

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-Джасри Г.Х.М., Болтенков В.О., Червоненко П.П. Локально-когерентна обробка виміральної 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 TDOA технологією пропонується враховувати тільки ті оцінки TDOA, 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, локально-когерентная обработка, форм-фактор корреляционной функции.

Al-Jasri G. Kh. M., Boltkenov V.A., Chervonenko P.P. **Locally-coherent Processing of the Measuring Information 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 coherence module, locally-coherent processing, correlation function form factor.

Постановка науочної проблеми. Проблема створення систем моніторингу течей теплоносія в енергетическому обладнанні дуже актуальна як з точки зору економії енергоресурсів, так і в плані підвищення надійності основного металу обладнання теплоенергетических агрегатів, пошкоджуваного при виникненні і розвитку течей. Незважаючи на практичну важливість проблеми на сьогоднішній день не існує надійних і в той же час достатньо інформативних систем моніторингу течей. Одним з шляхів рішення проблеми є акустичні безконтактні системи моніторингу течей [1]. Принцип дії таких систем ґрунтується на реєстрації звукового сигналу, виникаючого при істеченні перегретого теплоносія через дефект, просторово рознесеної системою акустических датчиків (мікрофонів), встановлених в контролюваному технологіческому приміщенні – акустическої сенсорної мережі. При істеченні теплоносія відбуваються достатньо складні процеси звукоутворення, акустический сигнал від течі є широкополосним і займає частотну смугу (2-45) кГц при загальному рівні звукового тиску до 95 дБ [2].

Основними завданнями системи акустического моніторингу течей є:

- виявлення факту течі,
- локалізація течі, т.є. оцінка координат дефекту, через який відбувається істечення теплоносія,
- контроль стану і працездатності акустических сенсорів (мікрофонів).

Завдання локалізації течі є найбільш складним в зв'язі з тим, що в технологіческих приміщеннях акустический сигнал зазнає згасання, багаторазові переотраження від об'єктів, знаходячись в приміщенні і його стін. Завдання локалізації пропонується вирішувати на основі TDOA технології, т.є. шляхом оцінювання різниць часів приходу (англ. Time Differences Of Arrivals – TDOA) сигналу на рознесені в просторі мікрофони [3].

Метою даного дослідження є розробка методу, що дозволяє підвищити точність оцінювання TDOA і відповідно точність оцінювання координат течі в складних умовах утворення звукового поля в технологіческому приміщенні.

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 ($i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, i \neq j$):

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

где T – интервал анализа.

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

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

где (x_0, y_0, z_0) – координаты источника звука, $(x_k, y_k, z_k), k = 1, \dots, 4$ – 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 гиперboloида вращения, которые являются поверхностями положения, т.к. на поверхностях гиперboloидов $\hat{\tau}_{ij} = const$. 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:

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

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 сигналов. Целью исследования, результаты которого приведены в статье, является повышение точности 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

експеримента така. Спеціальний теплофізический стенд дозволяє імітувати сигнали від різних видів дефектів в елементах теплотехнічного обладнання на реальних робочих тисках і температурах. Генеруємий при модельній течі акустический сигнал реєструється групою з 8-ми просторовно рознесених вимірельних конденсаторних мікрофонів МФК-003М з удичшенними характеристиками (робоча амплітудно-частотна характеристика 20-50000 Гц при нерівномірності не більшє 5 дБ). В частності, на рис.1 приведєна спектральна густина потужності (СПМ) акустического сигнала, зарєгистровано мікрофоном №1 від імітуваної течі через дефект удичненої прокладкі фланцевого з'єднання розміром 0,2 мм, розрахована методом періодограм Уєлча [8] .

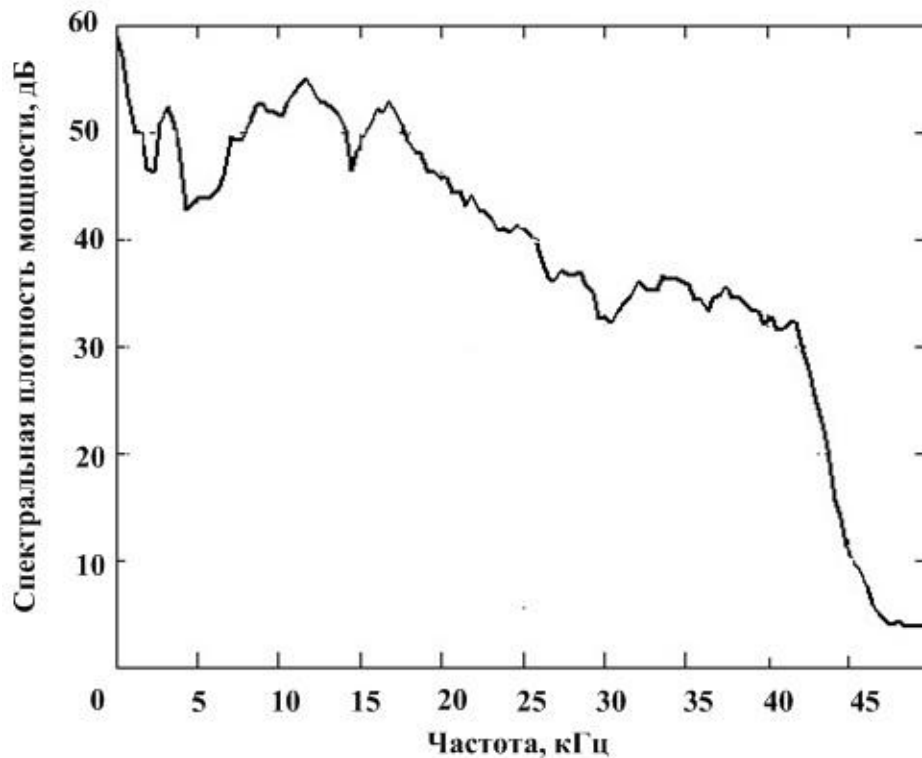


Рис.1. Спектральная плотность мощности для сигнала протечки.

Функція КМК двох сигналів від той же течі, зарєгистровано на парє мікрофонів №1 і №2, рознесених на 4,6 м, приведєна на рис.2.

Аналіз виду функції когерентності показує, що в деяких областях аналізованого частотного діапазону когерентність висока, а в деяких областях частотного діапазону вона практичєски незначительна. Среди причин зниження когерентності сигналів, приймаємих рознесеними мікрофонами, видєлимо наступніє.

1) Процєс локалізації течі відбуваєтьсє, як правило, в приміщенні, що містить обладнання, трубопроводи і другєє відбиваючі і поглинаючі об'єкти. В результаті виникаєє багатолучевє розповсюдження сигналу (реверберація). В результаті цього ефекта в точці прийєма накопичуєтьсє як сигнал, що прийєшов по прямєму шляху, так і його багаторазово відбитіє репліки. Інтерференція частотних складових широкополосного сигналу в точці прийєма призводить до суттєвої втрати когерентності в окремих ділянках частотного діапазону. В частності, експеримент проводивсь в прямокутному приміщенні з розмірами 9,4 м * 11,5 м * 5,5 м. Крім відбиваючих поверхонь (стен, стель, застєкленних віконних проємів) в приміщенні знаходилося різне обладнання і трубопроводи з різного матеріалу і різних розмірів. Все переліченєє елементи грали роль системи хаотичєски розташованих відбивачів.

2) Коефіцієнт поглинання звуку при розповсюдженні є частотно зависимою функцією, пропорційною квадрату частоти [7]. Це також в сукупності з ефектом багатолучєвого розповсюдження вносить вклад в втрату когерентності сигналів.

3) Хоча при експерименті контролювалось швидкість звуку c шляхом урахування її температурної залежності

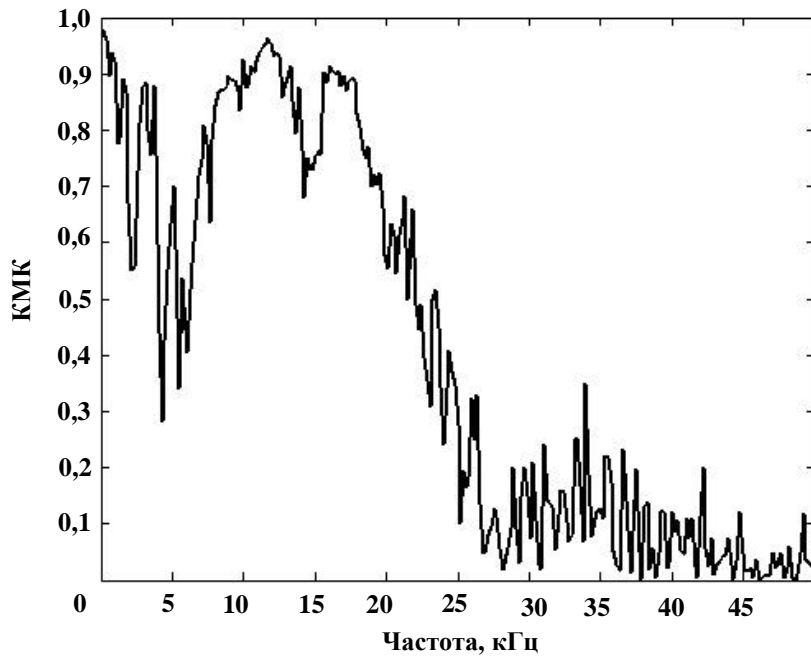


Рис. 2. Квадрат модуля когерентності для пари сигналів, зареєстрованих мікрофонами, рознесеними на відстань 4,6 м.

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

де t^0 - температура повітря в приміщенні (в градусах Цельсія), вблизи зони течії існують області високої температури (до 150⁰С і вище), що викликає фазові флуктуації частотних компонент широкополосного сигналу, пропорційні четвертій степені температури.

Все перераховані фактори приводять до формуванню складної картини взаємної когерентності сигналів, приймаємих парой рознесених мікрофонів.

Аналіз картини КМК дозволяє установити, що в окремих частотних діапазонах когерентність сигналів достатньо висока ($\gamma_{xy}^2(f) > 0,8$). Очевидно, при оцінці ВКФ, а потім і TDOA по положенню максимуму ВКФ саме області високої когерентності вносять основний вклад в формування ефективної статистичної оцінки. Назовемо ці області областями локальної когерентності (Local Coherence Area – LCA) або «окнами когерентності» по аналогії з «окнами прозорості» в атмосферній оптиці і розповсюдженні радіоволн [9].

Сформулюємо алгоритм локально-когерентної обробки сигналів для оцінки TDOA.

Шаг 1. Для кожної пари мікрофонних датчиків розрахувати функцію КМК $\gamma_{xy}^2(f)$ во всем анализируемом диапазоне частот.

Шаг 2. Оцінити $\max_f \gamma_{xy}^2(f)$. Якщо $\max_f \gamma_{xy}^2(f) < 0,8$, то Вихід. В случае общей низкой когерентності на парі мікрофонів, цю пару слід виключити з подальшого розгляду, оскільки від неї не можна очікувати якісної оцінки TDOA.

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

Шаг 4. Для функції КМК визначити області локальної когерентності («окна когерентності»), т.е. частотні області $(f_n, f_b)_k$, де виконується умова $\gamma_{xy}^2(f) > 0,8$, $k = 1, \dots, N_{LCA}$, де k - номер окна когерентності, N_{LCA} - загальне число окон когерентності в анализируемом частотном диапазоне, $(f_n, f_b)_k$ - відповідно нижня і верхня частотна границя k -го окна.

Шаг 5. Якщо $(f_b - f_n)_k < 200$ Гц, виключити окно с номером k из дальнейшего рассмотрения, ввиду его малой ширины.

Шаг 6. Для всіх виявлених N_{LCA} окон когерентності синтезувати полосові фільтри с частотами среза $(f_n, f_b)_k$. Поскольку для оцінки TDOA фільтр повинен мати максимально лінійну

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 $\hat{\tau}_{ij}^{(k)} = \arg \max_{\tau \in T} \hat{R}_{ij}(\tau)$.

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.

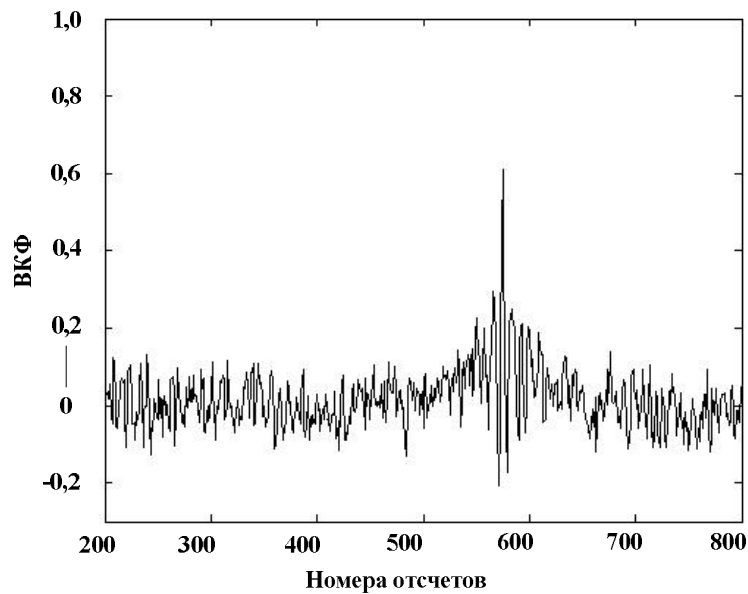


Рис.3. Взаимно-корреляционная функция для пары сигналов без учета их когерентности.

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:

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

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.

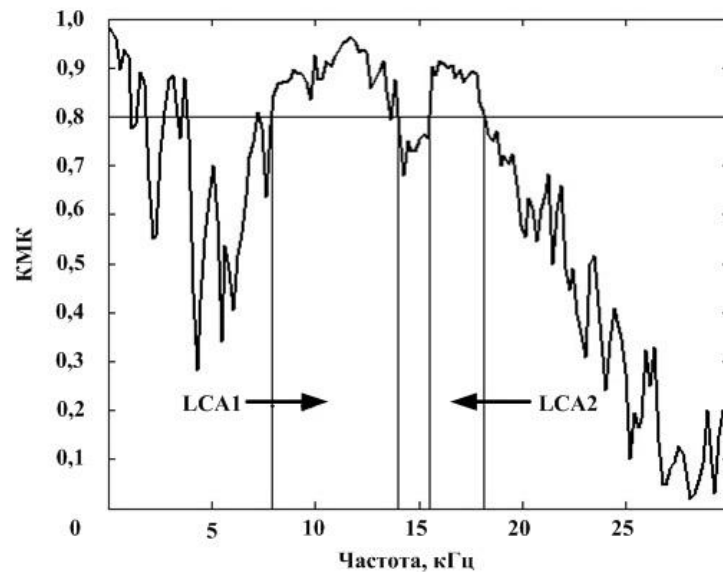


Рис.4. Области локальної когерентності для експериментального прикладу.

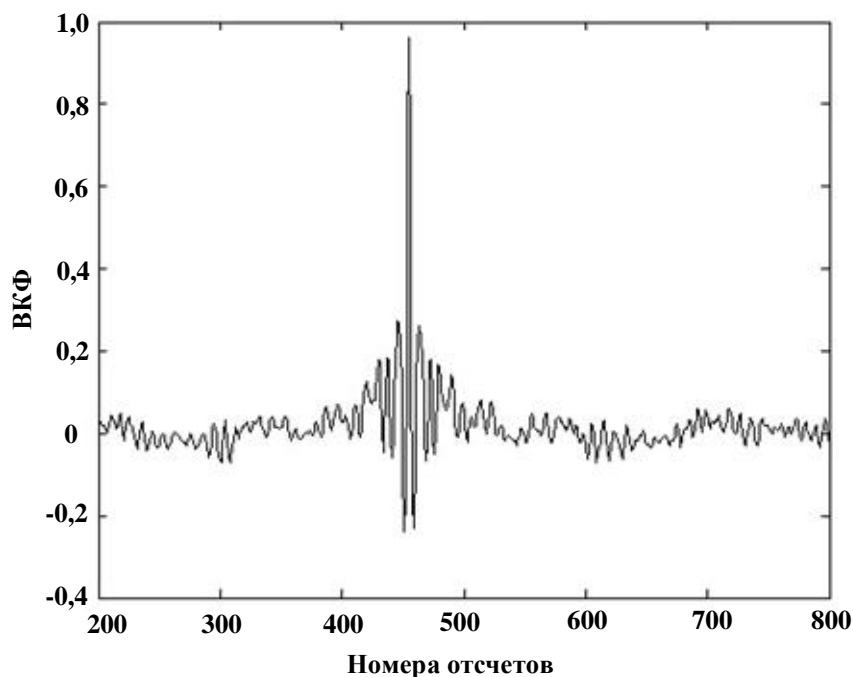


Рис.5. Взаємно-кореляційна функція після фільтрації сигналів в окні когерентності LCA1(7960-14150)Гц.

Після фільтрації параметри в першому окні прозорості показателі якості оцінки ВКФ стали такими: $bias(\Delta\tau_{ij})=452-498=-46$ і $FF=2,11\%$. Усереднена по двом окнам когерентності оцінка TDOA $\bar{\tau}_{ij}=518$ (напомним, що істинне значення затримки рівно $\Delta\tau_{ij}=498$ отсчетов). Предложена локально-когерентна обробка проведена для всіх пар, утворених вісьмою мікрофонами. При цьому число окнів когерентності змінювалось від двох (для пар найбільш віддалених мікрофонів) до п'яти (для пар близько розташованих мікрофонів). В таблиці 1 приведені оцінки координат течі, отримані прямим путем і з застосуванням локально-когерентної обробки.

Таблица 1
 Сравнительный анализ точности оценивания координат течи

| 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% |
| y | 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% |

Анализ таблицы 1 показывает, что точность оценивания координат течи при локально-когерентной 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.
2. 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.
3. 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.
7. 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.
8. 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.: Гидрометеоздат, 1989. – 286 с.
11. 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.