Optyczne metody pomiaru prędkości przepływu

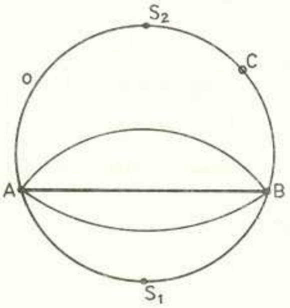
Grzegorz PAKUŁA

W technice często zachodzi potrzeba pomiaru prędkości przepływającej cieczy bądź gazu. Ta dziedzina badań ma nawet swoją nazwę – anemometria. Najstarszą, historycznie rzecz biorąc, metodą było użycie sond aerodynamicznych, które pozwalają określić prędkości przepływu na podstawie pomiaru różnicy między ciśnieniem statycznym a ciśnieniem całkowitym – większym od statycznego o wartość powstałą z wytrącenia energii kinetycznej płynu. Później, w połowie naszego stulecia, rozwinęła się termoanemometria. Rolę sondy w tej metodzie pełni cienki, podgrzewany drucik. Płyn opływający sondę powoduje chłodzenie drucika. Mierząc jego oporność można wyznaczyć prędkość przepływu, która decyduje o intensywności chłodzenia. Obie wspomniane metody mają wspólną wadę – wymagają mianowicie wprowadzenia sondy w obręb przepływającego płynu. Sonda zaś powoduje zakłócenia mierzonego pola prędkości. W niektórych przypadkach sonda może być narażona na oddziaływanie ekstremalnie niekorzystnych warunków, na przykład w pomiarach przepływu cieczy żrących bądź w komorach spalania. Tych trudności możemy uniknąć stosując metody optyczne, które wymagają wprowadzenia jedynie wiązki światła w obszar przepływu. Źródłem informacji jest w tym przypadku światło rozproszone na drobnych cząstkach (zanieczyszczeniach) unoszonych przez płyn. Wiele płynów spotykanych w technice z natury zawiera takie cząstki; jeśli nie, można je wprowadzić sztucznie, na przykład w postaci dymu (gdy mierzy się prędkość gazu).

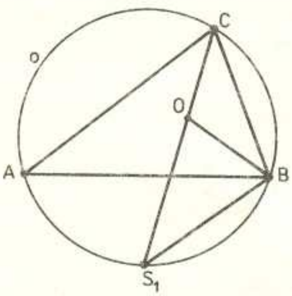
Aby zrozumieć zasadę laserowej anemometrii optycznej, należy przypomnieć sobie trzy podstawowe fakty. Po pierwsze – światło jest falą elektromagnetyczną, czyli jego rozchodzenie się polega na zmianie natężenia pola elektromagnetycznego w czasie i przestrzeni zgodnie z przebiegiem sinusoidalnym. Po drugie – dwie fale mogą interferować. W efekcie interferencji dwóch fal o bliskich częstościach otrzymujemy pewien przebieg okresowy o podstawowej częstotliwości zależnej od częstotliwości fal składowych. Po trzecie – częstotliwość fali mierzona przez obserwatora zależy od prędkości względnej źródła fali i obserwatora. Jest to tzw. *efekt Dopplera*, tłumaczony zazwyczaj na przykładzie fal akustycznych. Obserwator, do którego zbliża się motocykl, słyszy inną częstotliwość pracy silnika, niż obserwator, od którego pojazd się oddala. Analogiczne zjawisko zachodzi dla fal świetlnych. Jeśli oświetlimy poruszającą się czastkę, to światło przez nią rozproszone będzie miało inną częstotliwość (a więc i barwę) w zależności od tego, czy cząstka przybliża się czy oddala od obserwatora. Teoretycznie, w celu pomiaru prędkości wystarczy więc oświetlić cząstkę unoszoną przez płyn, a następnie dokonać pomiaru częstotliwości światła przez nią rozproszonego w dwu kierunkach. Praktycznie jest to jednak niewykonalne, gdyż częstotliwość światła jest tak duża, że bezpośredni jej pomiar byłby technicznie niezmiernie skomplikowany, o ile w ogóle możliwy. Aby ominąć tę trudność, w anemometrii dopplerowskiej zawsze dokonuje się interferencji (nałożenia) dwu fal. W efekcie otrzymuje się sygnał, którego podstawowa częstotliwość jest równa różnicy częstotliwości dwu fal składowych, a więc zazwyczaj jest ona znacznie niższa od częstotliwości fali świetlnej i możliwa do zmierzenia.

Źródłem światła oświetlającego cząstkę jest zawsze laser, ze względu na możliwości precyzyjnego określenia częstotliwości oraz łatwość koncentracji wiązki w przestrzeni. Istnieje kilka wariantów metody w zależności od tego, jakie fale są na siebie nakładane. Można oświetlić poruszającą się cząstkę pojedynczą wiązką laserową, a następnie, przy użyciu odpowiedniego układu optycznego, doprowadzić do nałożenia wiązek światła rozproszonych w dwu różnych kierunkach. Można oświetlić cząstkę pojedynczą wiązką, a następnie

Rozwiązanie zadania M 598. Są to zawarte w kole o brzegu o łuki okręgów przechodzących przez A i B i mających środki w środkach łuków, na jakie A i B dzielą okrąg o (bez A i B).

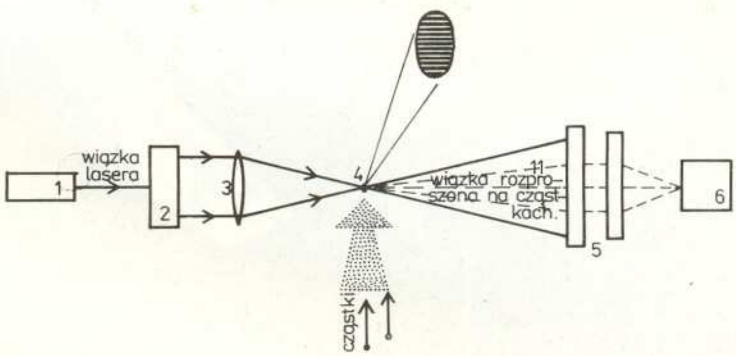


A oto dowód. Środek O okręgu wpisanego w trójkąt ABC leży na przecięciu dwusiecznych kątów tego trójkąta. Dwusieczna kąta ACB połowi łuk AB (bo równe kąty wpisane są oparte na równych łukach) – oznaczmy punkt przecięcia tej dwusiecznej z o przez S_1.



Wystarczy wykazać, że trójkąt OS_1B jest równoramienny (a dokładniej, że $OS_1 = BS_1$). Mamy
$\angle S_1OB = \angle OCB + \angle OBC = \frac{1}{2}\angle ACB + \frac{1}{2}\angle ABC$,
bo kąt S_1OB jest kątem zewnętrznym trójkąta OCB
oraz
$\angle OBS_1 = \angle OBA + \angle ABS_1 = \frac{1}{2}\angle ABC + \frac{1}{2}\angle ACB$,
bo kąty ABS_1 i ACS_1 są oparte na tym samym łuku.
Zatem $\angle S_1OB = \angle OBS_1$, skąd $OS_1 = BS_1$.

dokonać interferencji światła rozproszonego z niezakłóconą wiązką laserową. Można wreszcie oświetlić poruszającą się cząstkę dwiema wiązkami laserowymi z różnych kierunków, a następnie mierzyć częstotliwości nałożonych dwu fal rozproszonych w tym samym kierunku pochodzących od obu wiązek. W tym ostatnim przypadku możliwe jest nieco inne, prostsze, objaśnienie zjawiska. Dwie wiązki laserowe przecinając się w przestrzeni interferują, dając w pewnym obszarze prążki interferencyjne. Cząstka przelatując przez ten obszar wysyła impuls świetlny w momencie, gdy przelatuje przez każdy jasny prążek. Mierząc czas między poszczególnymi rozbłyskami oraz znając odległość prążków, zależną od długości fali i kąta przecięcia wiązek, można wyznaczyć prędkość cząstki. Ściślej rzecz biorąc, składową prędkości leżącą w płaszczyźnie przecięcia dwu wiązek laserowych i prostopadłą do dwusiecznej kąta między nimi. Chcąc zmierzyć drugą (prostopadłą) składową prędkości należy krzyżujące się wiązki obrócić o 90° wokół dwusiecznej.



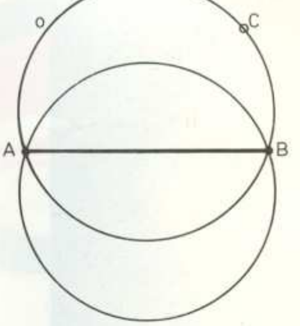
Schemat układu pomiarowego z podwójną wiązką laserową.

1. Laser
2. Układ rozdziału wiązki
3. Układ skupiający wiązki
4. Przestrzeń pomiarowa wypełniona prążkami
5. Układ optyczny pomiaru sygnału
6. Fotodetektor

Dużą zaletą anemometrii laserowej jest to, że (jak wynika z analizy teoretycznej) różnica częstotliwości nałożonych wiązek jest wprost proporcjonalna do prędkości cząstek. Pewną wadą jest natomiast to, że de facto nie mierzymy prędkości płynu, lecz prędkości zawieszonych w nim cząstek. Na szczęście dla odpowiednio drobnych cząstek prędkości te praktycznie się pokrywają. Dokładność metody jest wysoka i zależy w pierwszym rzędzie od precyzji w określeniu kąta między krzyżującymi się wiązkami. Błąd pomiaru nie powinien przekraczać 2 – 3%, co może wydawać się wartością znaczną, lecz w dziedzinie pomiaru prędkości jest to spore osiągnięcie. Anemometria laserowa nadaje się do pomiarów prędkości szybko zmiennych. Reakcja układu pomiarowego na zmianę prędkości jest w praktyce natychmiastowa, w odróżnieniu od metod klasycznych charakteryzujących się pewną bezwładnością. Jedynym ograniczeniem jest gęstość rozmieszczenia cząstek w płynie, gdyż oczywiste jest, że nie da się dokonać pomiaru w mniejszym odstępie czasu niż ten, który oddziela pojawienie się dwu kolejnych cząstek w przestrzeni pomiarowej. W każdym razie, metoda nadaje się do mierzenia szybko zmieniających się tzw. składowych fluktuacyjnych w ruchu turbulentnym płynu. Zdjęcie na tylnej okładce przedstawia przykład zastosowania anemometrii laserowej do badania opływu wokół kadłuba statku.

Autor pragnie wyrazić podziękowanie dr A.K. Lewkowiczowi i dr S. Cheah z Uniwersytetu w Liverpoolu za życzliwą pomoc w przygotowaniu tekstu.

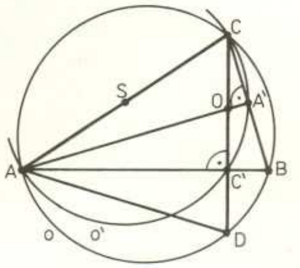
Rozwiązanie zadania M 600. Jest to okrąg będący obrazem o w symetrii względem prostej AB (bez A i B).



A oto dowód. Niech AA' i CC' będą wysokościami trójkąta ABC. Ortocentrum oznaczmy przez O. Wysokość CC' przecina o w punkcie D. Mamy

$$\angle DCB = \angle DAB,$$

bo są to kąty wpisane w o i oparte na tym samym łuku.



Okrąg o' o środku w środku odcinka AC i przechodzący przez A i C przechodzi także przez A' i C' (bo z obu tych punktów widać AC pod kątem prostym). Zatem

$$\angle C'AA' = \angle C'CA',$$

bo są to kąty wpisane w o' i oparte na tym samym łuku.
Wynika stąd, że $\angle DAC' = \angle OAC'$, a więc trójkąty DAC' i OAC' są przystające (bo mają wspólny bok i równe odpowiednio przyległe do niego kąty). Zatem $DC' = C'O$ i O jest obrazem D w symetrii względem prostej AB.