

ДВУХКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОЛНОСПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ

Булкин Владислав Венедиктович

доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»¹.

E-mail: vvbulkin@mail.ru.

Терсин Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент, инженер АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов»².

E-mail: vvtersin@yandex.ru.

¹Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

²Адрес: 602267, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, Карачаровское шоссе, д. 2.

Аннотация: Представлены результаты разработки и экспериментальной проверки двухканальной системы обработки данных контроля акустических шумов в реальном времени. Система реализована с использованием графического языка программирования G среды LabView. Длина измеряемой реализации определяется отношением размера выборки к частоте дискретизации, а количество измерений каждого звукового сигнала – отношением времени анализа к длине измеряемой реализации. Измеренная реализация звукового сигнала в виде 40000 16-ти разрядных двоичных чисел обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье. В результате обработки получается дискретный спектр звукового сигнала в диапазоне от 0 до 20 кГц с шагом 1 Гц. Оценка среднего значения осуществляется на каждом шаге измерений. Достоинством системы является получение разностного спектра контролируемых сигналов. Дополнительно осуществляется формирование базы данных измерений на средневзвешенных частотах третьоктавных диапазонов. Проверка качества функционирования системы осуществлялась с использованием микрофонных капсулей типов MDN-318, wт61 и т.п., широко применяемых в компьютерной аудиотехнике. По результатам предварительного отбора были отобраны три пары капсулей со сходными амплитудно-частотными характеристиками. Представлены результаты измерений. Сделан вывод о возможности применения данной системы при качественной оценке изменения уровня шума по трассе распространения, а также как дополнения к результатам измерений, выполненных по стандартным методикам.

Ключевые слова: акустические сигналы, спектр акустического сигнала, язык программирования среды LabView, разностный спектр контролируемых сигналов, быстрое преобразование Фурье.

1. Введение

Проблема мониторинга территорий городов и населённых пунктов в последние годы становится всё более актуальной. Состояние среды обитания больших и, особенно, крупных городов определяется совокупностью факторов климатического, техногенного и планировочного характера. Известно [1], что в крупных городах-агломерациях состояние приземного слоя атмосферы может существенно различаться от района к району, что определяется особенностями планировки района, активностью транспортных потоков, архитектурными особенностями жилых и технических зданий, насыщенностью района промышленными

предприятиями, характером подстилающей поверхности и т.п.

Среди разнообразных факторов, влияющих на жизнь человека в такой среде, не последнее место занимает акустический шум, который является третьим по важности среди экологических опасностей. Принято считать, что в последние годы уровень шума в техносфере увеличивается не менее, чем на 0,5 дБ в год. Таким образом, задача изучения и анализа акустического шума техногенного происхождения становится актуальной [2].

Применяемые в настоящее время приборы для измерения уровней звукового давления акустических сигналов – шумомеры – относят-

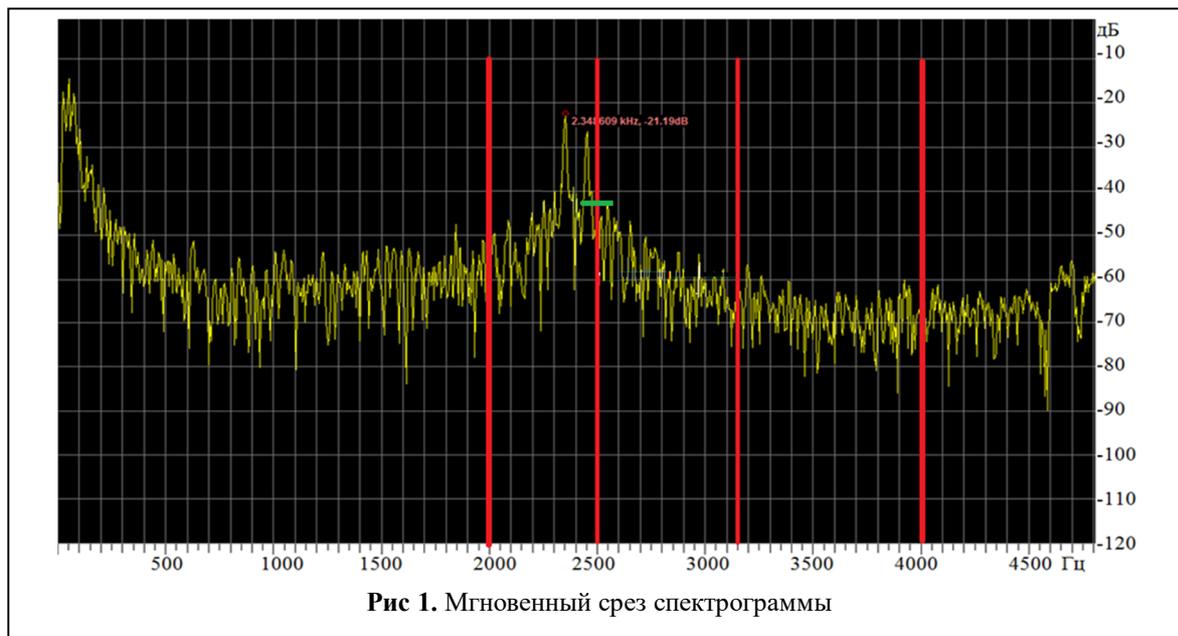


Рис 1. Мгновенный срез спектрограммы

ся к различным классам, имеют разные возможности [3]. В классическом варианте шумомер представляет собой измерительную систему, в которой функции датчика выполняет микрофон, имеется усилитель, набор полосовых фильтров, а результат отображается либо с помощью стрелочного прибора, либо цифрового табло. Оценка осуществляется либо в среднем по всему диапазону, либо на среднегеометрических частотах октавных диапазонов. Более сложные системы обеспечивают проведение одномоментных измерений в октавных (долеоктавных) диапазонах, позволяя сохранять результаты измерений, осуществлять встроенную и последующую внешнюю компьютерную обработку полученной информации. Размеры диапазонов и соответствующие этим диапазонам средневзвешенные частоты определяются рядом R10 по [3].

Известны более сложные системы, представляющие собой измерительные комплексы, включающие мощные звукоусилительные станции, совокупность радиометеорологических приборов, серверные устройства и программы обработки информации [4]. Системы являются стационарными и не могут применяться для мониторинга шумов техногенного характера, характерных для городской среды. А именно в городской среде актуальными яв-

ляются задачи, требующие оценить и сопоставить недетерминированные акустические сигналы в удалённых друг от друга зонах, что предусматривает наличие как минимум двухканальной системы измерений. Такие системы могут обеспечить оценку ослабления уровня шума при распространении от источника до рабочей точки в случае неповторяющихся импульсных шумов, при анализе распространения акустических сигналов вглубь жилой зоны, оценке эффективности шумозащитных средств и т.д.

Следует, также, отметить, что при проведении измерений с использованием октавных или долеоктавных фильтров возможна потеря части полезной информации о характере широкополосного сигнала. Уровень звукового давления в этом случае фиксируется на конкретных среднегеометрических частотах, а наличие полосовых фильтров «отсекает» все остальные сигналы. В [5] показано, что при таких измерениях часть значимой информации о характере широкополосных сигналов может быть потеряна, что не позволит дать правильную оценку характера распространения шума.

На рис. 1 показан мгновенный срез спектрограммы измерений, проведённых на улицах города Муром. Вертикальными линиями красного цвета показаны некоторые значения

среднегеометрических частот третьоктавных диапазонов (2000, 2500, 3150 и 4000 Гц), кроме того, дополнительно выделены значения частот для случая октавных диапазонов (2000 и 4000 Гц). Метка зелёного цвета на вертикальной линии, относящейся к частоте 2500 Гц, показывает усреднённое значение звукового давления для данной частоты.

При этом на спектрограмме можно видеть два амплитудных всплеска на частотах 2340 и 2450 Гц, уровень которых превышает показанное среднее значение, соответственно, на 21,2 и 16,2 дБ. Очевидно, что в данном случае амплитудный всплеск на частоте 2450 Гц в значительной степени учитывается при определении среднего значения. Степень учёта второго всплеска (2340 Гц) уже определяется характеристикой полосового фильтра, применяемого в шумомере. Очевидно, также, что в случае проведения измерений в режиме октавных диапазонов оба эти всплеска не будут учтены при определении среднего значения на частотах 2000 и 4000 Гц.

Ещё более значимой потерей информации об импульсных случайных акустических шумах может быть при анализе характера распространения таких шумов вглубь жилой территории, выборе средств защиты от шума, когда значение может иметь не средний уровень, а именно импульсные недетерминированные всплески амплитуды шумового сигнала.

Таким образом, актуальной становится задача создания простых многоканальных средств анализа характеристик разнообразных шумовых сигналов на базе известных вычислительных программ с использованием общедоступных периферийных устройств и систем, обеспечивающих анализ в реальном времени и в полноспектральном режиме.

2. Описание системы

Разработанная программа одновременного анализа спектров 2-х звуковых сигналов использует графический язык объектно-ориентированного программирования GOOP среды LabView [6]. Выбор среды LabView обу-

словлен удобством написания программ и её широкими возможностями по созданию объектно-ориентированных многопоточных приложений для работы с устройствами в реальном времени [6, 7]. Входными данными являются: время анализа Time (sec), размер выборки # of samples и частота дискретизации sampling freq (Hz). Длина измеряемой реализации определяется отношением размера выборки к частоте дискретизации и при выбранных по умолчанию одинаковых значениях (40000) равна 1 сек, а количество измерений каждого звукового сигнала – отношением времени анализа к длине измеряемой реализации. Константами задаются число каналов подключения каждого из микрофонов (в данном случае их два), количество бит – 16 – оцифрованного звукового сигнала и номера каналов подключения микрофонов к USB портам ПЭВМ. Номера каналов подключения определяются с помощью утилиты Acquire Sound среды LabView до запуска программы.

Программа двухканального анализатора спектров звуковых сигналов на языке GOOP среды LabView представлена на рис. 2.

Измерения сигнала с выхода каждого микрофона производятся отдельным объектом в отдельном потоке с требуемым числом повторений. Каждый объект создаётся собственным конструктором Sound Input Configure, считывает текущую реализацию из 40000 отсчётов с выхода микрофона с помощью метода Sound Input Read и удаляется из памяти после завершения последовательности измерений с помощью деструктора Sound Input Clear. Возможность последовательного считывания реализаций задаётся каждому конструктору с помощью опции Continuous Samples. Считывание отдельных реализаций с выходов обоих микрофонов происходит параллельно и занимает ту же 1 сек, что и для одного микрофона, так как процессор освобождается в паузах между отдельными измерениями на время, обратное частоте дискретизации.

Измеренная реализация звукового сигнала в виде 40000 16-ти разрядных двоичных чисел

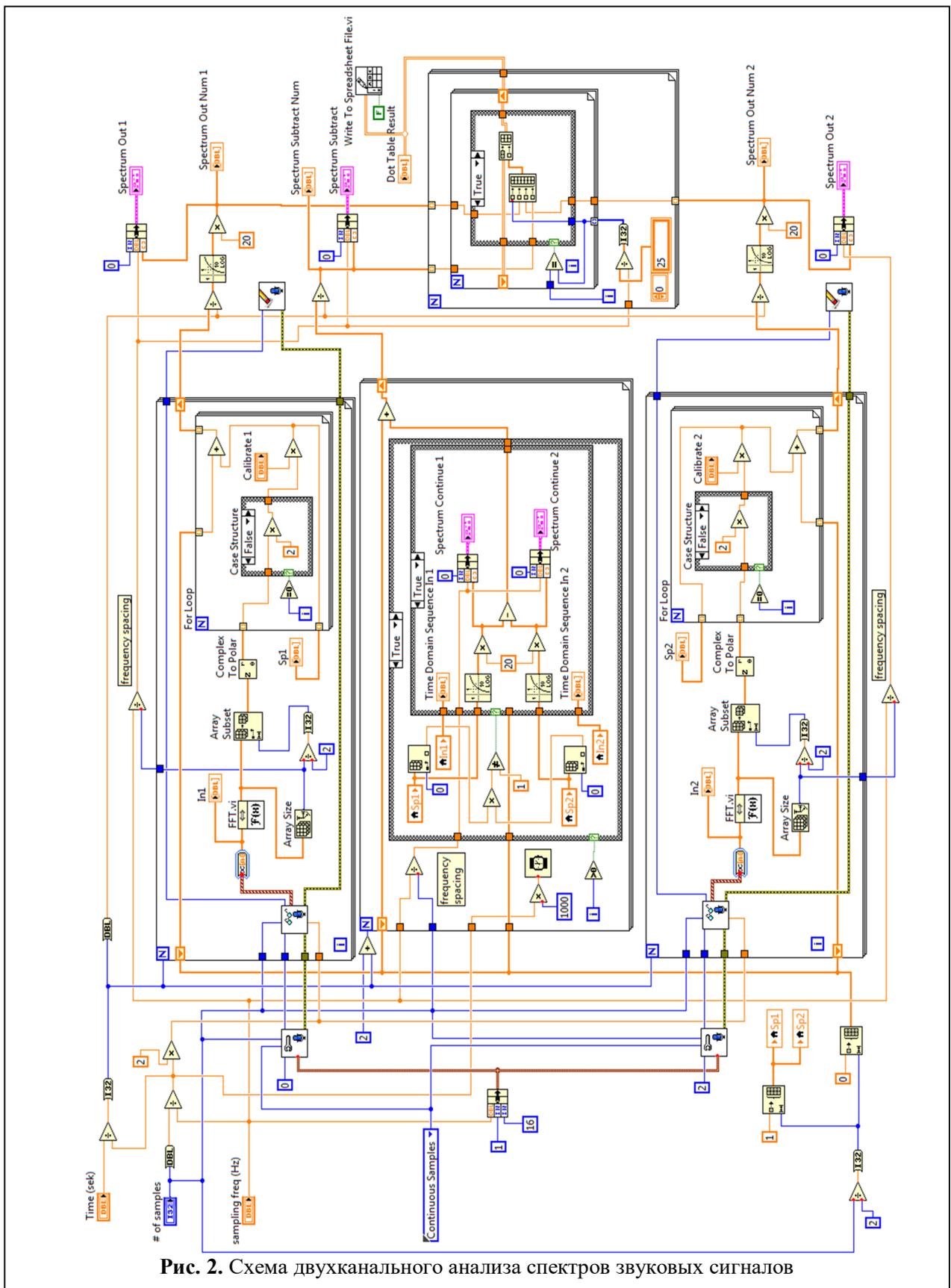


Рис. 2. Схема двухканального анализа спектров звуковых сигналов

обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT). Из полученного комплексного двухстороннего спектра выделяется первая половина, отбрасывается мнимая часть каждой спектральной линии, а оставшаяся вещественная часть каждой спектральной линии, кроме нулевой, умножается на 2. В результате получается дискретный спектр звукового сигнала в диапазоне от 0 до 20 КГц с шагом 1 Гц.

По завершению каждого из 2-х потоков (циклов) измерений соответствующий, усреднённый за заданное время анализа спектр звукового сигнала традиционно должен вычисляться по известному принципу:

$$f_{cp}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

где x_i – полученное текущее значение спектра; n – число реализаций.

Такой подход является традиционным и классическим. Однако он не позволяет отслеживать изменения спектра сигнала в формате реального времени, что обеспечило бы возможность визуального наблюдения спектра быстро меняющихся широкополосных сигналов с непостоянным исходным спектром.

В данной системе был выбран иной вариант получения результирующего спектра [8]. Суть принятого подхода заключается в вычислении текущего среднего на каждой итерации цикла усреднения по рекуррентному соотношению вида

$$f_{cp} = \frac{(n-1)f_{cp} + x_n}{n}, \quad (2)$$

где начальное значение f_{cp} при $n=0$ может быть любым, так как умножается на ноль.

Для получения требуемого соотношения можно провести простое преобразование соотношения (1), где добавлено следующее измерение x_{n+1} :

$$f_{cp}(n) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i + x_n}{n}. \quad (3)$$

Снова используя формулу (1), получаем выражение для суммы, входящей в числитель правой части (3):

$$\sum_{i=1}^n x_i = n f_{cp}(n), \quad (4)$$

которое подставляем в (3). Тогда результирующее среднее значения на каждом шаге получается использованием соотношения

$$f_{cp}(n) = \frac{(n-1) \times f_{cp}(n-1) + x_n}{n}. \quad (5)$$

Этот вариант обеспечивает возможность наблюдения за изменениями среднего спектра в реальном времени. В этом случае нет необходимости задавать заранее время наблюдения, так как появляется возможность прекратить измерения при достижении необходимой точности результатов, в случае понимания сути контролируемого процесса распространения сигнала и т.п.

Полученные значения отображаются на экране в виде непрерывных спектров объектами Spectrum Out 1 или Spectrum Out 2 и запоминаются в одномерных массивах Spectrum Out Num 1 или Spectrum Out Num 2.

Средний разностный спектр вычисляется в отдельном, третьем потоке с заданным числом повторений. Информация о текущих спектрах, вычисленных в первых 2-х потоках по реализации длительностью 1 сек, поступает в этот поток через локальные переменные Sp1 и Sp2. Одновременно через локальные переменные In1 и In2 в него поступают и отображаются на экране объектами Time Domain Sequence In 1 и Time Domain Sequence In 2 дискретные реализации исходных временных сигналов с выходов микрофонов в реальном времени. Полученные текущие спектры (в дБ) отображаются на экране объектами Spectrum Continue 1 и Spectrum Continue 2, а также вычитаются на каждой дискретной частоте. Полученная разность логарифмов спектров суммируется с предыдущей текущей разностью, изначально установленной в «0». По завершению третьего потока вычисляется средняя разность логарифмов спектров, которая также отображается на экране объектом Spectrum Subtract в виде отдельного графика и запоминается в одномерном массиве Spectrum Subtract Num.

Количество повторений в третьем потоке на два больше, чем в первых двух потоках, причём первая итерация третьего потока используется только для задержки на время, равное 1 сек, которое затрачивается на считывание текущих реализаций с выходов микрофонов. Задержка осуществляется утилитой `Wait (ms)`, важной особенностью которой является то, что центральный процессор освобождается на оставшееся время до окончания задержки после выполнения необходимых вычислений. Первая (нулевая) итерация третьего потока пропускается по номеру. Вторая итерация третьего цикла используется для компенсации времени, затрачиваемого на вычисление спектров в первых двух потоках. Условием пропуска второй итерации является отсутствие отличия от «0» значений локальных переменных $Sp1$ и $Sp2$, соответствующих текущим спектрам в каждом из двух первых потоков. Нулевые значения специально присваиваются этим переменным при запуске программы.

После завершения потоков из трёх сформированных с их помощью одномерных массивов, содержащих два средних спектра акустических сигналов, а также среднюю разность логарифмических значений спектров этих же сигналов, с помощью двух вложенных циклов формируется двумерный массив из 31-ой строки. Такой размер определяется выбором в данном случае третьоктавного режима фиксации результатов измерений, который может быть в случае необходимости уменьшен до 11 строк при выборе октавного режима. Каждая строка содержит четыре элемента: значение выбранной частоты (Гц), средние значения спектров 1-го и 2-го акустических сигналов (дБ), а также среднюю разность логарифмических значений спектров этих же сигналов (дБ). Сформированный двумерный массив сохраняется в файле в виде электронной таблицы.

Для калибровки системы измерений на фиксированной частоте с помощью шумомера или внешнего калибратора следует добавить на вход системы дополнительную переменную, на которую необходимо умножить текущие

спектры $Sp1$ и $Sp2$. В результате полученные данные будут соответствовать шкале шумомера или калибратора.

3. Экспериментальная проверка системы

Для проверки системы использовались простейшие микрофоны, состоящие из микрофонных капсулей общего применения типов MDN-318, `wm61` и т.п., широко применяемых в компьютерной аудиотехнике, и специально разработанных держателей капсулей. Акустический сигнал – шумоподобный, типа «белый шум», с достаточно равномерным распределением в пределах диапазона 20-20000 Гц, также сформированный с использованием среды LabView. Время оценки – до 60 сек.

Предварительно были проведены измерения с использованием нескольких десятков капсулей с целью выявления сходных картин амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Проверка проводилась с использованием лабораторной акустической камеры, разработанной для применения в учебном процессе и научно-исследовательской работе студентов, описание которой дано в [9], имеющей внешние размеры порядка 2 м, 1 м и 0,8 м при вертикальной ориентации. С целью выравнивания характеристики камеры и снижения уровня эха внутренняя поверхность покрыта звукопоглощающим материалом - акустическим поролоном с использованием т.н. бас-ловушек для поглощения низкочастотных акустических сигналов.

Широкополосная акустическая система встроена в нижнюю часть конструкции камеры. Направление излучения акустического сигнала – снизу-вверх.

При проведении измерений микрофоны случайными парами располагались в верхней части акустической камеры. Для фиксации капсулей использовались два держателя. Затем были отобраны пары, имеющие сходные спектры сигнала.

Результаты сопоставления АЧХ некоторых капсулей представлены на рис. 3, 4 и 5. Во всех случаях первый и второй спектры – это

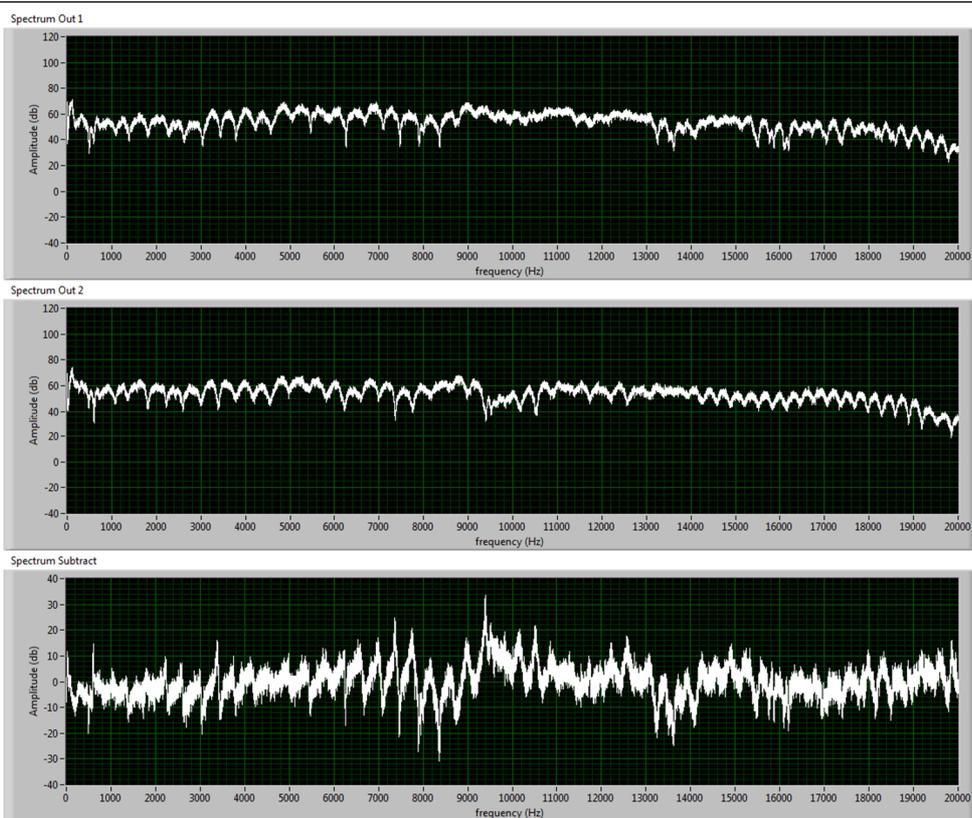


Рис. 3. Результаты контроля спектра сигналов с использованием капсулей № 13 и № 14

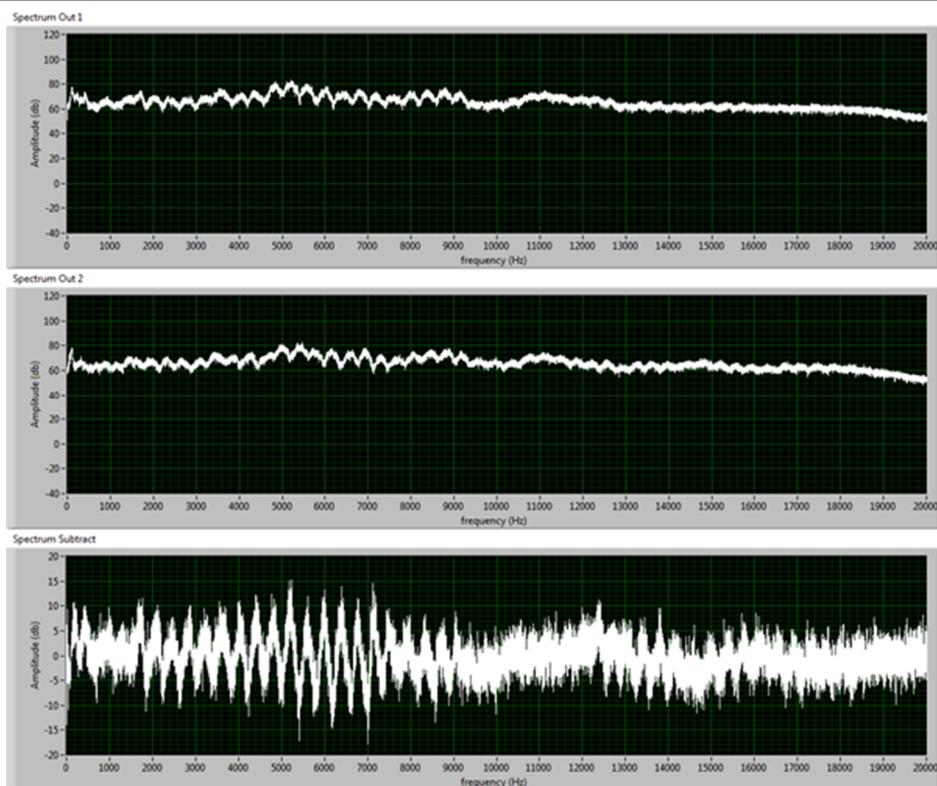


Рис. 4. Результаты контроля спектра сигналов с использованием капсулей № 27 и № 28

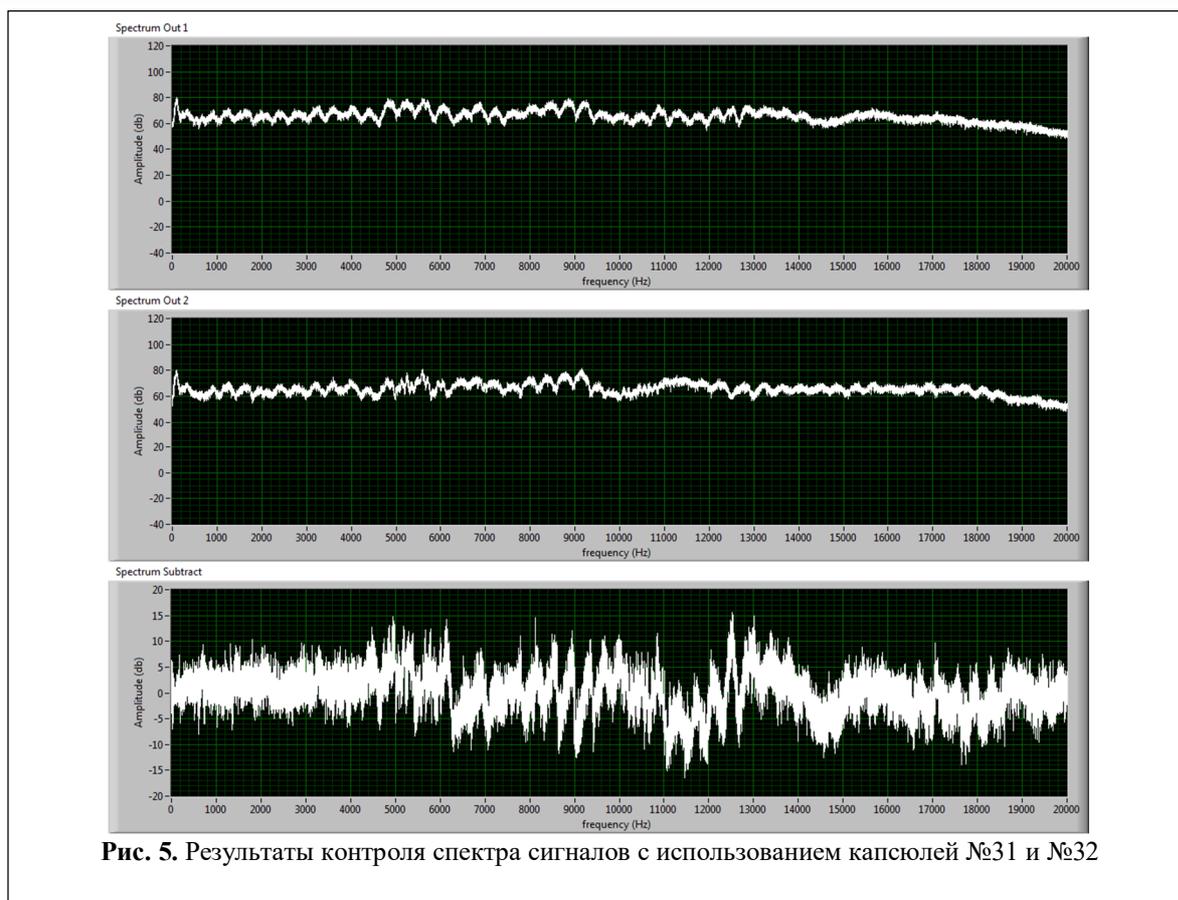


Рис. 5. Результаты контроля спектра сигналов с использованием капсулей №31 и №32

спектры первого (в данной паре) и второго капсуля, третий – разностный спектр (с вычитанием второго из первого [10]).

Как следует из сопоставления спектров сигналов, не приходится говорить о полном соответствии АЧХ микрофонов, поскольку характер изменения средней линии во всех случаях различен. Анализ отклонений АЧХ разности спектров показывает, что во всех случаях имеет место различие, достигающее до 30 дБ (капсули № 13 и № 14), что не позволяет говорить о применении таких капсулей для построения прецизионной измерительной системы.

Вместе с тем, следует учитывать и то, что действующими методиками измерений акустического шума предусматривается анализ сигналов на средневзвешенных частотах октавных или долеоктавных диапазонов [3]. Поскольку, как уже отмечалось, разработанная система обеспечивает сохранение данных в

виде базы, построенной на фиксировании уровня звукового давления (УЗД) именно на средневзвешенных частотах с возможностью выбора диапазонов, воспользуемся данными фиксации этих измерений и представим в виде графиков разностные изменения УЗД в третьоктавных и октавных диапазонах (см. рис. 6, 7 и 8).

Из анализа этих АЧХ видно, что в первом случае (капсули № 13 и № 14) различия в АЧХ доходят до ± 10 дБ, в то время как во втором случае (капсули № 27 и № 28) речь идет об отклонениях $+7 \div -5$ дБ в третьоктавном и $+6 \div -5$ дБ в октавном диапазонах.

Что касается третьего случая (капсули № 31 и № 32), то отклонения в третьоктавном диапазоне составляют $+6,5 \div -6$ дБ, что в целом совпадает со вторым случаем, а вот в октавном диапазоне отклонения на уровне $+3 \div -0,5$ дБ, что существенно меньше остальных случаев.

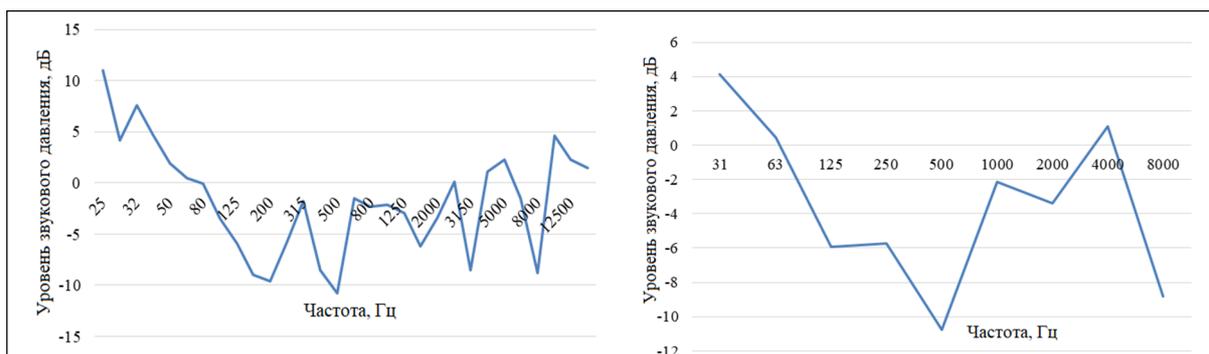


Рис. 6. Результаты контроля спектра сигналов с использованием капсулей № 13 и № 14 в третьоктавных и октавных диапазонах

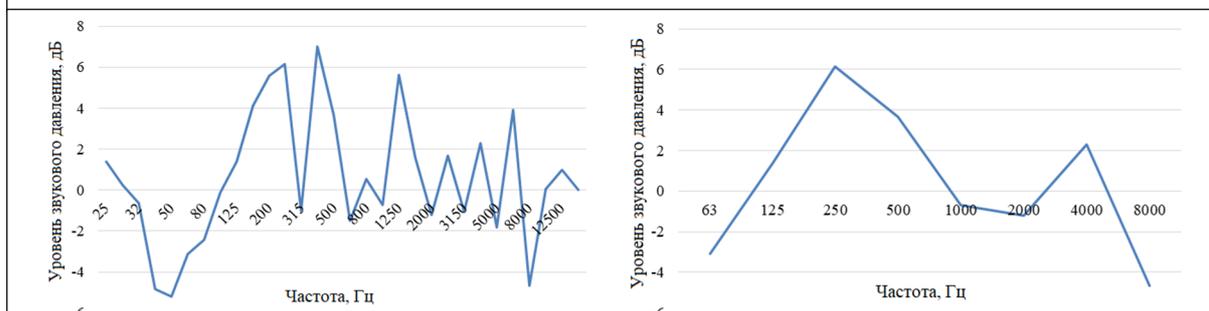


Рис. 7. Результаты контроля спектра сигналов с использованием капсулей № 27 и № 28 в третьоктавных и октавных диапазонах

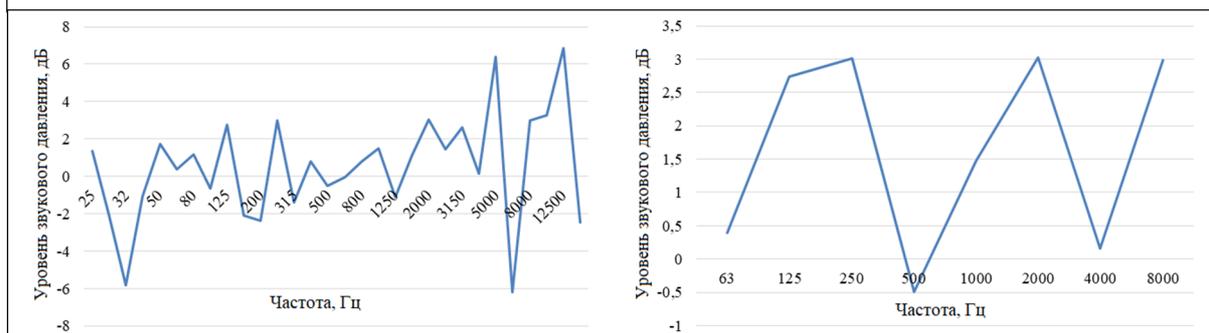


Рис. 8. Результаты контроля спектра сигналов с использованием капсулей № 31 и № 32 в третьоктавных и октавных диапазонах

Следует отметить, что в третьоктавных диапазонах средневзвешенные частоты учитывались от 25 до 16000 Гц, а в октавных - от 63 до 8000 Гц.

Последний результат в целом соответствует классу «Тип 2» в принятой в США в системе ANSI (Американский национальный институт стандартов) классификации измерительных приборов для контроля уровня шума [ANSI/ASA/IEC 61672-2-2019. International standard. Electroacoustics – Sound level meters]. Для приборов этого типа требуемая точность

измерений порядка ± 2 дБ. Применяются такие шумомеры для измерений общего назначения: шум улицы, ночные помехи, гул машин, кухонные приборы и т.д.

Вывод

Анализ результатов проведённых исследований показывает, что применение разработанной измерительной системы в совокупности с простейшими микрофонными капсулями широкого применения для проведения прецизионных измерений мониторингового характера

не представляется возможным в силу слишком больших различий в их индивидуальных АЧХ.

Однако их применение в системах качественной оценки изменений уровня звукового давления, там, где измерения могут проводиться с некоторой погрешностью, вполне возможно. Например, применение такой системы с рассмотренной парой капсулей вполне возможно в случаях оценочных измерений при анализе изменения акустических сигналов по трассе распространения (на небольших расстояниях), оценке эффективности шумозащитных средств общего применения, в других случаях. Кроме того, возможно применение этой системы как дополнения к измерениям, выполненным по стандартным методикам.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00909.

Литература

1. Булкин В.В. Акустическое загрязнение промышленных городов (на примере г. Муром) // Экологические системы и приборы. 2016. № 1. С. 18–21.
2. Щёлокова (Хромулина) Т.Д. Актуальность исследования шумового загрязнения в городах // Символ науки. 2015. № 11. С. 72–74.

Поступила 22 апреля 2020 г.

3. ГОСТ 17187-2010. Шумомеры. Часть 1. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2012. 31 с.

4. Красненко Н.П., Клименко А.Н., Раков А.С. Аппаратно-программный комплекс акустического мониторинга метеорологической обстановки на ограниченной территории // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2014. № 6. С. 146307-1–146307-6.

5. Булкин В.В., Кириллов И.Н. Анализ возможного распространения акустического загрязнения в жилых зонах // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2014. Вып.16. С. 35–40

6. Суранов А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007. 536 с.

7. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. М.: ДМК Пресс, 2011. 208 с.

8. Кушниренко А.Г., Лебедев Г.В. Программирование для математиков: учебное пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 384 с.

9. Зайцев А.В., Пузырёв В.И., Шеронова Т.С., Булкин В.В. Модернизация лабораторной акустической камеры // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2018. Вып. 20. С. 14–20.

10. Калининченко М.В., Хромулина Т.Д., Булкин В.В. Особенности обработки информации при акустических измерениях в случае несовпадения амплитудно-частотных характеристик источников шума // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2019. Вып.21. С. 39–42.

English

TWO-CHANNEL FULL-SPECTRUM ACOUSTIC NOISE PROCESSING SYSTEM

Vladislav Venediktovich Bulkin – Doctor of Engineering Sciences, Professor of Department of Technosphere Safety, Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹.

E-mail: vbulkin@mail.ru.

Vladimir Vladimirovich Tersin – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Engineer, JSC “Murom Plant of Radio Measuring Instruments”².

E-mail: vvtersin@yandex.ru.

¹Address: 602254, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya street, 23.

²Address: 602267, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Karacharovskoe highway, 2.

Abstract: The paper presents the results of development and experimental testing of a two-channel acoustic noise control data processing system that provides real-time monitoring of broadband nondeterministic acoustic noise. The system is designed to monitor the acoustic noise situation in an urban environment and assess the nature of acoustic signal propagation in residential areas. The system is implemented using the graphical programming language G of the LabView environment. Length measurable realization is determined by the ratio of sample size to the sample rate, and number of measurements for each audio signal with respect to the time of the analysis to the length measured implementation. The measured implementation of

the audio signal as 40,000 16-bit binary numbers is processed using a fast Fourier transform. The processing results in a discrete spectrum of the audio signal in the range from 0 to 20 kHz with a step of 1 Hz. The average value is evaluated at each measurement step. The advantage of the system is to obtain a difference spectrum of controlled signals in real time. Additionally, a database of measurements on weighted average frequencies of third-octave ranges is formed. Quality control of the system was performed using microphone caps of the MDN-318, wm61, etc. types, widely used in computer audio engineering. Previously, the analysis of the amplitude-frequency characteristics (AFC) of several dozen caps was performed, followed by the formation of pairs with similar AFC. The analysis of the frequency response of the caps and the verification of the system were carried out using a program for generating a broadband signal of the "white noise" type and a laboratory acoustic muffled camera. The results obtained using three pairs of caps are presented. It is concluded that this system can be used for qualitative assessment of changes in the noise level along the propagation route, as well as as a Supplement to the results of measurements performed using standard methods.

Keywords: acoustic signals, acoustic signal spectrum, LabView programming language, difference spectrum of controlled signals, fast Fourier transform.

References

1. *Bulkin V.V.* Akustoshumovoe pollution of industrial cities (on the example of Murom). *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2016. No. 1. Pp. 18–21.
2. *Shchelokova (Khromulina) T.D.* the Relevance of noise pollution in cities. *Simvol nauki*. 2015. No. 11. Pp. 72–74.
3. GOST 17187-2010. Sound level meter. Part 1. Technical requirements. Moscow: Standartinform, 2012. 31 p.
4. *Krasnenko N.P., Klimenko A.N., Rakov A.S.* Hardware and software complex for acoustic monitoring of meteorological conditions on a limited territory. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta*. 2014. No. 6. Pp. 146307-1–146307-6.
5. *Bulkin V.V., Kirillov I.N.* Analysis of the possible spread of acoustic noise pollution in residential areas. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii*. 2014. Vol. 16. Pp. 35–40
6. *Suranov A.Ya.* LabVIEW 8.20: Handbook of functions. Moscow: DMK Press, 2007. 536 p.
7. *Magda Yu.S.* LabVIEW: practical course for engineers and developers. Moscow: DMK Press, 2011. 208 p.
8. *Kushnirenko A.G., Lebedev G.V.* Programming for mathematicians: a textbook for universities. Moscow: Nauka, 1988. 384 p.
9. *Zaitsev A.V., Puzyrev V.I., Sheronova T.S., Bulkin V.V.* Modernization of the laboratory acoustic chamber. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii*. 2018. Vol. 20. Pp. 14–20.
10. *Kalinichenko M.V., Khromulina T.D., Bulkin V.V.* Features of information processing in acoustic measurements in the case of mismatch of amplitude-frequency characteristics of noise sources. *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii*. 2019. Vol. 21. Pp. 39–42.