

УДК 004.73(042.4)

Булаковская А.А., аспирант; Харлай Л.А., преподаватель

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ В КОМПЬЮТЕРИЗОВАННОЙ СИСТЕМЕ МНОГОПОЗИЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ

**Bulakovs'ka A.O., Kharlay L.O. Mathematical models of signals and interference in the computerised system for multi-site detecting acoustic noise.** The analysis of basic instrumental methods for determining leaks in pipelines: acoustic and correlation was developed. It is shown that the correlation leak detectors have relatively high operational and technical characteristics of the mathematical model of acoustic noise signals arising from the expiry of a liquid or gas through a defect of the pipeline, which is under pressure. The principal difference from the existing models is to clarify the spatial frequency characteristics of the model useful and interfering signals, in particular the spatial coherence intervals, loss factors and noisy data.

**Keywords:** computerised system, multi-site detecting acoustic noise, correlation leak detectors, spatial coherence intervals, noisy data, Radon Transform

**Булаковська А.О., Харлай Л.О. Математичні моделі сигналів і завад в комп'ютеризованій системі багатопозиційного виявлення акустичних шумів.** Проведено аналіз основних інструментальних методів визначення місць витоків в трубопроводах: акустичного і кореляційного. Розроблено математичну модель акустичних шумових сигналів, що виникають при виділенні рідини або газу з наскрізного дефекту трубопроводу. Принциповою відмінністю від існуючих моделей є уточнення просторово-частотних характеристик моделі корисних і перешкоджаючих сигналів, зокрема, інтервали просторової когерентності, коефіцієнти втрат і зашумлення даних.

**Ключові слова:** комп'ютеризована система, багатопозиційне виявлення акустичних шумів, кореляційний шукач витоків, інтервал просторової когерентності, зашумлення даних, перетворення Радона

**Булаковская А.А., Харлай Л.А. Математические модели сигналов и помех в компьютеризованной системе многопозиционного обнаружения акустических шумов.** Проведен анализ основных инструментальных методов определения мест утечки в трубопроводах: акустического и корреляционного. Разработана математическая модель акустических шумовых сигналов, возникающих при истечении жидкости или газа из сквозного дефекта трубопровода. Принципиальным отличием от существующих моделей является уточнение пространственно-частотных характеристик модели полезных и помеховых сигналов, в частности, интервалы пространственной когерентности, коэффициенты потерь и зашумление данных.

**Ключевые слова:** компьютеризованная система, многопозиционное обнаружение акустических шумов, корреляционный течеискатель, интервал пространственной когерентности, зашумление данных, преобразование Радона

### Введение

Определение мест утечек жидкости из трубопроводов под давлением является серьезной проблемой, особенно для скрытых трубопроводов [1]. В этом случае приходится применять методы дистанционного зондирования с комбинированным (линейным и угловым) сканированием датчиков акустических шумов.

Для синтеза системы обнаружения-измерения таких сигналов необходимо применять методы теории вероятностей и математической статистики. Поставленная задача осложняется наличием помех, шумов разного характера, неоднородностей среды распространения сигнала. По существу, это задача обнаружения случайного сигнала на фоне случайных помех и шумов. Математическое описание случайных сигналов и помех сводится к определению их статистических характеристик и обоснованному выбору вероятностных распределений, которыми наиболее адекватно описываются выборки данных на входах датчиков.

Существует два основных инструментальных метода определения мест утечки в трубопроводах: акустический и корреляционный. Корреляционные течеискатели имеют достаточно высокие эксплуатационно-технические характеристики:

- высокую чувствительность, т.е. способность выявлять малые утечки;
- высокую точность определения местоположения утечек;
- высокую надежность результатов при определении мест утечек;
- независимость результатов от глубины прокладки трубопроводов;
- высокую помехоустойчивость при определении мест утечек;
- высокую производительность проверки трубопроводов.

Наибольшую информативность для определения мест утечек имеют функции когерентности и взаимной корреляции [2, 3]. Эти функции имеют существенные различия для случаев отсутствия и наличия утечек: в первом случае они не имеют выраженных областей выбросов, а во втором такие выбросы наблюдаются. Функция когерентности является, по существу, взаимной спектральной плотностью принимаемых сигналов. С ее помощью оценивается ширина спектра сигнала утечки, что позволяет сделать обоснованный выбор полосы анализа для оценивания функции взаимной корреляции.

В работе [4] рассмотрен алгоритм восстановления изображения по точно известной функции  $G_k(x_k, y_k) = G(\rho_k, \theta_k)$ . Практически проекционные данные всегда искажены помехами и шумами.

Для получения оптимального решения необходимо разработать математическую модель входных воздействий, которая адекватно отражает реальную ситуацию. На основе этой модели можно разработать метод обнаружения-измерения и построить структурные схемы устройств. Данной проблеме и посвящена представленная работа.

### **Постановка задачи**

Рассматривается линейная система обнаружения, состоящая из  $M$  пассивных датчиков (приемников), на входы которых поступают полезный сигнал и  $L$  мешающих сигналов (Рис. 1). Пусть датчики расположены вдоль оси  $X$ . В каждом датчике имеется приемная антенна с диаграммой направленности (ДН)  $G(\phi, \theta)$ . Обозначим ширину ДН на уровне половинной мощности по оси  $X$  через  $\Delta\phi_{0,5}$ , по оси  $Y$  через  $\Delta\theta_{0,5}$ . Предполагается, что диапазон  $\phi_{\min} \dots \phi_{\max}$  углов прихода сигналов от источника на любой из датчиков лежит в пределах  $\Delta\phi_{0,5}$ . Также положим, что координата  $x_s$  излучающего источника лежит в пределах  $[x_1, x_n]$ , где  $x_i, i = \overline{1, M}$  – координаты приемников.

Сигналы от каждого датчика поступают по линиям передачи данных в устройство совместной обработки. В датчиках и линиях передачи данных имеются внутренние шумы. Степень пространственной когерентности полезных и мешающих сигналов зависит как от характеристик источников, так и от геометрических соотношений в системе [2, 3].

На рис. 1. изображена схема возможного размещения датчиков системы мониторинга трубопроводов, размещенных под землей или под водой.

Наибольшую информативность для определения мест утечек имеют функции когерентности и взаимной корреляции. Эти функции имеют существенные различия для случаев отсутствия и наличия утечек: в первом случае они не имеют выраженных областей выбросов, а во втором такие выбросы наблюдаются. Функция когерентности является, по существу, взаимной спектральной плотностью принимаемых сигналов. С ее помощью оценивается ширина спектра сигнала утечки, что позволяет сделать обоснованный выбор полосы анализа для оценивания функции взаимной корреляции.

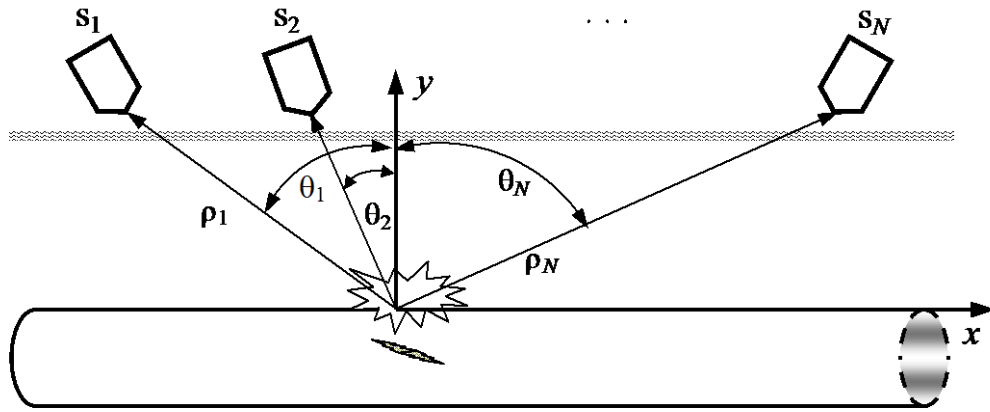


Рис. 1 Схема системи обнаружения источника акустических шумов

Для получения количественных оценок функций когерентности целесообразно применять методы теории частичной когерентности [4]. Если излучаемый сигнал  $s(t)$  существует на интервале от  $-T$  до  $T$ , то его преобразование Фурье  $S(T, \nu)$  удовлетворяет уравнению Гельмгольца  $\nabla^2 S(T, \nu) + k^2 S(T, \nu) = 0$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны. Тогда формальное решение этого уравнения относительно двух точек приема сигнала  $r_1$  и  $r_2$  имеет вид

$$S(r_i, T, \nu) = k_1(r_i, \nu)S(P_1, T, \nu) + k_2(r_i, \nu)S(P_2, T, \nu), \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – значения мощностей сигналов в точках  $r_1$  и  $r_2$ .

Используя уравнение (1), можно вычислить взаимный спектр мощности  $I(P_1, P_2, \nu)$ , который, по существу, представляет собой функцию взаимной (частичной) когерентности принимаемых сигналов для случаев наличия и отсутствия утечек.

При комбинированном сканировании датчиков задача оценивания спектральных и корреляционных характеристик принимаемых шумовых сигналов усложняется: вместо дискретного преобразования Фурье необходимо применять дискретное веерное преобразование Радона [5]. При этом пространственный спектр поля, рассеянного источником шума, представляет собой набор пространственных частот, которые определяются величинами соответствующих углов  $\theta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  (см. рис. 1).

Для рассматриваемой задачи вполне адекватно отражает реальную ситуацию модель аддитивной смеси изображения источника акустического шума и посторонних шумовых источников [6]:

$$G(f_{xk}, f_{yk}) = G(f_{xk}, f_{yk}) + G_n(f_{xk}, f_{yk}), \quad (2)$$

где  $G_n(f_{xk}, f_{yk}) = [V(f_{xk}, f_{yk})V^*(f_{xk}, f_{yk})]^{1/2} + N_0^{1/2}$ ;  $V(f_{xk}, f_{yk})$  – пространственный спектр точечных и пространственно-распределенных источников помеховых сигналов;  $N_0$  – спектральная плотность  $\delta$ -коррелированных пространственных шумов (шумов атмосферы, космоса, земли, внутренних шумов приемников и др.).

Расширение диапазона пространственных частот в спектре является достоинством, т.к. при этом уменьшается влияние артефактов и снижается общий уровень боковых лепестков передаточной функции источника шума. Однако из-за непрерывного изменения формы двумерного спектра пространственных частот усложняется алгоритм обработки информации. Практически нереальной является попытка разработки алгоритма получения томографического изображения во всей зоне обзора из-за чрезвычайно высоких требований к

скорости обзора, быстродействию вычислителей и пропускной способности линий передачи данных. Поэтому для многопозиционного обнаружителя-измерителя координат источника акустического шума целесообразно разрабатывать режим томографической обработки для отдельного элемента пространственного разрешения.

### Математическая модель сигнальной и мешающей томографической информации в частотной и пространственной областях

Томографическая обработка информации возможна как в частотной, так и в пространственной областях. При обработке в частотной области, строго говоря, сечение пространственного спектра под некоторым углом  $\theta_k = \varphi_k$  есть двумерное преобразование Фурье от проекции плотности рассеяния под углом  $\varphi_k$  или одномерное преобразование Фурье в системе координат  $\{x_{\theta k}, y_{\theta k}\}$  вдоль координаты  $y_{\theta k}$ , повернутой относительно оси ординат  $Y$  на угол  $\theta_k$ . Однако, если для реального рассеиваемого акустического шума выполняется условие квазимонохроматической аппроксимации  $\Delta f / f_0 \ll 1$ , где  $\Delta f$  – ширина спектра шума,  $f_0$  – средняя частота шумового сигнала, можно приближенно считать, что результирующий принимаемый сигнал  $G_k(x_k, y_k)$  с направления  $\theta_k$  представляет собой функцию следующего вида:

$$G_k(x_k, y_k) = \begin{cases} g_{\text{прм}}(x_k, y_k) & \text{при } (x_k^2 + y_k^2)^{1/2} = 2/\lambda; \\ 0 & \text{при } (x_k^2 + y_k^2)^{1/2} \neq 2/\lambda, \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_k, y_k$  – проекции пространственной частоты спектра под углом  $\theta_k$  на оси  $f_x, f_y$  пространственно-частотной плоскости. Тогда общее выражение для пространственного спектра изображения при многопозиционном приеме запишется в следующем виде:

$$G_k(x_k, y_k) = G(f_{xk}, f_{yk}) = \sum_{k=1}^N g_k(x_k, y_k) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda \sec(\beta/2)} \left[ y_k \cos\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_k}{2}\right) - x_k \sin\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_k}{2}\right) \right] \right\} = \sum_{k=1}^N g_k(x_k, y_k) \exp \left\{ -j2\pi(f_{xk}x_k + f_{yk}y_k) \right\}, \quad (4)$$

где  $f_{xk} = 2 \sin\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_k}{2}\right) / \left[ \lambda \sec\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \right]$ ,  $f_{yk} = -2 \cos\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_k}{2}\right) / \left[ \lambda \sec\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \right]$  –

пространственные частоты спектра акустического шума, трансформированные при многопозиционном приеме. Коэффициент трансформации  $\sec^{-1}(\beta_k/2)$  зависит от угла  $\beta_k$  между направлениями лучей первого и  $k$ -го приемников.

Таким образом, в многопозиционной системе с узкополосными в обычном (частотном) смысле акустическими сигналами получаем набор томографических проекций источника на нескольких пространственных частотах, которые определяются величинами соответствующих углов  $\theta_k$ .

При обработке в частотной области в соответствии с выражениями (3 – 4) получаем совокупность точек в полярном растре, т.е. в координатах  $(\rho, \varphi)$ . Поэтому логично использовать интегральные преобразования также в полярных координатах, т.е. преобразования Радона [2, 7]. Как известно [8], операции над интенсивностями в полярных координатах осуществляются в рамках метода обратных проекций на основе свертки. Каждый набор проекций при использовании этого метода может обрабатываться независимо от остальных, что значительно упрощает построение алгоритма обработки.

Пусть пространственному спектру  $V(f_{xk}, f_{yk})$  источника помеховых сигналов соответствует стационарное случайное поле с автокорреляционной функцией  $R_V(\Delta x_k, \Delta y_k)$ :

$$R_V(\Delta x_k, \Delta y_k) = \mathfrak{R}_2^{-1} \{ V(f_{xk}, f_{yk}) V^*(f_{xk}, f_{yk}) \}, \quad (5)$$

где  $V^*(f_{xk}, f_{yk}) = V(-f_{xk}, -f_{yk})$ ;  $\mathfrak{R}_2^{-1} \{ \cdot, \cdot \}$  – символ двумерного обратного преобразования Радона.

Тогда выражение (5) для проекции двухпозиционного рассеянного в  $k$ -м направлении сигнала с учетом наличия шумов и помех запишется как

$$g_i(x_k, y_k) = \sum_{l=1}^L u_l k_{\sigma} \sqrt{2\sigma_l} \delta(x_0 - x_l, y_0 - y_l) \times \exp \left[ -jk_{\Delta}(\beta_{il})(x_l \bar{x}_k + y_l \bar{y}_k) \right] + \sum_{m=1}^M V_m(x_k, y_k) \delta(x_0 - x_l, y_0 - y_l) + N_{oi}. \quad (6)$$

Функции  $k_{\sigma}$  и  $k_{\delta}$  трактуются как ядра преобразования (6) по пространственным координатам.

Рассмотрим последовательность этапов обработки по методу обратных проекций [8]. Одномерное преобразование Фурье пространственного спектра  $G(f_x, f_y)$  по одной из пространственных частот (например,  $f_x$ ) имеет вид

$$g(x_k, f_{yk}) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f_x, f_y) \exp(-j2\pi f_{xk} x_k) df_x. \quad (7)$$

Выполняя преобразование Фурье по другой координате пространственной частоты  $f_y$ , получаем функцию изображения

$$g(x_k, y_k) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x_k, f_{yk}) \exp(-j2\pi f_{yk} y_k) df_y. \quad (8)$$

Перейдем в выражениях (7, 8) к полярным координатам в области пространственных частот:

$$g(x_k, y_k) = \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} G(\rho_k, \theta_k) |\rho| \exp[-j2\pi \rho \cos(\theta_k - \varphi_k)] d\rho, \quad (9)$$

где  $|\rho|$  – множитель перехода к полярным координатам (якобиан преобразования).

По существу, при переходе к полярным координатам в выражении (9) происходит переход от преобразования Фурье к преобразованию Радона.

Для построения устойчивых решений уравнения (9) необходимо модифицировать (регуляризовать) функцию окна:

$$k_c(\rho) = |\rho| k_p(\rho, \alpha), \quad (10)$$

где  $\alpha$  – параметр регуляризации, обычно выбираемый с учетом ошибок задания исходных данных [2]. В рассматриваемой задаче  $\alpha$  выбирается по энергетическим и спектральным характеристикам помех [2].

## Выводы

1. Применение томографических методов обработки акустических шумовых сигналов является радикальным средством повышения точности и разрешающей способности системы по пространственным координатам. Практические возможности метода и пределы разрешающей способности томографической многопозиционной системы обнаружения-измерения координат источников акустического шума ограничены лишь точностью систем синхронизации, навигационной привязки, пропускной способности линий передачи данных

и быстродействием вычислителей системы обработки.

2. Для разработки практически реализуемых алгоритмов томографической обработки выполнен анализ статистических характеристик пространственно-временных спектров (спектров пространственных частот) акустических шумов и разработана математическая модель аддитивной смеси полезных и мешающих сигналов. Учитывая характер этих спектров, необходимо соответствующим образом модифицировать традиционные алгоритмы компьютерной томографии.

3. Облик и конфигурацию системы (число датчиков-приемников, число и варианты размещения устройств совместной обработки, требования к быстродействию системы) планируется рассмотреть при проведении дальнейших исследований. Здесь отметим только, что при современном уровне развития универсальных и специализированных вычислителей (в частности, процессоров быстрых спектральных преобразований, программируемых логических интегральных схем и программируемых логических матриц) наиболее просто можно реализовать алгоритмы многопозиционной компьютерной томографии методами обратных проекций на основе свертки.

### **Литература**

1. Bulakovska Anna. Computerized acoustic system of detection and localization cracks in pipelines / Anna Bulakovska / Матеріали науково-технічної конференції СПТЕЛ-2013 (30 жовтня – 2 листопада 2013 р., м. Львів). – 4 с.

2. Виноградов Н.А. Применение принципов реконструктивной вычислительной томографии в МП РЛС и синтез алгоритмов цифровой обработки информации / Н.А. Виноградов // Тезисы доклада VI всесоюзной конференции "Голография-90". – 18 – 20 сентября 1990 г. – Витебск. – С. 24-25.

3. Beran M.J. Theory of partial coherence / M.J.Beran, G.B. Parrent. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1964. – 193 PP.

4. Булаковская А.А. Алгоритм многопозиционного обнаружения источника акустического шума по смещенному сегменту пространственного спектра / А.А. Булаковская // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – № 5(39). – С. 98-102.

5. Хелгасон С. Преобразование Радона / С. Хелгасон. – Москва : Мир, 1983. – 152 с.

6. Пономаренко О.В. Комп'ютеризована система виявлення свищів у продуктопроводах. Дис... канд. техн. наук. – Київ : НАУ, 2011. – 114 С.

7. Belkin G. Discrete Radon Transform / G. Belkin // IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing. – February 1987. – Vol. ASSP-35, No. 2. – PP. 162-172.

8. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннел. – Москва : Мир, 1989. – 336 с.

### *Автор статті*

**Булаковська Анна Олександрівна** – завідувач лабораторії аналізу та обробки інформації, Київський коледж зв'язку, Київ, Україна. Тел. +380 (67) 985 21 90. E-mail: ryhz@yandex.ua

**Харлай Людмила Олексіївна** – голова циклової комісії інформаційних мереж зв'язку, Київський коледж зв'язку, Київ, Україна. Тел.: +380 (99) 012 33 23. E-mail: harlay@i.ua.

### *Authors of the article*

**Bulakovska Anna Oleksandrivna** – head of laboratory of analysis and treatment of information, Kiev college of communication, Kyiv, Ukraine. Tel. +380 (67) 985 21 90. E-mail: ryhz@yandex.ua

**Kharlay Lyudmyla Oleksiyivna** – head of department of informative communication networks, Kiev college of communication, Kyiv, Ukraine. Tel.: +380 (99) 012 33 23. E-mail: harlay@i.ua

Дата надходження в редакцію: 12.01.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М.А. Виноградов