

обратная картина (пик, образованный одной частотой, находится в максимуме, а образованный двумя частотами,— в минимуме), что согласуется с работой [6]. Рис. 4 позволяет проиллюстрировать деформацию контура мощности излучения при расстройке контуров усиления и поглощения. В рассматриваемом случае пики наблюдаются на склонах. Если учесть возможность генерации частоты моды TEM_{01} , то возможно появление третьего пика (см. рис. 4, II).

Заключение. Полученные данные могут быть использованы для прецизионной стабилизации спектра газового лазера с излучением на $\lambda=3,39$ мкм не только в одночастотном, но и в двух- и трехчастотном режимах, что важно для получения высокостабильного сигнала в радиочастотном диапазоне. Кроме того, по зависимости мощности излучения от частоты в двухчастотном режиме возможно более точное совмещение центров линии поглощения метана и линии усиления неона. Это позволяет улучшить предельные значения стабильности и воспроизводимости лазера в режиме генерации на одной частоте.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Летохов. Частотный эффект в лазере с нелинейно-поглощающим газом.— «ЖЭТФ», 1968, т. 54, вып. 4, с. 1244—1253.
2. И. М. Бетеров, Ю. А. Матюгин, Г. А. Милушкин, Б. И. Трошкин, В. П. Чеботаев. Высокостабильный газовый лазер на основе поглощения ($\lambda=0,63$ мкм). ч. I. Методы стабилизации частоты мощных газовых лазеров.— «Автоматрия», 1972, № 5, с. 71—85.
3. С. Н. Багаев, А. К. Дмитриев, В. П. Чеботаев. Узкие резонансы в газовом лазере в режиме генерации двух частот.— «Опт. и спектр.», 1974, т. XXXVI, вып. 3, с. 531—538.
4. С. Н. Багаев, А. К. Дмитриев, В. П. Чеботаев. Двухчастотный оптический стандарт.— «Письма в ЖЭТФ», 1972, т. 15, вып. 2, с. 91—94.
5. Toshihisa Tako, Tadshi Akahane, Tashiuyuki Hara.— "Jap. J. Appl. Phys.", 1974, vol. 13, № 2, p. 389—390.

*Поступила в редакцию 14 июля 1975 г.;
окончательный вариант — 30 декабря 1975 г.*

УДК 532.57

В. М. ЛАТЫШЕВ

(Москва)

ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Оптический спектральный метод измерения скорости течения жидкости, основанный на пространственной фильтрации и фотоэлектрической регистрации движения изображений различного рода оптических неоднородностей, успешно применяется при гидродинамических исследованиях [1—3].

Достоинства оптических измерителей скорости течения (ИСТ) на основе этого метода: сравнительная простота оптической схемы измерений; определенная универсальность, связанная с возможностью использования в качестве меток потока оптических неоднородностей самого различного характера (взвешенных частиц, естественных флуктуаций плотности, температуры, собственной светимости и т. п.); отсутствие требований монохроматичности, когерентности, поляризации пуч-

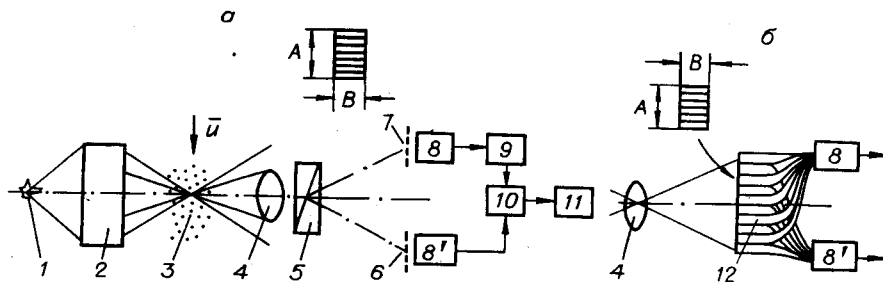


Рис. 1.

ков подсветки неоднородностей, присущих, например, лазерным доплеровским измерителям скорости. В то же время построение трактов обработки сигналов, измерения средней частоты узкополосного спектра сигнала для ИСТ на основе спектрального метода и доплеровского измерителя в значительной мере аналогичны. Одна из особенностей спектра выходного сигнала фотоприемника в схемах ИСТ [1] — большой уровень низкочастотных (НЧ) составляющих, связанный с тем обстоятельством, что пространственно-частотная характеристика фильтра ИСТ — решетчатого транспаранта с периодически изменяющимся по одной из координат коэффициентом пропускания, устанавливаемого в плоскости изображения, — имеет полосу прозрачности в области малых волновых чисел. Кроме того, НЧ флуктуации выходного сигнала могут быть связаны с нестабильностью мощности источника подсветки, модуляцией интенсивности падающих и рассеянных пучков движущимися частицами, однополярностью оптических сигналов, неодинаковостью рассеивающих свойств частиц различной формы и размеров и т. п. При построении схемы ИСТ с многорядовым пространственным фильтром в плоскости изображения для измерения скоростей течения одновременно в нескольких «точках» по толщине пограничного слоя [2] или для измерения двух составляющих скорости течения жидкости с анализом сигнала на едином частотном анализаторе полезные составляющие спектра сигнала, соответствующие малым скоростям течения, наблюдаются на фоне НЧ спектра, соответствующего большим скоростям течения, что приводит к трудностям наблюдения и измерения характерных частот сигнала. Традиционные методы фильтрации НЧ составляющих спектра неэффективны, поскольку полоса частот НЧ участка спектра пропорциональна скорости течения жидкости.

Ниже рассматриваются вопросы построения дифференциальных схем ИСТ с практически полным исключением НЧ составляющих спектра сигнала и возможности их применения для исследования потоков жидкости. На рис. 1, а приведена дифференциальная схема ИСТ с удвоением изображения оптических неоднородностей. Для подсветки взвешенных в потоке 3 частиц используется осветитель, содержащий лампу накаливания 1 (СЦ-61), конденсор темного поля 2 (ОИ-10). Объективом 4, светоделительным элементом 5 (призма Волластона) в плоскости пространственных фильтров 6 и 7 с квазипериодическим коэффициентом пропускания формируются идентичные изображения взвешенных частиц, пересекающих пучок света. Для соответствующих элементов изображения щели фильтров сдвинуты на половину пространственного периода x_0 . Так, если коэффициент пропускания одного фильтра описывается выражением

$$\varepsilon_1(x, y) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\cos K_0 x}{|\cos K_0 x|} \right) r(x, y),$$

то для другого

$$\varepsilon_2(x, y) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\cos K_0 (x - x_0/2)}{|\cos K_0 (x - x_0/2)|} \right] r(x, y)$$

($K_0=2\pi/x_0$, $r(x, y)=1$ в области $D=AB$ (A, B — размеры фильтров) и $r(x, y)=0$ вне этой области).

Световой поток, прошедший решетчатые фильтры, собирается на фотокатоде фотоэлементов δ и δ' (фотоэлектронные умножители ФЭУ-51). Сигналы с выхода фотоэлементов поступают на схему суммирования 10 , причем один из сигналов проходит через инвертор 9 , а затем на измеритель средней частоты сигнала 11 (анализатор спектра сигнала). Пространственное разрешение измерителя определяется конструктивными размерами A, B фильтров с учетом масштаба изображения оптических неоднородностей M . Выбирая M большим ($M \sim 50 \div 100$), можно получить достаточно малыми характерные размеры области измерений (~ 100 мкм).

Представим сигналы на выходе фотоэлементов δ и δ' в виде сумм сигналов с задержкой:

$$y_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(t - m\tau_0); \quad y_2(t) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x\left(t - m\tau_0 - \frac{\tau_0}{2}\right),$$

где $x(t)$ — случайный стационарный сигнал, регистрируемый при пересечении изображением взвешенных частиц одной из щелей фильтра; задержка во времени между сигналами, регистрируемыми при пересечении m и $m+1$ щелей фильтра: $\tau_0 = x_0/\bar{u}$; \bar{u} — составляющая скорости движения изображения, перпендикулярная щелям фильтра; N — число периодов фильтра. Очевидно, энергетический спектр каждой из этих сумм равен [4]

$$S_{1,2}(\omega) = \frac{1}{N^2} P_x(\omega) \frac{\sin^2 N \frac{\omega\tau_0}{2}}{\sin^2 \frac{\omega\tau_0}{2}},$$

$P_x(\omega)$ — спектр процесса $x(t)$, а спектр разностного сигнала $y(t) = y_2(t) - y_1(t)$ на выходе сумматора 10 запишется в виде

$$S(\omega) = \frac{4}{N^2} \sin^2 \frac{\omega x_0}{4\bar{u}} P_x(\omega) \frac{\sin^2 N \frac{\omega x_0}{2\bar{u}}}{\sin^2 \frac{\omega x_0}{2\bar{u}}},$$

$\bar{u} = x_0 f_0$, $f_0 = \omega_0/2\pi$ — частота, соответствующая максимуму $S(\omega)$.

Таким образом, дифференциальная схема ИСТ позволяет исключить из спектра суммарного сигнала постоянную и существенно уменьшить уровень низкочастотных составляющих спектра.

В предположении $P_x(\omega) = \text{const}$ в полосе прозрачности фильтра,

обусловленной весовой функцией $\frac{1}{N^2} \frac{\sin^2 N \frac{\omega x_0}{2\bar{u}}}{\sin^2 \frac{\omega x_0}{2\bar{u}}}$, ширина спек-

ра полностью определяется числом периодов N решетчатого транспаранта. Влияние множителя $\sin^2 \omega x_0 / 4\bar{u}$ на сужение спектра сигнала незначительно. Одним из недостатков дифференциальной схемы рис. 1, а является то обстоятельство, что на фотоприемник проходит только 50% световой энергии изображения (при ширине окна фильтра в виде последовательности щелей, равной половине периода x_0). Значительный выигрыш можно получить при изготовлении пространственного фильтра из волоконных световодов 12 с разводкой световых потоков к двум фотоэлементам (см. рис. 1, б).

Дифференциальная схема ИСТ, приведенная на рис. 2, отличается тем, что подсветка взвешенных частиц в потоке жидкости осуществля-

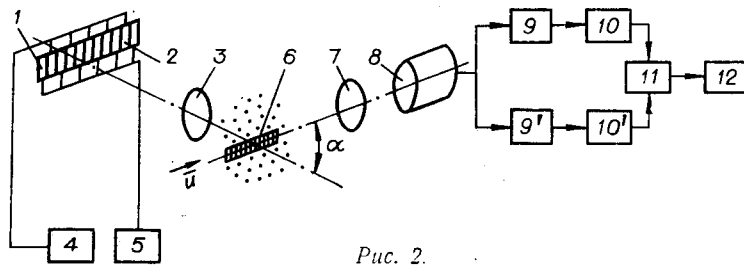


Рис. 2.

ется осветителем, включающим в себя группы светодиодов 1 и 2, помещенные в предметной плоскости проекционного объектива 3. Светодиоды образуют две периодические структуры, причем светодиоды в виде полосок одной структуры расположены между полосками другой структуры. Периодические структуры подключены к генераторам сигналов 4 и 5 различных частот f_1 и f_2 соответственно. При пересечении взвешенными частицами области локализации изображения светодиодов 6 рассеянное излучение собирается объективом 7 на поверхности фотоэлемента 8 (ФЭУ-51). С выхода фотоэлектронного умножителя сигналы разделяются полосовыми фильтрами 9 и 9' со средними частотами f_1 и f_2 , детектируются 10 и 10' и подаются на схему вычитания 11. Средняя частота энергетического спектра сигнала с выхода схемы вычитания является аналогом скорости течения жидкости и определяется измерителем частоты 12. Очевидно, что требования к стабильности частот генераторов, питающих светодиоды, невысоки, а выбор частот должен отвечать условиям: f_1 и $f_2 \gg F_{\max}$, $|f_1 - f_2| \geq 2F_{\max}$, где $F_{\max} = \bar{u}_{\max}/x_0$. Достоинства дифференциальной схемы со светодиодами — использование одного фотоприемника для регистрации рассеянного светового излучения, нечувствительность его размещения перед объемом с исследуемым потоком жидкости или газа.

Представляет интерес применение дифференциальной схемы ИСТ для исследования скорости течений жидкости или газа, где в качестве меток потока используются естественные флюктуации плотности. На рис. 3 приведена одна из реализаций такого измерителя двух составляющих скорости течения. Источник света 1, объективы 2 и 3, нож Фуко 4 образуют обычную теплеровскую систему, преобразующую «фазовое» распределение оптических неоднородностей в потоке 5 в распределение интенсивности светового потока в плоскости теневой картины. При помощи светоделительного элемента 6 формируются две идентичные теневые картины, в плоскости которых помещены периодические структуры 7, 8 и 7', 8' из фотоспротивлений, причем полосы структуры 7 и 7' размещены между полосами структуры 8 и 8' соответственно. По отношению к идентичным элементам теневой картины структуры 7, 8 и 7', 8' повернуты на 90° . Измеритель также содержит усилители 9

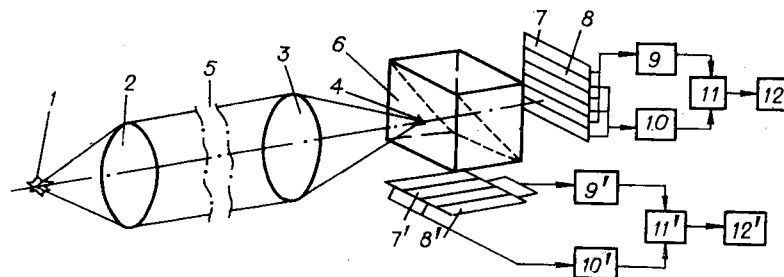


Рис. 3.

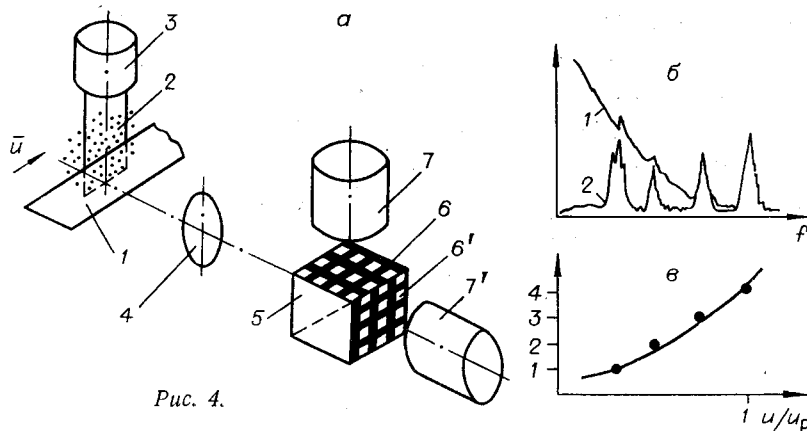


Рис. 4.

и 10, 9' и 10', схемы вычитания 11 и 11' и схемы измерения частот сигналов 12 и 12' — аналогов составляющих скорости течения вдоль осей x и y . Естественно, что вместо фотосопротивлений в схеме рис. 3 могут быть использованы фотоэлементы (фотоэлектронные умножители) с разводкой световых потоков световодами (см. рис. 1, б).

На рис. 4, а приведена дифференциальная схема ИСТ с многорядными решетчатыми фильтрами, позволяющая исследовать распределение скоростей течения в пограничном слое обтекаемой модели. Подсветка взвешенных в потоке частиц 1 осуществляется узким пучком света 2 осветителя 3. При помощи объектива 4, светоделительного элемента 5 в плоскости фильтров 6 и 6' формируются идентичные изображения частиц. Решетчатые фильтры сдвинуты на половину пространственного периода для одинаковых элементов изображения. Световой поток, проходящий окна фильтра, преобразуется фотоэлементами 7 и 7' в электрический сигнал и подается на блок обработки сигналов (усилители, схема вычитания, запись на магнитную ленту, анализатор частот сигнала). На рис. 4, б приведены спектрограммы сигналов: 1 — с выхода одного из фотоэлементов [2], 2 — с выхода схемы вычитания.

На рис. 4, в изображен профиль скорости течения жидкости, построенной по результатам обработки спектрограммы. Средняя скорость течения жидкости составляла 5 см/с. По оси ординат отложены расстояния по толщине пограничного слоя в относительных единицах, по оси абсцисс — значения средней скорости течения на заданном расстоянии от поверхности, отнесенные к расходной скорости течения в гидроканале. Схема рис. 4 особенно удобна при исследовании распределения скоростей течения в установках, работающих в режиме одиночных запусков (дозированное введение в пограничный слой полимерных добавок, импульсные аэродинамические установки и т. п.) с неприемлемой воспроизводимостью характеристик течения для различных запусков. Схемы ИСТ [1, 2] применялись для различного рода гидродинамических исследований при сечениях рабочего участка гидроканала от мм^2 до $\sim \text{м}^2$ в диапазоне скоростей течения от 10^{-5} м/с до 25 м/с. В качестве меток потока использовались взвешенные частицы естественных примесей с размерами $\sim 5 \div 50$ мкм.

Пространственное разрешение в отдельных экспериментах составляло ~ 20 мкм. Погрешность измерений не превосходила 0,5% [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Латышев. Спектральный метод исследования течений жидкости. — «Научные приборы», 1973, № 2 (16), с. 75—80.
2. В. М. Латышев. Исследование распределения скоростей течения жидкости оптическим методом. — «Измерительная техника», 1973, № 1, с. 39—40.

3. G. E. Roe. An optical study of turbulence.—“J. Fluid Mech.”, 1970, vol. 43, pt. 3, p. 607—635.
4. В. И. Чайковский. Энергетический спектр суммы запаздывающих стохастических сигналов.—«Изв. высш. учебн. заведений. Радиотехника», 1965, т. 8, № 1, с. 87—89.
5. В. М. Латышев. О погрешностях измерения скорости течения жидкости оптическим спектральным методом.—Труды ВНИИФТРИ. «Метрология в гидродинамических измерениях». М., 1974, вып. 14 (44), с. 56—60.

*Поступила в редакцию 17 марта 1976 г.;
окончательный вариант — 5 января 1976 г.*

УДК 681.33

В. Б. СМОЛОВ

(Ленинград)

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

1. При создании современных цифровых систем обработки информации актуальна задача разработки многофункциональных аналого-цифровых вычислительных устройств (МФАЦВУ), оперирующих аргументами, заданными в виде мгновенных $U_k(t)$, амплитудных U_{km} и фазовых $\varphi_k(t)$ параметров синусоидальных напряжений $U_k(t) = U_{km}(t) \sin[\omega t + \varphi_k(t)]$, где $k=1, n$.

Подобные устройства необходимы для решения широкого круга практических задач в информационно-измерительных, управляющих, вычислительных и контрольно-диагностических системах, содержащих прецизионные индукционные датчики низкой частоты (50—500 Гц).

Так как в общем случае в указанных системах математической обработки могут подвергаться любые сочетания различных параметров синусоидальных напряжений, то несомненный интерес представляют аналого-цифровые вычислительные устройства с функциональной характеристикой общего вида

$$N = K_N F[U_k(t), U_{km}(t), \varphi_k(t)], \quad (1)$$

где $K_N = N_{\max}/F_{\max} = \text{const}$ — масштаб устройства; F — заданная многомерная функция; N — выходной цифровой код.

Учитывая, что рассматриваемые МФАЦВУ являются вычислительными преобразователями формы представления информации [1], произведем анализ возможности автоматического решения некоторых зависимостей вида (1) в реальном масштабе времени при помощи схемы, содержащей только типовые, хорошо освоенные производством детали и узлы микроэлектронной непрерывной и дискретной автоматики.

2. Рассматриваемый вариант схемы МФАЦВУ (рис. 1), отвечающий поставленному условию, содержит два аналоговых запоминающих устройства АЗУ1, АЗУ2, два преобразователя кода в напряжение ПКН1, ПКН2, два регистра Р1, Р2 для записи и хранения цифрового кода N , преобразователь напряжения в код (ПНК), двенадцать электронных ключей $K_{л_j} (j=1, 12)$, осуществляющих требуемую коммутацию вышеперечисленных узлов схемы устройства под воздействием соответствующей временной последовательности управляющих импульсов от устройства управления (УУ). Все элементы и узлы схемы, оперирующие непрерывной информацией (Кл, ПНК, ПКН, АЗУ), могут быть выпол-