

ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ С ОПТИЧЕСКИМ ДИСКРИМИНАТОРОМ ДОППЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ

П. Я. Белоусов, Ю. Н. Дубнищев и В. А. Павлов

Предложен метод и приведена схема экспериментальной установки для измерения скорости с помощью лазера (ЛДИС), позволяющая исследовать динамику движения различных сред с временным масштабом не менее $0.25 \cdot 10^{-2}$ с и для скоростей в пределах $0.1 \div 10^3$ м/с.

Как известно, выделение доплеровского сдвига частоты в лазерных доплеровских измерителях скорости (ЛДИС) осуществляется методом оптического гомодинирования [1, 2] либо с помощью спектрометра, в качестве которого обычно применяется интерферометр Фабри—Перо (ИФП) с плоскими [3, 4] или сферическими (ИФПС) зеркалами [5]. ЛДИС с гомодинным выделением доплеровской частоты получили наиболее широкое распространение. Они успешно применяются в современном гидро- и аэрофизическом эксперименте и в промышленной технологии. Однако при изучении высокоскоростных процессов такие системы требуют применения широкополосных фотоприемников. Исключение составляют еще не вышедшие из стадии экспериментального исследования измерительные устройства с оптическим преобразованием доплеровской частоты в промежуточную. Электронно-измерительный блок в ЛДИС с оптическим гомодинированием достаточно сложный, так как исследуемый сигнал представляет собой случайную последовательность радиоимпульсов, модулированных по амплитуде и фазе.

Спектрометрическое выделение доплеровской частоты в ЛДИС с применением ИФП либо ИФПС позволяет обойтись без сложных электронно-измерительных блоков. В опубликованных работах описаны устройства с ИФП и ИФПС, которые дают возможность измерять средние доплеровские сдвиги частоты в пределах межмодового интервала интерферометра. Такие устройства обладают малой полосой пропускания временных частот и не позволяют исследовать динамику быстрых процессов в реальном времени.

В работе [7] описано применение эталона Фабри—Перо, работающего в режиме компарирования двух спектральных линий. В применении к стационарным самосветящимся объектам с широкой спектральной линией (поток аргоновой плазмы) описанное устройство, как показано авторами, обеспечивает чувствительность более высокую, чем классический (обычный) спектрометр Фабри—Перо. Однако при этом требуется сложная электронная система исключения балансной ошибки. Такое устройство не может работать с эталоном, имеющим большую крутизну контура пропускания из-за отсутствия привязки резонансной частоты интерферометра к исследуемой спектральной линии.

В настоящей работе обсуждается простой метод измерения скорости с применением многолучевого интерферометра в качестве дискриминатора доплеровского сдвига частоты. Наряду с многолучевыми интерферометрами, такое применение могут иметь среды, обладающие сильно выра-

женными дисперсионными свойствами, а также среды, нелинейно усиливающие или поглощающие исследуемое излучение [8].

Как известно, интенсивность светового пучка, прошедшего через интерферометр Фабри—Перо с плоскими или сферическими зеркалами, определяется формулой Эйри. При малых расстройках нормированная на максимум формула Эйри описывает контур Лорентца

$$I = (1 + 4F^2\gamma^2)^{-1} = [1 + A^2(\nu - \nu_0)^2]^{-1}, \quad (1)$$

где F — острота полос, γ — дробный порядок, A — постоянная, которая определяется коэффициентами отражения и пропускания зеркал, $\nu - \nu_0$ — расстройка относительно резонансной частоты.

В малой окрестности точки $\nu_1 = \nu_0 \pm (1/\sqrt{3} A)$ зависимость интенсивности выходного пучка от частоты может быть приближенно описана линейной функцией

$$I \approx (3/4) + S(\nu - \nu_1), \quad (2)$$

где $S = \sqrt{3}A/8$.

При расстройках относительно частоты ν_1 в диапазоне $\pm 20\%$ от полуширины лорентцовой линии ошибка нелинейности не превышает 3%. Этот участок на склоне контура пропускания ИФПС может быть выбран в качестве дискриминационной частотной характеристики.

Для работы ЛДИС с оптическим дискриминатором доплеровского сдвига частоты необходима привязка рабочей точки ν_1 на дискриминационной характеристике к частоте лазерного излучения. Привязка может быть осуществлена двумя способами.

Первый способ заключается в ведении системы автоподстройки центральной частоты контура пропускания ИФПС к частоте информационного светового пучка, рассеянного движущимся объектом. Частота информационного пучка имеет доплеровский сдвиг, пропорциональный скорости движения. На выходе оптического частотного дискриминатора измеряется интенсивность опорного пучка от стабилизированного по мощности одночастотного лазера. Для работы на линейном участке дискриминационной характеристики можно сместить частоту опорного пучка на необходимую величину $\nu_1 - \nu_0$ с помощью, например, однополосного оптического частотного модулятора [9].

Второй способ предполагает автоподстройку центральной частоты контура пропускания ИФПС к частоте опорного пучка. На выходе дискриминатора измеряется интенсивность информационного пучка. Для компенсации модуляции интенсивности информационного пучка из-за случайного изменения рассеивающих свойств исследуемого объекта необходимо ввести дополнительное устройство, измеряющее отношение интенсивностей информационного пучка на входе и выходе дискриминатора. Амплитуда сигнала на выходе измерителя отношения интенсивностей линейно связана с доплеровским сдвигом частоты, пропорциональным скорости движения рассеивающего объекта. Выход на линейный участок дискриминационной характеристики может быть осуществлен, как и в первом способе, сдвигом частоты опорного пучка на необходимую известную величину.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для исследования ЛДИС с оптическим дискриминатором, в качестве которого применен конфокальный ИФПС. В этом устройстве линейно поляризованный луч одночастотного лазера 1 после прохождения полуволновой пластинки 2 призмой Волластона 3 делится на два ортогонально поляризованных пучка. Один из расщепленных пучков является опорным и имеет интенсивность, много меньшую интенсивности другого пучка. Полуволновая пластинка 2 служит для задания необходимого соотношения интенсивностей расщепленных призмой Волластона лучей. Мощный пучок после призмы Волластона зеркалом 4 и объективом 5 направляется в заданную область движущегося объекта, скорость которого необходимо определить. Таким объектом служит, например, вращающийся рассеивающий диск 6. Угловая скорость вращения диска контролируется тахометром 7. Рассеянный

в исследуемой малой области поверхности вращающегося диска световой поток, сформированный объективом 8 и диафрагмой 9, направляется в конфокальный ИФПС 10, одно из зеркал которого закреплено на пьезо-керамической шайбе 11. Частота рассеянного сигнального пучка имеет доплеровский сдвиг, пропорциональный линейной скорости движения диска в области пересечения с падающим пучком. Опорный пучок зеркалом 12 и тонкой плоскопараллельной стеклянной пластинкой 13 пространственно совмещается с рассеянным пучком и также направляется в ИФПС. Выходящие из дискриминатора опорный и также направленный пучки пространственно разделяются призмой Воластона 3 по ортогональным поляризациям и направляются на соответствующие фотоприемники 15 и 17 с диафрагмами 14 и 16. Если интенсивности рассеянного и опорного пучков одного порядка, между объективом 8 и рекомбинационной пластинкой 13 помещают поляризационный фильтр.

В данной схеме ЛДИС привязка дискриминационной характеристики к частоте излучения лазера осуществляется системой экстремального

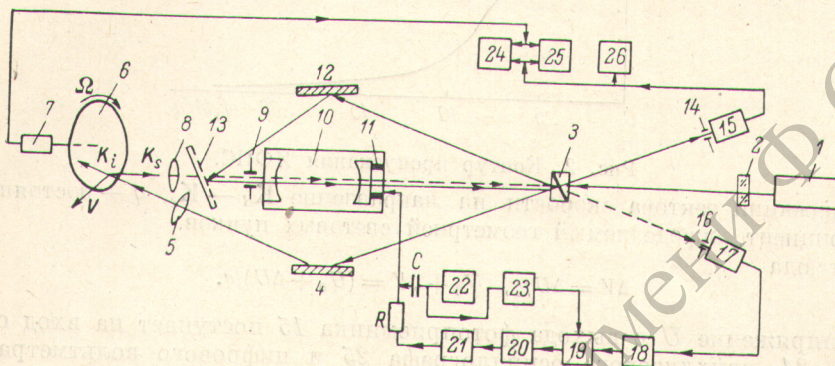


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

управления. Эта система содержит вспомогательный генератор 22, вырабатывающий электрический сигнал с частотой 10 кГц. Сигнал с генератора через RC-фильтр поступает на пьезокерамическую шайбу 11, которая модулирует длину ИФПС. Переменный сигнал с нагрузки фотоприемника 17 поступает на вход селективного усилителя 18, настроенного на частоту модуляции 10 кГц. Сигнал с выхода селективного усилителя подается на фазовый детектор 19, на другой вход которого через фазовращатель 23 поступает опорный сигнал с генератора 22. Величина и полярность выходного напряжения фазового детектора определяется отклонением резонансной частоты ИФПС от частоты сигнального рассеянного пучка. Выходной сигнал с фазового детектора через интегратор 20, усилитель 21 поступает на пьезокерамическую шайбу 11 и является сигналом коррекции.

Пьезокерамическая шайба в соответствии с сигналом коррекции изменяет длину ИФПС, осуществляя подстройку резонансной частоты ИФПС к частоте сигнального рассеянного пучка. Напряжение с нагрузки фотоприемника 15, пропорциональное интенсивности опорного пучка, прошедшего через ИФПС, описывается, согласно (2), формулой

$$U = U_0 + \Delta U = \eta I_0 [(3/4) + S(\nu - \nu_1)], \quad (3)$$

где η — чувствительность фотоприемника; I_0 — интенсивность опорного пучка; S — крутизна линейного участка дискриминационной характеристики в окрестности частоты опорного пучка ν_1 . Выход в рабочую точку на дискриминационной характеристике в данной схеме осуществляется выбором средней скорости V_0 движения диска и геометрией световых пучков. В этом случае выражение для частоты рассеянного пучка, соответствующей линейной скорости V_0 , имеет вид

$$\nu_0 = \nu_1 - [V_0 (K_S - K_i) / 2\pi], \quad (4)$$

где \mathbf{K}_s и \mathbf{K}_i — волновые векторы рассеянного и падающего световых пучков. Отсюда приращение напряжения на выходе фотоприемника 15 пропорционально девиации доплеровской частоты и, следовательно, девиации скорости

$$\Delta U = \gamma S I_0 (\nu - \nu_0) = \gamma S \Delta V (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i) / 2\pi = q \Delta V, \quad (5)$$

где ΔV — девиация скорости движения диска: $\Delta V = V - V_0$, ΔV — девиа-

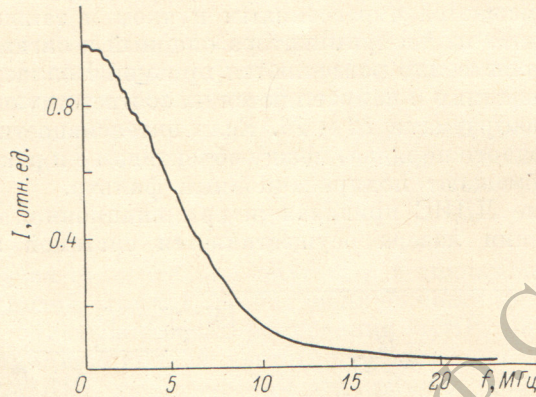


Рис. 2. Контур пропускания ИФПС.

ция проекции вектора скорости на направление $\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i$, q — постоянный коэффициент, определяемый геометрией световых пучков.

Отсюда

$$\Delta V = \Delta U / q, \quad V_0 + \Delta V = (U_0 + \Delta U) / q. \quad (6)$$

Напряжение U с выхода фотоприемника 15 поступает на вход самописца 24, двухлучевого осциллографа 25 и цифрового вольтметра 26. Для сравнения на другой вход двухкоординатного самописца и двухлу-

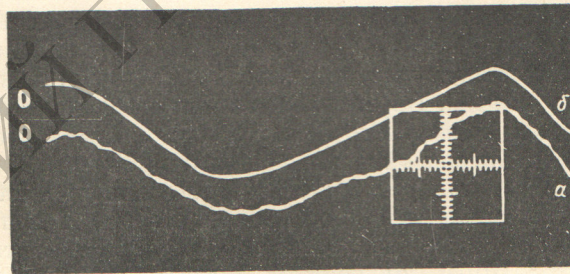


Рис. 3. Сигнал с выхода оптического дискриминатора доплеровской частоты (а) и сигнал с выхода тахогенератора (б).

Масштаб: по оси ординат $m_v = 1,36$ м/с на клетку или $1,18$ МГц на клетку; по оси абсцисс $m_t = 1,5$ с на клетку.

чевого осциллографа поступает сигнал с тахогенератора 7, пропорциональный угловой скорости вращения диска.

На рис. 2 показан экспериментально полученный нормированный на максимум контур пропускания ИФПС, работавшего в режиме частотного дискриминатора. Для снятия этой характеристики диск разгонялся из состояния покоя до большой скорости. По оси ординат отложен доплеровский сдвиг частоты, пересчитанный из выходного напряжения тахогенератора с учетом геометрии световых пучков и расстояния рассеивающей области от оси вращения. Применялся конфокальный ИФПС с радиусом кривизны зеркал 200 мм. Одночастотный режим работы гелий-неонового лазера на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм достигался методами, изложенными в работе [10].

На рис. 3 приведены сигналы с выхода оптического дискриминатора (а) и, для сравнения, с выхода тахогенератора (б). Фотография сделана с экрана двухлучевого осциллографа и иллюстрирует возможность получения информации о девиации скорости движения диска в реальном времени. Эти сигналы получены на вышеописанной установке, система автоподстройки в которой имеет полосу пропускания 400 Гц. Следовательно, быстродействие системы позволяет исследовать в реальном времени динамику движения различных сред с временным масштабом не менее $0.25 \cdot 10^{-2}$ с.

Технически несложно создать измерительные системы с автоподстройкой в полосе частот порядка 10 кГц. Такие ЛДИС, имеющие высокое быстродействие, найдут успешное применение для исследования нестационарных процессов, скорости которых лежат в пределах $0.1 \div 10^3$ м/с.

Литература

- [1] Yu. N. Dubnistchev, V. P. Koronkevich, V. S. Sobolev, A. A. Stolpovski, Yu. G. Vasilenko, E. N. Utkin. *Appl. Opt.*, 14, 180, 1975.
- [2] Yu. N. Dubnistchev, Yu. G. Vasilenko. *Optics and Laser Technology*, 10, 225, 1974.
- [3] В. С. Ринкевичус, А. В. Толкачев. *Ж. прикл. спектр.*, 9, 748, 1968.
- [4] Ю. Г. Василенко, В. В. Донцова, Ю. Н. Дубнищев, В. П. Коронкевич, *Опт. и спектр.*, 33, 170, 1972.
- [5] W. Z. Kuriger. *Proc. IEEE*, 10, 73, 1969.
- [6] Ю. Г. Василенко, Ю. Н. Дубнищев, В. П. Коронкевич, В. С. Соболев, А. А. Столповский, Е. Н. Уткин. *Лазерные доплеровские измерители скорости*. «Наука», Новосибирск, 1975.
- [7] H. F. Döbele, J. H. Massig. *Appl. Opt.*, 15, 69, 1976.
- [8] В. С. Летохов, В. П. Чеботаев. *Усп. физ. наук*, 113, 385, 1974.
- [9] Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. *Методы модуляции и сканирования света*. «Наука», М., 1970.
- [10] Э. Г. Сапрыкин, Р. Н. Юдин, С. Н. Атутов. *Опт. и спектр.*, 34, 755, 1973.

Поступило в Редакцию 27 сентября 1976 г.