

В. С. СОБОЛЕВ

(Новосибирск)

## О СПЕКТРЕ «ФАЗОВОГО» ШУМА НА ВЫХОДЕ ЛАЗЕРНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКОВ

Как известно [1, 2], переменную составляющую сигнала лазерного доплеровского измерителя скорости потока можно описать следующей суммой:

$$u(t) = \sum_{i=1}^N a_i A(t - t_i) \cos \omega_i (t - t_i). \quad (1)$$

Здесь  $A(t)$  — огибающая сигнала от каждой рассеивающей частицы, характер которой определяется геометрией оптической схемы;  $a_i$  — случайная амплитуда;  $\omega_i$  — доплеровская частота, пропорциональная мгновенной скорости  $i$ -й частицы;  $t_i$  — момент появления частицы в центре рассеивающей области;  $N$  — число частиц, прошедших через рассеивающий объем прибора.

Случайный характер распределения частиц в пространстве приводит к тому, что при наложении сигналов от нескольких частиц фаза, а следовательно, и частота суммарного сигнала на выходе фотоприемника флюктуируют даже при измерении скорости ламинарного безградиентного потока, когда  $\omega_i = \omega = \text{const}$ . При частотной демодуляции такого сигнала кроме постоянного напряжения, пропорционального средней скорости, на выходе частотного детектора появится напряжение шума. Этот шум удобно назвать «фазовым», так как он обусловлен случайным соотношением фаз налагающихся сигналов от нескольких частиц. Необходимость оценки параметров этого шума очевидна, так как он в конечном счете определяет порог чувствительности прибора и погрешности при исследовании турбулентных потоков. Оценка дисперсии этого шума была сделана в [3]. Большой интерес в свете изложенного представляет анализ его спектра. Для оценки последнего можно воспользоваться результатами, полученными в [4], для гауссова шума с гауссовым спектром.

Если концентрация частиц велика, а положение каждой из них в пространстве не зависит от положения остальных, то в силу предельной теоремы теории вероятностей суммарный доплеровский сигнал будет близок к нормальному узкополосному процессу. Как показано в [1], второе условие в отношении формы спектра сигнала также будет выполнено, если входные пучки лазерного измерителя имеют гауссов характер распределения интенсивности по сечению. Для большинства схем измерителей это требование выполняется автоматически. Таким образом, энергетический спектр сигнала (1) для рассматриваемого случая на основании [1] можем записать так:

$$S(\omega) = S_0 \exp \left[ - \frac{(\omega - \omega_0)^2 \sigma^2}{\omega_0^2 b^2} \right], \quad (2)$$

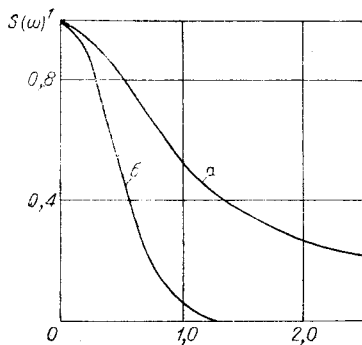
где  $\omega$  — текущая частота;  $\omega_0 = \frac{2kVb}{F}$  — доплеровская частота;  $V$  — скорость потока;  $F$  — фокусное расстояние объектива;  $b$  — расстояние между входными пучками;  $\sigma$  — дисперсия поля интенсивности гауссова пучка лазера на входе оптической схемы ЛДИС;  $k$  — волновое число.

Используя результаты [4], можем написать, что спектр флюктуаций частоты доплеровского сигнала в рассматриваемом случае описывается следующим рядом:

$$S(\omega) = \Delta\omega \sum_{n=1}^{\infty} n^{-3/2} \exp \left\{ - \left[ \frac{\pi}{2n} \left( \frac{\omega}{\Delta\omega} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $\Delta\omega$  — полуширина спектра сигнала на уровне  $\exp(-\pi)$ . Нормированный на максимум этот спектр представлен на рисунке (кривая  $a$ ). Представляет интерес сравнить спектр исходного доплеровского сигнала (2) и спектр шума на выходе демодулятора (кривая  $b$ ). Из рисунка следует, что спектр шума намного шире спектра исходного сигнала. Даже по уровню 0,5 он более чем в два раза шире полуширины спектра доплеровского сигнала. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе полосы пропускания фильтра на выходе частотного демодулятора: полоса должна быть ограничена верхней частотой ожидаемого спектра турбулентных пульсаций скорости.

Если предположить, что турбулентные пульсации и шум статистически независимы, что не вызывает особых сомнений, и на выходе частотного детектора образуют аддитивную смесь, истинный спектр турбулентных пульсаций можно получить, вычитая из сум-



марного спектра сигнала на выходе демодулятора спектр шума, полученный при той же скорости на ламинарном потоке.

Поскольку ламинизировать поток при больших скоростях затруднительно, можно получить спектр шума на ламинарном потоке при малых скоростях, пересчитать его для турбулентного потока с интересующей исследователя средней скоростью и уже затем вычистить из суммарного спектра выходного сигнала ЛДИС. Пересчет спектра делается на основе известного соотношения [1, 2], связывающего скорость ламинарного безградиентного потока и ширину доплеровского спектра:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\Delta\omega_1}{\Delta\omega_2}. \quad (4)$$

Учитывая это соотношение, необходимо в соответствии с (3) полученный на скорости  $V_1$  спектр растянуть по оси частот с коэффициентом  $K = V_2/V_1$  и умножить на  $k$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yu. Dubnitschev, V. P. Koronkevitch, V. S. Sobolev, A. A. Stolpovsky, E. N. Utkin, Yu. G. Vasilenko. The Development of an Optical Doppler Technique for Measuring Flow Velocities.— Optoelectronics, 1973, N 5.
2. Г. А. Барилл и др. Вопросы теории и практического использования лазерных доплеровских измерителей скорости при исследовании турбулентных потоков.— ЖПМТФ, 1973, № 1.
3. Ю. Н. Дубнищев, А. Г. Сенин, В. С. Соболев. Оценка потенциальных возможностей лазерного доплеровского измерителя скорости потоков жидкостей и газов по точности.— Автометрия, 1972, № 5.
4. S. O. Rice. Statistical Properties of a Sine Wave Plus Random Noise.— Bell System Techn. J., 1948, N 1.

Поступило в редакцию 14 июня 1974 г.

УДК 532.57+621.378.3

В. С. СОБОЛЕВ, С. А. ТИМОХИН  
(Новосибирск)

#### О ВЫБОРЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАССЕИВАЮЩИХ ЧАСТИЦ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СКОРОСТИ ПОТОКА ЛАЗЕРНЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ

При измерении флюктуирующей скорости потока с помощью ЛДИС концентрацию частиц обычно стремятся сделать достаточно малой с тем, чтобы в объеме извлечения информации в любой момент времени в среднем находилось не более одной частицы. Это стремление вызвано тем, что наложение сигналов от нескольких частиц приводит к дополнительным ошибкам измерения скорости из-за флюктуаций фазы выходного сигнала светоприемника. Вместе с тем для удовлетворительного восстановления значений скорости между отсчетами, полученными обработкой сигналов от отдельных частиц, концентрация последних не должна быть слишком малой. Таким образом, к концентрации частиц предъявляются противоречивые требования, что приводит к необходимости принятия компромиссного решения. Рассмотрению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

Пусть перекрытие импульсов от  $k$ -частиц приводит к помехе  $\xi_k(t)$ , аддитивной к измеряемой скорости  $v(t)$ , где  $v(t)$  — стационарный случайный процесс. Эта помеха уменьшает точность восстановления  $v(t)$ . Рассмотрим простейший способ восстановления, при котором измеряемая функция принимается равной значению последнего отсчета, т. е.  $v^*(t) = v(t_i) + \xi_k(t_i)$ ,  $t_i \leq t < t_{i+1}$ . В этом случае ошибка восстановления

$$\xi_k(t) = v^*(t) - v(t) = \Delta(t) + \xi_k(t) \quad t_i \leq t < t_{i+1}, \quad (1)$$