На правах рукописи

Чан Вьет Тьяу

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ В АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (отрасль: промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Гончаров Валерий Иванович**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор **Карташов Владимир Яковлевич**
	кандидат технических наук, доцент **Шелестов Александр Андреевич**
Ведущая организация:	**Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа**

Защита состоится 22 декабря 2011 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при ФГБОУ ВПО Национальном исследовательским Томском политехническом университете по адресу: г. Томск, ул. Советская, 84/3, Институт кибернетики ТПУ, ауд.214.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «__» ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 212.269.06
кандидат технических наук, доцент Сонькин М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Задача обнаружения утечек в трубопроводных системах водо- и теплоснабжения, системах транспортировки нефти, газа и других продуктов всегда была и остается до настоящего времени актуальной и сложной. По официальной информации Минэнерго РФ в России в 2000-м году суммарная протяженность только тепловых сетей в двухтрубном исчислении составляла около 183 300 км, средний процент износа оценивался в 60-70%. Прямые потери в изношенных трубопроводах тепла доходили до 15%. Потери в системах водопроводов составляют в отдельных регионах до 40% (от 25 млрд. куб м, поданных в сеть). Потери обусловлены высоким уровнем изношенности трубопроводов, часть которых необходимо заменить, а остальные – обследовать и устранить имеющиеся неисправности. Утечки из систем водопроводов, кроме прямых потерь, приводят к множественным другим негативным последствиям: отключению подачи тепла или воды населению и предприятиям, разрушению дорожного полотна и зданий, размораживанию трубопроводов и т.д. Своевременная диагностика состояния трубопроводов позволяет снизить затраты на ремонтные и восстановительные работы, а также избежать более серьёзных последствий. В связи с этим работы по совершенствованию средств обнаружения и локализации утечек считается важной и актуальной.

Неблагополучное состояние трубопроводных систем городов и населенных пунктов делает задачу совершенствования средств обнаружения и локализации утечек актуальной. При этом в первую очередь речь идет об объективных, инструментальных средствах контроля трубопроводов, позволяющих оперативно и с приемлемой точностью обнаруживать возникающие утечки и определять их местоположение.

Существует множество методов поиска утечек, каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Для решения проблемы в трубопроводных сетях жилищно-коммунального хозяйства населенных пунктов распространены два основных метода: акустический и корреляционно-акустический. Первый из них основан на последовательном прослушивании трубопровода и выявлении места повышенной интенсивности акустического сигнала. Ограниченность метода и приборов на его основе связана с низкой чувствительностью, которая обусловлена трудностями выделения сигнала на фоне многочисленных промышленных, уличных и иных шумов. Корреляционный метод базируется на информации, получаемой с двух разнесенных по трубопроводу датчиков, построении взаимной корреляционной функции и вычислении по ней координаты утечки. Он позволяет получать более точные результаты, однако на фоне сильных шумов широкого частотного спектра многие трудности задачи сохраняются. В рамках диссертационной работы рассматривается способ корреляционного анализа сигналов, позволяющий в определенной степени улучшить результаты за счет более полного учета частотного спектра акустических сигналов.

Цель диссертационной работы определена как развитие корреляционного метода анализа на основе учета частотных свойств сигналов и использование его для создания аппаратно-программных средств обнаружения утечек в трубопроводных системах. Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработка способа учета частотных свойств сигналов при корреляционном анализе.
2. Создание графических средств для наглядного и оперативного отображения результатов частотно-временного корреляционного анализа сигналов.
3. Разработка алгоритмов, программ и аппаратных средств для создания прибора, позволяющего повысить точность обнаружения и локализации утечек трубопроводов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы обработки информации, в частности, быстрое преобразование Фурье, численный анализ экспериментальных данных, математическое моделирование с использованием инструментальных средств автоматизации математических и инженерных вычислений MathCAD и интегрированная среда разработки Borland Delphi.

Научную новизну полученных в работе результатов определяют:

1. Способ частотно-временного корреляционного анализа сигналов.
2. Частотная фильтрация сигналов на основе частотно-временного корреляционного анализа сигналов.
3. Повышение точности определения скорости распространения акустических сигналов за счет учета их спектрального состава.
4. Применение разработанного частотно-временного корреляционного анализа к задачам обнаружения и локализации сигналов утечек в трубопроводных системах.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Предложен и разработан способ частотно-временного корреляционного анализа сигналов. Он реализован в виде алгоритмов и программ, в число которых входят программные продукты «Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов» и «Программное обеспечение корреляционного течеискателя», на которые получены свидетельства о государственной регистрации. Созданы два варианта аппаратно-программных средств для обнаружения утечек в трубопроводных системах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ частотно-временного корреляционного анализа сигналов.
2. Алгоритм частотной фильтрации сигналов на основе частотно-временного корреляционного анализа.
3. Пространственная графическая форма представления информации результатов частотно-временного корреляционного анализа и ее использование в задачах повышения точности локализации утечек.

4. Результаты исследования влияния частотного спектра сигналов утечек на скорость его распространения и создание на этой основе средств обнаружения и локализации утечек трубопроводов, обеспечивающих повышение точности экспериментального определения скорости распространения сигнала.

5. Аппаратно-программные средства обнаружения утечек в трубопроводных системах, реализующие частотно-временной корреляционный анализ акустических сигналов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на V и VIII Всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых “Молодежь и современные информационные технологии”, (г. Томск, 2007 и 2010 гг.), на XIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2007», г. Томск, ТПУ, 26 – 30 марта 2007г., на X научно-практической конференции «Средства и системы автоматизации: проблемы и решения», г. Томск, 19–20 ноября 2009 г., на XXX Российской школе, посвященная 65-летнию победы, г. Екатеринбург, 15-17 июня 2010г., на зарубежных форумах в Австрии и Республике Корея (The Junior Scientist Conference 2010, Vienna University of Technology Vienna, Vienna, Austria, 7–9 апреля 2010г., The 5th International Forum on Strategic Technology (FOST 2010), Ulsan, Republic of Korea, 13–5 октября 2010г.).

По результатам диссертационных исследований опубликовано 10 работ, в том числе четыре публикации в изданиях, рекомендованных ВАК. По базовому научно-техническому решению получен патент на изобретение «Способ частотно-временного корреляционного анализа цифровых сигналов». Две программы имеют свидетельства о их государственной регистрации.

Личный вклад автора.

1. Постановка задач диссертационного исследования осуществлена совместно с В.И. Гончаровым.

2. Разработка алгоритмов частотно-временного корреляционного анализа выполнена совместно с В.С. Аврамчуком.

3. Программное обеспечение частотно-временного корреляционного анализа создано автором.

5. Разработка двух вариантов аппаратно-программных средств для обнаружения утечек выполнена совместно с В.С. Аврамчуком.

6. Проведение натурных экспериментов и интерпретация их результатов, направленные на исследование способа частотно-временного корреляционного анализа, аппаратно-программных средств обнаружения утечек, а также выявление факторов, влияющих на точность локализации утечки, выполнены совместно с В.С. Аврамчуком и В.И. Гончаровым.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 47 наименований и 4-х приложений, содержит 64 рисунка и 9 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее практическое значение, сформулирована цель, определены задачи исследования, а также выделены основные положения, выдвигаемые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные методы и средства обнаружения утечек в системах трубопроводов.

Каждый из подходов к решению задач обнаружения и локализации утечек обладает определенными достоинствами, особенностями и недостатками. Преимущественное применение тех или иных методов и средств определяется во многом назначением трубопровода, его параметрами, особенностями транспортируемой среды, зависит от природно-климатических условий и других факторов. Среди наиболее заметных решений выделяются следующие: метод понижения давления, метод отрицательных ударных волн, метод сравнения расходов, метод сравнения изменения скорости расходов, акустический метод, корреляционно-акустический метод, лазерный газоаналитический метод.

В приложении к задачам обнаружения утечек трубопроводных системах водо- и теплоснабжения эффективным в настоящее время и перспективным для будущего считается корреляционно-акустический метод, имеющий ряд достоинств, в первую очередь – по точности обнаружения утечек и их локализации. Реализация метода связана с созданием специальных аппаратных и программных средств, позволяющих анализировать акустические сигналы, получаемые с двух датчиков, установленных по обе стороны от места предполагаемой утечки, как это показано на рис. 1.

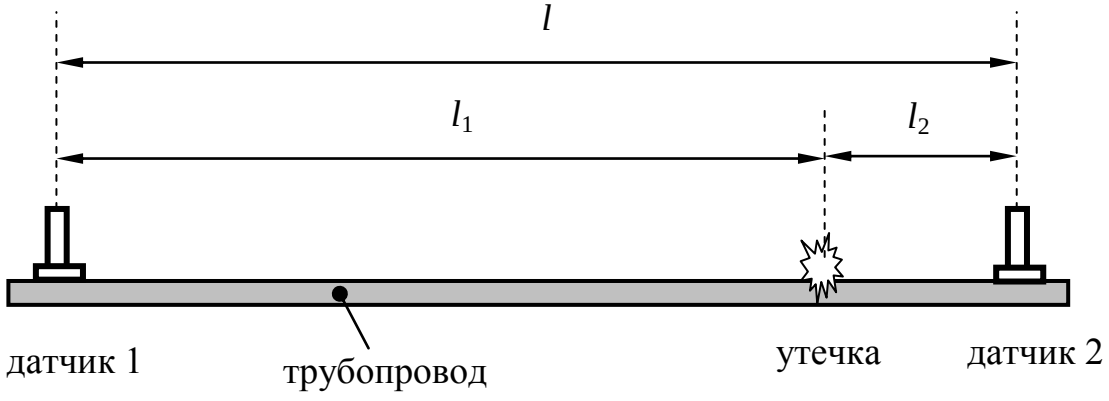

Рис. 1. Схемя трубопровода с утечкой и установленными датчиками

Расстояние от первого датчика до утечки (l_1) вычисляется по форулу:

$$l_1 = \frac{l + v\Delta t}{2}, \qquad (1)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta k}{f_d},$$

где l – расстояние между датчиками, Δt – временная задержка, v — скорость распространения сигнала по трубопроводу, Δk – смещение максимума от нулевой отметки на временой оси (в отсчетах), f_d – частота дискретизации входных сигналов.

Современные приборы-течеискатели позволяют выявлять корреляционные связи сигналов датчиков и по этой связи определять наличие утечки до десятков сантиметров при расстоянии между датчиками в десятки метров. Естественно, при увеличении расстояния между датчиками, определяемым, в частности, расположением технологических колодцев трубопроводов, возрастает погрешность определения координаты утечки. В условиях многочисленных помех, присутствующих в составе акустического сигнала, общая погрешность часто увеличивается до недопустимо большой величины.

Определенного улучшения результатов добиваются частотной фильтрацией принимаемых акустических сигналов. Это позволяет улучшить отношение сигнал/шум и, как следствие, повысить точность вычислений. Однако на пути формирования частотных фильтров, как и во многих других подобных задачах, остаются неопределенными граничные значения частоты фильтров. Применяемая в современных течеискателях методика экспериментального подбора настроек фильтров трудоемка, так как требует значительного времени, определенного опыта оператора и не гарантирует получения решения, близкого к наилучшему. Поэтому возникает исходная задача – такое развитие корреляционного способа обнаружения утечек, которое может обеспечить заметное снижение трудоемкости настройки частотных фильтров. Попутно заметим, что при решении этой задачи стало возможным, как впоследствии оказалось, учесть еще один фактор, существенно влияющий на точность вычислений координаты утечки, - получить экспериментальные данные для уточнения скорости распространения акустического сигнала.

Все сказанное распространяется на более широкую область применения корреляционного анализа: определение дефектов в механических конструкциях, в элементах конструкций летательных аппаратов, выявление напряжений в кристаллических структурах, в сейсморазведке и во многих других областях. В этом смысле обсуждаемая задача является достаточно общей, но в работе рассматриваемая только та ее часть, которая имеет непосредственное отношение к определению утечек в трубопроводном транспорте водо- и теплоснабжения.

Во второй главе рассматривается частотно-временной корреляционный анализ, который в полной мере опирается на классический корреляционный анализ и является его развитием. Необходимость в совершенствовании традиционного подхода уже частично отмечалась. В целом она определена

ограничениями и трудностями применения метода в реальных ситуациях, когда анализируемые сигналы содержат помехи - мультипликативные и аддитивные.

Первоначально задача возникла в связи с применением корреляционного метода в течеискателях для улучшения их аппаратных средств. Суть задачи связана с тем, что прямое назначение метода направлено на определение разности времени прихода акустических сигналов утечки к двум датчикам, как это следует из формулы (1). При наличии интенсивных помех, которые в условиях населенных пунктов (и даже вне их) имеют высокий уровень, сопоставить время прихода сигналов затруднительно, по крайней мере это делается с большими погрешностями. Для снижения уровня шумов принято использовать частотные фильтры. Но определение параметров, при которых фильтры наилучшим или хотя бы приемлемым образом осуществляют свои функции, как уже говорилось, требует значительного времени и аппаратно-программных затрат. И это относится не только к области поиска утечек.

Новизна решения состоит в рассмотрении взаимосвязи входных сигналов не только области времени, но и в области частот. В приложении к задаче обнаружения утечек результирующий график должен представлять собой трехмерное изображение с координатами осями времени и частоты. Имея информацию о спектре сигнала утечки, можно выбрать такой срез изображения, при котором результаты в максимальной степени соответствуют реальной ситуации.

Для пояснения подхода будем считать, что два датчика акустических сигналов формируют последовательность дискретных вещественных чисел x_i и y_i ($i = 0, 1, \ldots, 2^n - 1$, n – положительное целое число). Необходимо выявить их взаимную связь, если она существует. Взаимная корреляционная функция r_{12} рассчитывается по известной формуле $r_{xy} = F^{-1}\left[F(x_i) F^*(y_i) \right]$, где F – прямое дискретное преобразование Фурье первого сигнала, F^* – комплексно-сопряженное значение результатов прямого дискретного преобразования Фурье второго сигнала, F^{-1} – обратное дискретное преобразование Фурье. Новизна предлагаемого решения состоит в том, что вместо взаимосвязи сигналов для всего частотного диапазона, нужно получить множество взаимосвязей - для различных частотных диапазонов. Рассмотрим реализацию подхода.

Из произведения P_j, полученного по формуле

$$P_j = F(x_i) F^*(y_i), \qquad (2)$$

формируем m векторов M^k. Они представляют собой произведения результатов быстрого преобразования Фурье (БПФ) P_j, разделенные на m равных частотных диапазонов:

$$M_j^k = P_j w_j^k, \qquad (3)$$

где $w_j^k = \begin{cases} 1, \frac{k}{m} \le \frac{j}{2^{n-1}+1} < \frac{k+1}{m}, \\ 0, \text{иначе.} \end{cases}$ – оконная функция, $j = 0, 1, \ldots, 2^{n-1}+1$, $m = 2, 3, \ldots, 2^{n-1}+1; k = 0, 1, \ldots, m-1$. Полученные сигналы M^k подвергаем обратному преобразованию Фурье

$$Z^k = F^{-1}\left[M^k \right], \qquad (4)$$

Полученный результат Z^k представляет собой вектор из m векторов, каждый из которых фактически является взаимной корреляционной функцией входных сигналов на соответствующем частотном диапазоне. По результатам обратного преобразования Фурье можно определить значения частотно-временной корреляции по формуле

$$r_{12}(f_k, t_i) = Z_i^k, \qquad (5)$$

где $t_i = \frac{i}{f_d} - t_{\min}$; $f_k \in 0, f_{\max}$; $f_k = \frac{k \cdot f_{\max}}{m-1}$; $t_{\min} = -\frac{2^{n-1}}{f_d}$; $t_{\max} = \frac{2^{n-1}-1}{f_d}$; $f_{\max} = \frac{f_d}{2^n}$; f_d – частота дискретизации сигнала, $t_{\min}$, $t_{\max}$ – минимально и максимально возможные значения разности времени прихода для данного набора входных сигналов. Последние являются дискретными, поэтому результаты анализа могут характеризовать их взаимосвязь только в ограниченном частотном диапазоне от $[0, f_{\max}]$ и, соответственно, ограниченном временном диапазоне $t_{\min}, t_{\max}$. По полученным результатам можно построить график частотно-временной корреляционной функции $r_{12}(f, t)$, который позволяет судить о корреляции гармонических составляющих сигналов.

Для пояснения процедуры вычислений представим ее блок-схемой, которая составлена на основе соответствующих формул (2) – (5) и приведена на рис. 2. Входные сигналы x_i и y_i в виде одномерных массивов размером 2^n подвергаются преобразованию в блоках БПФ. На выходе получаем массивы комплексных чисел размером $2^{n-1}+1$. Блок БПФ* заменяет входные числа их комплексно-сопряжёнными представлениями. Результаты перемножения являют собой массив комплексных чисел размером $2^{n-1}+1$, на основе которого на выходе блока БФС формируются сигналы M^k. Блок БПФ$^{-1}$ преобразует форму M^k вновь во временной домен. Значения частотно-временной корреляции r_{12} определяются с помощью блока БИ по формуле (5).

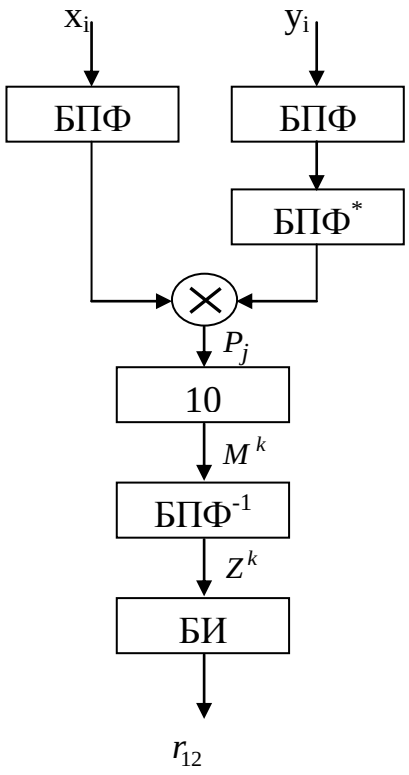

Рис. 2. Блок-схема вычисления взаимной частотно-временной корреляционной функции. БПФ – блок быстрого преобразования Фурье, БПФ – блок получения комплексно сопряжённых чисел, БФС – блок формирования сигналов, БПФ$^{-1}$ – блок быстрого обратного преобразования Фурье, БИ – блок интерпретации*

Для проверки алгоритма были проведены разнообразные компьютерные эксперименты, направленные на исследование свойств и особенностей как самого алгоритма, так и его программных реализаций. На первых этапах были использованы искусственно генерируемые сигналы, соответствующие заведомо известным параметрами утечек. Позднее моделирование неисправностей трубопроводов максимально приближалось к реальным условиям, так как использовались записи реальных сигналов утечек. В этих случаях отличие от натурных испытаний состояло практически лишь в использовании прикладного программного обеспечения, реализованного на стандартном персональном компьютере. Полученные результаты позволили, во-первых, подтвердить ожидания в отношении возможностей и целесообразности применения частотно-временного анализа в частной фильтрации акустических сигналов, во-вторых, позволили улучшить программное обеспечение в отношении точности и оперативности, сделать интерфейс более дружественным.

Для подтверждения работоспособности созданного алгоритма и разработанных программных средств ниже приведен демонстрационный пример. Исходные сигналы представляют собой оцифрованные звуковые сигналы с частотой дискретизации f_d равной 44,1 кГц. Имеется 2 записи, каждая из которых содержит 2 канала. Исследуемые сигналы x_i и y_i получают путем суммирования отсчетов исходных сигналов следующим образом:

$$x_i = L_i + L_i^{'} + 0,3R_{i+f_d\Delta t},\ \ y_i = R_i + R_i^{'} + 0,3L^{'}_{i+f_d\Delta t},$$

где $L_i, L_i^{'}, R_i, R_i^{'}$ – соответственно левые $(L_i, L_i^{'})$ и правые каналы $(R_i, R_i^{'})$ исходных записей. Сигнал x_i представляет собой сумму отсчетов левых каналов и доли правого канала первой записи с разницей по времени $\Delta t = 0,07$ с. Сигнал y_i представляет собой сумму отсчетов правого канала и части левого канала второй записи с разницей по времени $\Delta t^{'} = 0,03$ с. В результате анализа предложенным способом на графике частотно-временной корреляционной функции получили отображение заданных задержек (рис. 3). Анализ был осуществлен со следующими параметрами: размер выборки 2^{14}=16384 отсчетов, количество формируемых копий *m*=53. Рисунок построен с помощью программных средств инженерных и математических вычислений MathCAD Professional 2001.

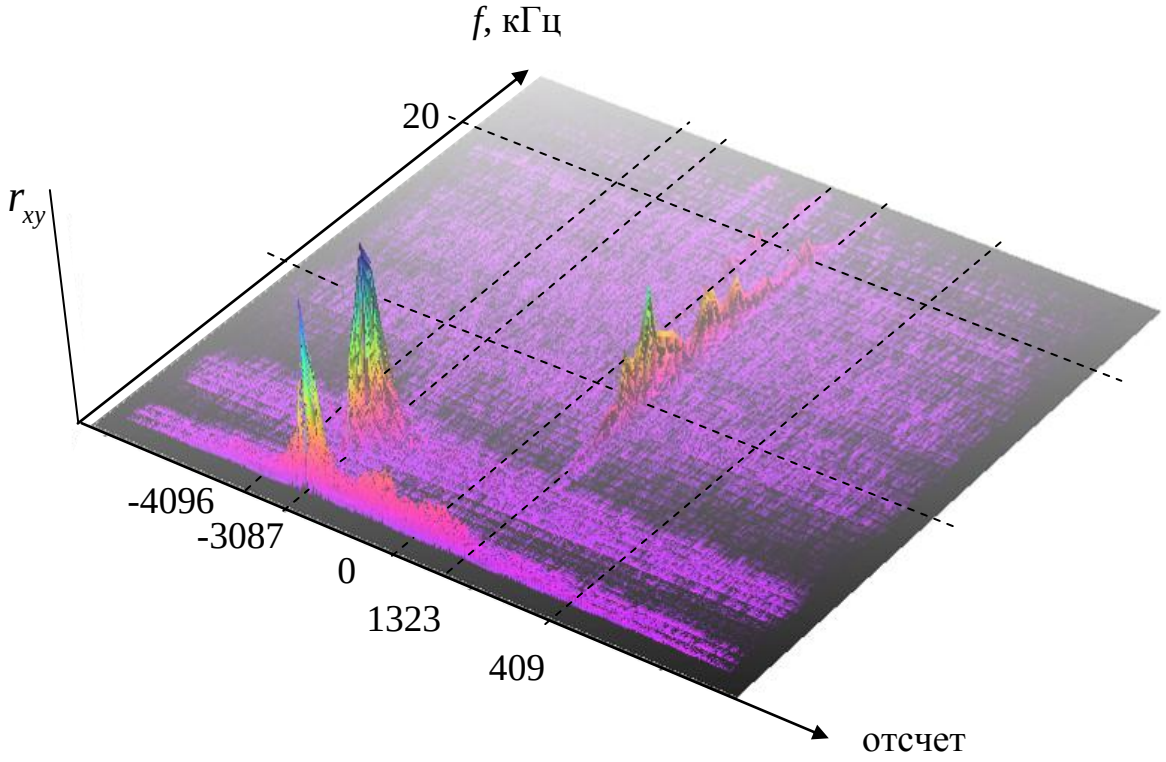

Рис. 3. Частотно-временная корреляционная функция для тестового примера

На рис. 3 присутствуют два максимума вблизи отметки -4096 в частотном диапазоне до 6 кГц и прямая линия в частотном диапазоне 7–20 кГц. При изучении выходных данных в среде MathCAD было установлено, что центры двух упомянутых максимумов располагаются на 3087 отсчете от нулевой отметки, а прямая линия – на 1323 отсчетах. С учетом того, что частота дискретизации f_d = 44,1 кГц, получим значения задержек 0,07 и 0,03 с. Этот пример демонстрирует способность частотно-временной корреляционной

функции разлагать взаимную зависимость двух сигналов одновремено на разные частотные диапазоны.

Отметим, что информационная насыщенность представленного в автореферате рисунка существенно ниже по сравнению с приборной реализацией. Это объяснимо, так как представленный рисунок, во-первых, имеет значительно меньшую разрешающую способность по сравнению с экранной формой и, во-вторых, он представлен в автореферате в черно-белом исполнении, в то время как на мониторе воспроизводится более информативное многоцветное решение.

Полученные в работе результаты показывают, что на основе частотно-временного анализа можно выделить информативный частотный диапазон, не прибегая к трудоемкой частотной фильтрации. Этим, напомним, увеличивается отношение сигнал/шум и, следовательно, точность обнаружения и локализации утечек трубопроводов.

В третьей главе рассматриваются задачи построения аппаратной и программной частей течеискателя, использующего частотно-временной корреляционный анализ сигналов.

Аппаратная часть создавалась с учетом прогнозируемых технических характеристик течеискателя, в частности, точности локализации утечек, удобного для оператора интерфейса, надежности прибора, его стоимости и других факторов. В ходе разработки были реализованы две основных схемы течеискателя - с проводной связью датчиков с базовым блоком и связью по радиоканалу.

Программное обеспечение было разработано на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований частотно-временного корреляционного анализа в соответствии с выбранной элементной базой. В диссертации рассмотрены варианты аппаратной реализации и программного обеспечения, отличающиеся назначением, функциональными возможностями и стоимостью течеискателя. Основные различия диктует способ передачи информации от датчиков к базовому блоку. Каждый из них - с проводной и беспроводной связью - имеет свои особенности, как положительные, так и негативные. Существенную роль играют также комплектующие изделия, в первую очередь датчики акустических сигналов.

Аппаратная часть прибора должна обеспечить функции сбора и обработки данных, взаимодействие с оператором, представление результатов.

На начальных этапах были использованы вибродатчики, внешние блоки с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и COM-портами для управления и передачи данных. Связь между этими блоками в варианте, показанном на рис. 4, организована по радиоканалу.

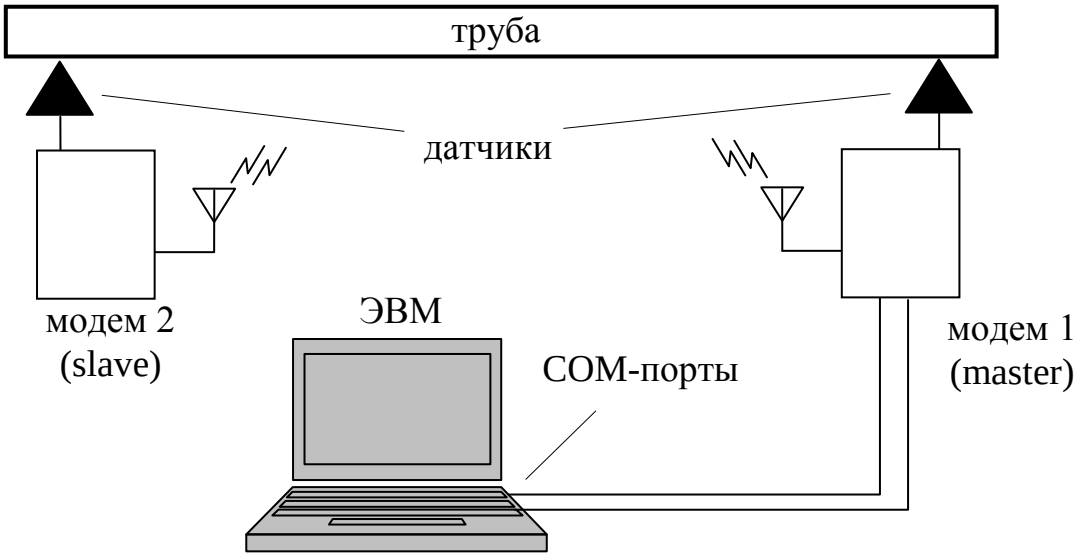

Рис. 4. Схема прибора с беспроводной связью

Были разработаны и прошли экспериментальную проверку макеты приборов, использующих схемы с проводной и беспроводной связью. Испытания проведены как в лабораторных условиях на имитационных и реальных сигналах, так и в полевых условиях. В ходе экспериментов были выявлены достоинства и ограничения каждой из схем. Прежде всего отметим недостатки в целом перспективного варианта прибора с радиоканалом:

- радиосвязь позволяет достаточно просто реализовать только сравнительно низкую скорость передачи данных; например, при скорости 4 кбит/с для передачи 1МБ записи требуется больше 33 минут, что практически недопустимо;

- в условиях населенных пунктов могут возникнуть трудности передачи данных, например, в отсутствии прямой видимости приемопередатчиков, расположенных на сторонах датчиков и базового блока, экранирования одного из них и т.п.; при этом увеличение мощности передатчиков возможно лишь до величины, определенной соответствующими нормами;[1]

- невозможно записывать длительные реализации сигналов, потому что данные сначала записываются во внутреннюю память модемов, затем передаются в ЭВМ.

Для рассматриваемого варианта прибора разработано прикладное программное обеспечение, построенное по модульному принципу. На рис. 5 приведены основные модули разработанного ПО.

[1] По решению ГКРЧ от 28.11.2005г. №05-10-02-001 о выделении полосы радиочастот 446-446.1 МГц для портативных радиостанций, без специального разрешения можно использовать устройства с излучаемой мощностью до 0,5 Вт.

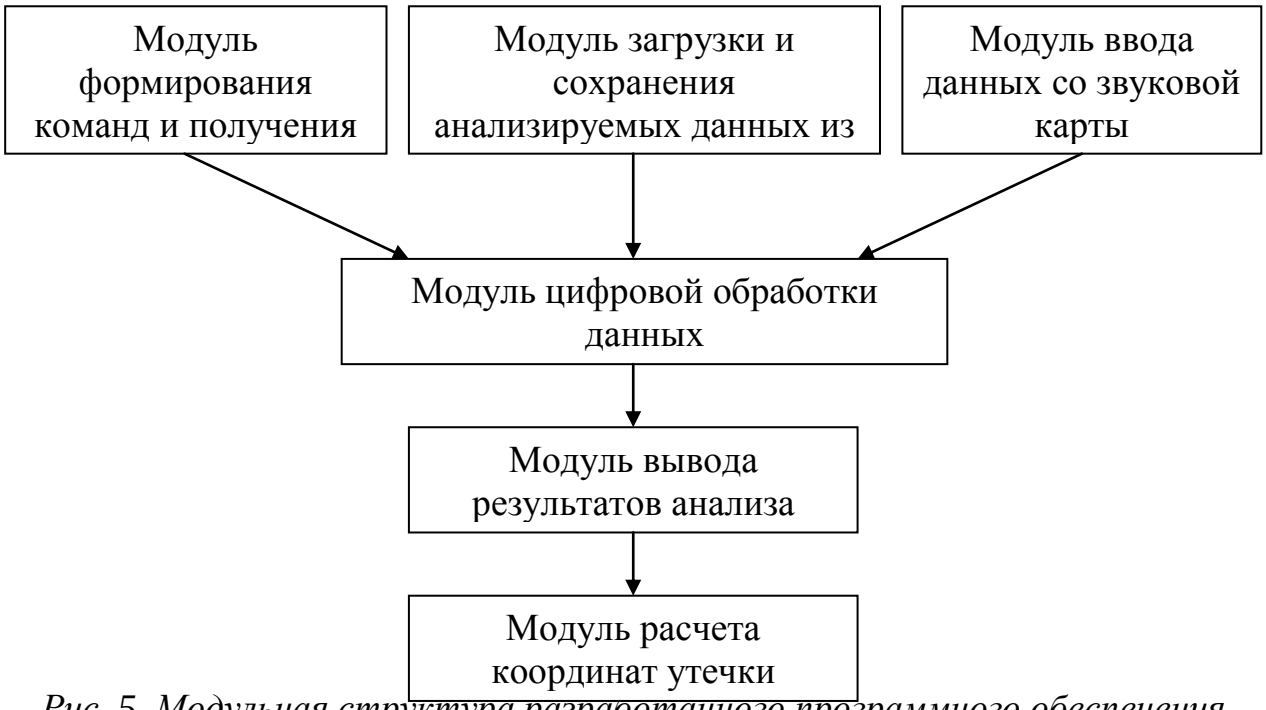

Рис. 5. Модульная структура разработанного программного обеспечения

Модуль загрузки и сохранения анализируемых данных из файла / в файл предназначен для загрузки данных из звуковых файлов формата WAV и собственного формата. С помощью модуля ввода данных со звуковой карты разработанный программный комплекс может принимать цифровой звуковой поток из WaveIn-устройств с выбранной частотой дискретизации. В модуле обработки данных реализованы фильтрация и корреляционный анализ данных. Модуль вывода результатов анализа позволяет выводить данные на экран ЭВМ в виде графиков.

По результатам испытаний прибора было решено внести изменения как в аппаратный состав прибора, так и в его программное обеспечение. Основные причины этого решения:

- на рынке появились вибродатчики нового поколения с улучшенными параметрами, которые, однако, имеют иную схему подключения;
- звуковые интерфейсы современноых ЭВМ превосходят имеющиеся модемы по таким характеристикам, как частота дискретизации, уровень фонового шума, удобство работы;
- в операционной системе Microsoft Windows имеются развитые программные инструменты для работы с оцифрованными звуковыми данными, нежели предоставленная вместе с модемами библиотека.

За основу прибора приняли портативную ЭВМ, имеющую достаточно полное функциональное обеспечение. В качестве звукового интерфейса для подключения датчиков была выбрана внешняя звуковая карта E-MU 0202 USB, которая имеет следующие привлекательные характеристики: два отдельных аналоговых входа; два аналоговых выхода с балансным подключением; уровень проникновения сигналов между каналами ниже -120 дБ; частоты дискретизации

ЦАП/АЦП до 192 кГц, разрядность до 24 битов; интерфейс USB 2.0; имеется внутренний источник питания.

Решающими факторами выбора стали наличие аналоговых входов с балансным подключением и сверхнизкий уровень проникновения сигналов между каналами, что в результате обеспечивает хороший прием данных с датчиков и снижает уровень таких помех.

Изменения в аппаратной части прибора повлекли за собой коррекцию программного обеспечения. Главные отличия состоят в следующем:

- отсутствует модуль формирования команд и получения данных для работы с модемами;
- широкое применение параллельных вычислений, обеспечившее повышение скорости обработки данных.

На рис. 6 приведена условная модульная структура ПО.

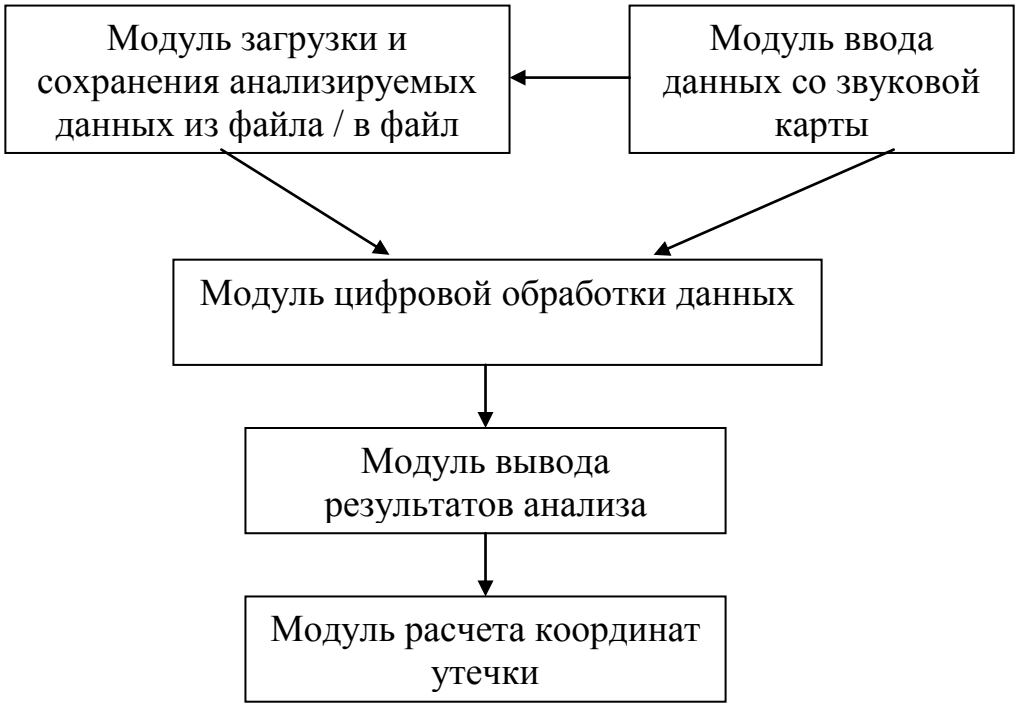

Рис. 6. Условная модульная структура разработанного программного обеспечения

Отметим, что результаты разработки программного обеспечения подтверждены двумя свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В четвертой главе приводится описание и результаты экспериментов, проведенных в различных форматах с целью проверки как самого частотно-временного корреляционного метода анализа, так и созданных на его основе структурных составляющих – алгоритмов, программ, аппаратной части.

В процессе работы по теме появлялись новые сведения, в том числе результаты экспериментов, несколько иначе интерпретировались имеющиеся знания, находились более приемлемые комплектующие изделия. Наиболее заметно происходило изменение в аппаратной части.

Первый вариант, как показали испытания, выполнял свои функции, но в то же время хотелось лучшего и большего. В первую очередь нужно было вносить изменения в канал передачи информации. Такие изменения были внесены, как уже говорилось при изложении третьей главы. Но этот шаг повлек за собой необходимость проведения экспериментов, направленных на проверку работоспособности принятых решений. Были сформированы задачи испытаний, главные их которых состояли в следующем:

- определение частотного диапазона акустических сигналов, который способны регистрировать датчики;
- исследование влияния ряда факторов, которые могут оказывать влияние на величину скорости распространения акустического сигнала вдоль трубопровода;
- экспериментальное определение точности прибора при локализации утечек.

Наиболее существенным оказалось решение второй задачи. Объясняется это тем, что скорость распространения акустического сигнала входит в формулу (1) расчета запаздывания времени прихода сигнала утечки к одному из датчиков по отношению к другому. В свою очередь этот параметр определяет расчетную величину координаты утечки. Стандартным решением для выпускаемых течеискателей является выбор фиксированного значения скорости, например, 1150м/с в приборе Aquascan 700 (Швейцария), 1200 м/с в некоторых других. В некоторых случаях методики использования приборов сопровождаются рекомендациями по выбору величины скорости в зависимости от диаметра трубы, толщины ее стенки и т.д. (например ЛИДЕР-КТМ-250, Россия). В любом случае значение скорости задается во многом произвольно и потому велика вероятность получения большой погрешности в определении координаты утечки.

Частотно-временной корреляционной анализ подтвердил вообще-то известный факт зависимости скорости распространения акустического сигнала от его частотного спектра. Подтверждена была закономерность, которая также известна, о быстром затухании высокочастотных составляющих по отношению к низкочастотным. Существенно новый результат состоял в том, что с помощью частотно-временного корреляционного анализа оказалось возможным экспериментально получить зависимость скорости распространения сигнала от частоты (следовательно, от расстояния между датчиками и утечкой). Один из таких графиков показан на рис. 7. На рисунке видно, что время задержки сигналов утечки, поступающих на датчики, зависит от частоты, то есть и от расстояния. Значения этих двух параметров могут быть определены приближенно, как результат первой итерации. На второй итерации, соответствующей уточненной скорости распространения сигнала, становится возможным получить более точные сведения о координате утечки.

Отметим, что приведенное на рис. 7 изображение позволяет составить определенное суждение о существующей зависимости времени задержки от частоты, но очевидно, что экранное цветное изображение значительно более

информативно и оператор имеет возможность принять более обоснованное решение о величинах определяемых параметров.

Итак, наличие у оператора графика, подобного приведенному на рис. 7, в сочетании с корреляционной функцией позволяет более точно определять скорость распространения сигнала и координату утечки.

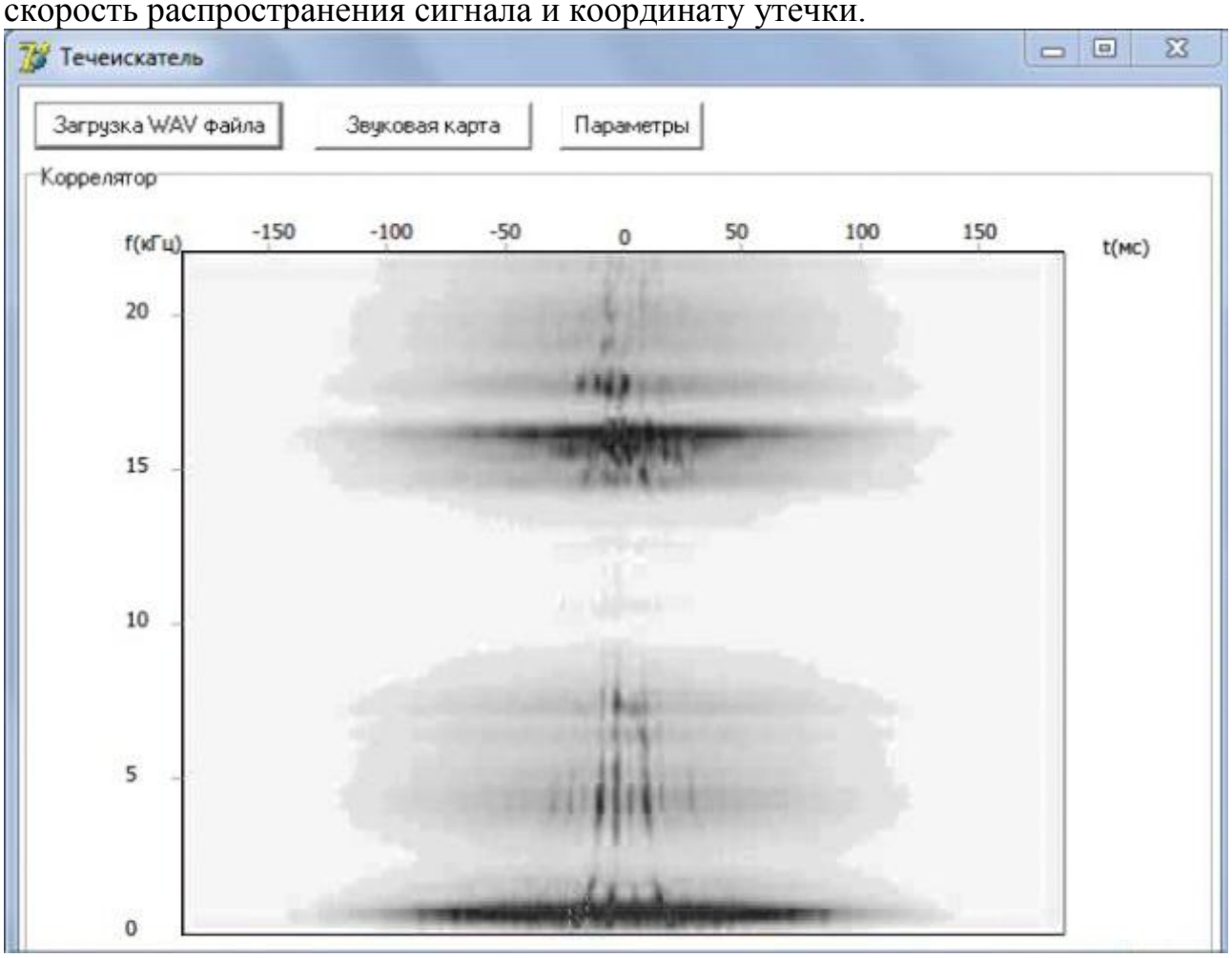

Рис. 7. Зависимость временной задержки сигнала утечки от частоты

В ходе экспериментов были проверены другие предположения и возможные взаимосвязи. Наиболее интересным является эффект ложных утечек, появляющийся при классическом корреляционном анализе. В этом отношении также имеется прогресс - инструменты частотно-временного корреляционного анализа позволяют достаточно просто идентифицировать ложные утечки и принять правильное решение.

Основные результаты работы

1. Выполнен анализ методов и средств обнаружения утечек в системах трубопроводного транспорта, выделены перспективные подходы и приемлемые коммерческие средства их реализации.

2. Предложен способ частотно-временного корреляционного анализа сигналов, позволяющий учитывать спектральный состав сигналов и принимать

решения, направленные на частотную фильтрацию сигналов и улучшение соотношения сигнал/шум.

3. Разработаны алгоритмы частотно-временного корреляционного анализа сигналов утечек трубопроводных систем.

4. Созданные алгоритмы анализа сигналов реализованы в форме соответствующего программного обеспечения для аппаратно-программных средств обнаружения утечек.

5. Создан графический интерфейс для наглядного оперативного отображения результатов частотно-временного корреляционного анализа сигналов утечек трубопроводов.

6. Разработаны два варианта аппаратно-программной реализации прибора для обнаружения утечек трубопроводов, использующего частотно-временной корреляционный анализ сигналов утечек трубопроводов.

7. Полученные результаты позволяют наметить пути и способы дальнейшего повышения точности работы прибора для локализации утечек трубопроводов, в частности, необходимо иметь специализированные модули радиопередатчик/приемник для связи датчиков с базовым блоком, использовать потенциал современных процессоров для параллельных вычислений и технологий облачного вычисления, повысить точность экспериментального определения скорости распространения акустических сигналов по трубопроводам различных типов.

В приложениях приведены: копия патента РФ на изобретение «Способ частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов» (приложение 1); копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ (приложения 2 и 3); акты внедрения результатов диссертационной работы (приложение 4 и 5).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Чан Вьет Тьяу, Аврамчук В.С. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов// Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 112–115.

2. Аврамчук В.С., Гончаров В.И., Чан В.Т. Частотно-времнной корреляционный анализ и его применение в задачах обнаружения утечек// Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 137. – № 2. – С. 70–73.

3. Аврамчук В.С., Гончаров В.И., Чан В.Т. Привлечение информации о частотных свойствах сигналов при корреляционном анализе// Наука и технологии. МСНТ. Том 2. – Краткие сообщения XXX Российской школы, посвяенной 65-летию Победы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – С. 69–71.

4. Аврамчук В.С., Гончаров В.И., Чан В.Т. Частотно-времнной корреляционный анализ и его применение в задачах обнаружения утечек // Наука и технологии. – Труды XXX Российской школы, посвященной 65-летию победы. - М.: РАН, 2010. – 386 с.

Публикации в других изданиях

5. Чан В.Т., Аврамчук В.С. Разработка программного обеспечения корреляционного течеискателя // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2007. – с. 112–115.
6. Чан В.Т., Аврамчук В.С. Разработка корреляционного течеискателя// Современные техника и технологии. СТТ 2007: XIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых. – Томск, 2007. – с. 251–253.
7. Чан В.Т. Получение корреляционно-временной функции в задачах определения координат утечек в трубопроводах// Средства и системы автоматизации: проблемы и решения: X научно-практическая конференция. – Томск, 2009. – с. 140–142.
8. Чан В.Т., Аврамчук В.С. Обнаружение утечек в трубопроводах с помощью частотно-временной корреляционной функции // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2010. – с. 136–137.
9. Tran Viet Chau, Valery Avramchuk, Valery Goncharov. Time-frequency Correlation Function's Application in Pipeline Leakage Localization// Proceedings of the Junior Scientist Conference 2010, Vienna University of Technology Vienna, г. Виена, Австрия, 7–9 апреля 2010г. - ISBN 978-3-200-01797-9. - Pp. 121–122.
10. Tran Viet Chau, Valery Avramchuk. Time-frequency Correlation Analysis// FOST 2010: Proceedings The 5th International Forum on Strategic Technology, г. Ulsan. 13–5 October 2010. ISBN: 978-1-4244-9038-7 с. 448-450.

Свидетельства об интеллектуальной собственности

11. Патент РФ № 2405163. Способ частотно-временного корреляционного анализа цифровых сигналов / Аврамчук В.С., Гончаров В.И., Чан В. Т. 26.05.2010.
12. Св.-во гос. рег. прогр. для ЭВМ 2010615394, Российская Федерация. Программное обеспечение корреяционного течеискателя / Аврамчук В.С., Чан В.Т.; правообладатель Национальный исследовательский Томский политехнический университет -№2010613670; дата поступл.22.06.2010; дата регистр.20.08.2010.
13. Св.-во гос. рег. прогр. для ЭВМ 2010615395, Российская Федерация. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов / Аврамчук В.С., Чан В.Т.; правообладатель Национальный исследовательский Томский политехнический университет -№2010613671; дата поступл.22.06.2010; дата регистр.20.08.2010.