

# 利用信号强度反演多模多频 GNSS-MR 雪深

陈国庆, 何秀凤, 王笑蕾, 涂晋升

河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100

**摘要:** 近年来, 随着全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite Systems) 的发展, 兴起了一种基于信噪比 SNR (Signal to Noise Ratio) 的 GNSS 多路径遥感技术 GNSS-MR (GNSS-Multipath Reflectometry)。该技术利用 GNSS 接收机即可获取反射面信息, 在雪深反演中具有信号源丰富、采样率高等优势。但是目前许多 GNSS 接收机并不记录 SNR 观测值。为了使这些接收机也具有雪深监测能力, 文章提出了一种基于信号强度 SSI (Signal Strength Indicator) 的多模多频 GNSS-MR 雪深反演融合方法。实验研究选取美国阿拉斯加州 SG27 测站; 结果表明, 4 大全球卫星系统的多频点 SSI 数据均能反演雪深。经多模多频 GNSS-MR 雪深反演融合后, SSI 反演结果与雪深实测序列间的均方根误差为 2.36 cm, 相关系数为 0.98。同时, 实验研究也进行了基于 SNR 数据的多模多频 GNSS-MR 雪深反演, 发现 SSI 反演结果和 SNR 反演结果具有一致性, 实验验证了基于 SSI 的多模多频 GNSS-MR 雪深反演融合方法的可行性和有效性。

**关键词:** GNSS 多路径遥感, 多模多频, 雪深, 稳健估计, 信号强度

**中图分类号:** P228/P2

**引用格式:** 陈国庆, 何秀凤, 王笑蕾, 涂晋升. 2024. 利用信号强度反演多模多频 GNSS-MR 雪深. 遥感学报, 28(9): 2240-2251

Chen G Q, He X F, Wang X L and Tu J S. 2024. Multi-mode and multi-frequency GNSS-MR snow depth inversion based on signal strength. National Remote Sensing Bulletin, 28(9): 2240-2251 [DOI:10.11834/jrs.20233041]

## 1 引言

积雪在全球水文循环和气候系统中起着重要作用, 而雪深是积雪的重要参数, 准确掌握雪深对于了解全球水文变化量和气候系统变化至关重要。目前的雪深观测资料主要来源于常规的雪深测量仪和遥感卫星。常规的雪深测量仪精度虽高, 但无法进行大面积探测, 空间分辨率低; 随着遥感手段的发展, 有学者开始利用遥感卫星监测积雪的时空变化。但可见光遥感监测积雪变化易受云层和大气影响; 被动微波遥感信号虽可穿透云层, 获得全球大尺度积雪时空变化, 但其空间分辨率较低, 对小尺度积雪变化难以监测。因此, 如何快速高效地获取我们所需要的雪深数据, 仍然是一个亟待解决的问题。近年来, 兴起了一种利用多路径效应的 GNSS 多路径遥感技术 GNSS-MR (GNSS-Multipath Reflectometry) 技术。该技术利用 GNSS 接收机即可获取反射面信息, 在雪深反演

中具有信号源丰富、采样率高、全天候等优势, 为气象部门进行雪深监测提供了一种新的手段。

在 GNSS-MR 技术探测雪深领域上, 国内外学者最早将目光聚焦于基于信噪比 SNR (Signal to Noise Ratio) 的 GNSS-MR 技术的雪深反演。Larson 等 (2009) 首次利用 GNSS 接收机中的 SNR 观测值跟踪了雪深的变化, 证实了基于 SNR 观测值的 GNSS-MR 技术应用于雪深监测的可行性。随后, 基于该技术的雪深反演研究陆续由 L1 C/A 频段扩展到其他频段 (Larson 等, 2013; Larson, 2016; 黄良珂 等, 2019)。在此基础上, 又逐渐由 GPS 单系统扩升到多系统组合 (王泽民 等, 2018; Wang 等, 2020; Tu 等, 2021), 在一定程度上提高了卫星数据的利用率, 使得反演结果精度和时间分辨率均有明显的改善。此外, 在数据处理和接收机性能方面也取得了良好的进展: Wang 等 (2020) 使用稳健回归的方法处理多系统数据; 实验表明: 稳健回归的多系统组合在精度、可用性和时间分

收稿日期: 2023-02-17; 预印本: 2023-07-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (编号: 41830110); 国家重点研发计划 (编号: 2018YFC1503603)

第一作者简介: 陈国庆, 研究方向为 GNSS 遥感。E-mail: 335179752@qq.com

通信作者简介: 何秀凤, 研究方向为卫星定位导航、海洋监测、卫星遥感技术。E-mail: xfhe@hhu.edu.cn

分辨率方面都较单系统有了明显地提高。陈亮宇等 (2022) 将同一天线接到两台接收机, 定量研究了接收机性能对雪深反演精度的影响, 结果表明, 两台接收机多频点反演结果偏差基本上在 3 cm 以内。

然而, 由于输出协议的不同, 早期的 GNSS 观测站提供的观测文件并不包含 SNR 观测值。导致基于信噪比的雪深反演方法对于这些站点并不适用。针对于此, Ozeki 和 Heki (2012) 提出了一种基于双频载波相位无几何距离组合观测值的 L4 雪深探测方法, 实验表明该方法可以进行雪深探测, 但反演精度明显低于信噪比方法。为了提高精度, Yu 等 (2015) 在此基础上提出了一种基于三频组合观测值的 GNSS-MR 算法, 该方法消除了电离层延迟的影响, 实现了厘米级的雪深反演。但是基于三频组合观测值的 GNSS-MR 算法比较复杂, 还需要进行周跳的探测。因此, 如何找到一种反演精度既高, 处理步骤又简便的雪深反演方法仍然十分必要。针对这个问题, Yan 等 (2018) 提出一种基于信号强度 SSI (Signal Strength Indicator) 的 GNSS-MR 技术用于反演土壤湿度, 证实了 SSI 观测值可以用来反演土壤湿度。Wang 等 (2022) 提出一种基于 SSI 的 GNSS-MR 技术用以反演潮位高度, 实现了厘米级的潮位反演, 证实了 SSI 观测值可以用来反演潮位高度。但如何将 SSI 观测值应用到雪深方面的研究? 如何提高 SSI 雪深反演结果的精度和时间分辨率? 目前关于这方面的研究讨论还较少。

因此, 为了进一步拓展 GNSS-MR 技术在监测雪深方面的应用, 本文将 SSI 观测值引入到雪深反演的研究中, 并在此基础上提出一种基于信号强度的多模多频 GNSS-MR 雪深反演融合方法。该方法使用 GNSS 观测文件中总是存在的 SSI 观测值, 从中提取与反射面有关的反射分量, 然后进行 Lomb-Scargle 频谱分析获得主频并将其转化成接收机至反射面的高度, 从而得到雪深监测序列。为了进一步提高精度和时间分辨率, 本文还利用稳健估计的方法对多模多频雪深监测序列进行融合。此外, 对于一些不输出 SNR 观测值的站点, SSI 观测值能够弥补 GNSS-MR 技术的数据来源不足问题, 进一步拓展 GNSS-MR 技术的应用。本文还可为利用 SSI 观测值监测潮位、土壤湿度、植被含水量等领域的应用提供参考。

## 2 研究区域介绍

为了探讨本文所提方法的可行性, 选取美国阿拉斯加州 SG27 测站多模多频 SSI 观测值设计了雪深反演实验。所用到的实验站点 SG27, 位于美国阿拉斯加州, 处于经度  $156.6103^{\circ}\text{W}$ , 纬度  $71.3229^{\circ}\text{N}$ , 隶属于板块边界观测网络 (<http://pbo.unavco.org> [2023-02-17])。该站可同时跟踪采样率为 15 s 的 4 大卫星系统的信号。本文实验选取 SG27 测站 2018 年 7 月 15 日至 2019 年 1 月 15 日共 6 个月的多模多频数据, 雪深参考值来自于距 SG27 测站约 7 km 的与其积雪特性较为相近的 PABR 气象站。

图 1 (a) 和 (b) 是 SG27 测站周围环境和地理位置示意图, 从图 1 中可以看出 SG27 测站周围较为开阔, 无明显遮蔽, 适合进行雪深反演。SG27 测站周围的地形起伏可由图 1 (c) 中的数字高程模型得到。为了避免 SG27 站西侧和北侧建筑物和其他构造物的影响, 选择方位角  $90^{\circ}$ — $180^{\circ}$  (Hu 等, 2022) 和卫星高度角  $5^{\circ}$ — $25^{\circ}$  的数据进行实验, 图 1 (d) 为根据文献 (Roesler 和 Larson, 2018) 提供的基于 Google earth 的绘制工具绘制的菲涅尔反射区。

## 3 理论与方法

### 3.1 基于 SNR 的 GNSS-MR 雪深反演原理

如图 2, GNSS-MR 雪深反演模型采用一根右旋圆极化 RHCP (Right Hand Circular Polarization) 天线同时接收直射和反射信号。

反射信号相较于直射信号会产生一个相位延迟, 相位差  $\psi$  可以表述为 (Larson 等, 2009)

$$\psi = \frac{2\pi D}{\lambda} = \frac{4\pi \cdot H \cdot \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

式中,  $D$  是反射信号与直射信号之间的路径差;  $H$  是天线相位中心至反射面的高度;  $\lambda$  和  $\theta$  分别是卫星载波波长和卫星高度角。

直射信号和反射信号会在接收机内产生干涉, 进而生成一种复合信号, 其功率为

$$P = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}\cos(\psi + \varphi) \quad (2)$$

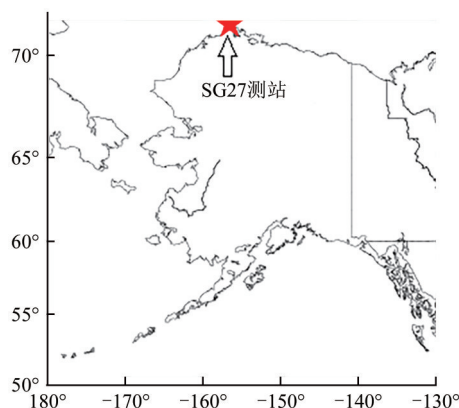
式中,  $P_d$  为直射信号的功率,  $P_r$  为反射信号的功率,  $\varphi$  为复合信号超出直射信号的相位。

SNR 在 GNSS 观测文件中被定义为信号和噪声强度的比值 (周威 等, 2018):



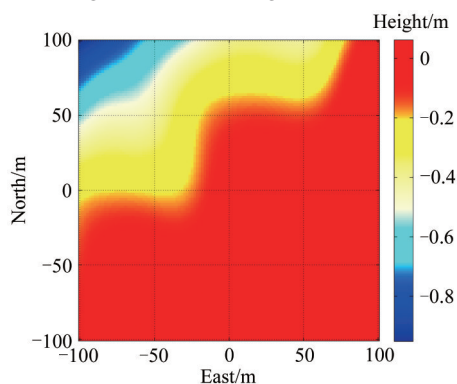
(a) SG27测站周围环境

(a) Schematic diagram of surrounding environment of station SG27



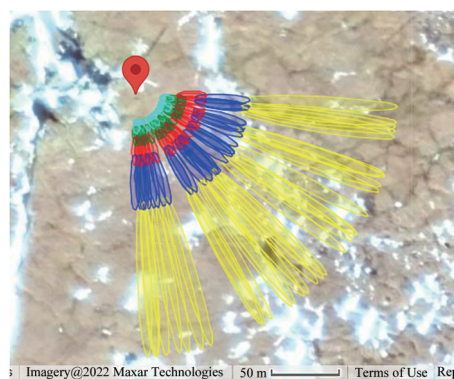
(b) SG27测站地理位置

(b) Geographical location of station SG27



(c) SG27测站数字高程模型

(c) Digital elevation model of station SG27



(d) SG27测站菲涅尔反射区域

(d) Fresnel reflection area at station SG27

图1 SG27测站信息一览

Fig. 1 Overview of information at station SG27

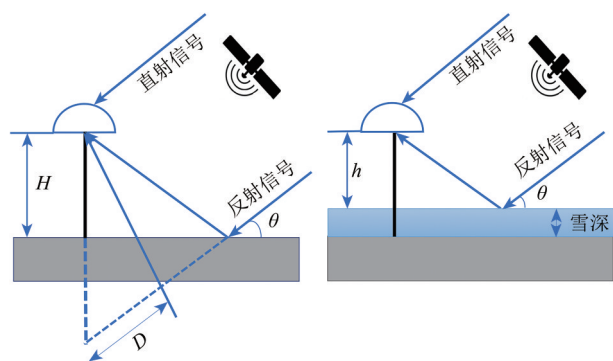


图2 GNSS-MR雪深反演示意图

Fig. 2 Schematic diagram of GNSS-MR snow depth inversion

$$\text{SNR} = \frac{P}{P_{\text{noise}}} = \frac{P_d + P_r + 2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}\cos(\psi + \varphi)}{P_{\text{noise}}} \quad (3)$$

提取SNR的反射分量, 可得到式(4):

$$d\text{SNR} = A \cos\left(\frac{4\pi \cdot H}{\lambda} \sin(\theta) + \varphi\right) \quad (4)$$

因此, 通过对SNR观测值提取反射分量, 然

后进行Lomb-Scargle频谱分析获得主频, 然后通过公式 $H = \lambda/2$ 将主频转化成接收机至反射面的高度, 便可得到雪深监测时间序列。

### 3.2 基于SSI的GNSS-MR雪深反演原理

SSI在GNSS观测文件中被定义为SNR的量化(Gurtner和Estey, 2007):

$$\text{SSI} = \min\left(\max\left(\text{int}\left(\frac{\text{SNR}}{6}\right), 1\right), 9\right) \quad (5)$$

式中, min和max分别是最小和最大值函数, int是向下取整函数。

根据式(5), SSI用1—9表示。SSI和SNR的关系如表1: 当SNR值小于12 dB-Hz时, SSI值为1; 当SNR值大于54 dB-Hz时, SSI值为9; 当SNR值介于12—54 dB-Hz之间时, SSI值介于1—9。

由式(3)和式(5), SSI还可表述为

$$\text{SSI} = \min\left(\max\left(\text{int}\left(\frac{P_d + P_r + 2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}\cos(\psi + \varphi)}{6P_{\text{noise}}}\right), 1\right), 9\right) \quad (6)$$

表1 SNR和SSI的关系  
Table 1 Relationship between SNR and SSI

|     | SNR/(dBHz) |       |       |       |       |       |       |       |     |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|     | <12        | 12-17 | 18-23 | 24-29 | 30-35 | 36-41 | 42-47 | 48-53 | ≥54 |
| SSI | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9   |

对式(6)利用低阶多项式去除直射分量,剩下的便是携带反射面物理特性的反射分量:

$$dSSI = A \cos\left(\frac{4\pi \cdot H}{\lambda} \sin(\theta) + \varphi\right) \quad (7)$$

式中,  $A$  是与直射信号、反射信号、天线增益和噪声功率有关的振幅。取  $H = \lambda f/2$ , 对 SSI 残差序列进行 Lomb-Scargle 频谱分析可获取 GNSS 多路径反射信号的频率  $f$ , 进而得到  $H$ , 然后分别获得降雪前和降雪后的反射高, 作差便是雪深。

### 3.3 稳健估计的 SSI 融合雪深反演

在进行 GNSS-MR 雪深反演实验时, GNSS 信号在穿过对流层时会发生折射弯曲, 这种折射弯曲引起的对流层延迟会使解算的反射高度偏小。为了消除对流层延迟对反演结果精度的削弱, 在此使用 GPT2W (Global Pressure and Temperature 2 Wet) 和 VMF1 (Vienna Mapping Functions) 映射函数 (Williams 和 Nievinski, 2017) 消除对流层延迟的影响。根据 GPT2W 模型和 VMF1 映射函数, 对流层延迟  $\tau_T$  计算公式为

$$\tau_T = 2\Delta\tau_h^* \cdot m_h(\theta) + 2\Delta\tau_w^* \cdot m_w(\theta) \quad (8)$$

式中,  $\Delta\tau^* = \tau^*(-H) - \tau^*(0)$  是天线和地面位置的天顶延迟差,  $m_h$  和  $m_w$  分别是干湿延迟映射函数。于是由对流层延迟  $\tau_T$  引起的反射高度的偏差  $\Delta h_T$  为

$$\Delta h_T = \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_T}{\partial \sin \theta} \quad (9)$$

事实上, 上面叙述的基于 SSI 的 GNSS-MR 雪深反演原理使用的是一种假设反射面静止的静态模型。对于雪深反演而言, 反射面比较稳定, 应用该静态模型能够达到精度要求。但是为了对多模多频反演结果进行融合, 以达到更高的精度和更高的时间分辨率, 本文在该静态模型中引入两个随时间变化的动态参数 (Larson 等, 2013): 卫星高度角变化率  $\dot{\theta}$  和反射面高度变化率  $\dot{h}$ 。因此, 在加上对流层延迟改正和引入动态参数后, 反射高度  $h$  可以写为

$$\bar{h} = \frac{\tan \theta}{\dot{\theta}} \dot{h} + h + \Delta h_T \quad (10)$$

式中,  $\bar{h}$  为静态模型下的反射高,  $h$  为要求的实际反射高。

为了解算  $h$ , 采用稳健估计的方法。首先设定一个滑动窗口, 这个窗口的宽度要容纳足够多的反演点以满足方程求解。若设窗口长度为  $T$ , 窗口的滑动步长为  $1h$ , 则第  $i$  窗口的时间  $t_i \in \{0, 1h, 2h, \dots\}$ , 根据式(10)建立方程:

$$\bar{h}_{i,l}(t_{i,l}) - \Delta h_{T_{i,l}}(t_{i,l}) = \frac{\tan \theta_{i,l}}{\dot{\theta}_{i,l}} \dot{h}_i(t_i) + h_i(t_i) \times (t_{i,l} - t_i) + h_i(t_i) \quad (11)$$

式中,  $l$  表示窗口内反演值的序号。

则第  $i$  个窗口内各反演值可以用方程组表示:

$$\begin{aligned} & \dots \\ & \bar{h}_{i,l-1}(t_{i,l-1}) - \Delta h_{T_{i,l-1}}(t_{i,l-1}) = \\ & \left( \frac{\tan \theta_{i,l-1}}{\dot{\theta}_{i,l-1}} + (t_{i,l-1} - t_i) \right) \dot{h}_i(t_i) + h_i(t_i) \\ & \bar{h}_{i,l}(t_{i,l}) - \Delta h_{T_{i,l}}(t_{i,l}) = \\ & \left( \frac{\tan \theta_{i,l}}{\dot{\theta}_{i,l}} + (t_{i,l} - t_i) \right) \dot{h}_i(t_i) + h_i(t_i) \\ & \bar{h}_{i,l+1}(t_{i,l+1}) - \Delta h_{T_{i,l+1}}(t_{i,l+1}) = \\ & \left( \frac{\tan \theta_{i,l+1}}{\dot{\theta}_{i,l+1}} + (t_{i,l+1} - t_i) \right) \dot{h}_i(t_i) + h_i(t_i) \\ & \dots \end{aligned} \quad (12)$$

可简化为矩阵方程:

$$\bar{\mathbf{H}}_i = \mathbf{M}_i \dot{h}_i + h_i = \mathbf{A}_i \mathbf{X}_i \quad (13)$$

式中,  $\bar{\mathbf{H}}_i = \bar{h}_{i,l}(t_{i,l}) - \Delta h_{T_{i,l}}(t_{i,l})$ ,  $\mathbf{M}_i = \frac{\tan \theta_{i,l}}{\dot{\theta}_{i,l}} + (t_{i,l} - t_i)$ ,  $\mathbf{A}_i = (\mathbf{M}_i, 1)$ ,  $\mathbf{X}_i = \begin{pmatrix} \dot{h}_i \\ h_i \end{pmatrix}$ 。

若不同 SSI 序列的反演值  $\bar{h}$  具有相同的精度, 根据最小二乘原理, 矩阵方程(13)的解为

$$\mathbf{X}_i = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T \bar{\mathbf{H}}_i \quad (14)$$

但是由于不同卫星系统不同频点的 SSI 序列的主频存在差异, 所以不同频点信号应对应不同的权重, 在此采用 ICG III 模型进行自动赋权。ICG III 模型将权分成 3 段, 即正常段、可疑段和淘汰段。

图3为SG27测站SSI反演数据迭代过程中残差所对应的权重,从图中可以看出权重大致分为3段:即正常段,保持原有的权;可疑段,降权;淘汰段,权值为0,淘汰异常值。IGG III模型不仅能够削弱粗差对结果的影响而且还可以充分的保留精确数据,避免数据严重失真(Yang等, 2002)。此外,为了更好从数字方面对实验进行可视化,本文取各频点当天反演雪深结果的均值作为当日雪深反演值并采用标准差STD (Standard Deviation)、均方根误差RMSE (Root Mean Square Error) 和相关系数3个评价指标作为反演值的精度评定标准。

稳健估计的流程为:首先通过最小二乘得到每个反演值的残差估计值,然后根据残差确定各反演值新的权因子,进行下一轮最小二乘解算,最后反复迭代,直到前后两次估计值的变化值小于设定限差。

图4是本文进行GNSS-MR雪深反演实验的基本流程。需要注意的是:GNSS-MR技术通常采用低

高度角数据;针对于本文研究区域这里采用高度角 $5^{\circ}$ — $25^{\circ}$ ,方位角 $90^{\circ}$ — $180^{\circ}$ 的数据。此外,GNSS信号在穿过对流层时发生的折射弯曲会使GNSS-MR雪深反演结果偏小。在此使用GPT2W和VMF1映射函数进行对流层延迟改正。最后,对SSI和SNR序列提取反射分量后,使用Lomb-Scargle频谱分析法获取主频,再通过公式 $H = \lambda f/2$ 将主频转化成接收机至反射面的高度,便可得到雪深。

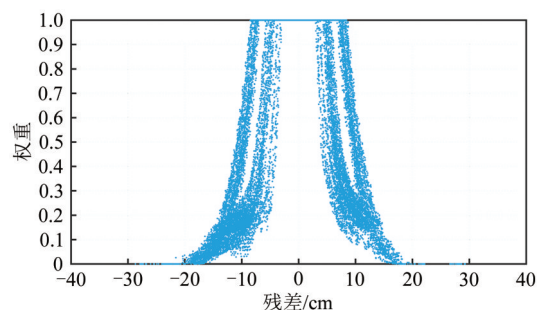


图3 SSI雪深反演权重分布

Fig. 3 Weight distribution of SSI snow depth retrieval

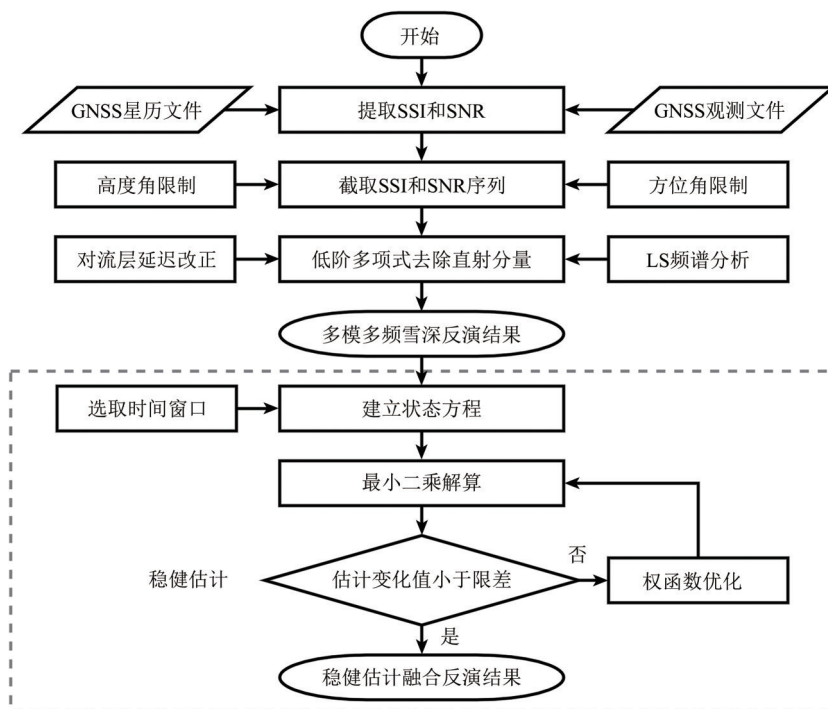


图4 SSI和SNR反演雪深流程

Fig.4 Snow depth retrieval by SSI and SNR

## 4 结果和分析

### 4.1 SSI数据分析

为了更清晰地比较SSI和SNR在反演过程中的异同点,选取2019年1月1日GPS卫星系统1C频

点的SSI和SNR数据进行分析。图5和图6给出了SSI和SNR在这一天内的可视化。图7(a)展示了SNR和SSI的低高度角数据,其中,SNR观测值在30—45 dB-Hz之间,类似于一个余弦函数;SSI观测值在5—7之间浮动,趋势类似于一个矩形函数。

对图 7 (a) 用二阶多项式去除直射分量, 得到图 7 (b), SSI 残差序列显现出和 SNR 残差序列相似的振荡。对图 7 (b) 进行 Lomb-Scargle 频谱分析, 并将主频通过公式  $H = \lambda f/2$  转化成反射高度后, 得到图 7 (c) 和 (d), 可以看到, 两种数据均能提取主频所对应的反射高度, 且转化为反演雪深值后与实测雪深值差均在 1 cm 以内。

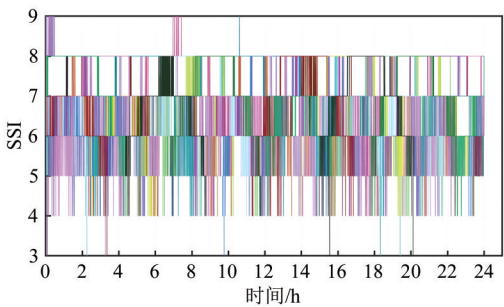


图 5 SSI 可视化  
Fig. 5 SSI Visualization

4.2 多模多频 SSI 反演结果

图 8、图 9、图 10、图 11 分别给出了连续 6 个月内 SG27 测站北斗、Galileo、GPS、GLONASS 等 4 个卫星系统各频点的日均雪深反演值。图 8—11 中黑线是气象站实测雪深; 不同颜色的散点代表了不同

频点, 图 8—11 (a) 是 SSI 反演结果, 图 8—11 (b) 是 SNR 反演结果; 散点上标注的灰色短竖线是当日雪深反演值的标准差。从图 8—11 中可以直观地看出, 一方面各频点 SSI 反演结果与气象站实测值吻合良好 (虽然在某些时段二者存在一定的差异, 但从长期趋势看, 二者整体变化趋势相同); 另一方面在相同时间段内, SSI 反演结果与 SNR 反演结果具有一致性。

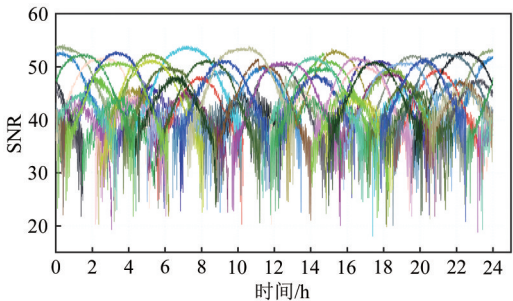
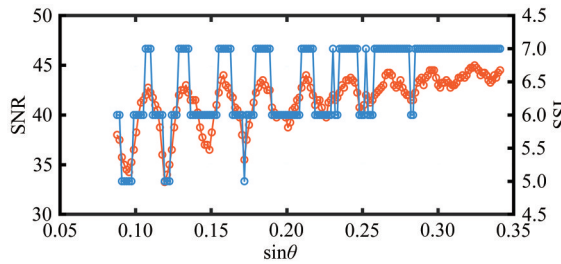
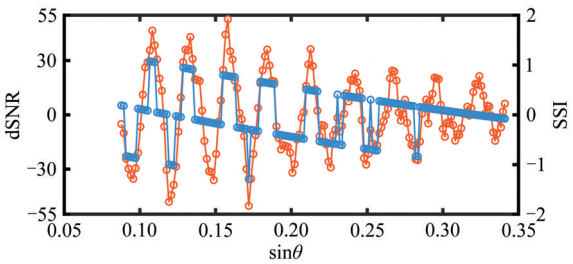


图 6 SNR 可视化  
Fig. 6 SNR Visualization

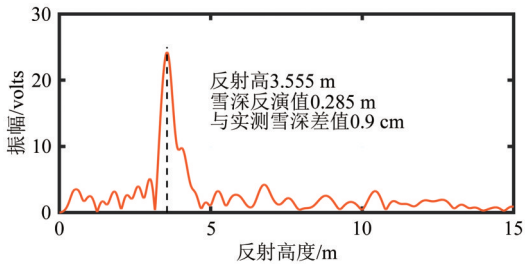
为了进一步分析各频点反演结果具体的精度指标, 从标准差、均方根误差、相关系数 3 个方面对 SSI 反演结果和 SNR 反演结果进行了统计, 结果如下表 2 所示。



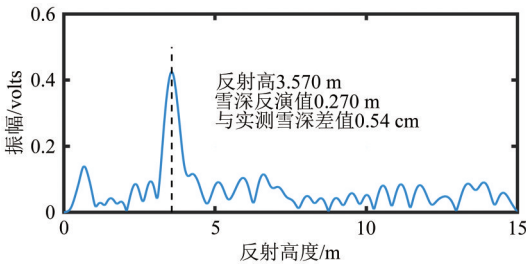
(a) SG27 站 SNR 序列和 SSI 序列  
(a) SG27 station SNR sequence and SSI sequence



(b) 去除直射分量后的 SNR 残差序列和 SSI 残差序列  
(b) SNR residual sequence and an SSI residual sequence after the direct component is removed



(c) SNR 残差序列 Lomb-Scargle 谱分析后的反射高度  
(c) Reflection height after Lomb-Scargle spectrum analysis of SNR residual sequence



(d) SSI 残差序列 Lomb-Scargle 谱分析后的反射高度  
(d) Reflection height after Lomb-Scargle spectrum analysis of SSI residual sequence

—●— SNR    —●— SSI

图 7 SNR 和 SSI 反演过程中的异同点

Fig. 7 Differences and similarities in SNR and SSI inversion processes

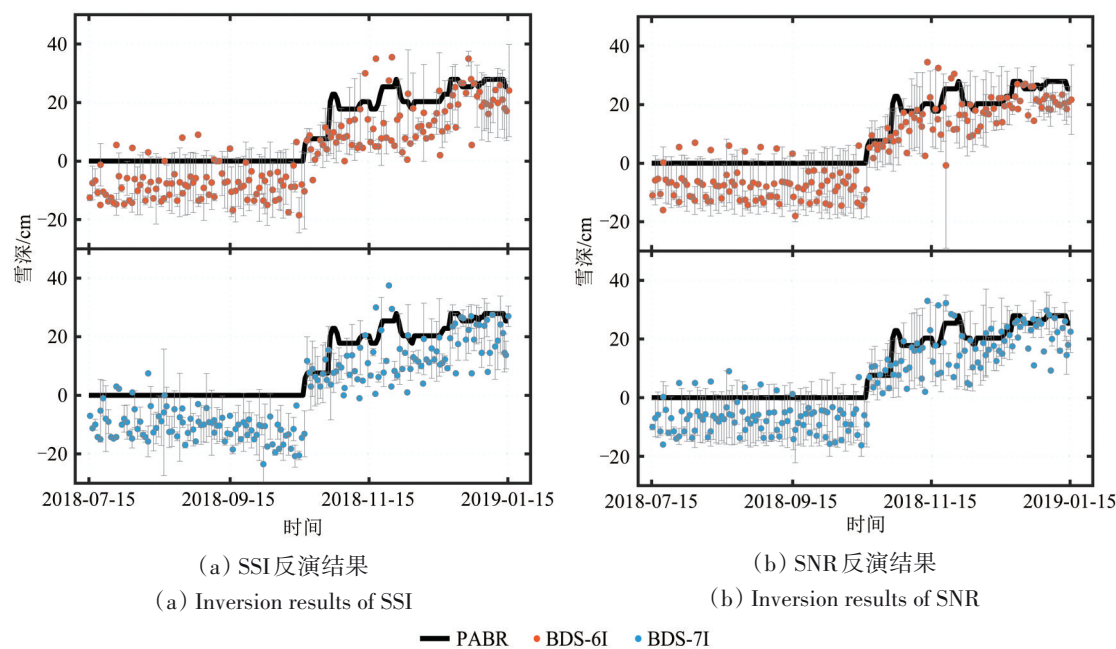


图8 SG27测站北斗反演结果  
Fig. 8 Beidou inversion results of SG27 station

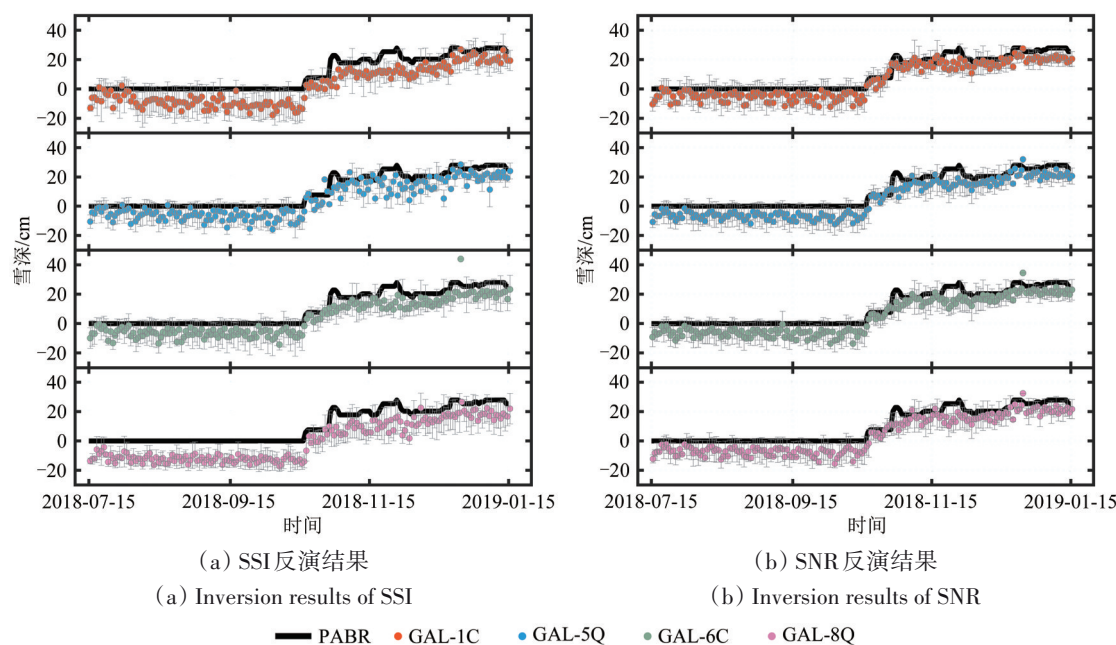


图9 SG27测站伽利略反演结果  
Fig. 9 Galileo inversion results of SG27 station

表2汇总了多模多频反演结果具体精度指标。可以看出,各频点SSI反演结果与气象站实测雪深值具有良好的相关性(相关系数除北斗两个频点外均大于0.92)。综合不同卫星系统反演结果的标准差和均方根误差来看,GPS卫星系统反演结果最优,其次是GLONASS,然后是Galileo,但这3种卫星系统反演结果相差不大;而北斗卫星系统反演结果最差。主要原因是测站位于美国阿拉斯加

州,能够观测到的北斗卫星较少,因此基于北斗卫星系统的SSI反演结果稳定性差、精度低。

另一个值得注意的是基于同一系统的不同频点的SSI反演结果之间同样存在差异。例如Galileo卫星系统的5Q频点反演结果明显高于8Q频点的反演结果。造成这一现象的原因可能是不同频点信号的码片率,天线增益和随机噪声的大小不一样。

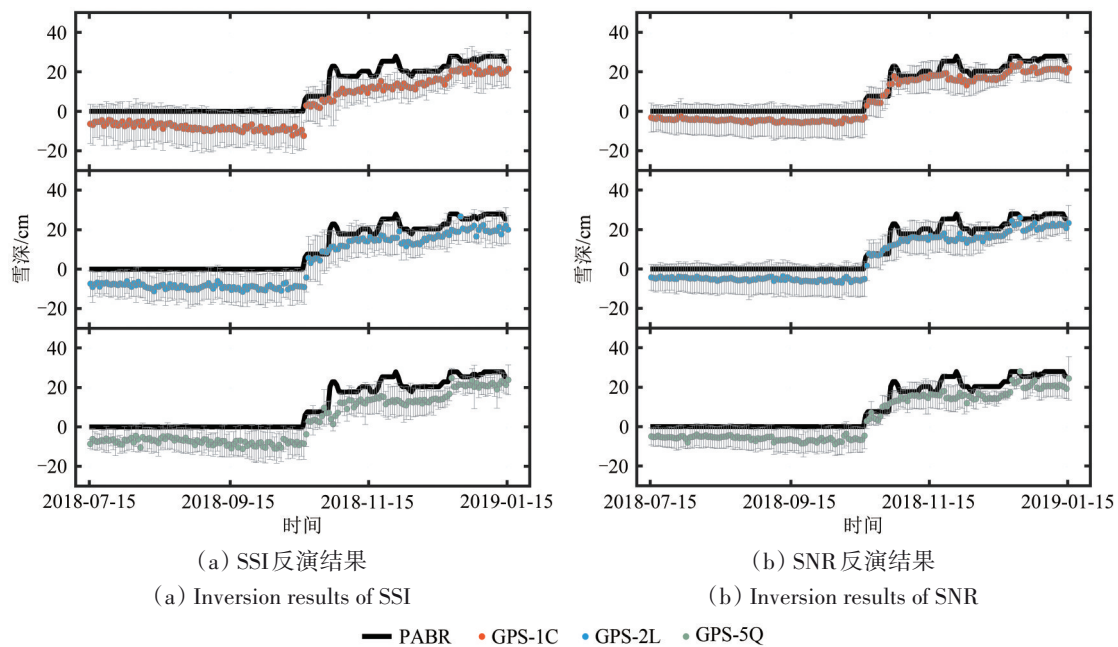


图 10 SG27测站GPS反演结果

Fig. 10 GPS inversion results of SG27 station

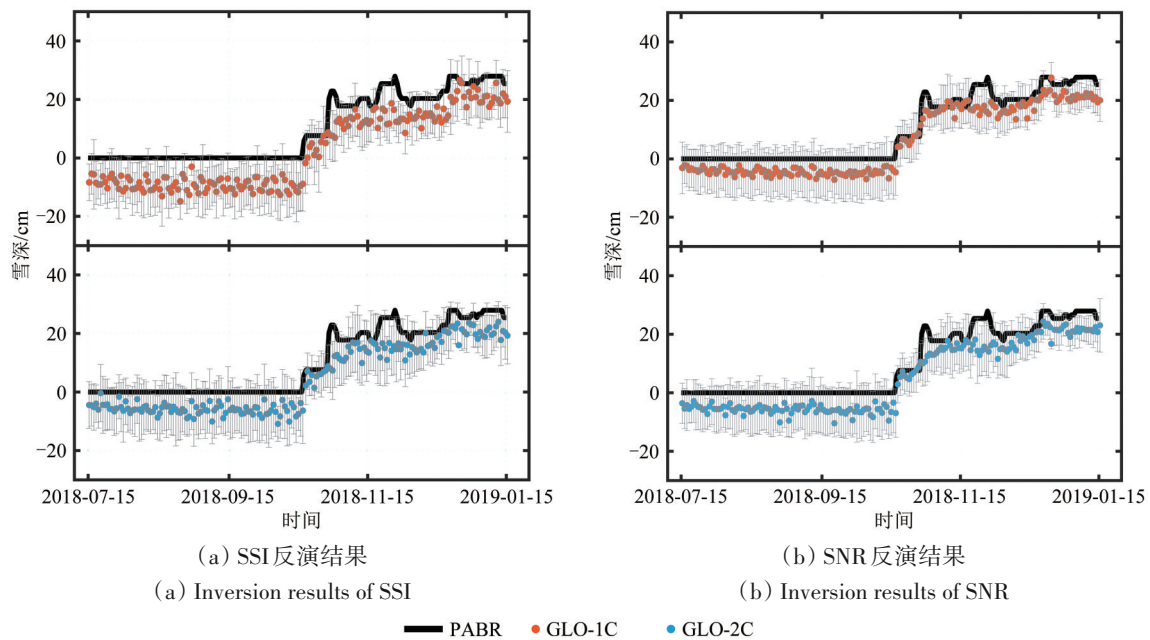


图 11 SG27测站格洛纳斯反演结果

Fig. 11 GLONASS inversion results of SG27 station

除此之外, 分别将SSI反演结果和SNR反演结果的标准差与均方根误差进行横向对比, 发现SSI反演结果精度略低于SNR反演结果的精度, 但差别不大, 二者处在同一个数量级。可能的原因是SSI值的波动范围小(1—9), 而SNR值的波动范围大(通常是12—54 dB-Hz), 在用低阶多项式去除直射分量时会产生微小的差异。

#### 4.3 多模多频SSI融合反演结果

由于雪面的镜面反射性较差, 易出现粗差, 一般是对每一段SSI序列给出的反演结果剔除粗差, 然后取其平均值作为当天的雪深反演结果。但这样做无疑降低了雪深序列的时间分辨率。此外, 由于不同卫星系统和不同频点信号之间存在差别, 导致它们反演出来的雪深值也存在精度差

别。因此，对多模多频数据进行融合以使其时间分辨率精度趋向更高是有现实意义的。所以，为了获得更稳定的，时间分辨率更高的雪深反演值，本文采用稳健估计的方法对雪深反演结果进行融合。具体策略为：设置滑动窗口 2 h，可以获得每 2 h 一次采样的高精度雪深反演值。

表 2 SG27 测站多模多频反演结果精度统计  
Table 2 Accuracy statistics of multi-mode and multi-frequency inversion results at SG27 station

| 卫星系统    | 反演方法 | 频点 | STD/cm | RMSE/cm | 相关系数 |
|---------|------|----|--------|---------|------|
| 北斗      | SSI  | 6I | 6.54   | 10.00   | 0.87 |
|         |      | 7I | 6.62   | 11.20   | 0.88 |
|         | SNR  | 6I | 5.90   | 8.46    | 0.90 |
|         |      | 7I | 6.12   | 8.43    | 0.89 |
| Galileo | SSI  | 1C | 4.10   | 9.47    | 0.95 |
|         |      | 5Q | 4.47   | 7.64    | 0.93 |
|         |      | 6C | 3.73   | 7.46    | 0.95 |
|         |      | 8Q | 4.01   | 11.30   | 0.94 |
|         | SNR  | 1C | 3.61   | 6.00    | 0.95 |
|         |      | 5Q | 3.48   | 6.74    | 0.96 |
|         |      | 6C | 3.46   | 6.49    | 0.96 |
|         |      | 8Q | 3.64   | 7.22    | 0.96 |
| GPS     | SSI  | 1C | 2.60   | 8.10    | 0.97 |
|         |      | 2L | 2.73   | 7.89    | 0.98 |
|         |      | 5Q | 2.79   | 7.79    | 0.97 |
|         | SNR  | 1C | 1.98   | 4.84    | 0.98 |
|         |      | 2L | 2.26   | 5.36    | 0.98 |
|         |      | 5Q | 2.37   | 6.06    | 0.97 |
| GLONASS | SSI  | 1C | 3.18   | 8.58    | 0.97 |
|         |      | 2C | 2.76   | 6.34    | 0.97 |
|         | SNR  | 1C | 2.33   | 4.74    | 0.98 |
|         |      | 2C | 2.54   | 5.76    | 0.97 |

根据 3.3 节介绍的方法对 4 个卫星系统多模多频反演结果进行融合，结果如图 12 所示。图 12 (a) 给出了多模多频融合后的雪深反演值，其中黑线是气象站实测雪深，蓝线和红线分别是多模多频融合 SSI 反演结果和多模多频融合 SNR 反演结果。对比 4.2 节融合前的雪深反演结果，发现融合后的反演结果比融合前的任何卫星系统的频点信号精

度都要高。而且相较于融合前的日均雪深反演值，融合后获得了每 2 h 一次采样的雪深反演值。因此，无论是时间分辨率还是精度上，基于两个维度的对比，融合后的结果均比融合前的结果更为优异。图 12 (b) 和 (c) 分别是融合 SSI 反演结果和融合 SNR 反演结果与气象站实测值之间的误差图，蓝线代表 SSI，红线代表 SNR。图 12 中的黑色虚线为 2018 年 10 月 15 日和 2018 年 12 月 5 日，可以看出在对应无雪期和积雪稳定期的 2018 年 7 月 15 日—2018 年 10 月 15 日，2018 年 12 月 5 日—2019 年 1 月 15 日内，融合反演结果与实测值误差很小；而在积雪不断堆积和消融的 2018 年 10 月 15 日—2018 年 12 月 5 日内，误差较大，说明雪深反演误差一般集中在雪深变化较为剧烈的时期。根据实际情况可以推知，之所以在雪深变化较为剧烈时反演误差较大，是因为在这期间，雪面存在一个短期的动态变化。而 GNSS 卫星信号在经过地面反射后，易受到干扰，从而导致反演结果的不稳定。

图 13 给出了 SSI 融合反演结果和 SNR 融合反演结果误差统计的直方图，并在直方图上叠加了一个正态分布。表 3 是具体的精度指标，从表 3 中可以看出融合后的 SSI 反演结果精度：标准差 2.36 cm，均方根误差 2.36 cm，相关系数达到了 0.98，相较于融合前精度有了较大的改善；此外，融合后 SSI 反演结果精度和融合后 SNR 反演结果精度几乎一致；说明 SSI 数据可以替代 SNR 数据进行雪深反演。需要指出的是：融合后结果精度的提高主要得益于稳健估计的方法处理。本文使用稳健估计的方法解算式 (13)，将融合前的结果输入进去，通过 IGGⅢ 模型自动定权，对精度高的数据赋予较大的权重，对精度低的数据赋予较小的权重，最后经过解算，输出一个高精度的估值。这个估值就是融合后的结果。对于稳健估计，滑动窗口长度的设置很重要。理论上窗口长度越短，雪深变化越符合线性关系，但长度过短，窗口中数据量过少，不足以进行可靠的抗差估计；窗口越长，则雪深的非线性运动造成的融合反演误差越大。因此，在反复试验后，本文最终选取一个精度最高的 2 h 滑动窗口，获得了每 2 h 一次采样的高精度雪深反演值。

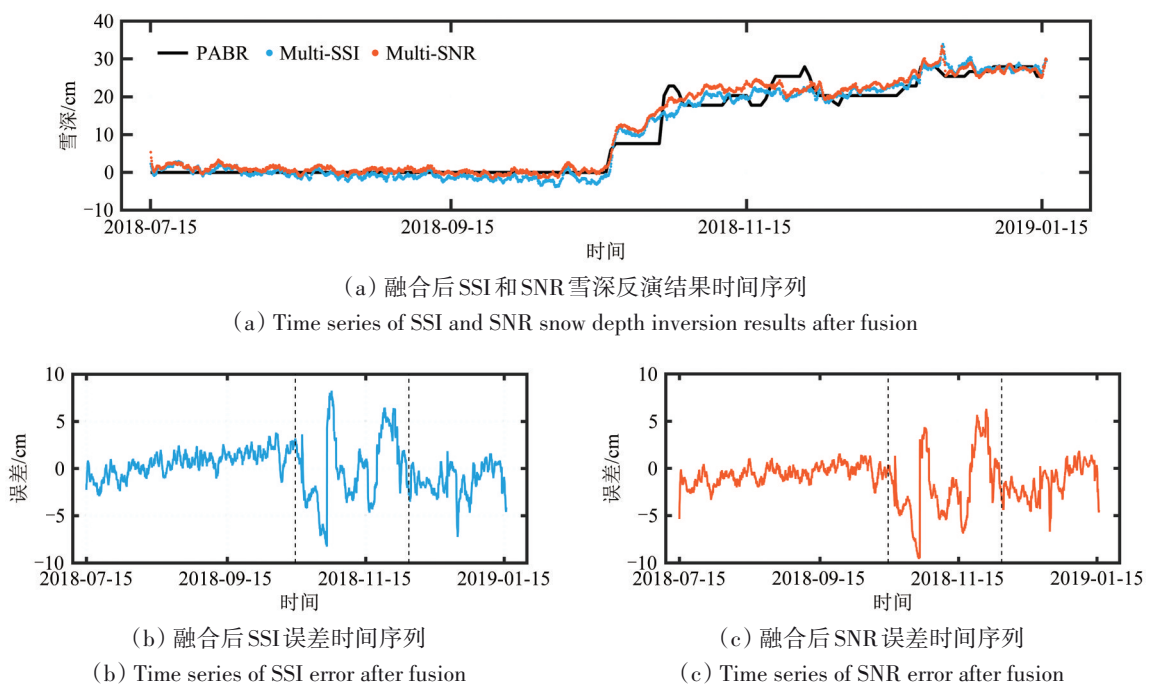


图 12 SG27 测站四系统融合反演结果

Fig. 12 Inversion results of four systems fusion at SG27 Station

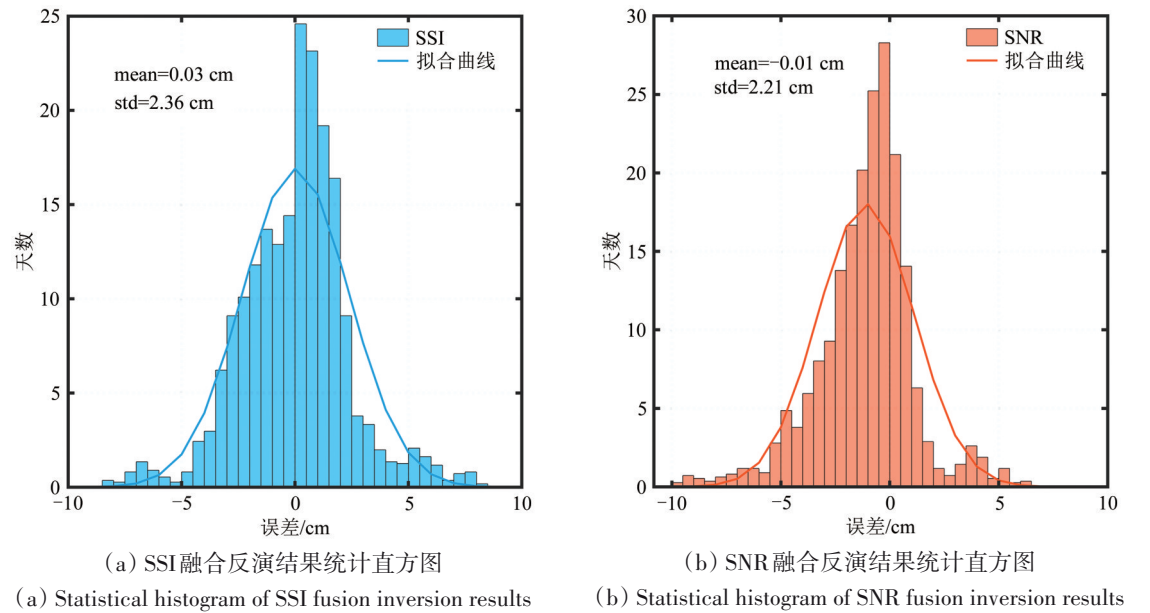


图 13 SSI 和 SNR 融合反演结果统计直方图

Fig. 13 Statistical histogram of SSI and SNR fusion inversion results

表 3 SG27 测站多模多频融合反演结果精度统计

Table 3 Accuracy statistics of multi-mode and multi-frequency fusion inversion results at SG27 station

| 卫星系统 | 采样率/h | 反演方法 | STD/cm | RMSE/cm | 相关系数 |
|------|-------|------|--------|---------|------|
| 四系统融 | 2     | SSI  | 2.36   | 2.36    | 0.98 |
| 合    | 2     | SNR  | 2.21   | 2.47    | 0.98 |

5 结 论

针对很多站点缺少 SNR 数据的现象, 本文提出一种基于信号强度的多模多频 GNSS-MR 雪深反演融合方法。文章利用美国阿拉斯加州 SG27 测站多模多频 SSI 数据设计了 GNSS-MR 雪深反演实验,

获得了每2 h采样一次,均方根为2.36 cm的高精度雪深反演值,验证了SSI数据应用于雪深反演领域的可行性和有效性,并得到了以下结论:

(1) 各卫星系统的SSI数据均能有效反演雪深,但卫星系统之间存在差异。从反演结果的优异性来看:GPS反演结果较其他系统更佳,北斗反演结果略差,原因是在高纬度地区北斗卫星可用数据较少,质量较弱。

(2) 同卫星系统不同频点的SSI数据均能有效反演雪深,但各频点间存在差异。例如,最好的是GLONASS卫星系统的2C频点,标准差2.76 cm,均方根误差6.34 cm,相关系数0.97。最差的是北斗卫星系统的7I频点,标准差6.62 cm,均方根误差11.20 cm,相关系数0.88。造成这一现象的主要原因是由于不同频点信号的调制功率、接收机天线增益、信号码片率、信号中随机噪声的大小等因素不同,从而导致反演结果的精度不同。

(3) 对多模多频SSI反演结果融合后,反演结果的精度和时间分辨率均得到提高。其中,时间分辨率达到了每2 h采样一次,精度指标中标准差2.36 cm,均方根误差2.36 cm,相关系数0.98。

(4) 相同频点的SSI与SNR反演结果差异较小,尤其是经过稳健估计融合方法后的结果,几乎完全一致,二者标准差和均方根误差差值均在毫米以内。

此外,目前全球范围内还有很多站点缺少SNR数据。因而利用本文提出的融合方法对这些站点所处的区域进行雪深、潮位、土壤湿度、地表形变监测等方面的研究具有广阔的应用前景。但是对于不同领域的应用,处理方法还需进行更深一步的探索。

## 参考文献(References)

- Chen L Y, An J C, Wang Z M, Liu J B and Qu X C. 2022. Assessment of GNSS-IR-based snow-depth retrievals using observations from different receivers with the same antenna. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(8): 1312-1321 (陈亮宇, 安家春, 王泽民, 柳景斌, 屈小川. 2022. 同天线不同接收机的GNSS-IR雪深反演分析. 武汉大学学报(信息科学版), 48(8): 1312-1321) [DOI: 10.13203/j.whugis20210710]
- Gurtner W and Estey L. 2007. RINEX-the Receiver Independent Exchange Format-Version 3.00[EB/OL]. (2007-11-28). <https://epic.awi.de/id/eprint/29985/1/Gur2007a.pdf>
- Hu Y F, Wang J, Li Z H and Peng J B. 2022. Ground surface elevation

- changes over permafrost areas revealed by multiple GNSS interferometric reflectometry. *Journal of Geodesy*, 96(8): 56 [DOI: 10.1007/s00190-022-01646-5]
- Huang L K, Zhou W, Liu L L, Chen J and Wang H Y. 2019. Research on surface snow depth retrieval of new L5 signals from GPS. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 7: 1-5, 11 (黄良珂, 周威, 刘立龙, 陈军, 王浩宇. 2019. 基于GPS新型L5信号的地表雪深反演研究. 测绘通报, (7): 1-5, 11) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0208]
- Larson K M. 2016. GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6): 775-787 [DOI: 10.1002/wat2.1167]
- Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, Braun J J, Williams M K and Nievinski F G. 2009. Can we measure snow depth with GPS receivers? *Geophysical Research Letters*, 36(17): L17502 [DOI: 10.1029/2009GL039430]
- Larson K M, Ray R D, Nievinski F G and Freymueller J T. 2013. The accidental tide gauge: a GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5): 1200-1204 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2236075]
- Ozeki M and Heki K. 2012. GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases. *Journal of Geodesy*, 86(3): 209-219 [DOI: 10.1007/s00190-011-0511-x]
- Roesler C and Larson K M. 2018. Software tools for GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR). *GPS Solutions*, 22(3): 80 [DOI: 10.1007/s10291-018-0744-8]
- Tu J S, Wei H H, Zhang R, Yang L, Lv J C, Li X M, Nie S H, Li P, Wang Y X and Li N. 2021. GNSS-IR snow depth retrieval from multi-GNSS and multi-frequency data. *Remote Sensing*, 13(21): 4311 [DOI: 10.3390/rs13214311]
- Wang N Z, Xu T H, Gao F, He Y Q, Meng X Y, Jing L L and Ning B J. 2022. Sea-level monitoring and ocean tide analysis based on multipath reflectometry using received strength indicator data from multi-GNSS signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4211513 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3219074]
- Wang X L, He X F and Zhang Q. 2020. Coherent superposition of multi-GNSS wavelet analysis periodogram for sea-level retrieval in GNSS multipath reflectometry. *Advances in Space Research*, 65(7): 1781-1788 [DOI: 10.1016/j.asr.2019.12.023]
- Wang Z M, Liu Z K, An J C and Lin G B. 2018. Snow depth detection and error analysis derived from SNR of GPS and BDS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(1): 8-16 (王泽民, 刘智康, 安家春, 林国. 2018. 基于GPS和北斗信噪比观测值的雪深反演及其误差分析. 测绘学报, 47(1): 8-16) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20160644]
- Williams S D P and Nievinski F G. 2017. Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry—Experimental evidence from coastal sites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(3): 2310-2327 [DOI: 10.1002/2016JB013612]
- Yan S H, Zhang N, Chen N C and Gong J Y. 2018. Feasibility of using signal strength indicator data to estimate soil moisture based on GNSS interference signal analysis. *Remote Sensing Letters*, 9(1):

- 61-70 [DOI: 10.1080/2150704X.2017.1384587]
- Yang Y, Song L and Xu T. 2002. Robust estimator for correlated observations based on bifactor equivalent weights. *Journal of Geodesy*, 76(6/7): 353-358 [DOI: 10.1007/s00190-002-0256-7]
- Yu K G, Ban W, Zhang X H and Yu X W. 2015. Snow depth estimation based on multipath phase combination of GPS triple-frequency signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(9): 5100-5109 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2417214]
- Zhou W, Liu L L, Huang L K, Li J Y, Chen J, Chen F D, Xing Y and Liu L B. 2018. Monitoring snow depth based on the SNR signal of GLONASS satellites. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(5): 889-899 (周威, 刘立龙, 黄良珂, 黎峻宇, 陈军, 陈发德, 邢尹, 刘林波. 2018. GLONASS 卫星 SNR 信号的雪深探测. *遥感学报*, 22(5): 889-899) [DOI: 10.11834/jrs.20187126]

## Multi-mode and multi-frequency GNSS-MR snow depth inversion based on signal strength

CHEN Guoqing, HE Xiufeng, WANG Xiaolei, TU Jinsheng

*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*

**Abstract:** In recent years, with the development of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), a GNSS-multipath reflectometry (GNSS-MR) technique based on Signal-to-Noise Ratio (SNR) has been developed. This technology can obtain the information of the reflector by using a GNSS receiver and has the advantages of abundant signal sources and high sampling rate in snow depth inversion. However, many GNSS receivers do not record SNR observations. Thus, a multimode and multifrequency GNSS-MR snow depth inversion fusion method based on Signal Strength Indicator (SSI) is proposed in this study to make these receivers capable of snow depth monitoring. At the same time, aiming at the two main problems existing in GNSS-MR inversion of snow depth, that is, low precision and low time resolution, this method can also be effectively solved. This approach mainly benefits from the strategy of performing a robust estimation. The specific steps are as follows: first, by using SSI and SNR data of GPS, GLONASS, Galileo and Beidou, and using Lomb-Scargle Periodogram (LSP) method in classical snow depth retrieval principle, the snow depth retrieval values of each frequency band are obtained from four constellations. Then, a specific time window is established, and the state transition equation set is established in each time window considering the snow surface dynamic change and tropospheric delay. Finally, the snow depth time series is solved by a robust estimation model. In essence, it is a method of optimal valuation for GNSS-MR that is theoretically suitable for different geographical environments. In addition, this study selected a suitable station for snow depth retrieval experiments to prove the feasibility and effectiveness of the method. The experimental station is SG27 in Alaska, United States. Results show that the multifrequency SSI data of four global satellite systems can retrieve snow depth. Before multimode and multifrequency GNSS-MR snow depth inversion fusion, the results of SSI inversion at each frequency band have good correlation with the measured snow depth (except for Beidou frequency band, the other correlation coefficients is greater than 0.92). Considering the standard deviation and root mean square error of the retrieval results of different satellite systems, the retrieval results of GPS satellite system are the best, followed by GLONASS, then Galileo. However, the retrieval results of these three satellite systems are similar. The Beidou satellite system has the worst retrieval result. Among the four satellite systems, root mean square error of the frequency band with the best inversion result is 6.34 cm. After multimode and multifrequency GNSS-MR snow depth inversion fusion, the root mean square error between the SSI inversion results and the measured snow depth series is 2.36 cm, and the correlation coefficient is 0.98. At the same time, the multimode and multifrequency GNSS-MR snow depth inversion based on SNR data is also performed in the calculation example; the results of SSI inversion are consistent with those of SNR inversion, and the feasibility and effectiveness of multimode and multifrequency GNSS-MR snow depth inversion fusion based on SSI are verified by experiments.

**Key words:** GNSS-MR, multi-mode and multi-frequency, snow depth, robust estimation, signal strength

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41830110); National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC1503603)