СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Клибанова И. М. Особенности синхронного взаимодействия колебаний в автоколебательной системе с двумя степенями свободы.— Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1973, **16**, № 11, с. 1709—1716. [2] Клибанова И. М. Взаимная синхронизация генераторов с целочисленным отношением частот.— Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1968, **11**, № 11, с. 1676—1685. [3] Дворников А. А. О стабилизации частоты ансамбля автогенераторов внешним резонатором.— Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1975, **18**, № 11, с. 1645—1652.

Поступила в редакцию
16.05.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, Т. 22, № 6

УДК 53.05/08:532.574.07

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС «ОПТИЧЕСКИЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ АНЕМОМЕТР — ЭВМ ЕС-1010» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕДЛЕННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

М. В. Евдокимов, А. В. Приезжев

(кафедра общей физики и волновых процессов)

В последнее время оптические доплеровские анемометры (ОДА) стали применяться для исследования потоков, для которых характерна большая плотность светорассеивающих частиц и большие градиенты скорости, например потоков суспензий, крови, протоплазмы в тонких капиллярах [1]. Выходные сигналы фотоприемников ОДА в этих случаях имеют сложную структуру, в результате чего такие распространенные методы обработки сигналов, как последовательный спектральный анализ, счет нулей, слежение за частотой и пр. [2], оказываются малоэффективными. Особенно это касается случаев нестационарного течения жидкости [3]. Для получения адекватной информации о временных зависимостях таких характеристик потока, как средняя или максимальная скорость, профиль скорости и др., необходима дополнительная машинная обработка результатов измерения. В случае низкоскоростных потоков (с максимальными доплеровскими сдвигами частоты до 3—7 кГц) сбор и обработку сигналов ОДА и их спектров можно осуществить с помощью широко распространенной ЭВМ ЕС-1010. При этом возможны комплексная автоматизация эксперимента и проведение его в реальном масштабе времени.

Ниже описан комплекс ОДА — ЭВМ ЕС-1010 для исследования потоков со скоростями от нескольких мкм/с до нескольких мм/с. Возможны параллельный ввод и обработка сигналов ОДА из нескольких пространственно разнесенных измерительных объемов, а также сигналов, несущих вспомогательную информацию об исследуемом объекте.

Входящий в состав комплекса ОДА может быть построен по любой схеме — дифференциальной или с опорным пучком [2]. Выбор конкретной схемы зависит от особенностей исследуемого объекта. ЭВМ ЕС-1010 используется в следующей конфигурации: центральный процессор с блоками аппаратного умножения и деления, ОЗУ объемом 24 кслова, минидиск емкостью 800 кбайт, АЦП с мультиплексором на 16 каналов, алфавитно-цифровой дисплей, цифровые входы-выходы, таймер, АЦПУ, ЦАП на сопротивлениях, осциллоскоп с памятью типа С1-8, двухкоординатный самописец типа ДРП-5.

Рассеянное и опорное излучение с помощью блока приемной оптики направляется на фотоприемник. После усиления и аналоговой

фильтрации широкополосных шумов сигнал ОДА поступает на АЦП, осуществляющий считывание и дискретизацию сигнала. Дискретные выборки сигнала поступают через цифровые входы в ОЗУ. При проведении экспериментов в реальном масштабе времени запись выборок осуществляется с интервалами в несколько секунд, в течение которых осуществляется предварительная обработка информации и вывод результатов. Типичная обработка считанной выборки состоит в разбиении ее на отдельные более короткие реализации,

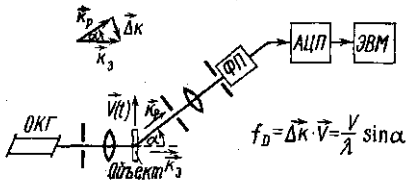

Рис. 1. Гетеродинная однолучевая схема ОДА, сопряженного с ЭВМ: $\vec{V}(t)$ — вектор скорости потока протоплазмы в исследуемом объекте, $\vec{k}_з$ и $\vec{k}_р$ — волновые векторы зондирующего и рассеянного пучков, $\Delta\vec{k}$ — разностный волновой вектор, определяющий связь между величиной доплеровского сдвига частоты f_D и величиной скорости потока $|\vec{V}|$

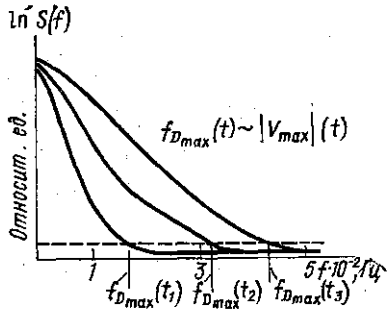

Рис. 2. Типичные доплеровские спектры, построенные ЭВМ и аппроксимированные полиномами по методу наименьших квадратов. Максимальная доплеровская частота, соответствующая ширине спектра на некотором фиксированном уровне, превышающем уровень шума, пропорциональна значению максимальной скорости потока в области измерения

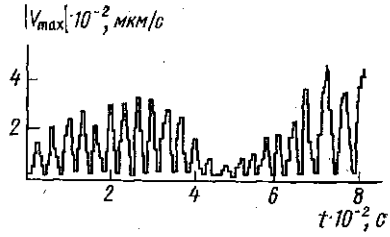

Рис. 3. Фрагмент зависимости $|\vec{V}_{max}(t)|$, полученной на комплексе при исследовании потока протоплазмы в тяже клетки *Physarum*, выращенной на агаровой подложке при комнатной температуре

вычитании из каждой реализации линейного тренда, построение энергетического спектра каждой реализации по методу БПФ [4], усреднении спектров, выводе результирующего спектра через цифровые выходы и ЦАП на экран осциллоскопа, выводе числовых характеристик на дисплей и АЦПУ, перезаписи спектра на диск для последующей более детальной обработки. В ряде случаев для экономии памяти на диск записывается не сам спектр, а лишь коэффициенты аппроксимирующего его полинома, вычисляемые по методу наименьших квадратов. Скорость обработки по такой схеме при нахождении 128 гармоник в усредненном спектре составляет около 10^3 точек в секунду.

Циклы считывания и предварительной обработки могут повторяться вплоть до заполнения отведенной зоны диска. После этого проводятся окончательная обработка и анализ полученных данных: например, определяется максимальная скорость потока, пропорциональная максимальной частоте спектра, вычисляется ошибка измерения, проводится спектральный и корреляционный анализ полученных кривых.

Задание параметров работы комплекса осуществляется в процессе диалогового общения экспериментатора с ЭВМ.

Работу комплекса проиллюстрируем примером исследования реверсивного течения протоплазмы в длинных тонких тяжах плазмодия миксомицета *Physarum*, представляющих собой вязкоупругие толстостенные трубки диаметром около 100 мкм. В этих экспериментах использовалась однолучевая схема ОДА, являющаяся разновидностью схемы с опорным пучком (рис. 1). Роль опорного излучения играет здесь свет, рассеянный на неподвижных стенках тяжа. Сечение измерительного объема сравнимо с сечением тяжа. Выходной сигнал фотоприемника несет информацию лишь о модуле скорости $|\vec{V}|$, который связан с величиной доплеровского сдвига частоты f_D соотношением: $|\vec{V}|$ (мкм/с) $=0{,}8 f_D$ (Гц).

На рис. 2 приведены усредненные по 8 реализациям логарифмические доплеровские спектры, снятые с интервалом в 10 с. Время усреднения составляет 0,3 с. Вид спектров существенно определяется формой профиля скорости в измерительном объеме, которая в случае вязкоупругой протоплазмы может сильно отличаться от параболической. По ширине спектров можно определить максимальную скорость в измерительном объеме. При этом суммарная ошибка измерения не превышает 8—10%.

На рис. 3 приведена полученная временная зависимость модуля максимальной скорости для исследованного в данном эксперименте тяжа. Отчетливо видна низкочастотная модуляция скорости потока протоплазмы, являющаяся результатом наложения различных внутриклеточных ритмов.

Приведенный пример показывает возможности комплекса при решении задач, выходящих за рамки традиционной гидродинамики.

Авторы выражают благодарность Ю. М. Романовскому за полезные обсуждения и В. И. Берсеневу за помощь в проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Приезжев А. В., Романовский Ю. М. Лазерная доплеровская спектроскопия и ее применение в биологии.— Квантовая электроника, 1978, 5, № 10, с. 2237—2242. [2] Лазерные доплеровские измерители скорости. Новосибирск, 1975, 163 с. [3] Приезжев А. В., Романовский Ю. М., Тихомиров А. Г., Пентегова Л. И. Исследование нестационарного течения протоплазмы плазмодия миксомицета методом лазерной доплеровской анемометрии.— Биофизика, 1978, 23, № 3, с. 541—543. [4] Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М., 1978, 848 с.

Поступила в редакцию
16.06.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, Т. 22, № 3

УДК 538.56:533.90

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ

В. К. Гришин, М. Ф. Каневский

(кафедра ядерных взаимодействий и ускорителей)

Вопросам генерации поверхностных волн в пучково-плазменных системах посвящен ряд исследований [1, 2]. Внимание привлекают системы, в которых релятивистский электронный пучок обдувает плаз-