

УДК 534.6.08
EDN: LDFJBZ

PACS: 06.



Трансмиссионная многоракурсная ультразвуковая томография температурных неоднородностей воздуха

Д. Я. Суханов, А. Халил

Предлагается метод ультразвуковой трансмиссионной томографии воздуха для получения изображений температурных неоднородностей. Система излучателей и приёмников размещается на окружности, что позволяет зондировать на проход и на отражение неоднородности среды, находящиеся внутри окружности. Зондирование проводится с помощью широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией. Предлагается восстанавливать изображение неоднородностей температуры воздуха методом пространственно-согласованной фильтрации в приближении однократного рассеяния. Восстановление распределения температуры осуществляется на основе вычисления пространственного распределения скорости звука по фазовым задержкам проходящего ультразвукового поля. Разработана экспериментальная установка для ультразвуковой томографии воздуха, работающая в диапазоне частот от 38 до 43 кГц. Экспериментальные исследования показали возможность восстановления распределения температуры воздуха.

Ключевые слова: трансмиссионная томография, распределение температуры, согласованная фильтрация, ММО.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-79-85

Введение

Определение неоднородности плотности и температурного распределения воздуха требуется при анализе работы систем теплоотвода различных устройств и оборудования, для исследования конвекционных потоков и эффективности систем охлаждения. Томографическое ультразвуковое зондирование воздуха позволяет решать данную задачу.

Трансмиссионное томографическое зондирование применяется для оценки свойств материалов. Во многих приложениях эта оценка может быть выполнена без разрушения объекта исследования, что называется неразрушающим контролем [1–3].

Неразрушающий контроль используется во многих приложениях, таких как медицина, производство, жидкостная и газовая промышленность, строительство и т. д. Существует множество методов неразрушающего контроля, таких как акустические [4, 5], электромагнитные [6] и лазерные методы [7, 8]. Томография позволяет исследовать внутренние характеристики материалов путем восстановления изображения распределения неоднородностей в интересующей области. Датчики в томографической системе распределены по поверхности исследуемой области, для визуализации внутренних неоднородностей, не нарушая исходное состояние материалов.

Суханов Дмитрий Яковлевич, профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Халил Амур, аспирант.

E-mail: amoon.khalil16@gmail.com

Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ).
Россия, 634050, г. Томск, Ленина пр-т, 36.

Статья поступила в редакцию 11.11.2022

После доработки 16.12.2022

Принята к публикации 24.01.2023

© Суханов Д. Я., Халил А., 2023

Ультразвуковой метод требует небольшого количества энергии для возбуждения преобразователя, а ультразвуковые сигналы могут быть оцифрованы с применением относительно низкочастотных аналого-цифровых преобразователей [9, 10].

Ультразвуковая техника используется для визуализации тканей человеческого тела уже более полувека. Ультразвуковая волна частично проходит, отражается, преломляется и рассеивается после прохождения через ткань. Изменяются такие свойства ультразвуковой волны, как скорость, давление, амплитуда, частота и время прихода волны [11, 12]. Анализ этих характеристик полезен для получения состояния характеристик ткани. Еще одним применением ультразвуковых методов является акустическая томография температуры [13–15]. В [13] предложен метод восстановления полей температуры и скорости с использованием радиальной базисной функции и метода переменных направлений множителей. В [14] был использован метод визуализации температурного поля, основанный на теории томографии светового поля. В [15] описан другой метод визуализации трехмерного распределения температуры и радиационных свойств участвующих сред на основе мультиспектрального светового поля.

В промышленности методы ультразвуковой томографии работают на частотах от 20 кГц до 10 МГц [15, 16]. Выбор частотной области зависит от конкретного приложения, проницаемости материалов, требуемого разрешения реконструированного изображения. Низкочастотные (длинноволновые) волны проникают глубоко в материалы, но имеют плохое пространственное разрешение. Высокочастотные (коротковолновые) волны генерируют изображения с высоким пространственным разрешением, но они сильнее затухают по сравнению с низкочастотными волнами и поэтому имеют ограниченную глубину проникновения [11, 12]. Диапазон частот в области медицины составляет 2–15 МГц.

Прямая и обратная задачи ультразвуковой томографии

Рассмотрим схему измерений, в которой излучатели и приемники распределены по

окружности радиуса α в плоскости XOY (рис. 1). Максимумы диаграмм направленности излучателей и приёмников направлены внутрь окружности, где находится исследуемая область. Приемники регистрируют рассеянные, отраженные и преломленные волны внутри исследуемой области. На рис. 1 показано расположение источников и приёмников. В качестве неоднородности среды рассматриваются области неравномерно нагретого воздуха, которая проявляется в изменении его плотности и скорости звука. Для идеально газа плотность зависит от температуры так: $\rho = P_0 \mu / (k_B T_K)$, где P – атмосферное давление, T_K – температура воздуха, k_B – постоянная Больцмана, $\mu = 4,9 \times 10^{-26}$ КГ – молекулярная масса для воздуха. Рассматривается следующая зависимость скорости звука от температуры: $c = \sqrt{(\gamma k_B / \mu) T_K}$, где $\gamma = 7/5$ – показатель адиабаты для воздуха [17].

Для рассматриваемых неоднородностей можно предположить, что наибольшее влияние на распространение волн оказывает изменение скорости звука. При этом скорость звука в пространстве меняется медленно относительно длины волны ультразвуковых волн. Поэтому приближённо, будем считать, что выполняется волновое уравнение для акустических волн с пространственной зависимостью скорости звука.

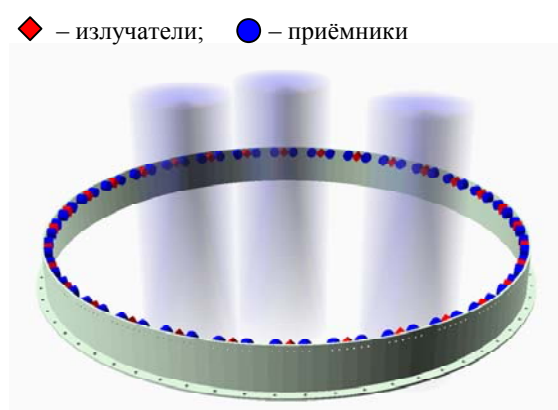


Рис. 1. Рассматриваемая схема томографического зондирования на основе множества излучателей и множества приёмников, размещённых на окружности

Учитывая, что источники являются точками, прямую задачу запишем с использованием волнового уравнения:

$$\Delta u_n(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_n(\mathbf{r}, t) = -\delta(\mathbf{r}, \mathbf{S}_n) f(t), \quad (1)$$

$$u_n(\mathbf{r}, t=0) = \frac{\partial}{\partial t} u_n(\mathbf{r}, t=0) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_n(\mathbf{r}, t) = 0$$

где $u_n(\mathbf{r}, t)$ – поле акустического давления внутри исследуемой области при работе n -го источника в момент t , $0 < t < T$; $\mathbf{S}_n = (x_n, y_n)$ – координаты n -го источника; $c(\mathbf{r})$ – скорость звука в исследуемой области; $f(t)$ – сигнал, генерируемый источниками; Δ – оператор Лапласа относительно $\mathbf{r} = (x, y)$. Обозначим функцией $U_n(\mathbf{r}, t)$ – поле источника, размещенного в точке \mathbf{S}_n в однородной среде.

Необходимо выбрать значение времени T таким образом, чтобы волны, дифрагировавшие на неоднородностях, успевали дойти до приёмников. Теоретически, чем больше время T , тем выше уровень сигнал/шум при восстановлении томографических изображений.

В данной работе рассматривается численное решение уравнения (1) методом конечных разностей во временной области [18, 19]. Для восстановления поля применим метод обращения времени [20, 21].

Обратное распространение измеренных сигналов так же моделируется с помощью уравнения (1), но вместо источников рассматриваются приёмники с сигналом обращённым во времени. При решении обратной задачи рассматриваем однородную среду с постоянной скоростью звука. Тогда (1) можно переписать следующим образом:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} W_n(\mathbf{r}, t) - \Delta W_n(\mathbf{r}, t) = \sum_m \delta(\mathbf{r}, \mathbf{R}_m) u_{n,m}(t), \quad (2)$$

$$W_n(\mathbf{r}, t=0) = \frac{\partial}{\partial t} W_n(\mathbf{r}, t=0) = 0$$

где $u_{n,m}(t) = u_n(\mathbf{R}_m, t)$ – сигнал в m -ом приёмнике при работе n -го излучателя в неоднородной среде; m -й приемник находится в точке $\mathbf{R}_m = (x_m, y_m)$.

Сравнение расчётного поля прямого распространения для однородной среды и поля обратного распространения для неоднородной среды позволяет сделать вывод о наличии фазовых или поглощающих неоднородностей. Разница в амплитуде указывает на поглощение в среде, а разность в фазе на преломление. Данные отличия несут информацию о пространственном распределении скорости звука, и, следовательно, температуры.

Восстановление рассеивающих неоднородностей предлагается осуществить по формуле:

$$P(\mathbf{r}) = \sum_n \int_0^T U_n(\mathbf{r}, t) W_n(\mathbf{r}, t) dt. \quad (3)$$

Формула (3), по сути, реализует метод обратной временной миграции (Reverse Time Migration) [22]. Амплитуда функции $|P(\mathbf{r})|$ – описывает относительную интенсивность неоднородностей среды.

Для восстановления распределения скорости звука в среде предлагается проанализировать среднюю по всем источникам разность фаз поля прямой волны и поля волны обратного распространения:

$$\Phi(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{N} \sum_n \arg(\tilde{W}_n(\mathbf{r}, \omega) \tilde{U}_n^*(\mathbf{r}, \omega)), \quad (4)$$

где $\tilde{W}_n(\mathbf{r}, \omega)$ – спектр поля обратного распространения на частоте ω , $\tilde{U}_n^*(\mathbf{r}, \omega)$ – комплексно сопряжённый спектр поля прямой волны в однородной среде на частоте ω , $\mathbf{r} = (x, y)$.

Рассмотрим (4) как сумму теневых проекций по аналогии с методом проекций в рентгеновской компьютерной томографии [23]. Следующим шагом метода теневых проекций является вычисление обратной свёртки с функцией вида $A(x, y) = 1/r$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Восстановим изображение фазовых неоднородностей с помощью операции обратной свёртки:

$$\Psi(\mathbf{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{\Phi}(k_x, k_y, \omega)}{4\pi^2 \tilde{A}(k_x, k_y)} e^{ik_x x + ik_y y} dk_x dk_y$$

где пространственный спектр реакции на точечную неоднородность имеет вид

$$\tilde{A}(k_x, k_y) = (k_x^2 + k_y^2)^{-1/2};$$

$$\tilde{\Phi}(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x, y, \omega) e^{-ixk_x - iyk_y} dx dy.$$

Распределение скорости из восстановленного фазового сдвига определим по формуле:

$$c(\mathbf{r}) \approx \left(\frac{1}{c_0} + \frac{\Psi(\mathbf{r}, \omega)}{\omega R \alpha} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где α – калибровочный поправочный коэффициент, определяемый путём численного моделирования объекта с известной скоростью звука.

Для проверки предложенного томографического метода проведено численное моделирование предложенной томографической системы на основе вычисления волнового поля методом конечных разностей во временной области. Рассматривалось 32 излучателя и 256 приёмников на окружности радиусом $R = 205$ мм. Результат восстановления распределения скорости по формуле (5) для частоты зондирования 43 кГц представлен на рис. 2. Моделировались неоднородности разных форм (3 круга разного радиуса и квадрат) со скоростями звука 352 и 380 м/с, фоновая среда имела скорость звука 342 м/с.

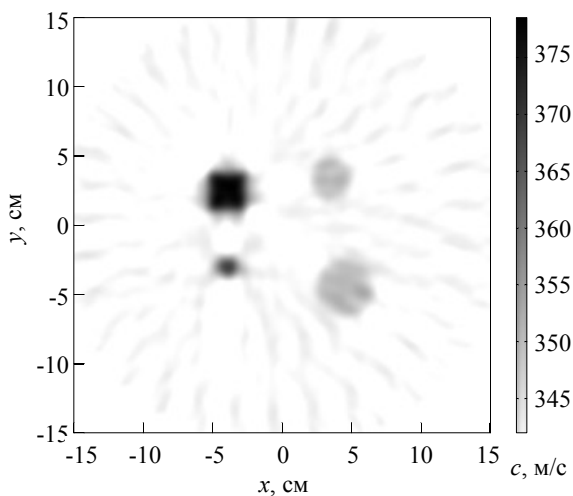


Рис. 2. Результат восстановления распределения скорости звука по данным численного моделирования

Изображение восстановлено с разрешением порядка половины длины волны. Следует отметить, что данный метод применим только для слабо контрастных неоднородностей. При увеличении показателя преломления возникнут искажения траекторий волн и эффекты многократного рассеяния, что приведёт к значительному отличию от поля в однородной среде. Поскольку поле обратного распространения вычисляется в однородной среде, то не учитываются отклонения волн от прямолинейного распространения. Результат работы метода будет тем точнее, чем лучше выполняется лучевое приближение.

Экспериментальные исследования

Разработана экспериментальная установка из 32 излучателей и 64 приёмников на окружности радиусом $R = 205$ мм с диапазоном рабочих частот от 38 до 43 кГц. Количество сенсоров, выбрано исходя из технических возможностей для мультиплексирования и параллельной оцифровки сигналов. В качестве излучателей применялись пьезоизлучатели МА40S4/S, а в качестве приёмников сенсоры МА40S4/R. Генерирование зондирующих сигналов и оцифровка сигналов с приёмников проводилась с помощью микроконтроллера STM32F407. Для усиления излучаемых сигналов применялись микросхемы LM837, а для усиления приёмных сигналов микросхемы LMC6482A. Для переключения между различными сенсорами применялись 16-канальные мультиплексоры 74НС4067.

Был проведён эксперимент с тестовой сценой в виде трёх нагревателей размещённых под зондирующей системой. Нагреватели создавали конвекционный поток восходящего нагретого воздуха до температуры 45 °С, при фоновой температуре 24 °С. Диаметр источников тепла составлял 25 мм. Нагреватели расположены на 120 мм ниже плоскости зондирующей системы. На рис. 3 представлена фотография эксперимента.

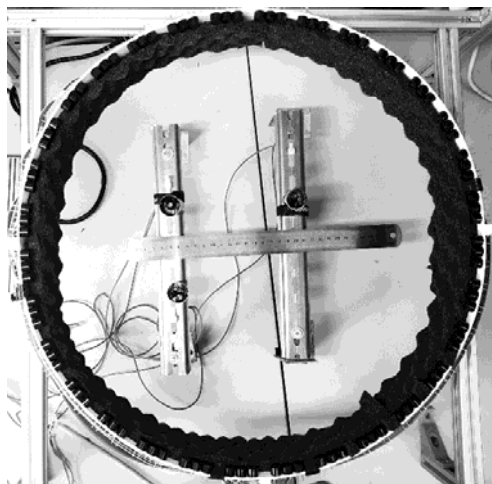


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки для ультразвуковой томографии неоднородно нагретого воздуха

В результате обработки сигналов по формуле (3) было восстановлено изображение неоднородности воздуха $|P(\mathbf{r})|$ (рис. 4). Можно видеть наличие трёх неоднородностей в позициях, совпадающих с размещением источников нагретого воздуха.

Путём обработки данных зондирования по формуле (5) было получено пространственное распределение скорости звука в воздухе, где калибровочный поправочный коэффициент равен единице.

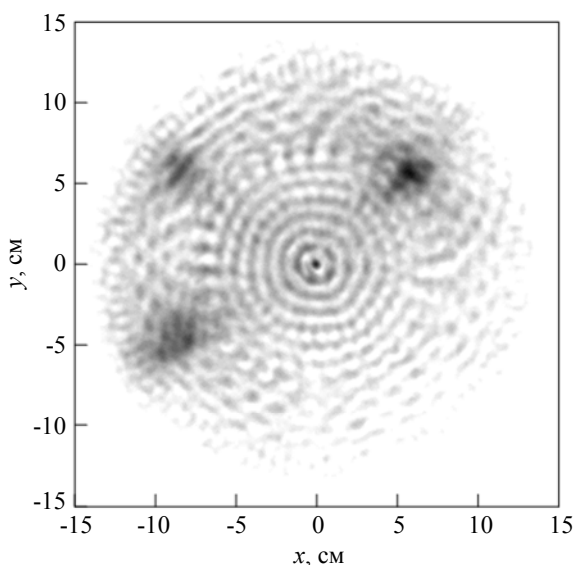


Рис. 4. Восстановленное изображение неоднородностей воздуха по данным эксперимента

Температуру воздуха из скорости звука определим по формуле $T_k = \frac{\mu c^2}{\gamma k_B}$. Восстанов-

ленное распределение температуры воздуха представлено на рис. 5.

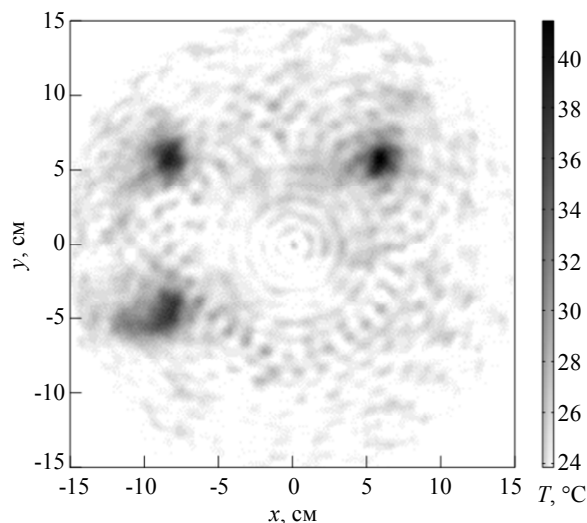


Рис. 5. Восстановленное распределение температуры воздуха по данным эксперимента

Для контроля корректности восстановленных значений температуры проведено измерение термометром в самой горячей области. Показания термометра составили 45 °С. Теоретическая оценка скорости звука для температуры 45 °С составляет 352 м/с. Артефакты и шумы на восстановленном изображении связаны с конвекционным движением нагретого воздуха и наличием шумов при измерениях акустических сигналов. Следует отметить, что с увеличением количества приемников, уровень артефактов будет снижаться. Этим объясняется такая разница в уровне артефактов между моделированием (рис. 2) и экспериментом (рис. 5). Кроме того, при моделировании считается, что датчики изотропные и ненаправленные, а в эксперименте датчик имеет ограниченные диаграммы направленности.

Следует отметить, что время, необходимое для сбора данных в ходе эксперимента составляет 228 мс. Для восстановления значений скорости звука по формуле (5) с вычислением обратного распространения волн решением волнового уравнения методом конечных разностей во временной области по формуле (2) на персональном компьютере (355 GFLOPS) требуется время ~10 мин. Применение аналитического решения для точечного источника позволяет ускорить решение до ~15 с. Время обработки данных и рекон-

струкции изображений можно сократить при использовании суперкомпьютеров.

Заключение

Предложен метод восстановления распределения скорости звука и температуры в воздухе путем ультразвукового зондирования томографической системой с множеством излучателей и множеством приемников. В данном методе, вычисляется разность фаз между полем прямой волны и полем волны обратного распространения от приёмников в однородной среде, что даёт информацию об изменении скорости звука. Реализована система томографии из 32 излучателей и 64 приемников расположенных по окружности радиуса 205 мм. Проведен эксперимент по восстановлению распределения скорости звука и температуры в воздухе. Полученные результаты подтвердили возможность восстановления изображений скоростных неоднородностей, а следовательно, распределения и значений температур в исследуемой области с помощью предложенного метода.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Maev R. G., Jr Green R. E., Siddiolo A. M.* / Research in Nondestructive Evaluation. 2006. Vol. 17. № 4. P. 191.
2. *Sambath S., Nagaraj P., Selvakumar N.* / J. Non-destruct. Eval. 2011. Vol. 30. № 1. P. 20.

3. *Williams R. A., Beck M. S.* Process Tomography: Principles, Techniques, and Applications – Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, 1995.
4. *Goncharsky A. V., Romanov S. Y., Seryozhnikov S. Y.* / Ultrasonics. 2016. Vol. 67. P. 136.
5. *Zhao W., Wang H., Gemmeke H., van Dongen K. W., Hopp T., Hesser J.* / Physics in Medicine & Biology. 2020. Vol. 65. № 23. P. 235021.
6. *Barai A., Watson S., Griffiths H., Patz R.* / Meas. Sci. Technol. 2012. Vol. 23. № 8. P. 085501.
7. *Kim J. G., Yoon S., Lee J., Jhang K. Y.* / IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation-Testing. – China, Chengdu. 2014. P. 66–68.
8. *Pezzoni R., Krupka R.* / Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2001. Vol. 43. № 4. P. 244.
9. *Ibrahim S., Md Yunus M. A., Md Khairi M. T., Faramarzi M.* / J. Teknologi. 2014. Vol. 70. № 3. P. 1.
10. *Суханов Д. Я., Халил А.* / Техника радиосвязи. 2022. Т. 54. № 3. С. 62–70.
11. *Narouze S. N.* / Basic of ultrasound imaging, in: Atlas Ultrasound-Guided Proced. Interv. Pain Manag. – Springer Science+Business Media. 2011. P. 13–19.
12. *Khairi M. T. M., Ibrahim S., Yunus M. A. M., Faramarzi M., Sean G. P., Pusppanathan J., Abid A.* / Measurement. 2019. Vol. 146. P. 490.
13. *Zhang J., Qi H., Ren Y., Su M., Cai X.* / International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022 Vol. 188. P. 122660.
14. *Niu Z. T., Qi H., Shi J. W., Zhang J. Q., Ren Y. T.* / Sci. China Technol. Sc. 2020. Vol. 64. № 2. P. 223.
15. *Huang X., Qi H., Niu C. Y., Ruan L. M., Tan H. P., Sun J., Xu C. L.* / Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 115. P. 1337.
16. *Schickert M.* / 11th Eur. Conf. Non-Destructive Test. – Prague, Czech Republic. 2014. P. 1–11.
17. *Исакович М. А.* Общая акустика. – М.: Наука, 1973.
18. *Yee K. S.* / IEEE Trans. Antennas Propag. 1966. Vol. 14. № 3. P. 302.
19. *Taflove A., Hagness S. C.* Computational Electrodynamics: the Finite-Difference TimeDomain Method, 3rd ed. – Artech House, 2005.
20. *Зверев В. А.* / Акустический журнал. 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
21. *Зверев В. А., Коротин П. И., Стромков А. А.* / Акустический журнал. 2008. Т. 54. № 5. С. 823–830.
22. *Zhou H. W., Hu H., Zou Z. H., Wo Y. K., Youn O.* / Earth-Sci. Rev. 2018. Vol. 179. P. 207–227.
23. *Хаммерер Ф.* Математические аспекты компьютерной томографии. – М.: Мир, 1990.

Transmission multi-view ultrasonic tomography of air temperature inhomogeneities

D. Ya. Sukhanov and A. Khalil

Research Tomsk State University (NR TSU)
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: sdy@mail.tsu.ru; amoon.khalil16@gmail.com

Received 11.11.2022; revised 16.12.2022; accepted 24.01.2023

A method of ultrasonic transmission tomography of air is proposed for obtaining images of temperature inhomogeneities. The system of transmitters and receivers is placed on a circle, which allows probing for the passage and for reflection of the inhomogeneity of the medium located inside the circle. Sounding is carried out using broadband signals with linear frequency modulation. It is proposed to restore the image of air temperature inhomogeneities by the method of spatially consistent filtering in the single scattering approximation. Reconstruction of the temperature distribution is based on the calculation of the spatial distribution of the speed of sound from the phase delays of the passing ultrasonic field. An experimental setup for ultrasonic air tomography has been developed, operating in the frequency range from 38 to 43 kHz. Experimental studies have shown the possibility of restoring the air temperature distribution.

Keywords: Transmission tomography, temperature distribution, matched filtering, MIMO.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-79-85

REFERENCES

1. Maev R. G., Jr Green R. E. and Siddiolo A. M., *Research in Nondestructive Evaluation* **17** (4), 191 (2006).
2. Sambath S., Nagaraj P., Selvakumar N. and Nondestruct J., *Eval.* **30** (1), 20 (2011).
3. Williams R. A. and Beck M. S., *Process Tomography: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd, 1995.
4. Goncharsky A. V., Romanov S. Y. and Seryozhnikov S. Y., *Ultrasonics* **67**, 136 (2016).
5. Zhao W., Wang H., Gemmeke H., Van Dongen K. W., Hopp T. and Hesser J., *Physics in Medicine & Biology* **65** (23), 235021 (2020).
6. Barai A., Watson S., Griffiths H. and Patz R., *Meas. Sci. Technol.* **23** (8), 085501 (2012).
7. Kim J. G., Yoon S., Lee J. and Jhang K. Y., in *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation-Testing*. China, Chengdu, 2014, pp. 66–68.
8. Pezzoni R. and Krupka R., *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* **43** (4), 244 (2001).
9. Ibrahim S., Md Yunus M. A., Md Khairi M. T. and Faramarzi M., *J. Teknologi* **70** (3), 1 (2014).
10. Sukhanov D. Ya. and Khalil A., *Radio communication technology* **54** (3), 62 (2022).
11. Narouze S. N., *Basic of ultrasound imaging*, in: *Atlas Ultrasound-Guided Proced. Interv. Pain Manag.* Springer Science+Business Media, 2011.
12. Khairi M. T. M., Ibrahim S., Yunus M. A. M., Faramarzi M., Sean G. P., Puspanathan J. and Abid A., *Measurement* **146**, 490 (2019).
13. Zhang J., Qi H., Ren Y., Su M. and Cai X., *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **188**, 122660 (2022).
14. Niu Z. T., Qi H., Shi J. W., Zhang J. Q. and Ren Y. T., *Sci. China Technol. Sc.* **64** (2), 223 (2020).
15. Huang X., Qi H., Niu C. Y., Ruan L. M., Tan H. P., Sun J. and Xu C. L., *Appl. Therm. Eng.* **115**, 1337 (2017).
16. Schickert M., in *11th Eur. Conf. Non-Destructive Test. Prague, Czech Republic, 2014*, pp. 1–11.
17. Isakov M. A., *General acoustics*, Moscow, Nauka, 1973.
18. Yee K. S., *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14** (3), 302 (1966).
19. Taflove A. and Hagness S. C., *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference TimeDomain Method*, 3rd ed. London, Artech House, 2005.
20. Zverev V. A., *Acoust. Phys.*, № 50, 685 (2004).
21. Zverev V. A., Korotin P. I. and Stromkov A. A., *Acoust. Phys.*, № 54, 711 (2008).
22. Zhou H. W., Hu H., Zou Z. H., Wo Y. K. and Youn O., *Earth-Sci. Rev.* **179**, 207 (2018).
23. Natterer F., *Mathematical aspects of computed tomography*, Moscow, Mir, 1990.