



REMOTE SENSING MEDIANTE LIDAR EN LA UPC

F. Rocabosch, M. Sicard, A. Comerón, A. Rodríguez, C. Muñoz,
M.A. López, D. García, R. Agishev

Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC), UPC. ETSETB, Módulo D4, Desp. 016. Email:
roca@tsc.upc.es; msicard@tsc.upc.es; comeron@tsc.upc.es

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas LIDAR (acrónimo de Light Detection And Ranging) permiten el sondeo de la atmósfera (aunque no necesariamente limitado a éste) mediante haces láser.

El sondeo remoto de la atmósfera mediante haces de luz (grandes reflectores) antecede la propia invención del láser. Fue, sin embargo, el nacimiento de este último en los años 1960, el que, ofreciendo anchos espectrales muy reducidos (< 0.01 nm) y una directividad sin precedentes, supuso un gran avance para estas técnicas de teledetección activa. Así, en 1962, Fiocco y Smullin [1] rebotaron por primera vez un haz láser en la Luna: Había nacido el LIDAR... Ese mismo año, McClung y Hellwarth inventaban el Q-switch, tecnología que permitía generar pulsos de luz muy cortos (≈ 10 ns) y con elevadas energías de pico (≈ 1 J), lo cual se traduce en potencias pulsadas del orden de 100 MW. Posteriormente, en 1973, ya se tiene constancia de un primer lidar utilizando un láser semiconductor de AsGa [2].

En la actualidad, los sistemas lidar (Fig. 1) representan la contrapartida más cercana a los radares de microondas, con la salvedad que la radiación de RF se ha sustituido por otra en las bandas ópticas y que las resoluciones espaciales resultan muy superiores, del orden de unos pocos metros. El espectro de longitudes de onda de trabajo puede comprender desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR).

Como una realidad imparable, los sistemas lidar están empezando a reemplazar los sensores *in situ* (p.ej., sondas locales tales como anemómetros, higrómetros y termómetros) y radiosondas (instrumentos embarcados en globos sondas controlados por radio) [3][4].

Las aplicaciones de los sistemas lidar son enormes y comprenden desde ambiciosos proyectos espaciales como LAWS (Lidar Atmospheric Wind Sounder, NASA) y ALADIN (Atmospheric LAsEr Doppler INstrument, ESA) orientados a realizar mapas de viento a escala mundial, hasta sistemas terrestres y embarcados (diversos proyectos en el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y en la UE fruto de diversos Programas Marco de I+D e iniciativas privadas) que abarcan tanto aplicaciones meteorológicas como medioambientales:



Figura 1. Primera estación lidar UPC, operación nocturna (1996, V. Sec.2.1)

Las primeras utilizan los lidares para derivar la densidad de aerosoles, velocidad y dirección del viento (el estado del arte actual permite alcances en torno a 20 km de altura con resoluciones mejores de 3 m/s) [5], concentración de especies químicas (con lo que ello supone desde el punto de vista regulador), variables físicas (en particular, perfiles de temperatura hasta unos 100 km de altura con precisiones de 1 K) y estudios ceilometría (altura y espesor de nubes, por la importancia de éstas en el balance radiativo tierra-atmósfera).

En el campo medioambiental, los sistemas lidar permiten detectar y monitorizar la dispersión de aerosoles (Fig. 2) y efluentes contaminantes como O_3 , SO_2 , NOX (óxidos de nitrógeno), CO, CO_2 , H_2S , CH_4 y C_6H_6 , entre otros, emitidos desde plantas industriales y químicas hasta el receptor crítico, a distancias típicas de 5 km, con sensibilidades de unas pocas ppb -partes por billón- y resoluciones de 10 m. Los lidares embarcados en barcos y helicópteros también ofrecen interesantes aplicaciones de batimetría láser (estudio del fondo marino) en regiones costeras.

En condiciones climáticas adversas como las que se dan bajo intensa niebla o nubes bajas, los lidares no pueden operar debido a la elevada extinción atmosférica. Sin embargo, cuando éstos se combinan con instrumentación «cooperativa» como redes de satélites, radares y sensores locales, es posible implementar redes de observación a escalas incluso continentales (con resoluciones y

sensibilidades muy notables) y acercarse a lo que viene en llamarse «all weather sounding» (sondeo en «casi» cualquier condición climática) [6].

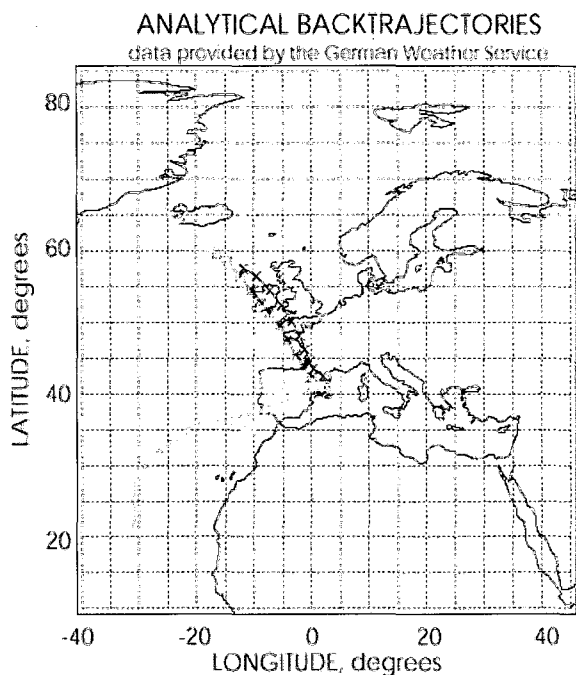


Figura 2. Mapa de trayectorias representativo de los distintos flujos de aerosoles y sus orígenes con destino Barcelona. Cada marca representa un retroceso de 6h (hasta 96 h en total) y cada color un origen o especie diferenciada (cortesía del German

2.SISTEMAS LIDAR

Los radares láser atmosféricos o lidar se basan en la interacción entre el haz láser emitido (generalmente pulsado) y los aerosoles y moléculas atmosféricas. Esta interacción se haya sujeta a las leyes de dispersión o scattering (Rayleigh, Mie y Raman, principalmente) y de absorción, de forma que esta interacción se manifiesta en una extinción o pérdida exponencial de energía conforme el haz láser se propaga por la atmósfera de acuerdo con la ley de Beer (también conocida como ley de Bouger). Así, la intensidad de un haz propagándose en la dirección r en un medio inhomogéneo entre $r=0$ y $r=R$ viene dada por

$$\frac{I(\lambda)}{I_0} = T(\lambda, R) = \exp\left[-\int_0^R \alpha(r, \lambda) dr\right] \quad (1)$$

donde I_0 es la intensidad inicial en $r=0$, I es la intensidad en $r=R$, λ es la longitud de onda de trabajo, α es el coeficiente de extinción atmosférico [km^{-1}] y $T(\lambda, R)$ es la transmitancia en $[0, R]$. Es evidente que la extinción atmosférica condiciona los parámetros de diseño del lidar en un doble sentido:

Por un lado, es necesario aprovechar las ventanas espectrales de transmisión de la atmósfera a fin de que el haz láser no se vea muy atenuado (ventanas en $0.4-0.7 \mu\text{m}$ (visible), $0.7-1.5$ (infrarrojo cercano, NIR), y ventanas en $3-5 \mu\text{m}$ y $9-13 \mu\text{m}$), lo cuál condiciona a su vez la disponibilidad de láseres y tecnologías adecuadas para cada aplicación lidar, en particular, que sean seguros ocularmente ($>1.4 \mu\text{m}$, como es el caso de los láseres a $1.55 \mu\text{m}$). En recepción, los lidares utilizan un telescopio a modo de «antena óptica» seguida de un sistema optoelectrónico de detección, el cuál componen fotodetectores que también deberán ser adecuados a la banda o subbanda de interés (PMTs (típ. $0.2-0.7 \mu\text{m}$), PINs y APDs (típ. $\lambda > 0.8 \mu\text{m}$), VAPDs, detectores térmicos, etc.).

Por otro, hay que notar que la extinción es el resultado combinado de tres procesos que actúan simultáneamente en la atmósfera: a) absorción de energía por parte de las moléculas presentes, b) dispersión o scattering molecular y, c) dispersión por parte de partículas (aerosoles) en suspensión. Formalmente,

$$\alpha = \alpha_{g,abs} + \alpha_{g,sca} + \alpha_{p,sca} \quad (2)$$

donde el subíndice «g» indica gases (componente molecular), «p» partículas (aerosoles), «abs» absorción y «sca» scattering. En consecuencia, la longitud de onda de operación del instrumento lidar debe elegirse adecuadamente para magnificar la interacción óptica de interés. Además, esta interacción podrá ser elástica o inelástica, según que la longitud de onda en recepción coincida o no (caso del scattering Raman) con la del láser emisor.

Con estas premisas, para un sistema lidar elástico o backscatter lidar, la ecuación lidar toma la forma [7]

$$P(\lambda, R) = \frac{K(\lambda)}{R^2} \beta(\lambda, R) T(\lambda, R)^2 \xi(R) \quad (3)$$

donde $P(R)$ es la potencia recibida en función de la distancia, $T(\lambda, R)$ es la transmitancia atmosférica (Eq.(3)) en el camino de ida del haz láser (el cuadrado asimila los caminos de ida y vuelta), $\beta(\lambda, R)$ es el coeficiente de retrodispersión (o backscatter) atmosférico [$\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$], que no es más que una «reflectividad» a la longitud de onda λ (específicamente, la sección recta de retrodispersión por unidad de volumen y ángulo sólido), $K(\lambda)$ es un factor de calibración función de la energía emitida y área equivalente en recepción y, $\xi(R)$ es un factor de corrección que tiene en cuenta el solapamiento óptico en función de la distancia R entre la sección recta iluminada por el láser y la verdaderamente captada por el telescopio dentro de su campo de visión (V. detalle en Fig. 3).

2.1. Sistemas elásticos

Como se ha dicho, en un sistema elástico o *backscatter lidar*, las longitudes de onda emitida y recibida coinciden, de forma que la interacción entre el haz láser y la atmósfera es relativamente fuerte. Si bien este hecho no permite identificar especies químicas, el retorno recibido en condiciones de buena visibilidad es básicamente proporcional a la mezcla de aerosoles y partículas en suspensión, lo cual es con todo suficiente para, mediante una arquitectura relativamente poco compleja, invertir parámetros medioambientales básicos tales como la altura de la capa de mezcla (o PBL, una capa formada por aerosoles bien mezclados que se extiende desde el suelo hasta unos 2-3 km de altura y muy influenciada por los ciclos diurnos/nocturnos, vientos y fenómenos de transporte como, por ejemplo, las inyecciones de masas debidas a incendios y a invasiones de polvo en suspensión), concentración/flujo de aerosoles en efluentes tales como chimeneas, intensidad de lluvia, nieve, etc. [8].

La Fig. 3 muestra la arquitectura de los diferentes subsistemas de emisión y recepción partiendo de la que ya en 1996 fue la primera estación lidar fija de la UPC. Estos se distribuían entre la cúpula y la sala de control (localizada en la tercera planta del edificio D3). El sistema emisor estaba basado en un láser de estado sólido (Nd:YAG, sala de control) que emitía pulsos de 10 ns de anchura y unos 400 mJ de energía a 532 nm (verde) con una frecuencia de 10 Hz (obsérvese que estas especificaciones se traducen en potencias de pico de 40 MW; el haz láser podía verse fácilmente desde la Pza. M^a Cristina en la Av. Diagonal de Barcelona). El sistema receptor propiamente dicho se localizaba en la cúpula y estaba formado por un telescopio Schmidt-Cassegrain de 20 cm de apertura y 2 m de distancia focal y un receptor optoelectrónico que, ensamblado en el plano focal de aquél y en sustitución su ocular, transducía las señales ópticas recibidas (Eq.(3)) en eléctricas. La cúpula también albergaba diversa instrumentación de polarización y monitorización. Finalmente, la sala de control alojaba, además de la fuente láser emisora, el equipo de adquisición y control, que digitalizaba las señales recibidas a 20 Msps (esto se traduce en resoluciones espaciales tan impresionantes como 7.5 m) y controlaba diversos subsistemas, el propio láser y un generador de retardo a modo de unidad de sincronismo. El haz láser se dirigía verticalmente mediante un espejo deflector en la misma sala y el sistema tenía un alcance máximo ($SNR(R_{max})=1$) de unos 15 km en condiciones de buena visibilidad ($\alpha \approx 0.01 \text{ km}^{-1}$) y 5 s de integración de pulsos. El sistema de control (implementado en LabView[®]) ya permitía extraer semicuantitativamente las características atmosféricas más significativas en tiempo real a partir de un simple procesado de la forma $R^2 \cdot P(R)$ sobre la Eq.(3), como se muestra en la Fig. 4. A diferencia de los sistemas elásticos más clásicos como el descrito, que utilizan pulsos muy cortos de alta energía para interrogar la atmósfera, la tendencia tecnológica

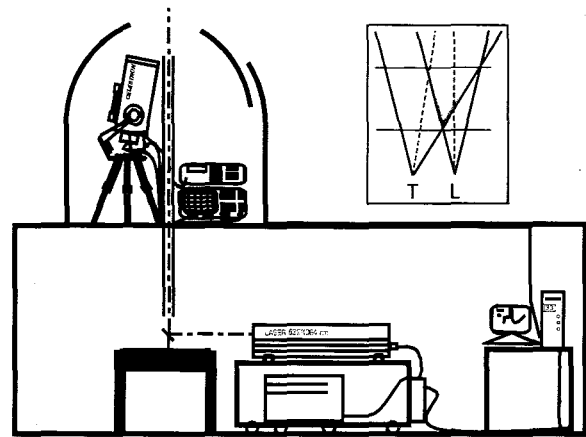


Figura 3. Esquema de la estación lidar elástica de la UPC (1996) mostrada en la Fig. 1 (y V. Sec.2.1).

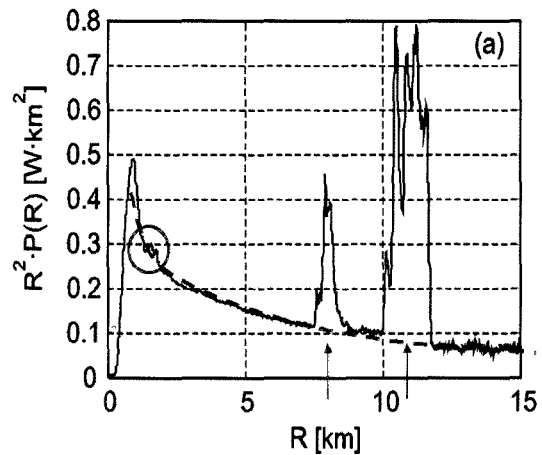


Figura 4. Ejemplo de una señal lidar corregida en distancia. En trazo discontinuo, retorno Rayleigh debido a la concentración de moléculas en la atmósfera. Las flechas indican la presencia de dos capas de nubes localizadas entre 7.5-9 km y 10-12 km, respectivamente, y el círculo una inhomogeneidad en la capa de mezcla debida a la advección de aerosoles a unos 2 km de altura.

actual es hacia lo que se conoce como *microlidares*, sistemas pseudoaleatorios de baja potencia, que básicamente modulan la portadora óptica mediante secuencias pseudoaleatorias con determinadas propiedades de ortogonalidad y que merced a este esquema de modulación evitan tener que utilizar potencias pico tan elevadas en emisión [9]. Esta nueva concepción y tecnologías electrónicas basadas en ASICs permiten diseñar sistemas de bajo coste, de menor volumen y *eye-safe* (seguros ocularmente), basados enteramente en tecnologías semiconductoras. La Fig. 5 muestra una escena obtenida con un lidar elástico de este tipo, de forma que cada columna de pixels no es más que un registro de datos como el de Fig. 4, orientado verticalmente y procesado con un mapa de color apropiado.

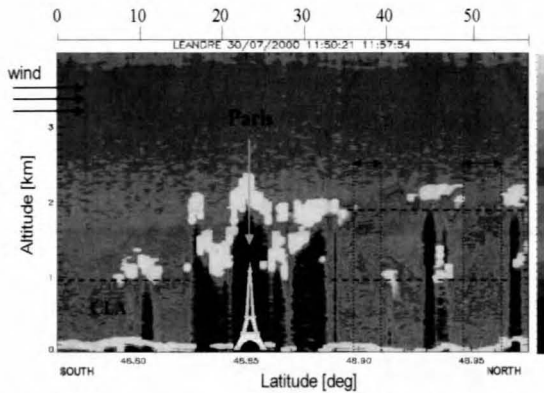


Fig. 5 Mapa de concentración de aerosoles (altura vs. latitud) en el área metropolitana de París sondeada mediante un microlidar backscatter embarcado en avión. La escala de colores representa la concentración de aerosoles (a.u.). Alrededor de la ciudad, la contaminación proporciona retornos máximos (en color blanco).

2.2 Medida de campos de viento

El principio operacional que utilizan estos sistemas lidar es la medida de la velocidad radial del viento a partir de los retornos que proporcionan las partículas atmosféricas en suspensión (polvo, polen, etc., típicamente de unas 2-3 μm de diámetro) y que actúan como «trazadores».

Puesto que las medidas que proporcionan los lidars de viento están resueltas en distancia (esto es, p.ej. cada cincuenta de metros se invierte el vector velocidad del viento), estos lidars encuentran aplicaciones no sólo en el campo meteorológico y medioambiental, en este último caso como predictores de los flujos de transporte de polución o como feedback de modelos software de mesoescala (una de las principales líneas de investigación de los centros de modelización medioambiental), sino también en los aeropuertos, como sistemas de alerta temprana de fenómenos de cizalladura de viento, cuyos efectos son potencialmente catastróficos en las maniobras de aproximación a tierra de los aviones.

La arquitectura de los lidars de viento comprende tanto sistemas coherentes como incoherentes para medir el desplazamiento Doppler,

$$f_d = -\frac{2v_r}{\lambda} \quad (4)$$

donde v_r es la velocidad de las partículas dispersoras, λ es la longitud de onda y f_d es el desplazamiento Doppler.

Como se sabe, la detección coherente implica la mezcla de la señal láser recibida de la atmósfera con la del propio láser emisor (oscilador local) a la misma frecuencia (detección homodina) u otra desplazada un cierto offset (mediante moduladores acustoópticos) respecto de la original, dando lugar entonces a una frecuencia intermedia

(detección heterodina), que facilita la información de sentido de la velocidad radial, v_r .

En principio, en 1964, Foreman y Huffaker [10] realizaron las primeras medidas Doppler de viento experimentales mediante un láser de CO_2 ($\lambda=10.59 \mu\text{m}$) pero no es hasta 1992 cuando aparece el primer sistema de Doppler lidar comercial capaz de medir velocidades y direcciones de viento entre 30 y 3000 m con precisiones de 1 m/s, resoluciones espaciales de 150 m y 5 minutos de integración [5]. Con todo, hoy por hoy, cabe decir que se trata de sistemas muy caros y con un know-how procedente de centros de investigación gubernamentales.

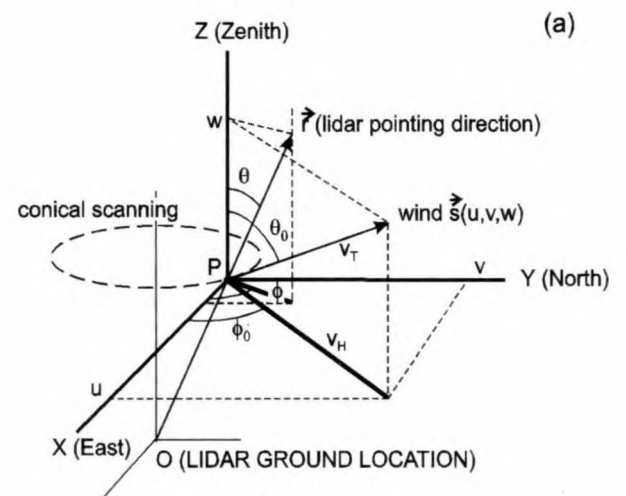


Figura 6. Ejemplo de operación de un lidar Doppler de medida de velocidad del viento. El sistema de localiza en O y realiza un scan cónico de la atmósfera de forma que en $t=t_0$ apunta según r . El vector velocidad del viento es s . Puesto que en cada instante de tiempo, la velocidad radial medida por el sistema no es más que la proyección de s sobre r , es posible determinar las tres componentes de velocidad del viento (adaptado de [6]).

Los sistemas coherentes suelen operar en la banda de 9-10 μm (láser de CO_2) y en menor grado en la banda «eye-safe» de 2 μm (láseres Tm:YAG) ya que las longitudes de onda más largas permiten mayores purzas espectrales y se reducen los efectos de la turbulencia atmosférica (básicamente, turbulencia fruto de las fluctuaciones del índice de refracción que se traducen en pérdidas de la coherencia de la señal y, consiguientemente, en menores eficiencias de mezcla en el sistema Doppler).

La Fig. 6 muestra una técnica de escaneado cónico de la atmósfera que permite recuperar las tres componentes de velocidad del viento y la Fig. 7 un mapa de la velocidad radial con indicación de sentido.

El procesado de la señal Doppler es complejo y se ve especialmente dificultado por el hecho que, a diferencia de lo que ocurre en radares de medida de viento (de microondas), que utilizan frecuencias órdenes de magnitud por debajo de las ópticas, no es posible determinar el

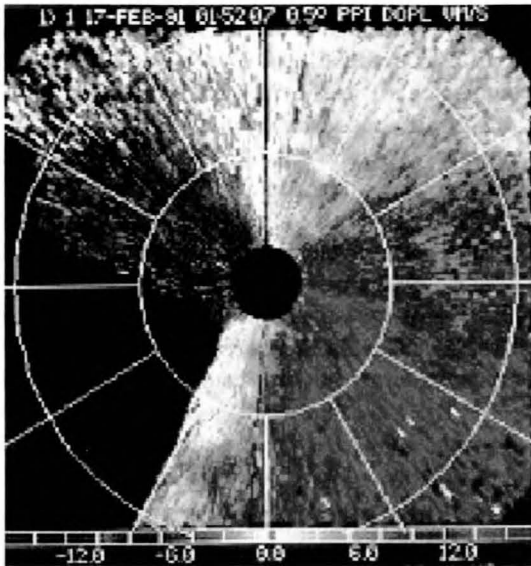


Figura 7. Ejemplo de un mapa PPI de velocidad del viento. El lidar se localiza en el origen. La escala de color representa velocidades radiales desde -12 m/s (entrantes) hasta $+12$ m/s (salientes) [11].

desplazamiento Doppler f_d a partir de la variación de fase

ϕ entre pulsos recibidos ($f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$) sino que es preciso

determinarla a partir de la información contenida de cada pulso individual, aislado. Esto es debido a que la coherencia temporal (el tiempo de correlación que tardan las partículas atmosféricas dispersoras en reorganizarse a partir de un estado de fase definida cuando fueron excitadas por la onda incidente) a frecuencias ópticas es comparativamente mucho menor. Como resultado, para invertir la velocidad es preciso utilizar técnicas avanzadas de estimación espectral como el periodograma o estimadores de covarianza, entre otros [6].

Existen también sistemas que permiten detectar el desplazamiento Doppler mediante técnicas de detección directa o interferométrica. Entre ellas cabe citar la *edge technique* (ET) [12] y la *fringe-technique* (FT) [13], respectivamente. La primera utiliza un interferómetro Fabry-Pérot a modo de «filtro paso banda» de forma que, cualitativamente, cuando el retorno Doppler se posiciona en el HHFW (half-height full width) de la curva de transmisión del filtro (banda lateral), las variaciones de frecuencia se traducen en variaciones de amplitud, construyendo de esta forma el transductor básico f_d -amplitud (algo similar al principio de los primeros detectores de FM haciendo un paralelismo con el mundo de la RF). El grupo lidar de TSC se encuentra actualmente trabajando en esta técnica de detección. La segunda técnica mencionada (FT) utiliza patrones de anillos interferentes como técnica básica de detección una reminiscencia de los conocidos anillos de Newton (...).

Finalmente, también es posible realizar medidas de campos de viento mediante sistemas lidar elásticos incoherentes como el descrito en la Sec.2.1, aunque con menores resoluciones, utilizando técnicas de correlación cruzada a partir de las inhomogeneidades detectadas en dos o más escenas adquiridas sucesivamente (a modo de «fotos» o «snapshots») [14].

2.3. Sistemas Raman, DIAL y otros

Existen por lo menos dos grandes categorías de sistemas lidar basados en técnicas inelásticas o absorción con importantes aplicaciones prácticas:

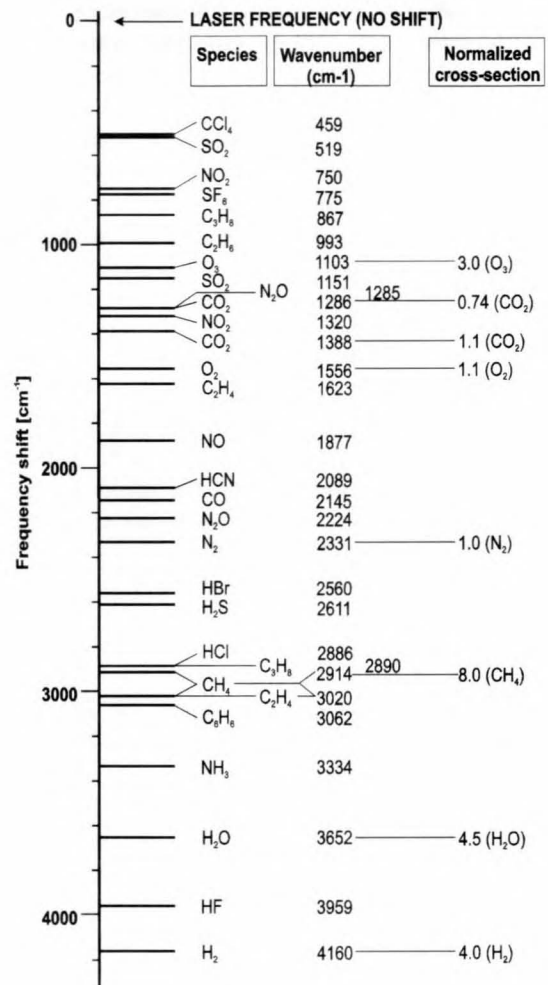


Figura 8. Desplazamientos frecuenciales por efecto Raman de diversas especies químicas típicamente presentes en una atmósfera contaminada y secciones rectas normalizadas a la del N₂ (adaptado de [16]).

a) *Sistemas lidar Raman*, que formalmente son sondas espectroscópicas de moléculas y átomos que permiten identificar el tipo de especie química detectada [15], perfiles de temperatura y de concentración de vapor de agua. La potencialidad de estos sistemas desde el punto de vista de monitorización y detección de fugas en plantas químicas y petroquímicas es pues enorme. A diferencia

de lo que ocurría con los sistemas elásticos en que la longitud de onda en recepción era la misma que en emisión, el campo dispersado por efecto de la interacción Raman con la atmósfera, se produce a una longitud de onda *desplazada* κ ($\kappa=1/\lambda$ [cm^{-1}], «wavenumber» en Fig. 8) con respecto de la emitida, de forma que este desplazamiento es propio de cada molécula o átomo, de ahí las enormes posibilidades de esta técnica para la identificación molecular de compuestos químicos.

b) *Sistemas DIAL (Differential Absorption Lidar)*. Como su nombre sugiere, el principio de medida es de naturaleza diferencial, de forma que utilizan dos (o más) longitudes de onda sintonizables, una absorbida por el gas o especie química a detectar y la otra (habitualmente próxima en longitud de onda) no [17]. La principal ventaja de estos lidares frente a los Raman yace en su gran sensibilidad (del orden de 10^4 - 10^5 veces mayor en el caso de la detección de CO) y en el hecho que el procedimiento de medida diferencial tiende a cancelar errores instrumentales. Los alcances típicos son de algunos kilómetros y, desde 1990 se existen equipos comerciales a bordo de furgonetas, que realizan medidas en terminales de gas y petrolíferos por diversos puntos de Europa.

3. SISTEMA LIDAR 3D DE LA UPC

Desde 1993, se han desarrollado dos grandes sistemas lidar en la UPC. El primero de ellos, un sistema lidar elástico (*o backscatter*) operando a 532 nm a modo de estación fija, ya ha sido presentado en la Fig. 1 y Fig. 3 y Sec.2.1.

El segundo, cuya construcción se inició en 1997 y que parte de una concepción modular a fin de hacerlo fácilmente transportable en diversas campañas de medidas por Europa, tiene como objetivo desarrollar un sistema lidar multilongitud de onda, dos de ellas elásticas (V. Sec.2.1) y una tercera (en recepción) inelástica Raman (V. Sec.2.3) [18]. Además, el sistema cuenta con capacidad para escanear en tres dimensiones (barridos en acimut y elevación con resoluciones de 30'' de arco) a partir de un editor vectorial de movimientos (en desarrollo). La iniciativa es fruto del V Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de UE (en el marco del proyecto europeo EARLINET) y de diversos proyectos de ámbito nacional y autonómico (CICYT, CIRIT, V. Sec.5).

Es evidente que cualquier proyecto como EARLINET [8], en el que participan más de una veintena de estaciones lidar operando coordinadamente en toda Europa (un mínimo de tres medidas regulares por semana), debe orientarse a la creación de valores añadidos en forma de desarrollo de curva de experiencia tecnológica y consolidación de equipos de trabajo pluridisciplinares en tecnologías punta, máxime en un marco globalizador e

integrador como el actual. En esta línea, las principales orientaciones del lidar-Raman 3D en desarrollo son hacia el campo meteorológico y de monitorización medioambiental (Sec.1), en particular, el establecimiento de una base de datos estadística a escala continental, que cuantificará las emisiones biogénicas y antropogénicas de aerosoles y su impacto ambiental.

La arquitectura del sistema (actualmente en su fase final de desarrollo) se ilustra en la Fig. 10 y ha reunido un amplio equipo investigador del grupo EEF (Enginyeria Electromagnètica i Fotònica, TSC) y la colaboración de más de una treintena de proyectos fin de carrera (PFC).

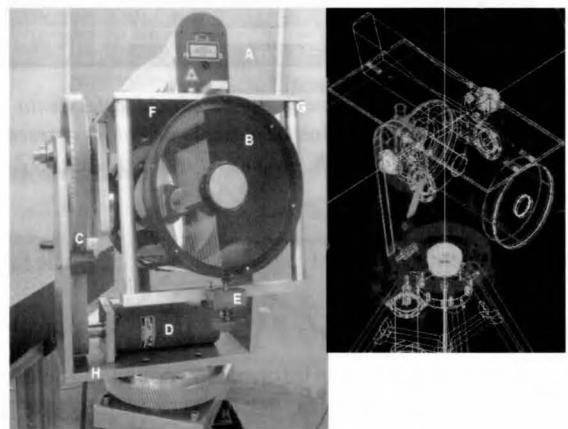


Figura 9. Vista frontal del actual sistema lidar-Raman 3D de la UPC.

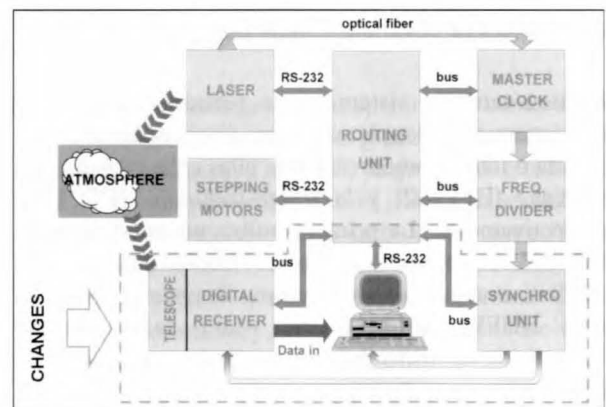


Figura 10. Arquitectura del sistema lidar-Raman 3D de la UPC. Basada en un sistema de control distribuido (multiprocesador), integra básicamente dos receptores digitales (canales elásticos de recepción), un contador fotónico (para el canal Raman), motores paso a paso y un complejo sistema de control, enrutamiento y monitorización de los diversos subsistemas.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Smullin, L. D.; Fiocco, G. Optical echoes from the moon. *Nature* **1962**, *194*, 1267-1267.
- [2] Brown, R. T. A New Lidar for Meteorological Application. *J. Appl. Meteorol.* **1973**, *12*, 698-708.
- [3] Collis R. T. H.; Russell, P. B. Lidar Measurement of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption. In *Laser Monitoring of the Atmosphere*; Hinkley, E. D., Ed.; Springer-Verlag: New York, 1976; Chap. 4, 71-102.
- [4] Measures, R. M. Interaction and Propagation of Radiation. In *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*; Krieger Publishing Co.: Malabar, Florida, 1992; 138-145.
- [5] Roux, R. Cooperative ventures monitor atmospheric conditions. *Laser Focus World* **1994**, *30* (8), S7-S9.
- [6] Clifford, S. T.; Kaimal, J. C.; Lataitis, R. J.; Strauch, R. G. Ground-Based Remote Profiling in Atmospheric Studies: An Overview. *Proc. IEEE* **1994**, *82* (3), 313-355.
- [7] Collis, R.T.H. Lidar: a new atmospheric probe. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **1966**, *92*, 220-230.
- [8] Bösenberg, J.; Ansmann, A.; Baldasano, J. M.; Balis, D.; Böckmann, C.; Calpini, B.; Chaikovsky, A.; Flamant, P.; Hägard, A.; Mitev, V.; Papayannis, A.; Pelon, J.; Resendes, D.; Schneider, J.; Spinelli, N.; Trickl, T.; Vaughan, G.; Visconti, G.; Wiegner, M. EARLINET: A European aerosol research lidar network. In *Proc. 20th International Laser Radar Conference (IPSL)*, Vichy (France), July 10-14, 2000; Pelon, J., Dabas, A., Loth, C., Eds.; IPSL (Institut Pierre Simon Laplace): 2000; Session 2 (Aerosol Properties and Radiation Budget (ARB)), paper 4.
- [9] Takeuchi, N.; Sugimoto, N.; Baba, H.; Sakurai, K. Random modulation CW lidar. *Applied Optics* **1983**, *22* (9), 1382-1386.
- [10] Huffaker, R. M. CO₂ laser Doppler systems for the measurements of atmospheric winds and turbulence. *Atmospheric Technology Journal* **1974-1975**, *winter*, (issue 6), 71-76.
- [11] Darby, L.S., Neff, W.D., Banta, R.M. «Multiscale analysis of a meso-beta frontal passage in the complex terrain of the Colorado Front Range.» *Mon. Wea. Rev.* **127**, 2062-2081 (1999).
- [12] McKay, J. A. Modelling of direct detection Doppler wind lidar: I. The edge technique. *Appl. Opt.* **1998**, *37*(27), 6480-6486.
- [13] McKay, J. A. Modelling of direct detection Doppler wind lidar: II. The fringe technique. *Applied Optics* **1998**, *37*(27), 6487-6493.
- [14] Eloranta, E. W.; King, J. M.; Weinman, J. A. The determination of wind speeds in the boundary layer by monostatic lidar. *J. Appl. Meteorol.* **1975**, *14*, 1485-1489.
- [15] Inaba, H.; Kobayasi, T. Laser-Raman Radar. *Opto-electronics* **1972**, *4*, 101-123.
- [16] Inaba, H. Detection of Atoms and Molecules by Raman Scattering and Resonance Fluorescence. In *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Hinkley, E. D., Ed.; Springer-Verlag: New York, 1976; Chap. 5, 153-236.
- [17] Rothe, K. W.; Brinkman U.; et al. Remote Sensing of NO₂ Emission from a Chemical Factory by the Differential Absorption Technique. *Appl. Phys.* **1974**, *4*, 181-182.
- [18] Rocadenbosch, F. et al. 3D Scanning Portable Backscatter Lidar Platform for Atmospheric Remote Sensing: Performance and Architecture overview. In *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere V*, EUROPTO 2000, Barcelona, Sept. 26-28, 2000; Russell, J.E., Schäfer, K., Lado-Bordowsky, O., Eds.; SPIE: Bellingham, Washington, 2001; Proc. 4168, pp. 158-169.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de los siguientes entes: CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) bajo los proyectos TIC 431/93, AMB96-1144-C02-C01, TIC99-1050-C03-01, REN2000-1907-CE y REN2000-1754-C02-02/CLI, Ministerio de Educación y Cultura bajo la acción Hispano-Francesa HF1997-0212, CIRIT (Comisión Interdepartamental de Investigación e Innovación Tecnológica) y Dep. de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya bajo el proyecto IMPACTE y Comisión Europea bajo el proyecto EVR1-CT-1999-40003 EARLINET.

AUTORES



Francesc Rocadenbosch nació en Barcelona en 1967. Ingeniero Superior en Telecomunicación (1991) y Doctor Ingeniero (1996) por la Universidad Politécnica de Cataluña inició su carrera profesional en 1991, en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, donde colaboró en el diseño de sistemas de alta frecuencia y microondas, y posteriormente, en 1993, la continuó como profesor del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones (UPC), de la que actualmente es profesor Titular de Universidad desde 1997. Premio al mejor Proyecto de Investigación en Cataluña (ACET, 1999) y máster en Administración y Dirección de Empresas (MBA) por la Universidad de Barcelona (2001), desde 1993 ha desarrollado una intensa actividad investigadora en el campo de los radares láser y la optoelectrónica a nivel internacional, donde ha participado en más de una decena de proyectos. Miembro de la Optical Society of America, es autor de numerosas publicaciones internacionales y revisor de diversas revistas de ingeniería óptica y procesado de la señal. Sus intereses actuales comprenden el diseño de sistemas de radar láser (lidar) de baja energía, receptores de altas prestaciones y técnicas de procesado en teledetección láser.