

Технічні науки

УДК 681.518.5

Кримська Анна Олександрівна

кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник

Інститут загальної енергетики НАН України

Krymska Anna

Candidate of Engineering Sciences, Junior Researcher

General Energy Institute of the NAS of Ukraine

**ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ
ТОМОГРАФІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ ПРОТЯЖНИХ ТА
РОЗГАЛУЖЕНИХ ТРУБОПРОВОДІВ
FEATURES OF THE APPLICATION OF COMPUTER TOMOGRAPHY
METHODS FOR DETECTING ANOMALIES OF CONTINUOUS AND
BRANCHED PIPELINES**

Анотація. Наведені особливості застосування методів комп'ютерної томографії для виявлення аномалій (свищів, витоків) протяжних та розгалужених трубопроводів, розташованих під землею або під водою. При застосовуванні методів дистанційного зондування з лінійним, кутовим або комбінованим (лінійним і кутовим) скануванням сенсорів акустичних шумів показано можливість застосування прямого і зворотного перетворення Радона для обчислення координат джерела витoku. Зазначено особливості та способи отримання томографічних зображень. На підставі отриманих результатів показано, що застосування томографічних методів опрацювання акустичних шумових сигналів є перспективним способом підвищення точності і роздільної здатності систем контролю за просторовими координатами.

Ключові слова: трубопровідний транспорт, перетворення Радона, акустична томографія.

Summary. Features of the use of computer tomography methods for detecting anomalies (fistulas, leaks) of long and branched pipelines located underground or under water are given. When using remote sensing methods with linear, angular or combined (linear and angular) scanning of acoustic noise sensors, the possibility of using direct and inverse Radon transformation to calculate the coordinates of the leak source is shown. Specified methods and features of obtaining tomographic images. On the basis of the obtained results, it is shown that the use of tomographic methods for processing acoustic noise signals is a promising way to increase the accuracy and resolution of spatial coordinate control systems.

Key words: pipeline transport, Radon transformation, acoustic tomography.

Постановка проблеми. Однією з важливих та актуальних задач забезпечення ефективного функціонування трубопровідного транспорту, підвищення надійності та безпеки транспортування газо- та нафтопродуктів є якнайшвидше виявлення, локалізація та ліквідація витоків (свищів) у трубопроводах. З цією метою створюються спеціалізовані комп'ютеризовані системи контролю та управління параметрів та стану трубопроводу, які дозволяють аналізувати та керувати процесами транспортування рідких або газоподібних продуктів, виявляти такі аварійні ситуації як відмова обладнання, пошкодження трубопроводів, витік продуктів, що транспортуються тощо [1]. Системи контролю параметрів магістральних трубопроводів проектуються з урахуванням таких факторів, як великий територіальний розподіл об'єктів контролю, наявність вибухонебезпечних зон, особливостей ландшафту та необхідності

постійного моніторингу, збору та аналізу даних. До параметрів, що підлягають контролю, відносяться як параметри продукту, що транспортується, так і параметри самого трубопроводу. При пошуку крізних дефектів трубопроводів, до яких немає безпосереднього доступу, необхідно застосовувати методи дистанційного зондування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для експлуатаційного контролю герметичності трубопроводів наразі широко застосовується методи акустичного течешування [1-3]. Виявлення витоків, що описане у роботах авторів [4-6] засноване, як правило, на аналізі кореляційно-спектральних характеристик акустичних шумових сигналів, що генеруються витоків рідини через течу в об'єкті контролю. Однак, запропоновані методи вирізняються складністю акустичної обстановки при їхній реалізації – конструкцією та безпосереднім доступом до об'єкту контролю, різноманітністю фізичних явищ, що супроводжують утворення сигналів витоків в наскрізному дефекті та їх подальше поширення об'єктом контролю, наявністю акустичних завад.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Теоретичною основою дистанційних методів контролю стану трубопроводів може служити теорія часткової когерентності і реконструктивна обчислювальна томографія за даними комбінованого (лінійного і віялового) сканування [1; 7; 8]. Метою статті є аналізування особливостей застосування методів комп'ютерної томографії для виявлення дефектів протяжних та розгалужених трубопроводів, розташованих під землею або під водою.

Виклад основного матеріалу. Застосування методів комп'ютерної томографії для виявлення аномалій протяжних та розгалужених трубопроводів, має ряд специфічних особливостей. В першу чергу, це необхідність застосовувати методи дистанційного зондування з лінійним, кутовим або комбінованим (лінійним і кутовим) скануванням сенсорів акустичних шумів при моніторингу прихованих трубопроводів. Іншою

особливістю є те, що при активному скануванні один з сенсорів (наприклад, той, що знаходиться посередині лінії сенсорів) випромінює зондуєчий акустичний сигнал, інші приймають розсіяні сигнали від плями рідини або газу в місці витoku продукту транспортування. При пасивному скануванні усі сенсори приймають акустичні шумові сигнали, викликані витоком рідини (або газу) з трубопроводу. Просторові спектри сигналів, що приймаються, в обох випадках є вузькосмуговими, оскільки геометричні розміри отворів (наскрізних дефектів, свищів) досить малі. При активному скануванні частотний спектр розсіяного сигналу є згортокою спектрів зондуєчого сигналу та акустичного шуму, обумовленого витоком з отвору. Зазвичай ширина частотного спектру зондуєчого сигналу менше, ніж ширина частотного спектру власного акустичного шуму витoku з отвору. На рис. 1 показано схему комбінованого сканування ділянки магістрального трубопроводу та приклад розміщення сенсорів.

Сенсори S_1, S_2, \dots, S_N сканують в секторі сканування θ_{sc} і переміщуються по горизонталі, при цьому θ_1 і θ_N є кутами візування дефекту, а ρ_1 і ρ_N – відстані від сенсорів до дефекту [7; 9].

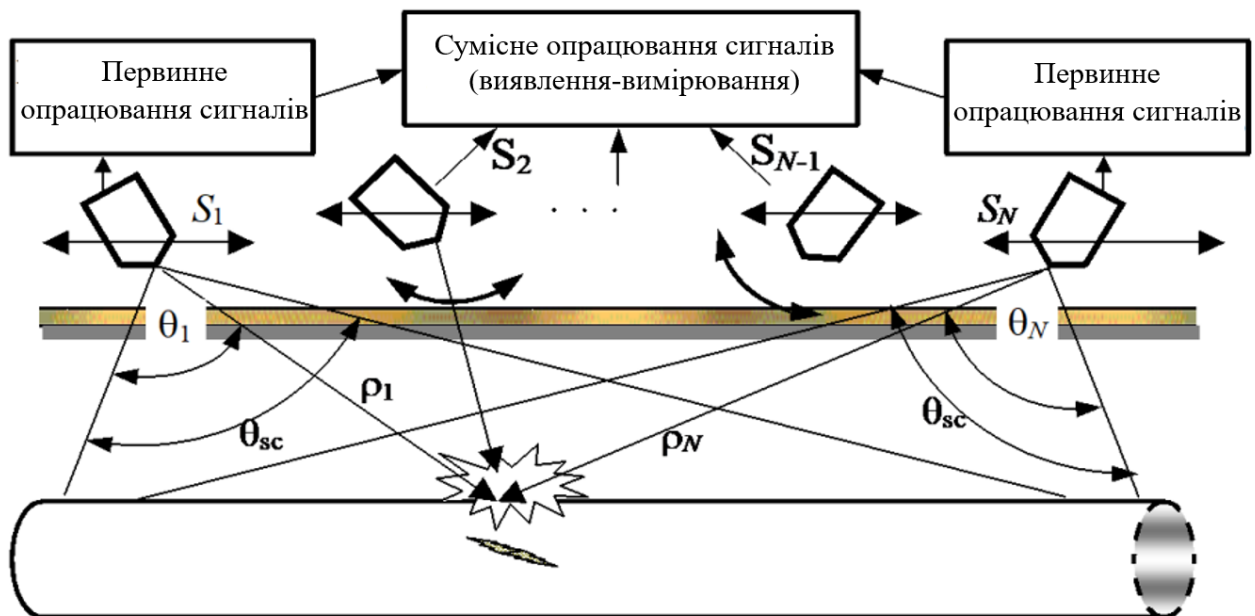


Рис. 1. Схема комбінованого сканування з сумісним опрацюванням інформації

При комбінованому скануванні задача оцінювання просторово-спектральних і кореляційних характеристик прийнятих шумових сигналів змінюється. Тому для обчислення координат джерела витoku застосовують як пряме, так зворотне перетворення Радона:

$$Rf = \tilde{f}(\rho, \theta) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) dx dy = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f(\rho \cos \theta - r \sin \theta, \rho \sin \theta + r \cos \theta) dr ; \quad (1)$$

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

При секторному скануванні сенсорів перетворення Радона є сегментно-віяловим і розраховується в кутовому секторі θ_{sc} . Із збільшенням відстані ρ за умови збереження необхідної точності розміри сегменту змінюються [7].

Для реалізації алгоритму дискретного перетворення Радона формують лінійну вибірку значень x, y [7]:

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

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

У загальному випадку $M \neq N$. Якщо виразити $y_k = \rho_k \sin \theta_k, 0 \leq k \leq N - 1$, тоді інтеграл у (1) прямого перетворення Радона можна замінити сумою виду:

$$Rf = \tilde{f}(\rho_k, \theta_k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(\rho_m \cos \theta_m - r_n \sin \theta_n, \rho_m \sin \theta_m + r_n \cos \theta_n) \quad (3)$$

Відомо, що ефективним способом реконструкції тривимірних об'єктів за їхніми двомірними проекціями є заміна перетворення Радона перетворенням Фур'є. При цьому слід враховувати, що при віяловому скануванні точність і роздільна здатність вимірювальної системи об'єктивно міняється в залежності від дальності, зокрема, інформація $F(u, v), u = x \cos \theta, v = y \sin \theta, \rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ задана в частотній області нерівномірно. Низькі просторові частоти визначені в більшій кількості точок спектральної площині, а високі – в меншій. При цьому щільність

завдання спектральних компонент зменшується в залежності від $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ по закону $1/\rho$. Для відновлення функції перед виконанням двовимірного зворотного Фур'є-перетворення необхідно виконати попередню фільтрацію сумарного спектра всіх проекцій функцією $|\rho|$.

При акустичній томографії збір інформації з різних частин зони покриття здійснюється послідовно. Зображення відновлюється також послідовно під час збирання інформації в кожному елементі зони покриття. Основною відмінною рисою опрацювання інформації є залежність просторової частоти спектральних компонентів кожної проекції від кута пошуку цієї проекції. Для отримання томографічних зображень використовують такі способи [10]:

- обертання об'єкта вздовж своєї осі за допомогою фіксованого передавача та приймального сенсора (сенсорів);
- обертання передавача і приймального сенсора (комплекту сенсорів) вздовж осі, яка проходить уздовж центру об'єкта;
- отримання деяких сигналів сенсорами, розташованими навколо об'єкта.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Застосування томографічних методів опрацювання акустичних шумових сигналів є перспективним способом підвищення точності і роздільної здатності системи за просторовими координатами. Практичні можливості методу і межі роздільної здатності томографічної багатопозиційної системи виявлення-вимірювання координат джерел акустичного шуму обмежені лише точністю систем синхронізації, навігаційної прив'язки, пропускної спроможності ліній передачі даних і швидкодією обчислювачів системи опрацювання, що в умовах стрімкого розвитку електроніки та телекомунікаційних систем відкриває перспективи їхнього широкого впровадження.

Література

1. Hsieh J. *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances*. 3rd edition. SPIE Press. 2015. 658 p.
2. Hu Z., Tariq S., Zayed T. A comprehensive review of acoustic based leak localization method in pressurized pipelines. *Mech. Syst. Signal Processing*. 2021. Vol. 161. [107994].
3. Glentis G., Angelopoulos K. Leakage detection using leak noise correlation techniques: overview and implementation aspects. *Proceedings of the 23rd Pan-Hellenic Conference on Informatics*. 2019.
4. Faerman V. A., Cheremnov A. G., Avramchuk V. S., Shepetovsky D. V. The leak location package for assessment of the timefrequency correlation method for leak location. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. Vol. 803. [012040]. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/803/1/012040>.
5. Владимирський О. А., Владимирський І. А. Просторовий і частотний кореляційні параметричні методи визначення координат витоків підземних трубопроводів. *Електронне моделювання*. 2021. 43(4). С. 22–36.
6. Владимирський О. А. Параметричні методи діагностування підземних трубопроводів з урахуванням багатохвильового поширення інформаційних сигналів. *Електронне моделювання*. 2019. 41(1). С. 03–18.
7. Булаковская А. А. Алгоритм многопозиционного обнаружения источника акустического шума по смещенному сегменту пространственного спектра. *Научные записки УНДІЗ*. 2015. № 5(39). С. 98 - 102.
8. Булаковская А.А. Синтез многопозиционного обнаружителя источника акустического шума по неполным и зашумленным данным. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2016. № 2. С. 70-76.

9. Булаковська А.О. Ієрархічна система комп'ютеризованого управління продуктопроводами. *Комп'ютерні системи і мережні технології: (CSNT-2017): X Міжнародної науково-технічної конференції*, 20-22 квітня 2017. С. 79-80.
10. Herman G. T. *Image Reconstruction from Projections: Fundamentals of Computerized Tomography* [ed. T. Gabor]. New York, NY : Academic Press, 2010. 297 p.

References

1. Hsieh, J. (2015). *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances*. 3rd edition. SPIE Press. 658 p.
2. Hu, Z., Tariq, S., Zayed, T. (2021). A comprehensive review of acoustic based leak localization method in pressurized pipelines. *Mech. Syst. Signal Processing, 161* [107994].
3. Glentis, G., & Angelopoulos, K. (2019). Leakage detection using leak noise correlation techniques: overview and implementation aspects. *Proceedings of the 23rd Pan-Hellenic Conference on Informatics*.
4. Faerman, V. A., Cheremnov, A. G., Avramchuk V. S., & Shepetovsky, D. V. (2017). The leak location package for assessment of the timefrequency correlation method for leak location. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803* [012040]. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/803/1/012040>.
5. Vladymyrskyi, O. A., Vladymyrskyi, I. A. (2021). Spatial and frequency correlation parametric methods for determining the coordinates of leaks in underground pipelines. *Elektronne modeliuвання*, 43(4), 22–36.
6. Vladymyrskyi, O. A. (2019). Creation of parametric methods for diagnosing underground pipelines taking into account the multi-wave propagation of information signals. *Elektronne modeliuвання*, 41(1), 03–18.

7. Bulakovska, A.O. (2015). Algorithm for multi-position detection of an acoustic noise source by a shifted segment of the spatial spectrum. *Science notes UNDIZ*, 5(39), 98-102.
8. Bulakovska, A.O. (2016). Synthesis of a multi-position acoustic noise source detector based on incomplete and noisy data. *Telecommunications and information technologies*, 2, 70-76.
9. Bulakovska, A.O. (2017). Hierarchical system of computerized management of product pipelines. *Computer systems and network technologies: (CSNT-2017): X International Scientific and Technical Conference*, 79-80.
10. Herman, G. T. (2010). *Image Reconstruction from Projections: Fundamentals of Computerized Tomography* [ed. T. Gabor]. New York, NY: Academic Press, 297 p.