

УДК 536.52:519.65

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВУМЕРНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ФРОНТА БЫСТРОПРОТЕКАЮЩЕГО ПРОЦЕССА ПУТЁМ АППРОКСИМАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫМ РАДИОМЕТРОМ

*В. Н. Иконников**, *В. А. Канаков*, *В. В. Пархачёв*

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Предложен метод, позволяющий повысить точность восстановления распределения температуры по поверхности объекта за счёт учёта влияния диаграмм направленности антенн многоканального радиометра на результаты измерений в узловых точках. Достигнуто увеличение точности, эквивалентное увеличению числа измерительных каналов системы с 9 до 16. Положительный эффект усиливается при увеличении перекрытия диаграмм направленности антенн.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение температуры фронта ударной или детонационной волны или границы области интенсивной химической реакции представляет значительный интерес как для определения уравнения состояния вещества, так и для уточнения модели исследуемого процесса [1]. Измерение таких параметров, как скорость, давление, температура быстропротекающих и высокоэнергетических процессов традиционно представляет сложнейшую научно-техническую задачу. Методы измерения можно разделить на контактные и бесконтактные. Контактные методы измерения, во-первых, влияют на объект исследования, во-вторых, не позволяют получать информацию об исследуемом процессе целиком, а только в местах размещения контактных датчиков. Бесконтактные методы основаны на измерении параметров электромагнитного излучения, отражаемого [2] или излучаемого [3, 4] объектом исследования.

Бесконтактное измерение температуры основывается на применении методов радиометрии. Большая часть веществ, изучаемых в физике взрыва, не прозрачна в оптическом диапазоне [1], поэтому измерение температуры процессов внутри вещества возможно только радиометрами миллиметрового диапазона длин волн. Использование более длинных волн нецелесообразно ввиду низкого пространственного разрешения.

При измерении яркостной температуры объекта, вся поверхность которого имеет одинаковую температуру, достаточно использовать одноканальный радиометр [3], причём оценка с точностью порядка 100 К может быть получена за время порядка 1 мкс, что позволяет измерять температуру быстропротекающих высокоэнергетических процессов. Если же распределение температуры по поверхности объекта отлично от постоянного, то очевидно, что для его измерения требуется несколько каналов. Хорошо известны многоканальные методы измерения яркостной температуры распределённых источников с малыми угловыми размерами и методы получения их двумерных радиоизображений в случае, когда диаграмма направленности каждого элемента антенной решётки радиометрического комплекса охватывает объект исследования полностью (интерферометрия), либо когда антенна может двигаться (апертурный синтез) [5–8]. Существенной здесь является возможность одновременного охвата каждой части объекта исследования несколькими антеннами.

* ikonnikovvn@gmail.com

Другой подход к восстановлению распределения температуры по поверхности может состоять в измерении температуры в нескольких точках и последующей интерполяции. Под измерением в точке подразумевается измерение в малом пятне, температуру в котором можно считать постоянной. Для проведения таких измерений следует фокусировать излучение (радиовидение) [9].

Отдельную задачу представляет случай, когда поверхность с неизвестным распределением температуры перемещается, причём в процессе перемещения распределение температуры может меняться. Такая задача может возникать, например, при исследовании процесса детонации в образце взрывчатого вещества. Укажем на существенные трудности применения упомянутых выше подходов к получению радиоизображений быстроперемещающихся поверхностей.

Перемещение фронта детонационной волны за время эксперимента может составлять более 10 см (несколько десятков длин волн), при этом, с одной стороны, объект должен оставаться в зоне покрытия диаграмм направленности антенн, а с другой — диаграммы не должны быть шире объекта исследования, чтобы не захватывать излучение от других объектов. При этом размещать антенную систему радиометра далеко от объекта нельзя по энергетическим соображениям. Сочетание этих двух условий требует размещения движущегося объекта в ближней зоне антенн, однако при этом их фазовые характеристики становятся зависимыми от расстояния между антеннами и объектом.

Таким образом, реализовать стабильные на всём перемещении объекта исследования фазовые характеристики антенной решётки радиометра, как минимум, затруднительно. Поэтому применение классических методов получения радиоизображений интерферометрическими методами не представляется возможным.

Апертурный синтез затрудняется тем, что высокая скорость перемещения объекта исследования (несколько км/с) и ограниченная скорость работы регистрирующей аппаратуры будут препятствовать осуществлению сканирования.

Подход, основанный на измерении температуры в нескольких точках с последующей интерполяцией (радиовидение), в этом случае осложняется тем, что излучение невозможно фокусировать в маленькое пятно на достаточно малой дальности при перемещении объекта исследования, а значит, яркостная температура будет усредняться в большом пятне с переменным радиусом, что существенно снизит точность. Очевидно, для сохранения точности необходимо учитывать эффект изменения углового размера области измерения при последующей интерполяции.

В данной статье предлагается метод многоканальной радиометрии, позволяющий оценивать закон распределения температуры по поверхности при произвольном перекрытии диаграмм направленности измерительных антенн и их произвольной ширине, не выходящей за пределы объекта исследования. Предлагаемый метод обходит принципиальные ограничения классических методов при работе с быстро перемещающимися поверхностями.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть поверхность с неизвестным распределением температуры движется в направлении антенной системы многоканального радиометра. Форма поверхности и её расположение относительно радиометра должны быть известны в каждый момент времени, например измерены с помощью многоканального радиоинтерферометра [10]. На рис. 1 показано взаимное расположение антенн (в виде конических рупоров) и поверхности, а заштрихованными кругами показаны области, покрываемые диаграммами направленности антенн. Диаграммы могут, в частности, перекрываться, на результаты измерений распределения температуры предлагаемым методом это не повлияет.

Пусть $\phi(x, y)$ — функция, описывающая истинное распределение термодинамической температуры по поверхности в некоторой выбранной системе координат. Будем считать, что каждый

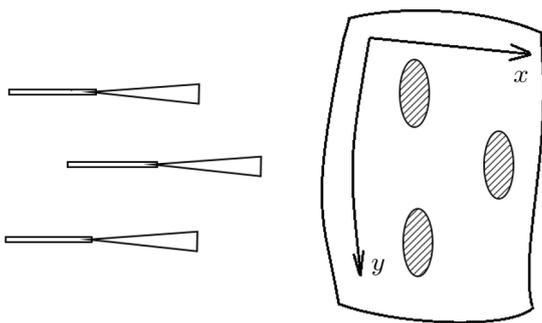


Рис. 1. Взаимное расположение антенн радиометра и объекта исследования

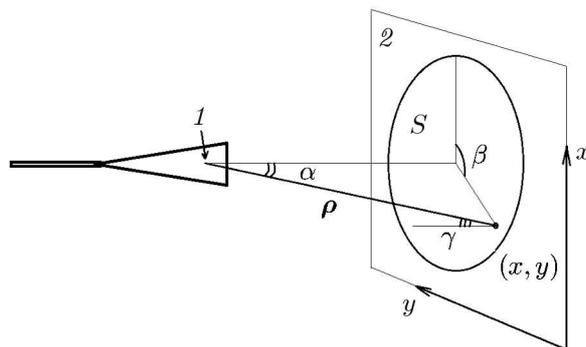


Рис. 2. Иллюстрация обозначений в формуле (1) (1 — фазовый центр антенны; 2 — объект исследования)

канал радиометра предварительно откалиброван, а коэффициент поглощения исследуемого объекта на частоте измерений известен. Методы калибровки и оценки коэффициента поглощения описаны в работах [3, 4]. В дальнейшем будем использовать термин температура, подразумевая, что измеряется яркостная температура, которая может быть пересчитана в термодинамическую.

Поскольку яркость излучения может зависеть от угла между нормалью к поверхности и направлением визирования, обозначим эту зависимость $L(\gamma)$, где γ — угол между нормалью к поверхности в текущей точке (x, y) и направлением на фазовый центр антенны. В частности, она может описываться законом Ламберта, т. е. быть константой [6]. Также при расчётах понадобится информация о диаграммах направленности антенн радиометра по мощности. Обозначим их $\Psi_i^*(\alpha, \beta)$, где α и β — угловые координаты точки с координатами (x, y) в некоторой привязанной к антенне системе координат, i — номер антенны. Тогда яркостная температура f_i , измеренная i -й антенной, может быть выражена следующим образом:

$$f_i = K_i \iint_{S_i} \phi(x, y) L(\gamma) \Psi_i^*(\alpha, \beta) J(x, y, \gamma, \rho_i) dx dy. \tag{1}$$

Здесь интегрирование ведётся по пятну поверхности S_i , охваченному диаграммой направленности, $J(x, y, \gamma, \rho_i)$ — угловой размер элементарной площадки интегрирования при наблюдении из фазового центра антенны (якобиан), ρ_i — радиус-вектор, проведённый из фазового центра антенны к точке (x, y) , K_i — калибровочный множитель. Введённые обозначения проиллюстрированы на рис. 2.

Можно заметить, что при заданном взаимном расположении поверхности и антенны радиометра множитель $K_i \Psi_i^*(\alpha, \beta) J(x, y, \gamma, \rho_i)$, в интеграле (1) зависит только от координат x и y . Упрощая запись, обозначим его $\Psi_i(x, y)$. Тогда интеграл (1) можно переписать в виде

$$f_i = \iint_{S_i} \phi(x, y) \Psi_i(x, y) dx dy. \tag{2}$$

Далее предложим метод приближённого восстановления функции $\phi(x, y)$ по конечному набору значений f_i , считая, что функции $\Psi_i(x, y)$ известны.

2. СЛУЧАЙ БЕСКОНЕЧНО УЗКИХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ

В случае, когда все диаграммы направленности антенн радиометра настолько узки, что в каждой области объекта исследования S_i , которую они охватывают, температура $\phi(x, y)$ постоянна, в выражении (2) множитель $\phi(x_i, y_i)$, где (x_i, y_i) — произвольная точка области S_i , можно вынести за знак интеграла. Оставшиеся множители не будут зависеть от ϕ , и, выбрав калибровочный множитель соответствующим образом, можно записать

$$f_i = \phi(x_i, y_i).$$

Таким образом, можно считать, что в результате измерения становятся известны значения температуры в известных точках поверхности. Этих точек столько же, сколько антенн радиометра, и их расположение можно выбирать, направляя антенны нужным образом до эксперимента.

Если дискретного набора значений f_i не достаточно, то для восстановления приближённого распределения температуры по поверхности можно использовать процедуру двумерной сплайн-интерполяции или сплайн-аппроксимации [11, 12]. Изложим кратко суть этих процедур.

Пусть $f_i = \phi(x_i, y_i)$, где ϕ — функция, известная в N точках с координатами (x_i, y_i) , а $i \in [1, N]$. Тогда непрерывная функция $\phi^*(x, y)$, задаваемая выражением

$$\phi^*(x, y) = \sum_{i=1}^N C_i + r_i^2 \ln r_i^2 + C_{N+1} + C_{N+2}x + C_{N+3}y, \quad (3)$$

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2,$$

будет являться сплайн-интерполяцией точек f_i , если коэффициенты C_i удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{pmatrix} 0 & s_{12} & \dots & s_{1N} & 1 & x_1 & y_1 \\ s_{21} & 0 & \dots & s_{2N} & 1 & x_2 & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{N1} & s_{N2} & \dots & 0 & 1 & x_N & y_N \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_N & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_N & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_N \\ C_{N+1} \\ C_{N+2} \\ C_{N+3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$s_{ij} = r_{ij}^2 \ln r_{ij}^2, \quad r_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2.$$

Если в системе уравнений (4) первые N элементов главной диагонали заменить на числа $\lambda > 0$, то функция, задаваемая уравнением (3), превратится в сплайн-аппроксимацию исходных точек f_i . Чем больше параметр λ , тем более «жёстким» является решение; и при возрастании λ поверхность $\phi^*(x, y)$ стремится к плоскости, проходящей на минимальном среднеквадратичном расстоянии от точек f_i .

При отсутствии дополнительных априорных данных о функции $\phi(x, y)$ использование интерполяции экспериментальных данных сплайн-поверхностью, имеющей минимальную кривизну, является разумным. Сплайн-аппроксимацию следует использовать, когда значения f_i содержат шум. Параметр λ следует подобрать таким, чтобы среднеквадратичное отклонение (СКО) экспериментальных данных f_i от аппроксимирующей функции $\phi^*(x, y)$ было равно СКО шума.

Во избежание путаницы подчеркнём, что процедура сплайн-интерполяции, применяемая к функциям любой природы, в данной статье используется для описания распределения температуры по поверхности известной формы, а не для описания самой формы поверхности.

3. СЛУЧАЙ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ

В случае, когда температура внутри области S_i не одинакова, мы не можем говорить о том, что в результате измерений нам известны значения температуры в каких-то конкретных точках поверхности. Однако, как будет показано ниже, описать результат измерения сплайн-поверхностью всё же возможно. Вновь рассмотрим функцию вида (3). За точку (x_i, y_i) выберем некоторую определённую точку области S_i , например точку пересечения поверхности с осью симметрии диаграммы направленности. Предположим, что функция $\phi^*(x, y)$ может точно описать реальное распределение температуры $\phi(x, y)$ при некоторых значениях параметров C_i . Подставим в (2) $\phi^*(x, y)$ вместо $\phi(x, y)$:

$$f_i^* = \iint_{S_i} \phi^*(x, y) \Psi_i(x, y) dx dy. \quad (5)$$

Здесь f_i^* — результат измерения.

Далее, подставив в интеграл (5) выражение для $\phi^*(x, y)$ из (3),

$$\begin{aligned} f_i^* &= \iint_{S_i} \left(\sum_{j=1}^N C_j r_j^2 \ln r_j^2 + C_{N+1} + C_{N+2}x + C_{N+3}y \right) \Psi_i(x, y) dx dy = \\ &= \sum_{j=1}^N \left[C_j \iint_{S_i} \Psi_i(x, y) r_j^2 \ln r_j^2 dx dy \right] + C_{N+1} \iint_{S_i} \Psi_i(x, y) dx dy + \\ &\quad + C_{N+2} \iint_{S_i} x \Psi_i(x, y) dx dy + C_{N+3} \iint_{S_i} y \Psi_i(x, y) dx dy, \end{aligned}$$

получаем N уравнений для коэффициентов C_i . Оставшиеся три уравнения — это последние три уравнения системы (4) для коэффициентов сплайн-поверхности. Введём обозначения

$$\begin{aligned} s_{ij} &= \iint_{S_i} \Psi_i(x, y) r_j^2 \ln r_j^2 dx dy, & a_{ij} &= \iint_{S_i} \Psi_i(x, y) dx dy, \\ b_{ij} &= \iint_{S_i} x \Psi_i(x, y) dx dy, & d_{ij} &= \iint_{S_i} y \Psi_i(x, y) dx dy. \end{aligned}$$

Тогда система уравнений для C_i приобретёт вид

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1N} & a_1 & b_1 & d_1 \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2N} & a_2 & b_2 & d_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{N1} & s_{N2} & \dots & s_{NN} & a_N & b_N & d_N \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_N & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_N & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_N \\ C_{N+1} \\ C_{N+2} \\ C_{N+3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1^* \\ f_2^* \\ \dots \\ f_N^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

4. ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОШИБКИ АППРОКСИМАЦИИ

Система уравнений (6) позволяет найти коэффициенты сплайн-поверхности по измеренным значениям температуры (5) в том случае, когда истинное распределение температуры может быть

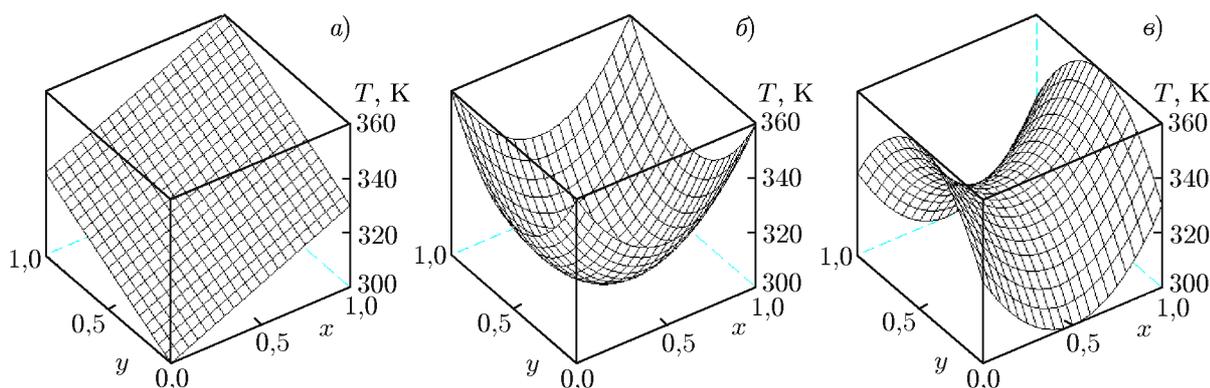


Рис. 3. Модельные распределения температуры

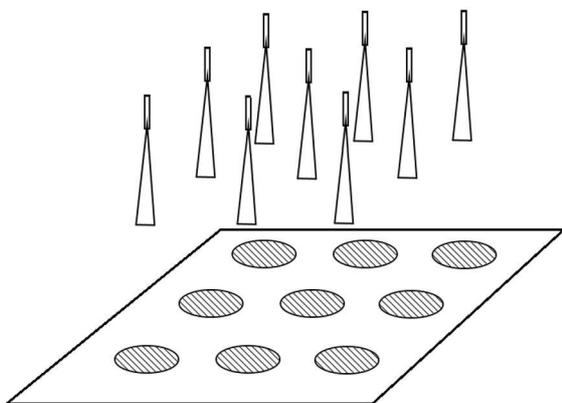


Рис. 4. Взаимное расположение объекта исследования и антенн

точно описано с помощью сплайн-поверхности. Таким образом, в этом случае возможно восстановить распределение температуры, несмотря на то, что при измерении происходит усреднение в некоторой, возможно довольно широкой, области.

С другой стороны, не любое распределение температуры в точности описывается сплайн-поверхностью вида (3). Требуется оценить величину ошибки, которая может возникнуть, если при восстановлении распределения температуры считать его описанным сплайн-поверхностью. Для этого рассмотрим три случая, когда истинное распределение температуры $\phi(x, y)$ описывается законом $f_i = 300 + 30x + 30y$, $0 \leq x, y \leq 1$ (участок наклонённой плоскости, рис. 3а), законом $f_i = 300 + 120(x - 0,5)^2 + 120(y - 0,5)^2$, $0 \leq x, y \leq 1$ (участок параболоида вращения, рис. 3б) и законом $330 + 120(x - 0,5)^2 - 120(y - 0,5)^2$, $0 \leq x, y \leq 1$ (участок однополостного гиперboloида, рис. 3в). Эти три модельные поверхности являются достаточно яркими представителями гладких поверхностей с различным распределением кривизны. Разброс температуры от 300 до 360 К выбран условно, оценка величины ошибки будет на него нормирована. Заметим, что наклонная плоскость может быть точно описана сплайн-поверхностью, поэтому ошибка должна получиться равной нулю. Величину ошибки определим с помощью численного моделирования.

Будем считать, что объект исследования представляет собой часть плоскости с размером 1×1 условных единиц длины. Введём на нём прямоугольную систему координат (x, y) : $x \in [0, 1]$, $y \in [0, 1]$. Пусть радиометр имеет девять каналов, оси симметрии диаграмм направленности перпендикулярны плоскости и пересекаются с ней в точках с координатами (x_i, y_i) : $(0,25; 0,25)$, $(0,25; 0,50)$, $(0,25; 0,75)$, $(0,50; 0,25)$, $(0,50; 0,50)$, $(0,50; 0,75)$, $(0,75; 0,25)$, $(0,75; 0,50)$, $(0,75; 0,75)$. Объект исследования и антенны схематично представлены на рис. 4. Для определённости, все функции $\Psi_i(x, y)$ будем считать равными константе $1/(\pi R^2)$ в круге с центром (x_i, y_i) и радиусом R и нулю вне его. Найдём величину ошибки для R , равных 10^{-4} , $0,10$ и $0,25$. В первом случае радиус меньше шага численного интегрирования, который был равен 10^{-3} , что позволяет промоделировать

случай бесконечно узких диаграмм направленности. Во втором случае диаграммы направленности от разных антенн не пересекаются, хотя и довольно широки, а в третьем — настолько широки, что пересекаются.

Моделирование заключается в вычислении девяти «экспериментальных» значений температуры на каждом из заданных распределений $\phi(x, y)$ по формуле (2). Далее, из системы (6) найдём коэффициенты сплайн-поверхности $\phi^*(x, y)$. Ошибкой будем считать нормированное усреднённое по площади среднеквадратичное отклонение истинного распределения от найденной сплайн-поверхности:

$$E = \frac{\sqrt{\frac{1}{S} \iint_S [\phi(x, y) - \phi^*(x, y)]^2 dx dy}}{\max \phi(x, y) - \min \phi(x, y)}. \quad (7)$$

Нормировка на разброс температуры, во-первых, позволяет получить относительную погрешность, а во-вторых, делает оценку ошибки информативной с точки зрения качества измерения переменной составляющей температуры, а не просто среднего значения, для измерения которого было бы достаточно одной антенны.

Сравним полученную ошибку при различных распределениях $\phi(x, y)$ и различной ширине диаграмм направленности R . Результаты численного моделирования приведены в табл. 1. Представлены значения ошибки E для трёх типов поверхности и трёх значений радиуса стягиваемой диаграммой направленности области поверхности R .

Можно отметить, что, во-первых, как предполагалось, наклонённая плоскость описывается сплайн-поверхностью точно, причём независимо от величины радиуса R . Во-вторых, даже при бесконечно узких диаграммах направленности, ошибки интерполяции сплайном как параболоида, так и гиперболоида весьма значительны, что соответствует совпадению модельных и интерполирующих поверхностей только в узлах интерполяции. В третьих, средняя ошибка восстановления значения температуры в каждой точке много меньше разброса температуры по всей поверхности, и в-четвёртых, она убывает с увеличением ширины диаграммы направленности.

Для сравнения рассмотрим случай, когда измеренные значения температуры подставляются в систему уравнений (4) для определения коэффициентов сплайн-поверхности без учёта ширины диаграммы направленности. Таким образом, при нахождении коэффициентов сплайн-поверхности диаграммы направленности теперь считаются бесконечно узкими, не являясь такими на самом деле. Получившиеся ошибки представлены в табл. 2. Из табл. 1 и 2 видно, что, за исключением плоского случая, ошибка аппроксимации без учёта ширины диаграмм направленности выше, чем с их учётом.

Полученный результат — повышение точности сплайн-интерполяции поверхностей с двумерной кривизной при замене узлов интерполяции областями интегрирования с конечными размерами и известным весовым распределением — не является очевидным. Его можно объяснить тем, что рост радиуса усреднения в окрестности узла интерполяции увеличивает погрешность в узловых точках, но уменьшает среднюю погрешность, делая сплайн более «правильным» в среднем, фактически переходя к сплайн-аппроксимации в указанном выше смысле.

Рассмотрим теперь, как меняется ошибка при росте числа измерительных каналов. Количество антенн увеличим до 16 и расположим их в узлах квадратной сетки в точках $(0,2; 0,2)$, $(0,2;$

Таблица 1. Ошибки восстановления распределения температуры с учётом диаграммы направленности (9 каналов)

поверхность	$R = 10^{-4}$	$R = 0,10$	$R = 0,25$
плоскость	$E = 0,00$	$E = 0,00$	$E = 0,00$
параболоид	$E = 0,26$	$E = 0,22$	$E = 0,12$
гиперболоид	$E = 0,25$	$E = 0,22$	$E = 0,14$

Таблица 2. Ошибки восстановления распределения температуры без учёта ширины диаграммы направленности (9 каналов)

поверхность	$R = 10^{-4}$	$R = 0,10$	$R = 0,25$
плоскость	$E = 0,00$	$E = 0,00$	$E = 0,00$
параболоид	$E = 0,26$	$E = 0,25$	$E = 0,22$
гиперболоид	$E = 0,25$	$E = 0,25$	$E = 0,25$

Таблица 3. Ошибки восстановления распределения температуры без учёта ширины диаграммы направленности (16 каналов)

поверхность	$R = 0,1$
плоскость	$E = 0,00$
параболоид	$E = 0,13$
гиперболоид	$E = 0,15$

0,4), (0,2; 0,6), (0,2; 0,8), (0,4; 0,2), (0,4; 0,4), (0,4; 0,6), (0,4; 0,8), (0,6; 0,2), (0,6; 0,4), (0,6; 0,6), (0,6; 0,8), (0,8; 0,2), (0,8; 0,4), (0,8; 0,6), (0,8; 0,8). Радиус диаграммы направленности положим равным 0,1, коэффициенты сплайн-поверхности рассчитываются по системе уравнений (6). Результаты представлены в табл. 3.

Из сравнения табл. 1 и 3 следует, что увеличение числа измерительных каналов привело к значительному уменьшению ошибки. Это объясняется наличием большей апостериорной информации при определении формы сплайн-поверхности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен метод, позволяющий повысить точность восстановления распределения температуры по поверхности исследуемого объекта за счёт учёта влияния ширины диаграмм направленности антенн многоканального радиометра на результаты измерений температуры объекта в узловых точках.

Проанализировав результаты численного моделирования, можно заключить следующее. Предложенный в статье метод действительно позволяет описывать двумерные распределения температуры, измеряемые с помощью многоканальных радиометров, посредством сплайн-поверхностей с высокой точностью, существенно превосходящей точность обычной сплайн-интерполяции, проводимой без учёта влияния ширины диаграмм направленности антенн. В рассмотренных примерах было достигнуто увеличение точности восстановления распределения, эквивалентное увеличению числа измерительных каналов системы с 9 до 16. Положительный эффект усиливается при увеличении степени перекрытия диаграмм направленности антенн многоканального радиометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С. Г., Бабкин А. В., Баум Ф. А. и др. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, испр. М.: Физматлит, 2004. 823 с.
2. Канаков В. А., Лупов С. Ю., Орехов Ю. И., Родионов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 3. С. 234.
3. Иконников В. Н., Канаков В. А., Савельев Д. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 2. С. 124.
4. Богданов Е. Н., Иконников В. Н., Канаков В. А. и др. // «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Труды Международной конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 23–27 марта 2015. С. 442.

5. Кисляков А. Г., Разин В. А., Цейтлин Н. М. Введение в радиоастрономию. Ч. 2. Техника радиоастрономии. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, 1996. 195 с.
6. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. М.: Физматлит, 2008. 704 с.
7. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф., Павликов В. В., Пустовойт В. И. // Радиотехника и электроника. 2013, Т. 58, № 8. С. 776.
8. Волосюк В. К., Гуляев Ю. В., Кравченко В. Ф. и др. // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 2. С. 109.
9. Гладун В. В., Котов А. В., Криворучко В. И. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 7. Art. no. 0421000114\0027.
10. Канаков В. А., Пархачёв В. В. // Вестник ННГУ. 2011. № 3(1). С. 84.
11. Ашкеназы В. О. Сплайн-поверхности: Основы теории и вычислительные алгоритмы: Учебное пособие. Тверь: Тверской гос. ун-т, 2003. 82 с.
12. де Бур К. Практическое руководство по сплайнам. М.: Радио и связь, 1985. 304 с.

Поступила в редакцию 18 сентября 2018 г.; принята в печать 30 января 2019 г.

**A METHOD FOR RETRIEVING THE TWO-DIMENSIONAL
TEMPERATURE PATTERN OF THE FAST-PROCESS FRONT
BY APPROXIMATING THE MEASUREMENT RESULTS
OF A MULTICHANNEL RADIOMETER**

V. N. Ikonnikov, V. A. Kanakov, and V. V. Parkhachev

We propose a method allowing one to improve the accuracy of retrieving the temperature distribution over the object surface by taking into account the influence of the antenna patterns of a multichannel radiometer on the measurement results at the nodal points. The accuracy improvement that is equivalent to an increase in the number of the measuring channels of the system from 9 to 16 is achieved. The positive effect is enhanced with increasing antenna-pattern overlapping degree.