

УДК 534.6:681.2

Измерение векторной интенсивности звука с использованием четырехмикрофонного интенсивметрического зонда в задачах акустики среды обитания

Сатарова Екатерина Владимировна^(*) satarova@zetlab.com

ООО «Электронные технологии и метрологические системы», Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматривается метод прямого измерения векторной интенсивности звука как энергетической характеристики акустического поля применительно к задачам акустики среды обитания. Интенсивность трактуется как средний поток акустической энергии, определяемый на основе корреляции звукового давления и скорости колебаний частиц среды. Показаны ограничения классического двухмикрофонного градиентного метода при исследовании сложных акустических полей с выраженной интерференционной структурой. Обосновано применение четырехмикрофонной конфигурации, обеспечивающей двумерное определение пространственного распределения градиента давления и восстановление вектора интенсивности в плоскости измерения. Описаны алгоритмы спектральной обработки сигналов, процедуры оценки когерентности и выделения активной составляющей интенсивности в частотных полосах. Показано, что предложенный подход повышает точность локализации источников шума и расширяет возможности акустического мониторинга в реальных условиях эксплуатации технических объектов и городской среды.

Ключевые слова: интенсивность звука, активная интенсивность, векторное акустическое поле, микрофонная решетка, локализация источников шума, спектральный анализ, акустический мониторинг.

Measurement of sound intensity vector using a four-microphone probe for environmental acoustics applications

Satarova Ekaterina Vladimirovna^(*) satarova@zetlab.com

Limited Liability Company "Electronic Technologies and Metrological Systems",
Moscow, Russia

Abstract. The paper discusses direct measurement of sound intensity as an energy-based characteristic of acoustic fields in environmental acoustics. Limitations of the classical two-microphone method are analyzed. A four-microphone probe configuration enabling two-dimensional pressure gradient estimation and reconstruction of the sound intensity vector is justified. Signal processing algorithms including spectral analysis, coherence estimation and active intensity extraction are described. The proposed approach improves noise source localization and enhances acoustic monitoring capabilities.

Keywords: sound intensity, acoustic energy flow, microphone array, spectral analysis, noise source localization

Введение. Контроль акустической обстановки в производственных помещениях и городской среде традиционно основан на измерении уровней звукового давления. Такой подход позволяет количественно оценить шумовое воздействие, однако не дает информации о направлении распространения звуковой энергии. В условиях наличия нескольких источников и значительного количества отражений измерение только амплитудных характеристик не позволяет корректно определить вклад отдельных источников в формирование акустического поля. Векторная интенсивность звука представляет собой плотность потока акустической энергии и позволяет непосредственно оценивать направление ее переноса. В международной практике метод измерения интенсивности применяется при определении звуковой мощности источников согласно стандарту ISO 9614-1 [1].

Методы и материалы. Мгновенная интенсивность звука определяется произведением звукового давления $p(t)$ и скорости колебаний частиц среды $u(t)$. Для стационарных процессов практическое значение имеет усредненная величина:

$$I = \langle p(t)u(t) \rangle. \quad (1)$$

Данное выражение отражает корреляционную природу интенсивности звука и характеризует средний поток акустической энергии через единичную площадку.

В частотной области активная интенсивность определяется как действительная часть взаимного спектра давления и скорости частиц:

$$I(f) = \text{Re}\{P(f)V^*(f)\}. \quad (2)$$

где $P(f)$ — комплексный спектр звукового давления, $V(f)$ — комплексный спектр скорости частиц, $*$ — операция комплексного сопряжения.

Связь скорости частиц среды с градиентом звукового давления в рамках линейной акустики определяется выражением:

$$u = -\frac{1}{j\omega\rho}\nabla p, \quad (3)$$

где ρ — плотность среды, ω — круговая частота, ∇p — пространственный градиент звукового давления.

Таким образом, измерение интенсивности сводится к регистрации звукового давления в пространственно разнесенных точках и вычислению пространственных производных давления на основе конечно-разностной аппроксимации.

Практические методы измерения интенсивности и требования к измерительным приборам регламентированы стандартом IEC 61043 [2].

Двухмикрофонный метод позволяет определить только одну компоненту градиента давления и требует последовательной переориентации зонда для получения пространственной картины поля. Для устранения данного ограничения применяется четырехмикрофонная конфигурация с размещением дат-

чиков в вершинах квадрата, обеспечивающая одновременное определение градиентов давления по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Сигналы микрофонов регистрируются синхронно и подвергаются спектральной обработке, включающей вычисление кросс-спектральных плотностей и оценку когерентности, что подробно рассматривается в современных исследованиях методов измерения интенсивности [3].



Рис. 1. Общий вид интенсивметрического зонда с четырехмикрофонной конфигурацией

Результаты. Применение четырех микрофонов позволяет восстановить двумерный вектор интенсивности без механической переориентации зонда, что повышает повторяемость измерений и снижает неопределенность результатов. Пространственная избыточность измерений повышает устойчивость метода к влиянию стоячих волн и отражений. Наличие четырех сигналов позволяет выполнять взаимную фазовую калибровку каналов и контролировать достоверность результатов на основе функции когерентности. Спектральная обработка обеспечивает анализ интенсивности в октавных и третьоктавных полосах частот и позволяет выявлять диапазоны, в которых наблюдается основной перенос акустической энергии.

Современные работы подтверждают эффективность векторного анализа акустических полей для задач идентификации источников шума [4].

Обсуждение результатов. Четырехмикрофонный метод демонстрирует существенные преимущества при исследовании сложных акустических полей, характерных для производственных помещений и городской среды. Векторная интенсивность позволяет выделять вклад отдельных источников, определять направления утечки звука через конструкции и выявлять зоны наибольшего энергетического воздействия. Использование спектрального

анализа повышает информативность измерений и расширяет возможности акустического мониторинга, включая задачи оценки звукоизоляции конструкций по стандарту ISO 15186-3 [5].

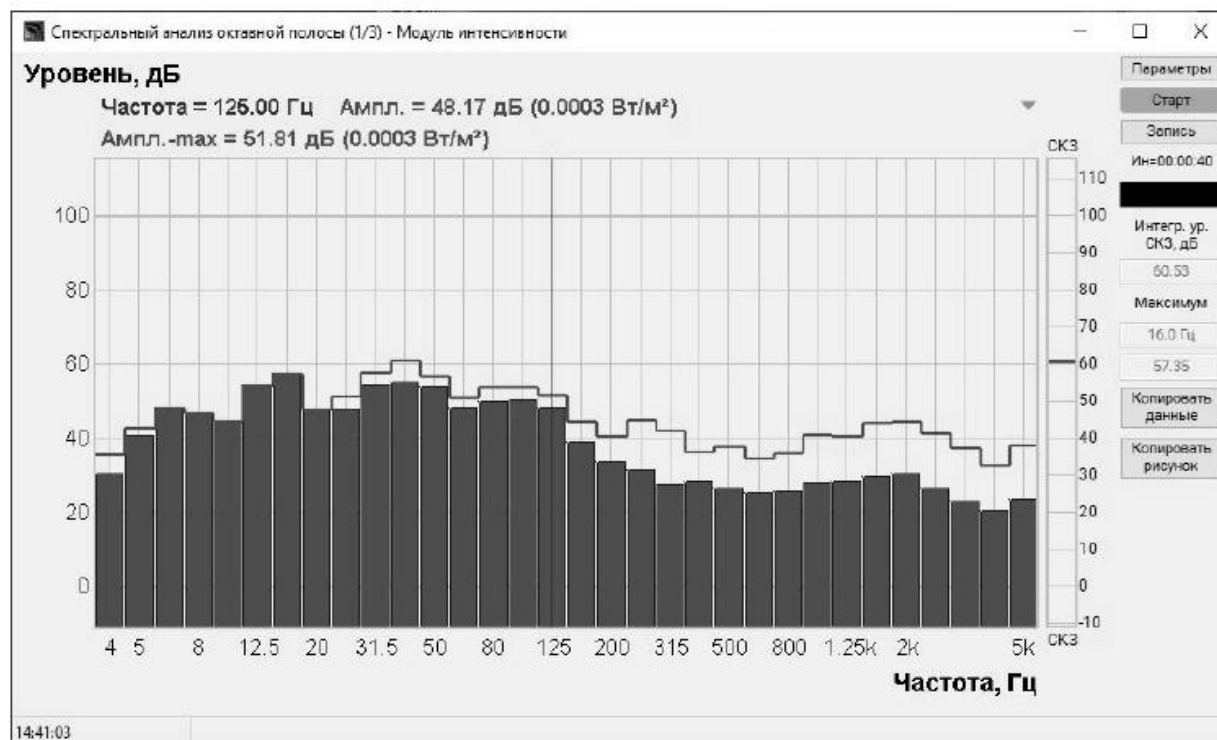


Рис. 2. Уровень интенсивности в 1/3 октавной полосе частот

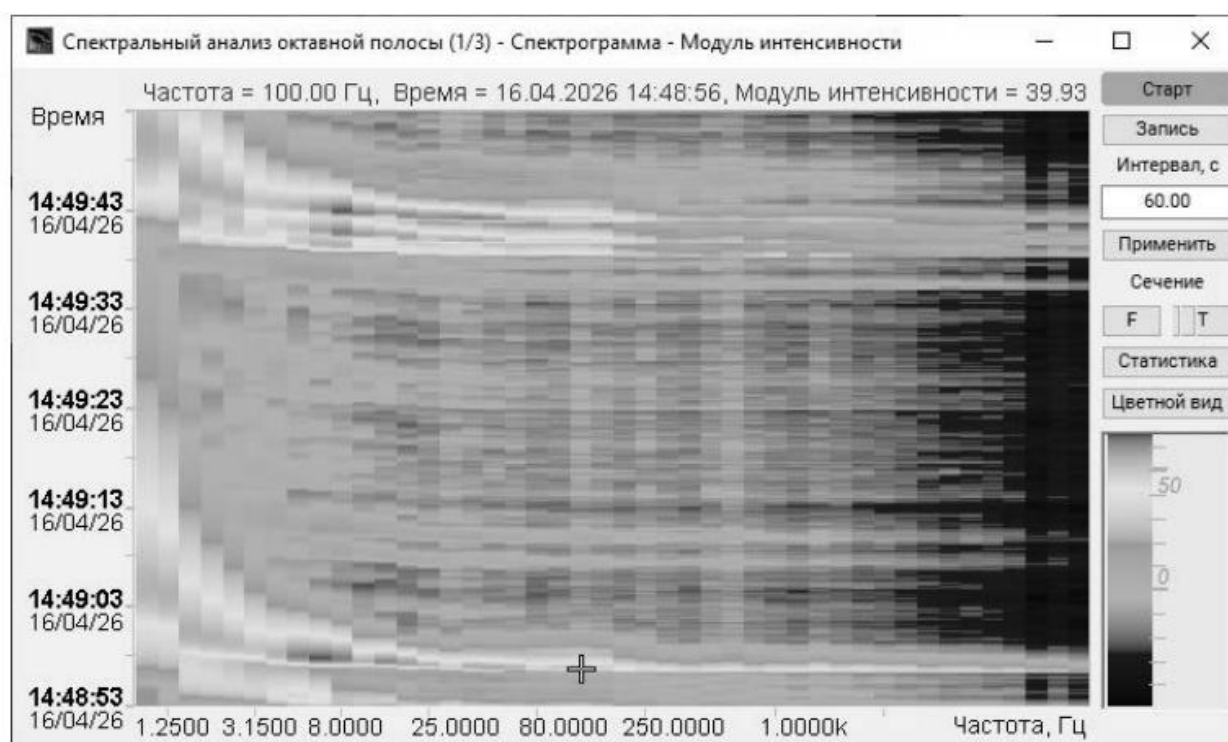


Рис. 3. Спектрограмма модуля интенсивности для четырехмикрофонного метода измерений

Заключение. Применение четырехмикрофонного интенсивметрического зонда обеспечивает более полное описание акустического поля по сравнению с традиционными методами измерения звукового давления. Метод позволяет определять направление переноса энергии, повышает точность локализации источников шума и расширяет возможности акустического мониторинга в задачах экологической и промышленной акустики.

Список источников

- [1] ГОСТ 30457–97 (ИСО 9614-1-93). *Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Часть 1. Измерения в дискретных точках*. Москва, Стандартинформ, 1997.
- [2] IEC 61043:1993. Electroacoustics — Instruments for the measurement of sound intensity — Measurements with pairs of pressure sensing microphones. International Electrotechnical Commission, 1993.
- [3] Крокер М.Дж., Арена Дж.П. Основы прямых измерений интенсивности звука и их практические применения. *Акустический журнал*, 2003, т. 9, № 2, с. 199–214.
- [4] Murovec J., Čurović L., Železnik A., Prezelj J. Automated identification and assessment of environmental noise sources. *Heliyon*, 2023, vol. 9, iss. 2, art. no. e12846. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12846>
- [5] ISO 15186-3:2002. Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity — Part 3: Laboratory measurements at low frequencies. International Organization for Standardization, 2002.