

05.11.13

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

И.Ю. Бычкова, А.В. Бычков, Л.А. Славутский

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары

Проводится теоретический и экспериментальный анализ рассеяния ультразвуковых импульсов на границе турбулентного потока воздуха. Для теоретических оценок используется решение задачи отражения плоской волны от слоя случайно-неоднородной среды методом инвариантного погружения. Показано, что в зависимости от масштабов и интенсивности случайных флуктуаций скорости звука существенно меняются не только амплитуда и фаза сигнала, но и пространственно-временные масштабы импульса, его временная задержка. Экспериментальные исследования проведены по многолучевой схеме, когда сигнал в приемнике представляет собой суперпозицию импульсов, пришедших по разным траекториям. Для оценки малых временных задержек использована цифровая фазовая модуляция и корреляционная обработка сигналов. Показано, что в турбулентном слое на границе воздушного потока вентилятора за счет эффекта локализации реализуется волноводное распространение ультразвука со значительным изменением задержки ультразвукового сигнала.

*Ключевые слова:* ультразвук, турбулентный поток, импульсные измерения, эффект локализации, фазово-модулированные сигналы, корреляционная обработка.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области рассеяния звука турбулентностью имеют длительную историю [1] и представляют интерес для широкого круга задач, от расходомерии [2, 3] до метеорологии [4, 5]. Современные методы цифровой модуляции и обработки сигналов позволяют существенно повысить разрешение ультразвуковых (УЗ) приборов [6-8], что дает возможность более детально исследовать распространение и рассеяние акустических волн в случайно-неоднородной среде. Соответствующие методы моделирования интенсивно развиваются в последние десятилетия [9, 10], однако из-за сложности процессов теоретические (численные) решения в большинстве случаев лишь качественно соответствуют экспериментальным результатам.

В настоящей работе для оценки задержки УЗ импульса на границе случайно-стратифицированной среды приводится точное решение волновой задачи в одномерном случае (отражение плоской волны от случайно-неоднородного слоя) и сравнивается с экспериментальными измерениями, проводимыми при скользящем распространении и рассеянии УЗ импульсов на границе турбулентного потока воздуха, генерируемого вентилятором в разных режимах. Результаты позволяют сделать вывод о возникновении эффекта локализации, когда УЗ сигнал оказывается «захвачен» в турбулентном слое потока, что приводит к существенному увеличению задержки распространения импульсов.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для решения задачи рассеяния волны от случайно-неоднородного слоя среды использовался метод инвариантного погружения, позволяющий свести краевую задачу к задаче с начальными условиями и реализовать эффективные численные алгоритмы ее решения, особенно для нестационарных случайно-неоднородных сред [9]. Решение для коэффициента отражения гармонической волны частоты  $\omega$  находится из нелинейного дифференциального уравнения первого порядка [10]:

$$\frac{dR_L}{dL} = 2ikR_L + i\frac{k}{2}\varepsilon(L)(1 + R_L)^2,$$

где  $k = \omega/c$  – волновое число акустической волны в однородной среде со скоростью звука  $c$ ;  $L$  – текущий параметр интегрирования;  $\varepsilon(L)$  – функция, определяющая случайную неоднородность слоя.

Решая уравнение погружения при разных частотах, мы можем получить частотную характеристику коэффициента отражения  $R_L(\omega)$ . Обратное Фурье-преобразование позволяет получить временную форму отраженного импульса.

Пример формы импульсного сигнала УЗ резонансного преобразователя показана на рис. 1,а. Пример профиля скорости звука при модельных расчетах показан на рис. 1,в, который представляется в виде суммы случайной и регулярной составляющих  $\varepsilon(x) = \varepsilon_0(x) + \tilde{\varepsilon}(x)$ . Случайная составляющая задавалась в виде функции с гауссовым распределением и дисперсией, соответствующей характерным неоднородностям среды. Масштабы случайной неоднородности сопоставимы с длиной акустической волны. Искаже-

ние формы отраженного импульса показано на рис. 1,б.

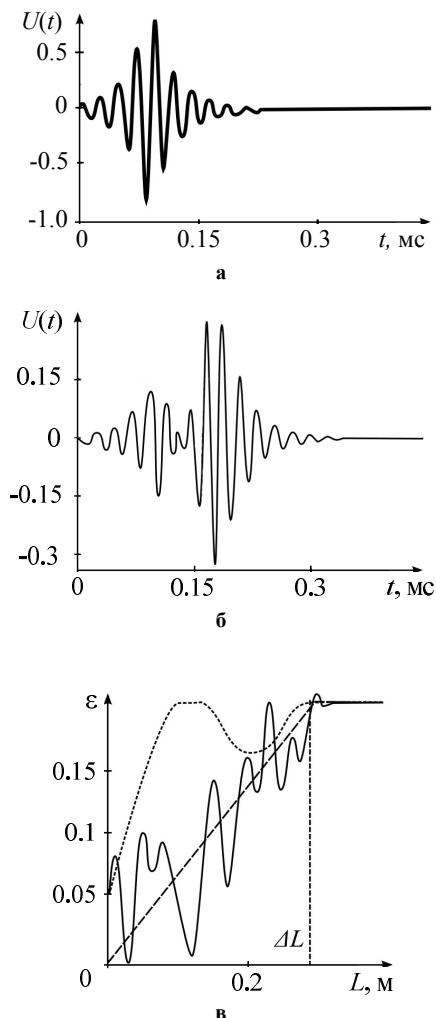


Рис. 1. Входной импульс (а), выходной импульс (б), профили скоростей (в)

Результаты моделирования демонстрируют следующее: с увеличением амплитуды случайной составляющей в неоднородности среды меняются не только амплитуда и фаза отраженного сигнала, но и

его длительность. Это сказывается на временной задержке сигнала в целом. «Переотражения» акустической волны между случайными неоднородностями внутри слоя приводят к дополнительной задержке сигнала. Это явление носит название «эффекта локализации» и приводит к тому, что случайная стратификация обеспечивает «захват» волны и ее волноводное распространение в случайно-неоднородном слое. Эффект достаточно широко известен в задачах распространения радиоволн в земной атмосфере [10, 11].

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Функциональные блоки импульсного УЗ устройства [6] заключены в приемно-передающем устройстве ППУ (рис. 2). Преобразователи ультразвука (УЗП) имеют собственную частоту, равную 40 кГц. Длительность зондирующего импульса составляет порядка одной миллисекунды. В устройстве имеется возможность настройки формы пакета импульсов, которая может быть простой либо фазомодулированной. Фазовая модуляция производится согласно коду Баркера [12]. УЗП имеют относительно широкую диаграмму направленности (около 60°). Сигнал на входе приемника в общем случае может быть представлен в виде суперпозиции двух сигналов: прямого и отраженного. Согласно диаграммам направленности мощность излучения боковых лучей отличается от мощности прямого луча примерно на 5 дБ, поэтому для повышения чувствительности системы к отраженному от потока сигналу УЗП были повернуты в эксперименте примерно на 45° (рис. 2). Для проведения эксперимента использовался промышленный вентилятор Dospel WK200 (В) с диаметром отверстия 0,15 м, мощностью 170 Вт, производительностью 1200 м³/ч и номинальной частотой вращения 2430 об/мин. Калибровки частоты вращения вентилятора производилась при помощи цифрового фототахометра DT2234В (ФТ). ФТ позволяет бесконтактно измерять частоту вращения вентилятора с разрешением 0,1 об/мин (в интервале менее 1000 об/мин), 1,0 об/мин (в интервале более 1000 об/мин). Погрешность измерений ±0,05 %.

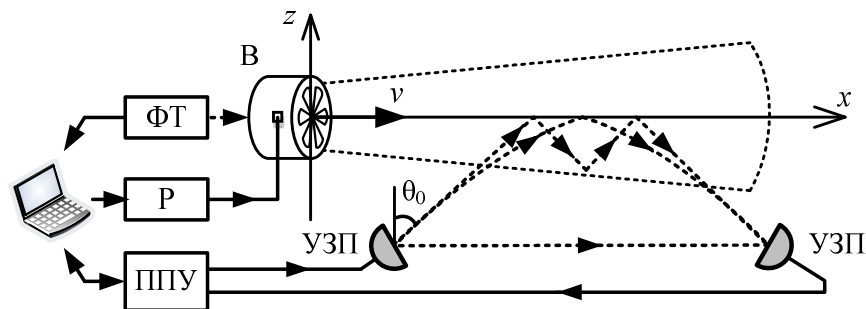


Рис. 2 Функциональная схема лабораторной установки и схема эксперимента

Алгоритм обработки измеряемых УЗ сигналов заключается в следующем: определяется временное положение «центра тяжести» огибающей мощности взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигнала в приемном УЗП с сигналом эталона. Эталон – сигнал с ФМ по коду Баркера [12], распространяющийся прямо между передатчиком и приемником звука [6]. В зависимости от относительной задержки между прямым и отраженным сигналами ВКФ на входе приемника меняется. При нулевой задержке ВКФ симметрична. Увеличение задержки отраженного сигнала приводит к искажению взаимной корреляционной функции. При значительных задержках во ВКФ имеют место два пика, амплитуда которых пропорциональна амплитуде сигналов в приемнике. При этом разница во времени между ними соответствует искомой относительной задержке.

Малую величину задержки можно оценить, анализируя асимметрию ВКФ: по изменению средневзвешенного положения «центра тяжести» огибающей мощности ВКФ

$$t_c = \int t \cdot W(t)dt / \int W(t)dt$$

где  $W(t)$  – огибающая мощности ВКФ.

Описанный подход не ограничивает величину измеряемой задержки.

Структура самого потока экспериментально контролировалась по результатам измерения пространственной и временной изменчивости скорости потока с помощью анемометра X-Line AeroTemp. Значения скорости измерялись в разных точках потока вдоль (в 11 позициях) и поперек потока (в 5 позициях) в течение 20 секунд с дискретностью 0,25 с. Скорость вращения вентилятора регулировалась симисторным регулятором (Р). На рис. 3 показаны распределение скорости и ее относительных флуктуаций  $\Delta v$  - степени турбулентности

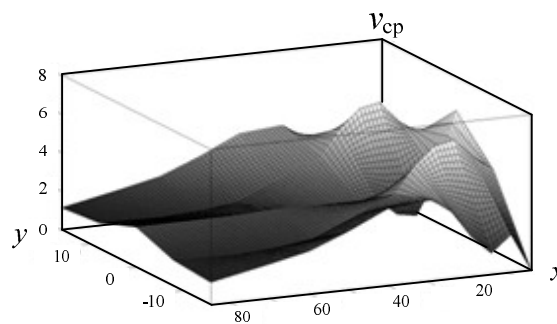
$$e = \left( |\Delta v| / v_{cp} \right) \cdot 100\%$$

в номинальном режиме работы вентилятора относительно её среднего значения  $v_{cp}$ .

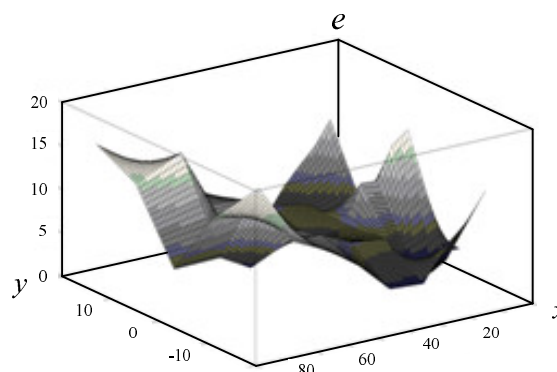
Как видно из рисунка на края потока степень турбулентности достигает 10-15 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения относительной задержки проводились при разных значениях частоты вращения вентилятора по результатам обработки и усреднения двухсот импульсов. На рис. 4 приведена зависимость изменения среднего положения «центра тяжести» мощности ВКФ от скорости вращения вентилятора.



а



б

Рис. 3. Распределение скорости потока (а) и ее относительных флуктуаций (б)

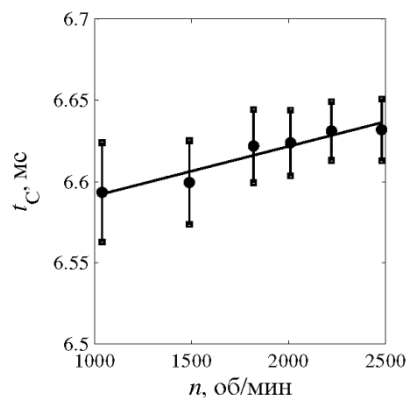


Рис. 4. Экспериментальная зависимость положения «центра тяжести» мощности ВКФ в зависимости от частоты вращения вентилятора. Точки – среднее значение по результатам 200 измерений, вертикальные линии – величина среднеквадратического отклонения

Таким образом, задержка между прямым и отраженным в потоке сигналом монотонно растет с увеличением его скорости. Важнейшим является тот факт, что соответствующие зависимости задержки от скорости потока очень мало отличаются при перестановке местами излучателя и приемника. То есть за-

держка растёт при распространении УЗ как по- так и против направления потока.

В номинальном режиме, при скорости потока на продольной оси вентилятора порядка 5 м/с, задержка УЗ волны между прямым и отраженным сигналом отличается для случаев прямого (по потоку) и обратного (против потока) распространения на 3-5 мкс. При том, что изменения задержки с увеличением скорости потока составляют 25-30 мкс (рис. 4). При расчетах рефракции с использованием лучевого приближения задержка составляет порядка 10 нс. То есть механизм распространения УЗ волны в потоке связан не с рефракцией, а с рассеянием УЗ, возникновением эффектов, характерных при распространении в волноводах, а также эффектов локализации при отражении от турбулентных неоднородностей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальные измерения, основанные на корреляционной обработке фазово-модулированных сигналов, позволяют за счет высокого временного разрешения при многолучевом распространении ультразвука оценить механизмы рассеяния акустической волны в турбулентном воздушном потоке. По теоретическим оценкам углы рассеяния ультразвука составляют не менее 15-20 градусов, что делает невозможным использование при моделировании не только лучевого, но и малоуглового приближения (параболическое уравнение).

Описанный подход может быть использован для количественной оценки параметров турбулентного слоя на границе газового потока.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. [Текст] / Д.И. Блохинцев – М.: Наука, 1981. – 208 с.
2. Kupnik M. Adaptive Pulse Repetition Frequency Technique for an Ultrasonic Transit-Time Gas Flowmeter for Hot Pulsating Gases [Текст] / M. Kupnik, A. Schröder, P. O'Leary, E. Benes, M. Gröschl // IEEE Sensors journal, 2006. – V.6. – № 4. – PP. 906-915.
3. Ядарова О.Н. Система управления приводом вентилятора на основе доплеровского ультразвукового контроля воздушного потока [Текст] / О.Н. Ядарова, Г.П. Охоткин, Л.А. Славутский // Электротехника. 2017. – № 7. – С. 27-30.
4. Bui G.T. Two Capacitive Micro-Machined Ultrasonic Transducers for Wind Speed Measurement [Текст] / G.T. Bui, Y.T. Jiang, D.C. Pang // Sensors. 2016. – V. 16, – № 6. – PP. 814-822.
5. Cruette D. Fast Temperature and True Airspeed Measurements with the Airborne Ultrasonic Anemometer-Thermometer [Текст] / D. Cruette, A. Marillier, J.L. Dufresne, J.Y. Grandpeix // Journal of atmospheric and oceanic technology. 1999. – V.17. – PP. 1020-1039.
6. Bychkova I.Yu. Digital phase modulation and correlation processing of ultrasound signals for pulsed measurements in an inhomogeneous medium [Текст] / I.Yu. Bychkova, A.V. Bychkov, L.A. Slavutskii // Instruments and Experimental Techniques, vol. 61, 2018, PP. 421-426.
7. Aldawi F.J. A high accuracy ultrasound distance measurement system using binary frequency shift-keyed signal and phase detection [Текст] / F.J. Aldawi, A.P. Longstaff, S. Fletcher, P. Mather, A. Myers // Proceedings of Computing and Engineering Annual Researchers. 2007. – PP. 1-7.
8. Elmer H. Effect of frequency dependent radiation of ultrasonic transducers to correlation based distance measurement systems [Текст] / H. Elmer, H. Schweinzer // Intelligent Components and Instruments for Control Applications. 2003. – PP. 273-278.
9. Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media [Текст] / A. Ishimaru // New-York: Academic Press, 1978. – 272 p.
10. Klyatskin V.I. Stochastic Equations: Theory and Applications in Acoustics, Hydrodynamics, Magnetohydrodynamics, and Radiophysics. Volume 2. Coherent phenomena in stochastic dynamic systems [Текст] / V.I. Klyatskin // Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – V.2 – 508 p.
11. Кошель К.В. Распространение УК и СВЧ радиоволн над морем [Текст] / К.В. Кошель, Л.А. Славутский, Б.М. Шевцов // Владивосток: Дальнаука, 1993. – 160 с.
12. Barker R.H. Group synchronizing of binary digital sequences Communication theory. [Текст] / R.H. Barker // London: Butterworth-Publ. 1953. – PP. 273-287.

*Бычкова Ирина Юрьевна – аспирант, кафедра автоматизации и управления в технических системах, ФГБОУ ВО «Чувацкий государственный университет имени И.Н. Ульянова», e-mail: biy.qint@gmail.com.*

*Бычков Анатолий Владимирович – аспирант, кафедра электрических и электронных аппаратов, ФГБОУ ВО «Чувацкий государственный университет имени И.Н. Ульянова», e-mail: bav.xlab@gmail.com.*

*Славутский Леонид Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, ФГБОУ ВО «Чувацкий государственный университет имени И.Н. Ульянова», e-mail: las\_co@mail.ru.*

## LOCALIZATION OF ULTRASOUND AT GLANCING PROPAGATION IN A TURBULENT AIR FLOW

I.Yu. Bychkova, A.V. Bychkov, L.A. Slavutskii

*Chuvash State University, Cheboksary*

Abstract – Theoretical and experimental analysis of the scattering of ultrasonic pulses at the turbulent air flow boundary is carried out. For theoretical estimates, the solution of plane wave's reflection from a randomly inhomogeneous medium by using invariant immersion method is used. It is shown, that not only the amplitude and the phase of the signal depend on the scales and in the intensity of random fluctuations of sound speed, but also the spatio-temporal scales of the pulse and its time delay. Experimental studies were carried out according to a multi-ray scheme, when the received signal is a superposition of pulses that came along different trajectories. Digital phase modulation and correlation signal processing are used to estimate small time delays. It is shown, that waveguide propagation of ultrasound with a significant change in the ultrasound signal delay is realized in the turbulent layer at the boundary of the fan's air flow due to the localization effect.

*Key words: ultrasound, turbulent flow, pulse measurements, localization effect, phase-modulated signals, correlation processing.*

### REFERENCES

1. Blokhintsev D.I., Acoustics of inhomogeneous moving medium. Moscow: Nauka Publ., 1981. – 208 p.
2. Kupnik M., Schröder A., O'Leary P., Benes E., Gröschl M., "Adaptive Pulse Repetition Frequency Technique for an Ultrasonic Transit-Time Gas Flowmeter for Hot Pulsating Gases", IEEE Sensors journal, V.6, № 4, pp. 906-915, 2006.
3. Yadarova O.N., Okhotkin G.P., Slavutskii L.A., "Fan drive control system based on Doppler ultrasound control of the air flow", Electrical Engineering, № 7, pp. 27-30, 2017.
4. Bui G.T., Jiang Y.T., Pang D.C. "Two Capacitive Micro-Machined Ultrasonic Transducers for Wind Speed Measurement", Sensors, V. 16, № 6, pp. 814-822, 2016.
5. Cruette D., Marillier A., Dufresne J.L., Grandpeix J.Y., "Fast Temperature and True Airspeed Measurements with the Airborne Ultrasonic Anemometer-Thermometer", Journal of atmospheric and oceanic technology, V.17, pp. 1020-1039, 1999.
6. Bychkova I.Yu., Bychkov A.V., Slavutskii L.A., "Digital phase modulation and correlation processing of ultrasound signals for pulsed measurements in an inhomogeneous medium", Instruments and Experimental Techniques, vol. 61, pp. 421-426, 2018.
7. Aldawi F.J., Longstaff A.P., Fletcher S., Mather P., Myers A., "A high accuracy ultrasound distance measurement system using binary frequency shift-keyed signal and phase detection", Proceedings of Computing and Engineering Annual Researchers, pp. 1-7, 2007.
8. Elmer H., Schweinzer H., "Effect of frequency dependent radiation of ultrasonic transducers to correlation based distance measurement systems", Intelligent Components and Instruments for Control Applications, pp. 273-278, 2003.
9. Ishimaru A., "Wave Propagation and Scattering in Random Media", New-York: Academic Press, 1978. – 272 p.
10. Klyatskin V.I., Stochastic Equations: Theory and Applications in Acoustics, Hydrodynamics, Magnetohydrodynamics, and Radiophysics. Volume 2. Coherent phenomena in stochastic dynamic systems. Switzerland: Springer International Publ., V.2, 2015. – 508 p.
11. Koshel K.V., Slavutskii L.A., Shevtsov B.M., The propagation of the ultra-short and microwave frequency radio waves over the sea. Vladivostok: Dal'nauka, 1993. – 160 p.
12. Barker R.H., "Group synchronizing of binary digital sequences. Communication theory", London: Butterworth Publ, pp. 273-287, 1953.

*Bychkova I.Yu. – post-graduate student, department of automatics and control in technical systems, Chuvash State University, Cheboksary, e-mail: biy.quint@gmail.com.*

*Bychkov A.V. – post-graduate student, electrical and electronic apparatuses department, Chuvash State University, Cheboksary, e-mail: bav.xlab@gmail.com.*

*Slavutskii L.A. – doctor of physics and mathematical sciences, professor of automatics and control in technical systems department, Chuvash State University, Cheboksary, e-mail: las\_co@mail.ru.*