

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДОНА В СИСТЕМАХ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ

Рассмотрена задача применения теории частичной когерентности и дискретных интегральных преобразований к задаче обнаружения местоположения источников акустических шумов, вызванных сквозными дефектами в трубопроводах. Проанализированы требования к точности восстановления пространственного распределения акустических шумов в зависимости от размеров и формы области съема информации. Даны рекомендации по снижению влияния артефактов, возникающих из-за ограниченности наборов данных.

### Введение

Определение мест утечек жидкости из трубопроводов под давлением является серьезной проблемой, особенно для скрытых трубопроводов [1]. В этом случае приходится приме-

нять методы дистанционного зондирования с комбинированным (линейным и угловым) сканированием датчиков акустических шумов (рис. 1).

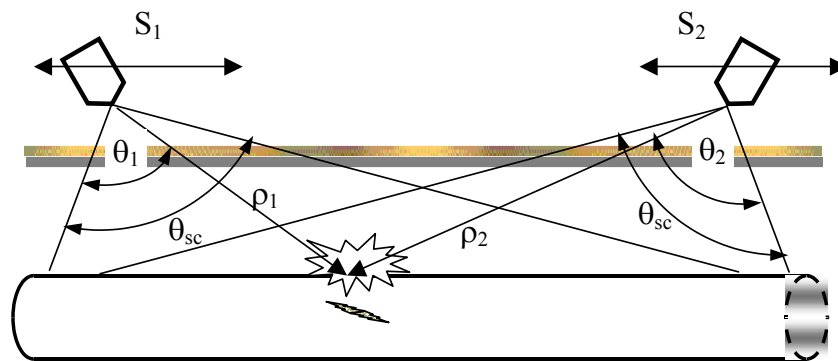


Рис. 1. Схема комбинированного сканирования.

Датчики  $S_1$  и  $S_2$  сканируют в секторе  $\theta_{sc}$  и перемещаются по горизонтали.

$\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы визирования дефекта,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – расстояния от датчиков до дефекта,

$\theta_{sc}$  – сектор сканирования

Существует два основных инструментальных метода определения мест утечки в трубопроводах: акустический и корреляционный.

Акустические (шумомерические) технологии и системы, которые базируются на прямом измерении звукового шума, генерируемого утечкой, могут применяться на коротких трубопроводах с неглубокой прокладкой по следующим причинам:

- глубина прокладки трубопроводов не должна превышать 1,5 м - при больших глубинах надежность результатов резко падает;

- акустическая помехоустойчивость мала, поскольку шумомерические течеискатели для работы требуют, как правило, чтобы уровни внешних шумов были намного меньше уровней звукового шума утечки; для работы с шумомерическими течеискателями необхо-

дима практически полная тишина, что в реальных условиях труднодостижимо.

Корреляционные течеискатели имеют достаточно высокие эксплуатационно-технические характеристики:

- высокую чувствительность, т.е. способность выявлять утечки с низким уровнем шума;

- достаточную точность и надежность результатов измерения независимо от глубины прокладки трубопровода;

- высокую скорость поиска утечек при проверке трубопроводов.

### Уравнение частичной когерентности акустического шума

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.

Для получения количественных оценок функций когерентности целесообразно приме-

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

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.

$$Rf = R(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) dx dy = \quad (2)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(\rho \cos \theta - r \sin \theta, \rho \sin \theta + r \cos \theta) dr;$$

- и обратное

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\pi} \tilde{f}(\rho, \theta) e^{2i\rho(x \cos \theta + y \sin \theta)} d\theta |\rho| d\rho. \quad (3)$$

На рис. 2 изображена система координат преобразования Радона.

При этом преобразование Радона является не круговым, а сегментно-веерным и рассчитывается в угловом секторе  $\theta_{sc}$ . С увеличением расстояния  $\rho$  и при условии сохранения требуемой точности размеры сегмента изменяются (рис. 3).

Для реализации алгоритма дискретного преобразования Радона необходимо формировать линейную выборку значений  $x$  и  $y$ :

$$x = x_m = x_{\min} + m\Delta x, \quad m = \overline{0, M-1}; \quad (4)$$

$$y = y_n = y_{\min} + n\Delta y, \quad n = \overline{0, N-1}.$$

$$Rf = R(\rho_k, \theta_k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(\rho_m \cos \theta_m - r_n \sin \theta_n, \rho_m \sin \theta_m + r_n \cos \theta_n) \quad (5)$$

нить методы теории частичной когерентности [2]. 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:

### Применение преобразования Радона при комбинированном сканировании

При комбинированном сканировании датчиков задача оценивания спектральных и корреляционных характеристик принимаемых шумовых сигналов усложняется. Для вычисления координат источника утечки вместо преобразования Фурье необходимо применять преобразование Радона [3]:

- прямое

В общем случае  $M \neq N$ .

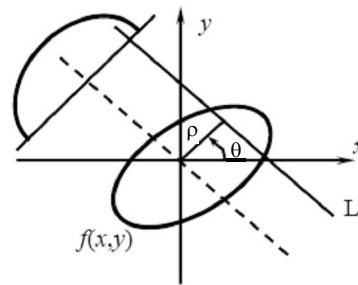


Рис. 2. Система координат преобразования Радона

Пусть  $x_k = \rho_k \cos \theta_k$ ,  $0 \leq k \leq M-1$ ,  $y_k = \rho_k \sin \theta_k$ ,  $0 \leq k \leq N-1$ . Тогда в выражении (2) интеграл заменяется суммой вида:

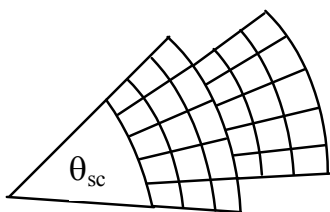


Рис. 3. Сектор сканирования датчиков и области вычисления преобразования Радона

В литературе [4, 5 и др.] отмечается, что наиболее эффективным способом реконструкции трехмерных объектов по их двумерным проекциям является замена преобразования Радона преобразованием Фурье. Предлагается применять один из алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Однако при этом не учитывается, что при веерном съеме информации точность и разрешающая способность измерительной системы меняется в широких пределах. Кроме того, из-за усечения анализируемой области могут возникать артефакты, которые могут быть приняты за истинные сиг-



Рис. 4. Пространственное распределение плотностей акустического шума

Для устранения артефактов можно применять, в первую очередь, сглаживание пространственной функции распределения интенсивности, которая для преобразования Радона, как известно, имеет вид зубца Кремлевской стены. В качестве сглаживающей функции наиболее целесообразно применять усеченную гауссовскую функцию [6], ширина которой на уровне 0,1 составляет примерно 0,3 от ширины упомянутого зубца.

### Выводы

При поиске сквозных дефектов трубопроводов, к которым нет непосредственного доступа, необходимо применять методы дистанционного зондирования. Теоретической основой таких методов может служить теория частичной когерентности и реконструктивная вычислительная томография по данным комбинированного (линейного и веерного) сканирования.

### Список литературы

1. Пономаренко А.В. Рациональный выбор параметров и структуры корпоративных ин-

налы. На рис. 4 изображена картина распределения акустических шумов для схемы съема данных, изображенной на рис. 1. В качестве источника акустического шума взято круглое отверстие единичного диаметра. Угловой размер сектора сканирования  $\theta_{sc} \pm 30^\circ$  относительно центра источника акустического шума; размер области съема данных составлял примерно  $32 \times 32$  единицы. В качестве моделей шума использовались отрезок так называемого «розового» шума со спектральной плотностью  $S(f) = a/f$ ,  $a = \text{const}$ ,  $f_{\min} > 0$  и «синего» шума:

$$(S(f) = af, a = \text{const}, f_{\min} < f < f_{\max}).$$

Установлено, что в случае «синего» шума артефакты возникают чаще (один из них показан на рис. 4). «Синий» шум наблюдается, когда дефект имеет рваные, заостренные края, а скорость истечения жидкости сравнительно велика (до 50%...75% скорости звука в воздухе).

формационно-вычислительных сетей для трубопроводных систем // Проблемы інформатизації та управління 3 (31) – 2010. – С. 132–138.

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

3. Хелгасон С. Преобразование Радона. – М.: Мир, 1983. – 152 с.

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

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

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