

ZASTOSOWANIE LASERÓW W METROLOGII

Metrologia - miernictwo, nauka o pomiarach. Obejmuje wszystkie teoretyczne i praktyczne problemy związane z pomiarami.

Cechy wiązki światła laserowego wykorzystywane w metrologii:

- stałość częstotliwości, rzędu 10^{-14} [lasery (w szczególności He-Ne) wykorzystywane są jako wzorce częstotliwości i długości],
- duża spójność i monochromatyczność,
- mała rozbieżność i możliwość ogniskowania,

Główne dziedziny metrologicznych zastosowań laserów:

- **pomiary wielkości geometrycznych** (długości, małych kątów, błędów kształtu i położenia, chropowatości powierzchni),
- **pomiary odległości** (dalmierze laserowe),
- **geodezja** (instrumenty takie jak teodolity, niwelatory, wskaźniki kierunku, dalmierze posługują się wiązką laserową),
- **geodezja satelitarna** (precyzyjne pomiary odległości do sztucznych satelitów Ziemi i Księżyca i na ich podstawie dokładne określanie pozycji stacji geodezyjnych, zmian pola grawitacyjnego, ruchu biegunów, obrotu Ziemi, dynamiki oceanów, ich topografii, przyptyków, odpływów, prądów morskich),
- **orientacja w przestrzeni i nawigacja** (żyroskopy laserowe).
- **pomiary prędkości przepływu i rozmiaru cząstek** (anemometria laserowa),

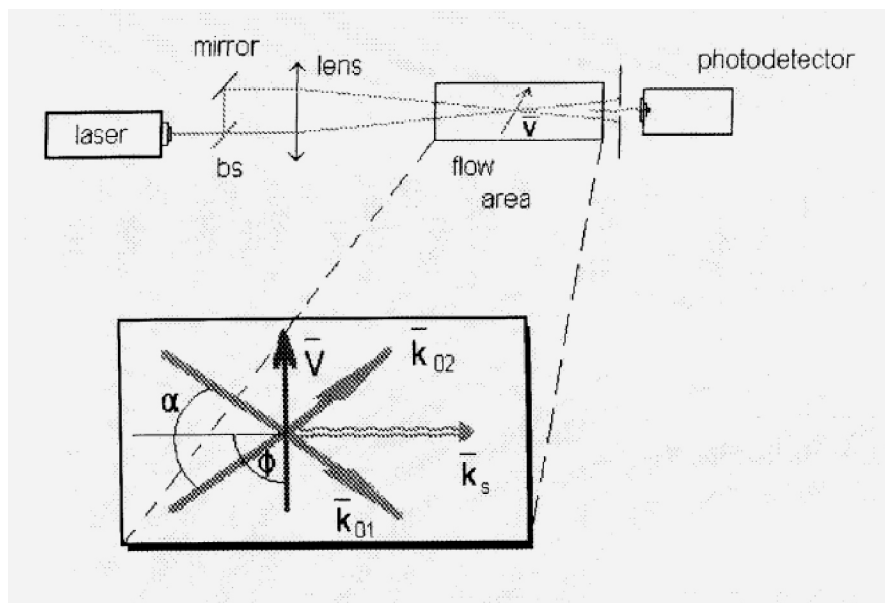
Anemometria laserowa (LDA - *Laser Doppler Anemometry*)

Jest to technika wykorzystywana w badaniach doświadczalnych z mechaniki przepływów. Wynaleziona przez Yeha i Cumminsa w 1964 r. Pozwala zmierzyć lokalną wartość prędkości w określonym punkcie przepływu i czasie.

Główne zalety anemometrii laserowej:

- bezinwazyjność,
- mała objętość próbkowania,
- możliwość ciągłego przesuwania obszaru badanego,
- samokalibracja.

Zasada pomiaru



Opis teoretyczny

Podstawowy teoretyczny opis laserowej anemometrii oparty jest na dwóch różnych zjawiskach fizycznych. Pierwszy oparty jest na dopplerowskim prawie przesunięcia częstości, drugi oparty jest na zjawisku interferencji. Obydwa dają te same relacje końcowe.

Anemometria laserowa - model dopplerowski

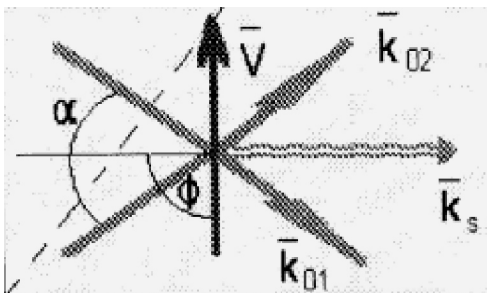
Ideę anemometrii możemy najkrócej przedstawić jako interferencję pomiędzy dwiema falami świetlnymi o częstościach przesuniętych w wyniku zjawiska Dopplera. Czynnikiem wprowadzającym to przesunięcie jest poruszająca się cząsteczka. Przesunięcie częstości światła rozproszonego na poruszającej się cząsteczce w stosunku do częstości światła padającego jest dane wzorem

$$\Delta\omega = (\vec{k}_s - \vec{k}_0) \vec{v}$$

$\vec{v}$ - wektor prędkości cząstki,

$\vec{k}_0$ - wektor falowy światła padającego,

$\vec{k}_s$ - kierunek obserwacji światła rozproszonego ($|\vec{k}_s| = |\vec{k}_0|$).



Jeśli znamy kierunki wiązki padającej i rozproszonej oraz przesunięcie częstości możemy znaleźć wartość prędkości cząstek rozpraszających. Cząstka jest oświetlona przez dwie wiązki o częstości ω_0 i generuje dwie

rozproszone fale świetlne z przesunięciem częstości zgodnie z wzorami

$$\omega_1 = \omega_0 + (\vec{k}_s - \vec{k}_{01}) \vec{v}$$

$$\omega_2 = \omega_0 + (\vec{k}_s - \vec{k}_{02}) \vec{v}$$

Obserwator umieszczony w punkcie x (stałym) zaobserwuje dudnienia natężenia światła w wyniku interferencji fal o dwóch różnych częstościach

$$E_1 = E_0 \cos(\omega_1 t - k_1 x)$$

$$E_2 = E_0 \cos(\omega_2 t - k_2 x)$$

Anemometria laserowa - model dopplerowski, cd

$$E_1 = E_0 \cos(\omega_1 t - k_1 x)$$

$$E_2 = E_0 \cos(\omega_2 t - k_2 x)$$

Pole wypadkowe

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= 2 E_0 \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right) \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} x\right) \end{aligned}$$

Obserwowalna amplituda pola elektrycznego jest zmienna w czasie i z dokładnością do stałego przesunięcia fazowego $(k_1 - k_2)/2 \cdot x$ może być zapisana wyrażeniem

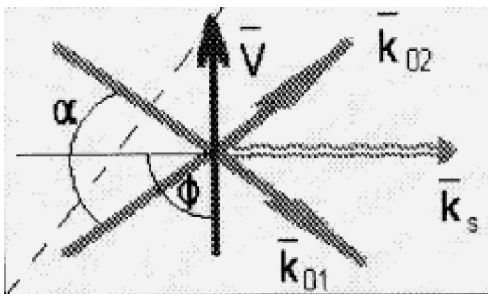
$$A_E(t) = 2 E_0 \left| \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \right|$$

Stąd dla natężenia światła rozproszonego ($I \propto A_E^2$) otrzymujemy

$$I(t) = I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\omega}{2} t\right) = \frac{I_0}{2} (1 + \cos(\Delta\omega t))$$

gdzie

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = (\vec{k}_{02} - \vec{k}_{01}) \cdot \vec{v} = 2 k_0 v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 2 \frac{2\pi}{\lambda_0} v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$



Częstość dudnień wynosi

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{2v}{\lambda_0} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

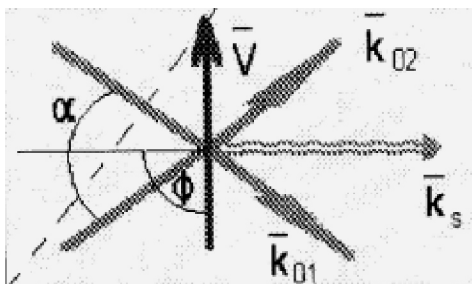
Anemometria laserowa - model prążkowy

Rozważmy dwie fale rozchodzące się w kierunkach $\vec{k}_{01}$ i $\vec{k}_{02}$. Pola elektryczne pochodzące odpowiednio od fali „1” i od fali „2” opisane są wzdłuż kierunku $\vec{r}$ wyrażeniami

$$E_1(\vec{r}) = E_0 \cos(\omega_0 t - \vec{k}_{01} \vec{r}) \quad E_2(\vec{r}) = E_0 \cos(\omega_0 t - \vec{k}_{02} \vec{r})$$

Wypadkowe pole wzdłuż kierunku $\vec{r}$

$$E(\vec{r}) = 2 E_0 \cos\left(\omega_0 t - \frac{(\vec{k}_{01} + \vec{k}_{02}) \vec{r}}{2}\right) \cos\left(\frac{(\vec{k}_{02} - \vec{k}_{01}) \vec{r}}{2}\right)$$



Zmiany natężenia światła wzdłuż kierunku $\vec{r}$ opisane są wyrażeniem

$$I(\vec{r}) = I_0 \cos^2\left(\frac{(\vec{k}_{02} - \vec{k}_{01}) \vec{r}}{2}\right)$$

a wzdłuż kierunku $\vec{r} \parallel \vec{u}$

$$I(y) = I_0 \cos^2\left(\frac{2 k_0 \sin(\alpha/2) y}{2}\right) = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(2 k_0 \sin(\alpha/2) y)]$$

Maksima natężenia światła pojawiają się wzdłuż kierunku $\vec{u}$ w odstępach

$$\Delta y = \frac{2 \pi}{2 k_0 \sin(\alpha/2)} = \frac{\lambda_0}{2 \sin(\alpha/2)}$$

Anemometria laserowa - model prążkowy, cd

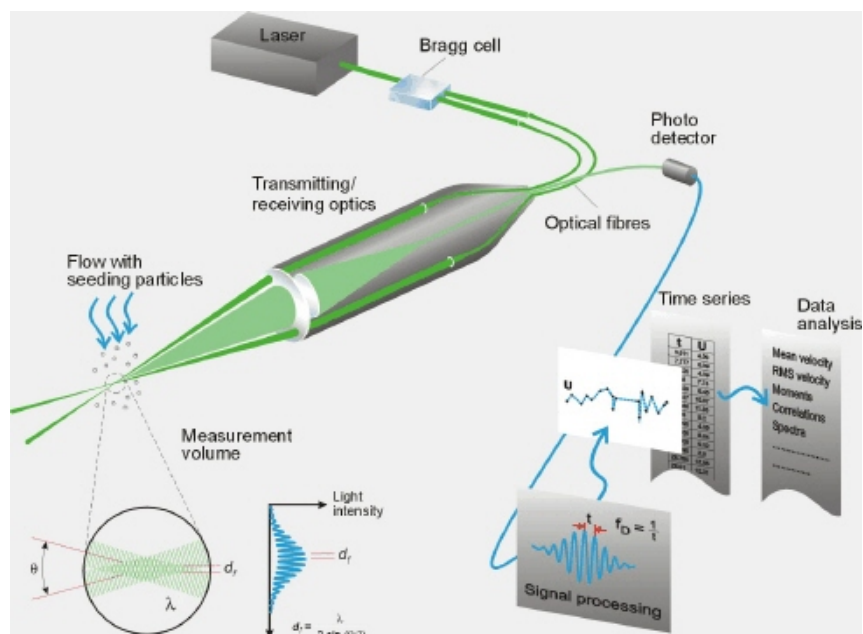
Maksima natężenia światła pojawiają się wzdłuż kierunku $\vec{v}$ w odstępach

$$\Delta y = \frac{2\pi}{2k_0 \sin(\alpha/2)} = \frac{\lambda_0}{2 \sin(\alpha/2)}$$

Małe poruszające się cząstki rozpraszają światło za każdym razem, gdy przechodzą przez jasny prążek. W wyniku tego można obserwować rozbłyski z częstością proporcjonalną do prędkości i odwrotnie proporcjonalną do odległości między prążkami.

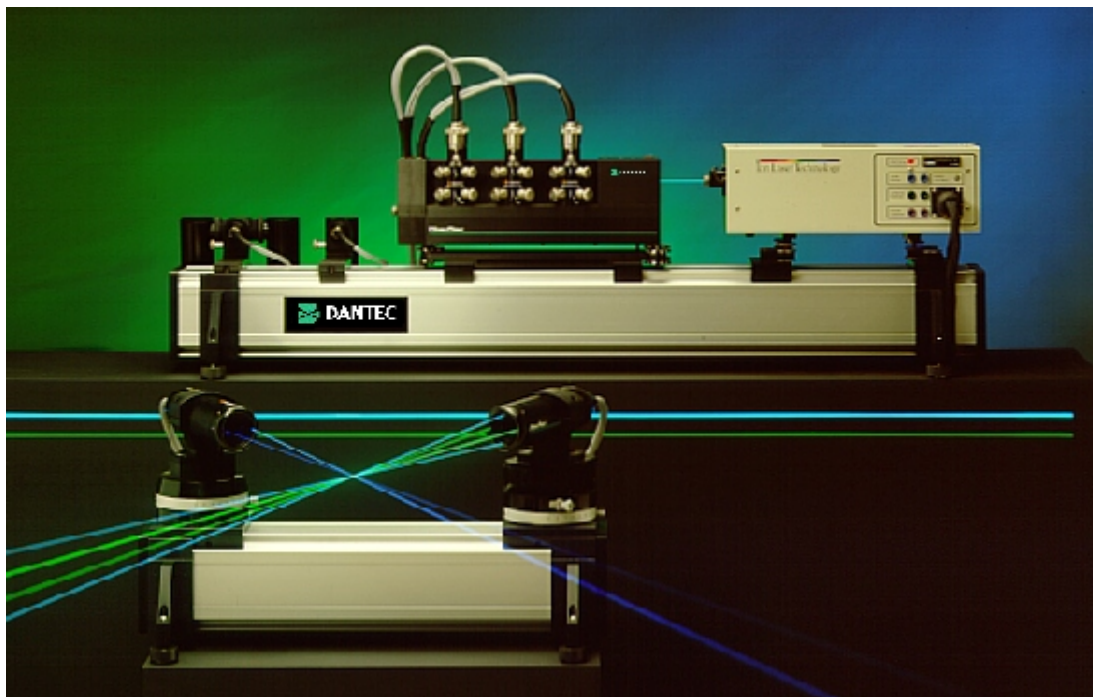
$$\Delta v = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v}{\Delta y} = \frac{2v}{\lambda_0} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Jest to dokładnie to samo wyrażenie, jakie otrzymaliśmy poprzednio dla przesunięcia dopplerowskiego.

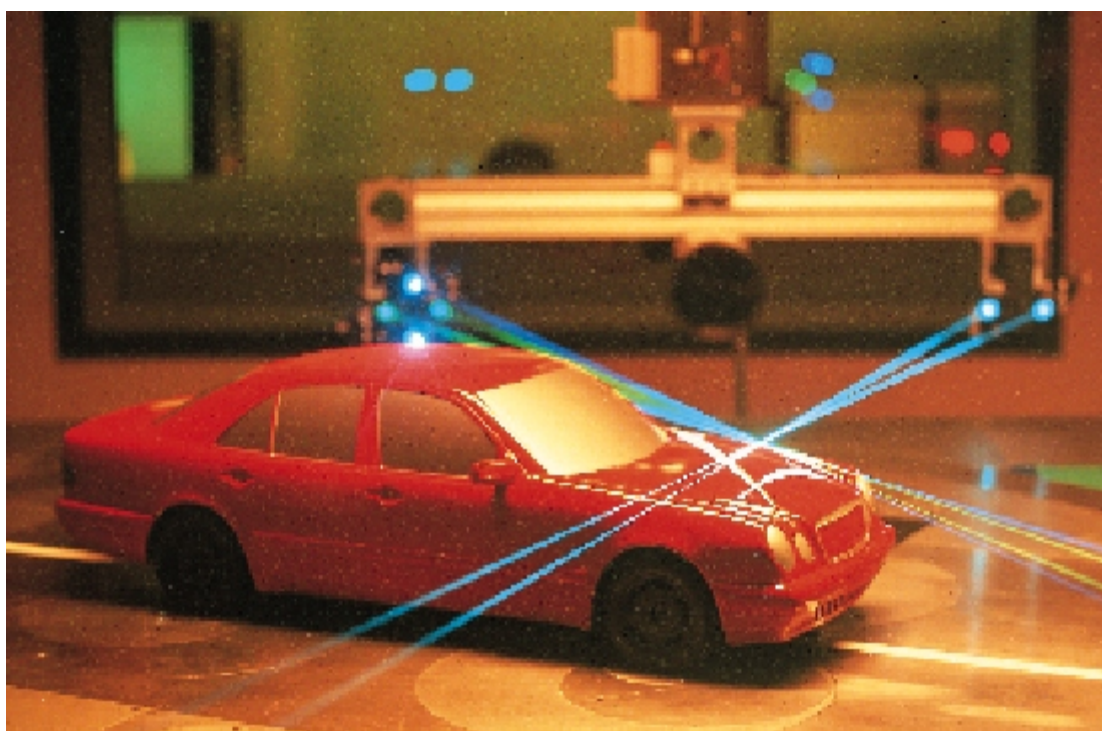


Zasada działania laserowego anemometru dopplerowskiego

<http://www.dantecdynamics.com/LDA/Princip/Index.html>



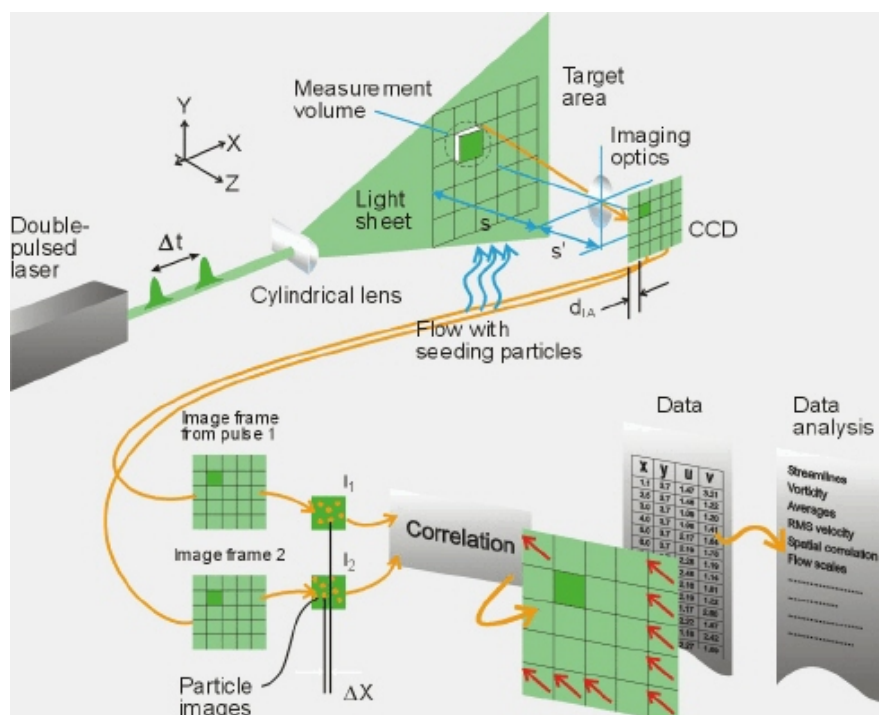
Laserowy anemometr dopplerowski firmy DANTEC



Pomiar w tunelu aerodynamicznym pola przepływu wokół modelu samochodu wykonanego w skali 1:5

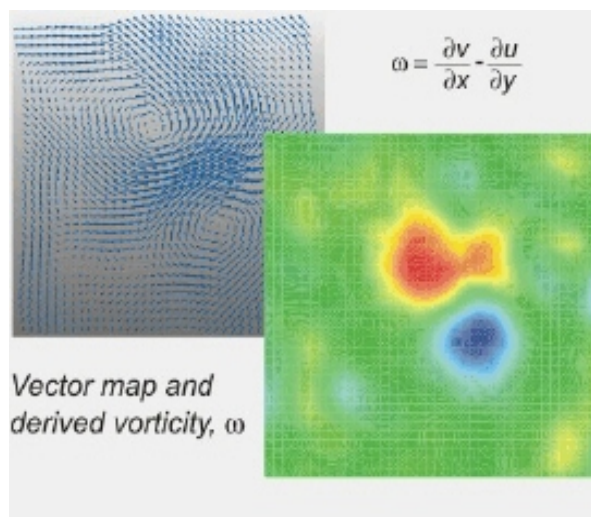
Laserowe obrazowanie pola prędkości cząstek (PIV- *particle image velocimetry*)

Jest to technika pozwalająca na natychmiastowy pomiar wektora prędkości w całym polu przekroju przepływu cząstek. Zazwyczaj mierzone są dwie składowe wektora prędkości, chociaż stosując metody stereoskopowe można zapisać wszystkie trzy składowych dla całego obszaru. Zastosowanie nowoczesnych kamer CCD i specjalnie konstruowanych komputerów



pozwala na tworzenie map prędkości w czasie rzeczywistym. Przy badaniu przepływów wodnych typowymi cząstkami rozpraszającymi światło są kulki polistyrenu, poliamidu lub wydrążonego szkła.

Zasada procesu obrazowanie pola prędkości cząstek



Wektory prędkości otrzymuje się mierząc przesunięcia cząstek w odcinku czasu między dwoma impulsami światła.