

Capítulo 11

Conclusiones y líneas futuras

11.1. Conclusiones

El objetivo final que deberíamos destacar desarrollado en este trabajo, ha consistido en un sistema de velocimetría láser integral optimizado respecto a los que actualmente existen en el mercado.

No hemos querido en ningún momento, ni esa era nuestra intención, proponer nuevas aplicaciones, sino solamente plasmar una estrategia que permite realizar medidas de la velocidad precisas, minimizando el tamaño del sistema y, reduciendo los costes, de un modo más acorde a las necesidades de la industria actual, a partir de una diferente configuración de la parte óptica.

Vistos los resultados obtenidos en esta tesis, podemos afirmar que la posibilidad de implementar nuevos prototipos de anemómetros láser, basados en el efecto Doppler, con solo una fuente de luz a una única longitud de onda y un solo detector, para la detección de dos componentes de velocidad de diferentes tipos de blancos, es posible sin perder las principales prestaciones (error, precisión, resolución espacial y temporal) de los sistemas clásicos basados en la interferencia de cuatro haces y más de un color [Dyn02a].

El prototipo de sistema 2D-LDA presentado en esta tesis, trabaja con tres haces del mismo color (@633nm) que interfieren en la superficie del blanco o punto de medida, con dos de ellos desplazados en frecuencia mediante la utilización de moduladores acusto-ópticos (AOM). El sistema es capaz de detectar dos componentes de velocidad, en el mismo instante de tiempo, sin necesidad de utilizar más de un color, con sólo tres haces y un solo fotodetector.

Las principales características son:

- Menor potencia de iluminación
- Configuración de la sonda óptica independiente del láser
- Montaje más sencillo
- Sistema de bajo coste
- Menor riesgo para los operadores del instrumento (visualmente seguros)
- Posibilidad de integración en un cabezal óptico.

Por lo que se refiere a la parte electrónica del sistema: mediante la utilización de un circuito generador multidisparo, en función del nivel de señal capturada, conseguimos aumentar la calidad de las medidas, aumentando la SNR de la señal por el hecho de escoger aquellas muestras de señal de mayor nivel.

La incorporación del subsistema de adquisición y procesado digital, formado por una placa digitalizadora de propósito general y un PC, evita la necesidad de utilizar otros sistemas mucho más caros y probablemente innecesarios, como pueden ser DSP's o procesadores específicos. El sistema es así mucho más simple y configurable. Podrá mejorarse el proceso de estimación simplemente mediante la actualización del software de control con versiones mejoradas. Esto resulta más sencillo para su utilización en la industria actual, y se evita la intervención de expertos para su modificación.

La utilización de algoritmos basados en la FFT para la detección de los picos máximos del espectro de señal, se ha revelado difícilmente superable. Se consiguen errores menores al 1% en señales con una pobre SNR y no precisan de un hardware específico.

La elección de las partículas de sembrado, tipo y cantidad, en el caso de la estimación de la velocidad de un líquido o gas, dependerá del tipo de experimento. Se debería realizar un estudio de la SNR obtenida en función de los diferentes parámetros del sistema, para confirmar una correcta elección. Se presentan las formulaciones teóricas de cómo se puede estimar la SNR en un sistema 2D-LDA, obteniendo una serie de resultados teóricos que nos pueden ayudar en su elección.

Por lo que respecta al número de medidas por segundo disponibles en este sistema, está muy por encima de las que habíamos obtenido en el sistema LDA de una dimensión desarrollado previamente. Es cierto que la elección del número de muestras por burst ha sido muy conservador ($N_m=512$). Probablemente con valores menores el sistema seguiría siendo igual de preciso y se incrementaría su velocidad. La mejora ha sido motivada también por la utilización de un software de control y estimación en Visual C++, mucho más eficiente y rápido que Labview, lo que reduce el tiempo de cálculo e

incrementa consecuentemente la resolución temporal. El número ha pasado de unas 25 medidas frente a 120 cada segundo.

En resumen, el diseño y realización del sistema integral de medida de velocidad, presentado en esta tesis, nos permite afirmar que los medidores pueden ser cada vez más sencillos, más baratos y de mayor flexibilidad, para que la industria pueda integrarlos en sus múltiples aplicaciones, en el control de procesos hidrodinámicos y aerodinámicos. Esto permitirá reducir costes, aumentar su eficiencia y generalizar sus aplicaciones en diferentes ámbitos civiles.

11.2. Líneas futuras

El siguiente paso, sería optimizar diferentes partes del sistema que permitan mejorar sus prestaciones:

1. Cambiar el láser de HeNe por una de mayor potencia y frecuencia

Vimos que debido al mal comportamiento del láser originalmente elegido (Nd:LSB, @532nm, color verde) como fuente de luz del sistema 2D-LDA, debido a los batidos espurios interferentes que se generaban a la salida del APD, hacía imposible detectar los batidos de la señal Doppler. Fue por esta razón, que tuvimos que utilizar un láser de gas, un típico HeNe de 25mW. Aunque no repercute directamente en el objetivo de la investigación, si que nos limita la recepción por retrodispersión (RD) - en el caso de la velocidad de un líquido-, ya que, debido a la poca potencia del láser y al hecho de utilizar unos AOM's optimizados para el verde, no se recogía suficiente energía dispersada por el blanco, para garantizar una mínima SNR.

Por tanto, para aplicaciones en fluidos, necesitamos incrementar la potencia del láser, con el fin de aumentar la intensidad de la energía dispersada, y escoger un láser verde o azul preferentemente que sufra menor atenuación del medio de propagación, maximizando así la intensidad en el volumen de dispersión. Además para reducir las dimensiones del medidor, el tipo de láser debería ser de estado sólido, de tamaño mucho más pequeño que los láseres de gas, incluyendo la fuente de alimentación en el mismo transmisor de luz.

2. Integración del subsistema óptico

Una vez comprobada su validez como instrumento de medida y optimización, el siguiente paso es integrar toda la parte óptica del anemómetro en un cabezal o sonda óptica, de la misma manera que realizamos su integración para el primer prototipo de sistema LDA de una dimensión, juntamente con la empresa MONOCROM S.L.

El éxito debe estar soportado en la utilización de fibras ópticas para que el cabezal de medida sea más compacto y sobre todo, separado de toda la parte electrónica. De esta manera, al igual que hacen algunos de los sistemas actuales, permitirá una mayor flexibilidad de cara a que el instrumento sea más portátil, transportable y sumergible.

3. Estudio de la mejora en función del multidisparo

Vimos cómo utilizando más de una señal de disparo en el subsistema electrónico, en función del nivel de la señal capturada, podíamos mejorar la SNR de la señal y por tanto obtener menor error en la medida. Esto ha sido comprobado empíricamente en los experimentos realizados, aunque sin ningún estudio riguroso.

4. Estudio de la interpolación gaussiana

Cuando realizamos la estimación de la frecuencia de los picos Doppler, para aumentar la precisión de las medidas, realizamos una interpolación gaussiana. Se realiza porque la forma del máximo, al ser la transformada de Fourier de una señal aproximadamente gaussiana en el tiempo, también será gaussiana en frecuencia. Convendría pues realizar un estudio exhaustivo de cuánto mejoramos con esta aproximación.

5. Estudio y elección de la ventana espectral

En esta primera versión del prototipo, cuando realizamos la estimación espectral de la señal Doppler, realizamos el cálculo de la densidad espectral de potencia a partir de la FFT. Como no disponemos de infinitas muestras de señal útil, como en cualquier sistema de adquisición, la ventana por defecto es rectangular. Ahora bien, en diferentes experimentos realizados se demuestra que utilizando ventanas de otro tipo, de *Hanning*, *Hamming* o gaussianas, permiten mejorar la resolución del espectro. Por tanto, deberemos escoger qué ventana es la más eficiente para nuestro caso, de una manera rigurosa, a partir de simulaciones teóricas y comprobando posteriormente los resultados con medidas reales.

6. Estimación espectral paramétrica

Además de mejorar el tipo de ventana temporal escogida, tendremos que estudiar qué tipo de estimador paramétrico permite una estimación con una mejor precisión y mejorar la estimación en caso de muy bajas SNR. De esta manera podríamos disminuir la potencia del láser mejorando los costes y haciendo el sistema aún más seguro y eficiente.

7. Verificación de los resultados por otros sistemas de medida

Ya comentamos que como no disponemos de otro sistemas de medida y de la imposibilidad de trasladar el prototipo a un laboratorio especializado, no hemos podido confrontar las medidas experimentales presentadas en la tesis con otro sistema láser de medida de velocidad.

A pesar de todo, mediante los estudios teóricos realizados juntamente con las medidas de la velocidad de disco rotatorio, hemos podido confirmar la validez de los resultados.

Lo más conveniente pues será, en el caso de la velocidad de fluidos, realizar una serie de campañas de medida para verificar las prestaciones del anemómetro láser Doppler frente a otros comerciales.

8. Detección de gases

Si queremos disponer de energía suficiente para realizar medidas de la velocidad de gases o caracterizar procesos de combustión, no sólo necesitaremos una fuente de mayor potencia sino que deberemos substituir el fotodetector APD, por un tubo fotomultiplicador, encareciendo el sistema original.

9. Búsqueda de nuevas aplicaciones

Por último, una vez que tengamos el instrumento optimizado e integrado pueden buscarse nuevas aplicaciones de interés para la industria y que permitan readaptar el sistema para situaciones particulares, tanto del subsistema óptico como del subsistema electrónico, dependiendo de las características del experimento y, sobre todo, del rango de velocidades a detectar.

