

# Sistema Lidar Coherente para monitorización de velocidades de blancos sólidos

ALEJANDRO RODRÍGUEZ GÓMEZ, ADOLFO COMERÓN TEJERO, ELOY MESALLES NALDA, ALBERT AGUASCA SOLÉ, CARLES PUENTE BALIARDA, FRANCESC ROCADENBOSCH BURILLO  
 GUPO D3-EEF, DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES  
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
 Tel: 93-4011069, Fax: 93-4017232  
 CAMPUS NORD UPC, EDIFICI D-4, 08034 BARCELONA  
 Correo electrónico: rgomez@vltor.upc.es  
 WWW: <http://gaig.upc.es/personal/rgomez/rgomez.htm>

## Abstract:

Coherent Laser Radar (Lidar) Velocimeters (CLRV) can provide many advantages to solid target velocity Monitoring, as compared to microwave-based systems. Narrower beamwidth, lower transmitted power and higher Doppler frequency shift are some of them. A low-power laboratory prototype is presented. It is based on the Michelson interferometer. Measures of working range, SNR and resolution are presented. A data-acquisition tool, based on the spectrum-analyzer principle, is presented too.

## 1. Introducción

El control de velocidad de blancos sólidos es uno de los campos en los que los sistemas Lidar coherentes se comportan mejor que los radares de Microondas. Entre las ventajas[1] que se pueden destacar están:

- Anchos de haz inferiores a  $0,1^\circ$ ;
- Dependencia con  $1/R^2$  de la potencia recibida;
- Alta responsividad de los módulos fotodetectores ( $\sim 10^6$  V/W)
- Desplazamientos Doppler del orden de 1 MHz/(km/h).

Todo esto nos permite la construcción de un prototipo de laboratorio de un sistema Velocímetro Lidar (Radar Láser) Coherente (VRLC) cuyas prestaciones son prometedoras para su uso en labores como el control de tráfico o de máquinas móviles en una fábrica.

Hay una serie de factores que se deben tener en cuenta al tratarse de un sistema Radar Láser coherente [2,3,4,5,6,7,8,9]:

- SNR;
- Ensanchamiento espectral de la señal Doppler;
- Reducción del área efectiva por efecto del speckle y del cono de coherencia del fotodetector;
- Longitud de coherencia de la señal transmitida;
- Alineación y truncamiento adecuado de las señales oscilador local (LO) y señal recibida;
- Polarización.

## 2. Parámetros Generales del Sistema

El sistema VLRC debe medir velocidades de blancos que serán, por lo general, móviles circulando en línea recta por un cierto camino predeterminado.

En la figura 1 se puede apreciar la geometría general del sistema.

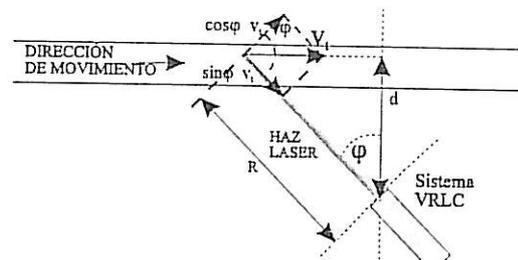


Figura 1. Geometría del sistema

El eje del sistema VRLC forma un ángulo  $\alpha$  con la perpendicular a la dirección de movimiento. El valor de ese ángulo constituye una constante del sistema. La velocidad medida será la proyección de la velocidad del blanco sobre el eje del sistema,  $v_1 = vt \cdot \text{sen} \alpha$ .

El ángulo  $\alpha$  de la figura 1 no debería ser excesivamente grande ni demasiado pequeño. Para un valor de  $\alpha$  demasiado grande, la distancia  $R$  crece mucho con lo que  $P_R$  es demasiado baja; para  $\alpha$  demasiado pequeño es la proyección  $v_1$  la que disminuye demasiado. Un buen margen para  $\alpha$  podría ser entre  $30$  y  $60^\circ$ . Por ejemplo, si consideramos un ángulo  $\alpha = 45^\circ$ , longitud de onda  $\lambda = 633 \text{ nm}$  y una velocidad del blanco de  $200 \text{ km/h}$ ,  $v_1$  tiene un valor de  $141 \text{ km/h}$ , lo que representa un desplazamiento Doppler de  $124 \text{ MHz}$ . El ancho de banda eléctrico del fotodetector tiene que ser el suficiente para recibir estas señales. En general, será necesario usar valores bajos de  $\alpha$  cuando el ancho de banda eléctrico efectivo del elemento fotodetector no sea lo suficientemente grande (por ejemplo, menor de  $100\text{-}150 \text{ MHz}$ ).

La figura 1 también permite una estimación del tiempo de medida. Consideremos un móvil de  $4 \text{ m}$  de largo, desplazándose a  $120 \text{ km/h}$ . El sistema de

medida está situado formando un ángulo  $\alpha=45^\circ$ . El coche intercepta el haz de transmisión durante 0,08 s. Este valor puede tomarse como nuestro máximo tiempo de medida e implica una resolución máxima teórica en la medida de frecuencia de 12,5 Hz.

### 3. Prototipo de laboratorio

En el grupo D3-EEF (Ingeniería Electromagnética y Fotónica) hemos construido un prototipo de un sistema VRLC para medida de velocidades. Es capaz de medir velocidades de hasta 180 km/h, con una resolución mejor que un 1%. En la figura 2 puede verse un esquema.

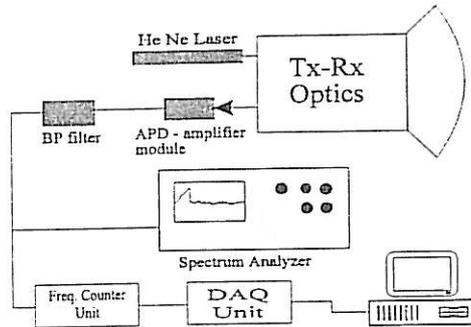


Figura 2. Esquema general del sistema

El prototipo de laboratorio emplea un transmisor láser CW de HeNe SIEMENS de baja potencia, que emite radiación de 633 nm. Para detectar la interferencia óptica, se emplea un módulo 713-4 de Analog Modules, que incluye un APD C30902 y un amplificador de transimpedancia. El modelo C30902 es uno de los fotodiodos más utilizados durante los últimos 10 años. Presenta una zona activa de 0.5 mm de diámetro y un ancho de banda eléctrico cercano a los 500 MHz, siendo sus características apropiadas para esta aplicación. La responsividad global del módulo es 1.5 V/ $\mu$ W con un ancho de banda eléctrico nominal de 300 MHz. Sin embargo, nuestras pruebas de laboratorio han mostrado que el ancho de banda en el cual existe respuesta plana es de alrededor de 110 MHz. Esto significa que para un ángulo  $\alpha=30^\circ$  la máxima velocidad medible es de 250 km/h.

Como en el laboratorio no podemos disponer de un blanco que se desplace linealmente a altas velocidades, lo hemos sustituido por un disco giratorio. La velocidad lineal en su borde simula la de un blanco que se traslada, y es su componente sobre la dirección de propagación del haz láser la que se mide. Dependiendo del ángulo de incidencia, podemos medir una fracción de la velocidad total. La superficie cilíndrica del volante está recubierta de papel, que presenta dispersión casi totalmente difusa. El volante tiene un radio de 25 cm y gira a una velocidad máxima de 2000 r.p.m., lo que equivale a una velocidad lineal de 190 km/h.

En la figura 3 se observa la óptica del sistema (inspirada en [10]), que es esencialmente un interferómetro de Michelson. Se pueden distinguir tres "circuitos" distintos: los correspondientes al haz transmitido, señal recibida, y al oscilador local (haz de referencia). Como se puede apreciar, se trata de un sistema estrictamente monoaxial, lo cual implica una notable sencillez en el apuntamiento y enfoque. El circuito de señal recibida emplea el espejo de salida del láser para reconducir ésta junto al haz de referencia, lo cual hace que la mezcla entre los dos sea óptima; no es necesario que éstos sean enfocados sobre el fotodetector APD ya que el tamaño del área activa es bastante similar al tamaño del haz. Como la separación entre elementos debe modificarse para las distintas distancias al blanco, es útil tener un modelo por ordenador de esta estructura, por lo que hemos desarrollado un simulador de la antena [11].

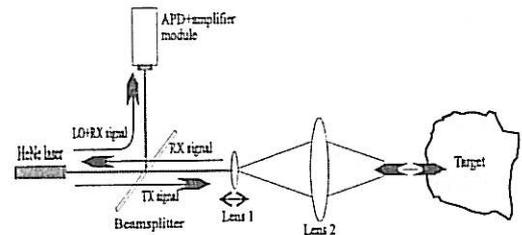


Figura 3. Óptica del sistema.

El pequeño valor de SNR que se consigue, debido fundamentalmente a la gran cantidad de ruido shot presente en el sistema, hace imposible realizar directamente la medida de la frecuencia doppler. Es por ello necesario incluir un subsistema de acondicionamiento y adquisición de señal. Este subsistema está basado en el principio del analizador de espectros. Posteriormente será la frecuencia del oscilador de barrido la que será medida. En la figura 4 puede verse un esquema funcional de éste subsistema.

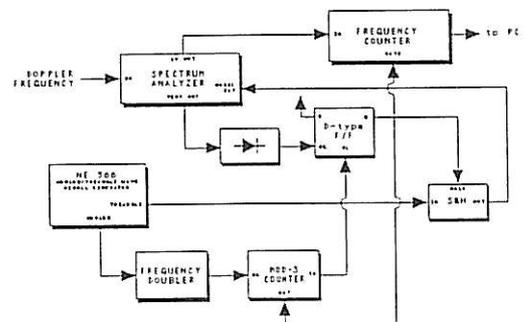


Figura 4. Subsistema de adquisición.

### 4. Medidas de laboratorio

La señal eléctrica a la salida puede ser estudiada mediante un analizador de espectros. Todas las siguientes medidas han sido obtenidas de esta forma. Una de las medidas más interesantes consiste

en determinar cuán precisa puede ser la determinación de la velocidad. La figura 5 muestra el ancho de banda de la señal doppler (expresado en su correspondiente en km/h) frente al valor absoluto de la velocidad, para distintos valores de la distancia de medida y del ángulo  $\alpha$ . Este valor se ha obtenido a partir del ancho del pico espectral que constituye la señal Doppler. Como se puede apreciar, dada una distancia al blanco y un ángulo de medida, la incertidumbre es proporcional al valor detectado absoluto, con lo que la incertidumbre relativa permanece constante. Los valores mostrados son las curvas de regresión de primer orden, que se han obtenido con una desviación típica máxima de 0.08 km/h. Se observa que la incertidumbre relativa permanece constante con la velocidad medida, manteniéndose por debajo del 1%.

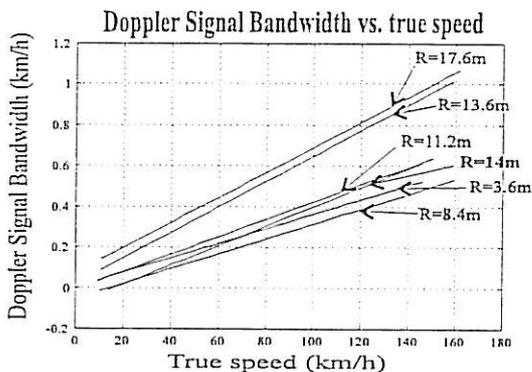


Figura 5. Ancho de la señal doppler.

La figura 6 muestra la variación en la relación señal a ruido para una velocidad detectada de 100 km/h, evaluada en un ancho de banda de 100 MHz. Como ya se ha comentado, su valor se mantiene por debajo de -5 dB para las distancias más cortas. Esto hace necesaria la inclusión del subsistema de adquisición, ya que un contador de frecuencia necesita una SNR a la entrada mucho mejor que 0 dB.

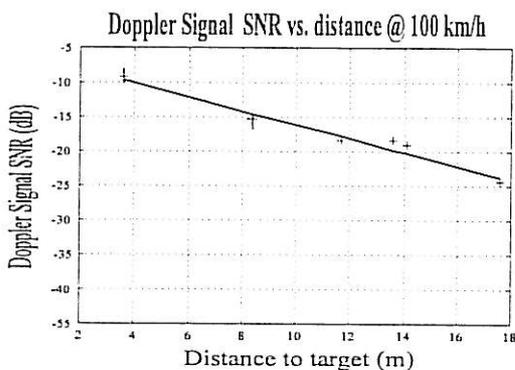


Figura 6. Relación señal a ruido.

Tal y como se aprecia en la figura, la SNR disminuye como el cuadrado de la distancia. Esto implica que se está trabajando limitado por ruido shot como se puede consultar en varias referencias, por ejemplo [12].

## 5. Conclusiones

Los sistemas lidar coherentes proporcionan una medida instantánea de la velocidad de blancos sólidos, usando transmisores de baja potencia, con muy alta resolución angular. Se han presentado resultados a partir de un prototipo de laboratorio, mostrando que se pueden medir velocidades con una resolución máxima del 1%.

Algunos cambios serían necesarios par su aplicación en sistemas operativos: transmisión a base de diodos láser y empleo de una longitud de onda "eyesafe", por ejemplo 1.55  $\mu\text{m}$ .

Aplicaciones posibles son el control de tráfico, de procesos industriales, robótica, etc.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el gobierno español, a través de la Comisión Interministerial de Ciencia Y Tecnología (CICYT), programas TIC 93-518 y TIC 93-431.

## Referencias

- [1] A. Rodríguez, A. Comerón, E. González, J.L. Montesino-Espartero, Gabino Rodríguez, *Low-cost, low-power Laser Doppler Velocimetry with applications to traffic monitoring*, Traffic Safety Technologies, Optics for Environmental and Public Safety, Munich 19-23 de mayo 1995. Proceedings of the SPIE, Vol 2511, paper 22.
- [2] J.H. Churnside, *Speckle from a rotating diffuse object*, J. Opt. Soc. Am., Vol. 72, No. 11, November 1982, pp. 1464-9.
- [3] Gary W. Kamerman, *Laser Radar, Active Electro-Optical Systems, The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*, Vol. 6, ERIM & SPIE, 1993.
- [4] J.W. Goodman, *Laser Speckle and related phenomena*, Topics in Applied Physics edited by J.C. Dainty, Vol. 9 Springer-Verlag, 1984.
- [5] L.E. Drain, *The Laser Doppler Technique*, John Wiley & Sons, Norwich (GB), 1980.
- [6] Barry J. Rye and Rod G. Frehlich, *Optimal truncation and optical efficiency of an apertured coherent lidar focused on an incoherent backscatter target*, Applied Optics, Vol. 31, No. 15, 20 May 1992, pp. 2891-9.
- [7] Rod G. Frehlich, *Optimal local oscillator field for a monostatic coherent laser radar with a circular aperture*, Applied Optics, Vol. 32, No. 24, 20 August 1993, pp. 4569-77.
- [8] Steven C. Cohen, *Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size and detector*

uniformity, *Applied Optics*, Vol. 14, No. 8, August 1975, pp. 1953-9.

[9] B.E.A. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, 1991.

[10] R.M. Huffaker, A.V. Jelalian, J.A.L. Thomsom, "Laser-Doppler System for Detection of Aircraft Trailing Vortices", *Proceedings of the IEEE*. Vol. 58, No. 3, March 1970, pp. 322-6.

[11] *Optical 'speedometer' to monitor Spain's traffic*, *Opto & Laser Europe*, september 1994, pp. 32-33.

[12] Albert V. Jelalian, *Laser Radar Systems*, Artech House, Norwood MA, 1992