

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105035

# 基于压缩感知与分段 Hermite 插值的 二维温度场重构方法\*

许富景 杜少成 荆蕊蕊

(山西大学自动化与软件学院 太原 030013)

**摘要:**在遥感测绘、爆炸场测试和物流安全等领域,往往需要高精度测量二维温度场信息。由于测量面积较大或者监测设备有限,经常导致温度场测试精度和分辨率较低。为此,本文结合压缩感知与分段 Hermite 插值理论提出一种二维温度场压缩重构方法。该方法首先对温度场进行随机欠采样;然后对采样结果进行分段 Hermite 插值以提高采样率;最后利用插值结果进行 OMP 高概率重构。该方法可以有效降低二维温度场测试的测量点数量。试验表明,在压缩率为 75% 情况下,二维温度场的重建误差不大于 6.5%。

**关键词:**温度场;压缩感知;随机采样;分段 Hermite 插值

**中图分类号:** TP206; TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4010

## Two-dimensional temperature field reconstruction method based on compressed sensing and piecewise Hermite interpolation

Xu Fujing Du Shaocheng Jing Ruirui

(School of Automation and Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** In the fields of remote sensing mapping, explosion field testing and logistics security, it is often necessary to measure two-dimensional temperature field information with high precision. Due to the large measurement area or limited monitoring equipment, temperature field measurement accuracy and resolution are often low. Therefore, this paper proposes a two-dimensional temperature field compression and reconstruction method combining compressive sensing and piecewise Hermite interpolation theory. Firstly, the temperature field is undersampled randomly. Secondly, the sampling results are interpolated by Hermite interpolation to improve the sampling rate. Finally, the interpolation results are used to reconstruct by OMP with high probability. This method can effectively reduce the number of measuring points in two-dimensional temperature field measurement. The experimental results indicate that the reconstruction error of two-dimensional temperature field is no more than 6.5% when the compression rate is 75%.

**Keywords:** temperature field; compressed sensing; random sampling; piecewise Hermite interpolation

## 0 引言

在遥感测绘、爆炸场测试和物流安全等领域,常常需要对二维温度场进行高精度测量<sup>[1-4]</sup>。目前常用的温度场测试方法主要有接触式测温和非接触式测温。接触式测温法主要有热电偶测温法和光纤测温法。文献[5]利用热电偶法获取瞬态温度场,文献[6]利用光纤测温法测量三峡大坝坝体温度场,这两种测量方法虽然测量精度较高,然而接触式存在响应速度慢、布设繁杂、后期难

易维护等诸多问题。因此非接触测温法逐渐盛行,这其中主要有热成像法和超声波测量法。热成像法主要利用被测对象辐射能量与温度关系进行温度场测量,文献[7]利用热成像法对瞬态温度场进行二维测量,然而其温度场分辨率较低。文献[8]利用超声波在介质中的传播速度与温度的关系测量温度场,这种测温方法抗干扰性强、测量范围广、实时连续性强,但需要高效的重构算法重建温度场。目前常用的算法主要有最小二乘法、高斯径向基函数法和遗传算法等<sup>[9-10]</sup>。这些方法虽然能够重建温度场,但重建误差较大,因此迫切需要一种高

收稿日期: 2021-12-19 Received Date: 2021-12-19

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61903240)项目资助

效、高精度温度测量方法。

针对上述问题,本文以压缩感知理论为基础,结合分段 Hermite 插值法提出一种新型二维温度场重构方法。该方法首先对温度场进行随机欠采样,然后利用分段 Hermite 插值对欠采样结果进行插值,使温度场采样数量满足压缩感知理论要求,最后利用 OMP 算法对插值结果进行高概率重构。由于分段 Hermite 插值可以有效保证插值数据的连续性,避免“龙格”现象,因此该方法可有效降低二维温度场测试过程中监测节点的布设数量。

## 1 压缩感知理论

压缩感知理论是 20 世纪初提出的一种感知端数据压缩方法<sup>[11]</sup>。由于其在数据采集时就进行了压缩,大大减少了后期数据传输系统的压力,因此被广泛应用。压缩感知理论主要包括 3 部分:信号的稀疏表示、观察矩阵设计和重构算法。

信号的稀疏表示是压缩感知的前提。假设信号  $x$  是时间域上的连续模拟信号,根据泛函理论  $x$  可以看成  $R^N$  空间中的一个  $N$  维列向量。因此,  $x$  可以由  $N$  维欧氏空间中一组基向量  $\{\psi_i\}_{i=1}^N$  线性表示,即:

$$x = \sum_{i=1}^N \theta_i \psi_i = \psi \Theta \quad (1)$$

其中,  $\Theta$  是  $x$  在  $\psi$  域的等价表示系数,即  $\Theta = [\theta_i] = [\langle x, \psi_i \rangle]$ 。根据稀疏信号定义,如果  $\Theta$  中的非零元素个数  $S$  远小于  $N$ ,则认为  $x$  信号在  $\psi$  域是稀疏信号,这样稀疏信号  $x$  就是可压缩信号。由于正交变换具有可逆性,所以常用的稀疏基有傅里叶变换基、小波变换基或者 DCT 基中等<sup>[12]</sup>。

在信号稀疏性的基础上,要对稀疏信号  $x$  进行压缩感知还需要一个与稀疏基非相关的观察矩阵。该矩阵的主要作用就是对稀疏信号进行降维投影,从而实现真正的感知端数据压缩。假设观察矩阵为  $\Phi \in R^{M \times N}$ ,则该过程可用式(2)表示:

$$y = \Phi x \quad (2)$$

式中:  $y$  为观察结果,且  $y$  数量  $M$  小于  $x$  的数量  $N$ 。将式(1)代入,则式(2)可转化为:

$$y = \Phi \psi \Theta = \tilde{\Phi} \Theta \quad (3)$$

式(3)中  $\tilde{\Phi} \in R^{M \times N}$  称为感知矩阵。为了保证压缩感知数据重构的精度,观察矩阵  $\Phi$  的选取必须与稀疏基是不相关的或者满足 RIP 准则,即<sup>[13]</sup>:

$$(1 - \delta) \|x\|_2^2 \leq \|\Phi x\|_2^2 \leq (1 + \delta) \|x\|_2^2 \quad (4)$$

式中:  $\delta$  为 RIP 系数,  $0 < \delta < 1$ 。根据这一原则,常用的观测矩阵有 Gaussian 矩阵和伯努利矩阵等。

压缩感知理论中,信号重构实际上就是式(2)的求

解,然而由于观察信号  $y$  的数量  $M$  较少,因此无法直接求解式(2)。幸运的是,  $S < M < N$ ,故可通过求解式(3)获得  $x$  在  $\psi$  域的等价系数,进而利用式(1)求解出  $x$  信号。根据上述分析,信号重构实际上转化为如下最优化问题<sup>[14]</sup>:

$$\min \|\psi^T x\|_{l_0} \quad \text{s. t. } y = \Phi \psi x \quad (5)$$

然而直接求解  $l_0$  范数较难,根据泛函理论,可以将  $l_0$  范数问题近似转化为  $l_1$  范数的求解,即:

$$\min \|\psi^T x\|_{l_1} \quad \text{s. t. } y = \Phi \psi x \quad (6)$$

根据上述分析,数据重构问题实际上可以采用凸松弛算法来求解。凸松弛求解算法所需的观测数目较少,但计算复杂度较高,导致算法的收敛速度较慢,而通过贪婪迭代来不断更新支撑集从而不断逼近原始解的贪婪追踪算法由于结构简单、计算量小而逐渐成为信号重构的主流算法,比如 MP (matching pursuit) 算法、OMP (orthogonal matching pursuit) 算法和 ROMP (regularized orthogonal matching pursuit) 算法等<sup>[15]</sup>。

## 2 分段 Hermite 插值方法

假设  $y[n]$  是时域信号  $x(t)$  的离散采样序列。在第  $i$  次采样中,  $x[i]$  和  $y[i]$  表示采样时间和采样结果。如果时间序列的采样时间由低到高排列为  $x[0] < x[1] < \dots < x[i] \dots < x[n]$ ,则信号  $x(t)$  在  $[0, n]$  区间内的 Hermite 插值函数  $H(x)$  应满足如下 3 条要求<sup>[16-17]</sup>:

1) 在分段子区间上  $H_i(x)$  是一个不超过 3 次的多项式函数;

2)  $H_i(x)$  在每个端点处的函数值等于端点值,即  $H_i(x) = y[x]$ ;

3)  $H(x)$  在区间  $[x[0], x[n]]$  上的 1 阶导数连续,即  $H_i(x) = y'[x]$ 。

根据 Hermite 插值理论,为了避免高阶插值出现“龙格”现象,分段 Hermite 插值函数应当是一个不超过 3 次的多项式。设  $x(t)$  信号在  $[i-1, i]$  上的插值函数为  $H_i(x)$ ,其中  $H'_i(x) = y'[x]$  是区间  $[i-1, i]$  端点的一阶导数,区间  $i$  的长度为  $h_i = x[i] - x[i-1]$ ,则 Hermite 插值函数  $H_i(x)$  在区间  $[i-1, i]$  上可表示为:

$$H_i(x) = y[i-1] \varphi_{i-1}(x) + y[i] \varphi_i(x) + y'[i-1] \psi_{i-1}(x) + y'[i] \psi_i(x) \quad (7)$$

式中:称  $\varphi_{i-1}(x)$ 、 $\varphi_i(x)$ 、 $\psi_{i-1}(x)$  和  $\psi_i(x)$  为插值基函数。对式(7)两边取导数可得:

$$H'_i(x) = y[i-1] \varphi'_{i-1}(x) + y[i] \varphi'_i(x) + y'[i-1] \psi'_{i-1}(x) + y'[i] \psi'_i(x) \quad (8)$$

又由于  $H_i(x)$  在  $[i-1, i]$  满足如下条件:

$$\begin{cases} H_i(x[i-1]) = y[i-1] \\ H_i(x[i]) = y[i] \\ H'_i(x[i-1]) = y'[i-1] \\ H'_i(x[i]) = y'[i] \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得:

$$\begin{cases} \varphi_{i-1}(x[i-1]) = 1, \varphi_i(x[i-1]) = 0, \\ \psi_{i-1}(x[i-1]) = 0, \psi_i(x[i-1]) = 0 \\ \varphi_{i-1}(x[i]) = 0, \varphi_i(x[i]) = 1, \\ \psi_{i-1}(x[i]) = 0, \psi_i(x[i]) = 0 \\ \varphi'_{i-1}(x[i-1]) = 0, \varphi'_i(x[i-1]) = 0, \\ \psi'_{i-1}(x[i-1]) = 1, \psi'_i(x[i-1]) = 0 \\ \varphi'_{i-1}(x[i]) = 0, \varphi'_i(x[i]) = 0, \\ \psi'_{i-1}(x[i]) = 1, \psi'_i(x[i]) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

解上述方程组可得:

$$\begin{aligned} \varphi_{i-1}(x) &= \left(1 + 2 \frac{x - x_{i-1}}{h_i}\right) \frac{(x - x_i)^2}{h_i^2} \\ \varphi_i(x) &= \left(1 - 2 \frac{x - x_{i-1}}{h_i}\right) \frac{(x - x_i)^2}{h_i^2} \\ \psi_{i-1}(x) &= \frac{1}{h_i^2} (x - x_{i-1})(x - x_i)^2 \\ \psi_i(x) &= \frac{1}{h_i^2} (x - x_i)(x - x_{i-1})^2 \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)计算得  $H_i(x)$  为:

$$\begin{aligned} H_i(x) &= y[i-1] \left(1 + 2 \frac{x - x_{i-1}}{h_i}\right) \frac{(x - x_i)^2}{h_i^2} + \\ y[i] &\left(1 - 2 \frac{x - x_{i-1}}{h_i}\right) \frac{(x - x_i)^2}{h_i^2} + \\ y'[i-1] &\frac{1}{h_i^2} (x - x_{i-1})(x - x_i)^2 + \\ y'[i] &\frac{1}{h_i^2} (x - x_i)(x - x_{i-1})^2 \end{aligned} \quad (12)$$

类似地,可以确定其他子区间的插值函数  $H_i(x)$ ,进而确定全区间  $[x[0], x[n]]$  上的插值函数  $H(x)$ 。

### 3 基于压缩感知与样条插值的温度场重构方法

压缩感知理论指出,若信号是可压缩信号,则可在信号采集阶段利用较低采样率采集,而后通过重构算法对其进行高精度重构。温度场信号是一种典型的缓变连续信号,研究表明其在 DCT 或小波基下具有一定稀疏性,故可对温度场信号低采样率采集,而后进行高概率、高分辨率重构。

由于高斯观察矩阵可有效保证与稀疏基的非相关性,因此基于压缩感知与分段 Hermite 插值的温度场重构方法将经典压缩感知中的观察矩阵构造分为两步:首先对温度场进行随机采样,然后利用高斯观察矩阵对随机采样结果进行投影。

假设温度场随机采样可以用矩阵  $S_{N \times N}$  表示,投影可用矩阵  $P_{M \times N}$  表示,则该方法的观测矩阵  $\Phi$  应该为:

$$\Phi = P_{M \times N} \cdot S_{N \times N} \quad (13)$$

选取 db3 小波基为稀疏基,将观察矩阵  $\Phi$  代入式(4),结果显示其与稀疏基的非相关性更好。这样基于随机采样再投影的温度场压缩感知原理如图 1 所示,其中  $S_{N \times N}$  为随机采样矩阵且仅包含  $L$  个非零元素的对角阵;  $P_{M \times N}$  为  $M \times N$  的投影矩阵且其中元素  $P_{ij}$  ( $0 < i < M, 0 < j < N$ ) 满足均值为 0 的高斯分布;  $\psi$  稀疏基;  $\Theta$  为稀疏基下的稀疏系数。

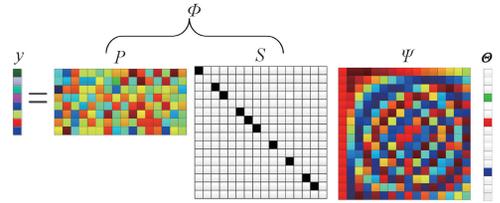


图 1 温度场压缩感知原理

Fig. 1 Schematic diagram of compressed sensing for temperature field

压缩感知原理指出,要对温度场进行高概率重构,温度场中监测点数量  $M$  需满足如下关系<sup>[18]</sup>:

$$M > C \cdot \log_2(N/S) \quad (14)$$

式中:  $C$  为常数,  $N$  为经典采样需要的点数,  $S$  为信号稀疏度。然而,在大型温度场监测中随机采样的点数往往无法满足式(14),导致直接应用压缩感知原理进行温度场重建精度较低,甚至无法重构。因此,本文对随机采样结果进行数据插值,使插值结果的监测点数量远高于式(14)要求,进而提高温度场重构成功率和分辨率。由于分段 Hermite 插值法具有 1 阶导数连续特性并且无明显过冲现象,可以有效保证温度场分布光滑特征,故采样分段 Hermite 插值法对随机采样结果进行插值。最后利用 OMP 算法对插值结果进行高概率重构。基于压缩感知与分段 Hermite 插值的温度场重构原理如图 2 所示。

根据上述分析,基于压缩感知与分段 Hermite 插值的温度场重构方法可以分为 5 步: 1) 对原始温度场进行随机采样,获得采样结果  $y_o(n)$ ; 2) 对随机采样结果  $y_o(n)$  进行分段 Hermite 插值,获得观察结果  $y_l(n)$ ; 3) 对插值结果进行投影,获得投影结果  $y_p(n)$ ; 4) 依据投影结果  $y_p(n)$  和感知矩阵  $\Phi$  对原温度场进行 OMP 重构,获得温度场稀疏系数  $\Theta$ ; 5) 依据稀疏系数  $\Theta$  获得重构温度场。

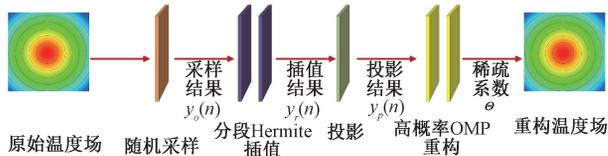


图 2 基于压缩感知与分段 Hermite 插值的温度场重构原理

Fig. 2 Temperature field reconstruction schematic diagram based on compressed sensing and piecewise Hermite interpolation

算法流程如图 3 所示。

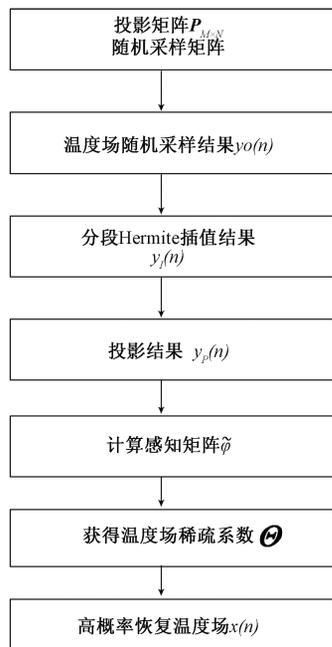


图 3 基于压缩感知与分段 Hermite 插值的温度场重构流程

Fig. 3 Temperature field reconstruction flow chart based on compressed sensing and piecewise Hermite interpolation

## 4 实验与分析

为验证基于分段 Hermite 插值的温度场压缩重构方法重构效果,这里首先将算法应用于理论二维温度场模型进行分析。假设二维温度场可以表示为:

$$T = 30 - 0.2 \times \sqrt{x^2 + (y - 16)^2} \quad (15)$$

其中,  $x$  为温度场横坐标,  $y$  为温度场纵坐标, 单位为米。当  $0 < x < 32$ ,  $0 < y < 32$  并且每隔 1 m 布置一个温度监测点, 则二维温度场模型如图 4 所示。

选取 db3 小波基为稀疏基, 根据压缩感知理论, 要对该温度场实现高概率重构需要至少 448 个观察数据。这里首先对原始温度场随机采样 256 个数据点, 然后利用分段 Hermite 插值法将采样结果补成 512 个数据点, 随后进行投影, 最后利用 OMP 算法对其进行重构。为验证基

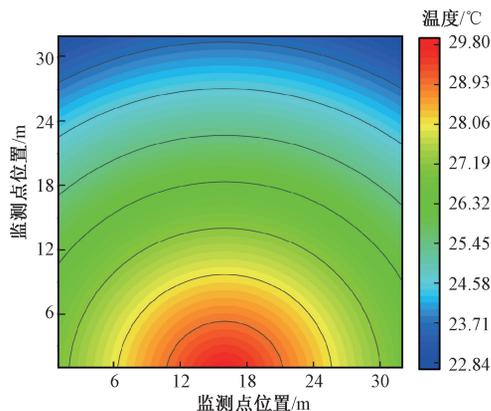


图 4 二维温度场模型

Fig. 4 The model of two-dimensional temperature field

于分段 Hermite 插值的温度场压缩重构方法重构效果, 这里选取线性插值法和临近插值法两种插值法作为对比, 3 种算法的随机采样结果和重构结果如图 5 所示。

压缩感知中二维重构数据的重构误差  $P_2$  可以表示为:

$$P_2 = \frac{\|\hat{x} - x\|_2}{\sqrt{m \times n}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}}{\sqrt{m \times n}} \quad (16)$$

其中,  $\hat{x}$  为重构结果,  $x$  为原始数据,  $m$  和  $n$  为二维数据的行数和列数,  $\|x\|_2$  为  $x$  的 2 范数。将 3 种方法的重构结果代入式(15)计算的重构误差如表 1 所示。由表 1 可知, 基于 Hermite 插值的压缩感知方法重构误差约为 5.0%, 明显低于其他两种方法。

表 1 二维温度场模型重构误差

Table 1 Reconstruction error of two-dimensional temperature field model

插值方法	线性插值法	临近插值法	分段 Hermite 插值法
误差/%	6.3	13.9	5.0

现场实验于某长度为 39.5 m, 宽度为 25.8 m 的仓库中进行。按照经典采样法, 为获得高精度温度场, 长度方向每 1.2 m 需要布置一个监测点, 宽度方向每 0.8 m 需要布置一个监测点, 则共需要  $32 \times 32 = 1024$  个监测点并且每个监测点每天需各自采集一次温度数据, 其布置示意图如图 6 所示, 采用传统监测法的高精度监测结果如图 7 所示。

对二维温度场进行小波分析可获取其近似稀疏度, 然后代入式(14), 最少需要 448 个观察点才能对该温度场进行 OMP 高概率重构。依据第 3 节算法, 这里首先在温度场的每一行随机布置 8 个温度监测点, 则 32 行共布置 256 个温度监测点进行温度场采样, 然后利用分段

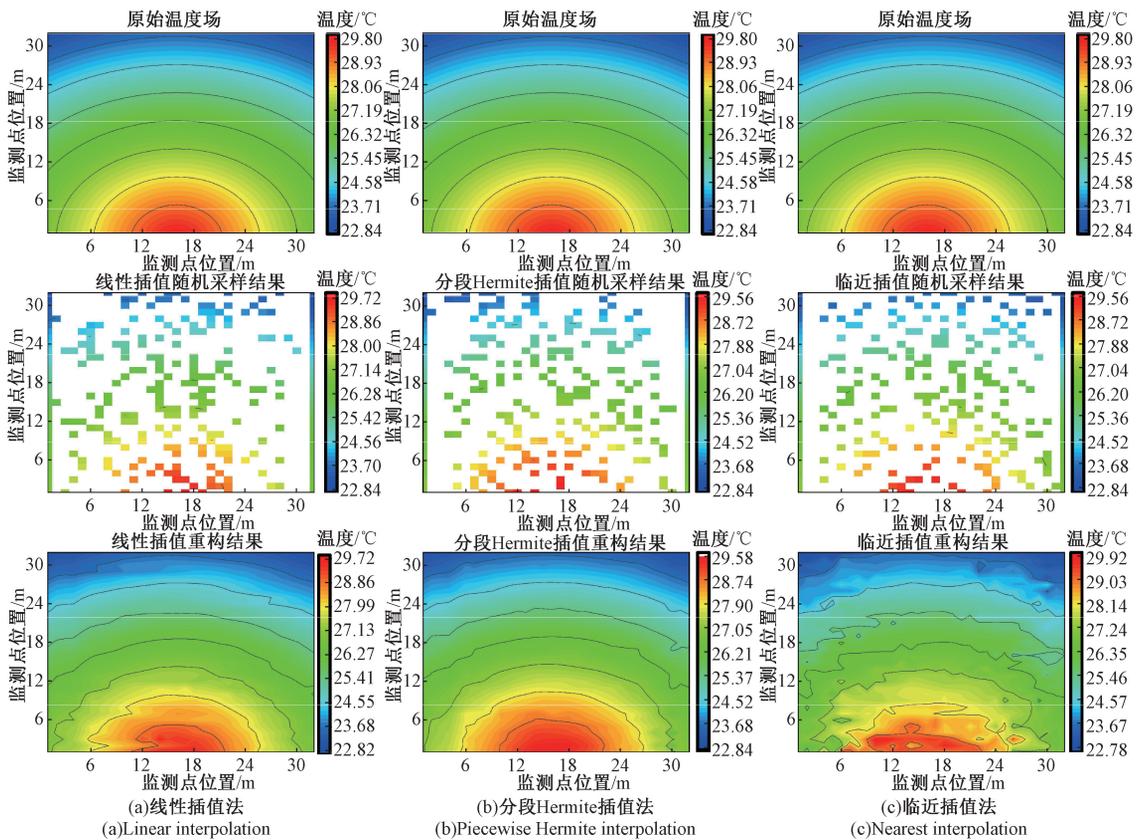


图 5 二维温度场模型重构结果

Fig. 5 Reconstruction results of two-dimensional temperature field model

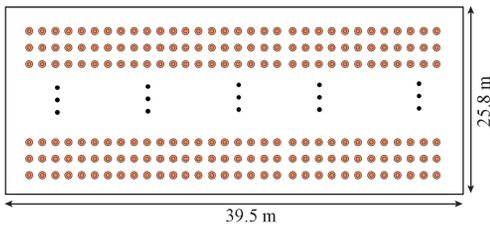


图 6 传统温度场监测节点布设示意图

Fig. 6 Layout schematic diagram of traditional temperature field monitoring node

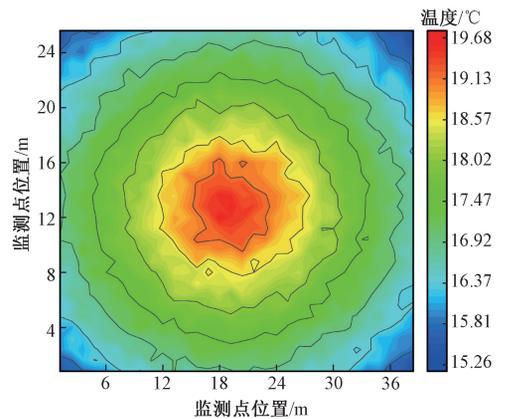


图 7 高精度温度场监测结果

Fig. 7 High precision measurement results of temperature field

Hermite 插值法将随机采样结果插成 512 个点。

为了验证基于分段 Hermite 插值的压缩感知重构法重构精度, 仍然选取线性插值法和临近插值法作为对比, 3 种方法的随机采样结果和采用 OMP 重构法获得的重构结果如图 8 所示。

将 3 种方法的重构结果代入式 (15) 计算的重构误差如表 2 所示。从表 2 可以看出, 分段 Hermite 插值法的误差最低, 当数据压缩率为经典采样的 75% 时, 温度场重构误差约为 6.5%。临近插值法无法兼顾温度场连续变化趋势, 故误差较大。在实际应用中, 线性插值法和临近插值法还会受到随机节点布设的影响, 产生插值边缘效应,

进而无法重构。

表 2 温度场重构误差

Table 2 Reconstruction error of temperature field

插值方法	线性插值法	临近插值法	分段 Hermite 插值法
误差/%	9.47	18.5	6.5

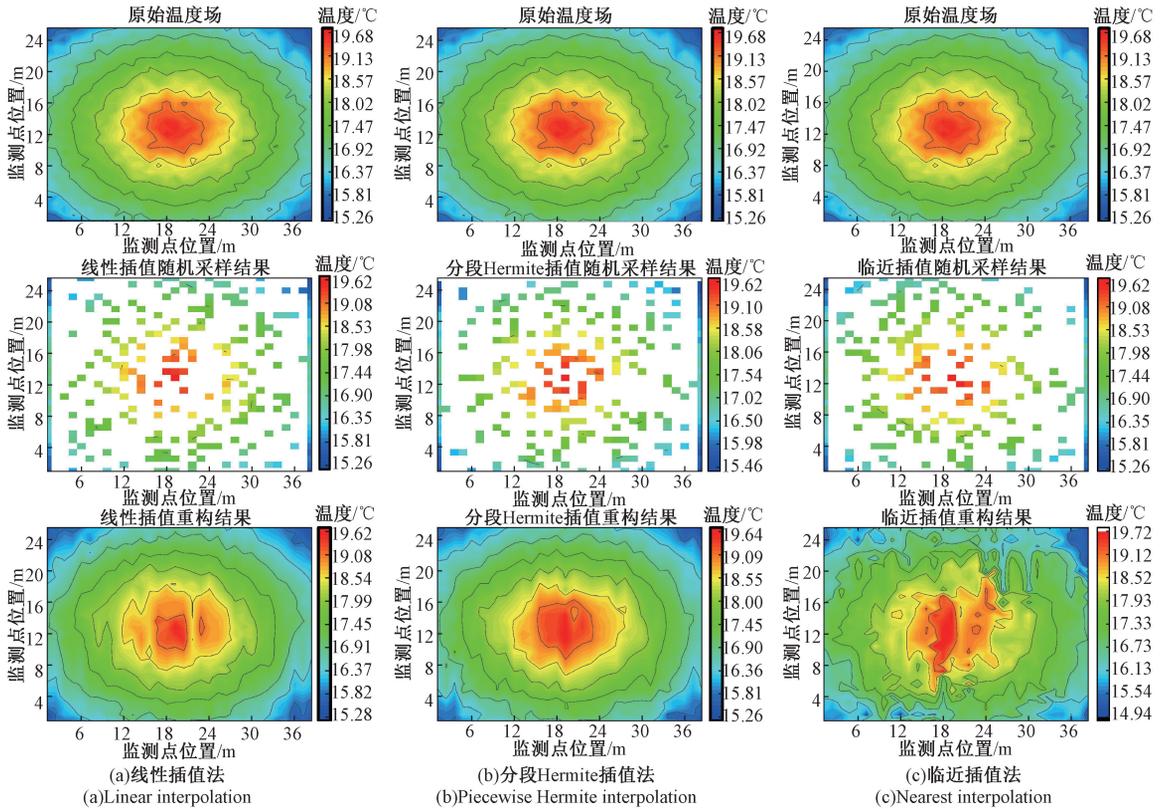


图 8 温度场重构结果

Fig. 8 Reconstruction results of temperature field

当然,随着随机采样数量的增加温度场重构误差越来越低,二者关系如图 9 所示。当监测点数量为 256 时,温度场重构误差率为 6.5%,而若采用经典压缩感知却无法重构原始温度场。

### 5 结 论

在遥感测绘、爆炸场评估和物流安全等研究领域,对温度场的测试精度要求越来越高。然而,传统温度场监测方法普遍存在测量精度低、分辨率差的问题。为此,本文结合压缩感知与分段 Hermite 插值理论提出一种新型温度场压缩重构方法。该方法首先对温度场进行随机欠采样;然后,对采样结果进行分段 Hermite 非线性插值;最后利用插值结果进行温度场 OMP 重构。该方法有效降低了二维温度场测试对测量点数量的要求。试验表明,在压缩率为 75% 情况下,温度场的重建误差不大于 6.5%。

### 参考文献

[ 1 ] ZHAO Z W. Remote sensing estimation of daily average temperature in northwestern China based on advanced scanning radiometer for the earth observing system [J]. Journal of Environmental Protection Ecology, 2018, 19(3) :1280-1292.

[ 2 ] 刘晓蔚,祝海江,刘兴旺,等.一种基于加权准则的火炮爆炸场中高温火球三维温度场的迭代重建算法 [J].北

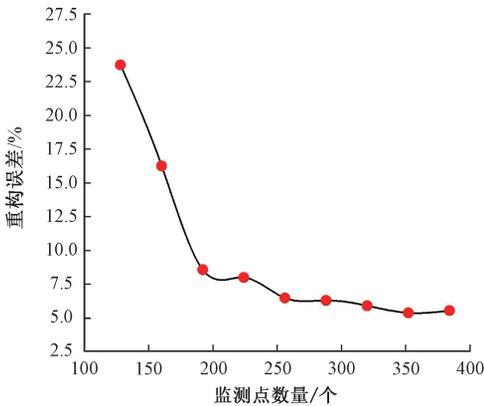


图 9 重构误差与布设数量关系

Fig. 9 The relationship between reconstruction error and layout quantity

- 京化工大学学报, 2021, 48(3): 65-74.
- LIU X W, ZHU H J, LIU X W, et al. An iterative reconstruction algorithm for the 3D temperature field of the high-temperature fireball in a gun explosion field based on weighted multi-criteria [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2021, 48(3): 65-74.
- [ 3 ] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于温度场云图的储量数量监控方法研究 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 290-298.
- CUI H W, WU W F, WU Z D, et al. Monitoring method of stored grain quantity based on temperature field cloud maps [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 290-298.
- [ 4 ] 赵文超, 张彪, 许传龙, 等. 基于光场分层成像的火焰三维温度场测量 [J]. 东南大学学报, 2017, 47(5): 938-944.
- ZHAO W CH, ZHANG B, XU CH L, et al. Measurement of 3D flame temperature field based on light field optical sectioning tomography [J]. Journal of Southeast University, 2017, 47(5): 938-944.
- [ 5 ] 刘广海, 吴俊章, FOSTER A, 等. 多温蓄冷车设计与车内温度场分析 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 309-316.
- LIU G H, WU J ZH, FOSTER A, et al. Design of multi-temperature cold storage vehicle and analysis on temperature field in vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 309-316.
- [ 6 ] 周华维, 赵春菊, 陈文夫, 等. 基于海量光纤测温数据的混凝土坝三维温度场分析系统 [J]. 清华大学学报, 2021, 61(7): 738-746.
- ZHOU H W, ZHAO CH J, CHEN W F, et al. Three-dimensional temperature field analyses based on optical fiber temperature monitoring data in concrete dams [J]. Journal of Tsinghua University, 2021, 61(7): 738-746.
- [ 7 ] 颜华, 顾梦楠, 王伊凡. 基于基函数和卡尔曼滤波的温度场重建 [J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(1): 55-60.
- YAN H, GU M N, WANG Y F. Reconstruction of temperature fields based on basis function approximation and Kalman filtering [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(1): 55-60.
- [ 8 ] 许仁翰, 周钺捷, 狄长安, 等. 基于高速成像的爆炸温度场测试方法 [J]. 兵工学报, 2021, 42(3): 640-647.
- XU R H, ZHOU Y J, DI CH AN, et al. A temperature measuring method for explosive temperature field based on high-speed imaging technology [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(3): 640-647.
- [ 9 ] 董晨龙, 周新志, 白兴都, 等. 基于 Reflected-Sigmoid 径向基函数插值的温度场重建算法 [J]. 四川大学学报, 2019, 56(5): 851-856.
- DONG CH L, ZHOU X ZH, BAI X D, et al. Temperature field reconstruction algorithm based on reflected sigmoid radial basis function interpolation [J]. Journal of Sichuan University, 2019, 56(5): 851-856.
- [ 10 ] 赵蓝飞, 席志红. 基于三次样条插值的高动态范围成像方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(7): 1279-1289.
- ZHAO L F, XI ZH H. High dynamic range imaging based on cubic spline interpolation [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2015, 27(7): 1279-1289.
- [ 11 ] 焦李成, 杨淑媛. 压缩感知回顾与展望 [J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1651-1662.
- JIAO L CH, YANG SH Y. Development and prospect of compressive sensing [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1651-1662.
- [ 12 ] 李帅永, 毛维培, 程振华, 等. 基于 VMD 和 K-SVD 字典学习的供水管道泄露振动信号压缩感知方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 49-60.
- LI SH Y, MAO W P, CHENG ZH H. Compressed sensing method for leakage vibration signal in water-supply pipelines based on VMD and K-SVD dictionary learning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 49-60.
- [ 13 ] 颜上取, 汤昊, 刘备, 等. 基于压缩感知的 HIFU 回波信号降噪研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 19-25.
- YAN SH Q, TANG H, LIU B, et al. Research on HIFU echo signal denoising based on compressed sensing technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11): 19-25.
- [ 14 ] DAI Z J, CHEN Y, WEN W F, et al. Compressed sensing based sub-Nyquist sampling of multiple sinusoids with dual rate channels [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89, 125113.
- [ 15 ] XU F J, HU L H, JIA T W, et al. High precision measurement method for dynamic transient signal based on compressed sensing and spline polynomial interpolation [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92:015113.
- [ 16 ] 邓值红, 汪进文, 尚剑雨, 等. 基于 Hermite 插值的制导炮弹姿态旋转矢量优化方法 [J]. 兵工学报, 2018, 39(10): 2057-2065.

DENG ZH H, WANG J W, SHANG J Y, et al. Optimization of rotation vector of guided projectile attitude based on Hermite interpolation [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(10):2057-2065.

- [17] 陶天友, 王浩. 基于 Hermite 插值的简化风场模拟[J]. 工程力学, 2017, 34(3):182-188.  
TAO T Y, WANG H. Reduced simulation of the wind field based on Hermite interpolation [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3):182-188.
- [18] 周俊, 伍星, 迟毅林, 等. 基于改进频域压缩感知的轴承符合故障欠定盲提取[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14):123-134.  
ZHOU J, WU X, CHI Y L, et al. Underdetermined blind extraction for bearings complex failures based on improved frequency domain compressed sensing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14):123-134.

## 作者简介



**许富景**(通信作者), 2011 年于中北大学获得学士学位, 2016 年于中北大学获得博士学位, 现为山西大学副教授, 主要研究方向为动态测控与智能仪器、智能物联网技术。

E-mail: xufujing@126.com

**Xu Fujing** (Corresponding author) received his B. Sc.

degree from North University of China in 2011 and Ph. D. degree from North University of China in 2016, respectively. Now he is an associate professor in Shanxi University. His main research interests include dynamic measurement and control and intelligent instrument and intelligent Internet of Things technology.



**杜少成**, 2020 年于长安大学获得学士学位, 现为山西大学研究生, 主要研究方向为信息获取与信息处理。

E-mail: dushaocheng2020@163.com

**Du Shaocheng** received his B. Sc. degree from Chang'an University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Shanxi University. His main research interests include information acquisition and information processing.



**荆蕊蕊**, 2020 年于山西大学获得学士学位, 现为山西大学研究生, 主要研究方向为复杂环境下煤层气储运安全评估技术研究。

E-mail: jrly0207@163.com

**Jing Ruirui** received her B. Sc. degree from Shanxi University in 2020. Now she is a M. Sc. candidate at Shanxi University. Her main research interests include safety evaluation technology of coal-bed methane storage and transportation in complex environment.