

引用格式: ZHANG Xuan, LI Xijie, GAO Ming, et al. Research on the Temperature Variation Field Reconstruction Between the Main Reflector and Subreflector of the Large-Aperture Radio Telescope[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0712003
张璇,李西杰,高明,等. 大口径射电望远镜主副面间温度变化场重建研究[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0712003

大口径射电望远镜主副面间温度变化场重建研究

张璇^{1,2}, 李西杰², 高明¹, 林上民^{2,3,4}, 王虎^{2,3,4}, 赖云强^{2,3}, 吕宏¹

(1 西安工业大学 光电工程学院 西安 710021)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710119)

(3 中国科学院大学, 北京, 100049)

(4 西安市空间敏感器光学技术工程研究中心, 西安, 710119)

摘 要:针对大口径射电望远镜主副反射面间复杂环境导致的激光测量副面位姿精度下降的问题,提出了一种高精度的空间温度变化场重建方法。针对传统空间插值方法在处理大口径天线主副面间不均匀分层造成的垂直梯度突变温度场时的局限性,引入各向异性校正矩阵与位置相关的距离张量,创新性地将温度场分解为慢变背景项与瞬时脉动项,通过改进的反距离加权法、径向基函数、泛克里金法以及压缩感知稀疏重建的方法直接重建温度时空变化场。通过搭建南山 25m 射电望远镜空间立体环境监测模型进行外场实验,结果表明,改进的各向异性反距离加权方法在温度变化场重建中误差最小,更适用于大口径射电望远镜环境场的重建,也为后续风场参数反演与激光大气传输偏折精准校正奠定了核心理论与数据基础。

关键词:大口径射电望远镜;温度变化场;环境监测;各向异性插值;激光偏折精度

中图分类号:P404

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265507.0712003

0 引言

大口径射电望远镜是实现深空探测和天文观测的重大科学设备,其主副反射面位姿的激光测量精度直接受其复杂环境的影响^[1-2]。然而,由于太阳辐射、热汇聚效应及风场扰动,天线主副面间形成显著的不均匀空气分层。激光在天线主副面间复杂环境传输时,受折射率梯度变化影响发生气动偏折,严重破坏光束传输的稳定性与测量精度。刁鲁欣等^[3]通过分析湍流环境对光束传输的影响,揭示了介质扰动对激光传输影响的重要性。对于大口径天线位姿测量来说,评估并校正环境引起的激光偏折前提是获取高精度的空间环境参数场。现有的观测站气温数据无法满足大口径天线气候模型等相关研究的空间精度要求,且天线主副面间位置的环境参数不易直接测量,因此区域内激光传输路径的空间温度数据只能通过间接推算获取。微小的三维温度梯度都会显著影响光机系统的整体精度,必须依赖精确的温度场分布重构与控制^[4],需要对环境监测与环境场重建方法及其优化进行深入研究,实现天线内部离散点气温网格化和环境场重建。

空间插值法是实现连续空间数据重建的关键技术,现已被广泛应用于气象和环境场预测中,常用的空间插值法总体概括来说有以下几种:反距离加权法(Inverse Distance Weighting, IDW)、径向基函数插值(Radial Basis Function, RBF)、样条函数法(Spline, S)、趋势面法(Trend Surface, TS)和物理模型插值法等

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2203501),国家自然科学基金(11803075);陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBMS-536)

第一作者:张璇(1993—),女,博士,主要研究方向为激光大气传输。Email: spritexuan7@163.com

通讯作者:高明(1964—),男,教授,主要研究方向为光电测试与光电仪器、光学设计,精密仪器及机械,激光大气传输理论及技术,光电对抗技术等。Email: minggao1964xatu@163.com;王虎(1975—),男,研究员,主要研究方向为天体敏感器光学技术、空间碎片光学探测技术、光学设计理论与应用、杂散光抑制及评估技术、激光传输。Email: wanghu@opt.ac.cn

收稿日期:2026-03-04; **录用日期:**2026-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

方法^[5-7]。传统的环境温度场通常遵循线性的垂直梯度规律,即温度随海拔高度单调递减或递增。然而,对于中国新疆奇台 110m 超大口径的射电望远镜,由于主反射面的汇聚特性,导致实际测量的热场分布往往呈现出主反射面与副反射面温度高、中间不被遮挡的空气区域温度低的非典型分层现象,温度场的变化表现为各向异性,其对空间插值方法的适应性要求极高,传统的空间重建插值方法在处理这类突变流场时常出现平滑失真或重建精度差的问题。为了提高各向异性温度场重建精度,DUAN Ping 等^[8]提出了一种考虑各向异性的 IDW 方法来重建温度场,以更好地分析温度的空间分布特征;各向异性 IDW 在简单 IDW 的基础上,通过考虑方向性差异,提高了在特定各向异性数据下的插值精度^[9];ZHOU Xinzhi 等^[10]提出了一种基于反射 Sigmoid 径向基函数和 QR 分解的温度场重建算法,该算法通过结合 RBF 的优点,提升了在各向异性复杂温度场中的重建精度;压缩感知(Compressive Sensing, CS)与低秩稀疏(Low Rank Sparse, LRS)是一种创新的信号处理方式,通过稀疏采样和优化算法重建数据提高温度场重建的精度和鲁棒性^[11]。WU Jun 等^[12]提出了基于压缩感知背景纹影法的非轴对称温度场重建方法,可通过数据的稀疏性约束从有限投影数据恢复高分辨率的温度场;克里金插值法(Kriging Interpolation)在温度场重建方面,因其考虑空间趋势和空间自相关性的能力,通常在温度场重建中表现出较好的性能,尤其是在数据存在显著空间各向异性时,在重庆山地区域气象要素空间插值方法的比较研究中也表现出更好的插值效果与重建精度^[13-14]。

尽管改进空间插值方法可以实现基于离散监测点的各向异性温度场的静态、动态重建,为激光传输路径的环境分析提供了重要的空间分布信息,然而在实际的射电望远镜运行环境中,温度场往往具有动态变化与复杂时空关联的特性,在对实时性与连续性要求较高的激光大气传输偏折研究中,处理实时动态性方面存在局限性。GAO Shiping 等^[15]针对环境数据缺失的问题,提出粗颗粒度与细颗粒度两种动态时空插值方法,通过根据缺失值的时间和空间特征动态调整插值权重,显著提高了环境监测数据中连续缺失值的插值精度;CHEN Zehong 等^[16]提出一种基于瞬态热传导系统温度响应的时空相关特性,建立测量空间与估计空间温度之间的模型,通过离线阶段建立响应时空相关矩阵,利用少量实时测量数据直接重建瞬态温度场。LI Siyu 等^[17]提出了一个复杂的多维时间序列分析框架,通过分别提取时间和空间特征,由飞行时间变化所反映的温度场动态进行温度场重建。在实际应用中,选择最合适的重建方法需要综合考虑特定区域的物理特性、可用测量数据的特点、对重建精度和实时性的要求以及计算资源的限制,因此面对大口径射电望远镜主副面间的环境研究这一背景,需要分析其适用性。上述研究在动态时空插值和温度场重建方面的探索,为本文提供了重要的理论支撑与方法启示。

基于以上研究,本文针对大口径射电望远镜主副面间的环境监测精度的问题,引入各向异性校正矩阵与位置相关的距离张量,将其与时序变化相结合,提出一种结合时序变化的温度变化场重建方法,将温度场分解为慢变背景项与瞬时脉动项重建温度变化场,这将为后续大口径射电望远镜主副面间的风场参数反演与激光大气传输偏折精准校正奠定核心理论与数据基础。

1 空间温度变化场重建原理

大口径射电望远镜主副面间的温度场具有明显的梯度变化特征,如图 1 所示,由于大口径天线主反射面的热汇聚效应,副面温度最高,主面次之,中间空气层温度相对较低,形成了垂直方向上的强温度梯度变化,导致激光传输路径的偏折。这种非典型分层现象对空间插值方法的适应性提出了极高要求。

1) 各向异性 IDW

针对天线内环境垂直分层强于水平波动的现象,引入各向异性校正矩阵和与位置相关的距离张量,使权重函数能自适应局部温度梯度的方向^[18]。为了处理温度场的各向异性,使用位置相关的正定对称矩阵定义各向异性距离 $d_M(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$:

$$d_M(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^T \mathbf{M}(\mathbf{x}_i)(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)} \quad (1)$$

公式(1)中, $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \in \mathbb{R}^3$ 是三维坐标, $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$, $\mathbf{M}(\mathbf{x}_i)$ 是点 $\mathbf{x}_i$ 处的各向异性张量,是对称正定矩阵,可表示为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}(\mathbf{x})) \boldsymbol{\Lambda}(\mathbf{x}) \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}(\mathbf{x}))^T \quad (2)$$

公式(2)是旋转矩阵,由局部温度梯度方向决定; $\boldsymbol{\theta}(\mathbf{x})$ 是欧拉角向量, $\boldsymbol{\Lambda}(\mathbf{x})$ 是缩放矩阵的对角阵。温度

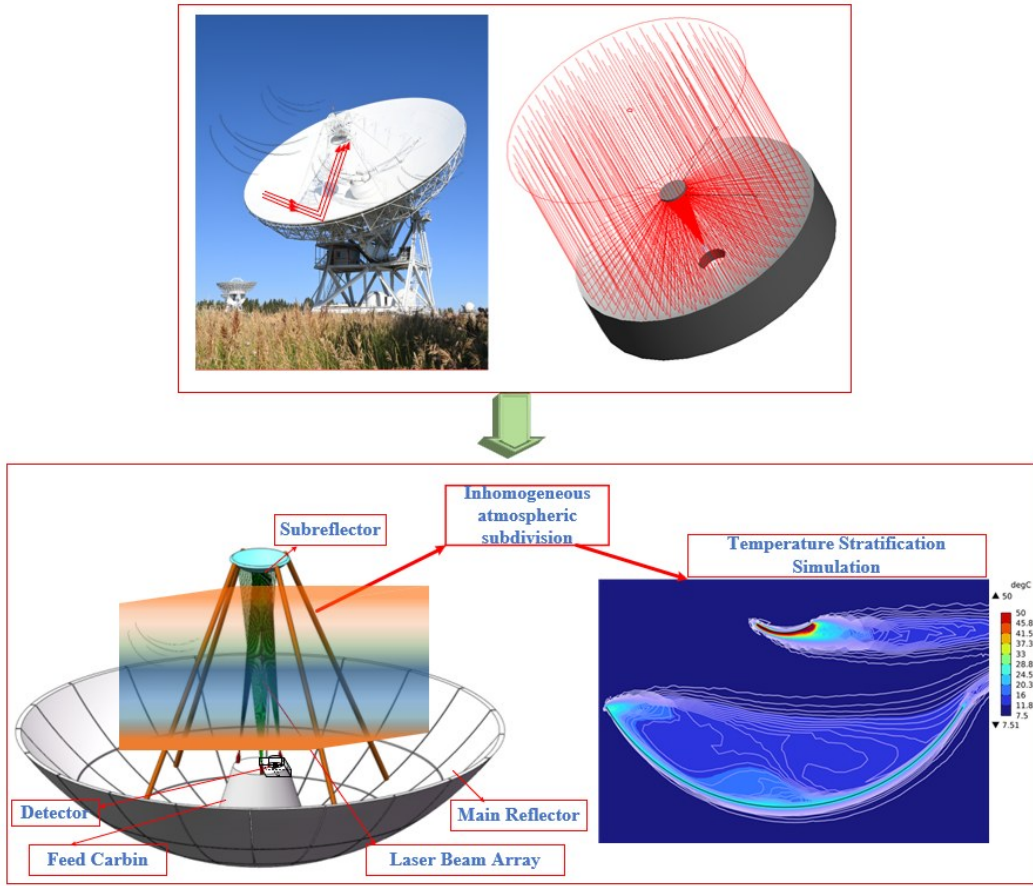


图1 大口径射电望远镜主副面间的空气分层

Fig.1 Air stratification between the large-aperture antenna main reflector and subreflector

场不同区域的平滑度不同,则通过局部温度方法进行幂参数自适应计算:

$$p(\mathbf{x}) = p_0 + \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{local}}^2(\mathbf{x})}{\sigma_{\text{global}}^2} \quad (3)$$

公式(3)中, p_0 是基础幂参数, η 是调节参数, σ_{local}^2 是局部温度方差, σ_{global}^2 是全局温度方差。通过此定义,在温度变化剧烈的区域即高局部方差处, p 值增大,使得插值结果更依赖于近邻点;温度平缓区域, p 减小,使得插值结果考虑更远的点。基于此,可得到改进后的权重函数:

$$w_{ij} = \frac{1}{[d_M(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)]^{p(\mathbf{x}_i)}} \quad (4)$$

根据公式(1)-(4)可以得到各向异性 IDW 温度重建估计公式为:

$$\hat{T}(\mathbf{x}_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i0} T_i}{\sum_{i=1}^n w_{i0}} \quad (5)$$

2) 各向异性 RBF

径向基函数 RBF 是一种精确的插值方法,要求插值表面经过每一个已知样本点,其基本思想是将目标温度场表示为一系列中心对称基函数的线性叠加。常用的适用于空间立体环境重建的基函数包括多二次函数和逆多二次函数,可表示为:

$$\begin{aligned}\varphi(r) &= \sqrt{1 + (\epsilon r)^2} \\ \varphi(r) &= \frac{1}{\sqrt{1 + (\epsilon r)^2}}\end{aligned}\quad (6)$$

公式(6)中, ϵ 表示形状参数,控制函数的陡峭程度, r 表示两点之间的欧氏距离。通过对 N 个观测点进行采样,构造基函数矩阵 $\Phi_{N \times N}$:

$$\Phi_{N \times N} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \cdots & \phi_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \phi_{ln} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

则包含各向异性的RBF可表示为:

$$s(x) = \sum_{k=1}^N \omega_k \phi_k(r_{ik}) \quad (8)$$

公式(8)中 ω_k 为每个样本点的权系数, $\phi_k(r_{ik})$ 为基函数, r_{ik} 为某一观测点 x_k 距离其中心点 x_i 的欧氏距离。

3) 泛克里金法

泛克里金法用于处理非平稳变量,即均值随空间位置坐标变化呈现某种函数关系变化的场景。大口径射电望远镜天线主副反射面高温,主副面间的环境低温的现象在数学上可以被视为一种空间趋势,因此泛克里金法将预测模型分解为两个部分:确定性趋势项和随机残差项^[19]。设定预测点 s_0 的温度 $Z(s_0) = m(s_0) + \epsilon(s_0)$,其中 $m(s_0)$ 为确定性趋势漂移项,表示温度随空间位置变化的宏观趋势,即对应的垂直分层规律, $\epsilon(s_0)$ 是随机残差项,表示剔除宏观趋势后,由于支架导热、局部对流等复杂因素引起的微小温度扰动,其被假设为二阶平稳的随机过程,均值为0。基于大口径射电望远镜天线的温度分布特性,本文将漂移项 $m(s_0)$ 数学建模为与高度 z 相关的非线性函数:

$$m(s) = \sum_{l=0}^L a_l f_l(s) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 \quad (9)$$

公式(9)中, L 表示趋势函数项的最高阶数, a_l 表示第 l 项趋势函数的待定系数,如 a_0, a_1, a_2, z 是天线的高度坐标变量, $f_l(s)$ 为预定义的空间基函数,其可分为三部分:

$$\begin{cases} f_0(s) = 1, & \text{常数项, 背景温度} \\ f_1(s) = z, & \text{线性项, 高度随} z \text{的线性梯度变化} \\ f_2(s) = z^2, & \text{二次项, 抛物线特征} \end{cases} \quad (10)$$

在泛克里金框架下,需要求解包含漂移约束的拉格朗日方程组,用于求解最优权重系数:

$$\sum_{j=1}^n \omega_j \gamma(s_i, s_j) + \sum_{l=0}^2 \lambda_l f_l(s_i) = \gamma(s_i, s_0), \quad i = 1, \cdots, n \quad (11)$$

公式(11)中, ω_j 是第 j 个采样点的权重系数, $\gamma(s_i, s_j)$ 是半变异函数,计算的是两个采样点之间的空间相关性,其值随距离增大而增大; λ_l 是拉格朗日乘子, n 为采样点的数量。基于此,引入无偏性约束方程:

$$\sum_{j=1}^n \omega_j f_l(s_j) = f_l(s_0), \quad l = 0, 1, 2 \quad (12)$$

公式(12)确保了预测结果不会产生系统性偏差,强制要求权重的线性组合必须能够重现定义的趋势函数 $f_l(s)$ 。

4) 联合压缩感知与稀疏矩阵

压缩感知CS与低秩稀疏重建LRS是最近几年新兴的处理大规模传感器缺失数据的高端算法,尤其适用于大口径射电望远镜天线这种环境监测布局困难、传感器易损坏的环境,其核心是假设天线各测点的温度变化具有高度的相关性,从而形成的观测矩阵 T 是低秩的,且低秩重建要求矩阵的能量分布均匀,但大口径射电望远镜天线分层现象中,主副反射面的温度变化剧烈且与中间环境温度层变化梯度大,导致温度矩阵在主副面边缘具有强相干性,则无法判定分层特征;其次,CS与LRS进行丢失数据补全时,仅从数学上的

奇异值分解出发,重建出的温度分布可能不满足基本的导热偏微分方程,导致温度场重建精度下降。基于上述缺点,本文加入传热方程的物理约束,并将观测矩阵 T 分解成代表全局分层趋势的低秩矩阵 L 和代表局部异常的稀疏矩阵 S ^[20]:

$$T = L + S \quad (13)$$

在此基础上,引入核范数 $\|L\|_*$, L_1 范数 $\|S\|_1$ 作为凸松弛工具,可以将非凸优化问题转化为凸优化问题,并引入热传导方程的损失函数 L_{total} :

$$L_{\text{total}} = \lambda_1 \|P_{\Omega}(L + S - T)\|_F^2 + \lambda_2 \|L\|_* + \lambda_3 L_{\text{physics}} \quad (14)$$

公式(14)中, P_{Ω} 是采样算子,其物理含义为:由于天线传感器的空间布置点是有限且稀疏的,计算误差时只关注那些有传感器的位置; $\|\cdot\|_F^2$ 是 Frobenius 范数的平方,用于衡量重建值 $L+S$ 与实际观测值 T 之间的欧氏距离,确保数据的真实程度; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是权重系数; L_{physics} 是物理信息项,其将热传导物理定律转化为本方法的数学约束,可表示为:

$$L_{\text{physics}} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y,z) \in \Omega} \left\| \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right\|^2 \quad (15)$$

公式(15)中, N 为用于计算物理残差的测量点的总数, $(x, y, z) \in \Omega$ 是天线在三维空间中的坐标点,这些点不仅包括传感器的位置坐标,也包括天线内环境任意空间点的位置; $\partial T / \partial t$ 是温度随时间的一阶导数, α 是热扩散率。基于此,可得到环境温度场的重建。

在大口径射电望远镜的实际运行工况中,真正影响激光传输动态特性的是温度的变化量而非绝对值。在大跨度空间中,绝对温度场通常包含一个较大的稳态背景梯度,直接在稀疏测点下对被测温度进行空间插值,极易引入较大的模型误差,而提取连续时刻的温度变化量进行重建,实质上是滤除了静态背景,直接对动态的湍流扰动特征进行各向异性插值。本文结合前面的空间插值优化算法,提出一种统一的时空温度变化场重建模型。定义 t 时刻空间位置 r 处的温度为 $T(r, t)$, 将其分解成慢变背景项 $\bar{T}(r)$ 与瞬时脉动项 $\Delta T(r, t)$, 可表示为:

$$T(r, t) = \bar{T}(r) + \Delta T(r, t) \quad (16)$$

公式(16)中,慢变背景项 $\bar{T}(r)$ 表示该区域的宏观热力学分层状态,可通过对离散传感器的测量序列 $T(r_i, t)$ 引入长度为 Δt 的滑动时间窗口时序均值求得:

$$\bar{T}(r_i, t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t T(r_i, \tau) d\tau \quad (17)$$

公式(17)中 τ 为积分过程中的时间变量。针对脉动项 $\Delta T(r, t)$ 采用改进后的各向异性空间插值方法 Γ 对其进行整个空间域内任意位置 r 进行重建:

$$\hat{T}_f(r, t) = \mathcal{F} \left(\left\{ (r_i, T_f(r_i, t)) \right\}_{i=1}^N \right), r \in \Omega \quad (18)$$

将所有重建方法代入到公式(16)-(18)中,即可求得大口径射电望远镜主副面间的环境温度变化场重建,通过重建变化量规避天线背景场强温度梯度带来的误差。

2 仿真分析

本文模拟大口径射电望远镜主副面间的非均匀温度分层环境,并通过随机选择传感器采样的方式,任意选取上述重建方法进行重建,将重建结果与虚拟真值做对比,在静态背景 t_0 时刻基础上模拟 t_1 时刻两个局部湍流扰动,则仿真参数如表1所示:

基于表1中的仿真参数,选取各向异性 RBF 重建方法与其对应的温度场变化重建方法进行仿真分析。图2展示了在空间 xz 截面的温度场及扰动。从图2(a)的 t_0 时刻的真实温度场可以看出,受主副面热汇聚效应影响,模型上下两端对应副反射面与主反射面,呈现明显的高温聚集区域,而中间环境区域是空气温度,构成了强烈的垂直非线性梯度背景;图2(b)为 t_1 时刻叠加扰动后的真实温度场;图2(c)为 t_1 时刻的三维示意图,也表明了选择随机监测点的位置,红色星号为测试点位置;图2(d)为 t_1 与 t_0 时刻的温差场,清晰地突出了两个扰动气团的位置、形状和强度,其变化范围约 $-0.5 \sim 0.5^\circ\text{C}$ 。图2表明所构建的仿真环境较好地模拟了实

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation Parameters

Category	Parameter	Value/Description
Spatial range	[X, Y, Z]	[10m, 10m, 30m]
Background temperature	Main reflector/Subreflector/Ambient	25°C/50°C/15°C
Interpolation method	Cubic spline	—
Dynamic disturbances	Disturbance 1、2	Gaussian distribution
Number of sensors	—	30
Sensor distribution	—	Uniform random
Reconstruction method	—	Anisotropic RBF
Test points	Number	6

际天线内部温度场的各向异性与动态扰动特征。图 2(b)至图 2(d)展示了在 t_1 时刻引入高斯分布的环境动态扰动后,原本平滑的分层结构被局部打破,这恰好模拟了实际风场或局部热对流对稳态温度场的破坏,也是引起激光大气传输偏折的关键因素。

为了直观对比传统温度场重建与本文提出的温度变化场重建的差异,图 3 给出了两种方法的三维空间重建结果。由图 3 对比可知,图 3(a)采用直接对绝对温度进行空间插值,在处理主副面边缘的巨大温差时,重构表面出现了明显的阶跃平滑失真与局部的“牛眼”效应,使其无法准确还原扰动的微小细节;图 3(b)为本文方法重建的温度变化场,由于提前滤除了慢变背景项,仅对瞬态脉动量进行各向异性插值,重建结果在保留整体强垂直梯度的同时,可见两个扰动气团得到清晰还原,细节保持良好。

为更清楚的评估算法性能,选取 6 个特征测试点,表 2 给出了具体的重建误差对比。

从表 2 数据可知,传统直接插值方法在测试点 3 和测试点 6 处出现了极大的误差,分别为 1.57°C 和 2.121°C,是因为点 3 位于冷热交替的温度梯度区域,点 6 位于靠近副面的极端高温边缘,传统插值极易在此类非平稳剧变区域失效。采用本文提出的温度变化场重建模型后,6 个测试点的误差均被极大降低,最大误差仅为 0.314°C,整体平均误差从 0.998°C 下降至 0.102°C,精度提升了近 1 个数量级。该结果表明,通过重建温度变化量规避背景场强梯度,可显著提升稀疏采样下的重建精度,为后续激光偏折计算提供了可靠的数据基础。

3 实验和结果分析

针对大口径射电望远镜主副面间的环境监测难题,设计并建立了空间立体环境监测系统,在南山 25m 射电望远镜上布置高精度温度传感器阵列,采集实测数据以验证所提时空变化场重建模型的工程适用性。

3.1 实验平台搭建

本文搭建了如图 4 所示的立体环境监测模型。图 4(a)是空间立体环境监测方案,图 4(b)是南山 25m 射电望远镜主副面间的外场环境监测点布置,布置了 30 个温度传感器,传感器测量精度是 $\pm 0.2\%$,最快响应时间为 0.1s;传感器测量点根据激光在南山 26m 外场实验的发射位置进行布置,如图 1 所示,在实际测量时需要南山 26m 射电望远镜上进行外场实验,激光发射系统放置在主面的馈源舱上面,馈源舱高度约为 1.5m,在此基础上,若想得到激光传输路径的环境参数,只需测距离主面 1m 以上至副面之间的环境区域。南山 26m 射电望远镜不定时有观测任务,无法完全暂停设备并实时对其环境进行测量,南山 25m 射电望远镜在南山 26m 射电望远镜附近,同处一个大气压环境,因此本文选择闲置的南山 25m 外场测试环境验证本文提出的方法。若将靠近主反射面 1m 的距离区域内的环境也测量在内,则主反射面的温度层变化也将耦合到温度变化场的重建结果中,为了避免引起不必要的主反射面附近的温度误差,本文不考虑主反射面 1m 以内的温度测点分布。进行传感器测量点空间位置布置时,首选均匀分布验证本文提出的重建方法。不同位置的传感器会引入不同的测量误差,但本文测量的是一定时刻的空间温度变化量,因此空间位置本就在所提方法的考虑范围内。

将 30 个传感器分为两组:编号 1-6 作为验证点,其余 24 个作为已知点用于对编号 1-6 的温度重建。

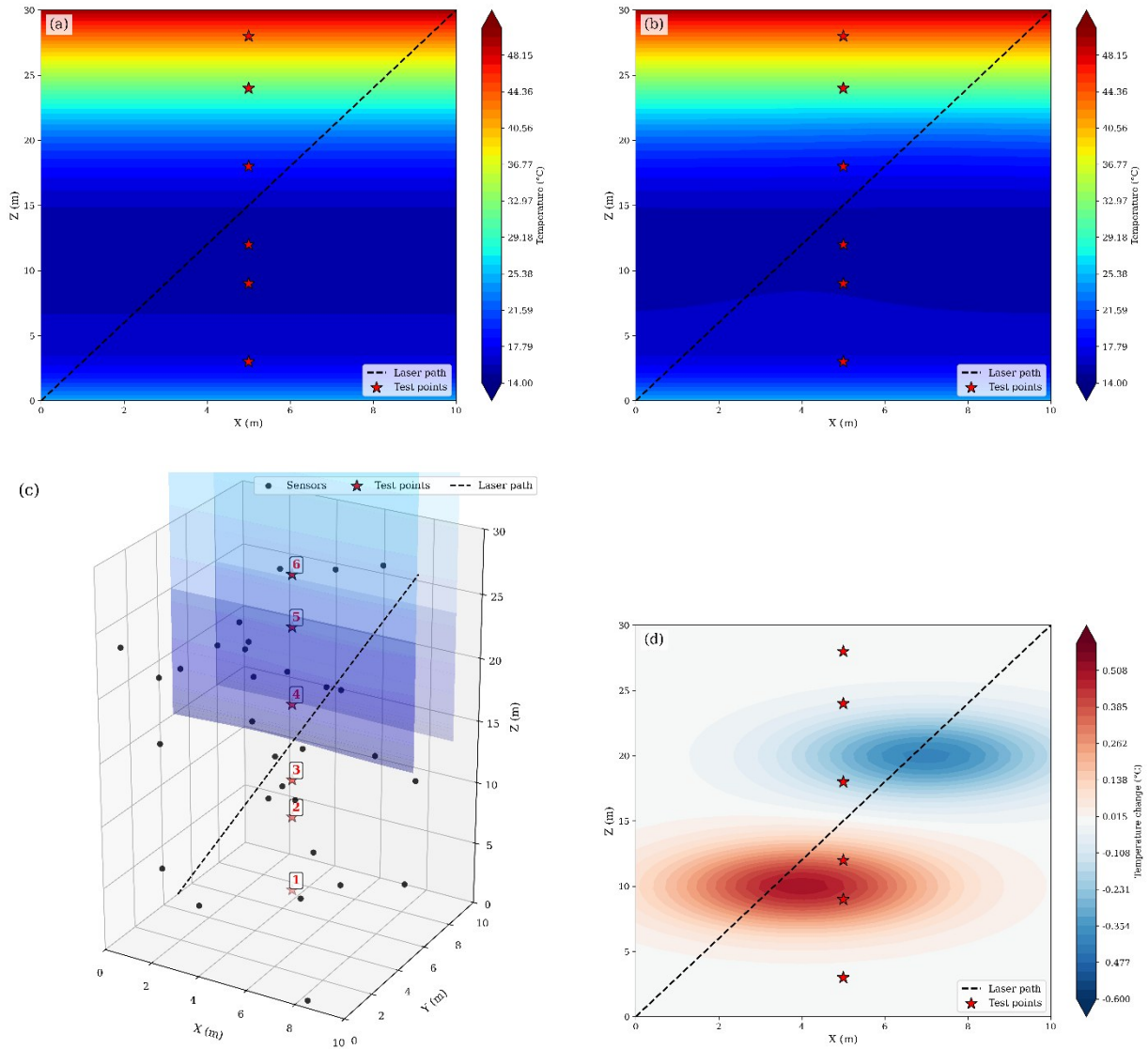


图2 仿真温度场及其环境扰动实验图。(a) t_0 时刻无扰动仿真背景温度场;(b) t_1 时刻叠加扰动后的仿真温度场;(c) t_1 时刻仿真三维图及随机监测点分布图;(d) t_1 时刻仿真添加的局部高斯环境扰动分布示意图

Fig.2 Simulated temperature field and its environmental disturbances. (a) Simulated background temperature field without disturbances at t_0 ; (b) Simulated temperature field with superimposed disturbances at t_1 ; (c) 3D simulated diagram and random monitoring point distribution at time t_1 ; (d) Schematic diagram of localized Gaussian environmental disturbances superimposed at time t_1

3.2 实验验证

图5展示了传感器1-6在20min的实测温度变化曲线。从图中可以看出,短时间内各传感器温度呈现明显的波动特征,反映了天线主副面间复杂的湍流热交换过程,且主副面不同高度的传感器的温度差异清晰可见,证实了主副面间存在显著的垂直温度梯度。由于传感器1和2均位于主反射面的覆盖范围中,其表现了主面局部热辐射效应;从图5的局部放大图中可知,在温度梯度分层的同时还叠加了由局部风场和微对流引起的高频温度脉动。这一现象也为本文算法的改进提供了有力的实测数据支撑。

将传感器7-30的24个环境监测点作为已知采样输入,编号1-6的环境监测点作为重建预测点。将实测时序数据分别代入各向异性IDW、各向异性RBF、泛克里金UK以及联合压缩感知与低秩稀疏CS-LRS四种变化场重建模型中,分别进行传统温度场直接重建和本文提出的温度变化场重建。重建精度通过验证点的平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)进行评估。图6和图7为四种重建方法在所有验证点的误差热力图与误差折线图。

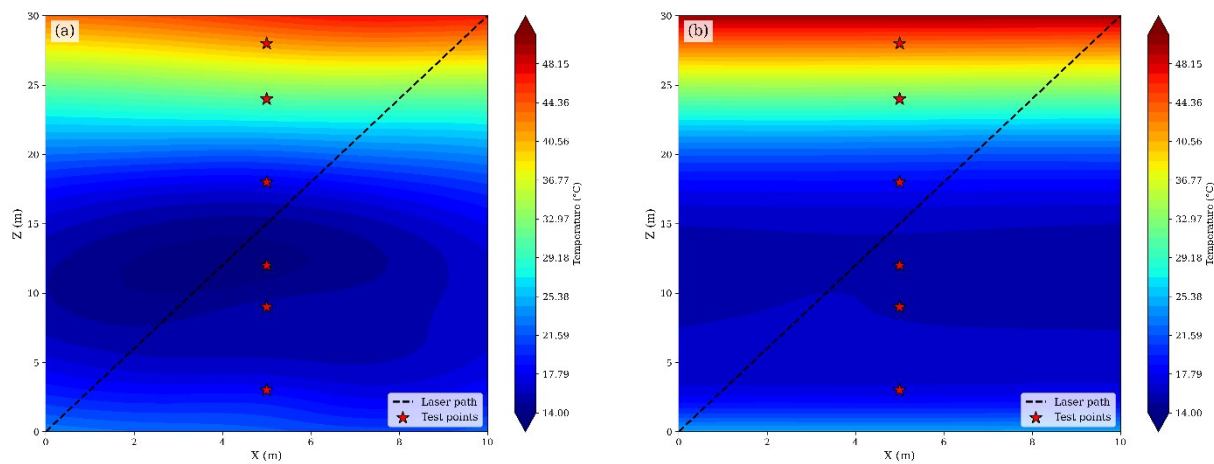


图3 t_1 时刻空间重建结果仿真图。(a)温度场重建仿真结果;(b)温度变化场重建仿真结果
Fig.3 Spatial reconstruction results at time t_1 . (a) Simulation results of temperature field reconstruction; (b) Simulation results of temperature variation field reconstruction

表2 测试点温度重建误差
Table2 Temperature reconstruction error at test points

Unit: $^{\circ}\text{C}$					
Test points	True value	Temperature field re- construction	Error	Temperature varia- tion field reconstruc- tion	Error
1	17.305	18.247	0.943	17.214	0.091
2	15.778	15.391	0.387	15.789	0.011
3	15.303	13.733	1.570	15.617	0.314
4	18.664	17.987	0.677	18.563	0.101
5	31.327	31.036	0.291	31.351	0.024
6	43.490	41.369	2.121	43.561	0.071
Mean error		0.998		0.102	

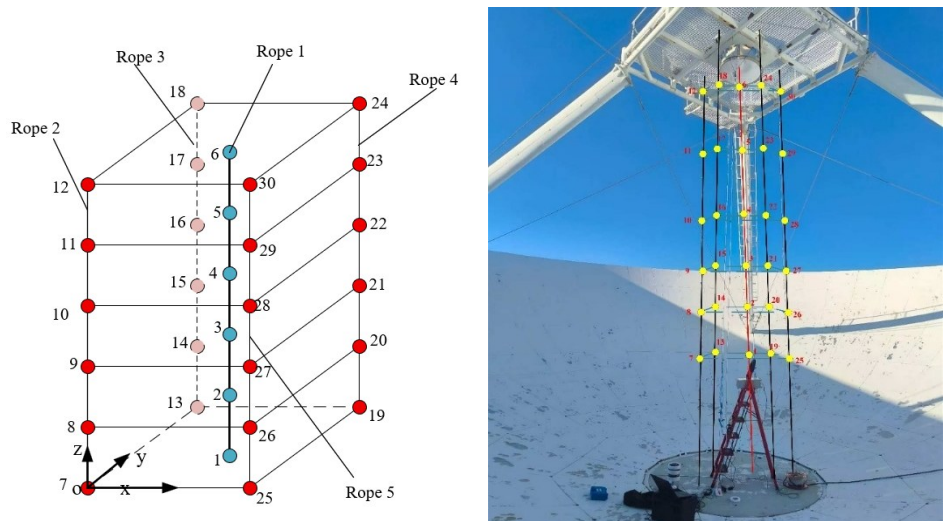


图4 环境监测方案框架。(a)空间立体环境监测模型框架;(b)南山25m射电望远镜主副面间环境监测方案框架
Fig.4 Environmental Monitoring (a) Three-dimensional environmental monitoring model; (b) Environmental monitoring for the main reflector and subreflector of the 25m telescope at Nanshan radio telescope

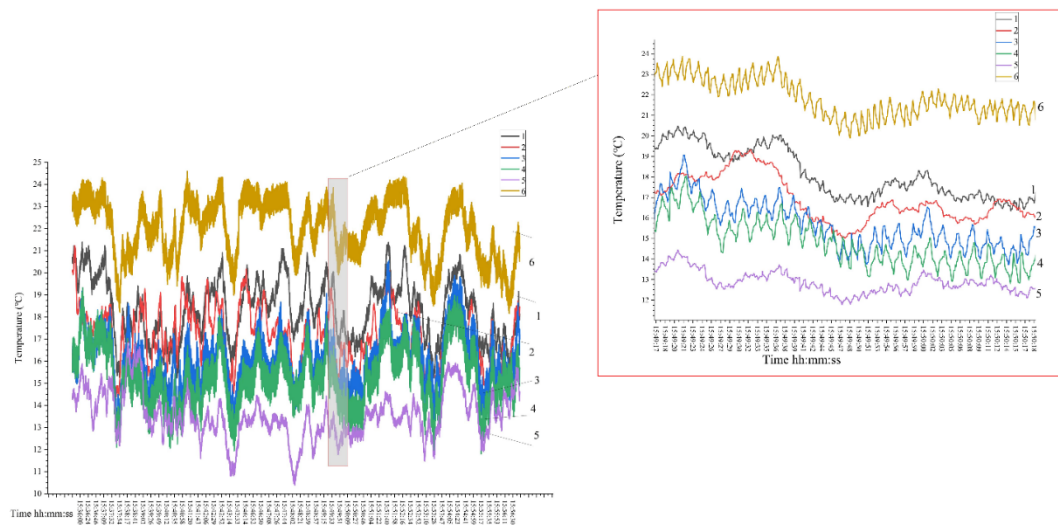


图5 大口径射电望远镜主副面间实测温度变化曲线图

Fig.5 Temperature variation curves between the main reflector and subreflector of the large-aperture radio telescope

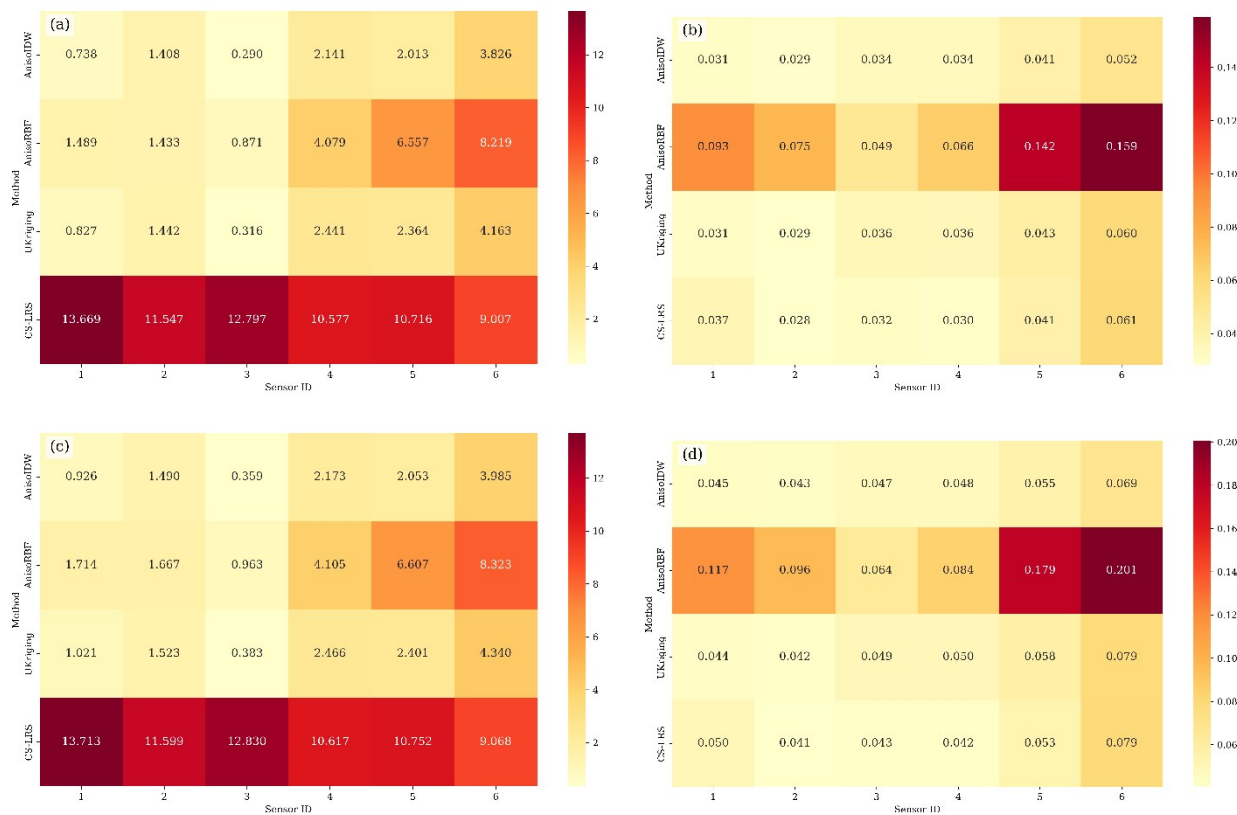


图6 重建方法误差热力实验结果图。(a)温度场重建MAE;(b)温度变化场重建MAE;(c)温度场重建RMSE;(d)温度变化场重建RMSE

Fig.6 Error Heatmaps of Reconstruction Methods (a) MAE for Temperature Field Reconstruction; (b) MAE for Temperature Change Field Reconstruction; (c) RMSE for Temperature Field Reconstruction; (d) RMSE for Temperature Change Field Reconstruction

根据图6和图7的误差结果图可知:温度场重建结果中,各向异性IDW重建精度最高,CS-LRS重建精度最差;在温度变化场重建结果中,各向异性IDW重建精度最高,各向异性RBF重建结果最差,且四种重建方法在本文提出的温度变化场重建中,精度均较传统重建方法有显著提升。通过对比6个不同位置的重建

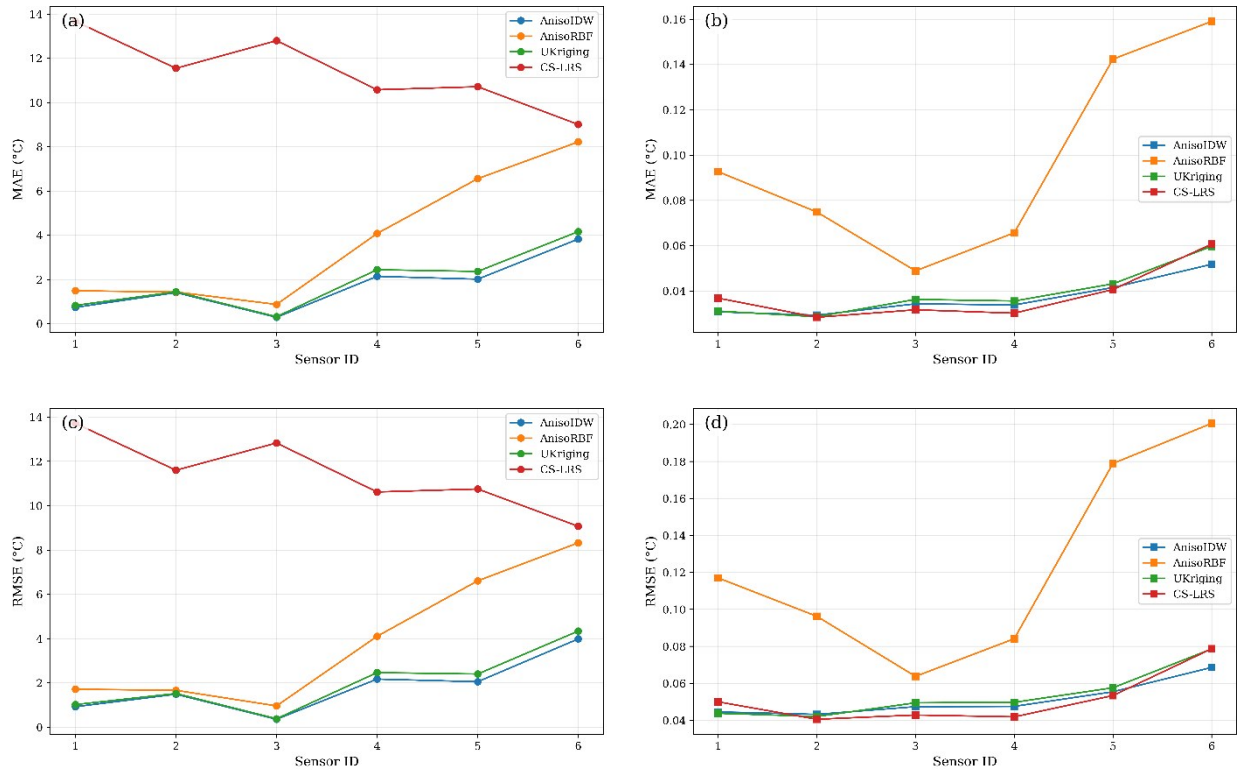


图7 重建方法误差折线实验结果图。(a)温度场重建MAE;(b)温度变化场重建MAE;(c)温度场重建RMSE;(d)温度变化场重建RMSE

Fig.7 Error Line Plots of Reconstruction Methods. (a) MAE for Temperature Field Reconstruction; (b) MAE for Temperature Change Field Reconstruction; (c) RMSE for Temperature Field Reconstruction; (d) RMSE for Temperature Change Field Reconstruction

精度,可知传感器序号3的重建精度最高,因此推测是因为该点处于空气环境中,不受主副面巨大温差的影响。分析四种重建方法的结果可知:各向异性IDW通过引入垂直方向的拉伸因子和自适应幂参数,能够较好地处理温度场的强垂直梯度,因此在多数情况下误差较小;各向异性RBF采用各向异性距离的逆多二次核,并加入线性多项式漂移,可以灵活拟合复杂曲面,但在数据稀疏时可能过拟合,导致局部误差增大;泛克里金将温度分解为高度趋势项和残差项,能有效捕捉宏观分层特征,但其依赖变异函数模型,若模型选择不当可能影响精度;CS-LRS对非线性趋势的拟合能力有限,且忽略了稀疏异常,因此在处理温度脉动时误差较大,在射电望远镜主副面间环境场重建中表现最差。因此各向异性IDW重建方法更适用于大口径射电望远镜环境场和环境变化场的重建。

根据图6和图7可知,在靠近副面的极端温差区域测点6处,有效的温度场重建误差约为4°C,而本文提出的温度变化场重建误差最大为0.2°C,其余方法的重建误差最大为0.08°C,由于激光偏折量与温度梯度引起的折射率变化成正比,该精度的量级提升意味着偏折估算误差显著下降。以监测点4和监测点6计算两点的温度梯度差,传统的重建方法后的温度梯度最小误差为1°C/m,本文提出的温度变化场重建的温度梯度最大误差为0.06°C/m。结合主副面间约6m的传输距离及空气折射率温度系数进行计算,传统方法引入的激光偏移误差约为0.018mm,本文提出的方法引入的误差为0.001mm。在大口径射电望远镜副面位姿的重建计算中,6自由度坐标的解算精度依赖于多路激光束的空间交汇与矩阵转换,则激光偏移误差会放大位姿测量的精度测量误差。该结果充分表明,本文的温度变化场重建模型为后续副面位姿的高精度解算提供了可靠的环境数据支撑。

4 结论

本文针对大口径射电望远镜主副面间复杂环境导致激光测量精度下降的问题,提出了一种基于时空分

离的温度变化场重建方法。通过将温度场分解为慢变背景项与瞬时脉动项,并引入各向异性校正矩阵改进IDW、RBF、泛克里金及CS-LRS等空间插值算法,实现了对动态温度扰动的高精度重建。仿真分析表明,所提方法能清晰还原局部湍流扰动,在6个测试点上的平均误差从传统直接插值的 $0.998\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $0.102\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。基于南山25m射电望远镜实测数据的验证进一步证实:各向异性IDW在温度变化场重建中综合表现最优, RMSE不超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 优于其他对比方法;位于自由空气层的测点误差最小,而靠近副面边缘的测点误差波动较大,但本文方法仍能有效抑制。实验结果充分证明了所提模型在实际工程环境中的有效性和可行性。后续工作将基于重建的高精度温度变化场,结合风场参数反演,建立激光大气传输偏折的实时校正模型,进一步提升大口径射电望远镜副面位姿的激光测量精度。

参考文献

- [1] LIN Shangmin, ZHANG Xuan, JIN Yu, et al. Development of large-aperture antenna subreflector pose measurement technology[J]. *Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2024, 54(01): 38-53.
林上民,张璇,金玉,等.大口径天线副面姿态测量技术研究进展[J].*中国科学:物理学 力学 天文学*, 2024, 54(01): 38-53.
- [2] LIAN Peiyuan, WANG Congsi, XUE Song, et al. Future research trend for improving large reflector antenna service performance[J]. *Engineering*, 2021, 7(8): 1047-1050.
连培园,王从思,薛松,等.提升大口径反射面天线服役性能的未来研究趋势[J].*工程(英文)*, 2021, 7(08): 30-37.
- [3] DIAO Luxin, WANG Mingjun, HUANG Chaojun, et al. Study on scintillation index and bit error rate of double Laguerre-Gaussian vortex beam in oceanic turbulence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(02): 217-229.
刁鲁欣,王明军,黄朝军,等.海洋湍流下双拉盖尔-高斯涡旋光束的闪烁指数与误码率研究[J].*光子学报*, 2024, 53(02): 217-229.
- [4] BAI Tian, JIANG Feng, KONG Lin, et al. Precision thermal control of high resolution micro-satellite of platform and payload integration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(12): 88-99.
柏添,姜峰,孔林,等.星载一体化高分辨率微小卫星精密热控制[J].*光子学报*, 2024, 53(12): 88-99.
- [5] LI Haitao, SHAO Zedong. Review of Spatial Interpolation Analysis Algorithm [J]. *Computer Systems & Applications*, 2019, 28(07): 1-8.
李海涛,邵泽东.空间插值分析算法综述[J].*计算机系统应用*, 2019, 28(07): 1-8.
- [6] HUANG Haocheng, LIAO Weihong, LEI Xiaohui, et al. An urban DEM reconstruction method based on multisource data fusion for urban pluvial flooding Simulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128825.
- [7] YANG Di, DUAN Chengjie, DING Peng, et al. Study of Reduced Order Model for Parameterized Flow and Heat Transfer Problems[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58(7): 1440-1451.
杨迪,段承杰,丁鹏,等.参数化流动传热问题的模型降阶方法研究[J].*原子能科学技术*, 2024, 58(7): 1440-1451.
- [8] DUAN Ping, LIANG Yurou, WANG Fujuan, et al. Application of Inverse Distance Weight Interpolation Taking into Account Anisotropy to the Reconstruction of Temperature Field [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2025, 64(11): 1723 - 1734.
- [9] SUN Mengnan, LIU Shaohua, LIU Jingcheng. IDW interpolation algorithm considering spatial anisotropy[J]. *COMPUTER ENGINEERING AND DESIGN*, 2020, 41(04): 983-987.
孙梦楠,刘少华,刘京城.顾及空间各向异性的IDW插值算法[J].*计算机工程与设计*, 2020, 41(04): 983-987.
- [10] ZHOU Xinzh, DONG Chenglong, ZHAO Chengping, et al. Temperature-field reconstruction algorithm based on reflected sigmoidal radial basis function and QR Decomposition [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 171: 114987.
- [11] CUI Yumin. Research on Three-dimensional Reconstruction of Low-light-level Image Based on Compressed Sensing [D]. Zibo, Shandong University of Technology, 2023.
崔玉敏.基于压缩感知的微光图像三维重建研究[D].淄博,山东理工大学,2023.
- [12] WU Jun, PAN Zhixiang, ZHANG Chengping, et al. A Non-axisymmetric temperature field reconstruction method based on the compressive sensing background oriented Schlieren Method [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(3).
- [13] XU Te, LIU Yongxia, TANG Lixin, et al. Improvement of Kriging interpolation with learning kernel in environmental variables Study [J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 60(4): 1284 - 1297.
- [14] YANG Chunhua, ZHENG Li, HUANG Heqing, et al. Comparison of spatial interpolation methods of meteorological elements over Chongqing mountainous region [J]. *JOURNAL OF METEOROLOGY AND ENVIRONMENT*, 2022, 38(04): 57-66.
杨春华,郑莉,黄河清,等.重庆山地区域气象要素空间插值方法对比[J].*气象与环境学报*, 2022, 38(04): 57-66.
- [15] GAO Shiping, HE Dongjie, ZHANG Zhouzhuo, et al. A novel dynamic interpolation method based on both temporal and spatial correlations[J]. *Applied Intelligence*, 2023, 53(5): 5100-5125.
- [16] CHEN Zehong, WANG Guangjun, CHEN Hong, et al. Response spatiotemporal correlation and transient temperature

- field direct reconstruction for heat conduction system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 216: 124609.
- [17] LI Siyu, ZHOU Xinzhi, ZHU Jianliang, et al. Reconstruction method of multidimensional Spatio-temporal channel for highly dynamic temperature field based on acoustic tomography Imaging [J]. Applied Acoustics, 2024, 221: 109979.
- [18] LI Zhengquan, WANG Kuo, MA Hao, et al. An adjusted inverse distance weighted spatial interpolation method [C]. CIMNS, 2018: 128-132.
- [19] FEI Lan, DU Shichang. Flatness Error Estimation based on Universal Kriging Interpolation Method [J]. JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, 2014, 50(15): 127-135.
费兰, 杜世昌. 面向零件平面度误差估计的空间泛克里金插值建模[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 127-135.
- [20] TANNER J, VARY S. Compressed sensing of low-rank plus sparse matrices[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2023, 64: 254-293.

Research on the Temperature Variation Field Reconstruction Between the Main Reflector and Subreflector of the Large-Aperture Radio Telescope

ZHANG Xuan^{1,2}, LI Xijie², GAO Ming¹, LIN Shangmin^{2,3,4}, WANG Hu^{2,3,4}, LAI Yunqiang^{2,3},
LV Hong¹

(1 School of Opto—Electronical Engineering, Xi'an Technological University, No.2 Xuefuzhonglu Road, Xi'an 710021, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Xi'an Space Sensor Optical Technology Engineering Research Center, Xi'an 710119, China)

Abstract: The pose measurement accuracy of the main reflector and subreflector in the large-aperture radio telescope is severely degraded by the complex environmental disturbances. Specifically, non-uniform thermal stratification caused by solar radiation, heat concentration, and wind fields induces significant refractive index gradients. This leads to laser beam deflection, which undermines measurement stability. Accurate reconstruction of the three-dimensional temperature field is essential for evaluating and correcting such deflections. Conventional spatial interpolation methods struggle with the abrupt vertical temperature gradients and anisotropic structures inherent in this environment. Therefore, this study aims to develop a high-precision method for reconstructing the spatial temperature variation field. By integrating anisotropic corrections with a temporal decomposition strategy, this research overcomes the limitations of conventional methods in handling real-time dynamic characteristics in complex spatial correlations. To address the limitations of traditional spatial interpolation methods in handling abrupt vertical gradients caused by non-uniform stratification, a novel spatial temperature variation field reconstruction method is proposed. This method introduces an anisotropic correction matrix and a position-dependent distance tensor to adapt weight functions to local temperature gradient directions. The temperature field is decomposed into a slowly varying background term and an instantaneous fluctuation term. The slow-varying background term is obtained using a sliding time window sequence of discrete sensors, while the fluctuation term is reconstructed using improved anisotropic spatial interpolation. Based on this, traditional algorithms, including Inverse Distance Weighting (IDW), Radial Basis Function (RBF), Universal Kriging (UK), and Compressive Sensing with Low-Rank Sparse (CS-LRS) reconstruction, are improved and evaluated. To validate the methodology, a three-dimensional non-uniform temperature stratification simulation environment was established with superimposed Gaussian dynamic disturbances. Furthermore, a spatial three-dimensional environmental monitoring model was constructed on the Nanshan 25m radio telescope, utilizing an array of 30 high-precision temperature sensors for field experiments. In the simulation analysis, directly interpolating absolute temperatures resulted in obvious step smoothing distortions and localized bullseye effects. In contrast, the proposed temperature variation field reconstruction, by filtering out the slow-varying background, clearly restored the two disturbance air masses with well-preserved details. Quantitative results showed the average reconstruction error at six test points decreased from 0.998 °C with

direct interpolation to $0.102\text{ }^{\circ}\text{C}$ with the proposed model. The field experiment on the Nanshan 25 m radio telescope confirmed the presence of a significant vertical temperature gradient superimposed with high-frequency temperature pulsations. Using 24 sensors as sampling inputs and 6 as validation points, the reconstruction errors were evaluated via Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Squared Error (RMSE). The experimental results demonstrated that the four improved methods in the proposed model exhibited significantly higher accuracy compared to traditional direct reconstruction. Among them, the anisotropic IDW method achieved the highest reconstruction accuracy for both the temperature field and the temperature variation field, with an RMSE as low as $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Conversely, CS-LRS showed the worst precision in temperature field reconstruction, while anisotropic RBF performed the worst in the variation field reconstruction. Furthermore, the analysis of specific locations revealed that sensors in the intermediate free air layer, which are less affected by the extreme temperature differences of the reflectors, exhibited the smallest reconstruction errors. The proposed temperature variation field reconstruction method, which combines anisotropic interpolation with background-fluctuation separation, effectively overcomes the limitations of traditional spatial interpolation in complex environments. By reconstructing only the transient turbulent fluctuations, the model circumvents severe errors induced by steep background gradients. The anisotropic IDW algorithm demonstrates the best overall performance and is the most suitable for the environmental field reconstruction of the large-aperture radio telescope. This work provides a core theoretical and data foundation for subsequent wind-field parameter inversion and real-time precise correction of laser atmospheric transmission deflection.

Key words: Large-aperture radio telescope; Temperature variation field; Environmental monitoring; Anisotropic interpolation; Laser deflection accuracy

OCIS Codes: 010.1290; 010.3310; 120.0280; 120.6780

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0712003