

Lasermätteknik

När laser kom i början på 60-talet var det användningsområde (förutom vetenskaplig forskning) man såg framför sig enbart att strålen skulle kunna användas militärt för att med den värme som utvecklas när ljuset absorberas kunna förstöra saker och ting. Sedan dess har många andra tillämpningar etablerats och blivit vanliga. CD:n, laserskrivaren, telefoni över optisk fiber och små pekpinne-lasrar är bara några exempel. Men ett område som verkligen revolutionerats är optiska mättekniker av olika slag. Av dessa är förstas avståndsmätning den mest näraliggande.

I praktiskt bruk finns här huvudsakligen två tekniker: Pulsloptidmätning (Time of Flight, TOF) och Lasertriangulering.

Pulsloptidmätningen innebär att man klockar hur lång tid en puls tar på sig för att gå till mätobjektet och tillbaka. Upplösningen i en sådan mätning ges av den längsta av pulslängden, T , och detektionssystemets svarstid. I de flesta fall (med Q-switchad laser exvis) ligger denna tid runt ngn ns. Räknat i längd blir då felet i mätningen $\Delta L = cT/2$ vilket blir några dm. Obs att detta fel är oberoende av avstånd, dvs på 10m avstånd är felet 1% och på 500m avstånd 0.02%!

Instrumentets räckvidd ("hur långt lasern når") beror inte på hur långt strålen tar sig. Vi vet ju sedan tidigare att strålen kan nå åtskilliga km utan att bli större än enstaka cm. Begränsningen ligger i stället i att ljuset efter reflektion mot en matt yta (gran, stridsvagn, flygplan) sprids i alla riktningar dvs i en halvsfär. Om målet är försett med laserreflektor minskas spridningsvinkeln till ngt tiotal mrad dvs en tiotusendel av en halvsfär. Hur stor andel av detta ljus som detektor med eventuell lins kan samla in beror av avstånd, L , linsens (eller detektorns) radie r :

Ljuset sprids över en yta $A_{halvsfär} = 2\pi L^2$, medan linsen har en yta av $A_{lins} = \pi r^2$

$$Andel = r^2 / 2L^2 \approx 5 \cdot 10^{-10}$$

Det numeriska värdet gäller en lins med radie 3cm och avstånd 1km. Av en ursprunglig puls på 10mJ kam man alltså räkna med att samla in 5pJ. Vilket ligger nära undre gränsen för vad en detektor kan se. På stationära anläggningar kan man kanske öka linsradien ngt, men annars finns inte så mycket att göra. Dessutom kanske målet är så eländigt att det inte är kritvitt, dvs att det absorberar en del....

Pulsekon för hastighetsmätning

Man mäter i detta fall inte hastighet direkt, utan avstånd vid två tidpunkter, definierar skillnaden däremellan som förflyttning och delar sedan med tiden mellan mätningarna (=mättiden). Detta ger oss ett fel i hastigheten på:

$$\Delta v = \frac{\Delta L_2 + \Delta L_1}{t_{mät}} = \frac{cT}{t_{mät}}$$

dvs ju längre man kan mäta ju bättre noggrannhet får man. En oceanångare, där man kan mäta under 10s kan man mäta med ett fel av bråkdelar av 1m/s, men ett stridflygplan..... Om mättiden är 0.1s blir det inte bättre än tiotals till hundratals m/s. Detta kan naturligtvis pressas med kortare pulser, snabbare detektorer osv, men i detta härad ligger det!

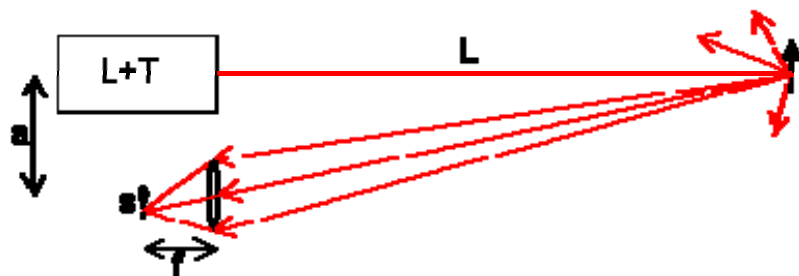
Riktigt katastrofalt blir det om man försöker beräkna en acceleration genom att mäta två hastigheter, dvs tre avstånd. Skillnaden mellan de två hastigheterna delas sedan med mättiden och då får man accelerationen. Felet i den blir då summan av två hastighetsfel delat med mättiden, dvs flera g!

För mer krävande hastighetsmätningar används i stället dopplereffekt där man får en frekvensändring på det reflekterade ljuset som kan mätas genom att blanda detta med en liten del av det utsända och sedan registrera de svävningar man får vid blandningen. Denna svävningsfrekvens blir

$f_{svävning} = 2v \cos \alpha / \lambda$ där α är vinkeln mellan objektets rörelse och observationsriktningen. Denna kan kombineras med en avståndsmätning om det ljus som sänds ut pulsas på lämpligt sätt (sågtand). Vi tittar i detalj på detta senare.

Lasertriangulering

Vi lasertriangulering används inte löptiden för att mäta avståndet utan vad man gör är egentligen att mäta basen i en mycket spetsig triangel vars spets ligger vid målet. Principen ser ut som i figuren:



Man belyser objektet så att en spot bildas på den. Det ljus som återkastas samlas ihop av en lins mot en detektor som är positionskännande, dvs känner var ljusets tyngdpunkt ligger. Denna kommer att ligga i förlängningen av den stråle som går genom mitten av linsen vilket innebär att den lilla triangeln s/f kommer att vara likformig med den stora a/L , dvs $L=af/s$.

Upplösningen i denna mätning beror på hur noggrant s kan mätas

$$L = \frac{af}{s}$$

Vi utgår från s och differentierar den (för att se hur ett fel i s fortplantar sig till L)

$$\Delta L = \frac{af}{s^2} \Delta s = \frac{af}{(af/L)^2} \Delta s = \frac{L^2}{af} \Delta s$$

Välj exvis $L=100\text{m}$, $a=0.5\text{m}$ och $f=0.2\text{m}$. s kan med modern PSD (PositionSensitiveDetector) mätas med 100nm noggrannhet, vilket ger oss cm -noggrannhet. Med en mer normal PSD kommer vi ändå ner till dm . Men felet ökar snabbt med avstånd!!

Flödesmätning

Vid optiska flödesmätningar används ofta en laserbaserad dopplermetod kallad LDV (Laser Doppler Velocimetry). Denna bygger på dopplereffekten vilken härleds nedan för en källa som rör sig med hastighet v och sänder ut ljus med en våglängd som i sändarens system upplevs vara λ som är lika med c/f

Partikeln betraktas vid tre på varandra följande ljusutsändningstidpunkter, åtskilda i tiden med en period för ljuset. Sträckan partikeln rör sig blir då $s=vT$.

Vid var och en av dessa tidpunkter utsänds en vågfront. Den första av dessa har då hunnit 2λ och den andra λ när den sista sänds ut. Eftersom den utsändande partikeln hunnit flytta sig mellan utsändningarna blir emellertid avståndet mellan vågfronterna

$$\lambda' = \lambda - vT \cos \theta \Rightarrow \Delta\lambda = -vT \cos \theta$$

Efter det vi så småningom ska mäta är vilken svävningsfrekvens vi får mellan detta ljus och ljus från orörliga partiklar är det bra att uttrycka detta som en frekvensändring:

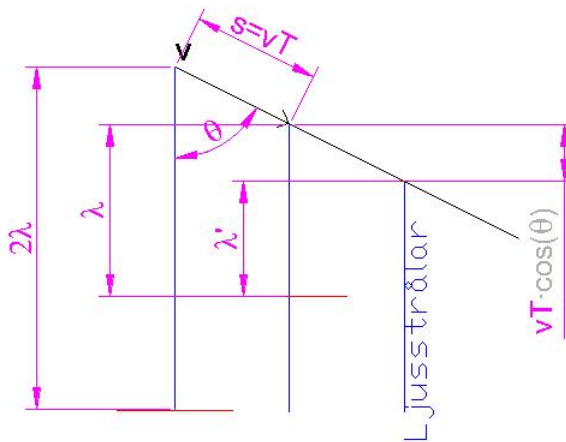
$$\Delta f = \Delta \left(\frac{c}{\lambda} \right) = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{c}{\lambda^2} v \frac{\lambda}{c} \cos \theta = \frac{v}{\lambda} \cos \theta$$

I fallet med ljus som inte sänds ut av partikeln utan reflekteras mot den kan man generalisera till

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} (\cos \theta_{in} - \cos \theta_{ut})$$

där vinklarna är vinkel mellan inkommande ljus och hastighetsvektorn resp spritt ljus (=betraktningsriktningen) och hastighetsvektorn.

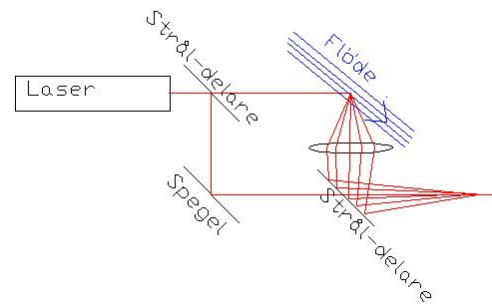
Möjligen kan man tycka att det är intressant att se att detta uttryck kan härledas ut det relativistiska uttrycket för tidsdilatation, vilket också ger och att den relativa ändringen av frekvensen är v/c . Detta låter som en mätteknisk omöjlighet, men är det som gör att den sökta storheten är mätbar.



Iden är nu sedan att låta det spridda ljuset interferera med ljus som inte reflekterats mot rörligt mål och därför har kvar sin ursprungliga frekvens/våglängd. Man kan då förvänta sig att intensiteten varierar med skillnadsfrekvens pga svävning.

Det finns två principiellt olika mätupställningar varav den föra illustreras i figuren nedan.

Som synes är det en uppställning som liknar en Mach-Zender-nterferometer, men den "lilla" ändringen att en spegel är utbytt mot spridning i den strömmande vätskan. Spridningen i en sådan sker så gott som isotropt och omfattar dessutom oftast bara en mindre del av det belysande ljuset. Alltså bör den första stråldelaren släppa igenom nästan allt ljus och bara reflektera en mycket liten andel.



Det spridda ljuset måste sedan samlas ihop med en lins mot detektorn vilket innebär att man måste ta hand om ljus som är spritt i olika riktningar. Detta leder till en motsvarande osäkerhet i hastighetsbestämningen eftersom cos-faktorerna varierar med olika riktningar.

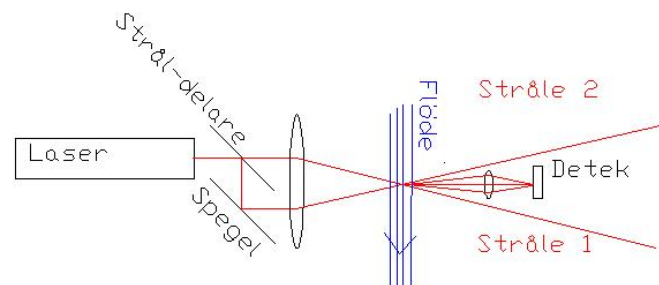
Man hamnar alltså i en obehaglig motsatsställning mellan ljusekonomi och mätprecision. Av denna anledning utvecklades tidigt metod 2, som fungerar enligt vidstående figur:

Iden är att inte ha någon referensstråle som är opåverkad utan låta spritt ljus från två laserstrålar interferera med varandra.

Det spridda ljuset från stråle 1 får frekvensen

$$f_1' = f + \frac{v}{\lambda} (\cos \theta_{in,1} - \cos \theta_{ut,1})$$

där $\theta_{in,1}$ är vinkeln mellan stråle 1 och flödet, och $\theta_{ut,1}$ är vinkeln mellan flödet och den spridda strålen. Denna är lika för ljus spritt från stråle 1 och från stråle 2 varför man kan ta bort index 1 och 2 i den spridda strålen.



För stråle 2 blir det helt analogt

Den svävning som uppkommer på detektorn får nu frekvensen

$$\Delta f = f_1' - f_2' = \frac{v}{\lambda} (\cos \theta_{in,1} - \cos \theta_{in,2})$$

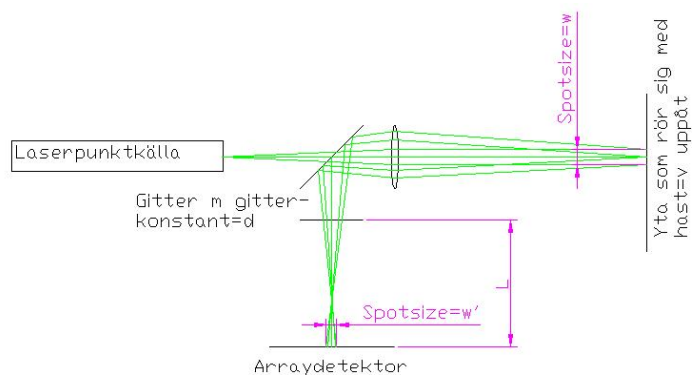
dvs den blir oberoende av vilken av de spridda strålarna vi registrerar eftersom alla par ger samma skillnadsfrekvens.

Numeriskt exempel: Låt stråle 1 och stråle 2 bilda vinkeln 30° mot linsernas symmetriaxel. Detta ger att den trigonometriska faktorn blir 1. Väljer vi då 514nm våglängd (Ar-jons-laser) får vi för 1m/s i flödes hastighet ca 2MHz. Elektriska frekvenser är mätbara upp till ca 10GHz vilket ger oss mätområdet.

Metodens svaghet är att den kräver mycket stark laser eftersom andelen ljus som sprids i den lilla rymdvinkel detektorlinsen upptar är liten. Den går dessutom bara att använda vid rörelse hos fasta material eller vid laminärt flöde i fluider.

Ett alternativ till ovanstående vid hastighetsmätning på förbipasserande ytor är att fokusera ljus på ytan och sedan titta på reflexen från ytan, avbildad genom en lins och ett gitter. Uppställningen blir som i fig :

Lasern (som ofta är av halvledartyp) belyser genom en lins ytan på det objekt som rör sig med en spot som har diametern w . Denna yta avbildas på återvägen genom linsen mot ett plan som ligger mellan ett gitter och en arraydetektor. På arraydetektorn bildas en (defokuserad) fläck med diameter w' som pga gittret tredubblas (tre ordningar).



Detta innebär att en detalj som passerar genom w på tiden t kommer att passera genom w' på tiden $(w'/w)t$, dvs detaljen (eller skugga eller diffraktionsmönstret) av den rör sig med hastigheten

$$v' = v \frac{w'}{w}$$

Avståndet i detektorplan, b , mellan de tre kopiorna av samma detalj ges av gitterformeln

$$b = L \tan \theta \approx L \sin \theta = \frac{L\lambda}{d}$$

Tiden mellan passage av samma detalj skugga på ett detektorelement blir då

$$t = \frac{b}{v'} = \frac{L\lambda w}{dvw'} \Rightarrow \text{frekvens} = v \frac{dw'}{\lambda L w}$$

I detektorerna registreras förstås många olika frekvenser beroende på att ytan är mer eller mindre matt, vilket genererar en brusliknande signal. Däremot förekommer ovanstående frekvens hela tiden så om signalen får passera en frekvensanalysator är den lätt att mäta. Detta är den princip exvis optiska möss använder sig av.