

SISTEMAS LIDAR PARA CONTROL DE TRÁFICO

Alejandro Rodríguez, Adolfo Comerón

Lidar (*Light Detection And Ranging*) es un acrónimo que revela las intenciones de este campo de la técnica: aplicar teoría, sistemas y aplicaciones de Radar clásico en frecuencias ópticas para la solución de viejos y nuevos problemas. Según la aplicación, los sistemas Lidar funcionan mejor que los de Radar de microondas, o peor que éstos. El cambio en

posicionamiento. Como se verá, los sistemas Lidar nos permiten trabajar con potencias transmitidas más bajas lo que los hacen indetectables por sistemas ajenos.

El control del tráfico parece ser uno de esos campos en los que los sistemas Lidar se comportan mejor que los Radares de microondas. Como se puede ver en la figura 1, en condiciones de tráfico pesado un sistema

el «campo de visión». A uno le parece que precisamente en estas condiciones de tráfico pesado debería ser cuando los sistemas de control funcionasen mejor, ya que es la situación más peligrosa.

En la figura 2 se aprecia un sistema de control de tráfico que emplea un transmisor láser: en la misma situación es capaz de distinguir perfectamente entre los diferentes blan-

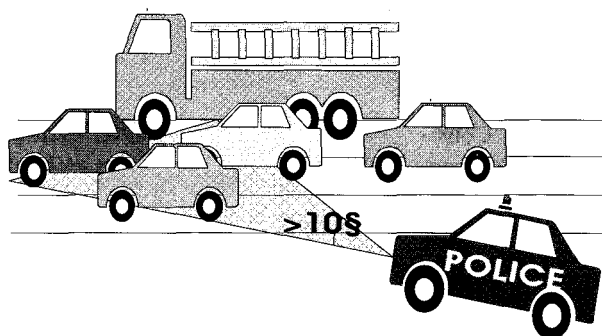


Figura 1.

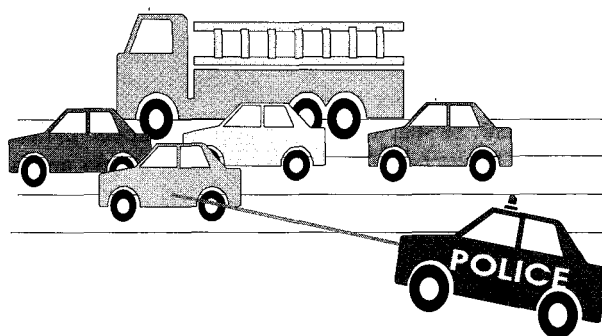


Figura 2.

frecuencias desde microondas al visible (o infrarrojo) significa un desplazamiento de seis (¡6!) órdenes de magnitud. Esto nos permitirá medir cosas más pequeñas, pero quizá requiera los más precisos sistemas de

Radar no es capaz de distinguir entre varios blancos próximos que estén a una cierta distancia de nuestro coche de policía.

Así para un sistema que trabaje a 10 GHz, con una antena de apertura de 20 cm, el ancho de haz transmitido es de casi 20°. Esto supone que si los blancos están a 10 m, el «campo de visión electromagnética» tiene 3 metros de ancho. Esto es suficiente para incluir varios vehículos. La velocidad que mediríamos en este caso sería algún tipo de media ponderada entre las de los vehículo incluidos en

cos. Esto se debe a que los anchos de haz transmitido que podemos obtener empleando frecuencias ópticas son mucho más estrechos. Las longitudes de onda están entre 0,5 y 1 μ m. Esto quiere decir que, para una apertura de 1 mm (un diámetro muy típico para un haz láser) podemos obtener un ancho de haz de menos de una décima de grado. De hecho, usando lentes, podemos obtener a partir de la anterior una apertura mayor y, por tanto, un ancho de haz menor.

Otra ventaja viene del hecho de que en los sistemas ópticos los

ALEJANDRO RODRÍGUEZ es ingeniero de Telecom. y está realizando la tesis doctoral en sistemas Lidar coherentes en el Grup d'Antenes, Microones, Radar i Òptica del Departament de TSC (UPC).
ADOLFO COMERÓN es catedrático del Departament de TSC (UPC) y dirige un proyecto de investigación sobre sistemas Lidar para estudio de la atmósfera y detección de blancos sólidos.

desplazamientos Doppler están alrededor de 1 MHz/(km/h), frente a 1-20 Hz/(km/h) para el caso de microondas. Esto es especialmente interesante cuando disponemos de tiempos de medida inferiores a una décima de segundo.

BAJAPOTENCIA

En la figura 2 se puede apreciar también un aspecto importante de los sistemas Lidar. Como podemos ver el blanco «intercepta» toda la potencia transmitida. ¿Cómo influye esto? Echando un vistazo a la ecuación radar

$$P_R = (P_T / \theta_T^2 R^2) (\sigma / 4\pi R^2) (\pi D^2 / 4) \eta_{ATM} \eta_{SYS}$$

(θ_T es el ancho de haz de transmisión, P_T es la potencia transmitida, R es la distancia al blanco, D es el diámetro de la apertura del receptor y η_{ATM} y η_{SYS} son las eficiencias atmosféricas y de sistema). En breve: la potencia recibida P_R es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia al blanco. Pero en Lidar los haces son muy estrechos y eso hace que la sección recta (σ) sea proporcional a la segunda potencia de la distancia al blanco. Es lo que habitualmente se conoce como un *blanco extenso*. Su sección recta es de la forma

$$\sigma = \pi \rho R^2 \theta_T^2$$

expresión que al incluirla en la

ecuación Radar anterior da el resultado siguiente:

$$P_R = \eta_{ATM} \eta_{SYS} \pi P_T \rho_T D^2 / (4R)^2$$

así que la potencia recibida es inversamente proporcional no a la cuarta sino al cuadrado del alcance! Esto nos permite trabajar con potencias transmitidas mucho menores, para obtener la misma potencia recibida.

GEOMETRÍA

Como se aprecia en la figura 3, la dirección de propagación del láser forma un cierto ángulo con el vector velocidad del móvil. Esto implica que no estamos midiendo el módulo de su velocidad sino la proyección sobre la dirección de propagación. Examinando la figura 3 podemos escribir:

$$v_{meas} = v_{total} \cos b$$

$$b = 90^\circ - a$$

b es el ángulo entre el eje de la carretera y el del sistema de medida. Ya que la velocidad que medimos es menor que la real, el desplazamiento Doppler lo será también.

Este gráfico permite también calcular el tiempo de medida. Considerando un coche de 4 m de largo, desplazándose a 120 km/h y un ángulo $b = 45^\circ$, el haz es interceptado durante 0.08 ms. Este puede ser con-

siderado nuestro tiempo máximo de medida.

MEZCLADORES ÓPTICOS

Llegados a este punto podemos examinar las diferentes opciones que los sistemas Lidar proporcionan. La primera es un equipo que opere un láser pulsado. Es capaz de medir distancias. A partir de varias medidas consecutivas, podemos obtener la velocidad del móvil.

Quizá una aproximación más interesante es la que nos ofrece la detección coherente. Empleando un mezclador óptico, podemos medir el desplazamiento Doppler sufrido por la luz dispersada por el blanco. Esto supone emplear un transmisor láser de onda continua y reproducir el esquema clásico de un mezclador en RF con elementos ópticos.

En este momento es útil recordar lo que ocurre cuando interfieren dos ondas cualesquiera de frecuencia ligeramente diferente. Si realizamos su suma:

$$E(t) = A_o \cos(\omega_o t + \phi_o) + \eta A_o \cos(\omega_o t + \phi_o + \omega_D t + \phi_D)$$

$$= A_o [1 + \eta \cos(\omega_D t + \phi_D')] \cos(\omega_o t + \phi_o')$$

En otras palabras: tenemos una portadora de frecuencia ω_o , modulada en amplitud por un coseno, cuya frecuencia es la diferencia entre las de las anteriores. Por supuesto lo que estamos mezclando en este caso es una muestra de la portadora transmitida (lo que en tecnología RF se conoce como «oscilador local», LO) con la radiación correspondiente dispersada por el blanco y desplazada en frecuencia.

Los fotodetectores disponibles actualmente (PMTs, PINs, APDs) son sensibles a la potencia óptica incidente en su superficie. A su salida podemos obtener una corriente eléctrica que es proporcional a esta potencia óptica, $i = \rho \cdot p$. Por descontado no son sensibles a la potencia óptica instantánea, pero sí que pueden serlo a la «modulación Doppler». Considerando las velocidades que

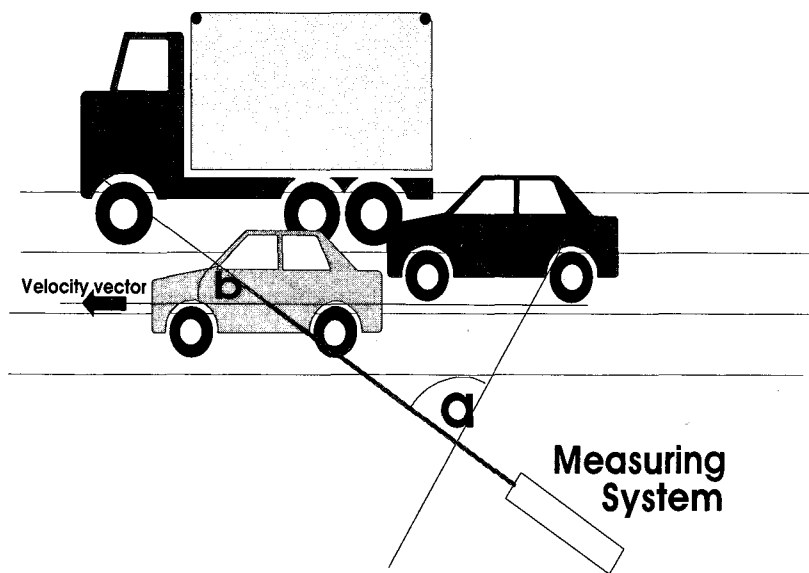


Figura 3.

alcanzan los coches en una autopista (digamos que hasta 250 km/h) y una portadora óptica de longitud de onda 633 nm, el desplazamiento Doppler máximo debe estar alrededor de 200 MHz. Los APDs de silicio son sensibles hasta una modulación de amplitud de 5 GHz. La señal eléctrica a la salida tendrá la forma:

$$i(t) = \rho [A_0^2 (1 + \eta^2) / 2 + \eta A_0^2 \cos(\omega_D t + \varphi_D)]$$

es decir, una componente continua sumada a una senoide de la frecuencia Doppler.

Es de la mayor importancia que ambos, la señal recibida y el oscilador local, viajen a lo largo del mismo camino antes de incidir sobre la superficie activa del detector, y que tengan la misma anchura cuando se combinen. Toda la energía que viaje fuera del camino común no participará en la mezcla: solamente contribuirá al ruido en baja frecuencia, empeorando la relación señal-ruido. De hecho las partes de la señal y el oscilador local que participen en la mezcla serán aquellos que caigan en el mismo punto del detector y bajo el mismo ángulo.

Este es uno de los puntos más críticos de los mezcladores ópticos. Implica que el apuntamiento es uno de los aspectos más importantes cuando construimos un sistema.

Otro punto crítico es la longitud de coherencia del láser. A pesar de ser osciladores con un Q extremadamente alto, los láseres presentan un ancho de línea espectral no despreciable. La longitud de coherencia de su emisión es inversamente proporcional a este ancho de línea. En esta aplicación se combinan señales desigualmente retrasadas, y deben mantener coherencia mutua. Los láseres de HeNe tienen longitudes de coherencia de más de 1 km, lo cual los hace muy apropiados para nuestro sistema. Los láseres de semiconductor, sin embargo, presentan longitudes de coherencia menores, del orden de decenas de metros, por lo cual, a pesar de las facilidades que aportan por su transportabilidad, no son apropiados.

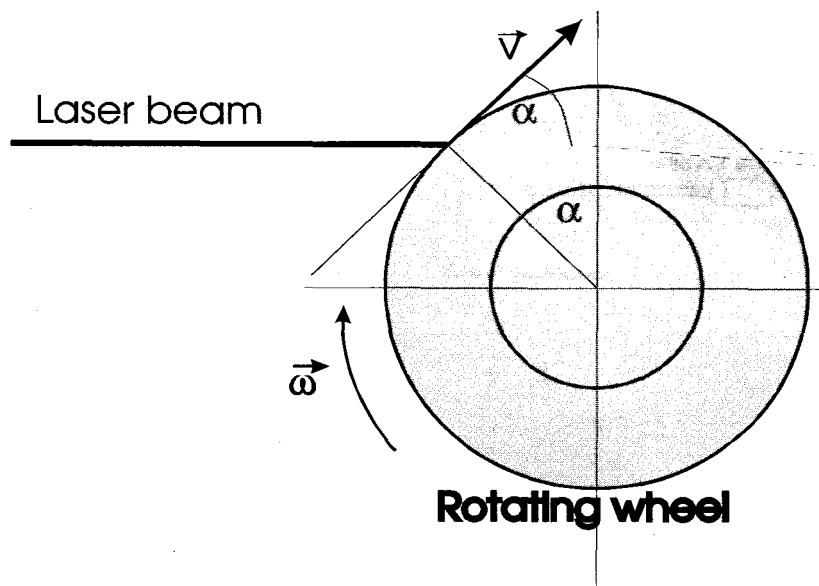


Figura 4.

Otros aspectos deben ser considerados: no hemos hablado nada de polarización (sólo las componentes con igual polarización participarán en la mezcla óptica); hay que tener en cuenta la distribución de potencia recibida y del oscilador local sobre la superficie del detector, relación entre potencias, perfil de sensibilidad del detector, la distribución del frente de fase de la señal recibida (que será aleatoria), etc.

PROTOTIPO DEL LABORATORIO

En el grupo d'Antenes, Microones, Radar i Òptica de la ETSETB hemos construido un prototipo de un Lidar coherente para medida de velocidades. Es capaz de medir velocidades de hasta 250 km/h, con una resolución menor de un 1%. Emplea un transmisor láser 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.

Como en el laboratorio no podemos tener un blanco que se desplace a 200 km/h, lo hemos sustituido por un disco giratorio. La velocidad lineal en su periferia simula la de un blanco que se traslada, y es su com-

ponente sobre la dirección de propagación del haz láser la que se mide. En la figura 4 se puede apreciar la geometría correspondiente. 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 totalmente difusa. El volante tiene un radio de 25 cm y gira a una velocidad máxima de 2.000 r.p.m. Esto implica una velocidad lineal de 190 km/h.

En la figura 5 se aprecia la óptica del sistema. Esta estructura es conocida como un interferómetro de Michelson, aunque ha sido ligeramente modificada. Es muy usada en holografía, donde el dispositivo sensible no es un fotodetector, sino una película fotográfica. Se pueden distinguir tres «circuitos» distintos: haz transmitido, oscilador de local OL (haz de referencia) y señal recibida.

El circuito del haz transmitido arranca de la salida del emisor láser (que presenta una divergencia de 1 mrad, aprox.); luego pasa a través de un divisor de haz (beamsplitter), que separa parte de la potencia para introducirla en el circuito del oscilador local; finalmente atraviesa el primer corrector

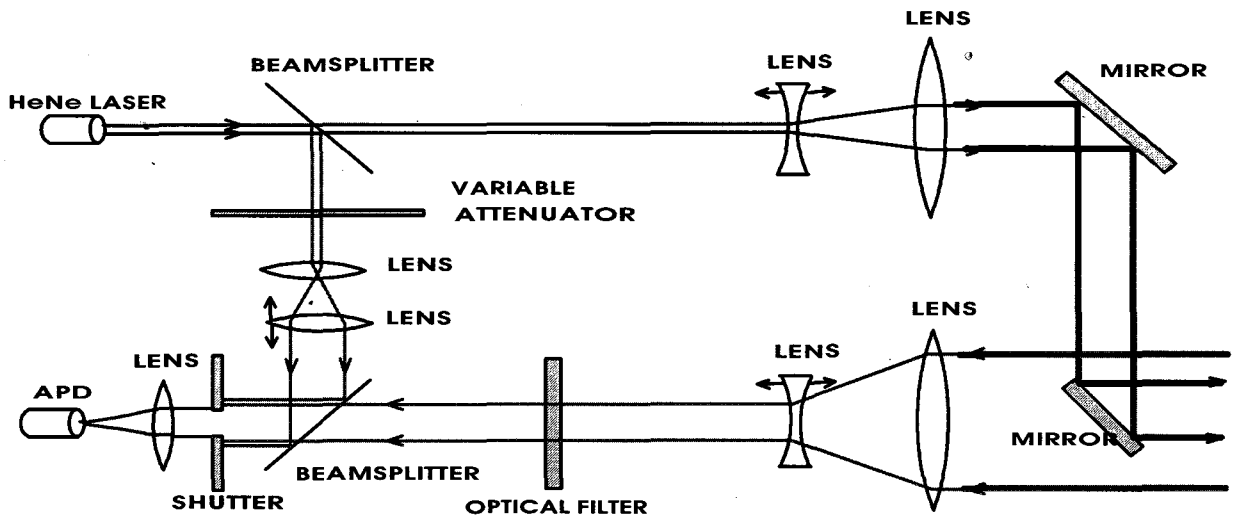


Figura 5.

de divergencia.

Este último elemento es un telescopio. Es una estructura clásica de dos lentes. Si sus focos coinciden, la divergencia del haz de salida será, esencialmente, la de entrada multiplicada o dividida por la razón entre las distancias focales de las lentes. Pero modificando ligeramente su separación, podemos controlar e incluso reducir a cero la divergencia de salida.

Posteriormente, el haz transmitido es reconducido al mismo eje del circuito de recepción, mediante dos espejos. El segundo está situado delante de la óptica de recepción. Produce un pequeño bloqueo que carece de importancia, ya que el espejo de transmisión tiene 1 cm de anchura, mientras que el de recepción es de 7,5 cm. De esta forma, con bajas pérdidas, podemos conseguir un sistema coaxial, con las ventajas en apuntamiento que ello reporta.

El circuito de recepción comienza con un controlador de divergencia que corrige la de la radiación dispersada por el blanco que incide sobre la lente de 7,5 cm, colimándola. Luego pasa por otro divisor de haz, donde es combinada con el oscilador local.

Para asegurar que se produce una mezcla óptica correcta entre la señal recibida y el oscilador local, hay un telescopio insertado en el circuito de OL para igualar ambos diámetros. Empleando un diafragma ajustable los podemos «cortar» a un mismo tamaño. El circuito de oscilador local proporciona una muestra del haz transmitido, que hace el papel de OL; luego expande este haz y lo suma a la señal recibida. Finalmente ambos circuitos son enfocados en la superficie del fotodetector APD para producir la mezcla.

Como la separación entre elementos deben ser cambiados para diferentes distancias al blanco, es útil tener un simulador de esta estructura. Hemos desarrollado uno para así automatizar los largos, pesados y repetitivos cálculos que implica cada una de estas configuraciones.

La corriente detectada en el APD es acondicionada en un amplificador de transimpedancia. Según el orden de magnitud de la señal recibida, es necesaria una ganancia global de unos 60 dB. Los APD presentan una responsividad de unos 50-100 A/W (unos 17-20 dB), luego el amplificador debe te-

ner unos 40 dB de ganancia.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Necesitamos ahora un sistema de tratamiento que sea capaz de identificar la frecuencia de la señal detectada. Lo más útil es un equipo basado en un contador de frecuencia, que nos permite obtener una salida numérica.

MEDIDAS DE SEGURIDAD

Las normas de seguridad ocular son muy estrictas para aplicaciones láser. Para un sistema que trabaje a 633 nm, con una potencia transmitida de unos 2 mW (clase 3A) pone un límite de irradiancia de $25 \cdot 10^{-3} \text{ mW/mm}^2$. Esto implica que, a la distancia mínima de seguridad, el haz transmitido debe tener, al menos, un ancho de 1 cm. Esto se puede hacer introduciendo una divergencia controlada o expandiendo un haz colimado. Si trabajásemos con láseres de longitud de onda 1.500 nm o más, las restricciones de seguridad son menos estrictas. Es por esto que, en el futuro, se debe caminar hacia el uso de sistemas que trabajen en el infrarrojo.