

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107767

基于 POD-RLS-KF 的有源相控阵天线温度场实时重构*

刘德荣¹, 周金柱¹, 王梅², 李唐¹, 谷振玉¹

(1. 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室 西安 710071;

2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所 合肥 230088)

摘要:当电子设备工作时,电磁性能受温度影响很大,如何用稀疏传感器测量数据实时重构电子设备三维温度场是实现健康监测和电磁性能控制的关键问题。针对这一问题,以有源相控阵天线为研究对象,提出了融合仿真数据和测量数据的基于本征正交分解-正则化最小二乘法-卡尔曼滤波(POD-RLS-KF)的温度场时空重构方法:首先利用 POD 方法将仿真瞬态温度场数据分离为时间模式系数和空间基函数;然后根据稀疏传感器采集的数据,利用 RLS 和 KF 方法对时间模式系数进行最优估计;最后结合空间基函数和更新后的时间模式系数实时重构温度场。仿真和实验结果表明:在仿真工况与实际工况不同时,该方法根据稀疏传感器提供的少量数据实时计算天线三维温度场。对比现有重构方法,提出的方法展现出较好重构精度和噪声抑制能力,重构温度场平均均方根误差是卡尔曼滤波-线性随机估计(KF-LSE)方法的 7.18%,是 Gappy 方法的 1.53%。

关键词:有源相控阵天线;稀疏传感器;温度场重构;本征正交分解;正则化最小二乘法;卡尔曼滤波器

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Real-time reconstruction of APAA temperature field based on POD-RLS-KF

Liu Derong¹, Zhou Jinzhu¹, Wang Mei², Li Tang¹, Gu Zhenyu¹

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. The 38th Research Institute, CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: When the electronic equipment works, the electromagnetic property is greatly affected by temperature. How to reconstruct the three-dimensional temperature field of electronic equipment with sparse sensor measurement data in real time is the key problem to realize health monitoring and electromagnetic property control. Aiming at this problem, taking active phased array antenna (APAA) as the research object, a temperature field temporal spatial reconstruction method is proposed based on proper orthogonal decomposition-regularized least square-Kalman filter (POD-RLS-KF), which fuses simulation data and sparse sensor measurement data. Firstly, POD is used to separate the simulated transient temperature field data into temporal mode coefficients (TMC) and spatial basis functions (SBF). Secondly, the data collected by sparse sensors are used to carry out the optimal estimation of the TMC in real time with RLS and KF methods. Finally, the temperature field is reconstructed in real time combining the SBF and updated TMC. The simulation and experiment results show that when the simulation state is different from the actual state, the method can calculate the three-dimensional temperature field of the antenna in real time according to a small amount of data provided by sparse sensors. Compared with existing reconstruction methods, the proposed method shows better reconstruction accuracy and noise suppression ability, and the average of the root mean square error of the reconstruction temperature field is 7.18% of that of Kalman filter-linear stochastic estimation (KF-LSE) method and 1.53% of that of the Gappy method.

Keywords: active phased array antenna; sparse sensor; temperature field reconstruction; proper orthogonal decomposition; regularized least square; Kalman filter

收稿日期: 2021-04-15 Received Date: 2021-04-15

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775405, 51905403)、国防基础科研项目(61404130405)、陕西省自然科学基金(2019JM-010)、The Research Project of State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration (MSV202110)项目资助

0 引言

随着新一代机载、舰载和车载平台中对高密度有源相控阵天线需求的增加以及微波集成电路技术的快速发展,有源相控阵天线朝着更高频段、更小体积和更高性能的方向发展^[1-2]。天线单元数量增加、结构集成度提高和芯片发射功率增长,导致天线结构内部热流密度增加,温度分布不均匀,影响其服役期间的电磁性能^[3]。因此,实时感知天线温度场是未来实现有源相控阵天线健康监测和电磁性能补偿的关键。

目前,温度场信息常采用仿真分析,但存在一些缺点:需要准确构建仿真模型,计算周期长;如果设备状态发生变化,需重新进行仿真^[4]。这些问题导致我们无法在设备工作时实时获得其温度场。

近年来,提出了一些测量设备温度场的方法,主要分为非接触式和接触式测量两种。非接触式测量方法包括光场成像^[5]、热辐射成像^[6]、超声波测温^[7-10],这些方法要求与测量仪器与被测物之间无遮挡,不适用于结构复杂、内部空间狭小的电子设备。

接触式测量方法根据传感器测量部分温度,再由相关算法计算温度场。Rapp 等^[11]根据测量信息,利用插值方法重构温度场,但需要的传感器数量较大。而对于电子设备温度场的测量,只能使用少量传感器,基于本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)方法进行计算。文献[12-13]采用机器学习构建时间模式系数的相关模型,但是需要大量训练数据。文献[14-17]采用 POD 方法计算温度场,将仿真数据用于估计时间模式系数,但未考虑边界变化。文献[18-19]基于 POD 方法对温度场进行重构,但未考虑测量噪声。文献[20-21]采用 Gappy 方法使用最小二乘法重构温度场,但适用范围有限,会出现过拟合现象。文献[22]考虑噪声影响,使用卡尔曼滤波—线性随机估计(Kalman filter-linear stochastic estimation, KF-LSE)方法,用仿真状态时间模式系数估计实际时间模式系数,当状态改变时,不能准确跟踪系统变化。

因此,针对上述温度场重构方法的不足,本文提出基于 POD-RLS-KF 的两阶段温度场实时重构方法:第一阶段对温度场仿真数据本征正交分解以获取空间基函数;第二阶段根据传感器采集的信息结合正则化最小二乘法和卡尔曼滤波算法实时更新实际状态下的最优时间模式系数;最后,利用空间基函数和最优估计的时间模式系数组成的降阶模型实时重构温度场。

本文以有源相控阵天线为研究对象,利用天线接收和发射交替、单独接收、单独发射 3 种不同工作状态的仿真和实验数据对提出的方法进行了验证,结果表明提出

的基于 POD-RLS-KF 方法能有效跟踪模型动态变化,其重构精度和抗噪能力均优于现有文献中的 Gappy 方法和 KF-LSE 方法。

1 有源相控阵天线温度场重构的问题描述

图 1 为有源相控阵天线结构组成示意图,主要包括天线阵面、片式 T/R 组件、液冷冷板、馈电网络和波控电路,其电磁性能受 T/R 组件温度影响。图 2 为 T/R 组件示意图,主要包括发射状态工作的高功放芯片、接收状态工作的低噪放芯片。由于电路复杂,无法大量布置传感器来实时检测温度场,且无法直接测量芯片温度,只能通过附近传感器测量数据进行估计。因此,若要准确计算芯片温度,则需以温度场重构为基础,通过稀疏传感器测量的不完备温度数据重构出整个结构的温度场,然后提取芯片温度用于天线健康监测和电磁性能调控。

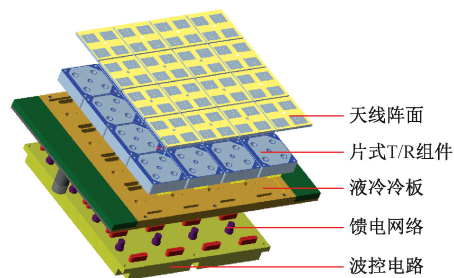


图 1 有源相控阵天线结构

Fig. 1 APAA structure

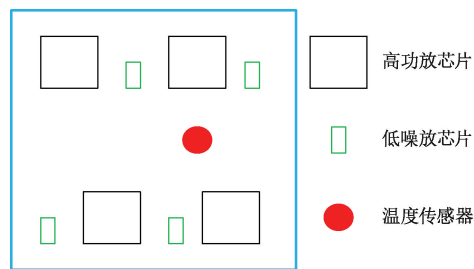


图 2 片式 T/R 组件

Fig. 2 Tiled T/R module

2 提出的温度场重构方法

2.1 温度场时空分离重构原理

温度场分布随时间、空间变化,需要无限维建模。考虑到传感器数量、成本问题,本文采用时空分离重构的方法将无限维系统用有限维系统近似。根据时空分离原理^[23-24],任意时刻 t 的温度场 $T(s, t)$ 表示为:

$$T(s, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(s) a_k(t) \quad (1)$$

式中: s 为节点空间坐标; $\varphi_k(s)$ 为与模型相关的空间基函数; $a_k(t)$ 为与时间相关的时间模式系数。

根据本征正交分解原理^[20-21], $\varphi_k(s)$ 和 $a_k(t)$ 的计算公式如下:

$$(T(s, t) T(s, t)^T) \varphi_k(s) = \mu_k \varphi_k(s) \quad (2)$$

$$a_k(t) = \langle T(s, t), \varphi_k(s) \rangle \quad (3)$$

式中: μ_k 为特征值, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积。

对特征值按从大到小的顺序排序, 前个 N 模式所包含的系统能量占比为:

$$\text{Energy} = \sum_{k=1}^N \mu_k / \sum_{k=1}^{\infty} \mu_k \quad (4)$$

当 $\text{Energy} \geq 99\%$ 时前 N 个模式可表示该系统:

$$T(s, t) \approx \sum_{k=1}^N \varphi_k(s) a_k(t) \quad (5)$$

2.2 时间模式系数最优估计器

由于实际模型与仿真模型存在差距, 实际工作状态与仿真工作状态也可能不一致, 因此需要用传感器测量数据来更新时间模式系数 $a_k(t)$, 并计算温度场, 根据时空分离重构方法^[23-24], 在传感器测量位置有:

$$T_{obs}(s_p, t) \approx \sum_{k=1}^N \varphi_k(s_p) a_k(t) \quad (6)$$

根据最小二乘法可以更新时间模式系数^[20-21]:

$$\hat{a}_k(t) = (\varphi_k(s_p)^T \varphi_k(s_p))^{-1} \varphi_k(s_p)^T T_{obs}(s_p, t) \quad (7)$$

但是由于模型复杂, 在求解上式时会产生过拟合现象, 为此本文采用 L_2 正则化最小二乘法更新时间模式系数, 防止求解时过拟合而出现异常温度场分布:

$$\hat{a}_k(t) = (\varphi_k(s_p)^T \varphi_k(s_p) + \lambda I)^{-1} \varphi_k(s_p)^T T_{obs}(s_p, t) \quad (8)$$

式中: $T_{obs}(s_p, t)$ 为传感器测量数据; $\varphi_k(s_p)$ 为传感器处空间基函数; p 为传感器数量; λ 表示正则化系数; I 表示单位矩阵, λI 可提高逆矩阵求解的正则性。

经过 L_2 正则化最小二乘法已经求出实际工作状态下的时间模式系数, 但受测量噪声影响, 重构误差较大, 因此采取卡尔曼滤波器对时间模式系数进行降噪。由于实际状态与仿真状态不一致, 需先获取动态模型的状态空间方程^[14], 可表示为:

$$\begin{cases} \hat{a}_k^-(t) = F(s) \hat{a}_k(t-1) + w(t) \\ \hat{T}_{obs}(s_p, t) \approx \sum_{k=1}^N \varphi_k(s_p) \hat{a}_k(t) + v(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$F(s) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\langle \varphi_1(s), A(s) \varphi_1(s) \rangle}{\|\varphi_1(s)\|^2} & \dots & \frac{\langle \varphi_1(s), A(s) \varphi_p(s) \rangle}{\|\varphi_1(s)\|^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\langle \varphi_p(s), A(s) \varphi_1(s) \rangle}{\|\varphi_p(s)\|^2} & \dots & \frac{\langle \varphi_p(s), A(s) \varphi_p(s) \rangle}{\|\varphi_p(s)\|^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $A(s) = \psi_p(s) \psi_p(s)^T$, $\psi_p(s)$ 表示前 p 阶空间基函数, 即 $\psi_p(s) = [\varphi_1(s) \dots \varphi_p(s)]$; $F(s)$ 为系统状态转移矩阵; $w(t)$ 和 $v(t)$ 均为零均值白噪声。

获取动态模型的状态转移矩阵 (10) 后, 结合状态空间方程 (9) 和卡尔曼滤波算法^[22], 对实际工作状态下的时间模式系数做最优估计:

$$\begin{cases} P^-(t) = F(s) P(t-1) F(s)^T + Q \\ K(t) = P^-(t) \psi_p(s)^T (\psi_p(s) P^-(t) \psi_p(s)^T + R)^{-1} \\ \hat{a}_k(t) = \hat{a}_k^-(t) + K(t) (\hat{T}_{obs}(s_p, t) - \sum_{k=1}^N \varphi_k(s) \hat{a}_k^-(t)) \\ P(t) = (I - K(t) \psi_p(s)) P^-(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P^-(t)$ 表示先验协方差矩阵; $K(t)$ 表示卡尔曼增益; $\hat{a}_k(t)$ 表示最优估计时间模式系数; $P(t)$ 表示协方差矩阵; Q 和 R 表示噪声协方差矩阵。

获取最优估计的时间模式系数 $\hat{a}_k(t)$ 后, 结合空间基函数 $\varphi_k(s)$, 可获得温度场时空重构方程:

$$\hat{T}(s, t) \approx \sum_{k=1}^N \varphi_k(s) \hat{a}_k(t) \quad (12)$$

与 Gappy 方法使用普通最小二乘法不同^[20-21], 提出的方法采用 L_2 正则化最小二乘法, 防止求解时产生过拟合现象, 同时结合卡尔曼滤波器对时间模式系数进行最优估计, 减小噪声带来的影响。与 KF-LSE 方法使用仿真状态时间模式系数估计实际状态的时间模式系数不同^[22], 提出的方法根据实时测量数据计算时间模式系数, 并将状态空间方程投影到空间基函数上获取状态转移矩阵, 能有效跟踪模型的动态变化。提出的方法融合仿真数据和测量数据, 实时计算模型实际工作状态下的温度场, 其重构原理如图 3 所示。

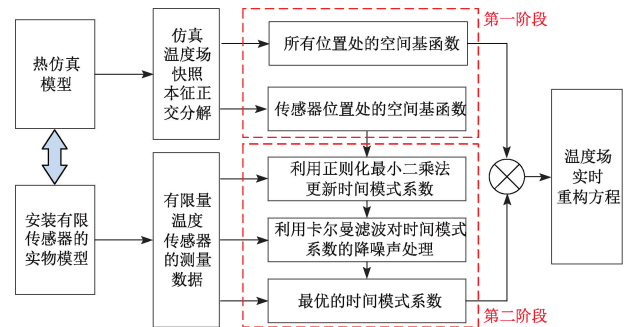


图 3 温度场重构原理图

Fig. 3 Principle diagram of temperature field reconstruction

2.3 重构方法的伪代码

本文提出的基于 POD-RLS-KF 的两阶段温度场实时重构方法, 其伪代码如算法 1 所示。

算法 1: 基于 POD-RLS-KF 的两阶段温度场实时重构方法

- 1: 瞬态仿真数据 $T(s, t)$
- 2: 利用式 (2) 进行 POD 分解获取空间基函数
- 3: for $t = 1, 2, 3 \dots$
- 4: 获取有限测点处的温度测量信息 $T_{obs}(s_p, t)$
- 5: 利用式 (8) 对时间模式系数进行更新
- 6: 利用式 (10) 计算状态转移矩阵
- 7: 利用式 (11) 对时间模式系数做最优估计
- 8: 利用式 (12) 计算时刻温度场, 完成时空重构
- 9: end for

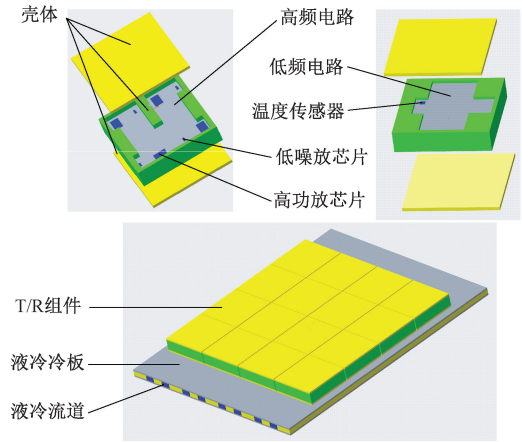


图 4 有源相控阵天线仿真模型

Fig. 4 Simulation model of APAA

3 温度场重构仿真验证

有源相控阵天线在实际工作时有接收和发射交替、单独发射、单独接收 3 种状态, 本文对交替状态进行仿真验证, 对单独接收和单独发射状态进行实验验证。重构温度场的精度采用节点温度的均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均均方根误差 (mean of root mean square error, MRMSE) 来衡量; 验证位置的重构精度用均方根误差 (root mean square error, $RMSE_p$)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE_p)、平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, $MAPE_p$) 表示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\dot{T}(s, t) - T(s, t))^2}{n_0}} \quad (13)$$

$$MRMSE = \frac{\sum RMSE}{M} \quad (14)$$

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{\sum (\dot{T}(s_p, t) - T(s_p, t))^2}{M}} \quad (15)$$

$$MAE_p = \text{mean}(|\dot{T}(s_p, t) - T(s_p, t)|) \quad (16)$$

$$MAPE_p = \text{mean}\left(\left|\frac{\dot{T}(s_p, t) - T(s_p, t)}{T(s_p, t)}\right|\right) \quad (17)$$

式中: $\dot{T}(s, t)$ 为重构温度场; $T(s, t)$ 为测试状态温度场; n_0 为网格数量; $\dot{T}(s_p, t)$ 为验证位置重构温度; $T(s_p, t)$ 为验证位置测试温度; M 为重构时刻个数。

3.1 交替状态仿真设置

由于天线结构复杂, 无法进行精确热仿真分析, 因此只考虑主要发热芯片 (高功放芯片和低噪声芯片) 和散热结构, 其简化模型如图 4 所示。

该 64 通道有源相控阵天线包括 64 个高功放芯片、64 个低噪声芯片、16 个温度传感器。为更好的获取天线

阵面上的温度信息, 选择不同行和列位置上 4 个温度传感器数据用于重构和验证, 即取左上至右下对角线上的 4 个传感器位置的数据用于重构温度场; 取右上至左下对角线上的 4 个传感器位置的数据用于验证重构温度场精度; 随机取 6 个芯片位置的温度用于分析实际状态下的芯片温度的变化情况, 其中芯片位置 1、4、5 为高功放芯片, 芯片位置 2、3、6 为低噪声芯片, 其相关位置如图 5 所示。天线温度场重构后, 便可提取 128 个芯片的温度用于后续天线电磁性能调控工作。

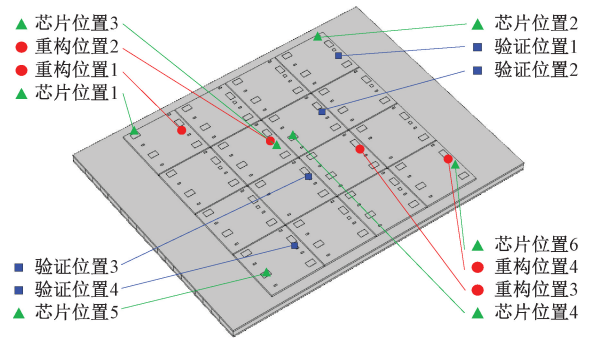


图 5 相关位置

Fig. 5 Relevant locations

3.2 交替状态验证结果

天线接收和发射交替状态仿真时, 设置高功放芯片热耗为 P_{10} , 低噪声芯片热耗为 P_2 , 改变芯片热耗交替周期 k 进行两次仿真, 用于模拟实际工况与仿真工况不一致。当 $k = 5$ 时, 瞬态仿真数据作为交替状态仿真工况; 当 $k = 2.5$ 时, 瞬态仿真数据作为交替状态测试工况。

$$P_{10} = \begin{cases} 10W, & 2nk < t \leq (2n+1)k, \quad n = 0, 1, 2, \dots \\ 0W, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$P_2 = \begin{cases} 0W, & 2nk < t \leq (2n+1)k, \quad n=0,1,2,\dots \\ 2W, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

首先对交替状态仿真工况温度场数据进行 POD 分解,取前 4 阶空间基函数;然后将 4 个重构位置的测试工况温度数据用于温度场重构。图 6 为交替状态测试工况传感器位置的温度变化,由于高功放芯片和低噪放芯片交替工作,传感器位置的温度也呈周期性变化;其中每一行温度从左到右依次降低,每一列温度大致相等,与冷板散热规律相符。

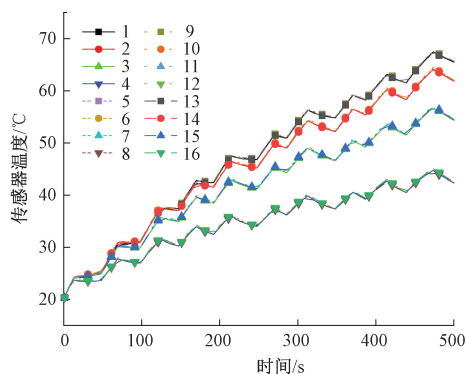


图 6 交替状态传感器位置的温度

Fig. 6 Temperatures at sensor locations under alternate state

在仿真工况和测试工况不一致的情况下,验证位置 1 的仿真、测试和重构温度如图 7 所示,Gappy 和 POD-RLS-KF 方法能有效跟踪模型动态变化,但 Gappy 方法存在大量噪声,KF-LSE 方法无法跟踪模型动态变化,而提出的方法在该位置的温度变化情况与测试值几乎保持一致。第 500 s 仿真、测试、重构温度场如图 8 所示,KF-LSE 方法重构温度场仍与仿真温度场相似,与测试温度场相差较大,即 KF-LSE 方法不能有效跟踪系统动态变化,Gappy 方法重构温度场存在大量噪声,温度场最高温度与测试温度场相差较大,而提出的方法在温度场分布方面与测试温度场相近。

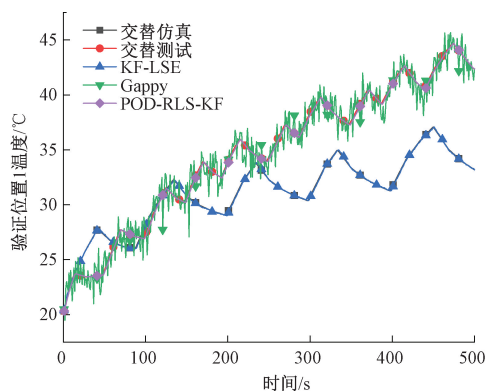


图 7 交替状态验证位置 1 的温度

Fig. 7 Temperature at verification location 1 under alternate state

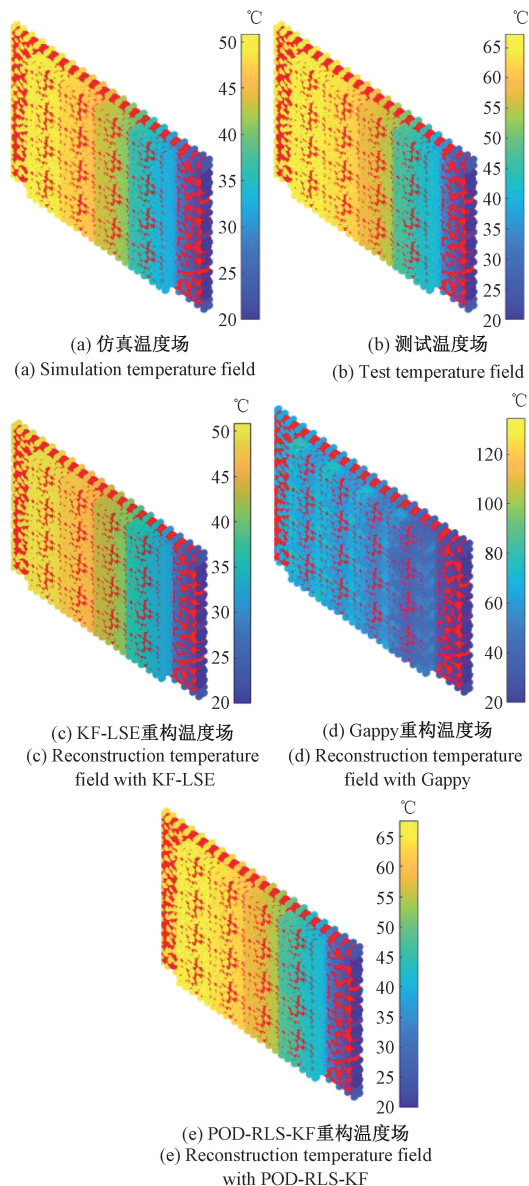


图 8 交替状态第 500 s 温度场

Fig. 8 Temperature fields at 500 s under alternate state

图 9 为交替状态 4 个验证位置的重构误差,所有时刻重构温度场的 $RMSE$ 如图 10 所示,由图可知,提出的方法在验证位置处重构误差在 0.5°C 以内,且重构温度场均方根误差 $RMSE$ 远小于文献中的两种方法。

如图 11 为 6 个芯片位置的温度,芯片 1、4、5 是发射状态工作的高功放芯片,发热功率大,在工作状态切换时温度波动大,芯片 1、5 位于模型最左侧,温度最高,芯片 4 位于模型靠右侧,温度比芯片 1、5 低;芯片 2、3、6 是接收状态工作的低噪放芯片,发热功率小,在工作状态切换时温度波动小,芯片 2、6 位于模型最右侧,温度最低,芯片 3 位于模型靠左侧,温度比芯片 2、6 高,符合冷板散热的分布规律。

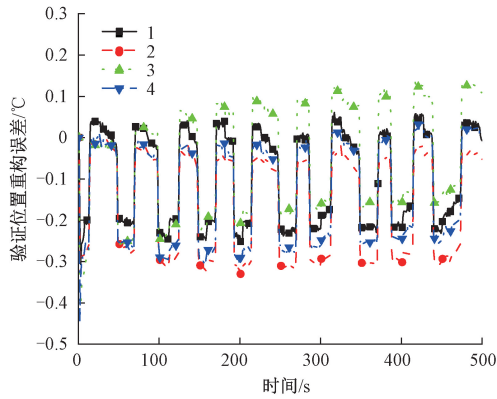


图9 交替状态验证位置的重构误差

Fig. 9 Reconstruction errors at verification locations under alternate state

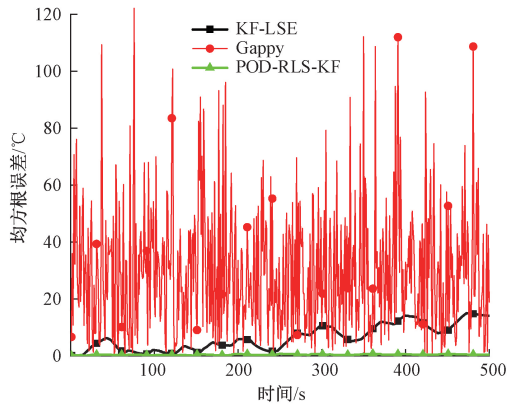


图10 交替状态温度场重构均方根误差

Fig. 10 RMSE of reconstruction temperature field under alternate state

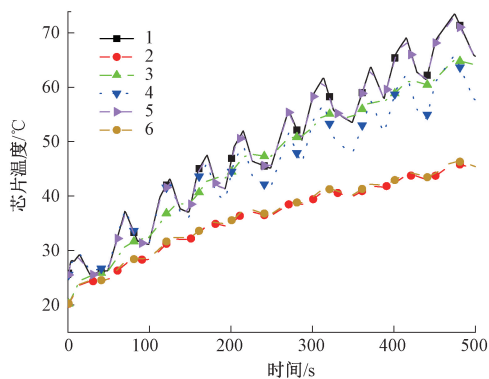


图11 交替状态芯片位置的重构温度

Fig. 11 Reconstruction temperatures at chip locations under alternate state

由表1可知提出方法重构温度场的平均均方根误差 $MRMSE$ 是 KF-LSE 方法的 7.18%, 是 Gappy 方法的

1.53%。由表2可知在4个验证位置重构精度方面, 提出方法的平均绝对误差 MAE_p 分别是 KF-LSE 方法的 2.54%、2.67%、1.91% 和 2.06%, 分别是 Gappy 方法的 13.25%、22.22%、27.66% 和 19.18%; 提出方法均方根误差 $RMSE_p$ 分别是 KF-LSE 方法的 2.84%、2.85%、1.78% 和 2.12%, 分别是 Gappy 方法的 14.42%、23.33%、25.42% 和 19.57%; 提出方法的平均绝对百分比误差 $MAPE_p$ 是 KF-LSE 方法的 2.68%、2.90%、2.02% 和 2.00%, 分别是 Gappy 方法的 13.54%、22.74%、27.00% 和 18.68%。

表1 交替状态温度场重构精度

Table 1 Temperature field reconstruction accuracy under alternate state

重构方法	KF-LSE ^[22]	Gappy ^[20-21]	POD-RLS-KF
MRMSE/℃	6.41	30.00	0.46

通过对比3种方法在温度场重构精度和验证位置重构精度, 提出的 POD-RLS-KF 方法重构精度远高于不能跟踪系统动态变化的 KF-LSE 方法, 优于未对时间模式系数降噪的 Gappy 方法, 验证了本方法在温度场重构方面的有效性, 即提出的方法能通过少量实际测量数据准确重构出模型在实际工作状态的温度场。

表2 交替状态验证位置重构精度

Table 2 Reconstruction accuracies at verification locations under alternate state

重构方法	重构精度	1	2	3	4
KF-LSE ^[22]	$MAE_p/℃$	4.33	5.99	6.79	6.80
	$RMSE_p/℃$	5.28	7.36	8.42	8.51
	$MAPE_p/\%$	18.31	21.75	23.83	33.99
Gappy ^[20-21]	$MAE_p/℃$	0.83	0.72	0.47	0.73
	$RMSE_p/℃$	1.04	0.90	0.59	0.92
	$MAPE_p/\%$	3.62	2.77	1.78	3.64
POD-RLS-KF	$MAE_p/℃$	0.11	0.16	0.13	0.14
	$RMSE_p/℃$	0.15	0.21	0.15	0.18
	$MAPE_p/\%$	0.49	0.63	0.48	0.68

4 温度场重构实验验证

4.1 有源相控阵天线实验系统

图12是64通道有源相控阵天线的实际测试装置, 其中有源相控阵天线工作状态为连续波, 可控制相位变化进行扫描。天线阵列由64个天线单元、16个4通道片式 T/R 组件和冷板组成, 其中冷却液从冷板右侧流入, 左侧流出。片式 T/R 组件结构如图13所示, 左侧为高频

电路,包括 4 个发射通道和 4 个接收通道;右侧为低频电路,安装了型号为 LM135 的半导体温度传感器。天线阵列温度信息由 16 个 T/R 组件内部的温度传感器获取,占整个系统工作空间的 5% 左右,因此还可以根据重构结果对电磁性能进行调控。

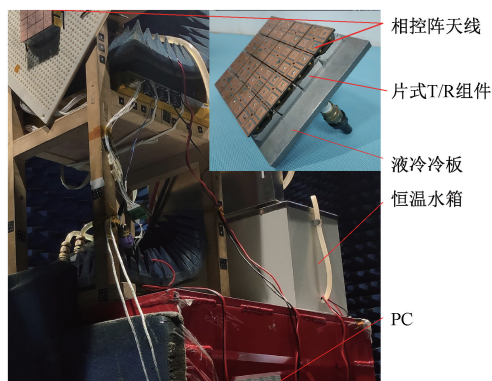


图 12 有源相控阵天线测试系统

Fig. 12 APAA test system

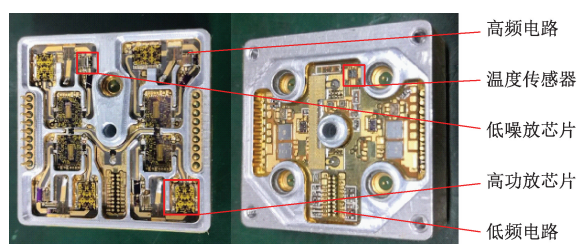


图 13 片式 T/R 组件实物图

Fig. 13 Photos of the tiled T / R modules

该测试装置位于微波暗室内,包括天线单元、T/R 组件、液冷冷板、恒温水箱和 PC。天线接收状态测试时,单个低噪放芯片热耗约为 2 W,天线阵列热耗约为 128 W,采用自然风冷散热;天线发射状态测试时,单个高功放芯片热耗约为 10 W,天线阵列热耗约为 640 W,采用液冷冷板散热,其结构如图 14 所示。

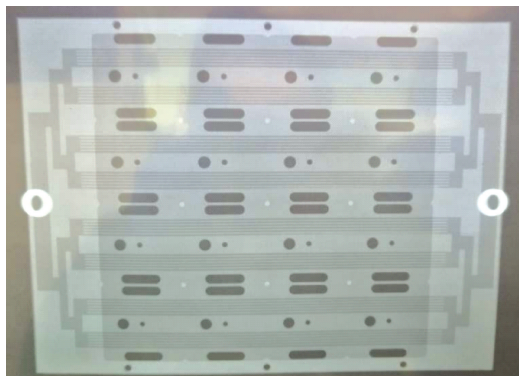


图 14 冷板 X 光检测图

Fig. 14 X-ray inspection photo of cold plate

因为实际测量时,无法获取模型实际工作状态下的温度场数据,所以在图 17 和图 22 中无测试温度场,在实验验证温度场重构精度时无均方根误差 $RMSE$ 和平均均方根误差 $MRMSE$ 。

4.2 接收状态实验结果

天线接收状态瞬态仿真时,发射通道的高功放芯片热耗 $P_{10} = 0$ W,接收通道的低噪放芯片热耗 $P_2 = 2$ W。对接收状态温度场仿真数据进行 POD 分解,取前 4 阶空间基函数,然后将 4 个重构位置温度传感器的测试数据用于温度场重构。图 15 为接收状态测试工况传感器位置的温度变化。由于芯片功率较小,缓慢进行升温,16 个传感器温度大致相等,符合自然风冷散热规律。

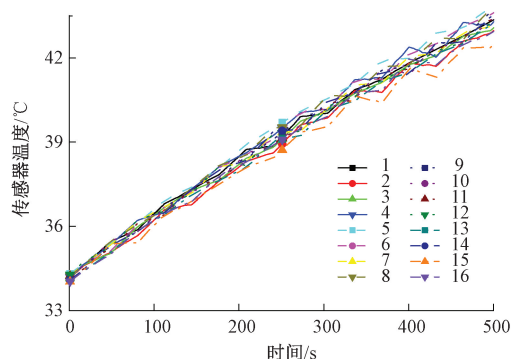


图 15 接收状态传感器位置的温度

Fig. 15 Temperatures at sensor locations under receive state

在仿真和测试工况不一致的情况下,接收状态验证位置 1 的仿真、测试和重构温度如图 16 所示,即 Gappy 和 POD-RLS-KF 方法能有效跟踪模型动态变化,但 Gappy 方法存在大量噪声,KF-LSE 方法无法跟踪模型动态变化,而提出的方法在该位置的温度变化情况与测试值几乎保持一致。第 500 s 接收状态的仿真、重构温度场如图 17 所示,KF-LSE 方法重构温度场仍与仿真温度场相似,即 KF-LSE 方法无法跟踪模型状态变化;Gappy 方法重构的温度场在冷板区域温度最高,不符合自然风冷散热的温度分布规律;而提出的方法重构温度场温度分布较为均匀。

接收状态验证位置的重构误差如图 18 所示,重构误差在 1°C 以内;图 19 是提取的 6 个芯片的温度,接收状态时低噪放芯片 2、3、6 工作,但芯片功率低,温度略高于未工作的高功放芯片 1、4、5。

表 3 给出了在接收状态下 3 种方法在 4 个验证位置的重构精度对比结果。从表中可知:POD-RLS-KF 方法的平均绝对误差 MAE_p 分别是 KF-LSE 方法的 1.38%、2.62%、3.43% 和 4.29%;提出方法的均方根误差 $RMSE_p$

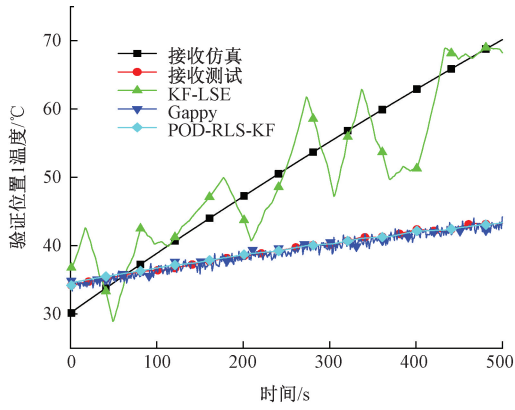


图 16 接收状态验证位置 1 的温度

Fig. 16 Temperature at verification location 1 under receive state

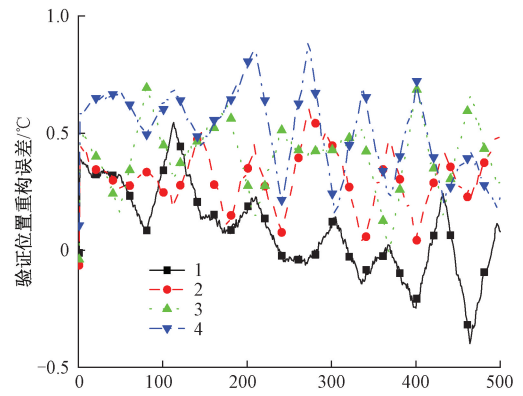


图 18 接收状态验证位置的重构误差

Fig. 18 Reconstruction errors at verification locations under receive state

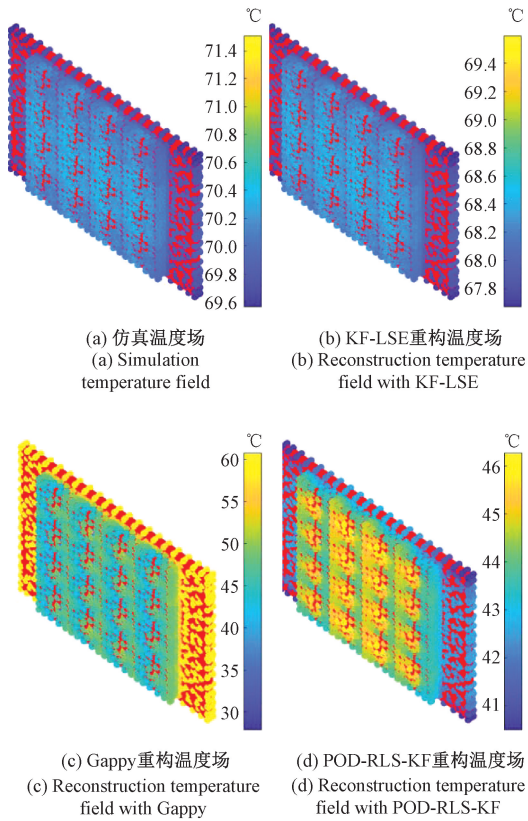


图 17 接收状态第 500 s 温度场

Fig. 17 Temperature fields at 500 s under receive state

分别是 KF-LSE 方法的 1.45%、2.34%、3.03% 和 3.82%；提出方法的平均绝对百分比误差 $MAPE_p$ 是 KF-LSE 方法的 1.47%、2.72%、3.58% 和 3.38%。在 4 个验证位置的重构精度方面,提出的 POD-RLS-KF 方法与 Gappy 方法较为相近,但是 Gappy 方法在最小二乘法求解时过拟合导致重构的温度场分布违背自然风冷却时的温度场分布规律。

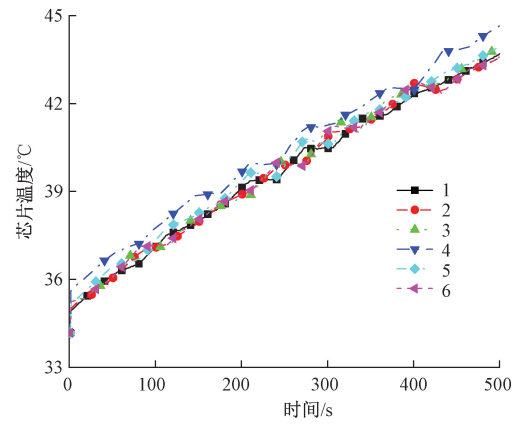


图 19 接收状态芯片位置的重构温度

Fig. 19 Reconstruction temperatures at chip locations under receive state

表 3 接收状态验证位置的重构精度

Table 3 Reconstruction accuracies at verification locations under receive state

重构方法	重构精度	1	2	3	4
KF-LSE ^[22]	$MAE_p/^\circ\text{C}$	11.57	11.85	11.94	11.89
	$RMSE_p/^\circ\text{C}$	13.82	14.11	14.18	14.13
	$MAPE_p/\%$	28.55	29.36	29.65	29.64
Gappy ^[20-21]	$MAE_p/^\circ\text{C}$	0.48	1.41	1.46	0.48
	$RMSE_p/^\circ\text{C}$	0.59	1.79	1.85	0.61
	$MAPE_p/\%$	1.22	3.61	3.75	1.25
POD-RLS-KF	$MAE_p/^\circ\text{C}$	0.16	0.31	0.41	0.51
	$RMSE_p/^\circ\text{C}$	0.20	0.33	0.43	0.54
	$MAPE_p/\%$	0.42	0.80	1.06	1.34

4.3 发射状态实验结果

天线发射状态瞬态仿真时,发射通道的高功放芯片热耗 $P_{10} = 10 \text{ W}$,接收通道的低噪放芯片热耗 $P_2 = 0 \text{ W}$ 。对发射状态温度场仿真数据进行 POD 分解,取前 4 阶空间基函数,然后将 4 个重构位置温度传感器的测试数据用于温度场重构。图 20 为发射状态测试工况下传感器位置的温度变化。由于芯片功率较大,升温过程较快,逐渐达到稳态;并且每一行温度从左到右依次降低,每一列温度大致相等,与冷板散热规律相符。

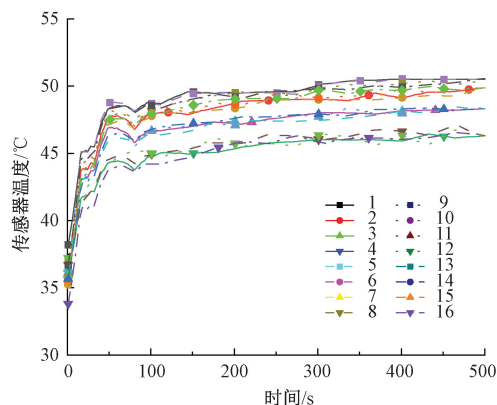


图 20 发射状态传感器位置的温度

Fig. 20 Temperatures at sensor locations under transmit state

在仿真和测试工况不一致的情况下,发射状态验证位置 1 的仿真、测试和重构温度如图 21 所示, Gappy 和 POD-RLS-KF 方法能有效跟踪模型动态变化,但 Gappy 方法存在大量噪声, KF-LSE 方法无法跟踪模型动态变化,而提出的方法在该位置的温度变化情况与测试值大致相等。

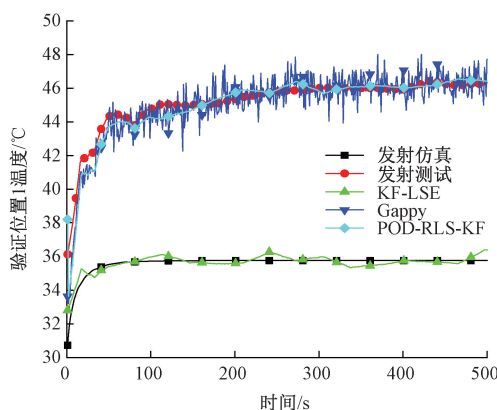


图 21 发射状态验证位置 1 温度

Fig. 21 Temperature at verification location 1 under transmit state

第 500 s 发射状态的仿真、重构温度场如图 22 所示, KF-LSE 方法重构温度场仍与仿真温度场相似,即 KF-LSE 方法无法跟踪模型动态变化, Gappy 方法重构温

度场在单个 T/R 组件的右侧部分区域温度较高,不符合冷板温度场分布规律,而提出方法重构温度场左侧温度高右侧温度低,符合冷板散热温度场分布规律。

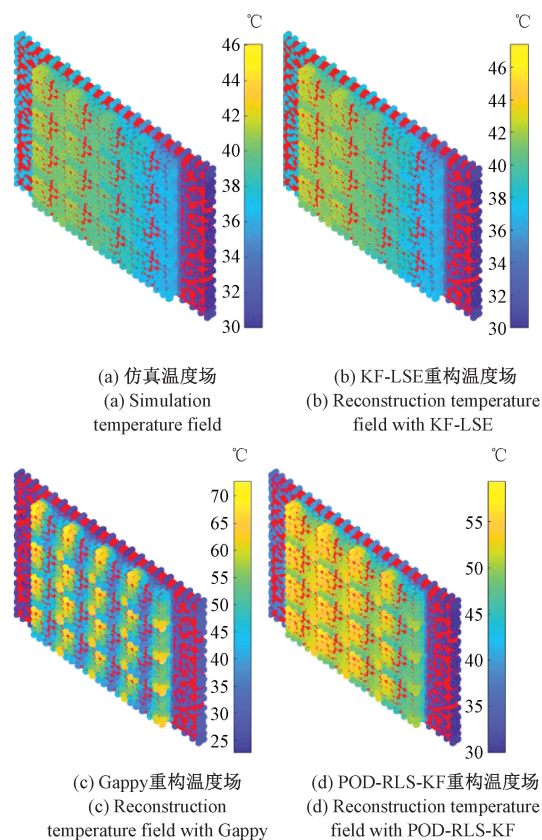


图 22 发射状态第 500 s 温度场

Fig. 22 Temperature fields at 500 s under transmit state

发射状态验证位置 1 的重构误差如图 23 所示,大部分重构误差在 1℃ 以内;图 24 为提取的 6 个芯片的温度,发射状态时高功放芯片 1、4、5 工作,因此温度高于未工作的芯片 2、3、6。

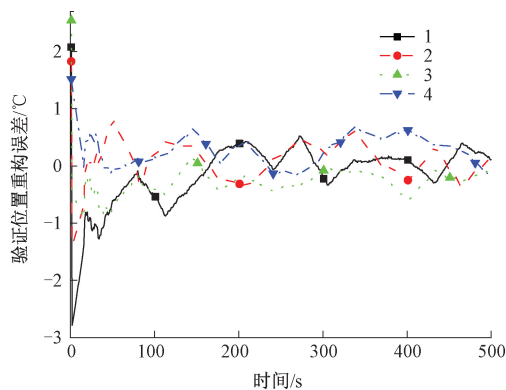


图 23 发射状态验证位置的重构误差

Fig. 23 Reconstruction errors at verification locations under transmit state

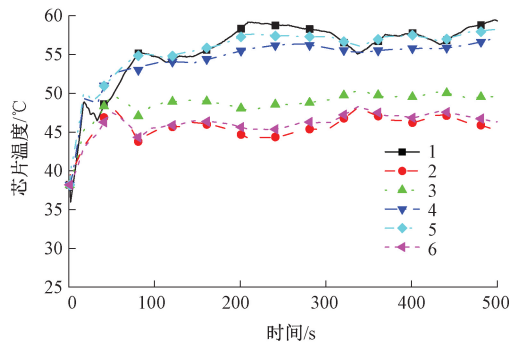


图 24 发射状态芯片位置的重构温度

Fig. 24 Reconstruction temperatures of chip locations under transmit state

表 4 给出在发射状态下 3 种方法在 4 个验证位置的重构精度对比。从表中可知:提出的 POD-RLS-KF 方法的平均绝对误差 MAE_p 分别是 KF-LSE 方法的 5.87%、2.35%、9.32% 和 2.39%;提出的 POD-RLS-KF 方法的均方根误差 $RMSE_p$ 分别是 KF-LSE 方法的 7.39%、3.28%、9.45% 和 2.99%;提出的 POD-RLS-KF 方法的平均绝对百分比误差 $MAPE_p$ 是 KF-LSE 方法的 6.23%、2.47%、9.28% 和 2.46%。在 4 个验证位置的重构精度方面,提出的 POD-RLS-KF 方法与 Gappy 方法相近,但是 Gappy 方法由于普通最小二乘法求解时过拟合现象导致重构的温度场分布违背冷板分布规律。

表 4 发射状态验证位置的重构精度

Table 4 Reconstruction accuracies at verification locations under transmit state

重构方法	重构精度	1	2	3	4
KF-LSE ^[22]	$MAE_p/^\circ\text{C}$	9.54	9.36	9.65	9.61
	$RMSE_p/^\circ\text{C}$	9.61	9.45	9.74	9.70
	$MAPE_p/\%$	21.03	19.87	19.82	19.55
Gappy ^[20-21]	$MAE_p/^\circ\text{C}$	0.51	0.40	0.27	0.87
	$RMSE_p/^\circ\text{C}$	0.65	0.48	0.34	0.95
	$MAPE_p/\%$	1.15	0.87	0.55	1.79
POD-RLS-KF	$MAE_p/^\circ\text{C}$	0.56	0.22	0.90	0.23
	$RMSE_p/^\circ\text{C}$	0.71	0.31	0.92	0.29
	$MAPE_p/\%$	1.31	0.49	1.84	0.48

5 结 论

针对稀疏传感器测量数据下的温度场实时重构问题,本文融合仿真和实验数据,提出了两阶段温度场实时重构方法 POD-RLS-KF。该方法利用稀疏传感器测量的不完备温度信息实时重构模型的温度场,它具有如下特点:1)通过正则化最小二乘法实时更新时间模式系数,防止求解时过拟合而出现不正常温度场分布;2)通过卡尔曼滤波器对时间模式系数进行滤波,减少噪声对温度场重构带来的影响;3)通过稀疏传感器采集数据,可以有效降低经济成本,减小传感器布置带来的结构和电路设计难度。通过有源相控阵天线在 3 种状态下的仿真与实验,与当前的温度场重构方法对比,提出的 POD-RLS-KF 方法展现出较好重构精度、动态跟踪能力和噪声抑制能力。该方法不仅可以实时监测天线阵温度场,而且能根据芯片位置的重构温度实时调控服役中的天线电磁性能,还可运用到其它类型的设备上,进行健康监测和性能调控。

参考文献

- [1] 张光义. 共形相控阵天线的应用与关键技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 331-336.
ZHANG G Y. Applications and key technologies of conformal phased array antenna [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(4): 331-336.
- [2] 鲁加国, 王岩. 后摩尔时代, 从有源相控阵天线走向天线阵列微系统[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(7): 1091-1109.
LU J G, WANG Y. From active phased array antenna to antenna array microsystem in post-Moore era [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(7): 1091-1109.
- [3] ASLAN Y, PUSKELY J, JANSSEN J, et al. Thermal-aware synthesis of 5G base station antenna arrays: An overview and a sparsity-based approach [J]. IEEE Access, 2018, 6: 58868-58882.
- [4] WILMER P, MICHELE D C. Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin facade[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37(1): 267-274.
- [5] SHI J W, QI H, YIN Y M, et al. Reconstruction of 3D flame temperature and absorption coefficient field by the hybrid

- light-field imaging and laser extinction technique [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 109: 103404.
- [6] 张艳博, 任瑞峰, 梁鹏, 等. 基于热成像的埋地热力管道缺陷检测试验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(6): 161-170.
- ZHANG Y B, REN R F, LIANG P, et al. Experimental study on flaw detection of buried heat pipeline based by infrared thermal [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(6): 161-170.
- [7] MA T, LIU Y, CAO C. Neural networks for 3D temperature field reconstruction via acoustic signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 126(7): 392-406.
- [8] 颜华, 李欣, 王善辉. 基于最小二乘法和克里金插值的三维温度场重构 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2014, 36(3): 303-307.
- YAN H, LI X, WANG SH H. Reconstruction of three-dimensional temperature field based on least-square method and Kriging interpolation [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014, 36(3): 303-307.
- [9] 施超, 胡斌, 梁晓瑜. 基于超声波的结构内部温度场重建方法研究 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(12): 44-51.
- SHI CH, HU B, LIANG X Y. Reconstruction of internal temperature distribution in solid structure by ultrasound thermometry [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(12): 44-51.
- [10] 魏东, 石友安, 胡斌, 等. 电磁超声法测量结构内部温度场的试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(6): 93-99.
- WEI D, SHI Y AN, HU B, et al. Experimental study on sensing the internal temperature distributions of structures by electromagnetic ultrasonic [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(6): 93-99.
- [11] RAPP S, BAIER H. Integrated fiber optic sensors for hot spot detection and temperature field reconstruction in satellites [J]. *Smart Materials & Structures*, 2010, 19(7): 075007.
- [12] XU K K, LI H X, LIU Z. ISOMAP based spatiotemporal modeling for lithium-ion battery thermal process [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 14(2): 569-577.
- [13] WANG B C, LI H X, YANG H D. Spatial correlation based incremental learning for spatiotemporal modeling of battery thermal process [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(4): 2885-2893.
- [14] LI K J, SU H Y, CHU J, et al. A fast POD model for simulation and control of indoor thermal environment of buildings [J]. *Building & Environment*, 2013, 60: 150-157.
- [15] LEI J, LIU S. Temperature field reconstruction from the partial measurement data using the gappy proper orthogonal decomposition [J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2013, 7(3): 171-179.
- [16] WANG X D, WANG G J, CHEN H, et al. Real-time temperature field reconstruction of boiler drum based on fuzzy adaptive Kalman filter and order reduction [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 113: 145-153.
- [17] 胡金秀, 郑保敬, 高效伟. 基于特征正交分解降阶模型的瞬态热传导分析 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45(1): 73-84.
- HU J X, ZHENG B J, GAO X W. Reduced order model analysis method via proper orthogonal decomposition for transient heat conduction [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, 45(1): 73-84.
- [18] MEYER R D, TAN G. Provide detailed and real-time indoor environmental information using POD-LSE and limited measurements [J]. *Energy & Buildings*, 2014, 73(2): 59-68.
- [19] SEMPEY A, INARD C, GHIAUS C, et al. Fast simulation of temperature distribution in air conditioned rooms by using proper orthogonal decomposition [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(2): 280-289.
- [20] JIANG C Y, SOH Y C, LI H. Sensor and CFD data fusion for airflow field estimation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 92: 149-161.
- [21] JIANG C Y, SOH Y C, LI H. Two-stage indoor physical field reconstruction from sparse sensor observations [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 151(9): 548-563.
- [22] 石欣, 王梨, 赵莹. 基于 KF-LSE 的建筑室内温度场实时准确重构方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2): 100-107.
- SHI X, WANG L, ZHAO Y. Real-time and accurate reconstruction method for indoor temperature field of building based on KF-LSE [J]. *Chinese Journal of*

Scientific Instrument, 2018, 39(2): 100-107.

- [23] LI H X, QI C K. Modeling of distributed parameter systems for applications—A synthesized review from time-space separation[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(8): 891-901.
- [24] HUANG X, WU L, YE Y S. A review on dimensionality reduction techniques[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019. 33(10): 1950017.

作者简介



刘德荣, 2019 年于西安工业大学获得学士学位, 现为西安电子科技大学机电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为电子设备温度场重构、电子设备热设计。

E-mail: liuderong0727@126.com

Liu Derong received his B.Sc. degree in 2019 from Xi'an Technological University. Now, he is an M.Sc. candidate in School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University. His main research interest includes temperature field reconstruction and thermal design of electronic equipment.



周金柱(通信作者), 2011 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能相控阵天线和场重构方法。

E-mail: xidian_jzzhou@126.com

Zhou Jinzhu (Corresponding author) received his Ph.D. degree in 2011 from Xidian University. Now, he is a professor and doctoral supervisor in Xidian University. His main research interest includes smart phased array antenna and field reconstruction method.



王梅, 2002 年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为中国电子科技集团公司合肥第 38 研究所高级研究员, 主要研究方向为相控阵天线结构设计。

E-mail: 15357946086@163.com

Wang Mei received her M.Sc. degree in 2002 from Hefei University of Technology. Now, she is a senior research fellow at 38th Research Institute, CETC in Hefei. Her main research interest is structure design of phased array antenna.