

УДК 534.26

Повышение точности акустических измерений в импедансной трубе с потоком

Комкин Александр Иванович

akomkin@mail.ru
SPIN-код: 5661-1528

Быков Алексей Иванович^()*

alecksbykov@mail.ru
SPIN-код: 2686-5097

Матасова Ольга Юрьевна

olgasanm@rambler.ru

Семенов Станислав Григорьевич

siemens_off@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность измерения потерь передачи типовыми элементами глушителей шума в импедансной трубе. К таким факторам относятся статистические ошибки при проведении спектрального анализа регистрируемых микрофонами акустических сигналов, на которые влияет, в частности, неравномерность частотной характеристики источника звука, а также наличие в импедансной трубе скользящего воздушного потока. Кроме того, снижение точности получаемых результатов может быть обусловлено большим объемом математических операций на стадии пост обработки получаемых спектральных характеристик измеряемых сигналов. Проанализированы основные методы повышения точности получаемых результатов, связанные с использованием процедур выравнивания спектра входного сигнала с помощью эквалайзера или адаптивной фильтрации.

Ключевые слова: спектральный анализ, корреляционная функция, когерентность, шум, фильтрация, адаптивный фильтр

Improving the accuracy of acoustic measurements in an impedance pipe with a flow

Komkin Alexandr Ivanovich

akomkin@mail.ru
SPIN-code: 5661-1528

Bykov Aleksei Ivanovich^()*

alecksbykov@mail.ru
SPIN-code: 2686-5097

Matasova Olga Yurievna

olgasanm@rambler.ru

Sementsov Stanislav Grigorievich

siemens_off@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The main factors influencing the accuracy of measuring transmission losses by typical elements of noise mufflers in an impedance pipe are considered. These factors include statistical errors in the spectral analysis of acoustic signals recorded by microphones, which are affected, in particular, by the uneven frequency response of the sound source, as well as the presence of a sliding airflow in the impedance tube. In addition, the decrease in the accuracy of the results obtained may be due to the large volume of mathematical operations at the stage of post-processing of the obtained spectral characteristics of the measured

signals. The main methods of increasing the accuracy of the obtained results are analyzed, related to the use of procedures for equalizing the spectrum of the input signal using an equalizer or adaptive filtering.

Keywords: spectral analysis, correlation function, coherence, noise, filtering, adaptive filter

Введение. Глушители является основным средством снижения газодинамического шума различного рода энергетических установок [1]. Разработка глушителей шума с высокими показателями акустической эффективности, требует, как правило, проведения большого объема как вычислительных, так и экспериментальных работ. В настоящее время для расчетного проектирования глушителей шума используются различные программные комплексы, позволяющие учесть влияние различных параметров окружающей среды и просчитать конфигурации глушителей практически любой сложности. Вместе с тем при расчетах с учетом воздушного потока, протекающего через глушитель, сложность вычислений существенно возрастает [2]. Поэтому наряду с расчетами большое значение имеют и экспериментальные исследования глушителей шума, которые могут подтвердить или опровергнуть правильность расчетных результатов. Экспериментальное исследование глушителей как правило проводятся в импедансной трубе с помощью системы по крайней мере из четырех микрофонов. Особенности проведения такого рода измерений рассмотрены в целом ряде работ [3–6], а также в стандартах [7]. Однако некоторые вопросы, связанные с особенностями алгоритмов обработки результатов измерений с помощью системы микрофонов, обеспечивающих минимальные погрешности при вычислении акустических характеристик исследуемого глушителя шума, еще требуют более детального рассмотрения. Сюда относиться также оценка влияния скользящего потока на точность получаемых результатов измерений. Рассмотрению этих вопросов и посвящена данная работа.

Материалы и методы. В работе проводится оценка точности измерений, проводимых в импедансной трубе методом четырех микрофонов и двух нагрузок. Схема измерений представлена на рис. 1, где в качестве исследуемого образца рассматривается резонатор Гельмгольца, размещенный на стенке импедансной трубы. С одного конца трубы размещается источник звука, генерирующий в трубе плоские звуковые волны, с другого конца — некоторая нагрузка, характеризуемая некоторым импедансом Z_r . По обеим сторонам от образца на стенках импедансной трубы размещаются по паре микрофонов $M1, M2, M3, M4$, с помощью которых амплитуды прямой и отраженной звуковых волн в импедансной трубе.

Звуковое давление в импедансной трубе определяется суммой двух бегущих встречных волн. Амплитуды этих волн, прямых A, C и отраженных B, D , есть комплексные величины. Они также зависят от волнового числа $k = \omega/c$, где ω — угловая частота; c — скорость звука в воздухе. Рассматриваемые амплитуды звуковых волн могут быть выражены через комплексный спектр сигнала на первом микрофоне P_1 и представлены в виде:

$$\begin{aligned} A &= iP_1 A' \exp(-ikx_2); & B &= iP_1 B' \exp(ikx_2); \\ C &= iP_1 C' \exp(ikx_3); & D &= iP_1 D' \exp(-ikx_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Входящие в эти выражения безразмерные амплитуды A' , C' , B' , D' определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} A' &= \frac{H_{21} \exp(ikx_{21}) - 1}{2 \sin kx_{21}}; & B' &= \frac{1 - H_{21} \exp(-ikx_{21})}{2 \sin kx_{21}}; \\ C' &= \frac{H_{41} - H_{31} \exp(ikx_{43})}{2 \sin kx_{43}}; & D' &= \frac{H_{31} \exp(-ikx_{43}) - H_{41}}{2 \sin kx_{43}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где H_{21} , H_{31} , H_{41} — частотные характеристики между сигналом с первого микрофона и сигналами соответственно со второго, третьего и четвертого микрофонов.

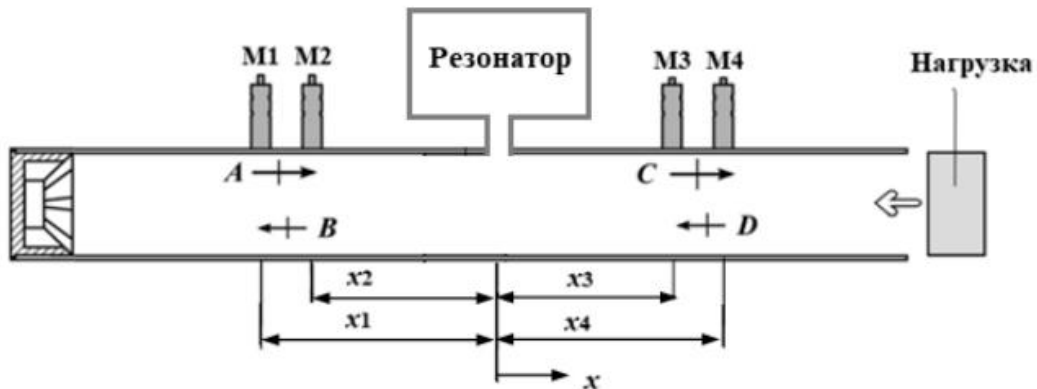


Рис. 1. Схема измерений в импедансной трубе методом четырех микрофонов

Основной акустической характеристикой глушителя шума являются потери передачи $TL = 10 \lg (W_u^+ / W_d^+)$, где W_u^+ , W_d^+ — мощности звуковых волн, соответственно поступающих на вход глушителя и прошедших глушителя, при согласованной нагрузке на его выходе.

Потери передачи глушителя могут быть выражены через безразмерные амплитуды падающей волн (2) в виде

$$TL = 20 \lg \frac{|A_1 D_2 - A_2 D_1|}{|C_1 D_2 - C_2 D_1|} = 20 \lg \frac{|A'_1 D'_2 - A'_2 D'_1|}{|C'_1 D'_2 - C'_2 D'_1|}, \quad (3)$$

где индексы при комплексных амплитудах соответствует порядковому номеру нагрузки в импедансной трубе. Из вышеизложенного следует, что определение TL связано с проведением большого объема измерений и последующих вычислений, так что важно проанализировать возможные источники ошибок в получаемых результатах.

Результаты. 1. Влияние шума в измерительной системе на точность измерений.

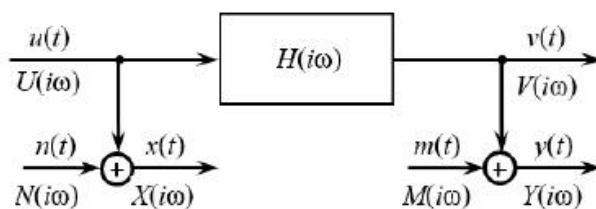


Рис. 2. Система с одним входом и одним выходом при наличии входного и выходного шума

Шум в измерительной системе может быть обусловлен большим динамическим диапазоном измеряемых сигналов, так что на некоторых частотах их уровень становится соизмеримыми с уровнем фоновых шумов. Проанализируем влияние шума на результаты измерений частотных характеристик сигналов между микрофонами с помощью модели [8], представленной на рис. 2, где $u(t)$, $v(t)$ — исходные сигналы; $x(t)$, $y(t)$ — измеряемые сигналы; $n(t)$, $m(t)$ — входной и выходной шумы; $U(i\omega)$, $V(i\omega)$, $X(i\omega)$, $Y(i\omega)$, $N(i\omega)$, $M(i\omega)$, — комплексные спектры (преобразования Фурье) соответствующих сигналов и шумов.

При отсутствии шума, $n(t) = m(t) = 0$, результаты измерений дают истинную частотную характеристику:

$$H_{xy}(i\omega) = \frac{X(i\omega)Y(-i\omega)}{X(i\omega)X(-i\omega)} = \frac{G_{xy}(\omega)}{G_{xx}(\omega)} = \frac{G_{uv}(\omega)}{G_{uu}(\omega)} = H(i\omega). \quad (4)$$

Если шум присутствует, $n(t) = m(t) \neq 0$, и они не коррелированы между собой и с исходными сигналами $u(t)$ и $v(t)$, то тогда

$$H_{xy}(i\omega) = \frac{G_{xy}(\omega)}{G_{xx}(\omega)} = \frac{G_{uv}(\omega)}{G_{uu}(\omega) + G_{nn}(\omega)} = H(i\omega) \frac{1}{1 + G_{nn}(\omega)/G_{uu}(\omega)}. \quad (5)$$

При этом оценка частотной характеристики получается смещенной. Величина этого смещения будет определяться отношением спектров шума и сигнала на входе системы. Уменьшить величину смещения можно путем выравнивания спектра входного сигнала, например, с помощью эквалайзера.

2. Погрешности измерений при наличии воздушного потока.

Наличие потока в канале может оказывать существенное влияние на результаты измерений. Это иллюстрируется рис. 3, где представлены потери передачи резонатора Гельмгольца в канале без потока и с потоком со скоростью 5 м/с.

На первый взгляд турбулентный шум потока можно рассматривать как дополнительное входное воздействие на исследуемую систему, что отражено на рис. 4, где через $q(t)$ и $Q(i\omega)$ обозначены турбулентный шум потока и его преобразование Фурье.

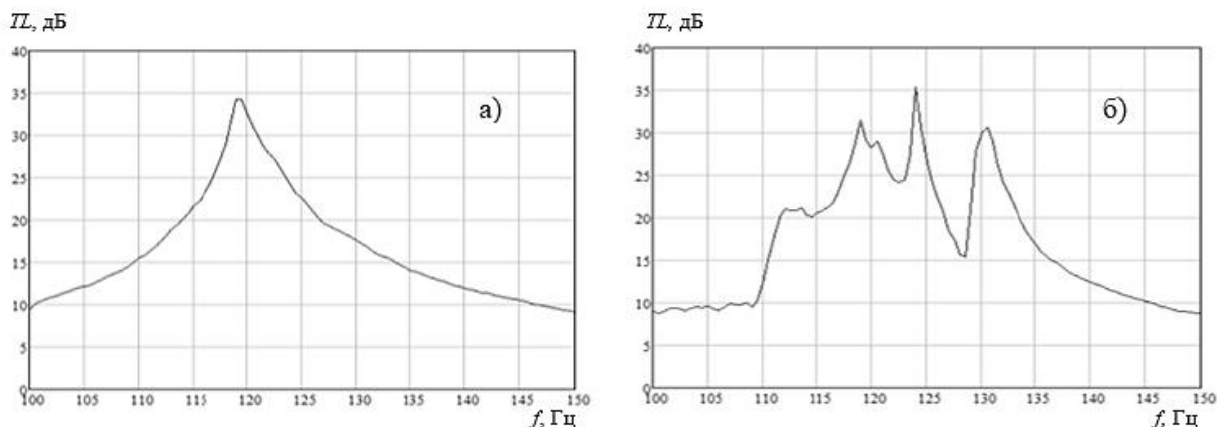


Рис. 3. Потери передачи резонатора Гельмгольца в канале без потока (а) и с потоком (б)

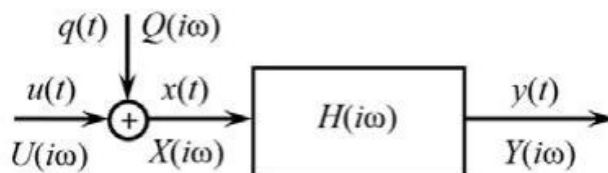


Рис. 4. Потери передачи резонатора Гельмгольца в канале без потока (а) и с потоком (б)

На этом основании можно считать, что турбулентный шум не должен приводить к снижению точности оценки $H(i\omega)$ (рис. 4). Но с учетом того, что $H(i\omega)$ описывает распространение плоской звуковой волны в канале, а турбулентный шум совсем другой природы и распространяется в измерительной системе со значительно меньшей скоростью, то такой шум действует на измерительные микрофоны как помеха.

Для иллюстрации этого обстоятельства на рис. 5 представлены спектр и корреляционная функция турбулентного шума потока, создаваемого в канале вентилятором.

Интервал корреляции [9] для данного шума

$$\tau_k = \frac{1}{R(0)} \int_0^{\infty} |R(\tau)| d\tau = 0,008 \text{ с.} \quad (6)$$

При скорости потока $v = 15 \text{ м/с}$ и расстоянии между микрофонами $l = 0,15 \text{ м}$ время, за которое поток проходит это расстояние $t = 0,01 \text{ с}$, что больше интервала корреляции. Таким образом, турбулентный шум оказывается некоррелированным с акустическими сигналами в рассматриваемой измерительной системе и его влияние на точность измерений также может быть описано формулой (5).

Обсуждение. Влияние турбулентного шума потока на точность оценки частотной характеристики не может быть уменьшена корректировкой формы спектра входного полезного сигнала с помощью эквалайзера, как для фоновое шума. В этом случае следует использовать адаптивную фильтрацию [10].

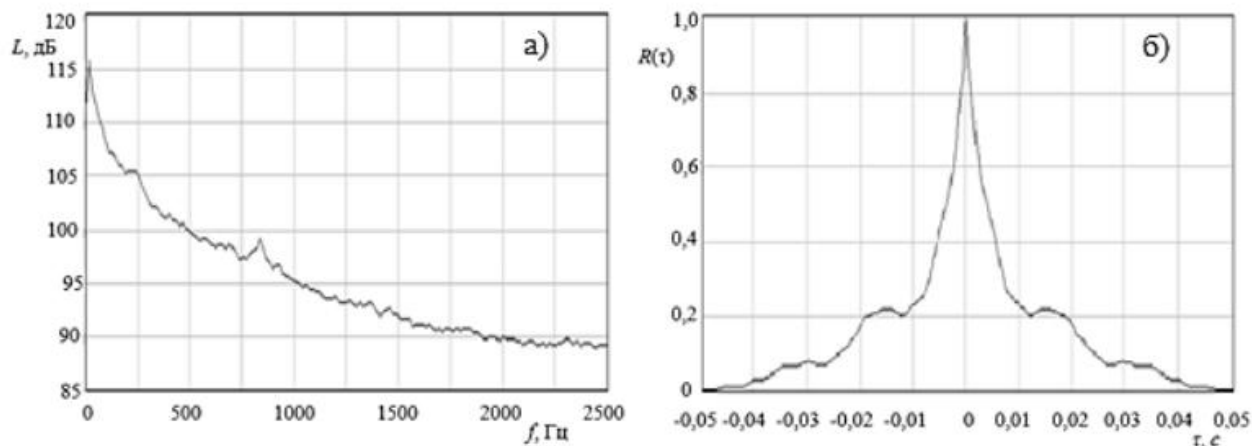


Рис. 5. Спектр (а) и корреляционная функция (б) турбулентного шума воздушного потока

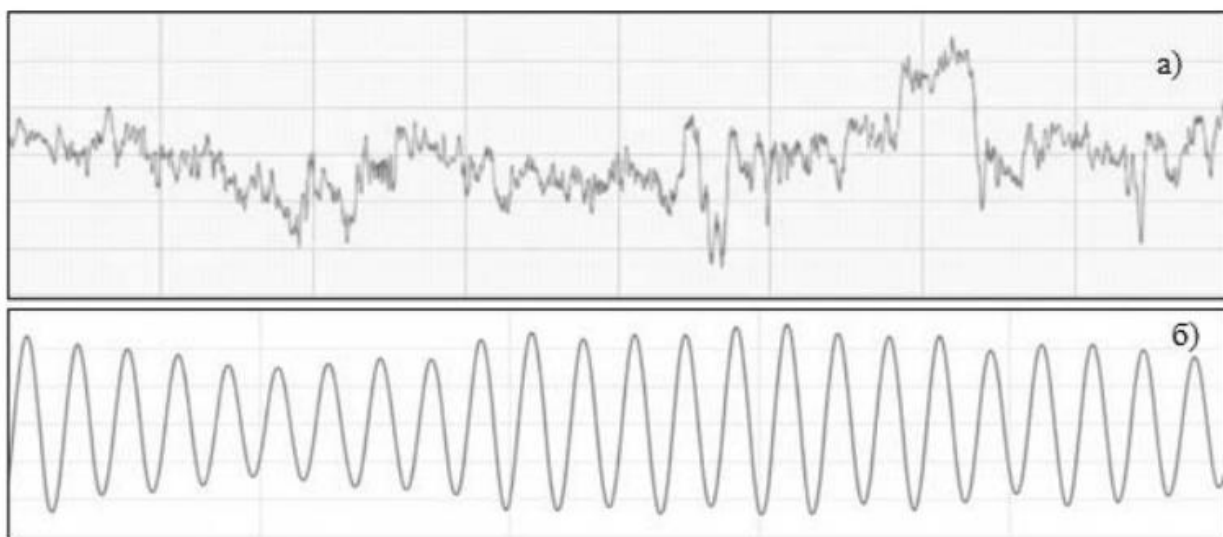


Рис. 6. Исходный измеренный сигнал (а) и он же после адаптивной фильтрации (б)

В качестве примера был рассмотрен линейно частотно модулированный (ЛЧМ) звуковой сигнал с наложенным на него турбулентным шумом воздушного потока, временная реализация которого представлена на рис. 6, а. Адаптивная фильтрация данного сигнала с привязкой к ЛЧМ сигналу от звукового генератора позволила эффективно очистить исходный сигнал от шумовой составляющей, что иллюстрируется рис. 6, б.

Заключение. На точность акустических измерений в импедансной трубе с потоком влияет целый ряд факторов: большой объем измерений и последующих вычислений; неравномерность частотной характеристик источника звука и как следствие влияние на конечный результат фоновое шума; турбулентный шум потока, действующий на измерительную систему как помеха, с уровнем достигающим и ли даже превышающим уровень полезного сигнала.

Снизить влияние первого фактора можно упрощением процедуры и сокращением объема промежуточных вычислений. Влияние фонового шума

можно уменьшить выравниваем спектра полезного сигнала с помощью эквалайзера. Устранить влияние турбулентного шума потока можно с помощью адаптивной фильтрации измерительных сигналов. Конечно, такая процедура требует многостадийной постобработки результатов измерений и сложна при ее практической реализации.

Список источников

- [1] Комкин А.И. Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей шума с требуемыми характеристиками. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2012, 411 с.
- [2] Матасова О.Ю., Купоросова И.С., Комкин А.И. Особенности расчета элементов глушителей шума с учетом газодинамического потока. *Акустика среды обитания. VII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 138–145.
- [3] Song B.H., Bolton J.S. A transfer matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, vol. 107 (3), pp. 1131–1152.
- [4] Denayer H., Tournadrey J., De Roeckz W., Desmetx W., Martinez-Lera P., Combined numerical and experimental study of a slit resonator under grazing flow. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2014, 17 p. <https://doi.org/10.2514/6.2014-2959>
- [5] Olivieria O., Bolton J.S. Measurement of transmission loss of materials using a standing wave tube. *Proceedings of INTER-NOISE 2019, Honolulu, USA, 2006*, 8 p.
- [6] Yudin G., Nadareyshvili A., Chertishchev A.N. Experimental method with increased accuracy for determining acoustic characteristics of exhaust system elements. *Proceedings of the 27-th International congress on sound and vibration. International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV)*, 2021, pp. 1252–1255.
- [7] ISO 10534-2:2023. Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance. 30 p. URL: <https://www.iso.org/standard/81294.html> (accessed March 12, 2026).
- [8] Бендат Д., Пирсол А. *Применение корреляционного и спектрального анализа.* Москва, Мир, 1983, 312 с.
- [9] Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы.* Москва, Высш. Школа, 1983, 536 с.
- [10] Уидроу Б., Стирз С. *Адаптивная обработка сигналов.* Москва, Радио и связь, 440 с.