

多星融合积雪深度反演研究

黄靖

皖江工学院土木工程学院

DOI:10.12238/jpm.v6i4.7924

[摘要] 针对利用全球卫星导航系统反射信号干涉测量（GPS-IR）反演雪深时单星反演精度不足的问题，本文提出一种基于小波分析和最小二乘支持向量机（LS-SVM）的多星融合反演模型。通过小波多尺度分解技术替代传统低阶多项式方法，有效分离卫星反射信号，抑制异常跳变，单星反演结果与参考雪深的相关系数均大于 0.547，较传统方法提升至少 8.9%。进一步引入 LS-SVM 融合多颗卫星数据，利用其处理小样本和非线性问题的优势，构建多星互补模型。实验采用美国 PBO 计划 P101 测站数据，结果表明：当融合卫星数量达到 6 颗时，反演结果与参考值的相关系数提升至 0.948，均方根误差（RMSE）低于 0.035，显著优于单星反演。研究发现，多星融合能综合不同方位角的地表积雪信息，缓解单星反演的局部偏差，且卫星组合数超过 5 颗后精度趋于稳定。该研究为复杂环境下雪深连续监测提供了新思路，未来可结合星载与地基 GNSS-R 数据，并纳入地表温度等变量以进一步提升模型适用性。

[关键词] GPS-IR；雪深；信噪比；小波分析；最小二乘支持向量机

Study on the deep inversion of multi-star fusion snow cover

Huang Jing

School of Civil Engineering, Wanjiang Institute of Technology

[Abstract] In view of the insufficient accuracy of single-star inversion, this paper proposes a multi-star fusion inversion model based on wavelet analysis and least-squares support vector machine (LS-SVM). By replacing the traditional low-order polynomial method through the wavelet multi-scale decomposition technology, the satellite reflection signal is effectively separated and the abnormal jump is suppressed. The correlation coefficient between the single-star inversion result and the reference snow depth is greater than 0.547, which is at least 8.9% higher compared with the traditional method. Further introduce LS-SVM to fuse multiple satellite data and use its advantages of handling small samples and nonlinear problems to construct a multi-star complementary model. In the experiment, the data of PBO Program P101 are used. The results show that when the number of fusion satellites reaches 6, the correlation coefficient between the inversion result and the reference value increases to 0.948, and the root mean square error (RMSE) is lower than 0.035, which is significantly better than the single star inversion. It is found that multi-star fusion can synthesize the surface snow information at different azimuth angles to alleviate the local deviation of single-star inversion, and the accuracy is stable after exceeding 5 satellites. This study provides a new idea for continuous monitoring of snow depth in complex environments. In the future, satellite load and ground-based GNSS-R data can be combined, and variables such as surface temperature can be included to further improve the applicability of the model.

[Key words] GPS-IR; snow depth; signal to noise ratio; wavelet analysis; least squares support vector machine

引言

雪水储存了全球约 17% 的淡水资源，其动态变化通过调节地表水蒸发与大气循环深刻影响着气候系统，因此积雪厚度的精准监测对气候预测与生态研究具有重要意义。然而，现有技术难以实现高精度、实时化的积雪监测需求。近年来，全球导航卫星系统反射信号干涉测量 (GNSS-IR) 技术凭借其低成本、全天候等优势，在雪深、土壤湿度等环境参数反演中展现出潜力。自 Larson 团队于 2008 年首次将 GNSS-IR 应用于土壤湿度监测并提出技术框架以来，相关研究逐步拓展至积雪领域，包括多频信号融合 (Yu 等, 2021)、天线优化 (Chen 等, 2017) 及地表特性分析 (Ozeki 等, 2015) 等。但现有研究仍存在显著局限：一方面，传统低阶多项式法在信号分离中易受阶数选择和局部噪声干扰，导致反演精度不足；另一方面，单星观测受限于方位角覆盖，难以克服地表异质性（如植被、地形）对多路径效应的影响，且信噪比 (SNR) 的非平稳特征进一步加剧了反演结果的不确定性。

针对上述问题，本文提出一种融合小波分析与最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 的多星协同反演框架。通过小波多尺度分解替代传统信号分离方法，抑制异常跳变并提升单星反演稳健性；同时，利用 LS-SVM 在小样本、非线性建模中的优势，集成多星观测数据以构建互补模型，突破单星视角局限。该方法不仅优化了信号处理流程，还为复杂地表环境下的连续雪深监测提供了新思路。

1 基于小波分析和 LS-SVM 的积雪厚度多星融合反演模型

1.1 雪深反演原理

GPS 接收机不仅接收直接来自卫星的直射信号，也接收到接收机附近地形或物体反射的卫星信号，当接收机同时接收到直射信号和反射信号时，两种信号会产生干涉形成合成信号，形成多路径效应^[13]，如图 1 所示。 A_c 代表 SNR 观测值， A_d 代表直射信号振幅， φ_d 代表卫星直射信号相位， A_r 代表反射信号振幅。 σ 代表直射信号相位差。 ϕ 代表反射信号相位。

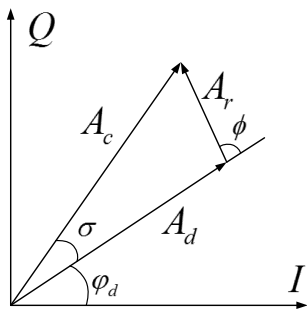


图 1 多路径效应示意图

GPS-IR 技术利用多路径效应来监测积雪的深度。直射信号

和反射信号可表示为：

$$\dot{SNR} = \dot{S}_d(0) + \dot{S}_m(\phi) \quad (1)$$

式中， SNR 代表信噪比， S_d 代表直射信号分量，‘0’

代表初始相位， S_m 代表反射信号分量。已有研究表明，SNR

观测值与 ϕ 之间存在一种正弦或余弦关系，而且雪深仅与多路径反射信号相关，多路径反射信号与卫星高度角正弦值之间存在某一固定频率的正弦（或余弦）函数关系，表示为^[14]：

$$SNR_m = A_r \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin\theta + \phi\right) \quad (2)$$

式中， SNR_m 代表反射信号分量， λ 代表波长， h 代表天线距地面高。令 $\frac{2h}{\lambda} = f$ 。结合式 2， h 可由频率 f 和波长 λ 解得，频率 f 可以由 Lomb-Scargle 频谱分析得到。本文采用的是 L2 载波的 SNR ，故波长为 0.2442 m。基于以上分析，卫星反射信号分离的好坏对于雪深反演的精度至关重要，SNR 数据量较少的情况下，传统低阶多项式会出现异常值，局部拟合不完整的现象。因此，本文利用小波分析分离卫星反射信号。

1.2 小波分析多尺度分解原理

小波分析通过小波基函数伸缩平移运算对原始信号逐步进行多尺度细化^[15]。小波基函数是通过一组有限长不断衰减的母小波经过缩放、平移得到。采用小波进行多层分解时，分离出来的低频信号的稳定性以及平滑性能较好，能够表现出信号的趋势^[16-17]。利用小波进行分解为：

$$Wf(a,b) = \int f \cdot \varphi(a,b)(t) dt \quad (3)$$

式中， a 为尺度因子， b 为平移因子， $\varphi(a,b)(t)$ 是有小波母函数生成的连续小波。则相应利用 $Wf(a,b)$ 重构 $f(t)$ 为：

$$f(t) = C_\varphi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Wf(a,b)}{a^2} \varphi(a,b)(t) da db \quad (4)$$

式中， C_φ 为小波基函数。可见， $f(t)$ 即为信号在多层分离出来重构的低频分量经过实验表明 coif5 小波函数对 SNR 信号进行分解重构效果良好，因此，本文选择 coif5 小波对卫星反射信号进行分解重构。

1.3 多星融合反演原理

设 GPS 卫星雪深反演结果数据集 X 为：

$$X = \begin{pmatrix} X_1^1 & X_1^2 & X_1^3 & \dots & X_1^N \\ X_2^1 & X_2^2 & X_2^3 & \dots & X_2^N \\ X_3^1 & X_3^2 & X_3^3 & \dots & X_3^N \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_M^1 & X_M^2 & X_M^3 & \dots & X_M^N \end{pmatrix} \quad (N=1, 2, 3, \dots; M=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

式中, N 代表年积日, M 代表卫星个数。雪深参考值 Y :
 $Y = Y^1, Y^2, Y^3, \dots, Y^N$ (6)

X 作为 M 维输入训练向量集, Y 作为 1 维输出训练向量集。LS-SVM 估计的回归问题可等价于最小化下列泛函数^[12]。

$$\begin{cases} \min Q(w, e) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2 \\ s.t. Y^N = W^T \varphi(X_M^N) + b + e_i (i=1, 2, 3, \dots, I) \end{cases} \quad (7)$$

式中, γ 表示正则化参数, e_i 表示拟合误差, $\varphi(\cdot)$ 表示核函数, w 表示权系数向量, b 表示阈值。进而, 得到 LS-SVM 的回归函数为:

$$y = \sum_{i=1}^N a_i K(X_M^N, X) + b \quad (8)$$

式中, X_M^N 为训练样本, X 为测试样本。由于 LS-SVM 性能的优劣很大程度上取决于核函数 $k()$ 、核参数 σ 和正则化参数 γ 的最优选取。考虑到径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 能很好地反应模型的复杂程度, 普适性较好。因此, 本文选定其为 LS-SVM 的核函数。同时, 采用网格搜索法进行 σ 和 γ 参数优选^[18]。模型估算流程如图 2 所示。

2 实验分析

本实验采用的 GPS 观测数据来自 PBO 的 P101 站。该测站地处北纬 41.692°, 西经 111.236°, 海拔高度为 2016.1m。该测站使用的接收机类型为 TRIMBLE NETRS, 天线类型为 TRM29659.00, 整流罩类型为 SCIT, 测站高 2m; 测站周围植被

类型为灌木, 地势平坦, 每年被积雪覆盖的时间达 150 天左右, 适宜用作雪深反演实验。因此, 本文采用 2016 年 335 年积日到 2017 年 103 年积日时间段的观测数据, 采样率为 15s。

使用 TEQC 和 Matlab 联合处理 P101 测站的观测数据, 除 PRN04 号卫星无数据外, 其余 31 颗卫星解算分别得到上升段和下降段的雪深反演数据。综合上升段和下降段后, 筛选出观测时间段内每天都有数据的卫星进行实验。因此, 本文选取 17 颗 GPS 卫星进行实验, 限于篇幅, 本文仅给出部分卫星解算结果进行分析, 利用传统低阶多项式和小波分析分离卫星反射信号解得各卫星的反演结果与雪深的关系见图 4。

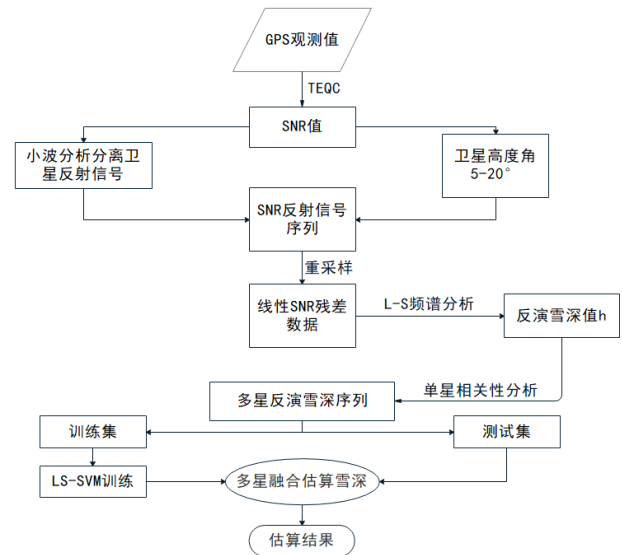


图2 模型估算流程图

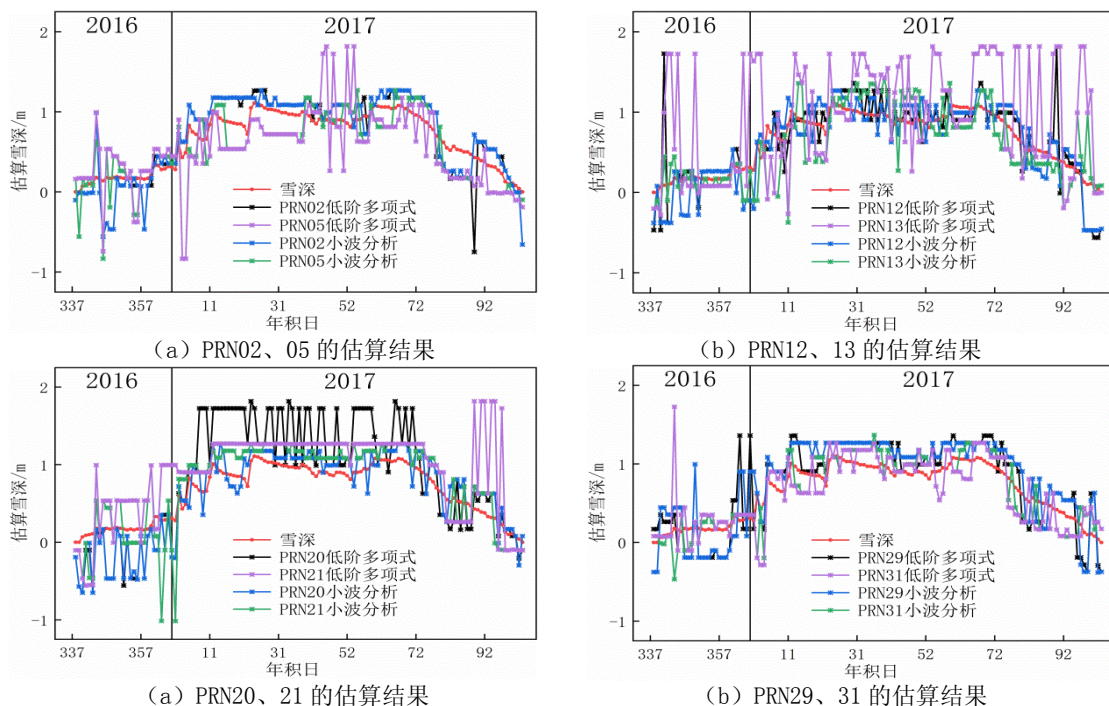


图4 P101测站的雪深估算结果与参考值关系图

由图4可知：随着雪深的变化，各卫星的反演结果均能做出响应，不同卫星的反演结果与雪深的变化趋势均不一样。采用传统方法得到的结果跃变点较多，而小波分析反演结果相对较少，特别是PRN13、20、21号卫星反演结果，整个时段内出现不同程度较大幅度的跳变现象。各卫星的反演结果与雪深之间的 r 如图5所示。可见，17颗卫星的 r 均不相同；利用小波分析估算得到的相关性均大于0.547，单星反演结果相关性最高达到0.845。采用单星反演模式，传统方法反演结果相关性普遍较低，难以准确掌握雪深变化趋势。

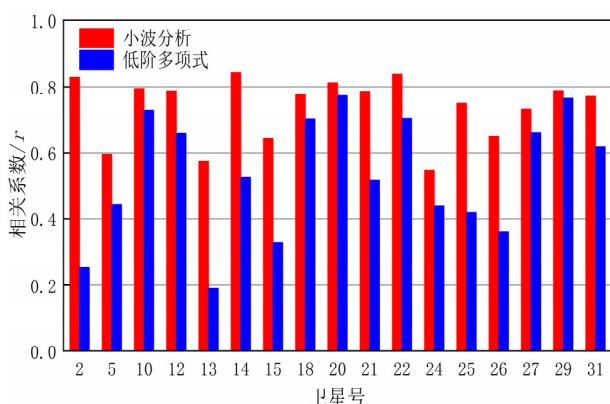


图5 反演结果与雪深参考值线性相关性

3 结束语

本文针对传统GPS-IR技术反演雪深时存在的单星精度不足、信号分离受噪声干扰及地表异质性影响等问题，提出了一种基于小波分析与最小二乘支持向量机(LS-SVM)的多星融合反演模型。通过理论分析、方法改进与实验验证，得出以下主要结论：

(1) 传统低阶多项式法在分离卫星反射信号时易受阶数选择和局部噪声干扰，导致反演结果出现异常跳变。本文采用coif5小波基函数对信噪比(SNR)信号进行多尺度分解，通过低频分量重构有效提取了反射信号的稳定趋势。实验表明，小波分析法使单星反演结果与参考雪深的相关系数均大于0.547，最高达0.845，较传统方法提升至少8.9%，且显著抑制了局部噪声引起的跃变现象，验证了小波分析在信号分离中的鲁棒性优势。

(2) 单星观测因方位角覆盖有限，难以消除地表异质性(如植被、地形)对多路径效应的影响。本文引入LS-SVM算法，通过非线性建模融合多颗卫星的反演数据，构建互补模型。实验结果表明，当融合卫星数量达到6颗时，反演结果与参考值的相关系数提升至0.948，均方根误差(RMSE)低于0.035，

较单星反演精度提高约43%。多星融合通过综合不同方位角的积雪信息，有效缓解了单星反演的局部偏差，且在卫星组合数超过5颗后精度趋于稳定，为复杂地表环境下的连续监测提供了可靠方案。

(3) 针对多星融合中的小样本与非线性问题，本文选用径向基函数(RBF)作为LS-SVM的核函数，并通过网格搜索法优化正则化参数(γ)与核参数(σ)。实验表明，LS-SVM能够自适应分配不同卫星的权重，实现多源数据的非线性互补，显著提升了模型的泛化能力。与传统线性回归相比，该方法在异常值抑制和趋势拟合方面更具优势，充分体现了机器学习在环境参数反演中的应用潜力。

本研究为高精度、全天候雪深监测提供了新思路，尤其在复杂地形和植被覆盖区域具有重要应用价值。未来工作可从三方面拓展：其一，结合星载与地基GNSS-R数据，扩大观测覆盖范围；其二，引入地表温度、降雪量等环境变量，构建多要素耦合反演模型；其三，探索深度学习算法(如卷积神经网络)在信号分离与融合中的潜力，进一步提升模型对动态积雪变化的适应性。

[参考文献]

- [1]李一杰.基于GNSS-IR多星多频数据融合的土壤含水率反演模型研究[D].西北农林科技大学, 2024.
- [2]张伊凡.融合VMD和SSA-BP的GNSS-IR土壤湿度反演方法研究[D].桂林理工大学, 2024.
- [3]王式太, 杨可心, 殷敏, 等.GNSS-IR多星融合的稳健回归土壤湿度反演方法[J].测绘通报, 2024, (03): 69-74.
- [4]袁鑫泰.基于GNSS反射信号的积雪深度反演技术研究[D].上海海洋大学, 2023.
- [5]李毅, 任超, 张志刚, 等.基于多元线性回归的GPS-IR积雪深度反演研究[J].遥感技术与应用, 2020, 35(06): 1312-1319.
- [6]张志刚, 梁月吉, 任超, 等.小波多尺度和多星融合的GPS-IR土壤湿度反演[J].测绘科学技术学报, 2020, 37(02): 133-137+143.
- [7]孙波, 梁勇, 汉牟田, 等.基于GPS多星三频数据融合的GNSS-IR土壤湿度反演方法[J].北京航空航天大学学报, 2020, 46(06): 1089-1096.