

Многочастотный акустический метод определения характеристик турбулентного поперечного течения

И. Б. Есипов^{1,2,*}, В. Н. Коновалов², А. Д. Черноусов^{2,3}, О. Е. Попов⁴

¹Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1

²Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева
Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

³Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН,
Научный центр волновых исследований
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

⁴Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН. Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3
(Статья поступила 28.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Приводятся результаты экспериментального исследования возможности решить обратную задачу — восстановить скорость турбулентного потока и его положение в пространстве по анализу спектра флуктуаций акустического сигнала разных частот. Обсуждаются условия и точность восстановления характеристик турбулентного течения с помощью многочастотного сигнала, распространяющегося по одной акустической трассе. Исследование выполнялось в заглушенной акустической камере. В качестве турбулентного потока служила струя воздуха. Несмотря на общезначимый характер выполненных исследований, полученные результаты могут быть применимы в задачах атмосферной акустики, аэроакустики, а также акустики океана.

PACS: 43.20

УДК: 534.23

Ключевые слова: турбулентный поток, флуктуации звука, многочастотная томография.

ВВЕДЕНИЕ

Акустический сигнал, проходя через турбулентное течение, испытывает флуктуации как амплитуды, так и фазы. Такие флуктуации называют еще сцинтилляциями звука. Этот эффект используется для решения обратной задачи — восстановления параметров турбулентного потока. Экспериментальные исследования [1] и компьютерное моделирование [2] показывают эффективность решения обратной задачи путем анализа сцинтилляций звука. Обычно используется корреляция пространственно разнесенных сигналов, прошедших через турбулентное течение. Если разнесение акустических трасс не превышает масштаба, на котором турбулентность можно считать замороженной, то задержка времени флуктуаций прямо указывает на скорость поперечного течения. По существу, этот подход используется и в томографических исследованиях. Методы акустической томографии используют пространственно разнесенные трассы и пространственное разрешение процесса восстановления исследуемых параметров зависит от числа таких трасс. Это обстоятельство может ограничивать возможность томографического исследования. В частности, при исследовании океана на протяженных трассах, создание томографического полигона оказывается весьма дорогим и трудно реализуемым. В настоящей работе мы обсуждаем возможность определения скорости и положения турбулентного потока, пересекающего акустическую трассу,

по которой распространяются многочастотные сигналы. Тем самым демонстрируется возможность реализации многочастотной томографии течения вдоль одной акустической трассы.

В статье кратко анализируется теория восстановления скорости турбулентного поперечного течения, приводятся данные лабораторного эксперимента, в заключении обсуждается возможность реализации этого метода в натуральных условиях.

1. ТЕОРИЯ ПРОЦЕССА

Турбулентный поток, пересекая акустическую трассу, приводит к флуктуациям сигнала. Эти флуктуации зависят от соотношения между масштабами турбулентности и размером зоны Френеля акустического сигнала, поэтому они меняются с частотой акустического излучения. Оказывается, что флуктуации амплитуды и фазы огибающих сигналов разных частот будут когерентными для низких частот и некогерентными для высоких частот флуктуаций. Частота среза функции когерентности будет зависеть от скорости потока, то есть от скорости сноса турбулентной структуры. Определение этой частоты среза позволяет определить скорость течения поперечного потока [3, 4]. Такой метод можно рассматривать как вариант сцинтилляционного метода определения скорости турбулентного течения, но в частотной области. В рамках этого подхода определяется когерентность флуктуаций огибающих сигналов. Ее можно характеризовать взаимной корреляционной функцией или ее взаимным спектром. Нормированный взаимный спектр (или когерентность) для

*E-mail: igor.esipov@mail.ru

логарифма амплитуды χ или фазы S флуктуаций сигналов с несущими частотами ω_n и ω_m определяется следующим образом:

$$\Gamma_{\chi,S}^{(n,m)} = \frac{W_{\chi,S}^{(n,m)}(\nu)}{\left[W_{\chi,S}^{(n,n)}(\nu)W_{\chi,S}^{(m,m)}(\nu)\right]^{1/2}}. \quad (1)$$

Здесь $W_{\chi,S}^{(n,m)}(\nu)$ — взаимный спектр флуктуаций амплитуды или фазы между сигналами разных частот, а $W_{\chi,S}^{(n,n)}(\nu)$ и $W_{\chi,S}^{(m,m)}(\nu)$ — соответствующие спектры мощности, ν — частота флуктуаций сигналов, вызванная турбулентным потоком.

Простой анализ показывает, что для ограниченно в пространстве турбулентного потока, частота среза функции когерентности (1) ν_c будет зависеть как от скорости турбулентного потока U , так и от пространственного положения этого потока x_0

$$\nu_c \approx U \left(\frac{kL}{x_0(L-x_0)} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $k = 2k_n k_m / (k_n + k_m)$ — среднее значение волнового числа для сигналов разных частот. В таком случае простое измерение частоты среза функции когерентности не позволяет определить скорость и пространственное положение потока. Чтобы разрешить возникшую неопределенность относительно параметров U и x_0 нужно привлечь дополнительные сведения, например, время фазовой задержки $\Delta\tau$ между сигналами одной частоты, но принятыми парой расположенных вдоль потока приемников. Такое время фазовой задержки будет являться дополнительной функцией U и x_0 .

$$\Delta\tau = \frac{bx_0}{UL}. \quad (3)$$

Здесь b — пространственное разнесение между приемниками. Таким образом, мы получили пару независимых соотношений (2) и (3), с помощью которых однозначно можно определить скорость турбулентного потока U и его положение на акустической трассе x_0 . Для оценки величины пространственного разнесения между приемниками следует иметь в виду, что модель замороженной турбулентности применима на расстояниях сноса турбулентной структуры порядка нескольких масштабов турбулентности, что приводит к условию $\nu_c \Delta\tau \approx 1$. Это условие накладывает ограничение на выбор расстояния между приемниками $b \approx (L/k)^{1/2}$, то есть приемники могут быть разнесены на расстояние порядка размера зоны Френеля. Сигналы от приемников, разнесенных на большее расстояние, будут некогерентными. Разнесение на меньшее расстояние снижает вклад выражения (3) в решение системы (2), (3).

Будем далее рассматривать условие, когда пара приемников будет разнесена на расстояние порядка размера зоны Френеля, то есть на масштаб толщины луча. В таком случае мы можем говорить об однолучевой акустической схеме регистрации параметров турбулентного потока.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальная демонстрация многочастотного метода была сделана в воздухе в звукозаглушенной камере. В качестве многочастотного источника звука был использован электродинамический излучатель с частотной полосой до 20 кГц. Звуковой сигнал принимался линейкой из 8 микрофонов, разнесенных с шагом 5 см симметрично относительно оси трассы (рис. 1). Пара центральных микрофонов была разнесена на 10 см. Расстояние между геометрическим центром приемников и динамиком $L = 7.75$ м. Турбулентный поток поперек акустической трассы создавался вентилятором, и ширина такого потока была около 1 м. Скорость потока мы определяли чашечным анемометром. Динамиком одновременно излучались 4 тона: 8000, 10000, 12500, 16000 Гц. Длительность каждой записи 200 с. Турбулентный поток приводит как к фазовой, так и амплитудной модуляции сигнала. Запись производилась на профессиональные микрофоны Brüel&Kjaer type 4961. Микрофоны обладают ровной АЧХ в области частот, в которой проводились измерения. Частота дискретизации записи 50 кГц. Минимальное, симметричное относительно оси трассы, разнесение микрофонов было 10 см, а максимальное 45 см при размере зоны Френеля около 20 см. Опыты выполнялись для двух положений вентилятора $x_0 = L/2$, либо $x_0 = L/4$ при скоростях потока 1.22 м/с, 1.39 м/с и 1.81 м/с,

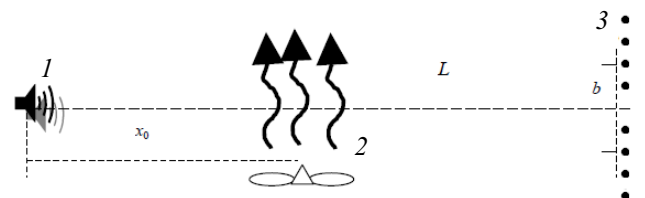


Рис. 1: Экспериментальная установка. 1 — излучающий динамик, 2 — вентилятор, 3 — линейка приемных микрофонов

На рис. 2 показано влияние турбулентного потока на спектр одной из частотных компонент сигнала. Видно, что в диапазоне частот ± 20 Гц относительно несущей частоты излучения спектр принятого сигнала за счёт флуктуаций, вызванных потоком, превышает спектр сигнала без потока более, чем на 20 дБ. В соответствии с выражением (1) были определены когерентности огибающих сигналов для каждой из излучаемых частот. Для дальнейшего анализа когерентности

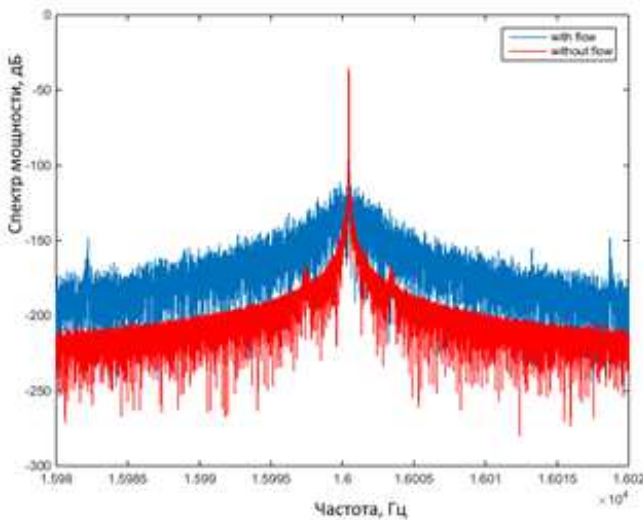


Рис. 2: Спектр сигнала на частоте 16 кГц, скорость потока 1.22 м/с

огibaющих сигналов мы вводим безразмерную частоту $FF = F(\Omega)^{1/2}$, где $\Omega = \frac{\omega_n - \omega_m}{\omega_n + \omega_m}$ — безразмерная частота, характеризующая несущие частоты ω_n и ω_m , $F = \nu/\nu_0$ есть отношение текущей частоты взаимного спектра огibaющих к некоторой постоянной. Принимая во внимание выражение (2), определим эту постоянную как $\nu_0 = U \left(\frac{kL}{x_0(L - x_0)} \right)^{1/2}$. Такой выбор постоянной ν_0 приводит к тому, что безразмерная частота среза функции когерентности становится универсальной для всех сигналов и принимает значение $FF_c \approx 1$ (рис. 3).

Это обстоятельство открывает возможность восстановить характеристики турбулентного потока — его скорость и пространственное положение. Чтобы реализовать эту процедуру нужно взять сигнал, по крайней мере, двух несущих частот ω_n и ω_m , определить безразмерную частоту Ω . Затем нужно определить частоту среза функции когерентности для огibaющих сигналов двух частот ν_c и определить безразмерную величину FF_c . В нашем случае $FF_c = 1$. Эти результаты следует дополнить определением времени задержки $\Delta\tau$ между огibaющими сигналами одной и той же частоты, но зарегистрированными разными приемниками. Согласно выражениям (2,3) эти данные определяют систему двух уравнений, решение которой позволяет определить величины $U(x_0)$ и x_0 .

$$\frac{\nu_c(\Omega)^{1/2}}{FF_c} = U(x_0) \left(\frac{kL}{x_0(L - x_0)} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\Delta\tau = \frac{bx_0}{U(x_0)L}.$$

Ключевым пунктом этой процедуры восстановления характеристик пространственно локализованного турбулентного потока является определение безразмерной частоты среза функции когерентности флуктуаций огibaющих двух частот FF_c . С целью проверки экспериментального выбора значения $FF_c = 1$, было выполнено компьютерное моделирование этого процесса. Моделирование выполнялось в соответствии с процедурой, описанной в [5]. В рамках этой процедуры турбулентный поток моделировался случайной суммой одномерных осцилляций $\delta c(x, y)$, которые являются добавками к скорости распространения звука в среде. Для того, чтобы проверить чувствительность метода к виду осцилляций было рассмотрено три варианта степени спада энергетического спектра $\delta c(x, y)$ с уменьшением размера неоднородностей: $(-3/3)$, $(-5/3)$, $(-7/3)$. Наименьший масштаб неоднородностей в модели был 0.01 м, наибольший масштаб неоднородностей 1.5 м. Профиль нормировался так, чтобы максимальное отклонение от средней скорости звука 340 м/с не превышало 0.5 м/с. Поток моделировался следующим образом. Предполагалось, что середина потока шириной 1 м находится на расстоянии 3.9 м от источника. В рассмотренном примере скорость потока 2 м/с.

Результаты экспериментального исследования и компьютерного моделирования, представленные на рис. 3, показывают, что универсальное значение безразмерной частоты $FF_c = 1$ подтверждается с достаточной точностью. Это значение устойчиво к изменению степени спектра флуктуаций в широких пределах (от -1 до -7/3). Результаты восстановления параметров U и x_0 показаны в табл. 1. Видно, что погрешность восстановления параметров турбулентного потока не превышает 15–20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые экспериментально показана возможность восстановить скорость турбулентного потока и его положение в пространстве по анализу спектра флуктуаций акустического сигнала разных частот. Как показывает анализ, более близкими к реальным данным, получаются результаты, когда берутся пары наиболее близких друг к другу частот. В этом случае размеры зон Френеля отличаются не сильно, и условие замороженной турбулентности выполняется наилучшим образом для определения частоты среза функции когерентности.

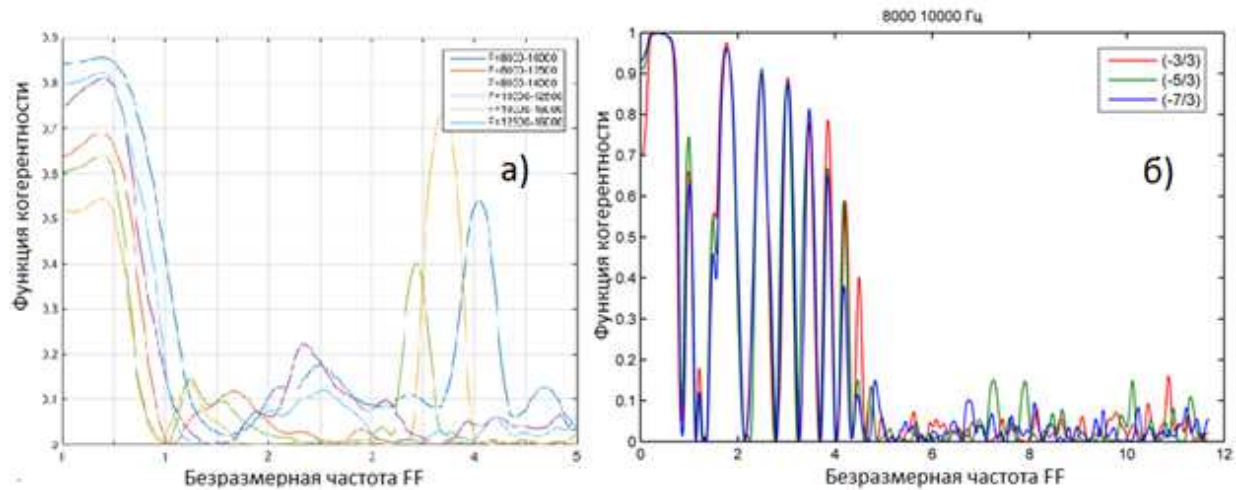


Рис. 3: Когерентность сигналов разных пар частот, как функция безразмерной частоты FF; а — эксперимент, б — моделирование для разных законов спектра флуктуаций $\delta c(x, y)$

Таблица I:

Данные измеренные на эксперименте								
U(м/с) (факт)	1.22		1.39		1.81			
x_0 , м	3.87	1.94	3.87	1.94	3.87	1.94		
Результат восстановления по всем парам частот								
U (м/с):	1.5	1.3	1.5	1.4	1.5	1.3		
x_0 , м	3.7	1.8	4.3	1.99	3.3	1.7		

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-29-02003; 17-02-00434 и 17-52-40009).

[1] Clifford S., Farmer D. J. *Acoust. Soc. Am.* 1983. **74**, N 6. P. 1826.
 [2] Esipov I. B., Naugolnykh K. A., Johannessen O. M., Ovchinnikov O. B., Tuzhilkin Yu. I. *Proc. 5-th ECUA 2000*. Lyon, France. P. 171.
 [3] Fuks I., Charnotsky M., Naugolnykh K. J. *Acoust. Soc. Am.* 2001. **109**, N 6. P. 2730.
 [4] Charnotskii M. I., Fuks I. M., Naugolnykh K. A., Smirnov A. V., Di Iorio D., Esipov I. B. *Acoust. Phys.* 2006. **52**, N 2. P. 222.
 [5] Chevret P., Blanc-Benon Ph., Juve D. J. *Acoust. Soc. Am.* 1996. **100**, N 6. P. 3587.

Multi-frequency acoustical method to detect the properties of the turbulent transversal current

I. B. Esipov^{1,2,a}, V. N. Konovalov², A. D. Chernousov^{2,3}, O. E. Popov⁴

¹Gubkin State university of oil and gas. Moscow, 119991, Russia

²Andreyev Acoustics institute. Moscow, 117036, Russia

³SCWR GPI RAS, Moscow, 119991, Russia

⁴Obukhov Institute of Atmosphere Physics of RAS. Moscow, 119017, Russia

E-mail: ^aigor.esipov@mail.ru

The results of experimental research the inverse problem to retrieve of the velocity both and spatial position of the turbulent current through the analysis of fluctuation spectra of the acoustical signals of different frequencies. Conditions and accuracy of

the inversion by multi-frequency signal, passed on the acoustical path crossed the turbulent current are discussed. The research has been done in echoless chamber with air flow as a turbulent current. In spite of general physics type of this research could be implemented in atmosphere acoustics, aeroacoustics and ocean acoustics.

PACS: 43.20

Keywords: turbulent flow, sound fluctuation, multi-frequency tomography.

Received 28 June 2017.

Сведения об авторах

1. Есипов Игорь Борисович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 723 62 11, e-mail: igor.esipov@mail.ru.
 2. Коновалов Виктор Николаевич — вед. инженер; тел.: (499) 723 62 11, e-mail: inet0001a@ya.ru.
 3. Черноусов Андрей Денисович — нач. отдела; тел.: (499) 723 62 11, e-mail: chado2008@yandex.ru.
 4. Попов Олег Евгеньевич — науч. сотрудник; тел.: (495) 951-55-65, e-mail: olegp@mail.ru.
-