УДК 004.93: 621.313 Аль-Джасри Г.Х.М., Болтенков В.А. к.т.н., Червоненко П.П. к.т.н. Одесский национальный политехнический университет

ЛОКАЛЬНО-КОГЕРЕНТНАЯ ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕЧЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Аль-Джасрі Г.Х.М., Болтьонков В.О., Червоненко П.П. Локально-когерентна обробка вимірювальної інформації в системах акустичного моніторингу течій теплоносія. Запропоновано метод підвищення точності локалізації течі теплоносія акустичною мікрофонною системою. Метод дозволяє виділити області локальної когерентності на парах мікрофонів в умовах багаторазового відбиття акустичного сигналу всередині приміщень. При оцінці координат течі за ТДОА технологією пропонується враховувати тільки ті оцінки ТДОА, для яких квадрат модуля когерентності вище порогового. Запропонований метод дозволяє зменшити помилку оцінки координат течі в 2-4 рази.

Ключові слова: моніторинг течій теплоносія, TDOA технології, квадрат модуля когерентності, локально-когерентна обробка, форм-фактор кореляційної функції.

Аль-Джасри Г.Х.М., Болтенков В.А., Червоненко П.П. Локально-когерентная обработка измерительной информации в системах акустического мониторинга течей теплоносителя. Предложен метод повышения точности локализации течи теплоносителя при помощи акустической микрофонной системы. Метод позволяет выделить области локальной когерентности на парах микрофонов в условиях многократных отражений акустического сигнала внутри помещений. При оценке координат течи по TDOA технологии предлагается учитывать только те оценки TDOA, для которых квадрат модуля когерентности выше порогового. Предложенный метод позволяет уменьшить ошибку оценки координат течи в 2-4 раза.

Ключевые слова: мониторинг течей теплоносителя, TDOA технологии, квадрат модуля когерентности, локальнокогерентная обработка, форм-фактор корреляционной функции.

Al-Jasri G. Kh. M.,Boltenkov V.A., Chervonenko P.P. Locally-coherent Processing of the Measuring Mnformation in the Acoustic Water Leak Monitoring Systems. A method for improving the localization accuracy of coolant leaks with the acoustic microphone systems. The method allows to distinguish the areas of local coherence on the microphone pairs in multiple reflections conditions of the acoustic signal indoors. In assessing the origin of a leak on the TDOA technology It is proposed to take into account only those TDOA estimation, for which square coherence module is above coherence threshold. The proposed method gives possibility to reduce the error of leak coordinate estimation in 2-4 times.

Keywords: water leaks monitoring, TDOA technology, square coherency module, locally-coherent processing, correlation function form factor.

Постановка научной проблемы. Проблема создания систем мониторинга течей теплоносителя в энергетическом оборудовании весьма актуальна как с точки зрения экономии энергоресурсов, так и в плане повышения сохранности основного металла оборудования теплоэнергетических агрегатов, повреждаемого при возникновении и развитии течей. Несмотря на практическую важность проблемы на сегодняшний день не существует надежных и в то же время достаточно информативных систем мониторинга течей. Одним из путей решения проблемы являются акустические бесконтактные системы мониторинга течей [1]. Принцип действия таких систем основан на регистрации звукового сигнала, возникающего при истечении перегретого теплоносителя через дефект, пространственно разнесенной системой акустических датчиков (микрофонов), установленных в контролируемом технологическом помещении – акустической сенсорной сетью. При истечении теплоносителя происходят достаточно сложные процессы звукообразования, акустический сигнал от течи является широкополосным и занимает частотную полосу (2-45) кГц при общем уровне звукового давления до 95 дБ [2].

Основными задачами системы акустического мониторинга течей являются:

– обнаружения факта течи,

– локализация течи, т.е. оценка координат дефекта, через который происходит истечение теплоносителя,

- контроль состояния и работоспособности акустических сенсоров (микрофонов).

Задача локализации течи является наиболее сложной в связи с тем, что в технологических помещениях акустический сигнал испытывает затухание, многократные переотражения от объектов, находящихся в помещении и его стен. Задачу локализации предлагается решать на основе TDOA технологии, т.е. путем оценивания разностей времен прихода (англ. Time Differences Of Arrivals – TDOA) сигнала на разнесенные в пространстве микрофоны [3].

Целью данного исследования является разработка метода, позволяющего повысить точность оценивания TDOA и соответственно точность оценивания координат течи в сложных условиях образования звукового поля в технологическом помещении.

5

Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" Луцьк, 2016. Випуск № 23

Пусть сигнал широкополосного источника звука (течи) регистрируется сетью из *N* пространственно разнесенных микрофонов (координаты их полагаются произвольными, но известными). Технология обработки измерительной информации такова. Для каждой пары микрофонов (i,j) (а таких пар при *N* микрофонах в помещении существует N(N-2)/2) оценивается обобщенная взаимно-корреляционная функция (ВКФ) по Кнеппу-Картеру $\hat{R}_{ij}(\tau)$ [4]. Положение максимума ВКФ позволяет оценить разности времен прихода (Time Differences Of Arrivals – TDOA) $\hat{\tau}_{ij}$ на *i*-й и *j*-й микрофоны (*i* = 1,...,*N*, *j* = 1,...,*N*, *i* \neq *j*):

$$\hat{\tau}_{ij} = \underset{\tau \in T}{\operatorname{argmax}} \ \hat{R}_{ij}(\tau) , \qquad (1)$$

где Т – интервал анализа.

Для каждого пространственного тетраэдра, образованного любыми четырьмя микрофонами можно составить систему TDOA-уравнений:

$$\frac{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} = c\,\hat{\tau}_{12},}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2}} = c\,\hat{\tau}_{13},$$
(2)
$$\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} - \sqrt{(x_0 - x_4)^2 + (y_0 - y_4)^2 + (z_0 - z_4)^2} = c\,\hat{\tau}_{14},$$

где (x_0, y_0, z_0) - координаты источника звука, $(x_k, y_k, z_k), k = 1, ..., 4$ - координаты четырех микрофонов из всего их набора, $\hat{\tau}_{ij}, i = 1, j = 2,3,4$ - соответствующие оценки TDOA, *c* - скорость звука для условий измерения. Приведенная выше система уравнений описывает три гиперболоида вращения, которые являются поверхностями положения, т.к. на поверхностях гиперболоидов $\hat{\tau}_{ij} = const$. Решение системы уравнений дает оценку местоположения источника $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0)_i$. Оценки координат источника передаются на следующий уровень обработки. На следующем уровне окончательная оценка местоположения источника определяется по какой-нибудь из многочисленных известных стратегий [3], например, как среднее по всем оценкам, полученным на предыдущем уровне.

Точность оценивания координат течи в первую очередь определяется точностью оценивания значений TDOA для каждой пары микрофонов $\hat{\tau}_{ij}$, которая в свою очередь определяется степенью когерентности сигналов, регистрируемых каждой парой микрофонов [5]. Количественной мерой когерентности двух случайных сигналов x(t) и y(t), принимаемых парой микрофонов, является комплексная функция когерентности, равная взаимному спектру мощности $C_{xy}(f)$, нормированному к корню квадратному из произведения собственных спектров мощности этих сигналов:

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{G_{xy}(f)}{\sqrt{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}},$$
(3)

где f - частота. На практике обычно используется квадрат модуля когерентности (КМК) $\gamma_{xy}^2(f)$. По физическому смыслу, как функция когерентности, так и КМК – это коэффициент корреляции (или линейной связи) пары сигналов на каждой частоте f анализируемого частотного диапазона [5,6] На практике удобнее использовать КМК, как функцию по определению нормированную к единице: в частности, если $\gamma_{xy}^2(f) = 1$ на всех частотах исследуемого частотного диапазоне сигналы считаются полностью когерентными, при $\gamma_{xy}^2(f) = 0$ сигналы некогерентны. На практике при обработке широкополосных сигналов $0 < \gamma_{xy}^2(f) < 1$, причем порогом когерентности, выше которого когерентность считается существенной для широкополосных сигналов, служит величина (0,75-0,8) [6]. Изложенная выше схема оценивания координат широкополосного источника не предполагает учета свойств взаимной когерентности оценивания TDOA, а соответственно и оценивания координат течи, путем учета степени взаимной когерентности сигналов, принимаемых разнесенными парами микрофонов.

Исследования проведены на многоканальных цифровых записях сигналов течей, полученных в экспериментах поставленных в НИЛ «Атомспецавтоматика» Одесского национального политехнического университета под руководством д.т.н., проф. А.В. Королева [7]. Общая схема

эксперимента такова. Специальный теплофизический стенд позволяет имитировать сигналы от различных видов дефектов в элементах теплотехнического оборудования на реальных рабочих давлениях и температурах. Генерируемый при модельной течи акустический сигнал регистрируется группой из 8-ми пространственно разнесенных измерительных конденсаторных микрофонов МФК–003М с улучшенными характеристиками (рабочая амплитудно-частотная характеристика 20-50000 Гц при неравномерности не более 5 дБ). В частности, на рис.1 приведена спектральная плотность мощности (СПМ) акустического сигнала, зарегистрированного микрофоном №1 от имитировавшейся течи через дефект уплотненной прокладки фланцевого соединения размером 0,2 мм, рассчитанная методом периодограмм Уэлча [8].



Рис.1. Спектральная плотность мощности для сигнала протечки.

Функция КМК двух сигналов от той же течи, зарегистрированных на паре микрофонов №1 и №2, разнесенных на 4,6 м, приведена на рис.2.

Анализ вида функции когерентности показывает, что в некоторых областях анализируемого частотного диапазона когерентность высока, а в некоторых областях частотного диапазона она практически незначительна. Среди причин снижения когерентности сигналов, принимаемых разнесенными микрофонами, выделим следующие.

1) Процесс локализации течи происходит, как правило, в помещении, содержащем оборудование, трубопроводы и другие отражающие и поглощающие объекты. В результате возникает многолучевое распространение сигнала (реверберация). В результате этого эффекта в точке приема складываются как сигнал, пришедший по прямому пути, так и его многократно отраженные реплики. Интерференция частотных составляющих широкополосного сигнала в точке приема приводит к существенной потере когерентности в отдельных участках частотного диапазона. В частности, эксперимент проводился в прямоугольном помещении с размерами 9,4 м * 11,5 м * 5,5 м. Кроме отражающих поверхностей (стен, потолка, застекленных оконных проемов) в помещении находилось различное оборудование и трубопроводы из различного материала и различных размеров. Все перечисленные элементы играли роль системы хаотически расположенных отражателей.

2) Коэффициент поглощения звука при распространении является частотно зависимой функцией, пропорциональной квадрату частоты [7]. Это также в совокупности с эффектом многолучевого распространения вносит вклад в потерю когерентности сигналов.

3) Хотя при эксперименте контролировалась скорость звука с путем учета ее температурной зависимости

© Аль-Джасрі Г. Х. М., Болтьонков В.О., Червоненко П.П.

7



Рис. 2. Квадрат модуля когерентности для пары сигналов, зарегистрированных микрофонами, разнесенными на расстояние 4,6 м.

$$c = 331 + 0.6t^0 \text{ (M / cek)}, \tag{4}$$

где t^0 - температура воздуха в помещении (в градусах Цельсия), вблизи зоны течи существуют области высокой температуры (до 150⁰С и выше), что вызывает фазовые флуктуации частотных компонент широкополосного сигнала, пропорциональные четвертой степени температуры.

Все перечисленные факторы приводят к формированию сложной картины взаимной когерентности сигналов, принимаемых парой разнесенных микрофонов.

Анализ картины КМК позволяет установить, что в отдельных частотных диапазонах когерентность сигналов достаточно высока ($\gamma_{xy}^2(f) > 0.8$). Очевидно, при оценке ВКФ, а затем и TDOA по положению максимума ВКФ именно области высокой когерентности вносят основной вклад в формирование эффективной статистической оценки. Назовем эти области областями локальной когерентности (Local Coherence Area – LCA) или «окнами когерентности» по аналогии с «окнами прозрачности» в атмосферной оптике и распространении радиоволн [9].

Сформулируем алгоритм локально-когерентной обработки сигналов для оценки TDOA.

Шаг 1. Для каждой пары микрофонных датчиков рассчитать функцию КМК $\gamma_{xy}^2(f)$ во всем анализируемом диапазоне частот.

Шаг 2. Оценить $\max_{f} \gamma_{xy}^2(f)$. Если $\max_{f} \gamma_{xy}^2(f) < 0.8$, то Выход. В случае общей низкой когерентности на паре микрофонов, эту пару следует исключить из дальнейшего рассмотрения, поскольку от нее нельзя ожидать качественной оценки TDOA.

Шаг 3. Если $\max_{f} \gamma_{xy}^{2}(f) > 0,8$, перейти к шагу 4.

Шаг 4. Для функции КМК определить области локальной когерентности («окна когерентности»), т.е. частотные области $(f_{H}, f_{B})_{k}$, где выполняется условие $\gamma_{xy}^{2}(f) > 0.8$, $k = 1, ..., N_{LCA}$, где k - номер окна когерентности, N_{LCA} - общее число окон когерентности в анализируем частотном диапазоне, $(f_{H}, f_{B})_{k}$ соответственно нижняя и верхняя частотная граница k -го окна.

Шаг 5. Если $(f_{\beta} - f_{\mu})_k < 200 \, \Gamma$ ц, исключить окно с номером k из дальнейшего рассмотрения, ввиду его малой ширины.

Шаг 6. Для всех выявленных N_{LCA} окон когерентности синтезировать полосовые фильтры с частотами среза (*fн*, *f* $_{\mathcal{B}}$)_{*k*}. Поскольку для оценки TDOA фильтр должен обладать максимально линейной

© Аль-Джасрі Г. Х. М., Болтьонков В.О., Червоненко П.П.

фазовой характеристикой, удобно синтезировать фильтры Селестника-Ланга-Барруса (ФСЛБ) [10], которые обеспечивают постоянство групповой задержки при фильтрации и одновременно обеспечивают несколько требуемых полос пропускания. Практический опыт показывает, что достаточно синтезировать цифровые ФСЛБ 20-25-го порядка.

Шаг 7. Пропустить сигналы x(t) и y(t), принимаемых парой микрофонов, через синтезированные полосовые фильтры, соответствующие выявленным окнам когерентности.

Шаг 8. Для каждого из профильтрованных сигналов вычислить ВКФ и оценку TDOA $\hat{\tau}_{ii}^{(k)} = \arg \max \hat{R}_{ii}(\tau)$.

 $\iota_{ij} = \arg \max_{\tau \in T} \kappa_i$

Шаг 9. Усреднить N_{LCA} полученных оценок РВП.

Шаг 10. Выход.

Проиллюстрируем эффективность предложенного алгоритма на экспериментальных данных, полученных в условиях, описанных выше. На рис.4 приведена ВКФ для указанной пары микрофонов.



Рис.3. Взаимно-корреляционная функция для пары сигналов без учета их когерентности.

Качество корреляционной обработки будем количественно оценивать двумя параметрами: смещением оценки TDOA $bias(\Delta \tau_{ij})$ относительно истинной (которая в данном случае известна из геометрии эксперимента и скорости звука для условий измерения) $\Delta \tau_{ij}$ и форм-фактором взаимно-корреляционной функции, под которым будем понимать отношение площади главного лепестка модуля ВКФ к общей площади модуля ВКФ на всем интервале анализа:

$$FF = \frac{S(abs(R_{ij}(\tau)))_{main_lobe}}{\sum_{\tau} (abs(R_{ij}(\tau)))}.$$
(5)

Практика оценивания TDOA показывает, что рост введенного форм-фактора ВКФ существенно уменьшает дисперсию оценки $\Delta \tau_{ij}$. Для приведенного случая $bias(\Delta \tau_{ij}) = 584-498 = 86$ (истинное значение задержки равно $\Delta \tau_{ij} = 498$ отсчетов) и *FF* = 0,6%.

Применим предложенный алгоритм локально-когерентного анализа. На рис.4 показаны окна когерентности для данного случая.

В описываемой акустической ситуации выявлено два окна когерентности: LCA1(7960-14150)Гц и LCA2(15400-17950)Гц.

После фильтрации исходных сигналов ФСЛБ 25-го порядка в окне LCA1(7960-14150)Гц получена ВКФ, приведенная на рис.5.

9

Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" Луцьк, 2016. Випуск № 23



Рис.4. Области локальной когерентности для экспериментального примера.



Рис.5. Взаимно-корреляционная функция после фильтрации сигналов в окне когерентности LCA1(7960-14150)Гц.

После фильтрации параметры в первом окне прозрачности показатели качества оценки ВКФ стали такими: $bias(\Delta \tau_{ij})=452-498=-46$ и FF=2,11%. Усредненная по двум окнам когерентности оценка TDOA $\bar{\tau}_{ij}=518$ (напомним, что истинное значение задержки равно $\Delta \tau_{ij}=498$ отсчетов). Предложенная локально-когерентная обработка проведена для всех пар, образованных восемью микрофонами. При этом число окон когерентности изменялось от двух (для пар наиболее удаленных микрофонов) до пяти (для пар близко расположенных микрофонов). В таблице 1 приведены оценки координат течи, полученные прямым путем и с применением локально-когерентной обработки.

Координаты течи	Истинные значения	Оценки, полученные прямой обработкой	Ошибки оценивания при прямой обработке	Оценки, полученные локально- когерентной обработкой	Ошибки оценивания при локально- когерентной обработке
x	6,55 м	7,03 м	7,32%	6,67 м	1,83%
у	7,22 м	6,84 м	5,26%	7,04 м	2,49%
Z.	0,60 м	0,82 м	3,67%	0,61 м	1,61%

Таблица 1 Сравнительный анализ точности оценивания координат течи

Анализ таблицы 1 показывает, что точность оценивания координат течи при локальнокогерентной обработке существенно повышается: так относительная ошибка оценивания координат течи уменьшается в 2-4 раза по сравнению с некогерентной обработкой.

Выводы и перспективы. В работе предложен метод локально-когерентной обработки широкополосных звуковых сигналов при локализации течей в теплотехническом оборудовании. Метод, основанный на оценке частотных диапазонов, в которых взаимная когерентность акустических сигналов на паре микрофонов выше установленного порога (окон когерентности) позволил существенно уменьшить смещение и дисперсию оценок TDOA тем самым повысить точность оценивания координат течи.

При формулировке алгоритма предполагался стационарный характер течи и соответственно уровня генерируемого звукового сигнала. В таких условиях предложенный алгоритм легко реализуется в реальном масштабе времени (в частности с применением систем программирования Matlab, Scilab, LabView). Однако при течах с большим расходом может наблюдаться интенсивное во времени развитие течи и предложенная процедура может не уложиться в темп нарастания уровня звукового сигнала и изменения его спектра. Поэтому в дальнейших исследованиях предполагается усовершенствование предложенного алгоритма с реализацией его как адаптивного и перестройкой передаточных функций фильтров в реальном масштабе времени.

- 1. В.А. Болтенков, Г.Х.М. Аль-Джасри. Исследование акустических систем мониторинга течей теплоносителя // 2015. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2015. Вип. 20. С. 16-22.
- Болтенков В.А. Алгоритмы обработки информации при акустическом бесконтактном поиске протечек на верхнем блоке реактора ВВЭР-1000 / В. А. Болтенков, А. В. Королев, М. В. Максимов, О. В. Маслов. // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ: Энергетика – 2009. – N 3. – С. 67-72.
- Huseynov J., Baliga S, Dillencourt M. et al. Gas-leak Localization Using Distributed Ultrasonic Sensors // Proc. 2009. 7293, Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems. – 72930Z. –DOI:10.1117/12.812058.
- 4. Knapp C.H., Carter G.C. The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay// IEEE Trans. Acoust., Spech, Signal Process. 1976. Vol. 24, №4 P.320-327.
- 5. Картер Г.К. Оценивание когерентности и временной задержки // ТИИЭР. 1987. Том 75, №2 С.64-84.
- 6. Бендатт Дж, Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
- Kozick R.J., Sadler B.M. Algorithms for Localization and Tracking of Acoustic Sources with Widely Separated Sensors // Proc. of 2000 Meeting of the IRIS Specialty Group on Battlefield Acoustics and Seismics. – Laurel, MD, 2000. — P.35-76.
- Королев А.В. Экспериментальное исследование особенностей акустических сигналов при истечении пара и газа через различные насадки / Королев А.В., Литвин А.Н. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2002. – Т. 5, Вып. 4. – С. 38-40.
- 9. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
- 10. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 286 с.
- Selesnick, I. W., M. Lang, and C. S. Burrus. Constrained Least Square Design of FIR Filters without Specified Transition Bands // IEEE Transactions on Signal Processing – 1996 – Vol. 44, No. 8 – P. 1879–1892.