自适应差分进化协同位置估计的流星雷达相位校准方法研究

吴永昆[1,2] 徐轻尘[1,2] 刘正青[1,2] 何玉斌[1,2] 蔡冰[1] 杨钧烽[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)
2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 本文提出一种基于自适应差分进化协同位置估计的流星雷达多通道相位校准方法。该方法基于到达角估计“坏点”占比、流星高度分布等统计特性构建复合目标函数，采用可变步长的自适应差分进化搜索策略，并协同开展流星余迹到达角与高度信息的迭代估计，可高效获取精确的系统相位校准结果与流星余迹位置估计结果。通过仿真模拟与对 4 个月流星雷达连续观测数据的相位漂移监测结果表明，该方法的通道间相位偏差估计方均根误差（RMSE）小于 1°，可进一步提升流星雷达观测数据质量，适用于雷达系统通道特性的长期持续监测。

关键词 流星，流星雷达，相位校准，自适应差分进化

中图分类号 P353

最新录用

Research on Meteor Radar Phase Calibration Using the JADE Algorithm with Collaborative Position Estimation

WU Yongkun[1, 2] XU Qingchen[1, 2] LIU Zhengqing[1, 2] HE Yubin[1, 2]

CAI Bing[1] YANG Junfeng[1, 2]

1 (*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2 (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract A method for multi-channel phase internal calibration of meteor radar based on adaptive differential evolution and collaborative position estimation is presented. This approach constructs a composite objective function based on statistical properties, specifically the proportion of angle-of-arrival (AOA) estimation "outliers" and the characteristic altitude distribution of meteors. By employing the JADE search strategy with an adaptive mutation factor and optional external archive, the method synchronously conducts iterative estimation the AOA and altitude information of meteor trails. This framework efficiently facilitates the estimation of high-precision multi-channel phase offsets and meteor trail positions. Simulation modeling and monitoring results of phase drift from four months of continuous meteor radar observations indicate that the root mean

* 基金项目：应急机动雷达接收处理技术
投稿日期：2026-03-06

square error of the multi-channel phase offsets is less than 1°. The proposed method substantially enhances the data quality of meteor radar and is highly applicable for the routine on-line self phase calibration measurements.

Key words　Meteor, Meteor radar, Phase calibration, Adaptive differential evolution

0　引 言

流星雷达目前已广泛应用于中间层顶和低热层（MLT）大气动力学研究（Hocking[1]，Holdsworth[2]，Cervera[3]，Stober[4]，Marino[5]等），例如 MLT 区域大气风场、温度和密度探测[6]，大气重力波、潮汐和行星波特性及其相互作用（Spargo[7]，YI wen[8-9]，Lu maolin[10]，He xiaojing[11]等）等研究。流星雷达主要通过测量流星余迹散射回波在不同接收天线之间的相位差来确定流星余迹的到达角（Jones[12]，Holdsworth[13]，Younger[14]，Korotyshkin D[15] 等），进而反演大气风场等环境参量。实际观测中，流星雷达各接收通道的相位延迟不平衡，天线、馈线、低噪放等部件的变化、探测站点的环境及其变化（例如地形和障碍物、站点温湿度变化）等因素都会使雷达系统通道间相位差发生变化[16]。因此多通道相位校准是流星雷达获取高质量观测数据的关键技术之一[17]。

现有的无线电雷达相位校准，主要包括外校准和内校准两类方法。外校准主要利用外部参考信号进行雷达通道相位校准。Valentic[18]、Chau[19]、Jin[20]等通过在雷达阵列远场部署多个外部信标源，计算天线阵列的位置和通道相位误差。R.D. Palmer 等[21]、J.L. Chau[22]等使用恒星发射的无线电信号，计算和评估系统多通道之间的相位偏差。J.-S. Chen 等[23]利用雷达探测到的飞机回波计算系统相位偏差，Marino[5]、Spargo[16]、Dmitry Korotyshkin[17]等人进一步利用穿越雷达站的航班 ADS-B 空中交通监测数据，结合雷达直接测量的飞机回波信号，进行流星雷达相位校准，校准精度（RMSE）最高可达~0.5°（积累 1 个月高信噪比飞机回波信号与 ADS-B 数据）。外校准方法对外部信号源以及与雷达系统的收发链路搭建要求较高，如需利用雷达工作频率范围内的、位置精确的高精度信号源，需保证接收天线阵列和多个外部信号源之间场地开阔，无地形、高大建筑等遮挡，或者需要雷达站附近有商业航线经过，并通过付费 API 订阅商业数据库或自行架设和维护 ADS-B 接收站，应用场景和持续监测能力受限。内校准方法则主要利用雷达接收到的回波信号或数据进行系统相位校准。例如 Holdsworth[24]、陈晓

最新录用

博[25]、沈金成[26]、Chau[27]等使用流星余迹回波自身特性进行流星雷达相位校准，校准精度（RMSE）可以达到~2°，且具备持续监测能力。

差分进化算法是由 Storn 和 Price[28]提出的一种高效的模拟自然界生物进化思想的随机全局搜索和优化方法。自适应差分进化算法（Adaptive Differential Evolution，ADE）[29-34]进一步改进和优化 DE 标准算法，具有概念简单、易于实现、鲁棒性强和全局寻优能力好等特点。2024 年，Stanovov V 等人[35]提出的 L-SRTDE 算法通过引入实时成功率参数反馈机制，打破了传统 SHADE 对历史存档的过度依赖，有效解决了高噪声环境下控制参数失调问题。Choi T 等人[36]在 2025 年开发的 ADCP-LSRTDE 中，通过设计维度自适应柯西扰动算子，显著增强了算法在处理非线性任务时的鲁棒性。在动态种群调整方面，Tanabe R 等人[37]通过线性减少种群规模（LPSR）来平衡全局勘探与局部开发，大幅提升了算法在有限计算资源下的搜索精度和效率。2025 年 Machacek J 等人[38]则通过构建动态双种群，在极高噪声水平下实现了比经典 L-SHADE 算法高出两个数量级的寻优精度。这些研究为处理高维、动态且含有大量随机扰动的工程优化问题提供了更丰富的理论支撑。

中国科学院国家空间科学中心于 2010 年 7 月在河北省廊坊市建立了我国首台可重部署流星雷达，并开展连续运行与观测[39-40]。在对该雷达的升级改造过程中，本文提出一种自适应差分进化协同位置估计的流星雷达相位校准方法，利用雷达系统现有的流星余迹天顶角、方位角和高度等观测数据，结合差分进化搜索算法（Differential Evolution，DE）和流星余迹到达角（Angle of Arrival, AOA,θ_{AOA}）迭代估计，通过 DE 算法迭代搜索与优化θ_{AOA}与高度分布统计特性，高效获取精确的系统相位校准与流星余迹位置估计结果，提升流星雷达数据质量。

1　自适应差分进化协同位置估计的相位校准方法

目前主要有四种利用流星回波的物理与统计特性进行雷达系统相位内校准的方法[24]：（1）最小化拟合双极扩散系数随高度变化的倾斜系数；（2）最小化流星余迹高度分布的标准差；（3）最大化θ_{AOA}可解的流星余迹数量；（4）最小化θ_{AOA}估计的“坏点”占比，即θ_{AOA}不可解、高度不可解的占比统计之和。通过对比分析，θ_{AOA}的“坏点”占比统计具有最好的无偏估计特性与估计稳定性。

最新录用

因此本文提出，通过结合θ_{AOA}估计的“坏点”占比统计和流星高度分布标准差这两个流星回波统计特性，构建可进行分阶段搜索的复合目标函数，采用自适应差分进化迭代搜索通道间相位偏差，并协同开展流星余迹θ_{AOA}与高度信息迭代估计的方法，进行雷达系统相位校准。

复合目标函数的计算需依托精确的θ_{AOA}算法，本文采用虚拟半波长基线法[16]提升θ_{AOA}反演准确性。同时，本文提出一种基于可变搜索步长的 JADE（ Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive proposed by Jingqiao Zhang，JADE）搜索算法，利用中间变量γ[24]降低搜索维度，以及基于 p 值引导的变异策略和外部存档机制[30]进行通道间相位偏差的迭代搜索方法，以解决高维目标函数存在全局多极值，目标函数极值附近呈现“多台阶”特性，以及传统 DE 算法搜索易陷入局部极值等问题。此外，本文选取了中科院空间中心廊坊站流星雷达的流星余迹观测数据用于相位校准方法的分析研究与算法验证。

1.1 复合目标函数构建

本文采用经典的流星雷达五通道干涉式接收天线阵布局[24]，周围天线R_2~R_5与中心天线 R_1 的距离分别为$d_1=d_3=2\lambda$，$d_2=d_4=2.5\lambda$，λ为雷达工作波长。

周围天线和中心天线之间总的相位差$\phi_{in}^{'}$为

$$\phi_{\mathrm{in}}^{'}=\phi_{\mathrm{in}}+\Delta\phi+\varepsilon \tag{1}$$

其中ϕ_{in}是天线几何位置引入的通道间相位差，$\Delta\phi$是通道间相位偏差，ε是噪声。例如，天线R_2~R_5与天线 R_1 的通道间相位偏差分别为$\Delta\phi_2$~$\Delta\phi_5$。

令参与相位校准的流星余迹数量为n，利用虚拟半波长基线法反演获取每颗流星余迹的天顶角θ和方位角φ后，再利用[24]中的公式（6）计算其高度h。

θ_{AOA}不可解的数量占比统计公式如下：

$$u_{\mathrm{AOA}}=\frac{\sum_{i=1}^{n} I\left(\frac{(sin\theta sin\varphi)^2}{d_3+d_4}+\frac{(sin\theta cos\varphi)^2}{d_1+d_2}\geq\frac{\lambda}{2}\right)}{n} \tag{2}$$

流星余迹高度h小于 70 km 或大于 110 km，均认为高度不可解。

$$u_h=\frac{\sum_{i=1}^{n'} I\,(h<70\ \mathrm{km}\ \vee\ h>110\ \mathrm{km})}{n'} \tag{3}$$

θ_{AOA}估计“坏点”占比统计公式如下：

最新录用

$$u=u_{\mathrm{AOA}}+u_h \tag{4}$$

图 1（a）和（b）是只对通道 2 加入相位偏差$\Delta\phi$（范围-720°~720°），并利用流星雷达一天的观测数据（流星余迹数量n=18318）计算得到流星余迹高度分布标准差δ_h和θ_{AOA}估计“坏点”占比u的一维变化情况。图 1（c）和（d）分别是将 1（a）和（b）在$\Delta\phi$=0°附近区域放大的结果，横轴的步长为 1°。

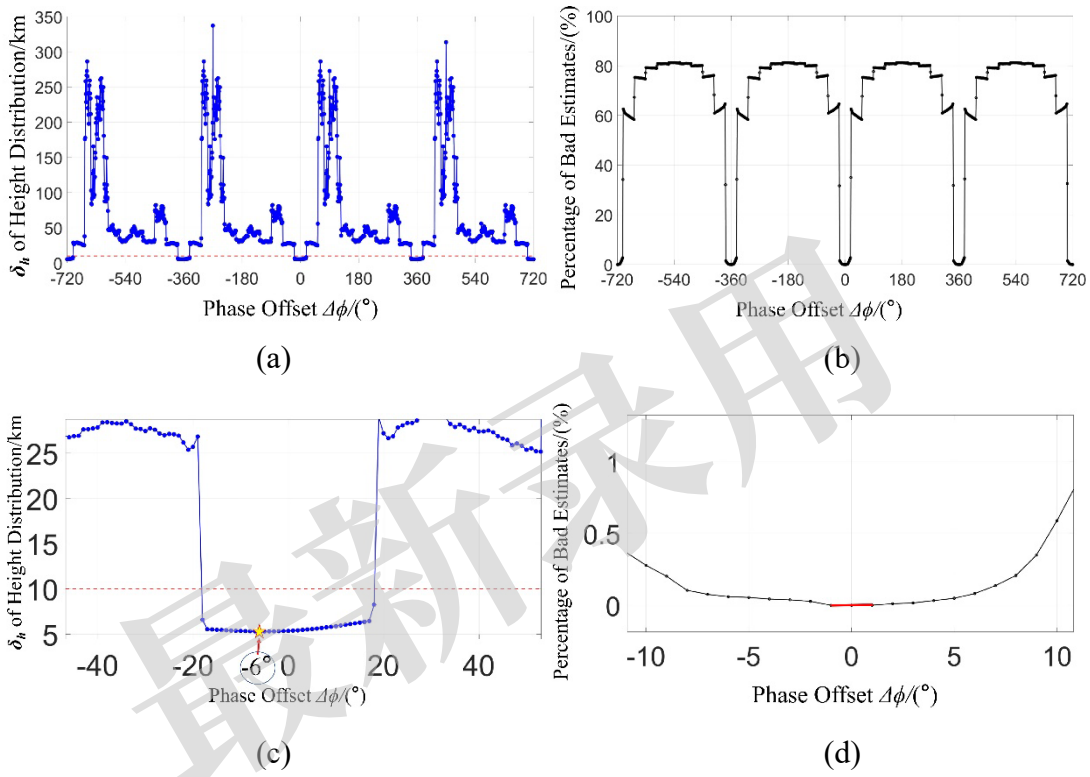


图 1 加入单个通道间相位偏差（-720°~720°）的高度分布标准差和θ_{AOA}估计“坏点”占比的变化.（a）δ_h一维变化情况，红色虚线代表δ_h数值陡降区域的阈值（10 km）.（b）θ_{AOA}估计“坏点”占比一维变化情况.（c）和（d）分别是将 1（a）和（b）在 $\Delta\phi$=0°附近放大的图像，δ_h最小值用红色五角星标注，θ_{AOA}估计“坏点”占比最小值范围用红色实线标注

Fig.1 Variations in height distribution standard deviation and θ_{AOA}estimation outlier ratio under single-channel phase deviations (-720°~720°). (a) 1D variations, where the red dashed line represents the threshold (10 km) for the region of sharp decline. (b) 1D variation of the θ_{AOA} estimation outlier ratio. (c) and (d) are respectively enlarged images of 1(a) and (b) near $\Delta\phi$ = 0°.The minimum value of δ_h is marked with a red pentagram, and the range of the minimum proportion of $\theta_{\mathrm{AOA}}$is marked with a solid red line.

从图 1 中可看到，一维δ_h和u值均呈现周期性变化（周期为 360°），δ_h的全局最小值不在相位偏差零值处（如图 1（c）所示，与沈金成[26]结果一致），且在

最新录用

不同时间段，其对应的相位偏差值也不同（与 Holdsworth[24]、Spargo[16]等结论一致）。此外δ_h在全局最小值附近存在一个约±20°的数值陡降区域。通过分析 LEE W[41]统计的流星余迹高度分布半高全宽（Full Width at Half Maxima，FWHM，Δ_{FWHM}）变化规律，FWHM 最大值不超过 20 km。根据高斯分布的 FWHM 与标准差σ之间的关系

$$\Delta_{\mathrm{FWHM}} = 2\sqrt{2\ln 2}\times\sigma \approx 2.355 \times\sigma \tag{5}$$

当 FWHM 为 20 时，标准差约为 8.49。因此可将δ_h陡降区域的阈值设为 10 km。

另一方面，u在相位偏差±1°以内均为零值（如图 1（d）所示）。因此，可利用θ_{AOA}估计“坏点”占比判断相位偏差估计搜索的收敛，同时利用δ_h相对较窄的陡降区域协助判断相位偏差零值的准确范围，在搜索开始阶段提升收敛速度。

综上所述，构建的复合目标函数y如下：

$$y = w_1 \cdot \delta_h + w_2 \cdot u \tag{6}$$

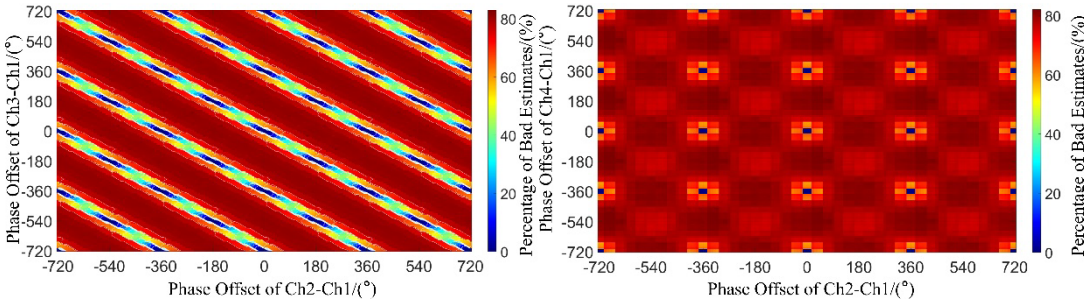
其中w_1、w_2为权重系数，分阶段控制搜索过程中y各分量的权重。其中，w_2=1，w_1设置如（7）式所示，在相位偏差估计值远离全局最小值时加速收敛，而在靠近全局最小值时旁路δ_h，

$$w_1 = \begin{cases} 1, & \delta_h \geq 10 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

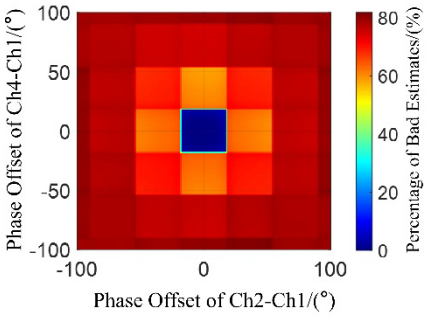
最新录用

1.2 降维搜索处理

图 2(a)为同时对通道 2 和 3（同一条天线基线）加入相位偏差$\Delta\phi_2$和$\Delta\phi_3$后u的二维变化情况；图 2(b)为同时对通道 2 和 4（不同天线基线）加入相位偏差$\Delta\phi_2$和$\Delta\phi_4$后u的二维变化情况。图 2（c）是将 2（b）放大至±100°区域的结果。



(a) (b)



(c)

图 2　θ_{AOA}估计“坏点”占比二维变化情况.（a）同时对通道 2 和 3（处于同一条天线基线）加入相位偏差$\Delta\phi_2$和$\Delta\phi_3$，横轴和纵轴分别表示对通道 2 和 3 加入的相位偏差.（b）同时对通道 2 和 4（处于不同天线基线）加入相位偏差$\Delta\phi_2$和$\Delta\phi_4$，横轴和纵轴分别表示对通道 2 和 4 加入的相位偏差.（c）将（b）放大至±100°的图像

Fig.2　2D of θ_{AOA} estimation outlier ratio. (a) Phase deviations applied simultaneously to Channel 2 and Channel 3 (on the same antenna baseline), where the horizontal and vertical axes represent the phase deviations of Channel 2 and Channel 3, respectively. (b) Phase deviations applied simultaneously to Channel 2 and Channel 4 (on different antenna baselines), with the axes representing the phase deviations of Channel 2 and Channel 4. (c) The image from (b) enlarged to ±100°.

从图 2 中可看到，高维度的u数值呈现出较复杂的周期性变化：例如，对处于同一条基线的二维通道间相位偏差，其变化周期为 180°；对处于不同基线的二维通道间相位偏差，其变化周期为 360°。为避免 180°周期变化在高维通道间相位偏差搜索过程中产生的全局多极值问题，需要进行降维搜索。例如，先搜索通道 2 和 4（不同基线）的通道间相位偏差$\Delta\phi_2$和$\Delta\phi_4$，再利用中间变量γ[26]计算通道 3 和 5 的通道间相位偏差$\Delta\phi_3$和$\Delta\phi_5$，

$$\Delta\phi_3=\frac{d_3}{d_2}\cdot\Delta\phi_2-\gamma_{23} \tag{8}$$

$$\Delta\phi_5=\frac{d_5}{d_4}\cdot\Delta\phi_4-\gamma_{45} \tag{9}$$

1.3 JADE 迭代搜索

如图 1（b）和图 2（c）所示，目标函数全局最小值附近的“多台阶”特性会使传统差分进化算法极易在搜索过程中陷入局部极值，无法收敛。所以本文提出基于 JADE[30]算法，采用 p 值引导的变异策略和外部存档机制的方法搜索多通道相位偏差，并迭代进行虚拟半波长基线算法的流星余迹位置估计，直至复合目标函数收敛至全局最小值。图 3 为本文提出的自适应差分进化协同位置估计相位校准

方法流程图，表 1 为相位校准算法参数列表，其具体步骤如下：

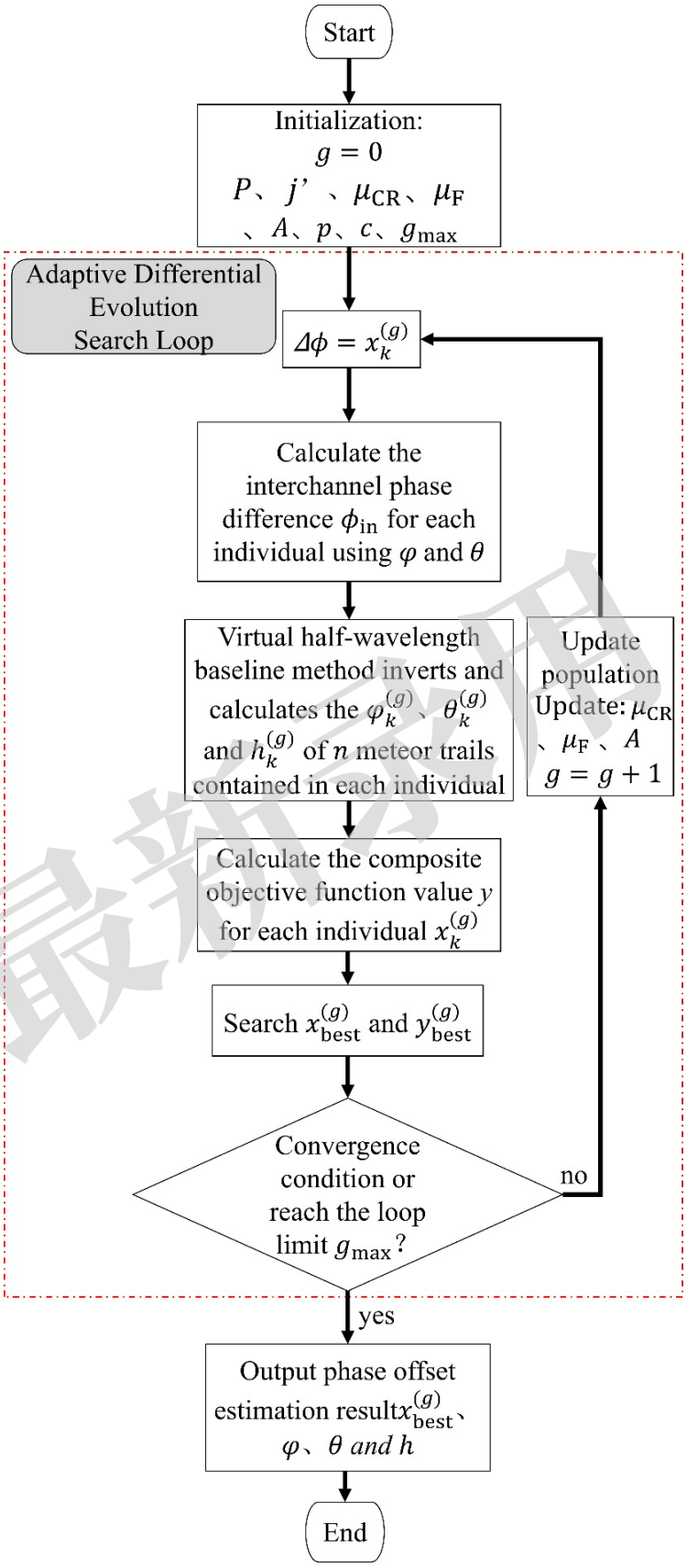


图 3 自适应差分进化协同位置估计相位校准方法流程

Fig.3 Procedure of Adaptive Differential Evolution Collaborative Position Estimation Phase

Calibration Method

表 1 相位校准算法参数列表

Table1 Phase Calibration Algorithm Parameters List

参数	含义
$g \in N$	迭代搜索的次数，每次迭代也称为一代，搜索次数上限为$g_{\max}$
j	维度，通道间相位偏差向量的元素个数。对于单站五通道全天空流星雷达，j=4
x	个体。第g代种群的第k(k=1,2…N_{P})个个体$x_k^{(g)}$为j维相位偏差解空间 S 中的一个多通道相位偏差估计向量，N_{P}为个体的数量。对于单站五通道全天空流星雷达，$x_k^{(g)}$为向量$\left[\Delta\sigma x_{1,k}^{'g},\Delta\sigma x_{2,k}^{'g},\Delta\sigma x_{3,k}^{'g},\Delta\sigma x_{4,k}^{'g}\right]$。其中，个体的元素$\Delta\sigma x_{j,k}^{'g}$($j$=1,2,3,4)为通道 2~5 与通道 1 的相位偏差估计值，$\Phi_{\mathrm{lb}} \le \Delta\sigma x_{j,k}^{'g} \le \Phi_{\mathrm{ub}}$
Φ_{lb}，Φ_{ub}	分别是相位偏差估计值搜索的下界和上界。对于单站五通道全天空流星雷达短基线通道（通道 2 和通道 4），Φ_{lb}=-720°，Φ_{ub}=720°；长基线通道（通道 3 和通道 5），Φ_{lb}=-900°，Φ_{ub}=900°。
P	种群。是N_{P}个个体x的集合
c	学习率
CR_k，F_k	变异因子和交叉概率
$\mu_{\mathrm{CR}}^{(g)}$、$\mu_{\mathrm{F}}^{(g)}$	变异因子均值和交叉概率均值
p	比例系数

步骤一 ：初始化

首先用[$\Phi_{\mathrm{lb}},\Phi_{\mathrm{ub}}$]范围内均匀分布的随机数初始化种群内每个个体$x_k^{(0)}$的第一维元素$\Delta\sigma x_{1,k}^{'0}$和第三维元素$\Delta\sigma x_{3,k}^{'0}$，然后利用公式（8）和（9）初始化第二维元素$\Delta\sigma x_{2,k}^{'0}$和第四维元素$\Delta\sigma x_{4,k}^{'0}$。

最新录用

变异因子均值$\mu_{\mathrm{F}}^{(0)}$、交叉概率均值$\mu_{\mathrm{CR}}^{(0)}$和比例系数p按照 Jingqiao Zhang[30]等研究团队中的标准配置进行初始化。

步骤二 ：迭代搜索

1、计算复合目标函数

计算种群$P^{(g)}$的每个个体$x_k^{(g)}$对应的复合目标函数$y_{x_k}^{(g)}$值。首先计算每个个体对应的所有流星余迹的θ_{AOA}[17]（包括方位角φ和天顶角θ）和高度 h，然后利用公式（2）、（3）和（6）计算每个个体的复合目标函数$y_{x_k}^{(g)}$值。

2、评估搜索是否收敛

首先，搜索种群$P^{(g)}$的复合目标函数最小值$y_{x_k}^{(g)}$以及对应的个体$x_{\mathrm{best}}^{(g)}$

$$\left(x_{\mathrm{best}}^{(g)}, y_{x_k}^{(g)}\right) = \underset{x_k^{(g)}, 1\le k\le N_P}{argmin}\ y_{x_k}^{(g)}, \quad g \in N \tag{10}$$

同时将复合目标函数按照数值大小升序排列，确定排名前100p%（p为比例系数）的个体组成当代种群$P^{(g)}$的优秀个体集合，并从该集合中随机挑选的一个个体$x_{j,\mathrm{pbest}}^{(g)}$。

然后，判断本次搜索是否收敛：设定收敛门限值H，若第 g 代搜索中所有个体的y集合的标准差满足以下条件

$$Std(\{y_{x_k}^{(g)}\}_{k=1}^{N_P}) < H \tag{11}$$

则提前结束搜索[42]；否则继续迭代搜索，直至到达搜索次数上限$g_{\max}$。

3、更新种群

采用自适应差分进化方法[30]更新种群$P^{(g)}$，用于下一代搜索。

3.1、变异：

首先，利用$x_{j,\mathrm{pbest}}^{(g)}$对种群$P^{(g)}$每个个体$x_k^{(g)}$的第一维和第三维元素进行变异操作[16]，生成变异向量$v_k^{(g+1)}$的第一维$\Delta\sigma v'^0_{1,k}$和第三维元素$\Delta\sigma v'^0_{3,k}$，并采用边界反射法[31]修正超出$[\Phi_{\mathrm{lb}}, \Phi_{\mathrm{ub}}]$范围的元素。然后，利用公式（8）和（9）计算变异向量的第二维元素$\Delta\sigma v'^0_{2,k}$和第四维元素$\Delta\sigma v'^0_{4,k}$。

最新录用

3.2、交叉：

利用公式（12）和（13）对每个个体$x_k^{(g)}$和对应的变异向量$v_k^{(g+1)}$进行交叉操作[20]，生成试验个体$u_k^{(g+1)}$。

$$\begin{cases}\Delta\sigma u_{1,k}^{'g+1}=\Delta\sigma v_{1,k}^{'g+1},\Delta\sigma u_{2,k}^{'g+1}=\Delta\sigma v_{2,k}^{'g+1} & \text{若 } U_1(0,1)<CR_k\text{或}j=j_{\text{rand}},\\ \Delta\sigma u_{1,k}^{'g+1}=\Delta\sigma x_{1,k}^{'g},\Delta\sigma u_{2,k}^{'g+1}=\Delta\sigma x_{2,k}^{'g} & \text{若 } U_1(0,1)\geq CR_k\text{且}j\neq j_{\text{rand}}\end{cases},k=1,\ldots N_P \quad (12)$$

$$\begin{cases}\Delta\sigma u_{3,k}^{'g+1}=\Delta\sigma v_{3,k}^{'g+1},\Delta\sigma u_{4,k}^{'g+1}=\Delta\sigma v_{4,k}^{'g+1} & \text{若 } U_2(0,1)<CR_k\text{或}j=j_{\text{rand}},\\ \Delta\sigma u_{3,k}^{'g+1}=\Delta\sigma x_{3,k}^{'g},\Delta\sigma u_{4,k}^{'g+1}=\Delta\sigma x_{4,k}^{'g} & \text{若 } U_2(0,1)\geq CR_k\text{且}j\neq j_{\text{rand}}\end{cases},k=1,\ldots,N_P \quad (13)$$

其中，$U_1(0,1)$和$U_2(0,1)$是在[0,1]上均匀分布的随机数，j_{rand}是在{1,3}中随机选取的数值。

3.3、个体筛选与保存：

按照 Jingqiao Zhang[30]等研究团队的方法对每对$x_k^{(g)}$和$u_k^{(g+1)}$进行筛选，生成新种群$P^{(g+1)}$。然后将$y_{\text{best}}^{(g)}$、$x_{\text{best}}^{(g)}$、$\mu_{\text{CR}}^{(g)}$、$\mu_{\text{F}}^{(g)}$等参数保存，进入下一次迭代搜索。

步骤 3 ：结果输出

输出收敛时的相位偏差估计结果$x_{\text{best}}^{(g)}$，以及同步迭代优化后的流星余迹θ_{AOA}（包括方位角φ和天顶角θ）和高度 h。

2 相位校准算法的验证与分析

首先，我们利用模拟仿真数据检验相位校准算法的收敛特性和准确性。

我们选取了中科院空间中心廊坊站流星雷达 2018 年 11 月 12 日一天的流星余迹观测数据（流星余迹数量 18318 颗），根据公式（1）模拟产生流星雷达天线之间的相位差ϕ_{in}，然后利用范围在±720°和±900°的均匀分布随机数，分别独立生成通道间相位偏差$\Delta\phi_2$和$\Delta\phi_4$，以及$\Delta\phi_3$和$\Delta\phi_5$。噪声ε则利用零均值、RMS（Root Mean Square）分别为 5°、10°、15°和 20° 的高斯分布随机数产生。

在相位校准的仿真模拟过程中，算法的参数配置详见表 2。

表 2 相位校准算法的预设参数列表

最新录用

Table2 Preset parameters of the phase calibration algorithm

参数	取值
种群大小N_P	40
最大迭代代数$g_{\max}$	250
DE 搜索维度j'	2
学习率c	0.1
比例系数p	0.1
变异因子均值$\mu_{\mathrm{F}}^{(0)}$	0.5
交叉概率均值$\mu_{\mathrm{CR}}^{(0)}$	0.5
收敛门限H	0.06

令[$\Delta\phi_2$,$\Delta\phi_3$,$\Delta\phi_4$,$\Delta\phi_5$]=[536.46°,667.49°,-620.85°,-441.95°]，噪声ε的 RMS 值为 10°，单次相位校准的仿真过程及结果如下。

图 4 展示了本次仿真的 y 值变化曲线和y集合的标准差变化曲线。从图 4（a）中可以看出由于在复合目标函数中增加了δ_h分量，y 数值在搜索前期迅速下降；在搜索范围进入全局最小值附近（约第 30 代）之后，y 数值下降趋势变缓，w_1=0，进入第二阶段搜索；通过采用基于 JADE 的搜索策略，搜索未陷入局部极值，并最终在第 188 代收敛，收敛时$Std(\{y_{x_k}^{(g)}\}_{k=1}^{N_P})$=0.047 如图 4（b）所示。本次仿真的相位偏差估计结果为 [-544.04°,-51.78°,-620.65°,-82.24°]，其中设定值与估计值相差[1080.50°,719.27°,-0.20°,-359.71°]，表明通过降维搜索避免了目标函数 180°周期变化引入的估计误差。

图 5 为本次仿真收敛时，种群四个维度所有个体的数值分布。图中的红色虚线为仿真时设定的通道间相位偏差值（折叠至±π之间），五角星标注了最终的相位偏差估计结果（最优个体）。本次仿真通道间相位偏差估计误差的最大值为 0.73°（忽略 2nπ的折叠）。

最新录用

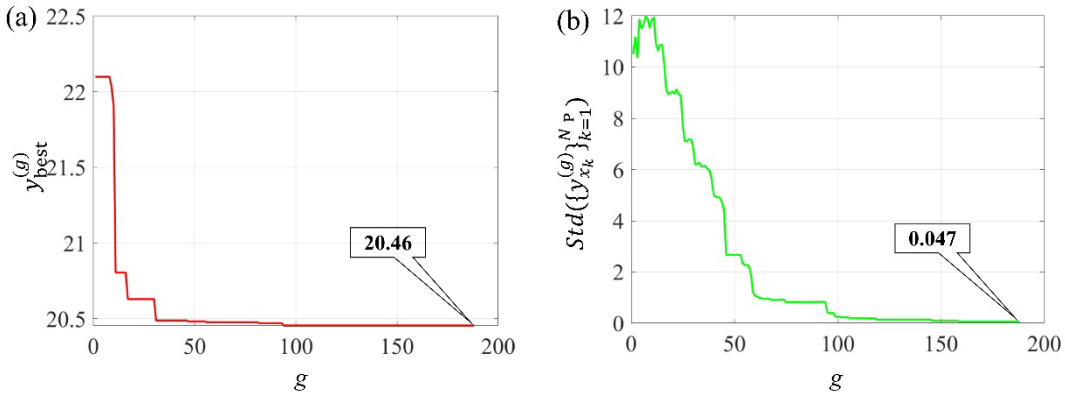


图 4(a)最优 y 值变化曲线.(b)y集合的标准差变化曲线

Fig.4 (a) Optimal y value variation curve. (b) Standard deviation variation curve of the y set.

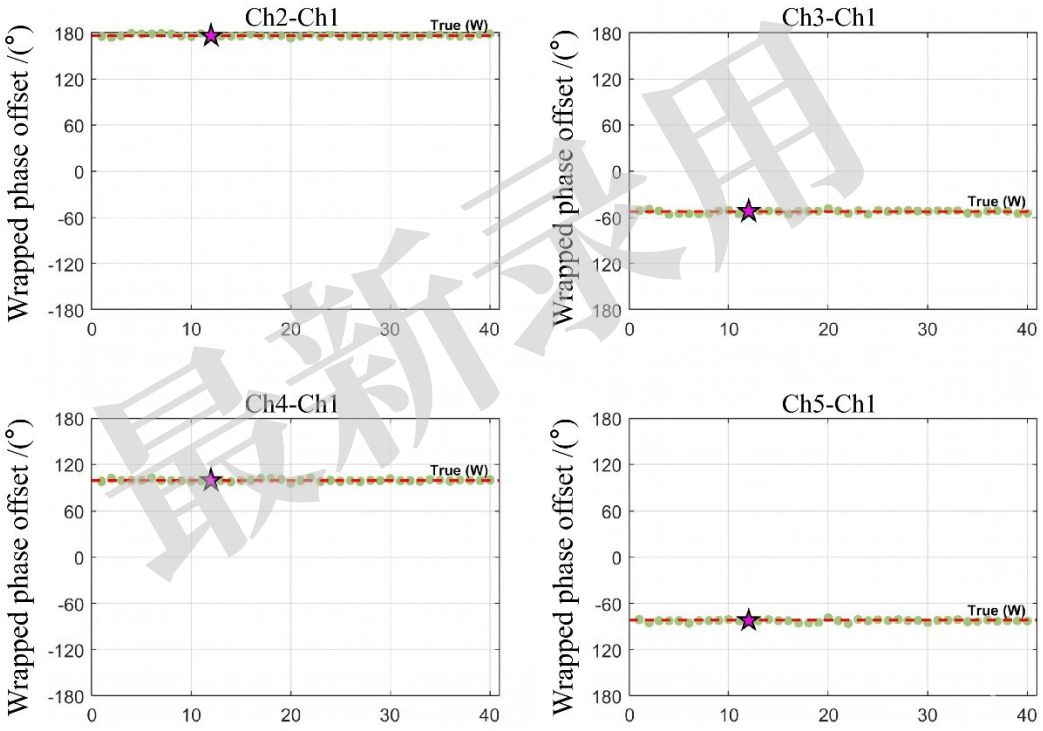


图 5 相位校准算法收敛时，种群四个维度的数值分布.其中横轴表示种群中的个体，红色虚线为仿真时设定的通道间相位偏差值（折叠至±π之间），五角星表示最终的相位偏差估计结果

Fig.5 Numerical distribution of the population across four dimensions at the convergence of the phase calibration algorithm. The horizontal axis represents the individuals in the population,the red dashed lines indicate the preset inter-channel phase deviations (wrapped within ±π), and the pentagrams represent the final phase deviation estimates.

在噪声 RMS 值为 5°、10°、15°和 20° 的情况下，分别开展N=500 次独立的

最新录用

相位校准仿真。图 7（a）、（b）、（c）、（d）为四个通道间相位偏差估计误差值集合（4×N=2000 个数据点）的密度直方图。当噪声 RMS 值为 5°、10°、15° 和 20°时，校准算法的平均偏差分别为 0.07°、-0.03°、-0.11°和-0.20° ，RMSE 分别为 0.43°、0.48°、0.78°和 1.18° 。

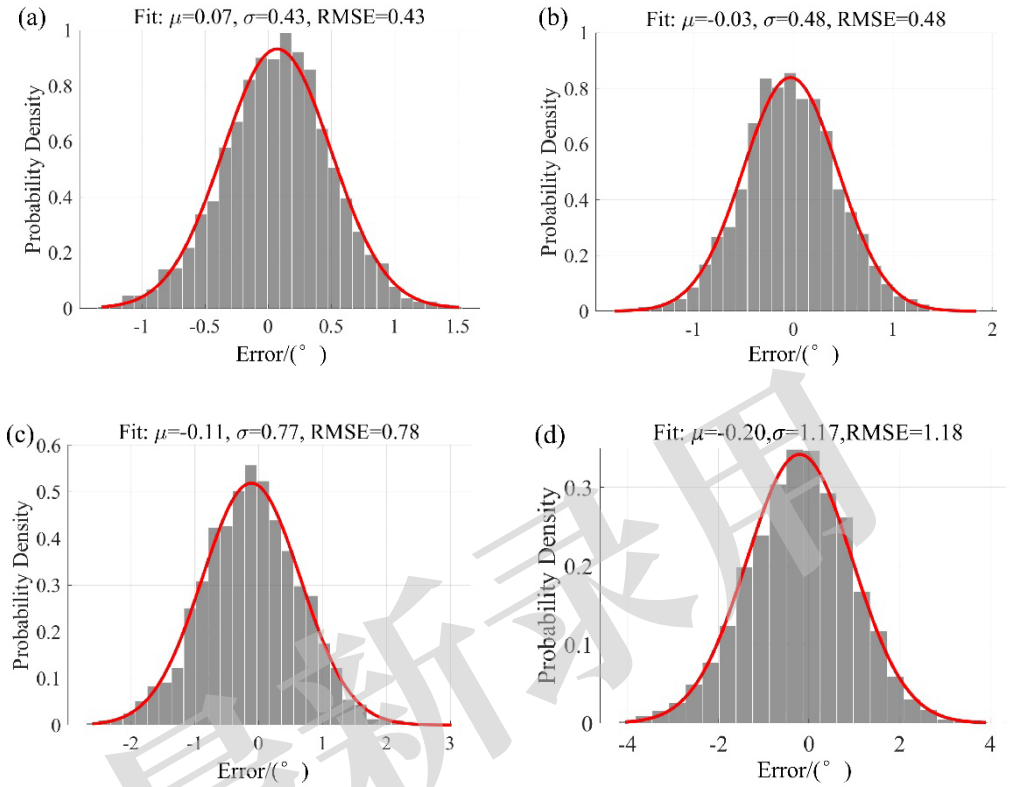


图 6 .不同噪声水平下的相位校准误差密度直方图（流星余迹个数 18318 颗）. (a), (b), (c),(d) 分别为噪声 RMS 为 5° 、 10° 、 15° 和 20° 时相位偏差估计误差的密度直方图

Fig.6 Histogram of phase calibration Error density at different noise levels(Number of meteor trails: 18,318). (a), (b), (c) , (d) Density histograms of phase deviation estimation errors for noise RMS values of 5° ,10° ,15° and 20° .

图 7 展示了本文提出的相位校准方法在不同流星计数（1504 颗、5000 颗和 10000 颗）和不同相位 RMS 噪声条件下与 Holdsworth[24]的内校准方法的相位校准结果对比情况。本文提出的相位校准方法在流星计数不低于 5000 颗、相位噪声 RMS 值不超过 15° 时，校准精度优于传统的内校准方法，尤其在流星计数不低于 10000 颗时，校准精度在 1° 以内。而在流星计数低于 2000 颗和相位 RMS 噪声为 20° 的极端情况下，校准精度不及传统的内校准方法。

最新录用

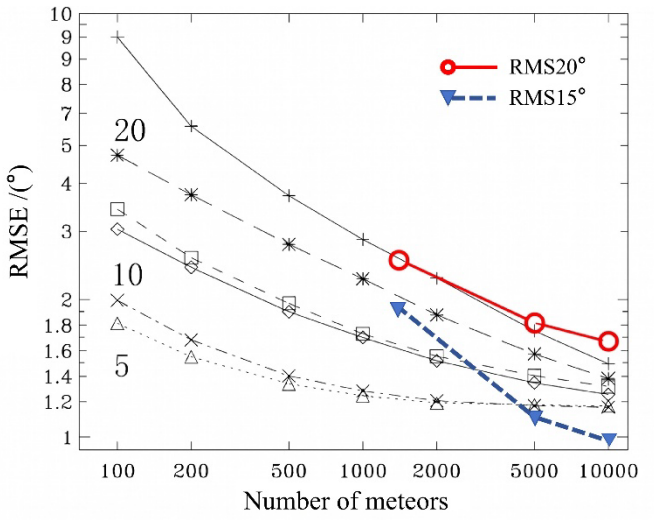


图 7 .本文提出的相位校准算法与传统内校准算法的精度对比. 图中倒三角蓝色粗虚线和圆环红色粗实线分别为本文的校准算法在相位噪声 RMS 为 15° 和 20°条件下的 RMSE（独立运行 500 次仿真），黑白结果为 Holdsworth 内校准方法的 RMSE[24]

Fig.7 The phase calibration algorithm proposed in this paper is compared with the accuracy of traditional internal calibration algorithms. In the figure, the inverted triangle blue thick dashed line and the ring red thick solid line represent the RMSE of the calibration algorithm in this paper under phase noise RMS conditions of 15° and 20° (based on 500 independent simulations), respectively, while the black and white results correspond to the RMSE of the Holdsworth internal calibration method.

我们利用 2011 年 9 月 11 日~9 月 17 日流星雷达的连续观测数据，仿真模拟雷达通道轻微故障，检验相位校准算法的有效性与稳定性。表 3 给出了一周内流星雷达观测数据某一或几个通道之间相位差附加固定的相位偏差值。图 8 为算法连续校准得到的通道间相位偏差估计误差值。由图 8 的结果可见，在雷达通道出现轻微故障导致通道间相位偏差不断变化的情况下，本文提出的校准算法精度均稳定保持在 1° 以内。

表 3 对观测数据通道间的相位差附加固定的相位偏差值

Table3 Add a fixed phase offset to the phase difference between observation data channels

	11	12	13	14	15	16	17
$\phi_{in2}^{'}$	+2°	+3°	-1°	+5°			-3°
$\phi_{in3}^{'}$		-5°	+2°	-3°	+6°	-5°	
$\phi_{in4}^{'}$			-6°	-2°		-1°	
$\phi_{in5}^{'}$				+4°	-3°	+2°	+5°

最新录用

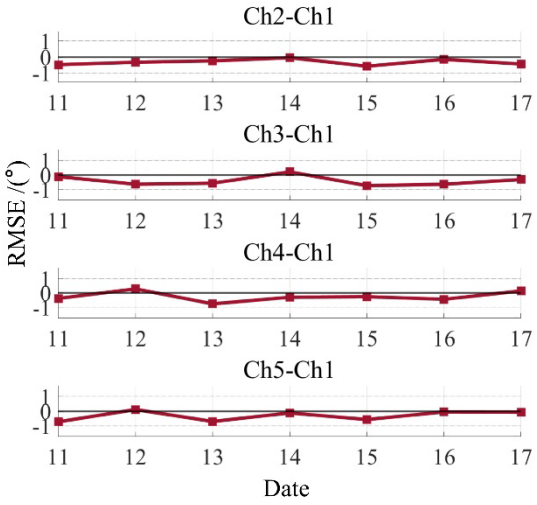
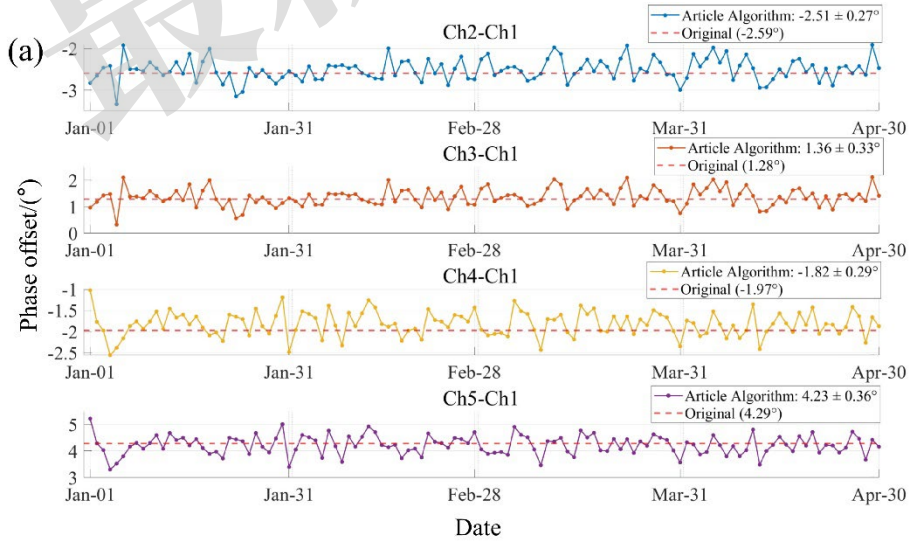


图 8 .流星雷达连续观测数据（2011.9.11~9.17）的相位校准误差值

Fig.8 Phase calibration error values of meteor radar continuous observation data (2011.9.11~9.17).

廊坊站流星雷达于 2010 年 7 月初开始正式观测。我们利用廊坊站流星雷达 2011 年 1~4 月的相位漂移监测结果，进一步检验相位校准算法的长期适用性。图 9（a）对比了雷达原有的相位校准算法与本文提出的相位校准算法的校准结果，图 9（b）给出了对应时段的日流星计数。表 4 统计了两种相位校准方法之间的平均偏差和标准差。从上述结果中可看出，两种相位校准算法具有较高的一致性，校准结果之间的最大偏差不超过 1°，平均偏差绝对值小于 0.1°，标准差小于 0.4°。另外，相位漂移监测结果表明雷达系统在 4 个月内的通道间相位偏差波动较小，标准差在 0.4° 以内。



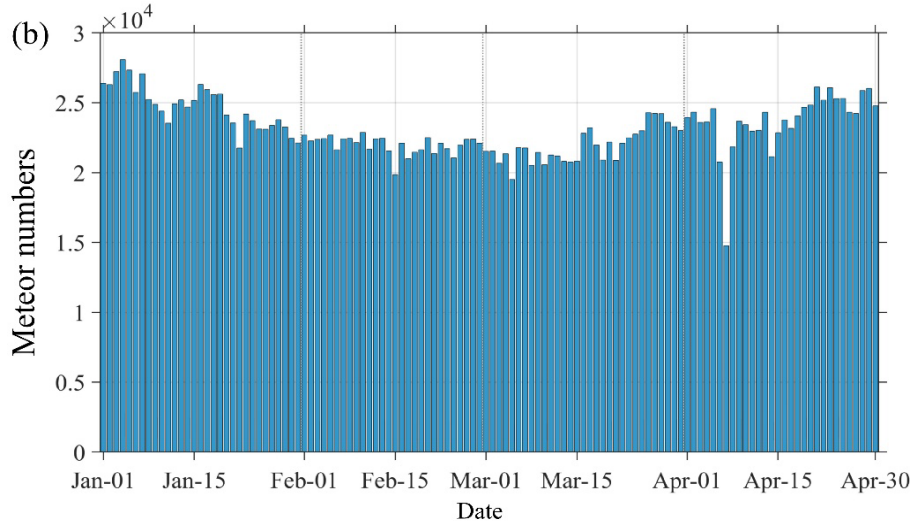


图 9 .长期相位漂移监测结果与日流星计数.（a）中虚线为流星雷达原有的相位校准结果，实线为本文提出的相位校准算法估计结果;（b）为 2011 年 1~4 月的日流星计数

Fig.9 Long-term phase drift monitoring results and daily meteor counts. (a) In the middle, the dashed line represents the original phase calibration results of the meteor radar, and the solid line represents the estimation results of the phase calibration algorithm proposed in this paper; (b) Daily meteor counts from January to April 2011.

表 4 两种相位校准方法的估计结果偏差统计

Table4 Statistical Parameters of Phase Calibration Errors in Observational Data

	201101	201102	201103	201104
平均偏差	0.02°	0.08°	0.08°	0.07°
标准差	0.37°	0.28°	0.32°	0.31°
RMSE	0.37°	0.29°	0.33°	0.32°

3 结论

本文提出了一种基于自适应差分进化协同位置估计的流星雷达多通道相位内校准方法。该方法通过构建基于θ_{AOA}估计“坏点”占比、流星高度分布等统计特性的复合目标函数，并针对高维目标函数存在全局多极值，目标函数极值附近呈现“多台阶”等特性，采用可变步长的 JADE 搜索并协同流星余迹到达角与高度信息迭代估计的相位校准策略，结合虚拟半波长基线法提升θ_{AOA}反演精度，并利用中间变量γ降低搜索维度，高效获取精确的系统相位校准结果与流星余迹位置估计结果。

本文提出的相位校准方法在流星计数不低于 5000 颗、相位噪声 RMS 值不

超过 15°时，校准精度优于传统的内校准方法，尤其在流星计数不低于 10000 颗时，校准精度优于 1°。对流星雷达观测数据的分析结果表明，70%以上的流星回波相位 RMS 噪声在 15°以内[15]，日均观测流星余迹个数不低于 10000 颗（见图 9（b））。因此本文提出的相位校准算法适用于目前大多数单站流星雷达系统的日常校准维护，且校准精度可达到 1°以内（每日校准一次）。此外，通过对不同流星计数、相位 RMS 噪声条件和雷达通道轻微故障的仿真模拟，以及对 4 个月流星雷达实测数据的相位漂移监测，均初步验证了该算法在真实大气环境、雷达硬件漂移、复杂噪声等实际场景下的有效性与稳定性。相对于外校准方法（利用一个月的飞机回波及 ADS-B 积累数据，校准精度可达~0.5°），本文提出的校准方法不依赖外部信源，计算复杂度低，效费比更高，更适合于雷达系统通道特性的长期持续监测。另一方面，本文提出的目标函数设计思路，自适应差分进化搜索协同位置估计，迭代优化多通道相位偏差估计的校准方法，也可进一步推广应用于阵列雷达、干涉测量及其他多通道无线电相位测量系统，为高精度波前重构与方位估计提供一种全新的、高精度与高效费比的技术解决方案。

另外后续还需进一步研究，通过采用动态双种群策略[38]，提高稀疏流星条件下搜索算法的全局勘探能力，并通过筛选高信噪比流星余迹与采用自适应维度扰动机制（如自适应柯西扰动[36]机制），增强高噪声环境下算法的寻优精度，提升算法在低流星计数、高噪声条件等极端场景下的校准精度与鲁棒性。

最新录用

参考文献

[1] HOCKING W K, FULLER B, VANDEPEER B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(2/3): 155-169

[2] HOLDSWORTH D A, REID I M, CERVERA M A. Buckland park all-sky interferometric meteor radar[J]. *Radio Science*, 2004, **39**(5): RS5009

[3] CERVERA M A, REID I M. Comparison of simultaneous wind measurements using colocated VHF meteor radar and MF spaced antenna radar systems[J]. *Radio Science*, 1995, **30**(4): 1245-1261

[4] STOBER G, CHAU J L, VIERINEN J, *et al*. Retrieving horizontally resolved wind fields using multi-static meteor radar observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(8): 4891-4907

[5] MARINO J, RAINVILLE N, MONACO J, et al. Meteor radar phase interferometry calibration with aircraft observations and ADS-B integration[C]//2024 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). Boulder: IEEE, 2024: 35-36

[6] QIAO Z S, LIU A Z, STOBER G, *et al*. Chilean observation network de meteor radars (CONDOR):

multi-static system configuration and wind comparison with co-located lidar[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2025, **18**(5): 1091-1104

[7] SPARGO A J, REID I M, MACKINNON A D. Multistatic meteor radar observations of gravity-wave-tidal interaction over southern Australia[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**(9): 4791-4812

[8] YI Wen, CHEN Jinsong, MA Chunbo, *et al*. Observation of upper atmospheric temperature by Kunming all-sky meteor radar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(8): 2423-2432 (易稳, 陈金松, 马春波, 等. 昆明全天空流星雷达观测中高层大气温度[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(8): 2423-2432)

[9] YI Wen, XUE Xianghui, ZENG Jie, *et al*. Observation of MLT region winds and tides by the USTC Mengcheng meteor radar[J]. *JUSTC*, 2023, **53**(5): 0501

[10] LU Maolin, YI Wen, ZENG Jie, *et al*. Two-dimensional wind field observation based on multistatic meteor radars in central and eastern China[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(3): 329-343 (鲁茂林, 易稳, 曾洁, 等. 基于中国中东部多站流星雷达的二维风场观测研究[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2024, **55**(3): 329-343)

[11] HAO Xiaojing, WANG Libin, MA Yu, *et al*. Comparative analysis of horizontal wind observation in 70~100 km nearspace by meteor radar and medium frequency radar[J]. *Aerospace Technology*, 2023(1): 43-52 (郝晓静, 王立斌, 马玉, 等. 流星雷达与中频雷达探测 70～100 km 临近空间水平风场对比分析[J]. 空天技术, 2023(1): 43-52)

[12] JONES J, WEBSTER A R, HOCKING W K. An improved interferometer design for use with meteor radars[J]. *Radio Science*, 1998, **33**(1): 55-65

[13] HOLDSWORTH D A. Angle of arrival estimation for all-sky interferometric meteor radar systems[J]. *Radio Science*, 2005, **40**(6): 1-8

[14] YOUNGER J P, REID I M. Interferometer angle-of-arrival determination using precalculated phases[J]. *Radio Science*, 2017, **52**(9): 1058-1066

[15] KOROTYSHKIN D. High-precision estimation of meteor radio echo angle of arrival over long antenna baselines under strong phase ambiguity[J]. *Advances in Space Research*, 2025, **75**(11): 8374-8390

[16] SPARGO A J. Studies of the MLT/I Using Multistatic Meteor Radar[D]. Adelaide: University of Adelaide, 2021

[17] KOROTYSHKIN D. Calibration of the phase interferometer of a meteor radar using ADS-B air traffic monitoring data: methodology and experimental validation[J]. *Advances in Space Research*, 2025, **76**(2): 968-984

[18] VALENTIC T A, AVERY J P, AVERY S K, *et al*. Self-survey calibration of meteor radar antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(3): 524-531

[19] CHAU J L, HYSELL D L, KUYENG K M, *et al*. Phase calibration approaches for radar interferometry and imaging configurations: equatorial spread F results[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, **26**(8): 2333-2343

[20] JIN Y J, CHEN X L, HUANG S T, *et al*. Dynamic calibration method of multichannel amplitude and phase consistency in meteor radar[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(2): 331

[21] PALMER R D, VANGAL S, LARSEN M F, *et al*. Phase calibration of VHF spatial interferometry radars using stellar sources[J]. *Radio Science*, 1996, **31**(1): 147-156

[22] CHAU J L, RENKWITZ T, STOBER G, *et al*. MAARSY multiple receiver phase calibration using radio sources[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, **118**: 55-63

最新录用

[23] CHEN J S, RÖTTGER J, CHU Y H. System phase calibration of VHF spaced antennas using the echoes of aircraft and incorporating the frequency domain interferometry technique[J]. *Radio Science*, 2002, **37**(5): 1-13

[24] HOLDSWORTH D A, TSUTSUMI M, REID I M, *et al.* Interferometric meteor radar phase calibration using meteor echoes[J]. *Radio Science*, 2004, **39**(5): 1-12

[25] CHEN Xiaobo, WAN Weixing, NING Baiqi. Phase bias estimation and calibration of meteor radar system[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2007, **27**(5): 420-424 (陈晓博, 万卫星, 宁百齐. 流星雷达系统相位差偏差的估计和校正[J]. 空间科学学报, 2007, **27**(5): 420-424)

[26] SHEN Jincheng, NING Baiqi, WAN Weixing, *et al*. Research on observing and analyzing phase differences of all-sky meteor radar[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2012, **32**(1): 75-84 (沈金成, 宁百齐, 万卫星, 等. 全天空流星雷达相位差监测分析方法研究[J]. 空间科学学报, 2012, **32**(1): 75-84)

[27] CHAU J L, CLAHSEN M. Empirical phase calibration for multistatic specular meteor radars using a beamforming approach[J]. *Radio Science*, 2019, **54**(1): 60-71

[28] STORN R, PRICE K. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, **11**(4): 341-359

[29] BREST J, GREINER S, BOSKOVIC B, *et al*. Self-adapting control parameters in differential evolution: a comparative study on numerical benchmark problems[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2006, **10**(6): 646-657

[30] ZHANG J Q, SANDERSON A C. JADE: adaptive differential evolution with optional external archive[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009, **13**(5): 945-958

[31] BOKS R, KONONOVA A V, WANG H. Quantifying the impact of boundary constraint handling methods on differential evolution[C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. Lille: ACM, 2021: 1199-1207

[32] ZHAN Z H, WANG Z J, JIN H, *et al*. Adaptive distributed differential evolution[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, **50**(11): 4633-4647

[33] DUAN M J, YANG H Y, WANG S P, *et al*. Self-adaptive dual-strategy differential evolution algorithm[J]. *PLoS One*, 2019, **14**(10): e0222706

[34] CHENG L Z, ZHOU J X, HU X, *et al*. Adaptive differential evolution with fitness-based crossover rate for global numerical optimization[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2024, **10**(1): 551-576

[35] STANOVOV V, SEMENKIN E. Success rate-based adaptive differential evolution L-SRTDE for CEC 2024 competition[C]//2024 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Yokohama: IEEE, 2024: 1-8

[36] CHOI T J, AN Y J. Adaptive dimension-wise Cauchy perturbation for enhanced differential evolution optimization[J]. *AIMS Mathematics*, 2026, **11**(1): 734-766

[37] TANABE R, FUKUNAGA A S. Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction[C]//2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Beijing: IEEE, 2014: 1658-1665

[38] MACHAČEK J, SIEGEL S, ZACHERT H. DEEM-Differential evolution with elitism and multi-populations[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2025, **92**: 101818

[39] TIAN C X, HU X, LIU A Z, *et al*. Diurnal and seasonal variability of short-period gravity waves at ~40° N using meteor radar wind observations[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(3): 1341-1355

[40] TIAN C X, HU X, LIU Y R, *et al*. Seasonal variations of high-frequency gravity wave

最新版本用

momentum fluxes and their forcing toward zonal winds in the mesosphere and lower thermosphere over Langfang, China (39.4° N, 116.7° E)[J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(11): 1253

[41] LEE W, LEE C, KIM J H, *et al*. A modeling analysis of the apparent linear relation between mesospheric temperatures and meteor height distributions measured by a meteor radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(1): e2021JA029812

[42] MAI Weijie, LIU Weili, ZHONG Jinghui. Self-adaptive differential evolution algorithm based on population state information[J]. Journal on Communications, 2023, **44**(6): 34-46 (麦伟杰, 刘伟莉, 钟竞辉. 基于种群状态信息的自适应差分进化算法[J]. 通信学报, 2023, **44**(6): 34-46)



吴永昆 男，1999 年 11 月出生于山东省青岛市，现就读于中国科学院国家空间科学中心电子信息专业，主要研究方向为临近空间环境探测研究技术。E-mail:1079300313@qq.com



徐轻尘（通信作者）男，1979 年出生，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，硕士生导师，主要研究方向为临近空间环境探测与研究。E-mail: xqc@nssc.ac.cn

最新录用