

Научная статья

УДК 532.526

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-4-58-71

**О методике оценки взаимосвязи возмущений
с помощью цифровой обработки сигналов
применительно к измерениям в сверхзвуковых течениях**

**Леонид Владимирович Афанасьев¹, Александр Дмитриевич Косинов²
Алексей Анатольевич Яцких³, Софья Андреевна Шипуль⁴
Николай Васильевич Семёнов⁵**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

¹l.afanasev@itam.nsc.ru

²kosinov@itam.nsc.ru

³yatskikh@itam.nsc.ru

⁴shipul@itam.nsc.ru

⁵semion@itam.nsc.ru

Аннотация

В работе описана методика цифровой обработки сигналов для определения взаимосвязи возмущений в сверхзвуковом потоке и пульсаций пограничного слоя модели плоской пластины. Приведены оценки погрешности предложенного метода обработки данных, представлены результаты эксперимента, проведенного для демонстрации метода на реальных данных.

Ключевые слова

эксперимент, сверхзвуковые течения, термоанемометр постоянного сопротивления, коэффициент корреляции, погрешность измерения

Благодарность

Эксперименты проведены с использованием оборудования ЦКП «Механика». Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00666, <https://rscf.ru/project/22-19-00666/>.

Для цитирования

Афанасьев Л. В., Косинов А. Д., Яцких А. А., Шипуль С. А., Семёнов Н. В. О методике оценки взаимосвязи возмущений с помощью цифровой обработки сигналов применительно к измерениям в сверхзвуковых течениях // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 4. С. 58–71. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-4-58-71

© Афанасьев Л. В., Косинов А. Д., Яцких А. А., Шипуль С. А., Семёнов Н. В., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 4

Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 4

On the Methodology for Estimating the Relationship of Disturbances Using Digital Signal Processing in Relation to Measurements in Supersonic Flows

Leonid V. Afanasyev¹, Alexandr D. Kosinov², Alexey A. Yatskikh³
Sofia A. Shipul⁴, Nikolay V. Semionov⁵

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹l.afanasev@itam.nsc.ru

²kosinov@itam.nsc.ru

³yatskikh@itam.nsc.ru

⁴shipul@itam.nsc.ru

⁵semion@itam.nsc.ru

Abstract

The paper describes a digital signal processing technique for determining the relationship between disturbances in a supersonic flow and pulsations of the boundary layer of a flat plate model. Estimates of the error of the proposed data processing method are given, the results of an experiment conducted to demonstrate the method on real data are presented.

Keywords

experiment, supersonic currents, constant temperature anemometer, correlation coefficient, measurement error

Funding

The study was conducted at the Equipment Sharing Center «Mechanics» of ITAM SB RAS. The research was supported by the Russian Science Foundation project no. 22-19-00666, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00666/>.

For citation

Afanasyev L. V., Kosinov A. D., Yatskikh A. A., Shipul S. A., Semionov N. V. On the Methodology for Estimating the Relationship of Disturbances Using Digital Signal Processing in Relation to Measurements in Supersonic Flows. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 58–71. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-4-58-71

1. Введение

Метод взаимно корреляционных измерений является одним из основных методов исследования турбулентных течений, поскольку позволяет определить временные и пространственные масштабы возмущений. Однако стоит заметить, что применение корреляционного анализа не ограничивается турбулентными течениями, так, в работе [1] впервые использован корреляционный анализ для определения влияния пульсаций сверхзвукового потока на пограничный слой острой пластины и конуса при различных числах Маха. В работе использовались аналоговые методы корреляционных измерений, такие как коррелометры и линии задержки. Использование аналоговой техники накладывает серьезные ограничения на проведение эксперимента, такие как удорожание самого эксперимента, ввиду большой длительности измерений, усложнение измерительной системы, большая сложность работы с аналоговыми приборами.

Обойти данные ограничения позволяют цифровые методы вычисления взаимнокорреляционных и автокорреляционных функций, данные методы получили активное развитие в 70-е годы прошлого столетия [2; 3]. Однако вычислительная сложность алгоритмов не позволила активно использовать эту методику.

На текущий момент существует ряд работ, в которых представлены результаты корреляционных измерений в сверхзвуковых пограничных слоях, полученных цифровым методом [4–8]. Данные работы демонстрируют возможности цифровой методики обработки сигналов при взаимнокорреляционных измерениях, однако недостатком является отсутствие описания самой методики.

2. Оценка корреляционной функции

Рассмотрим две выборки $x_n, y_n, n = 1, 2, 3, \dots, N$ из случайных сигналов x, y . Меру линейности связи x_n, y_n , т. е. их *корреляцию*, которая определяется как:

$$\sigma_{xy} = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu_x)(y_n - \mu_y).$$

Тогда коэффициент корреляции:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, -1 \leq \rho_{xy} \leq 1.$$

Аналогично коэффициент корреляции двух дискретных сигналов для произвольного сдвига j -сигналов относительно друг друга:

$$C_{xy,j} = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu_x)(y_{n+j} - \mu_y) = R_{xy,j} - \mu_x \mu_y, \quad (1)$$

где R_{xy} – взаимный ковариационный коэффициент x_n и y_n :

$$R_{xy,j} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n y_{n+j}. \quad (2)$$

При этом *нормированная корреляционная функция*:

$$\rho_{xy,j} = \frac{C_{xy,j}}{\sqrt{C_{xx,0j} C_{yy,0}}} = \frac{R_{xy,j} - \mu_x \mu_y}{\sqrt{[R_{xx,0} - \mu_x^2][R_{yy,0} - \mu_y^2]}}, \quad (3)$$

$|\rho_{xy,j}| \leq 1$ для всех j .

Ввиду того что шумы, далее исследуемые в работе, имеют гауссово распределение вероятности, корреляционная функция совпадает с ковариационной ($\mu_i = 0$). Однако при оценке взаимосвязи корреляции сигналов, полученных непосредственно с АЦП, нужно учитывать, что из-за смещения нуля АЦП, $\mu_i \neq 0$, это необходимо учитывать.

Формулы 1–3 дают несмещенные оценки только при выполнении условия $N \rightarrow \infty$, в противном случае необходимо использовать оценку следующего вида:

$$R_{xy,j} = \frac{1}{N-j} \sum_{n=1}^{N-j} x_n y_{n+j}.$$

Удобно воспользоваться соотношением между спектральными плотностями и ковариационной функцией стационарного процесса. Данные соотношения получаются с помощью теоремы о свертке функций и свойства преобразования Фурье об инверсии аргумента функции [11, 12]:

$$\begin{aligned} X_k &= \sum_{n=1}^N x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \\ Y_k &= \sum_{n=1}^N y_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \\ R_{xy,j} &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k^* Y_k e^{\frac{2\pi i}{N} kj}, \\ n &= 1..N, k = 1..N. \end{aligned} \quad (4)$$

Взаимную спектральную плотность мощности сигналов далее будем обозначать как

$$S_{xy,k} = X_k^* Y_k,$$

однако оценка ковариационной функции 4 является циклической.

Для устранения эффекта цикличности необходимо перед использованием быстрого преобразования Фурье дополнить исходную последовательность нулями до двойного размера [9].

3. Оценка взаимной спектральной плотности двух сигналов

Основным средством определения взаимосвязи сигналов на конкретных частотах является квадрат функции когерентности [9–11]:

$$\gamma_{xy,k}^2 = \frac{|S_{xy,k}|^2}{S_{xx,k} S_{yy,k}},$$

Для ограниченных во времени сигналов необходимо применять оценку квадрата функции когерентности:

$$\hat{\gamma}_{xy,k}^2 = \frac{|\hat{S}_{xy,k}|^2}{\hat{S}_{xx,k} \hat{S}_{yy,k}}.$$

$\hat{S}_{xy,k}$, $\hat{S}_{xx,k}$, $\hat{S}_{yy,k}$ есть оценки спектральных плотностей (здесь и далее «шляпкой» обозначается оценка величины):

$$\hat{S}_{xy,k} = \sum_{l=1}^{n_d} X_{l,k}^* Y_{l,k}.$$

Оценки спектральных плотностей получаются путем разбиения изначальной реализации длиной N на n_d частей, таким образом, каждая из реализаций имеет размер N/n_d , w – оконная функция:

$$X_{l,k} = \sum_{n=1}^{N/n_d} x_{l,n} w_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn},$$

$$Y_{l,k} = \sum_{n=1}^{N/n_d} y_{l,n} w_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}.$$

Оценка фазового угла (взаимной фазы сигналов) между гармоническими составляющими сигналов может быть получена на основе взаимного спектра возмущений:

$$\hat{\theta}_{xy,k} = \arctg \left(\frac{\operatorname{Re}(\hat{S}_{xy,k})}{\operatorname{Im}(\hat{S}_{xy,k})} \right).$$

4. Численный анализ поведения взаимных статистических характеристик двух сигналов

В связи с тем что в литературе не удалось найти рекомендаций по выбору величины разбиения исходной реализации и выбора оконной функции для оценки квадрата функции когерентности, был проведен численный анализ, позволивший определить наиболее приемлемые параметры для вычисления квадрата функции когерентности.

Для адекватного использования квадрата функции когерентности необходимо знать следующее:

- среднеквадратичное отклонение оценки квадрата когерентности $\hat{\gamma}_{xy}^2(f)$ от истинного значения квадрата когерентности $\gamma_{xy}^2(f)$ в зависимости от используемой оконной функции;
- величину среднеквадратичного отклонения оценки квадрата когерентности $\hat{\gamma}_{xy}^2(f)$ от истинного значения квадрата когерентности $\gamma_{xy}^2(f)$ как функцию числа суммирований, используемых для оценки, и коэффициента их перекрытия.

Данные величины можно получить с помощью численного расчета.

Для получения необходимых оценок использованы сигналы в виде белого шума, так как для двух сигналов вида:

$$\begin{aligned}x &= n_1 + Gn_2, \\y &= n_2 + Gn_1,\end{aligned}$$

где n_1, n_2 – белый шум, имеющий нулевое среднее значение, G – некий численный коэффициент; известно точное значение квадрата когерентности [2]:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{4G}{(1 - G^2)^2}$$

Среднеквадратичное отклонение $\hat{\gamma}_{xy}^2$ от γ_{xy}^2 вычисляется следующим образом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N/n_d} \sum_{i=1}^{N/n_d} (\hat{\gamma}_{xy,i}^2 - \gamma_{xy}^2)^2},$$

где коэффициент перекрытия определен как

$$O_f = \frac{N/n_d - a}{N/n_d}.$$

Параметр n_d – это требуемое количество отрезков без пересечения, a – смещение между перекрывающимися отрезками (рис. 4.1).

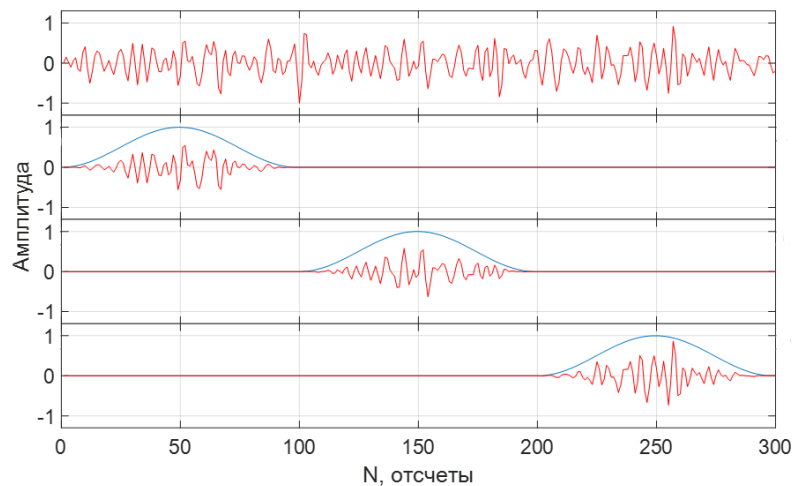


Рис. 4.1. Пример разбиения длинной реализации на непересекающиеся отрезки с использованием оконной функции Хеннинга, $n_d = 3$, $N = 300$ отсчетов, $a = 0$. Красным показан сигнал, синим – оконная функция

Fig. 4.1. An example of splitting epy implementation length into disjoint segments using the Hanning window function $n_d = 3$, $N = 300$ samples, $a = 0$. The signal is shown in red, the window function is shown in blue

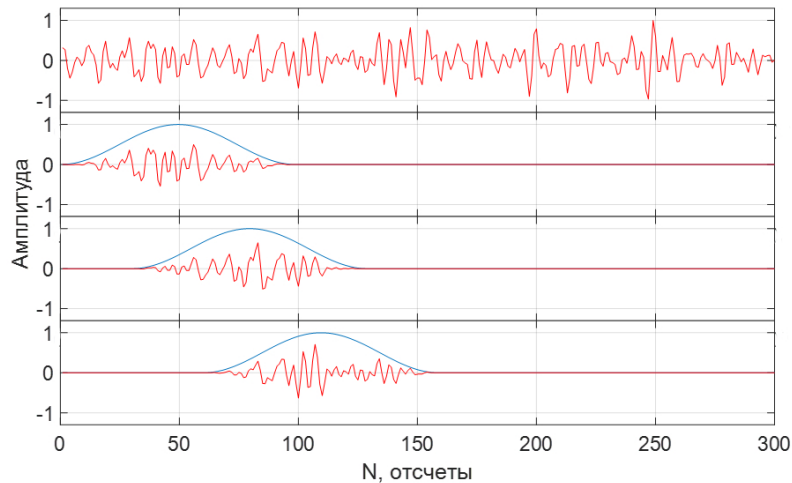


Рис. 4.2. Пример разбиения длинной реализации на отрезки с перекрытием $O_f = 0,7$, использована оконная функция Хеннинга, $n_d = 3$, $N = 300$ отсчетов, $a = 30$. Красным показан сигнал, синим – оконная функция

Fig. 4.2. An example of splitting epy implementation length into disjoint segments using the Henning window function, $n_d = 3$, $N = 300$ samples, $a = 30$. The signal is shown in red, the window function is shown in blue

Далее приведены зависимости среднеквадратичного отклонения оценки квадрата когерентности от весовой функции, коэффициента перекрытия и величины дробления исходной последовательности.

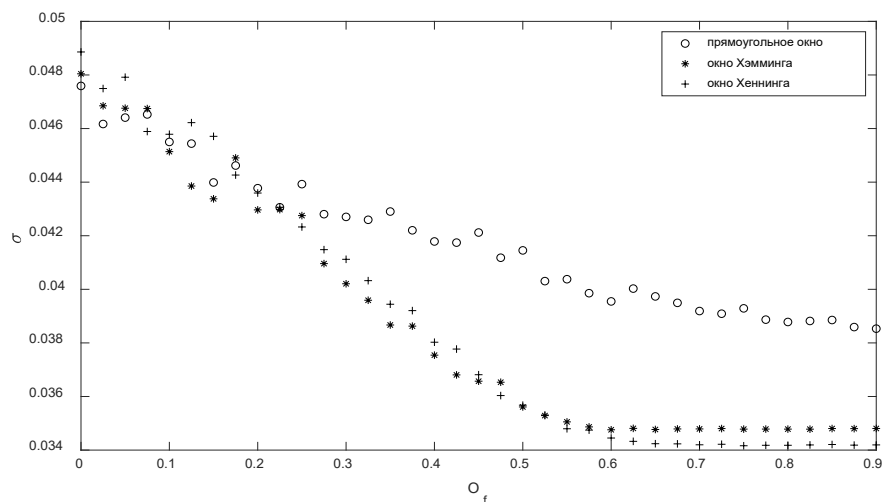


Рис. 4.3. Зависимость среднеквадратичного отклонения оценки квадрата когерентности от коэффициента перекрытия и используемого весового окна, $n_d = 128$, $N = 4096$

Fig. 4.3. The dependence of the standard deviation of the coherence square estimate on the overlap coefficient and the window function used $n_d = 128$, $N = 4,096$

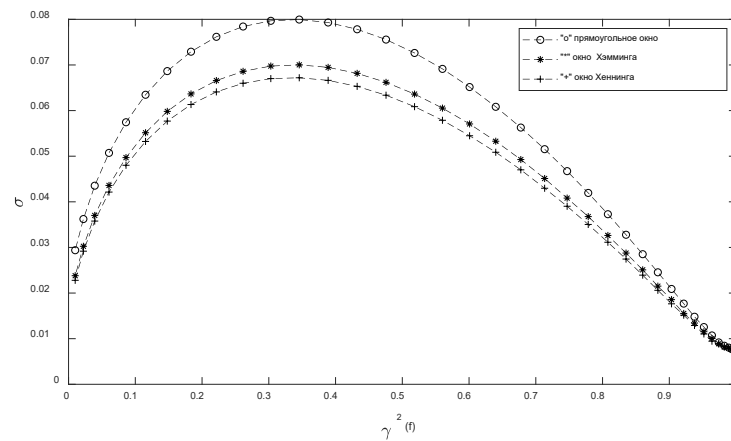


Рис. 4.4. Среднеквадратичное отклонение для $n_d = 32$, $O_f = 0,625$, $N = 4096$
 Fig. 4.4. Standard deviation for $n_d = 32$, $O_f = 0,625$, $N = 4,096$

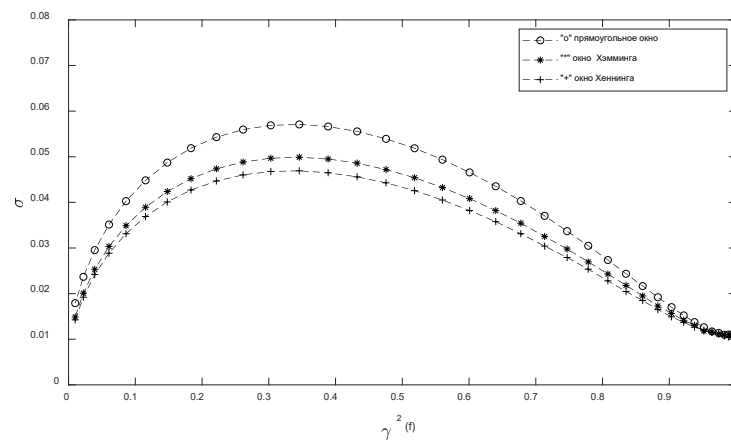


Рис. 4.5. Среднеквадратичное отклонение для $n_d = 64$, $O_f = 0,625$, $N = 4096$
 Fig. 4.5. Standard deviation for $n_d = 64$, $O_f = 0,625$, $N = 4,096$

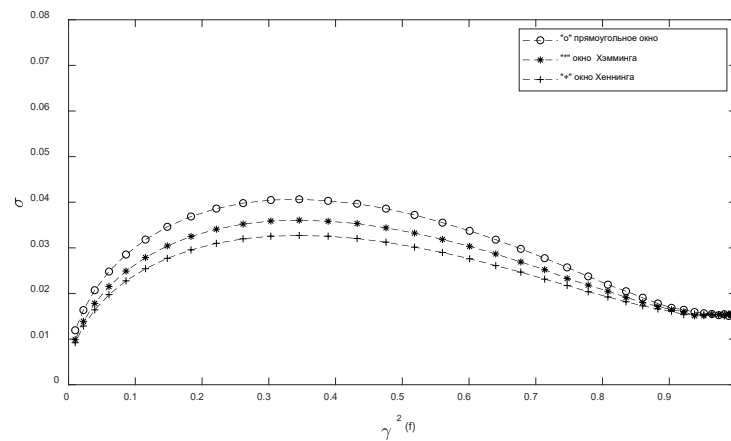


Рис. 4.6. Среднеквадратичное отклонение для $n_d = 128$, $O_f = 0,625$, $N = 4096$
 Fig. 4.6. Standard deviation for $n_d = 128$, $O_f = 0,625$, $N = 4,096$

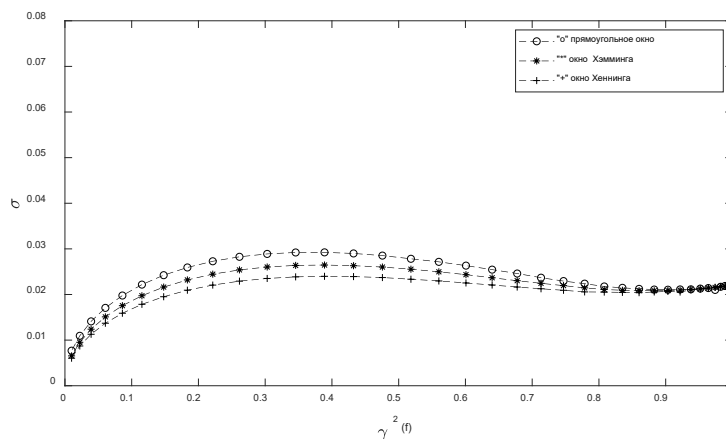


Рис. 4.7. Среднеквадратичное отклонение для $n_d = 256$, $O_f = 0,625$, $N = 4096$

Fig. 4.7. Standard deviation for $n_d = 256$, $O_f = 0,625$, $N = 4,096$

Приведенные выше рисунки (4.3–4.7) показывают, что наилучшая сходимость достигается при использовании окна Хеннинга для значений коэффициента перекрытия более 0,6 и максимально возможной величины дробления исходной последовательности n_d . Полученные результаты находятся в полном согласовании с работами [2; 3], где показано, что оценка спектральных плотностей с помощью перекрывающихся отрезков позволяет получить более точные значения квадрата функции когерентности.

Однако увеличение n_d приводит к уменьшению разрешения по частоте, по этой причине в дальнейшем будет использоваться $n_d = 128$ и $O_f = 0,625$.

5. Экспериментальные результаты

Для демонстрации применения данной методики предлагается рассмотреть результаты эксперимента, проведенного в лаборатории №14 ИТПМ СО РАН. Эксперимент выполнен при числе Маха $M = 2,5$, единичного числа Рейнольдса $Re_1 = 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Эксперимент проведен в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН. Использовалась модель пластины с цилиндрической передней кромкой радиусом 0,5 мм, пульсации потока измерялись при помощи двух термоанемометров постоянного сопротивления (ТПС) серии СТА-2017 [13]. Один датчик был установлен на координатном устройстве, второй датчик монтировался под пластиной таким образом, чтобы его чувствительный элемент находился за головной ударной волной. Использовались датчики, изготовленные из вольфрамовой нити толщиной 8 мкм, длиной 1,7 мм, перегрев датчиков составлял 0,8. Боковые стенки рабочей части аэродинамической трубы отполированы.

Пульсационные сигналы ТПС оцифровывались посредством АЦП L-CardE20-10 с частотой дискретизации 750 кГц и длиной реализации 2^{21} точек.

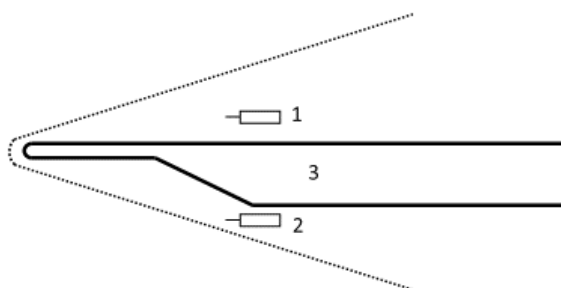


Рис. 5.1. Схема эксперимента: 1 и 2 – расположение датчиков термоанемометра, 3 – модель плоской пластины с цилиндрической передней кромкой

Fig. 5.1. Experimental scheme: 1 and 2—the location of the hot-wires, 3—the model of a flat plate with a cylindrical leading edge

При обработке данных используются следующие параметры $n_d = 128$ и $O_f = 0,625$. Для исключения влияния сетевых помех используется предварительная цифровая фильтрация для отсечения частот ниже 200 Герц.

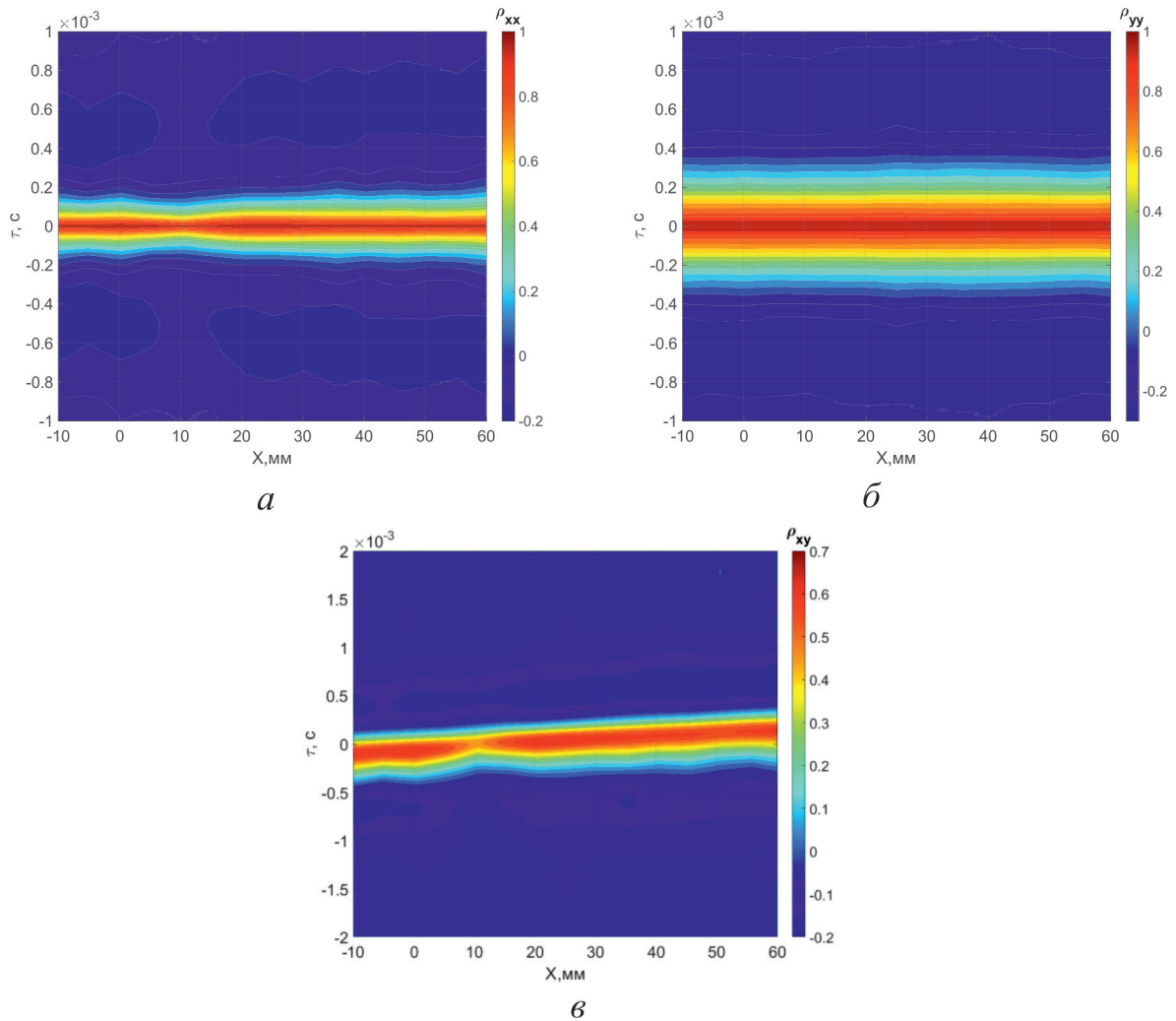


Рис. 5.2. Распределение коэффициентов корреляции между возмущениями свободного потока и пульсациями потока над пограничным слоем при $z = 0$ мм, $y = 7$ мм:

a – автокорреляционная функция возмущений над пластиной; b – автокорреляционная функция возмущений свободного потока в зависимости от положения датчика над пластиной; c – взаимно корреляционная функция возмущений свободного потока и пульсаций потока над пластиной

Fig. 5.2. Distribution of correlation coefficients between free flow perturbations and flow pulsations over the boundary layer at $z = 0$ mm, $y = 7$ mm: a —autocorrelation function of perturbations over the plate; b —autocorrelation function of free flow disturbances depending on the position of the sensor above the plate; c —cross-correlation function of free flow disturbances and pulsations of the flow over the plate

Полученные автокорреляционные функции показывают, что пульсации в свободном потоке и пульсации потока над пластиной имеют различное время когерентности.

Пространственно-временное распределение коэффициента взаимной корреляции (рис. 5.2, c) показывает, что существует некая взаимосвязь пульсаций на всем участке измерений $x = -10..60$ мм.

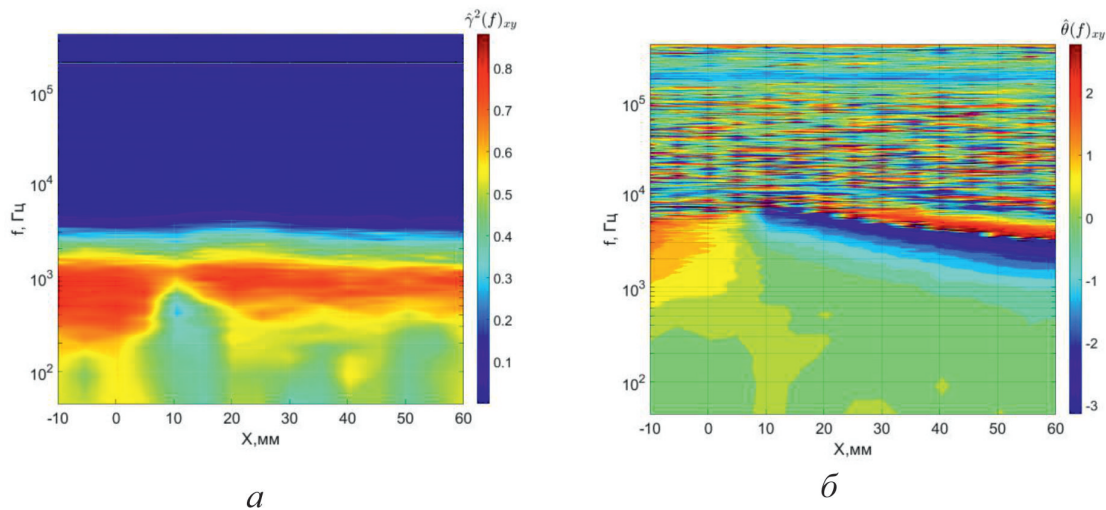


Рис. 5.3. *a* – распределение квадрата функции когерентности; *b* – взаимной фазы по частотам в сечении по x , при $z = 0$ мм, $y = 7$ мм

Fig. 5.3. *a* – is the distribution of the square of the coherence function, *b* – is the mutual phase over frequencies in the cross section over z , at $z = 0$ mm, $y = 7$ mm

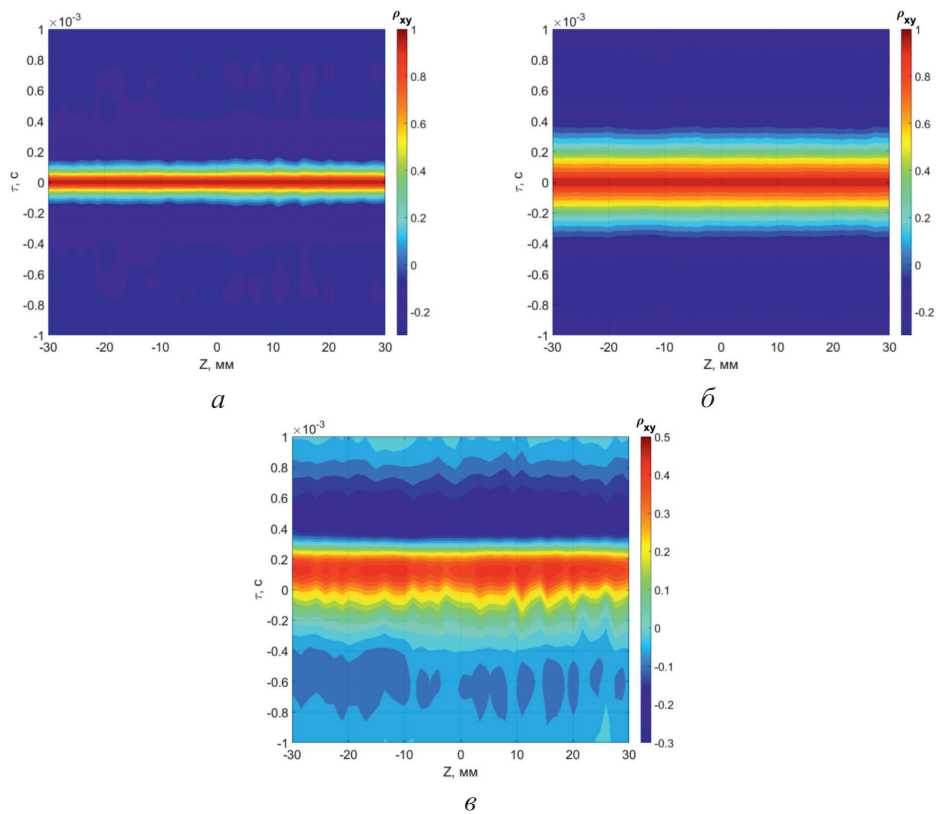


Рис. 5.4. Распределение коэффициентов корреляции между возмущениями свободного потока и пульсациями пограничного слоя при $y/\delta \approx 0,6$, $x = 60$ мм:

a – автокорреляционная функция возмущений пограничного слоя; *b* – автокорреляционная функция возмущений свободного потока в зависимости от положения датчика над пластиной; *в* – взаимнокорреляционная функция возмущений свободного потока и пульсаций пограничного слоя

Fig. 5.4. Distribution of correlation coefficients between free flow disturbances and boundary layer pulsations at $y/\delta \approx 0,6$, $x = 60$ mm: *a* – autocorrelation function of boundary layer perturbations; *b* – autocorrelation function of free flow disturbances depending on the position of the sensor above the plate; *в* – mutual correlation function of free flow disturbances and boundary layer pulsations

Распределение значения квадрата функции когерентности (рис. 5.3, *a*), показывает, что взаимосвязь существует на частотах до 5 кГц. Как в области $x = -10..0$ мм, т. е. перед пластиной, так и в области над пластиной, $x = 0..60$ мм.

Существует область ($x = 10$ мм), в которой взаимосвязь пульсаций свободного потока и пограничного слоя меньше, чем в остальных (рис. 5.2, *в*; 5.3, *a*), данное явление, возможно, объясняется прохождением головной ударной волны.

Распределение взаимной фазы показывает, что фаза имеет линейную зависимость от x . Околонулевой набег фазы виден в тот момент, когда верхний датчик находится непосредственно над датчиком под пластиной, рис. 5.3, *б*, $x = 7$ мм.

Измерения вдоль передней кромки при $x = 60$ мм, показывают, что существует значительная взаимосвязь пульсаций свободного потока и пограничного слоя, коэффициент корреляции доходит до 0,5. Характер пространственно-временного распределения коэффициента взаимной корреляции показывает, что возмущения падают на переднюю кромку плоским фронтом.

Еще одним подтверждением того, что возмущения падают на переднюю кромку плоским фронтом, является распределение взаимной фазы в измеренном сечении (рис. 5.5, *б*): видно, что во всем сечении набег фазы не зависит от координаты z , а только от частоты. Однако стоит отметить, что значения фазы являются определенными только до частот в 5 кГц. Причина состоит в том, что взаимосвязь пульсаций имеет место быть только до частот в 5 кГц, это видно из распределения значений квадрата функции когерентности (рис. 5.5, *a*).

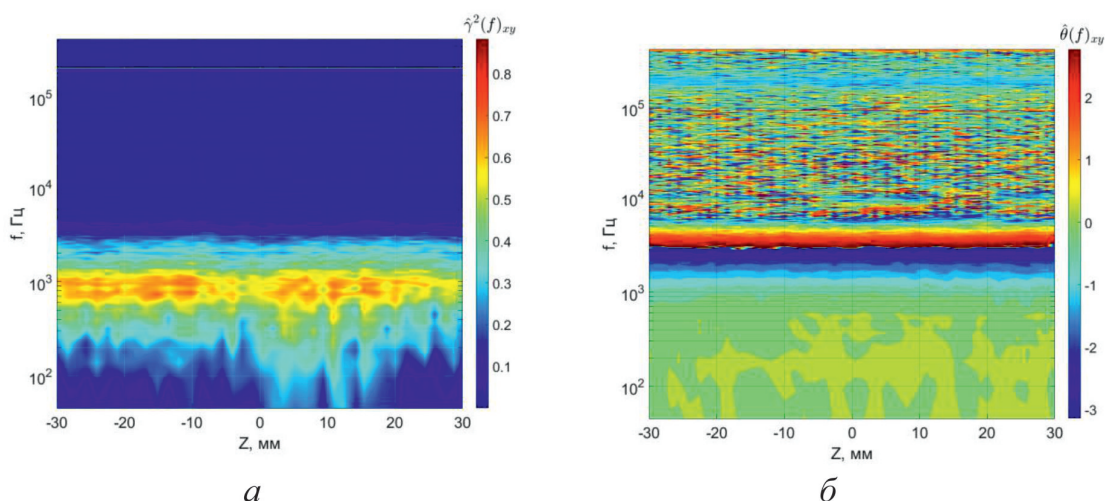


Рис. 5.5. *a* – распределение квадрата функции когерентности; *б* – взаимной фазы по частотам в сечении по z , $y/\delta \approx 0,6$, $x = 60$ мм

Fig. 5.5. *a*–the distribution of the square of the coherence function; *б*–the mutual phase over frequencies in the cross section in z , $y/\delta \approx 0.6$, $x = 60$ mm

Таким образом, данная методика позволяет определять не только наличие взаимосвязи между пульсациями сверхзвукового потока и возмущениями пограничного слоя, но и характер возмущений в потоке.

6. Заключение

В статье представлена методика измерения взаимосвязи посредством цифровых методов. Работоспособность данного метода показана на проведенных экспериментах по измерению взаимосвязи пульсаций свободного потока и пограничного слоя при числе Маха $M = 2,5$, единичного числа Рейнольдса $Re_1 = 6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Использование цифровой методики оценки взаимосвязи позволяет оценить такие параметры, как диапазон частот, в котором присутствует взаимосвязь возмущений, взаимную фазу возмущений, что применительно к измерениям в ламинарных течениях, позволяет произвести оценку характера волнового фронта возмущений.

Получены численные оценки погрешности определения квадрата функции когерентности, что является необходимым параметром при оценке диапазона частот, в котором присутствует взаимосвязь.

Список литературы

1. **Kendall J. M.** «Supersonic Boundary Layer Stability Experiments», Proceedings of Boundary Layer Transition Study Group Meeting, Vol. II, Aerospace Corp, San Bernardino, Calif, Aug. 1967.
2. **Carter G. C.** Estimation of the Magnitude-Squared Coherence Function (Spectrum)- NUSC Technical Report 4343, 1972, 107 p.
3. **Carter G. C., Knapp C. H. and Nuttall A. H.** Estimation of the Magnitude-Squared Coherence Function Via Overlapped Fast Fourier Transform Processing // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics-1973-Vol.21.
4. **Afanasev L. V. et al.** Correlation measurement of supersonic flow pulsations and boundary layer disturbances in wind tunnel at Mach 2 //AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2020. Т. 2288. №. 1. С. 030029.
5. **Afanasev L. V. et al.** The correlation of the pulsations of flow in the settling chamber with the pulsations of supersonic flow //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. Т. 1404. №. 1. С. 012074.
6. **Afanasev L. V. et al.** Cross-correlation measurement of disturbance initiated by weak shock wave in the flat plate boundary layer with blunt leading edge at Mach 2 //AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2021. Т. 2351. №. 1. С. 040035.
7. **Afanasev L. V. et al.** Measurement of the correlation of disturbances from a weak shock wave and pulsations of the boundary layer of a flat plate with a blunted leading edge at Mach 2 // METHODS OF AEROPHYSICAL RESEARCH. 2020. С. 3.
8. **Афанасьев Л. В., Косинов А. Д., Ермолаев Ю. Г., Семёнов Н. В.** К взаимосвязи возмущений свободного сверхзвукового потока с возмущениями пограничного слоя при числе Маха // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 15. №. 2. С. 50–60.
9. **Бендат Дж., Пирсон А.** Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312с.
10. **Бендат Д., Пирсон А.** Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. Т. 11. 464 с.
11. **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы, М.: Высшая школа, 2000. 462 с.
12. **Васильев Д. В., Витоль М. Р., Горшенков Ю. Н. и др.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебное пособие для вузов / Под ред. К.А. Самойло. М.: Радио и связь, 1982, 528 с.
13. **Kosinov A. D. et al.** “To the analysis of the natural pulsation development during laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer,” in XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM), AIP Conference Proceedings 1893, edited by V. M. Fomin (American Institute of Physics, Melville, NY, 2017), pp. 030073.

References

1. **Kendall J. M.** Supersonic Boundary Layer Stability Experiments. Proceedings of Boundary Layer Transition Study Group Meeting, Vol. II, Aerospace Corp, San Bernardino, Calif, Aug. 1967.
2. **Carter G. C.** Estimation of the Magnitude-Squared Coherence Function (Spectrum) NUSC Technical Report 4343, 1972. 107 p.

3. **Carter G. C., Knapp C. H., Nuttall A. H.** Estimation of the Magnitude-Squared Coherence Function Via Overlapped Fast Fourier Transform Processing. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1973, vol. 21.
4. **Afanasev L. V. et al.** Correlation measurement of supersonic flow pulsations and boundary layer disturbances in wind tunnel at Mach 2. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2288, no. 1, 030029.
5. **Afanasev L. V. et al.** The correlation of the pulsations of flow in the settling chamber with the pulsations of supersonic flow. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1404, no. 1, 012074.
6. **Afanasev L. V. et al.** Cross-correlation measurement of disturbance initiated by weak shock wave in the flat plate boundary layer with blunt leading edge at Mach 2. *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2351, no. 1, 040035.
7. **Afanasev L. V. et al.** Measurement of the correlation of disturbances from a weak shock wave and pulsations of the boundary layer of a flat plate with a blunted leading edge at Mach 2. *Methods of Aerophysical Research*, 2020, p. 3.
8. **Afanasev L. V., Kosinov A. D., Yermolaev Yu. G., Semionov N. V.** About the Relationship between Disturbances in a Free Supersonic Flow and Disturbances in a Boundary Layer at Mach Number 2. *Siberian Journal of Physics*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 50–60. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-50-60.
9. **Bendat J., Piersol A.** Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis. New-York, 1980.
10. **Bendat J., Piersol A.** Measurement and analysis of random processes. Moscow: Mir, 1974. Vol. 11. 464 p. (in Russ.)
11. **Baskakov S. I.** Radio engineering circuits and signals, Moscow: Higher School, 2000. 462 p. (in Russ.)
12. **Vasiliev D. V., Vitol M. R., Gorshenkov Yu. N. et al.** Radio engineering circuits and signals: A textbook for universities; Ed. by K. A. Samoilo. M.: Radio and Communications, 1982, 528 p.
13. **Kosinov A. D. et al.** To the analysis of the natural pulsation development during laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer. In: XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM), AIP Conference Proceedings 1893; Ed. by V. M. Fomin (American Institute of Physics, Melville, NY, 2017), p. 030073.

Информация об авторах

Афанасьев Леонид Владимирович, инженер-исследователь

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией

Семёнов Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник

Шипуль Софья Андреевна, младший научный сотрудник

Яцких Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник

Information about the Authors

Leonid V. Afanasiev, engineer researcher, ITAM SB RAS

Alexander D. Kosinov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), senior researcher, head of the laboratory, ITAM SB RAS

Nikolai V. Semenov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), senior researcher, leading researcher, ITAM SB RAS

Sofia A. Shipul, junior researcher, ITAM SB RAS

Aleksey A. Yatskikh, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), junior researcher, ITAM SB RAS

*Статья поступила в редакцию 23.11.2022; одобрена после рецензирования 28.12.22;
принята к публикации 28.12.22*

*The article was submitted 23.11.2022; approved after reviewing 28.12.22;
accepted for publication 28.12.22*