

13. Измерение скоростей

13.1. Измерение поступательных скоростей

Наиболее часто применяемый метод измерения скорости основан на использовании доплеровского сдвига частоты видимого излучения при отражении или рассеянии на движущемся объекте.

Суть эффекта Доплера заключается в следующем. Если световая волна с частотой f отражается от объекта, который движется со скоростью v , то частота волны изменяется. Величина доплеровского сдвига частоты определяется из выражения

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c},$$

где c – скорость света.

В качестве объектов, от которых отражается излучение, служат переносимые потоками малые частицы. В большинстве технологических потоков газов или жидкостей такие частицы всегда имеются. Поэтому во многих практически важных случаях рассеивающих (отражающих) частиц достаточно для того, чтобы гарантировать различимый уровень принимаемого отраженного сигнала (излучения).

В тех же случаях, когда жидкость (газ) очень прозрачна и не содержит рассеивающих центров, искусственно вводят в исследуемую среду специальные частицы. При этом их диаметр должен быть достаточно мал, чтобы частицы не отставали от движения потока.

Основное достоинство доплеровского измерителя скорости – бесконтактность измерения, возможность проведения дистанционного измерения.

При измерении, таким образом, не вносится возмущение в исследуемый поток.

Малая ширина спектра излучения лазера обеспечивает точное измерение скорости. Лазерный измеритель обладает высоким быстродействием, что позволяет получать с его помощью данные о переходных режимах потока и исследовать характеристики турбулентного потока.

Метод может быть использован для изучения скорости потоков горячих, агрессивных жидкостей, вредных газов (как ламинарных, так и турбулентных), исследования явлений в пограничном слое и ударных волнах, определения трехмерного поля скоростей воздуш-

ных потоков на конце самолетного крыла, измерения параметров потока между лопатками турбины, измерения скорости газа внутри ротора компрессора и скорости потока крови в сосудах живого организма, для дистанционного измерения скорости ветра и т.п.

Диапазон измеряемых скоростей от нескольких см/с до нескольких сот м/с (до 1300 м/с).

При реализации метода измерений пучок фокусируют в заданную точку внутри потока, а затем собирают излучение, рассеянное от жидкости (газовой среды) или взвешенных в ней частиц, и направляют его на приемник.

После обработки выходного сигнала приемника определяют величину доплеровского сдвига частот и по нему скорость потока.

Поскольку измеряемый объем может быть мал (диаметр фокального пятна ~ 10 мкм), то с помощью этого же метода можно измерять также профиль течения с высокой точностью.

При появлении различных скоростей в измеряемом объекте, например, вследствие турбулентности, рассеянный свет испытывает спектральное (доплеровское) уширение, т.е. появляется возможность контролировать и характер течения жидкости.

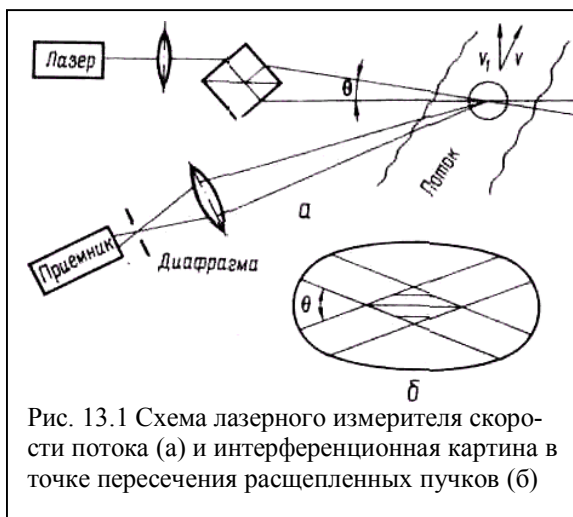


Рис. 13.1 Схема лазерного измерителя скорости потока (а) и интерференционная картина в точке пересечения расщепленных пучков (б)

В основе промышленных лазерных доплеровских измерителей скорости обычно лежит схема с двумя пучками.

Излучение лазера непрерывного излучения делится на два пучка равной интенсивности при помощи разделителя луча (рис. 13.1). Перед расщепителем установлена фокусирующая линза. Излучение,

получаемое при помощи такой системы, можно визуализировать в виде интерференционных полос. В местах пересечения обоих пучков

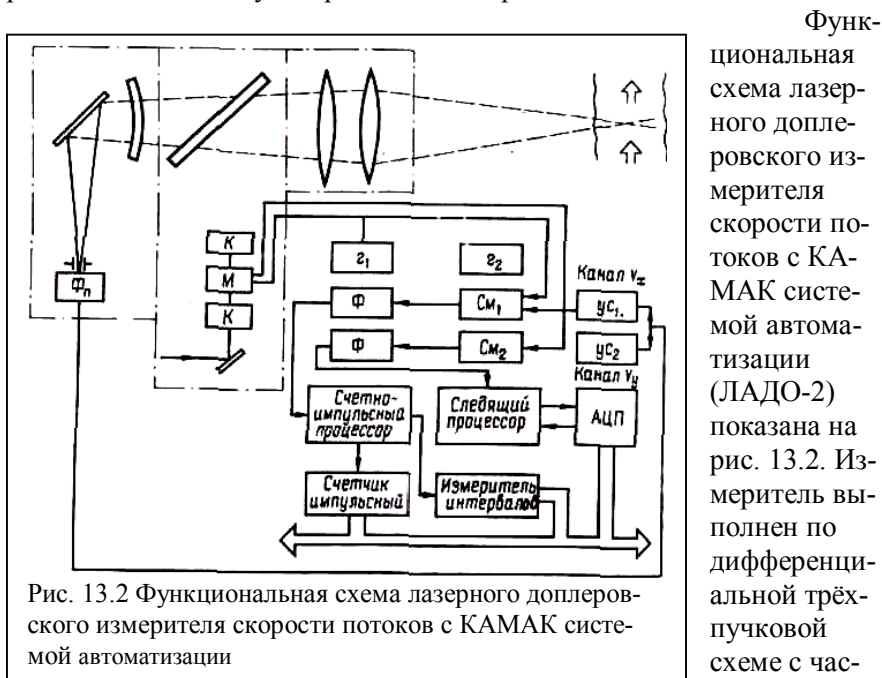
в результате их интерференции возникают области с чередованием большой и малой интенсивности.

Если движущаяся частица пересекает область интерференции, то рассеиваемое ею излучение возрастает, когда она проходит через область с высокой интенсивностью. Принимаемое излучение создает на выходе приемника переменный электрический сигнал с частотой пропорциональной скорости, с которой движущаяся частица пересекает интерференционные полосы:

$$\Delta f = 2v \sin(\theta/2) / \lambda_0 n,$$

где θ – угол между двумя сходящимися пучками; λ_0 – длина волны лазерного излучения в вакууме; n – показатель преломления среды (жидкости).

Необходимая мощность лазерного излучения определяется геометрией и расстоянием, на котором должны проводиться измерения. Для измерений на расстоянии 10-20 см обычно достаточно гелий – неоновый лазер мощностью 5-15 мВт. При измерении на большом расстоянии используют аргоновые лазеры мощностью 1Вт и более.

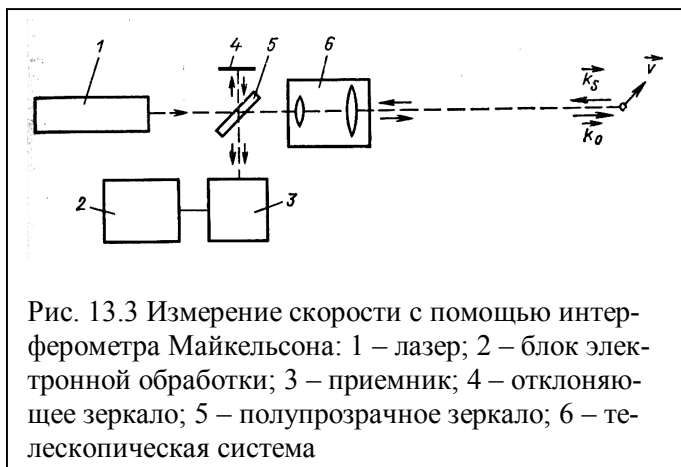


тотным разделением ортогональных компонентов вектора скорости. Несущие частоты в X и Y каналах равны соответственно 20 МГц и 34 МГц.

Прибор состоит из оптико-механического блока и электронного процессора. Оптико-механический блок имеет модульную конструкцию. К измерителю прилагается набор сменных оптических элементов, позволяющих в широких пределах менять его характеристики. Он может работать с любым лазером непрерывного излучения в видимой области спектра.

Электронный процессор счетно-импульсного и следящего типов выполнен в конструктиве КАМАК. При введении АЦП контроллера в крейт процессора прибор может применяться в системах автоматизации научного эксперимента на основе ЭВМ. Имеется цифровой отсчет средней скорости и выход аналогового напряжения, пропорциональный мгновенной скорости в заданной полосе частот. Следящий фильтр позволяет выполнять измерения даже в тех ситуациях, когда интенсивность рассеянного излучения очень мала и отношение сигнал/шум может падать до значений 0,5.

Часто используется устройство, имеющее схему интерферометра Майкельсона в

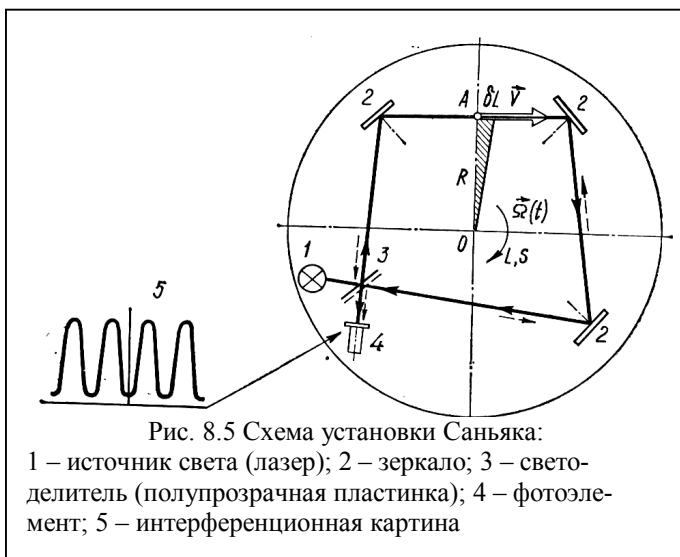
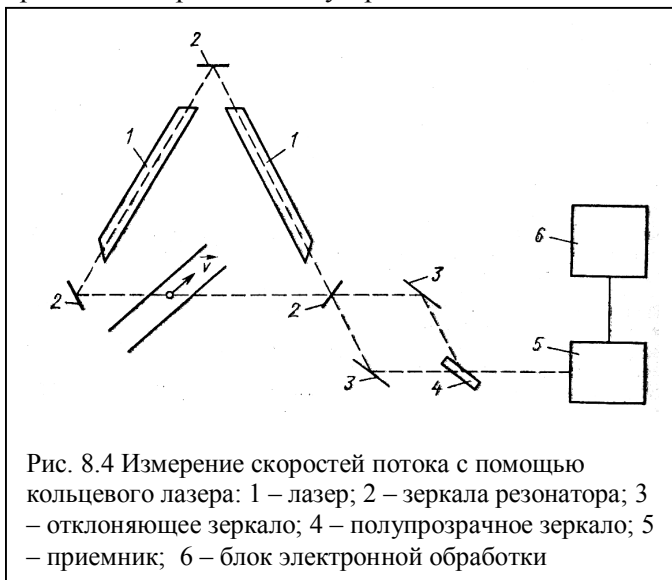


котором одно из зеркал заменено рассеивающей поверхностью движущегося объекта (рис. 13.3). С помощью такого прибора могут быть измерены

скорости на большом расстоянии (до 20 м).

Чувствительность измерения $\sim 10^{-5}$ м/с, она ограничена возмущениями, которые действуют различным образом на оба интерферирующие пучка (вибрации, колебания плотности воздуха и т. п.).

Верхняя граница измеряемого диапазона определяется постоянной времени измерительного устройства.



Возможно измерение скоростей потока путём определения коэффициентов увлечения Френеля с помощью кольцевого лазера (рис.13.4). Этот метод основан на эффекте Саньяка (1926 г.), который заключается в том, что время прохождения электромагнитной волны во вращающемся кольцевом резонаторе увеличивается или уменьшается в зависимости от того, совпадает направление движения волны с на-

правлением вращения резонатора или противоположно ему. Это объясняется неодинаковой длиной оптического пути, проходимого обоими пучками.

Разность оптического хода излучений на некотором произвольном участке контура в точке А (рис. 13.5) равна

$$\delta L = c\Delta t = c \left(\frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} \right) \quad (13.1)$$

С учетом того, что $v \ll c$, найдем

$$\delta L = \frac{2L}{c}v, \quad (13.2)$$

где L – длина резонатора. Учитывая, что линейная скорость

$$v = R\Omega,$$

где Ω – угловая скорость, а площадь кольцевого лазера $S = RL$, получим

$$\delta L = \frac{2LR}{c}\Omega = \frac{2S}{c}\Omega \quad (13.3)$$

Т.к. оптическая длина пути встречных излучений будет различной, то частоты этих излучений также различны и отличаются от резонансной частоты $\nu_0 = q \frac{c}{L}$ (q – целое число):

$$\nu_1 = q \frac{c}{L + \delta L}, \nu_2 = q \frac{c}{L - \delta L} \quad (13.4)$$

На фотоприёмнике выделится разносная частота, равная (при $\delta L \ll L$):

$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2 = qc \frac{2L\delta L}{L^2 - \delta L^2} \approx \nu_0 \frac{2\delta L}{L} = \frac{4S}{\lambda_0 L} \Omega \quad (13.5)$$

или в векторной форме

$$\Delta\nu = \frac{4S}{\lambda_0 L} (\vec{n}, \vec{\Omega}) \quad (13.6)$$

где $\Delta\nu$ – частота биений, получаемых в результате смешивания двух встречных излучений λ_0 – длина волны на частоте ν_0 , \vec{n} – нормаль к плоскости, в которой лежит резонатор.

Возвращаясь к рисунку 13.4., заметим, что составляющая скорости v_z в направлении распространения света вызывает увеличение (+) или уменьшение (-) скорости света c на величину

$$\Delta c = \pm \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) v_z, \quad (13.7)$$

где n – показатель преломления протекающего вещества.

Это, в соответствии с формулой (13.6.), приводит к расщеплению резонансных частот на величину

$$\Delta \nu = \frac{\Delta L (n^2 - 1)}{\pi L} (\vec{k}, \vec{v}), \quad (13.8)$$

где ΔL – оптическая длина пути света в протекающей среде, \vec{k} – волновой вектор $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \right)$.

Расщепление частоты вызывает биения на частоте $\Delta \nu$, исходя из чего можно определить v .

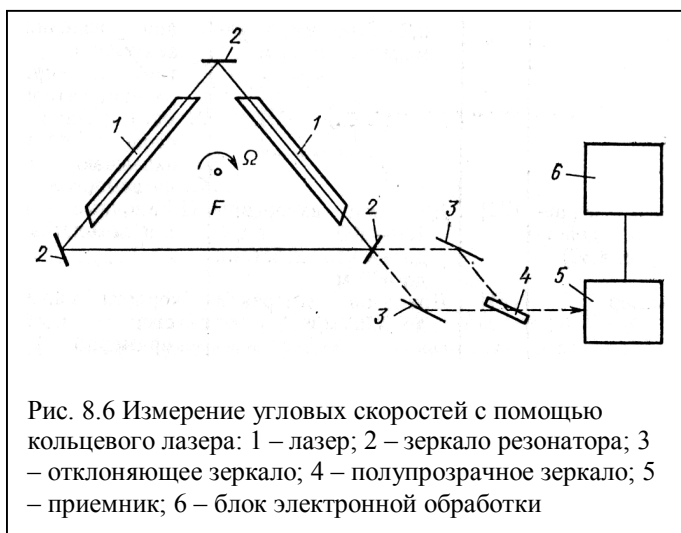
Т.к. расщепление частоты зависит от показателя преломления протекающей среды, то для жидкости измерения могут быть выполнены значительно точнее, чем для газов.

Предельная чувствительность метода равна 10^{-6} м/с для жидкостей и 10^{-3} для газов.

13.2 Измерение угловых скоростей

Угловые скорости удобно измерять с помощью кольцевого лазера, прочно соединенного с вращающейся системой, при условии, что ось вращения пересекает поверхность вращения под углом, отличным от нуля. Принцип действия такой измерительной системы основан на рассмотренном выше эффекте Саньяка (рис. 13.6) . Расщепление частоты $\Delta \nu$, определяемое выражением (13.6), регистрируется простым наложением обоих отдельно выведенных пучков на полупрозрачном зеркале.

В кольцевых лазерах применяются в основном газовые лазеры видимого спектрального диапазона, например He-Ne лазер. Эти лазеры без специальных мер позволяют обеспечить одномодовый



режим работы при достаточно большой площади (периметр 30-40 см).

Обнаружение очень малых Ω затруднительно тем, что встречные волны лазерного излучения взаимно синхронизиру-

ются при малом расщеплении частоты ($\Delta\nu \leq 1$ кГц).

Существенно повысить чувствительность можно при постоянном $\Delta\nu$, если регистрировать изменение этого расщепления, обусловленное вращением. Такой принцип приводит к идее лазерного гироскопа. Лазерные гироскопы позволяют обнаружить угловые скорости в интервале 0,001-0,01 град/ч.

Комплект лазерного гироскопа состоит обычно из трёх кольцевых лазеров, ориентированных в ортогональных плоскостях. Обработка трёх измеренных составляющих $\vec{\Omega}$ даёт возможность определить ориентацию вектора угловой скорости.

Лазерные гироскопы применяются как навигационные инструменты в авиации и космонавтике.