518.6.536.6

Реконструкция кубоида ИК-изображений для обнаружения скрытых объектов. Ч. 1. Решение на основе коэффициентной обратной задачи теплопроводности

И. Н. ИЩУК, А. В. ПАРФИРЬЕВ

Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия, e-mail: boerby@rambler.ru

Представлено решение задачи реконструкции кубоида ИК-изображений поверхности исследуемого (эталонного) изотропного материала с учетом его основных параметров, для получения изображения, отражающего распределение тепло- и температуропроводности, на основе коэффициентной обратной задачи теплопроводности. Предложен вариант программной реализации решения с использованием библиотек компьютерного зрения.

Ключевые слова: *теплофизические параметры, кубоид изображения, коэффициентная обратная задача, математическое моделирование, компьютерное зрение.*

A solution of the problem of reconstruction of cuboid of infrared images of the surface (standard) isotropic material under study with taking into account the key parameters affecting the formation of infrared images cuboid for obtaining the image reflecting the distribution of the object thermophysic parameters (thermal conductivity, temperature conductivity) based on the coefficient inverse heat conductivity problem is presented. A version of the software realization of reconstruction of IR images cuboid using the computer vision libraries is suggested.

Key words: *thermal physic parameters, cuboid of images, coefficient inverse problem, mathematical modeling, computer vision.*

В настоящее время существует огромное количество различных пакетов прикладных программ и библиотек специального программного обеспечения для обработки как статичных изображений, так и видеоизображений, которые позволяют корректировать, улучшать визуальное качество отображаемой на них информации, применять различные методы трансформации и фильтрации. В отдельный вид обработки изображений необходимо выделить процесс реконструкции или восстановления изображений. Этот тип обработки относится к обратным задачам математической физики, которые подразумевают получение изображения, максимально приближенного к объекту, с учетом свойств системы, формирующей изображение. В целом данная задача получила название редукции к идеальному прибору [1]. В частности, реконструктивная компьютерная томография является как раз таким методом получения изображений. Однако большинство задач редукции связано с обработкой одного статичного изображения, а задачи обработки потока видеоизображений — кубоида изображений — практически не исследованы.

Реконструкция кубоида инфракрасных (ИК) изображений, базирующаяся на методах вычислительной теплофизики и численных методах решения обратных задач теплопроводности, является отдельным научным направлением в решении задач редукции потока видеоизображений. Кубоид ИК-изображений — это пространственно-временное распределение радиационных температур, которое имеет зрительную и смысловую нагрузку. Конечно, это определение очень условное и субъективное, но оно позволяет сформулировать следующие свойства кубоида ИК-изображений: представление носителя трехмерной переменной, неотрицательность, максимальное значение функции, описывающей ИК-изображение, всегда меньше бесконечности.

Задача реконструкции кубоида ИК-изображений формулируется как

$$A_{\xi}^{-1}\left(\mathbf{T}_{\mathbf{r}}[m,n,k]\right)=\begin{vmatrix}\mathbf{f}_{\lambda}[m,n]\\ \mathbf{f}_{a}[m,n]\end{vmatrix}\equiv\mathbf{f}, \tag{1}$$

где A_{ξ}^{-1} — обратный оператор, использующий априорную информацию о неточности входных данных, позволяющий построить корректное обратное решение по невязке, зависящей от регуляризирующего параметра ξ; $\mathbf{T}_r$ — кубоид ИК-изображений (пространственно-временное распределение радиационных температур); m, n — номера отсчетов по пространственным координатам, $m\in\left[\overline{0,M}\right]$, $n\in\left[\overline{0,N}\right]$; $M\times N$ — растр ИК-изображения; k — номер отсчета по времени, $k\in\left[\overline{1,K}\right]$; $\mathbf{f}_{\lambda}$, $\mathbf{f}_a$ — тепловые томограммы в размерностях тепло- и температуропроводности; $\mathbf{f}$ — тепловая томограмма (пространственное распределение теплофизических параметров изотропной среды в соответствии с веденной сеточной функцией).

Основными параметрами, влияющими на формирование кубоида ИК-изображений, являются: абсолютные температуры, коэффициенты теплового излучения, спектральные и интегральные коэффициенты отражения, распределение теплофизических параметров среды, кроме того, вариации окружающей среды (облачность, влажность, температура воздуха, давление, скорость ветра), солнечной активности, времени года и суток, географических координат и т. д. При этом энергетическая светимость среды включает три составляющие: отраженную, поглощенную (переизлученную) и собственную (внутреннюю) энергии [2].

Применяя закон Стефана—Больцмана для каждой составляющей энергетической светимости неоднородной изотропной среды, определяют их термодинамическую температуру. В практических расчетах полагают, что коэффициент теплового излучения и отражения в спектральном рабочем диапазоне ИК-системы постоянны. Соответственно на температуру среды существенное влияние оказывает как коэффициент отражения, определяющий прирост радиационной температуры из-за поглощения радиации от внешних источников излучения, так и коэффициент теплового излучения, непосредственно определяющий их абсолютные температуры. Необходимо отметить, что абсолютная температура неоднородной изотропной среды формируется в результате процессов теплообмена: лучистого, конвективного и теплопередачи. На процесс наблюдения также оказывают влияние такие факторы, как ослабление излучения атмосферой, искажение температурных полей в условиях повышенной влажности и вынужденной конвекции и т. п. [3, 4].

Для приближенной количественной оценки мгновенного значения термодинамической температуры, регистрируемой в результате дистанционного измерения радиационной температуры излучающей поверхности неоднородной изотропной среды в диапазоне длин волн работы тепловизионного приемника, применяют выражение

$$T_r = \varepsilon \tilde{T}^4 + (1-\varepsilon) T_A^4,$$

где ε — коэффициент излучательной способности излучающей поверхности; $\tilde{T}$, T_A — термодинамические температуры, измеренная тепловизионным приемником, и фонового излучения (температура воздуха).

При этом для современных тепловизоров, например серии Testo, ИК-видеопоток от тепловизионного приемника представляется последовательностью динамических ИК-изображений, в каждом пикселе которых хранится относительное значение радиационной температуры $K \in [0, 1]$, получаемое из равенства

$$\tilde{T} = K\left(T_{\max} - T_{\min}\right) + T_{\min},\ T_{\min} \le \tilde{T} \le T_{\max},$$

где $T_{\min}$, $T_{\max}$ — заданные минимальный и максимальный пределы измерений термодинамических температур, измеряемых тепловизионным приемником.

В общем случае записанные данные термодинамических температур представляют собой трехмерную таблицу, построенную на двумерном базисе — евклидовой плоскости $\mathbf{e} = \mathbf{m} \times \mathbf{n}$ в пределах растра ИК-изображения. Однако для обратного преобразования (1) такая форма хранения данных является неудобной, что требует преобразования вида

$$\left[\tilde{\mathbf{T}}_1 \cdots \tilde{\mathbf{T}}_K\right]^{\mathrm{T}} \equiv \left[\begin{pmatrix} \tilde{T}_{11} & \cdots & \tilde{T}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{T}_{m1} & \cdots & \tilde{T}_{mn} \end{pmatrix}_1 \cdots \begin{pmatrix} \tilde{T}_{11} & \cdots & \tilde{T}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{T}_{m1} & \cdots & \tilde{T}_{mn} \end{pmatrix}_K\right]^{\mathrm{T}} \to$$

$$\to \begin{bmatrix} \tilde{T}[k]_{11} & \cdots & \tilde{T}[k]_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{T}[k]_{m1} & \cdots & \tilde{T}[k]_{mn} \end{bmatrix} \equiv \tilde{\mathbf{T}}_{\mathbf{e}},$$

т. е. для каждого пиксела потока ИК-изображения ставится в соответствие вектор термодинамических температур, разложенных по временным отсчетам. Такая декомпозиция задачи реконструкции кубоида ИК-изображений позволяет перейти к постановке коэффициентной обратной задачи теплопроводности, решение которой получают в каждой точке введенного двумерного базиса (растра ИК-изображения).

Для идентификации распределений теплофизических параметров $\mathbf{f}$ на основе построенной математической модели решают оптимизационную многопараметрическую задачу

$$J_\xi(\mathbf{e}, \mathbf{f}) = \left\{ g(\mathbf{e}; \mathbf{\Psi}, \mathbf{f}) - \xi \left| \frac{\partial g}{\partial \psi_\tau} \right| \right\} \to \min_{\mathbf{f}_{\min} < \mathbf{f} < \mathbf{f}_{\max}}, \qquad (2)$$

в которой невязка вычисляется между расчетными избыточными температурами и измеренными тепловизионным приемником с использованием евклидовой нормы $g(\mathbf{e}; \mathbf{\Psi}; \mathbf{f}) = \left\| \mathbf{T}_{\mathbf{e}} - \tilde{\mathbf{T}}_{\mathbf{e}} \right\|$, где J_ξ — функционал невязки; $\mathbf{e}$ — двухмерный базис (евклидова плоскость); $\mathbf{\Psi}$ — вектор параметров математической модели; $\mathbf{T}_{\mathbf{e}}$, $\tilde{\mathbf{T}}_{\mathbf{e}}$ — термодинамические температуры, полученные соответственно при помощи тепловизионного приемника и на основании математической модели.

Один из вариантов технической реализации решения задачи (2) может заключаться в следующем: поверхность исследуемого (эталонного) изотропного материала равномерно нагревают тепловым потоком от ИК-источника, движущегося прямолинейно с постоянной скоростью; измеряют радиационные температуры на поверхности изотропного материала в заданном интервале времени.

Нелинейная сопряженная задача, описывающая процесс формирования ИК-изображений на поверхности изотропной среды, имеет вид [4]:

$$\left.\begin{aligned} & T_r = \varepsilon T^4 + (1-\varepsilon) T_A^4; \\ & \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^{3} \left(a_j[T] \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \frac{\partial a_j[T]}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right)^2 \right),\ j = 1, 2; \\ & -\lambda_1[T] \left. \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \right|_{x_3 = -0} - \alpha[T](T_{\text{п}} - T_A) - \varepsilon\sigma\left(T_{\text{п}}^4 - T_A^4\right) - \\ & - L\rho\dot{v} = -q[\tau]; \\ & \lambda_1[T] \partial T_1 / \partial x_i \big|_{S_i} = \lambda_2[T] \partial T_2 / \partial x_i \big|_{S_i}; \\ & T_1\big|_{S_i} = T_2\big|_{S_i};\ T_j(\tau = 0) = 0, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где T — избыточная температура; τ — время; j — количество слоев в системе, $j = 1, 2$; $a_1, \lambda_1, a_2, \lambda_2$ — температуро- и теплопроводности первого и второго слоев среды; x_1, x_2, x_3 — пространственные координаты; α — коэффициент теплоотдачи; $T_п$ — абсолютная температура поверхности среды; σ — постоянная Стефана—Больцмана; L — удельная теплота испарения; ρ — плотность среды; $\dot{v}$ — скорость перемещения границы испарения; q — плотность теплового потока; S_i — контактные поверхности неоднородных слоев среды по соответствующим осям, ограничивающие область первого G_1 $(T_1 \in G_1)$ и второго G_2 $(T_2 \in G_2)$ слоев.

Рассматриваемую прямую нелинейную задачу теплопроводности можно решить существующими пакетами термодинамического моделирования, основанными на методах конечных разностей, элементов, объемов, в частности COMSOL Multiphysics, ThermoAnalitics. Наиболее близким к поставленной задаче (1) пакетом математического моделирования, базирующемся на теоретических основах радиационной теплофизики, является программа RadThermIR [9]. Однако ее применение не позволяет получить требуемых пространственных распределений теплофизических параметров — тепловых томограмм в режиме, близком к реальному времени. А именно такое временное ограничение на получение решения задачи (1), основанного на построении оптимизационной задачи (2), является новым требованием в технологии оценки эффективности дистанционного зондирования Земли и обнаружения малозаметных объектов в оптическом диапазоне длин волн, диагностирования состояния объектов трубопроводного транспорта с беспилотных летательных аппаратов, поиска и обнаружения скрытых дефектов в ходе теплового неразрушающего контроля.

Одним из путей разрешения возникшего противоречия между потребностью представления информации о структуре неоднородных сред по их теплофизическим параметрам и отсутствием моделей и методов построения тепловых томограмм, является решение коэффициентой обратной задачи (2) на основе нелинейного параболического уравнения с граничными условиями (3). Алгоритмическая реализация такого решения базируется на применении специальных функций и классов библиотеки цифровой обработки изображений Open Source Computer Vision Library (OpenCV).

Следовательно, для решения задачи реконструкции кубоида ИК-изображений в режиме реального времени и уменьшения вычислительных ресурсов необходимо применять алгоритмы, обеспечивающие приемлемую точность расчетов при минимуме вычислительных операций, что достигается декомпозицией кадра ИК-видеопотока на подобласти; уменьшением информационной емкости данных для каждой подобласти; применением дискретных моделей, построенных на быстрых алгоритмах итерационных процедур; реализацией уравнения процесса измерения на основе метода сравнения с эталонной мерой.

Процедуры декомпозиции кадра ИК-видеопотока на подобласти и уменьшение информационной емкости данных в OpenCV не являются стандартными, и их непосредственная реализация зависит от IDE (Integrated Development Environment) платформы. Построение математических моделей на основе быстрых алгоритмов требует рассмотрения двух стратегий: построение дискретных моделей, наиболее точно отражающих процесс дистанционного измерения теплофизических параметров неоднородной изотропной среды, и применение упрощенного аналитического решения с коррекцией выходных данных при помощи калибровочной функции. Построение конечно-разностной модели на основе неявных схем проводится для медленно происходящих тепловых процессов, что позволяет ввести ограничения: $\partial a(T)/\partial T \le A$ $(A = 1 \cdot 10^{-11})$ и $\partial C/\partial x \equiv 0$ [5], где C — удельная теплоемкость.

Для одномерного случая при введении сеточной функции T_p^k, где $p \in \overline{[1, P]}$ — номер отсчета по оси x_3 (перпендикулярной плоскости поверхности исследуемой изотропной среды, попадающей в объектив тепловизионного приемника) на неравномерной сетке, имеем систему линейных уравнений

$$\mathbf{T}^{k-1} = \mathbf{A}\mathbf{T}^k, \tag{4}$$

где $\mathbf{T}^{k-1} = \left(T_1^{k-1}, T_2^{k-1}, T_3^{k-1}, \ldots, T_P^{k-1}\right)^т$; $\mathbf{T}^k = \left(T_1^k, T_2^k, T_3^k, \ldots, T_P^k\right)^т$;

$$\mathbf{A} = \left\{\begin{array}{cccccc}
-2a_j\left[T_1^{k-1}\right]\left(\lambda_j\left[T_1^{k-1}\right]+\alpha h_1\right) & \lambda_j\left[T_1^{k-1}\right]\left(2a_j\left[T_1^{k-1}\right]\Delta\tau+h_1^2\right) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\
\dfrac{2a_j\left[T_1^{k-1}\right]\Delta\tau}{(h_1+h)h_1} & -\left(\dfrac{2\Delta\tau}{h_1 h}a_j\left[T_2^k\right]+1\right) & \dfrac{2a_j\left[T_2^{k-1}\right]\Delta\tau}{(h_1+h)h_1} & 0 & \cdots & 0 \\
0 & \dfrac{a_j\left[T_2^{k-1}\right]\Delta\tau}{h^2} & -\left(\dfrac{2\Delta\tau}{h^2}a_j\left[T_3^k\right]+1\right) & \dfrac{a_j\left[T_3^{k-1}\right]\Delta\tau}{h^2} & \cdots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\
0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \dfrac{a_j\left[T_{P-1}^{k-1}\right]\Delta\tau}{h^2} \\
0 & 0 & 0 & & \dfrac{a_j\left[T_{P-1}^{k-1}\right]\Delta\tau}{h^2} & -\left(\dfrac{2\Delta\tau}{h^2}a_j\left[T_P^k\right]+1\right)
\end{array}\right\};$$

h, h_1 — интервалы дискретизации по пространству; $\Delta\tau$ — интервал дискретизации по времени.

В ходе численной реализации решения задачи (4) методом двойной прогонки используют граничные условия

$$T_1^k = T_1^{k-1}\lambda_j\left[T_1^{k-1}\right]h_1^2 - 2h_1\Delta\tau q\,[k\Delta\tau]\,a_j\left[T_1^{k-1}\right],\ \ T_P^k = 0,$$

при этом $T_{1<p<P}^k = -T_{1<p<P}^{k-1}$. Зависимости теплопроводности $\lambda_j\left[T_p^k\right]$ и температуропроводности $a_j\left[T_p^k\right]$ от температуры аппроксимируют известными степенными или экспоненциальными зависимостями, исследованными в [6, 7], или кусочно-линейными, кусочно-постоянными приближениями [5, 8].

Использование упрощенного аналитического решения одномерной задачи теплопроводности

$$T(\tau; \mathbf{\Psi}) = \Psi_1 \exp(\Psi_2 \tau + \Psi_3) + \Psi_4 \qquad (5)$$

позволяет значительно снизить вычислительные ресурсы, однако требует применения наборов эталонных материалов в классе теплоизоляционных, теплопроводных, средне-, и сверхтеплопроводных материалов, что обеспечивает калибровку результатов измерений путем применения полученной экспериментально аппроксимирующей зависимости $\hat{\lambda} = F(\Psi_2)$.

В результате решения оптимизационной параметрической задачи (2) градиентным методом или методом симплекса на основе дискретной (4) или аналитической (5) моделей в пределах растра ИК-изображения, получают распределения оцененных значений λ и a исследуемого изотропного материала в пределах глубины прогрева:

$$\hat{\mathbf{f}}_\lambda = \begin{bmatrix} \hat{\lambda}_{11} & \ldots & \hat{\lambda}_{1n} \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ \hat{\lambda}_{m1} & \ldots & \hat{\lambda}_{mn} \end{bmatrix},\ \ \hat{\mathbf{f}}_a = \begin{bmatrix} \hat{a}_{11} & \ldots & \hat{a}_{1n} \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ \hat{a}_{m1} & \ldots & \hat{a}_{mn} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, при реализации процесса декомпозиции кубоида ИК-изображений с максимально возможной точностью необходимо учитывать влияние на его формирование абсолютных температур, коэффициентов теплового излучения, спектральных и интегральных коэффициентов отражения, распределения теплофизических параметров среды, состояние окружающей, солнечной активности, времени года и суток, географических координат и т. д. Инструментом учета таких параметров является решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности, позволяющее построить изображение — тепловую томограмму. Данное изображение отражает распределение теплофизических параметров объекта и среды, которые практически не зависят от внешних факторов, что является основой для более эффективного решения задач мониторинга земной поверхности, дефектоскопии и обнаружения объектов в ИК-диапазоне длин волн. При этом использование библиотек алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов, распространяющихся в условиях лицензии Berkley Software Distribution license (BSD), позволяет осуществить декомпозицию кубоида ИК-изображений в режиме реального времени.

Литература

1. **Левин Г. Г., Вишняков Г. Н.** Оптическая томография. М.: Сов. радио, 1989.

2. **Красс М. С., Мерзликин В. Г.** Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеоиздат, 1990.

3. **Павлов Н. И., Эльц В. К.** Дистанционное обнаружение температурных аномалий, обусловленных заглубленными в грунт инородными объектами // Оптический журнал. 2006. № 10. С. 83—88.

4. **Ищук И. Н., Король О.В., Вернигорова Е. В.** Роботизированная установка для исследования процессов влияния внешних факторов на поиск малозаметных объектов с помощью воздушной тепловизионной аппаратуры // Наукоемкие технологии. 2012. Т. 13. С. 47—52.

5. **Ищук И. Н. Фесенко А. И., Громов Ю. Ю.** Идентификация свойств скрытых подповерхностных объектов в инфракрасном диапазоне волн. М.: Машиностроение, 2008.

6. **Самарский А. А. и др.** Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987.

7. **Баутин С. П.** Аналитическая тепловая волна. М.: Физматлит, 2003.

8. **Самарский А. А., Вабищевич П. Н.** Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Издат. группа URSS, 2004.

9. **Pratmarty D., Cathala T.** Software coupling between RadThermIR and SE-WORKBENCH [Электрон. ресурс]. http://ebookbrowse.com/radtherm-oktal-se-itbm-s2011-paper-pdf-443040793 (дата обращения 13.05.2013 г.)

Дата принятия 11.07.2013 г.