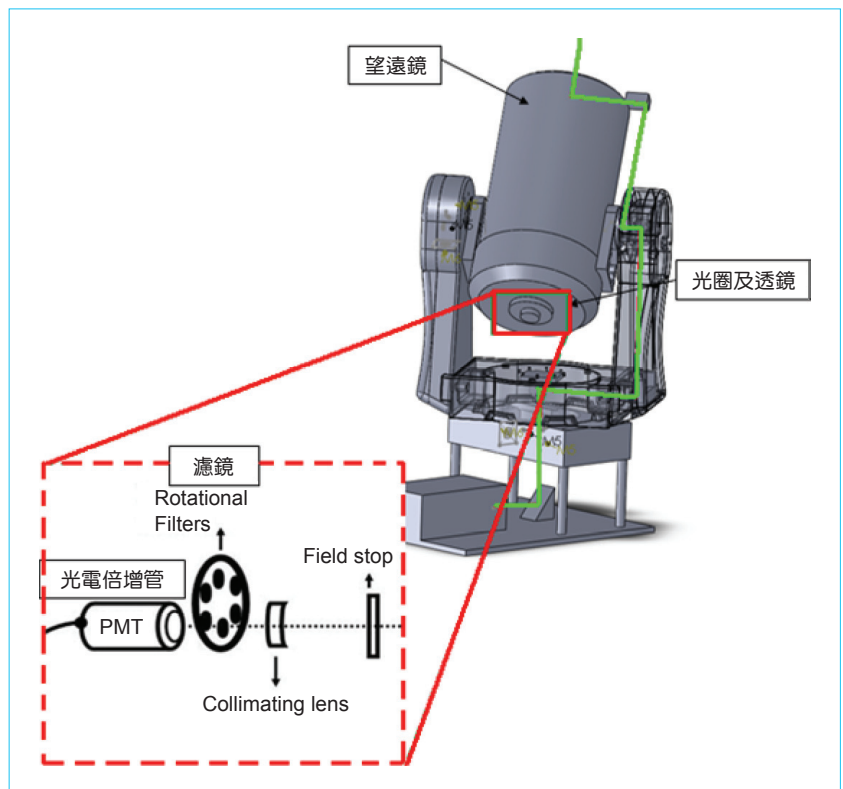


圖 4. 掃描式光學雷達系統之濾鏡轉盤與雷射光路徑 (綠線) 示意圖。

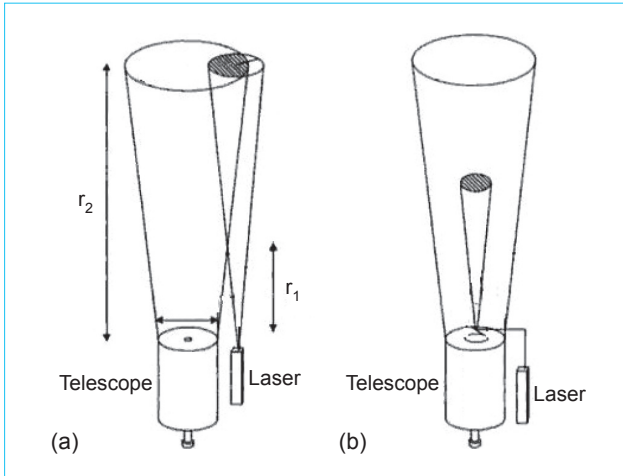


圖 5. 光學雷達系統之觀測視角示意圖。

軸與雷射光束同軸，如此可以改良固定式光學雷達系統因雷射光與望遠鏡非同光軸而出現測量死角之問題。如圖 5(a) 所示，在距離 r_1 內望遠鏡視野與雷射光束無法重合，因此無法量測光散射之訊號，若要訊號完全進入望遠鏡視野內，需高於 r_2 之高度。因此為減少測量死角，其雷射光路之設計需如圖 5(b) 所示，使雷射光束與望遠鏡之視野重合。

在接收系統中，設計一濾鏡載盤，並將光電倍增管裝設於濾鏡模組後方，此一濾鏡載盤設有多個濾鏡槽，此多個濾鏡槽同時分別置放不同頻寬之濾鏡，且濾鏡載盤可自動地轉動更換不同頻寬之濾鏡 (圖 4 紅框線內所示)，用以量測不同污染物之拉曼 (Raman) 位移波數。如此便可改良以往的光學雷達需依不同觀測目的，將光訊號加以分開以獲取所需資訊，而造成訊號減弱和光訊號接收設備也需隨著所增加的光訊號頻道個數而增加等問題。定向系統採用伺服運動控制，機構設計採用萬向式機構 (如圖 6 所示)，如此便可使光學雷達系統作全方位之掃描。

2. 光學雷達理論

光學雷達所收集到的大氣光散射訊號基本上正比於大氣中空氣分子與粒子的背向散射係數的總和。此外，雷射光在往返之間會被大氣吸收與散射，而隨著距離減弱，因此光學雷達系統所接收到的光散射訊號可用「光學雷達方程式 (LIDAR

equation)」來描述：

$$P_R(z) = P_L \frac{A_T}{z^2} \beta_{\text{atm}}(z) e^{-2\tau_{\text{atm}}(z)} \quad (1)$$

其中 P_L 和 P_R 分別代表發射與接收到的雷射光強度， A_T 為系統校正係數，包含望遠鏡與偵測器等光學、電子以及其他幾何上的因素， z 為高度/距離， β_{atm} 與 τ_{atm} 分別為大氣總背向散射係數和大氣光學厚度，包括空氣與氣膠的貢獻。

3. 差異吸收技術

對於污染物之成分與濃度則利用差異吸收技術 (differential absorption) 進行量測。差異吸收技術為目前量測微量氣體的技術之一⁽⁶⁾，其基本原理是利用待測物對不同雷射光波長有著差異吸收之特性，進而推算出待測物之濃度。若將待測物對某一雷射波長有較強之吸收，將此雷射波長標記為 λ_{ON} ，對吸收較弱的雷射波長標記為 λ_{OFF} ，根據兩個波長所量測強度 $P(\lambda_{\text{ON}}, z)$ 和 $P(\lambda_{\text{OFF}}, z)$ 可以得知區間距離 $z + \Delta z$ 之待測物濃度，其表示式如式 (2) 所示：

$$N(z) = \frac{1}{2\Delta\delta(T)} \left\{ \frac{d}{dz} \left[-\ln \frac{P(\lambda_{\text{ON}}, z)}{P(\lambda_{\text{OFF}}, z)} \right] + E_M \right\} \quad (2)$$

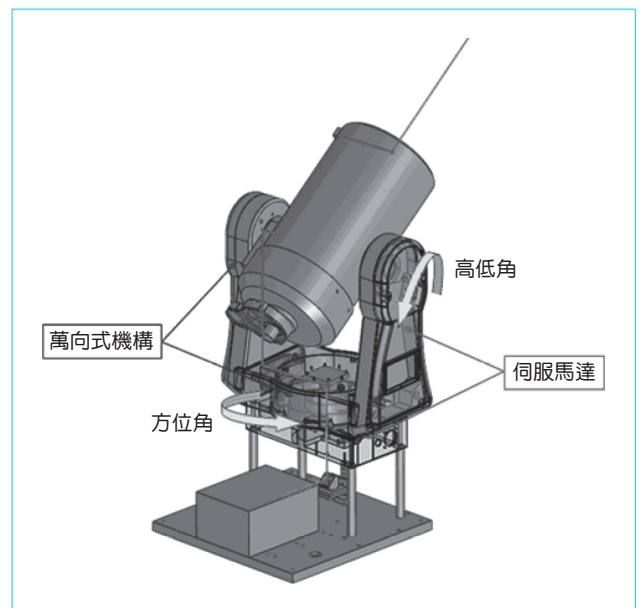


圖 6. 掃描式光學雷達系統之操作與雷射光路徑示意圖。

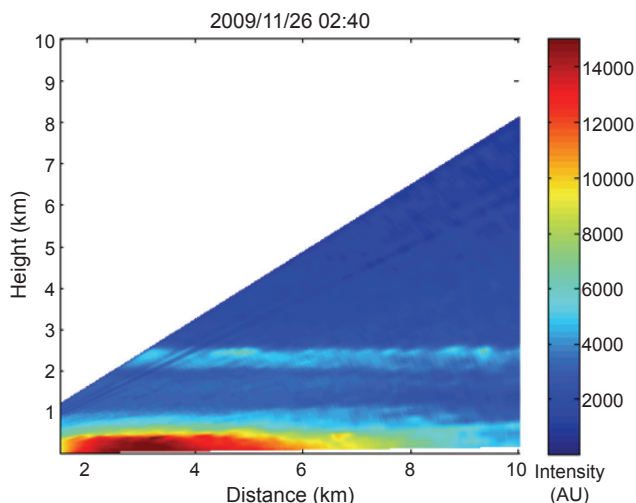


圖 7. 以掃描式光學雷達於 2009 年 11 月 26 日對大氣進行空間掃描之結果。

其中 $\Delta\delta(T) = \Delta\delta(\lambda_{ON}, T) - \Delta\delta(\lambda_{OFF}, T)$, $E_M = -2[\alpha_M(\lambda_{ON}, z) - \alpha_M(\lambda_{OFF}, z)]$, 式中 $\delta(\lambda_i, T)$ 為波長 $\lambda_{i = ON \text{ or } OFF}$ 、溫度 T 時待測物的吸收截面 (cross section), E_M 為大氣分子消光 (extinction) 修正項, $\alpha_M(\lambda_i, z)$ 為大氣分子對應於波長 λ_i 距離 z 和 $z + \Delta z$ 之間的平均消光係數。

由上述理論得知, 差異吸收技術需同時或交替發射兩束不同波長之雷射光, 由望遠鏡接收兩束不同雷射光經大氣介質吸收與散射後的背向散射訊號, 因此由這兩項背向散射訊號可以計算得到在雷射光束經過路徑上的待測物濃度。然而選擇量測待測物濃度之雷射波長, 需考慮待測物的測量精度與測量範圍、待測物對雷射光束吸收截面之差異, 以及其他大氣氣體分子對雷射光束吸收等因素。因此本系統研製裝填不同氣體 (如 CH_4 、 D_2 和 H_2 等) 之拉曼管 (Raman cell), 利用雷射激發 (pumping) 此等之拉曼管用以轉換雷射波長, 可對數種常見之大氣氣體或污染物如 O_3 、 SO_2 與 NO_2 等進行量測。

四、應用與討論

此掃描式光學雷達目前可針對氣膠粒子的大小、形狀和其在空間中之分布與傳輸、大氣的局部環流特性、邊界層高度演化、大氣溫度、水汽和污染物之成分與濃度等, 進行自動化空間與時間量測。本文列舉目前運用在大氣觀測上的一些例子。

1. 氣膠與雲之空間分布

光學雷達空間掃描結果如圖 7 所示, 為 2009 年 11 月 26 日晚間於中央大學的觀測結果, 此結果顯示光學雷達系統所掃描之物質空間分布, 其中色階為待測物的散射訊號強度與距離平方之乘積。由圖中回波強度說明薄雲層主要分布於高度 2–2.5 km 之間, 且其分布範圍綿延數十公里。而近地面之物質主要分布於 500 公尺以下, 這與中壢地區邊界層約 500 公尺之結果一致。由此掃描觀測可針對物質進行空間分布範圍與光學消光係數等資訊之建置。

2. 水汽與氣膠形狀之微物理作用

光學雷達在水汽量測上, 我們利用水汽和氮氣分子對雷射光產生的拉曼位移, 進而求得水汽的空間分布。詳細之理論與資料處理可參考文獻 7。而氣膠粒子形狀可利用散射光與入射光偏振方向垂直、平行的分量來鑑別, 這是由於單一分子散射的消偏振比值 (depolarization ratio, DR) 與分子偏振能力的非等向性 (anisotropy) 有關。若分子為等向性 (isotropic, 如水氣、氣膠), 則 $\text{DR} \sim 0$; 若分子為非等向性 (如冰晶、沙塵), 則隨著各種晶形的不同, 其消偏振的情形就更為複雜而有所差異, 其消偏振比值將比一般大氣分子大, 只要分析光學雷達背向散射訊號的消偏振比值, 就可得知沙塵粒子的型態^(8,9)。此偏振特性已經普遍地用於光學雷達對於沙塵的鑑別上。

圖 8 為 2009 年 3 月 14 日光學雷達所觀測中國北部而來之沙塵事件, 其觀測之背向散射訊號如圖 8(a) 所示, 氣膠粒子在高度上的分布有不連續的分層現象, 分別在高度 2 km 與 3 km 的地方, 下層 (2 km) 有較大的背向散射訊號, 是由於下層氣膠有較大的相對濃度或較大粒子之散射所造成。上層的消偏振比值為一常數值, 約 0.15, 下層氣膠初始之消偏振比超過 0.2, 隨著時間減少至 ~ 0.12 , 如圖 8(b) 所示, 因此推測上下兩層主要的成分應是沙塵顆粒。由圖 8(c) 之水汽混和比 (water mixing ratio, WMR) 我們發現上層氣膠中水汽的含量極低, 而下層氣膠的水汽含量會隨著時間逐漸增加, 氣膠的消偏振比值呈現遞減的趨勢, 推斷此現象應是由氣膠的吸濕成長 (hygroscopic growth) 所造成。由於

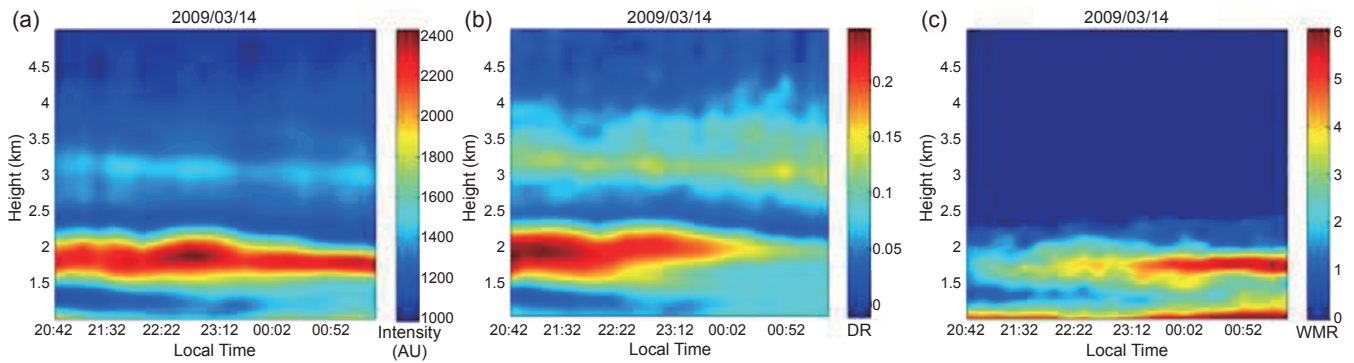


圖 8. (a) 光學雷達於 2009 年 3 月 14 日觀測氣膠背向散射訊號隨時間之變化，(b) 氣膠消偏振比 (DR) 隨時間之變化，(c) 和水汽混合比 (WMR) 隨時間之變化 (g/kg)。

隨著水汽增加，氣膠與周圍的水汽結合，使得外形變得較圓潤，因此消偏振比值減少。此個案說明氣膠粒子由於水汽之緣故，會造成不同的光學特性。

3. 臭氧 (O₃) 之量測

圖 9 為將 Nd:YAG 雷射的四倍頻波長 266 nm 激發裝填甲烷 (CH₄) 氣體之拉曼管，可產生 288 nm 之雷射光，利用此對雷射光束對 $\lambda_{i=ON}$ (266 nm) 和 $\lambda_{i=OFF}$ (288 nm) 對 O₃ 進行量測。由圖中垂直距離的 O₃ 觀測，與繫留氣球 (tethered balloon) 實際採樣的結果相似，顯示利用此光學雷達量測將是一個具效率、方便、且不受空間、時間與人力限制之方法。

由上述大氣觀測上之例子，證明此自行開發之系統具有環境保護與學術研究之價值。另外，本系統可配合許多其他系統進行大氣量測與監測，例如結合光譜分析儀進行大氣揮發性污染物 (volatile organic compounds) 變化之監測，或追蹤太陽，並利用太陽的全波段光譜，進行瞭解整個大氣懸浮微粒之消光、粒徑、濃度與折射率等。

五、結論

本研究中所自行開發之 3-D 掃描式光學雷達系統可具體改善以往監測儀器之若干缺點，如地面被動式分析儀器必須隨待測物體之分布空間作機動性之移動，方能進行有效取樣分析；地面被動式分析儀器無法確知待測體之空間、時間與濃度等特性的即時對應關係；和傳統雷射或雷達遙測系統之複雜結構、建置成本高、維護不易及系統體積龐大等

缺點。再者，此系統體積小、重量輕、拆裝方便，適合裝設於各種載具，期許未來能完成光學雷達車或飛機，並建置自動化定點式之光學雷達網，達到全方位之監測與資料連結，即時監控我國境內大小工業區所產生之空氣污染，使相關單位能儘速阻絕污染物，保障人民健康，和提供更多參考資訊，讓相關單位可用以擬定相關管政策和維護空氣品質。

誌謝

筆者感謝國科會經費之補助和達奈美克 (DMARK) 科技有限公司所提供之模具開發與設計。

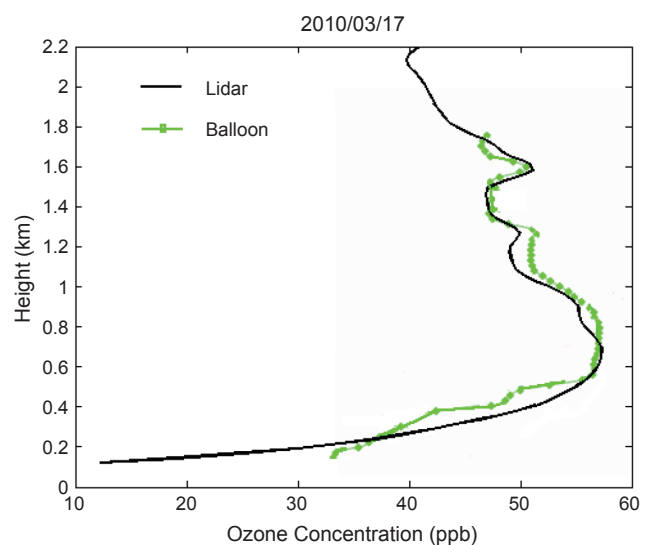


圖 9. 大氣臭氧垂直量測，黑實線為光學雷達之量測結果，綠方塊線為繫留氣球之觀測結果。

參考文獻

1. R. J. Charlson, S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley, J. E. Jr., Hansen, and D. J. Hofmann, *Science*, **255**, 423 (1992).
2. S. Twomey, *Atmos. Env.*, **25**, 2435 (1991).
3. C. C. Chan, K. J. Chuang, L. C. Chien, W. J. Chen, and W. T. Chang, *EHJ*, **27**, 1238 (2006).
4. J. A. Steven, J. M. Haywood, E. J. Highwood, J. Li, and P. R. Buseck, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1783 (2003).
5. F. J. McClung and R. W. Hellwarth, *J. Appl. Phys.*, **33**, 828 (1962).
6. K. Fredriksson, B. Galle, K. Nystrom, and S. Svanberg, *Appl. Opt.*, **18**, 2998 (1979).
7. C. W. Chiang, S. K. Das, J. B. Nee, S. X. Hu, and H. L. Hu, *JASTP*, **71**, 1389 (2009).
8. T. Murayama, H. Okamoto, N. Kaneyasu, H. Kamataki, and K. Minra, *J. Geophys. Res.*, **104**, 31781 (1999).
9. V. Noel, H. Chepfer, G. Ledanois, A. Delaval, and P. H. Flamant, *Appl. Opt.*, **41**, 4245 (2002).



江智偉先生為國立中央大學物理博士，現任中央研究院環境變遷研究中心博士後研究員。

Chih-Wei Chiang received his Ph.D. in physics from National Central University. He is currently a post-doctoral researcher at Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica.



達斯先生為國立中央大學物理研究所博士班學生。

Subrata Kumar Das is a Ph.D. student in the Department of Physics at National Central University.



廖煌時先生為國立嘉義大學光電碩士，現任國立中央大學物理研究所研究助理。

Huang-Shih Liao received his M.S. in optoelectronics from National Chiayi University. He is currently a research assistant in the Department of Physics at National Central University.



倪簡白先生為美國密西根大學化學博士，現任國立中央大學物理研究所教授。

Jan-Bai Nee received his Ph.D. in chemistry from the University of Michigan, USA. He is currently a professor in the Department of Physics at National Central University.