

# Sistema lidar elástico incoherente para sondeo de la atmósfera

Francesc Rocadenbosch, Carles Puente, Adolfo Comerón, Alejandro Lansac, Xavier Fábregas, Alejandro Rodríguez  
GRUPO DE INGENIERÍA ELECTROMAGNÉTICA Y FOTÓNICA (D3-EEF), DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA  
CAMPUS NORD UPC. *cf.* JORDI GIRONA 1 y 3. 08034 BARCELONA  
Correo electrónico: roca@voltor.upc.es

## Abstract:

The main features of the incoherent elastic lidar operating at the premises of the Department of Signal Theory and Communications' Electromagnetic and Photonics Engineering Group, in the Campus Nord of the Polytechnic University of Catalonia, are presented. The system is able to detect atmospheric aerosols (dust, haze, smoke...) and to provide data about the structure of clouds. Its performance is shown in the form of results concerning the measurement of atmospheric extinction and backscatter coefficients for several atmospheric conditions.

## 1. Introducción.

Un radar láser o lidar (de *light detection and ranging*) atmosférico utiliza la interacción relativamente fuerte entre la energía electromagnética a longitudes de onda ópticas y las partículas en suspensión y los constituyentes de la atmósfera para obtener información sobre distintos parámetros atmosféricos: presencia de partículas en suspensión (aerosoles), presencia de especies químicas, humedad, temperatura, etc...

En el grupo de Ingeniería Electromagnética y Fotónica del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha desarrollado un lidar atmosférico monoestático elástico incoherente [1, 2] para la detección de aerosoles (neblinas, polvo, humo...) y la medida de la estructura de las formaciones nubosas, con aplicaciones en el control de la contaminación atmosférica y en el establecimiento de modelos de dinámica atmosférica mediante el estudio de la evolución temporal de las distribuciones medidas.

## 2. Estructura general y prestaciones del sistema.

La figura 1 esquematiza la estructura actual del sistema. El emisor está constituido por un láser de Nd:YAG (Spectra Physics, modelo Quanta-Ray

CGR-190-10) que puede emitir pulsos de unos 10 ns de duración con energías alrededor de 1 J a la longitud de onda de 1064 nm, y de 0,5 J a la longitud de onda de 532 nm. El láser se encuentra en una sala del último piso del edificio D3 del Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña. Un espejo dieléctrico dirige el haz emitido — de una divergencia en campo lejano de alrededor de 100  $\mu$ rad — hacia el zenit a través de un agujero practicado en el tejado de la sala. En dicho tejado se ha instalado una cúpula de observatorio de 2 m de diámetro, que alberga el sistema óptico y el cabezal optoelectrónico de recepción y protege el orificio de emisión cuando no se utiliza el lidar. Como muestra la figura 1, un tubo de plástico circunda al haz durante parte de su trayecto vertical en la sala y a través de la cúpula, para proteger a los operadores contra intercepciones accidentales del haz.

La radiación retrodispersada por las partículas en suspensión en la atmósfera es recogida por un telescopio de 20 cm de diámetro de apertura y 2 m de distancia focal (Celestron C8 Classic). El receptor optoelectrónico está constituido por un fotodiodo de avalancha (EG&G, mod. C30954E) de 0,8 mm de radio seguido por una cadena de amplificación que convierte la corriente que suministra el fotodiodo — proporcional a la potencia óptica recibida — a tensión y adapta el nivel de ésta al margen dinámico de la tarjeta de adquisición. La cadena de recepción está formada por amplificadores operacionales de banda ancha, con una primera etapa de transimpedancia de bajo ruido seguida por etapas adaptadoras de nivel, hechas con amplificadores del tipo CFA (current feedback amplifier), de ganancia regulable en un margen de 10 dB. La responsividad global del receptor puede ajustarse entre  $10^5$  V/W y  $10^7$  V/W a las dos longitudes de onda que puede emitir el láser, su NEP (noise equivalent power) es de  $70 \times 10^{-15}$  W/Hz<sup>-1/2</sup>, y su ancho de banda es de 10 MHz, adaptado a la máxima velocidad de muestreo de la tarjeta de adquisición.

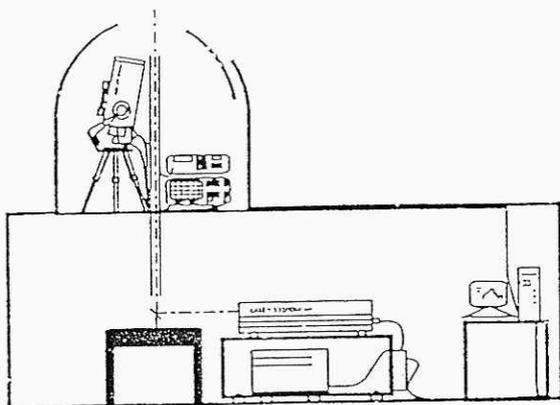


Fig. 1. Configuración general del lidar.

El receptor optoelectrónico está integrado en una caja con un sistema de adaptación a la mecánica del telescopio colector que permite situar en el plano focal de éste la superficie activa del fotodiodo de avalancha.

La salida del receptor es llevada mediante un cable coaxial a la entrada de la tarjeta de adquisición, inserta en un ordenador personal 486DX a 66 MHz que se encuentra en la misma sala que el láser. La tarjeta es el modelo Compuscope 1012 de la casa GaGe, con una resolución de 12 bits y una velocidad de muestreo de hasta 20 Mmuestras/s, lo que se traduce en un resolución en distancia del sistema de 7,5 m.

El sistema de emisión/recepción está controlado por el ordenador — situado junto al láser emisor en la sala de control — bajo el software de control especializado LabView, de National Instruments, que gestiona la emisión, la adquisición de datos, el sincronismo entre la emisión y la recepción y las alarmas, lo que equivale, en suma, a disponer de un “macroinstrumento” con los subsistemas descritos más arriba. La figura 2 muestra un esquema funcional del sistema.

La aplicación desarrollada permite también visualizar en tiempo quasi-real en la pantalla del ordenador la señal recibida sin procesar o con diversos tipos de procesado sencillos (promediado de pulsos, corrección del decrecimiento en  $1/R^2$ , etc...), así como almacenarla en el disco duro para un procesado completo posterior.

El alcance del lidar depende de la energía de los pulsos, de las condiciones de visibilidad de la propia atmósfera que se sondea, del número de retornos de pulso que se promedien y de la incertidumbre que se esté dispuesto a tolerar en la medida. Típicamente, para una energía en emisión de 500 mJ por pulso a 532 nm, condiciones de visibilidad atmosférica entre 1 y 5 km, e imponiendo como criterio de alcance máximo que la relación

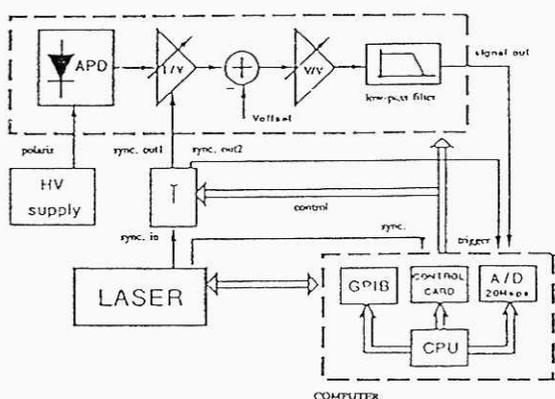


Fig. 2. Esquema funcional del sistema lidar.

señal/ruido en el retorno desde la distancia máxima sea 1 (0 dB), el alcance sin promediado de pulsos es de varios kilómetros; en condiciones de “cielo claro” y atmósfera estable que permita la integración de centenares de pulsos, se ha llegado a efectuar medidas hasta distancias de 15 km.

### 3. Resultados.

La potencia  $P(R)$  que el receptor de un sistema lidar recibe procedente de una célula de resolución situada a una distancia  $R$  del mismo se expresa como [3]

$$P(R) = P_0 \frac{c \tau_l A_r}{2 R^2} \beta(R) e^{-2 \int_0^R \alpha(r) dr} \zeta(R) \quad (1)$$

donde  $P_0$  es la potencia del pulso transmitido (supuesto, por simplificar, rectangular),  $\tau_l$  su duración,  $c$  la velocidad de la luz,  $A_r$  el área efectiva del sistema óptico receptor (incluyendo las pérdidas por transmitividad imperfecta),  $\beta(R)$  el coeficiente de retrodispersión ( $m^{-1} \text{sterrad}^{-1}$ ) de la atmósfera,  $\alpha(R)$  el coeficiente de extinción en potencia de la atmósfera ( $\text{neper/m}$ ) y  $\zeta(R)$  el llamado factor de solapamiento óptico, coeficiente adimensional que tiene en cuenta la superposición que se da, en función de la distancia al lidar, entre la sección recta de atmósfera iluminada por el haz transmitido — que constituye por definición el blanco a detectar — y el campo de visión del sistema óptico de recepción; dicho factor valdrá 0 a las distancias a que no haya superposición en absoluto, y 1 cuando la sección recta de atmósfera iluminada esté completamente comprendida dentro del campo de visión del receptor. Los datos primarios de la atmósfera que la inversión de la ecuación del lidar intenta recuperar son los parámetros ópticos  $\alpha$  y  $\beta$  en función de la distancia.

La figura 3 muestra la señal recibida en una exploración vertical, en una situación real, corregida en distancia (range-corrected) para compensar el efecto del decrecimiento en  $1/R^2$  que aparece en la ecuación del lidar, tal como podría presentarla la aplicación en LabView en la pantalla del ordenador durante una sesión de medida. En este caso el láser emitía a 532 nm y se han integrado los retornos de 50 pulsos. El eje de ordenadas representa, en unidades arbitrarias, la tensión de salida del receptor (proporcional a la potencia recibida) multiplicada por el cuadrado de la distancia a que se encuentra la célula de resolución desde la que se ha retrodispersado la potencia; en el eje de abscisas se da la distancia en kilómetros. Incluso con este procesado tan sencillo se pueden observar los grandes rasgos de la situación de la atmósfera y algunas limitaciones del sistema. Se aprecia, en

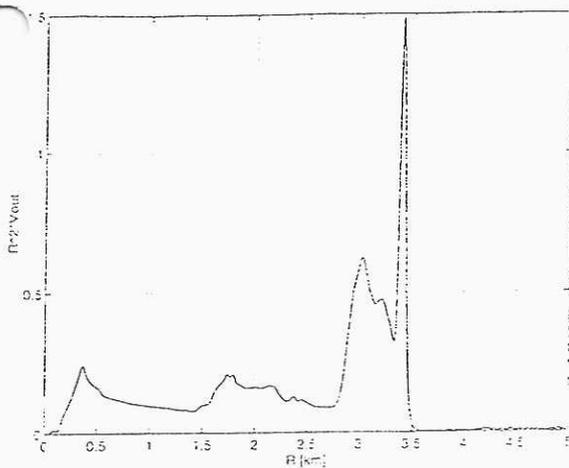


Fig. 3. Ejemplo de señal recibida con corrección de distancia

En primer lugar, una zona, comprendida entre 0 y unos 400 m, en que la señal corregida en distancia aumenta; la señal recibida en este margen no es significativa, pues aparece distorsionada por el efecto de crecimiento del factor de solapamiento conforme aumenta la distancia, esquematizado en la figura 4, propio de un sistema biaxial como el que se ha realizado. A partir de 400 m puede considerarse que el factor de solapamiento se ha estabilizado a un valor próximo a la unidad y se observa, primero, un decrecimiento monótono de la señal, hasta alrededor de 1500 m, que indica un decrecimiento de la retrodifusión producida por los aerosoles; entre 1700 y 2200 m se produce un aumento de la señal hasta valores del orden del que se daba a 400 m, lo que probablemente indica una capa en que se han acumulado partículas; sigue un descenso con cierta estructura espacial hasta unos 2700 m, y, a partir de ahí, el fuerte incremento del retorno indica la presencia de una nube, parte de cuya estructura es apreciable hasta unos 3400 m; a partir de esa distancia, el retorno del pulso emitido que llega al receptor ha sufrido tal atenuación que es indistinguible del ruido.

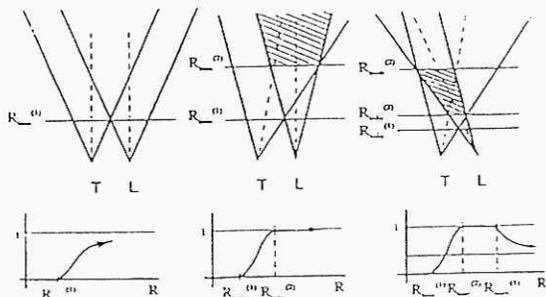


Fig. 4. Ilustración de la evolución del factor de solapamiento con la distancia al lidar biaxial, en función de la inclinación entre los ejes del telescopio y del haz transmitido. T: campo de visión del telescopio. L: zona iluminada por el láser.

La figura 5 corresponde al procesado de la señal de la figura 3 según el método de Klett [4], donde el eje de ordenadas corresponde ahora a la constante de extinción  $\alpha$ , en neper/km, para las distancias R en km dadas en el eje de abscisas. La figura 6 muestra en detalle la parte de la figura 5 comprendida entre 0 y 3000 m, donde sigue observándose el efecto de distorsión debido al factor de solapamiento creciente hasta los 400 m. Aparte de la medida instantánea de la constante de extinción, de la que pueden inferirse otras informaciones sobre el estado de la atmósfera, es evidente la posibilidad del estudio de la evolución atmosférica a partir de la comparación de curvas similares a la de la figura 5 tomadas a distintas horas del día.

La figura 7 muestra la medida de la constante de extinción de la atmósfera en neper/km (eje vertical) en función de la altura (eje marcado "HEIGHT") en m. El eje etiquetado como "SHOTS" corresponde a disparos sucesivos del láser y podría traducirse a tiempo conociendo la cadencia de disparo. La medida corresponde a una situación de

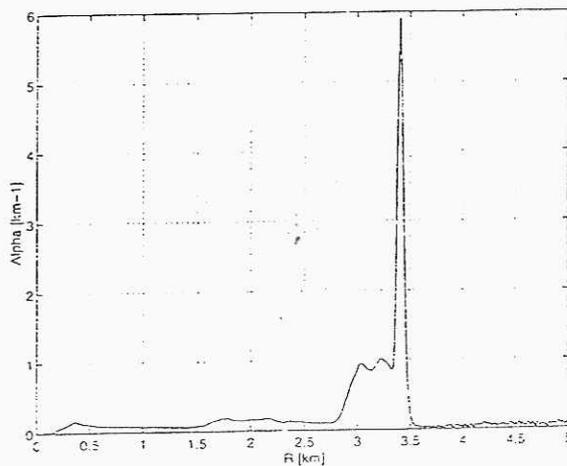


Fig. 5. Resultado de la inversión de la constante de extinción para la situación de la figura 3.

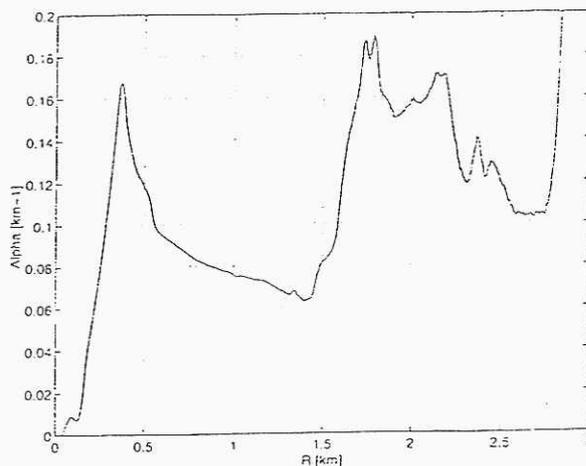


Fig. 6. Ampliación de la zona de la figura 5 comprendida entre 0 y 3000 m.

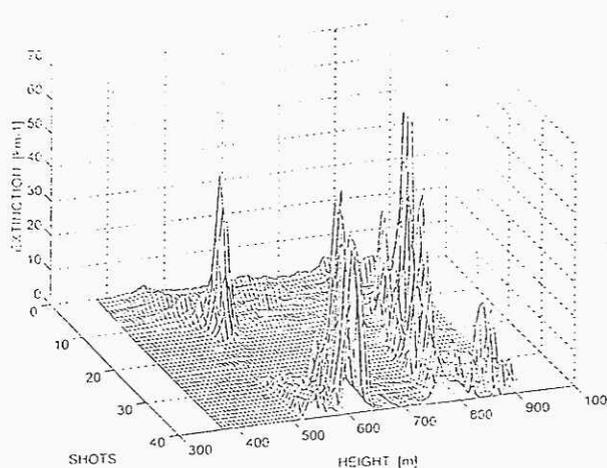


Fig. 7. Estructura de capas de nubes bajas a su paso por la vertical del lidar.

nubes bajas de tormenta, donde se aprecia la capacidad del lidar para determinar la estructura de las nubes e incluso detectar distintas capas, siempre que su grosor y altura permitan un nivel de señal suficiente en el receptor. También se ilustra la capacidad de medir la evolución del estado de la atmósfera a lo largo de la sección de exploración en función del tiempo.

#### 4. Conclusiones

El lidar presentado ha demostrado su capacidad para efectuar medidas primarias de constantes de extinción y de retrodispersión de la atmósfera, ligadas principalmente, para el margen de exploración en la troposfera en que se está trabajando, a la presencia de aerosoles. Paralelamente al trabajo de integración, diseño y desarrollo de subsistemas descrito aquí, ha sido necesario llevar a cabo la realización de algoritmos de inversión para la extracción de esos parámetros a partir de la señal recibida. Además del interés que las medidas de las constantes de extinción y retrodispersión presentan por sí mismas, en cuanto a la indicación que pueden proporcionar sobre la calidad del aire, de ellas puede extraerse información sobre el espesor de la capa de mezcla y de la capa límite planetaria, que son datos importantes para la modelización de la meteorología de una zona determinada. La estructura espacial de la densidad de aerosoles también puede servir como indicador de las alturas de capas de inversión térmica y de perfiles de humedad específica [5] y, utilizando métodos de máxima correlación cruzada, lo cual implica dotar al lidar de agilidad en la dirección de exploración, se pueden determinar campos tridimensionales de velocidades de vientos, de interés en la inicialización y verificación del funcionamiento de modelos atmosféricos de mesoescala.

En la actualidad, utilizando la experiencia adquirida en la realización del sistema presentado, se está trabajando en la realización de un lidar elástico incoherente transportable y dotado de la mencionada posibilidad de direccionamiento ágil, que constituya una herramienta flexible para el sondeo de la atmósfera y permita aprovechar plenamente las posibilidades comentadas en cuanto a extracción de información sobre su estado.

#### Agradecimientos

El trabajo presentado ha sido desarrollado en el marco de los Proyectos de Investigación CICYT TIC93-0431 y AMB96-1144-C02. Los autores desean agradecer también las fructíferas discusiones y comentarios de José María Baldasano y Cecilia Soriano, del Instituto de Tecnología y Modelización Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña, y de Miguel Lara, Luis Vázquez y Enric Tarradellas, del Centro Meteorológico Territorial de Cataluña del Instituto Nacional de Meteorología, que han ayudado a definir las características del sistema desarrollado. Éste no se hubiese podido realizar sin la asistencia técnica de Alfredo Cano y Joaquim Giner.

#### Referencias

- [1] F. Rocadenbosch, C. Puente, A. Comerón, A. Rodríguez, "Diseño de un sistema lidar para la monitorización de la dispersión elástica en la atmósfera", Actas del X Symposium Nacional de la URSI, Valladolid, 27-29 de septiembre de 1995, pp. 829-832.
- [2] F. Rocadenbosch: *LIDAR Sensing of the Atmosphere: Receiver Design and Inversion Algorithms for an Elastic System*. Tesis Doctoral. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña. Noviembre de 1996.
- [3] Raymond M. Measures: *Laser Remote Sensing. Fundamental and Applications*. Krieger Publishing Company, 1992.
- [4] James D. Klett, "Stable analytical inversion solution for processing lidar returns". *Applied Optics* 20, 2, 211-220 (1981).
- [5] C. Soriano, W. T. Buttler, J. M. Baldasano (1995). "Comparison of Temperature and Humidity Profiles with Elastic-Backscatter Lidar Data", en *Air Pollution III (vol.2: Air Pollution Engineering and Management)*, editado por H. Power, N. Moussiopoulos i C. A. Brebbia. Computational Mechanics Publications, 275-282 (1995).