

срок жизни этих трубок. Действительно, трубка № 1 проработала 5500 ч, а трубки № 2 и 3 1000 и 800 соответственно. Трубка № 4 служит до сих пор.

В заключение надо сказать, что изменения длины волны, происходящие в течение длительной работы лазеров, составляют не более  $10^{-8}$  мкм, что не должно сказываться на точности лазерных интерферометров и других измерительных приборов, построенных на их основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. D. White. Pressure and Current — Dependent Shifts in the Center Frequency of the Doppler — Broadened ( $2p_4 - 3s_2$ ) 6328 — Å  $^{20}\text{Ne}$  Transition.— Appl. Phys. Letters, 1967, № 10.
2. T. P. Sosnowsky and W. B. Jonson. Frequency Shifts of the Lamb Dip Minimum in the Helium-Neon Laser.— IEEE J., QE5, 1969.
3. E. J. G. Engelhard and Kamal Abdel-Hady Mohamed. Pressure — Wavelength Relationship of the 6328 — Å Helium-Neon Laser Emission.— JOSA, 1971, v. 61, № 2.
4. Г. А. Ленкова, А. И. Лохматов, И. А. Михальцова. Одночастотный стабилизированный гелий-неоновый лазер.— Автометрия, 1971, № 1.

Поступило в редакцию  
26 мая 1972 г.

УДК 621.373.8+681.3.06

Г. А. БАРИЛЛ, Ф. А. ЖУРАВЕЛЬ, В. С. СОБОЛЕВ  
(Новосибирск)

### ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ДОППЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ

В доплеровских устройствах измерения скорости потоков выходной сигнал можно считать результатом суперпозиции радиопульсов, посылаемых отдельными рассеивающими частицами, одновременно находящимися в исследуемом объеме. В условиях ламинарного безградиентного потока, когда частота сигнала от каждой частицы, пропорциональная скорости, не зависит от координат и одинакова для всех рассеивающих частиц, результирующий выходной сигнал для дифференциальных оптических схем [1] может быть представлен в следующем виде:

$$I(t) = \sum_{n=1}^N a_n F(t - t_n) \{1 + \cos[\omega_d(t - t_n)]\} = I(t)_{н.ч} + I(t)_{\sim}, \quad (1)$$

где  $I(t)$  — выходной ток фотоприемника;  $I(t)_{н.ч}$  и  $I(t)_{\sim}$  — соответственно низко- и высокочастотная составляющие выходного тока;  $\omega_d$  — доплеровская частота;  $t_n$  — момент вхождения  $n$ -й частицы в исследуемую область потока;  $N$  — случайное число частиц, одновременно находящихся в исследуемом элементарном объеме;  $F(t - t_n)$  — огибающая сигнала, определяемая геометрией и оптической схемой устройства;  $a_n$  — случайная амплитуда.

Как следует из (1), результирующий выходной сигнал является случайной функцией концентрации и скорости рассеивающих частиц, определяющих собой значения  $N$  и  $t_n$  в выражении (1). Из (1) также вытекает, что в результате наложения нескольких амплитудно-модулированных сигналов от отдельных частиц происходит паразитная фазовая модуляция, вызывающая дисперсию частоты результирующего сигнала, что дает прямую методическую погрешность измерения мгновенной скорости. В связи с этим актуальна задача оценки среднеквадратичной погрешности измерения скорости, а так-

же определения потенциальных возможностей системы измерения в смысле отношения сигнал/шум при исследовании турбулентных потоков.

Если предполагать, что процесс на выходе фотоприемника носит гауссовый характер, т. е. мгновенные значения сигнала, взятые на достаточно длинной реализации, распределены по нормальному закону, то аналитические оценки отношения сигнал/шум для данного случая [2] дают довольно высокий уровень шума и соответственно погрешности, причем по этим оценкам в области малых времен усреднения погрешности могут достигать 15%. Однако для реальных сигналов характер процесса, как правило, не является гауссовым ввиду относительно низкой концентрации рассеивающих частиц; в то же время аналитическая оценка погрешности в этом случае затруднена ввиду отсутствия приемлемого математического аппарата. В связи с этим представляется целесообразным промоделировать с помощью ЭВМ доплеровский сигнал, описываемый выражением (1), и оценить реальное значение мгновенной частоты суммарного доплеровского сигнала, которое может существенно отличаться от  $\omega_d$ . Если определять реальную частоту сигнала как производную фазы по времени, то в результате переналаживания сигналов возможны скачки фазы, а следовательно, разрывы производной. Поэтому для оценочных расчетов погрешности была использована величина, обратная мгновенной частоте, а именно, длительность выбросов доплеровского сигнала за нулевой уровень, так как значение этой величины нигде не претерпевает разрывов и может быть рассчитано как интервал времени между соседними нулями функции  $I(t)_{\sim}$ .

Программа обработки сигнала на ЭВМ была составлена и задача просчитана для трех законов распределения расстояний между частицами: равномерного (в пределах известной концентрации), экспоненциального и гауссовского. Моменты  $t_n$  вычислялись по методу Монте-Карло с использованием датчика равномерно распределенных случайных чисел. Задача решалась для дифференциальной оптической схемы доплеровского измерителя с делением амплитуды луча, огибающая сигнала для которой определяется выражением

$$F(t - t_n) = C \exp[-(t - t_n)^2/2\tau^2],$$

где  $C$  — постоянная амплитуда;  $\tau$  — время пролета частицей области локализации интерференционной решетки, исчисляемое по уровню интенсивности  $I = C \exp(-4,5)$  и определяемое скоростью частицы и геометрией оптической схемы.

После определения параметров, входящих в (1), вычислялись мгновенные значения функций  $I(t)_{н.ч}$  и  $I(t)_{\sim}$  в заданные моменты времени, определялись нули, а также интервалы между нулями для функции  $I(t)_{\sim}$ , величина которых соответствовала значениям длительности выбросов доплеровского сигнала за нулевой уровень или иначе — длительности «текущего доплеровского периода»  $T_i$ . Далее определялись среднее значение  $T_{ср}$  доплеровского периода и величина его относительного среднеквадратического отклонения или полной вариации  $W$  по известным выражениям:

$$T_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N};$$

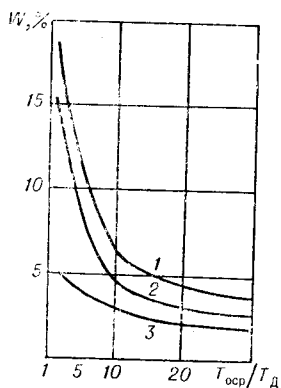
$$W = \frac{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (T_i - T_{ср})^2 \right] / (N - 1)}}{T_{ср}}, \quad (2)$$

где  $N$  — число рассматриваемых периодов.

Кроме определения полной вариации  $W$ , проводилось осреднение результатов по 10, 20 и 30 периодам доплеровской частоты, и затем рассчитывались вариации осредненных результатов по формуле, аналогичной (2), но при других значениях  $T_i$  и  $N$ . Результаты расчетов графически представлены на рисунке, где показана зависимость величины вариации от времени осреднения для двух геометрий оптической системы и различной концентрации частиц, а также приведены для сравнения теоретически рассчитанные кривые для гауссова сигнала, согласно выражениям, приведенным в [2].

При всех расчетах случаи очень редкого появления частиц в исследуемой области были исключены из рассмотрения, поскольку при этом результирующий сигнал в области перекрытия очень мал и лежит ниже порога чувствительности электронной системы его обработки.

Таким образом, наличие в объеме извлечения информации двух или более частиц вызывает паразитную фазовую модуляцию доплеровского сигнала. Соответствующая полная вариация его периода составляет при этом 6–8%. При осреднении по нескольким периодам вариация падает обратно пропорционально корню квадратному из их числа.



Среднеквадратичная погрешность измерения как функция времени осреднения:

1 — теоретическая кривая для гауссова сигнала при ширине радиоимпульса  $5 T_d$ ; 2 — то же, при ширине радиоимпульса  $10 T_d$ ; 3 — кривая для пуассоновского потока малой концентрации, рассчитанная с помощью ЭВМ.

Увеличение концентрации частиц (при низких начальных концентрациях) ведет к некоторому увеличению вариаций, однако это увеличение ощутимо лишь для концентраций, отличающихся между собой на порядок.

Значение вариаций обратно пропорционально корню квадратному из относительной ширины радиоимпульса, которая представляет собой отношение длительности радиоимпульса к длительности доплеровского периода и определяется геометрией оптической системы [1], т. е. отношением радиуса подающего пучка к расстоянию между пучками.

При достаточно длинных реализациях сигнала среднее значение текущего периода отличается от истинного периода доплеровской частоты не более чем на 0,5%, т. е. методическая погрешность измерения средней скорости с помощью лазерных доплеровских измерителей не превышает 0,5%. Величина отношения шум/сигнал, которая определяется полной вариацией периода и характеризует предел точности при измерениях турбулентности, может быть снижена, главным образом, за счет увеличения относительной ширины радиоимпульса, а также за счет увеличения времени осреднения. Как следует из расчетов, для снижения отношения шум/сигнал до уровня одного процента при относительной ширине радиоимпульса, равной 10, требуется, чтобы время осреднения составляло не менее  $100 T_d$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Г. Василенко, Ю. Н. Дубнишев, В. П. Коронкевич, В. С. Соболев. Сравнение некоторых оптических схем лазерных измерителей скорости.— ПМТФ, 1972, № 5.
2. А. Г. Сенин, В. С. Соболев, Ю. Н. Дубнишев. Оценка потенциальных возможностей лазерного доплеровского измерителя скорости потоков жидкостей и газов по точности.— Автометрия, 1972, № 5.

Поступило в редакцию  
30 мая 1972 г.

УДК 681.3.06

Е. Г. БАБАТ, Б. С. ДОЛГОВЕСОВ, Ф. М. ИЗРАЙЛЕВ  
(Новосибирск)

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАЛОГОВОГО ГРАФИЧЕСКОГО ТЕРМИНАЛА «ЭКРАН» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

При использовании ЭВМ для моделирования различных физических процессов часто возникает необходимость в динамическом отображении хода решения задачи и оперативного вмешательства в него со стороны экспериментатора.

Система графического взаимодействия «Экран» — буферная память, устройства вывода (экран визуализации, печатающая машинка), устройства ввода (световое перо, клавиатура печатающей машинки) [1, 2], подключенная к ЭВМ БЭСМ-6, — предоставляет пользователю возможность наблюдать на экране динамику вычисляемых процессов и осуществлять взаимодействие со своей программой. Для диалога с ЭВМ БЭСМ-6 пользователь системы «Экран» располагает пятью приказами, подаваемыми с пульта системы: «Вывод», «Ввод М», «Ввод П», «Автономная работа», «Отказ».