



利用小波分解的GNSS-R雪厚反演改进算法

邓攀¹ 王泽民¹ 安家春¹ 张辛² 于秋则³ 孙伟⁴

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 长江勘测规划设计研究院长江空间信息技术工程有限公司(武汉),湖北 武汉,430010

3 武汉大学电子信息学院,湖北 武汉,430079

4 武汉市测绘研究院,湖北 武汉,430022

摘要:基于全球导航卫星系统反射测量(global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)数据的雪厚反演具有低成本、低功耗、全天时采集数据的特点,但利用GNSS信噪比观测值进行雪厚反演时,观测值受噪声信号功率影响较大,反演精度较低。基于此,提出一种基于小波分解的雪厚反演改进算法,利用小波分解良好的去噪效果,在不改变原始信号中的频率组成的情况下,较好地将噪声功率与信号功率分离。通过北极黄河站2017年年初日第32—100天采集的信噪比数据对此算法进行验证,由于黄河站雪厚变化复杂,同时对比分析了不同积雪状态下该算法的适用性。结果表明,所提反演算法与现有的雪厚反演算法相比,单天时间尺度上的反演结果与实测值的最大偏差由13.71 cm下降到9.43 cm,反演结果与实测值的中误差由7.08 cm下降到5.98 cm,反演结果本身的标准差由8.19 cm下降到7.07 cm,数据利用率由82.60%提升到89.31%。在雪面消融、积累、稳定时,反演结果与实测值的中误差分别由9.02 cm、10.30 cm、7.59 cm下降到5.82 cm、5.64 cm、7.17 cm,平均绝对误差分别由6.77 cm、7.52 cm、7.00 cm下降到5.39 cm、4.72 cm、6.73 cm。可见,在复杂的积雪变化下,所提改进算法反演结果的精度和可靠性有明显的改善。

关键词:GNSS反射信号;信噪比;雪厚反演;小波分析

中图分类号:P228.42

文献标志码:A

雪在气候变化和水文循环中扮演着重要角色。近年来,随着全球导航卫星系统反射测量(global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)技术的迅速发展,基于GNSS反射信号雪厚研究成为热点^[1-2]。在GNSS-R雪厚反演方面,GNSS信噪比观测值(signal-to-noise ratio, SNR)与反射面高度存在着一定函数关系,文献[3-4]利用长时间序列对比分析了GPS L1和L2C的反演结果,发现两者具有很好的一致性;文献[5]利用GPS L2P信噪比值成功反演得到雪厚,结果表明,虽然L2P信号功率低于L1,但两者结果没有明显差异;文献[6]联合GPS和俄罗斯全球导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)的信噪比观测值进行雪厚反演,所得结果没有明显差异;文献[7]利用GPS和北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)信噪比数据进行雪厚反演,详细研究了高

度角、弧段长度、卫星数量、方位角、星座结构、信号频率等多种因素对雪厚反演结果的影响。

上述研究结果均验证了基于GNSS-R雪厚反演的可行性。但是文献[8-9]发现单颗卫星的反演结果精度较低、可靠性不高,反演精度一般在厘米到分米级。经典的信噪比雪厚反演方法主要采用Lomb Scargle周期图(Lomb Scargle periodogram, LSP)来获取非均匀采样时间序列的频谱图,但受环境噪声和基底热噪声的影响,直接LSP谱分析的结果很难得到主频信息,反演结果误差较大。信噪比的提升方法包括经验模态解、独立分量分析以及小波分解等。经验模态解在低信噪比条件下会引起混叠效应,去噪效果不理想。基于独立分量分析的信号去噪方法在低信噪比时,信号的自相关矩阵可能会出现零特征值,无法完成白化过程,此时去噪方法失效。小波分析多分辨率分解的特点能很好地在时域

收稿日期:2020-03-14

项目资助:国家自然科学基金(41531069,41941010);中央高校基本科研业务费专项资金(2042019kf0220)。

第一作者:邓攀,硕士生,主要研究方向为GNSS反射信号。dengpan@whu.edu.cn

通讯作者:安家春,博士,讲师。jcan@whu.edu.cn

和频域表征信号的局部信息,克服了短时傅里叶变换在单分辨率尺度上的缺陷,现已广泛运用于时频分析、信噪分离与提取弱信号等信号分析研究中^[10-11]。因此,本文在LSP谱分析前先进行小波分解变换来降低噪声信号功率对信噪比时间序列的影响,以提高单颗卫星反演精度;然后充分利用多颗卫星多方位角的观测数据以及质量控制等手段,进一步提高反演精度;最后,对改进方法的反演效果以及适用性进行了相应的评估。

1 方法原理

1.1 基于LSP谱分析的反演算法

GNSS卫星发射的电磁波为右旋圆极化信号,经天线周围物体反射后,其极化特性会发生改变,反射信号的极化方式与反射面的介质特性有关,并且随卫星高度角的变化而不同。但在低卫星高度角时,极化特性改变量小,此时到达接收机的反射信号更易与直射信号产生干涉,可用于反射面物理特征的反演。反射信号相对于直射信号的相位差计算如下:

$$\delta\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \sin\theta(t) \quad (1)$$

式中, h 为天线相位中心到反射面的高度; λ 为L波段的信号波长; $\theta(t)$ 为卫星高度角。式(1)只考虑了镜面反射点的几何延迟,而忽略了菲涅尔散射区内其他漫反射对相位的影响。

GNSS观测值文件中,SNR与接收到的信号振幅之间的关系式可以表达为:

$$\text{SNR} = \frac{1}{2P_{\text{noise}}} (A_d^2 + A_m^2 + 2A_d A_m \cos\delta\varphi(t)) \quad (2)$$

式中, P_{noise} 为噪声功率; A_d 、 A_m 分别为直射信号强度、反射信号强度。低阶多项式去除趋势项后,信噪比观测值可以近似表示为:

$$\text{dSNR} \approx \frac{A_d A_m}{P_{\text{noise}}} \cos\delta\varphi(t) \quad (3)$$

由式(3)可以发现,去趋势项后的信噪比观测值是一个类正弦函数,其随着卫星高度角的变化而振荡,振荡频率可以通过对卫星高度角随时间的变化微分得到,即:

$$\frac{d(\delta\varphi(t))}{d(\sin\theta(t))} = 2\pi \cdot \frac{2h}{\lambda} = 2\pi \cdot f \quad (4)$$

由式(4)可以发现,反射信号相对于直射信号的相位差与卫星高度角的正弦是线性函数关系,且该线性函数关系式中的频率信息包含了高度信息。因此,本文通过提取其中的频率信息可

反演天线相位中心到反射面的高度,从而间接得到雪的厚度信息。由于dSNR序列是按照历元采样的,并非等间隔的 $\sin\theta(t)$ 函数,本文使用LSP谱分析处理去趋势项后非均匀采样的信噪比时间序列,获取其对应的频谱信息^[12-13]。

1.2 基于小波分析的改进方法

由于GNSS卫星普遍采用直接序列扩频技术进行信号传播,因此卫星信号一般会淹没在噪声中。对于GPS而言,最低的信号功率为-160 dBW,考虑到GPS信号带宽为2 MHz,接收到的GPS信号功率实际上是低于基底热噪声,此外,接收到的卫星信号功率受周围环境噪声的影响也较大。图1为中国北极黄河站GPS PRN17卫星2017年年积日(day of year, DoY)第48天dSNR时间序列的LSP谱分析结果。

由图1可以发现,受环境噪声及基底热噪声的影响,直接LSP谱分析的结果很难得到主频信息,此时得到的反演结果缺乏可靠度与准确度。因此,在利用信噪比观测值进行雪厚反演时,观测值的质量控制尤为重要。所以,本文在对信噪比时间序列进行LSP谱分析前,先进行小波分解变换,以减少噪声信号功率对结果的影响。

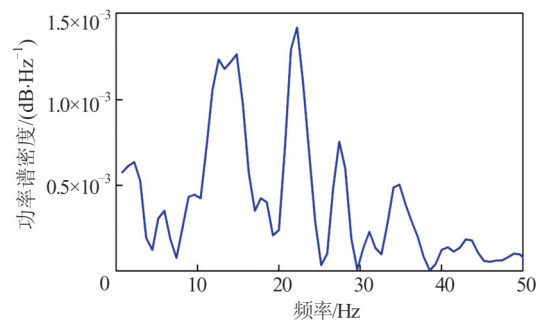


图1 黄河站GPS PRN17卫星dSNR时间序列LSP谱分析结果

Fig.1 LSP Spectrum Analysis Result of dSNR Time Series for GPS PRN17 at the Yellow River Station

文献[14]提出的小波变换分解将满足条件的信号表示为一系列逐次逼近表达式,其中每一个表达式都是原始信号经平滑后的形式,分别对应不同的分辨率。小波分析克服了短时傅里叶变换在单分辨率上的缺陷,具有多分辨率分析的特点,在时域和频域都有表征信号局部信息的能力,时间窗和频率窗都可以根据信号的具体形态来动态调整。多分辨率分析就是构造空间集合的闭包逼近 $L(R)^2$ 的一组函数,在每个空间中,这组函数的集合构成该空间的标准化正交基。对于任意给定的信号,其在小波空间的展开为:

$$f(t) = \sum_{j \in Z} f_{W_j} = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} (f(t), \psi_{j,k}(t)) \psi_{j,k}(t) \quad (5)$$

式中, W_j 是 $L^2(R)$ 上闭子空间 V_j 的正交补集, 即 $W_j \perp V_j$ 且 $V_{j+1} = W_j \oplus V_j$; $\psi(t)$ 是 $L^2(R)$ 中的一个函数, 其对应的多分辨率分析为:

$$f(t) = \sum_{j \in Z} (f(t), \varphi_{j,k}(t)) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j \leq J} \sum_{k \in Z} (f(t), \psi_{j,k}(t)) \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

式中, $\varphi(\cdot)$ 为尺度函数; j 为分辨率尺度; J 为最大分辨率尺度; k 为平移尺度。已有的研究表明, 由于不同卫星高度角范围下, 反射信号与直射信号发生干涉的难易程度不同, 最终反演结果差异较大。一般情况下, 低卫星高度角条件下 SNR 观测数据质量优于高卫星高度角。同时, 文献[7]详细对比分析了不同高度角范围下雪厚反演结果的差异, 最终发现高度角范围为 $5^\circ \sim 25^\circ$ 的观测值反演得到的结果具有较低的粗差别除率, 结果可靠性高。因此, 本文选取卫星高度角为 $5^\circ \sim 25^\circ$ 的 SNR 观测数据作进一步分析处理。PRN17 卫星 2017 年年积日第 48 天 dSNR 时间序列的离散小波分解结果如图 2 所示, 横坐标是高度角的正弦函数 $\sin\theta$, cD1~cD6 分别代表分辨率尺度 1~6 下的精细系数 (coefficients of detail), 其分解结果分别如图 2(b)~2(g) 所示; cA6 为分辨率尺度 6 下的初略系数 (coefficients of approximation level 6), 其分解结果如图 2(h) 所示。

不同的分辨率尺度对应不同的频率窗口, 其频率窗口的范围为 $[w_j - \Delta w_j, w_j + \Delta w_j]$, w_j 为中心频率, Δw_j 为频率半径。对于去趋势项后得到的信噪比时间序列, 采用 Mallat 算法进行多分辨率分析, 对原始信号结构进行重构, 提取出感兴趣的特征^[15]。经过对比实验研究, 本文对其进行紧支撑正交小波分解, 小波阶数为 6^[16]。不同分辨率尺度对应的频率计算公式为:

$$w_j = \frac{1}{\|\varphi_{j,k}\|_0^2} \int w |\varphi_{j,k}|^2 dw \quad (7)$$

$$\Delta w_j = \frac{1}{\|\varphi_{j,k}\|_0^2} \left\{ \int (\omega - w_j)^2 |\varphi_{j,k}|^2 d\omega \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

由于 W_j 是 V_j 的正交补集, 所以 W 也是正交序列集, 且不同的分辨率尺度对应完全不同的频率, 分辨率尺度越高, 频率窗口越窄。小波分解变换结果得到的详细系数对应不同的信号频率, 如接收机热噪声频率、环境噪声频率、与雪厚信息有关的信号频率等。为进一步确定原始信号

中与雪厚有关的频率信息, 对得到的各分辨率尺度上的详细系数进行 LSP 谱分析, 得到其对应的频率信息, 其不同分辨率尺度对应的 LSP 谱分析结果如图 3 所示。

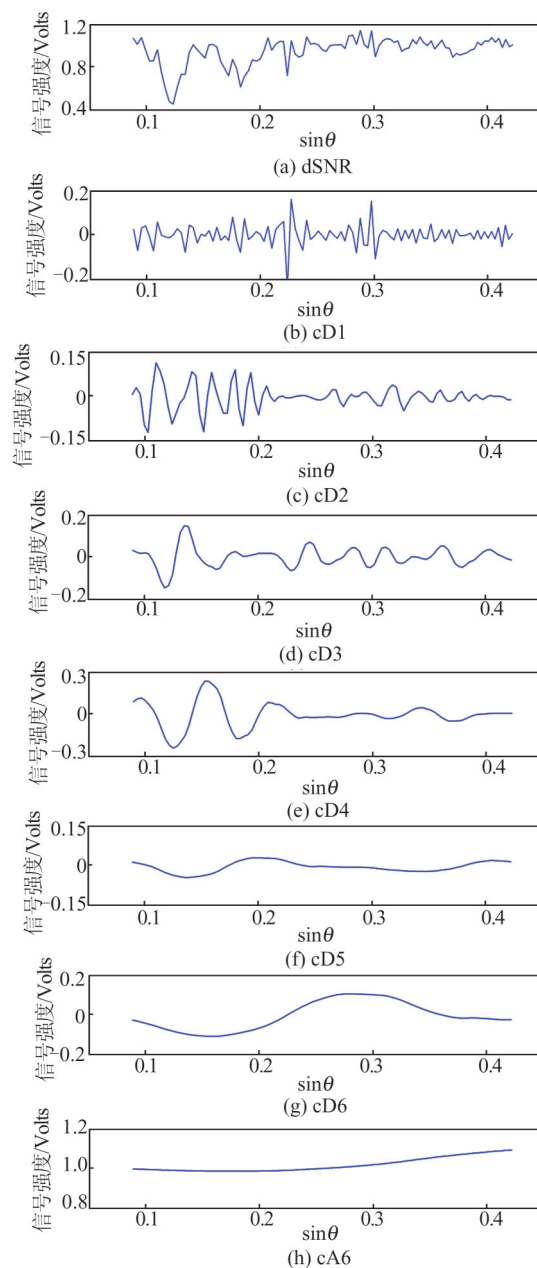


图2 黄河站 GPS PRN17 卫星 2017 年年积日第 48 天 db6 小波分解结果

Fig.2 Wavelet Decomposition Results of db6 of GPS PRN17 at the Yellow River Station on DoY 48, 2017

如图 3 所示, 分辨率尺度 5、6、4+5、5+6 LSP 谱分析得到的主频信号频率分别为 5.203、2.973、16.35 和 2.23 Hz, 其反演对应的雪厚分别为 120.49 cm、141.71 cm、14.41 cm 和 148.78 cm。根据气象站提供的实测资料, 2017 年年积日第 48 天 06:00 测得的雪厚为 19 cm。此外, 由图 3 可以

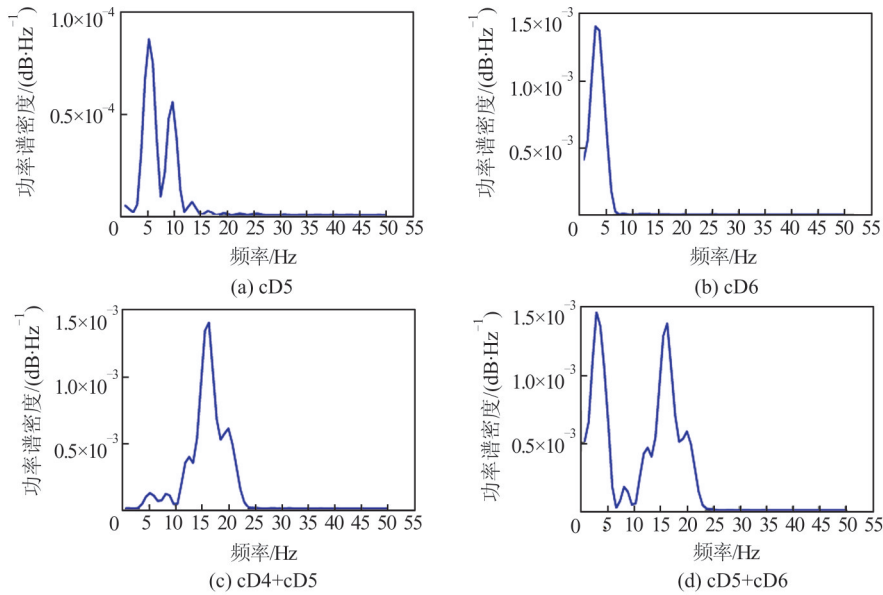


图3 cD5、cD6、cD4+cD5和cD5+cD6对应的LSP谱分析结果

Fig.3 Spectrum Analysis Results with LSP About cD5, cD6, cD4+cD5 and cD5+cD6

发现,分辨率尺度4+5较其他尺度降噪效果明显,经多分辨率分析后,主频信号特征明显。因此,分辨率尺度为4+5的精细系数与实测资料有较好的相关性,其对应的反演结果能大致代表雪厚的实际变化情况。

此外,由于利用单颗卫星反演得到的结果可靠性不高,误差较大,不能很好地反映一定空间范围内雪厚变化趋势,同时为了充分利用已有数据资源,本文利用所有可见GPS卫星进行反演计算。为降低偶然误差对反演结果的影响,数据处理过程剔除了偶然误差超过3倍中误差的雪厚反演值,所有卫星反演结果均值作为最终反演值。

2 实验结果及分析

本文在中国北极黄河站开展了GNSS-R雪厚反演实验。黄河站位于11°56'E、78°55'N的挪威斯匹次卑尔根群岛的新奥尔松,是中国建立的首个北极科考站。黄河站GPS常年观测站周围地势平坦,地面起伏变化小,可以将反射面看作平面处理^[7]。观测站所使用的接收机类型为和芯星通UR4B0,天线类型为诺瓦泰GNSS-750,采样频率为30 s。室外天线到无雪地面的高度是1.7 m,在卫星高度角为5°~25°时,能进入天线的反射信号主要来自测站周围3~20 m的环形区域。图4给出了2017年年积日第48天黄河站实际跟踪到并且可用于雪厚反演的GPS卫星的环视图,可见卫星及其相应反射点的分布较为均匀,可以使用多颗卫星进行雪厚反演。

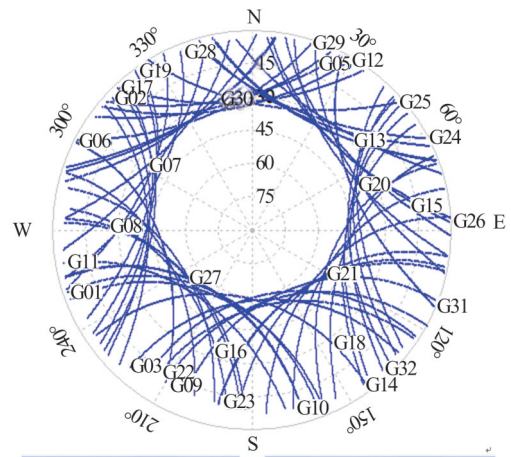


图4 2017年年积日第48天黄河站实际跟踪到的GPS卫星的环视图

Fig.4 Skyplot of GPS Satellites Tracked at the Yellow River Station on DoY 48, 2017

距离黄河站约1 km的新奥尔松气象站能够提供每天06:00的雪厚实测资料,该观测值可以作为黄河站周围雪厚真值进行验证。

采用2017年年积日第32—100天的GPS L1数据,提取出高度角范围5°~25°的信噪比时间序列,进而采用本文提出的改进算法进行雪厚反演。为了充分验证改进算法的有效性,本文从改进前后两种反演方法与真值的偏差、中误差、数据利用率等方面进行比较。

2017年年积日第48天PRN17卫星4段SNR时间序列反演结果如表1所示。由表1可以发现,对4个弧段直接LSP谱分析的结果与实测值差异均较大,不能反映出雪厚变化趋势,反演结

果误差较大。小波分解后的 LSP 谱分析结果,其反演雪厚值均在实测值附近波动,能很好地代表雪厚变化趋势,在允许误差范围内,其反演结果均值能代表当天的雪厚值。因此,单颗卫星直接进行 LSP 谱分析时,受噪声信号功率的

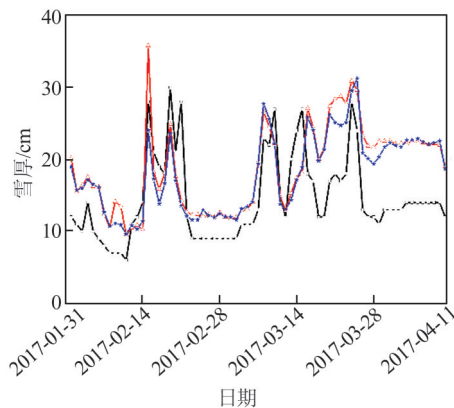
影响,反演结果波动范围大,可靠性低。相对于直接 LSP 谱分析,小波分析具有良好的去噪效果,其不同分辨率尺度上的精细系数能很好地保留雪厚的变化信息,进而提高反演结果的可靠性。

表 1 PRN17 卫星 2017 年第 48 天雪厚反演结果

Tab.1 Snow Depth Inversion Results of PRN17 Satellite on DoY 48, 2017

反演结果	弧段				均值	实测值
	1	2	3	4		
直接 LSP 谱分析结果/cm	120.49	33.62	120.12	1.97	69.05	18
小波分解后 LSP 谱分析结果/cm	14.41	26.44	6.12	1.97	12.24	

图 5 展示了本文改进算法和传统算法在观测时段内的反演结果均值与实测值的比较。由图 5 可以发现,综合所有卫星反演结果,两种算法均能与实际雪厚变化趋势保持很好的一致性,改进算法优于原有算法;当地面实际雪厚变化不大时,反演结果比较稳定,虽然与实测值之间存在一定的系统误差,但反演精度高、结果可靠。当地面实际雪厚突然增加或减少时,反演误差相对较大。



— 实测值 — 直接 LSP 谱分析结果 — 小波分解后 LSP 谱分析结果

图 5 两种算法的反演结果均值与实测值比较

Fig.5 Comparison of the Mean Values of Inversion Results of Two Algorithms with the Measured Values

两种算法的反演结果与实测值的差异对比如图 6 所示。可见,在观测时间内,直接 LSP 谱分析结果与实测值最大偏差为 13.71 cm,小波分解后 LSP 谱分析结果与实测值最大差异为 9.43 cm,反演结果与实测值的中误差分别为 7.08 cm 和 5.98 cm,相对于原有算法,改进算法的精度有所提高。

由于反演结果是一天内多个单星结果的平均值,因此反演结果本身的标准差能很好地反映不同卫星间结果差异与反演结果的稳定性。图 7

展示了两种算法反演结果的标准差,可以发现,相对于直接 LSP 谱分析,小波分解后的 LSP 谱分析结果波动更小,改进算法的反演结果更为可靠,标准差由 8.19 cm 下降到 7.07 cm,反演精度有一定的提高。

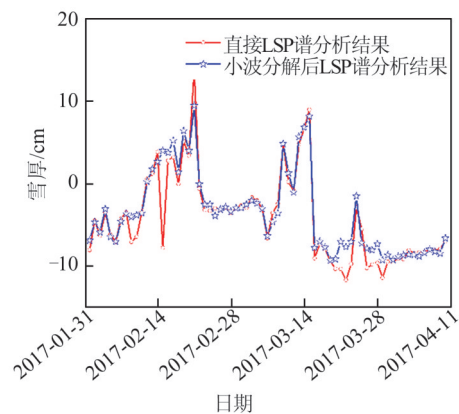


图 6 两种算法所得反演结果与实测值的差值对比

Fig.6 Deviation Comparison of the Inversion Results of Two Algorithms with the Measured Values

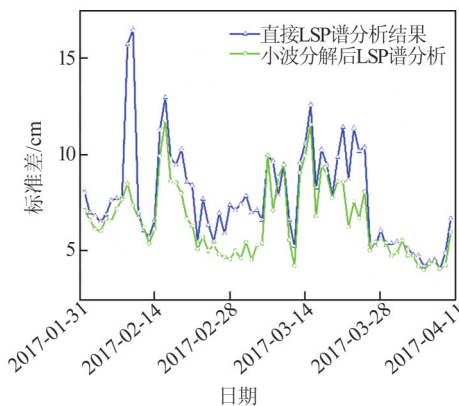


图 7 两种算法的反演结果标准差

Fig.7 Standard Deviations of the Inversion Results of Two Algorithms

由于数据处理过程剔除了偶然误差超过 3 倍中误差的雪厚反演值,因此反演算法改进前后的

误差剔除率或数据利用率也可作为精度比较的重要参考。图8为两种反演算法数据利用率的比较,可见,受观测数据质量的影响,两种反演算法数据利用率的变化趋势保持一致,相对于直接进行LSP谱分析,小波分解后的LSP谱分析有更低的粗差剔除率,能很好地提高数据利用率,所得反演结果更可靠。在观测时段内,相对于直接LSP谱分析,小波分解后LSP谱分析的数据利用率由82.60%提升到89.31%。

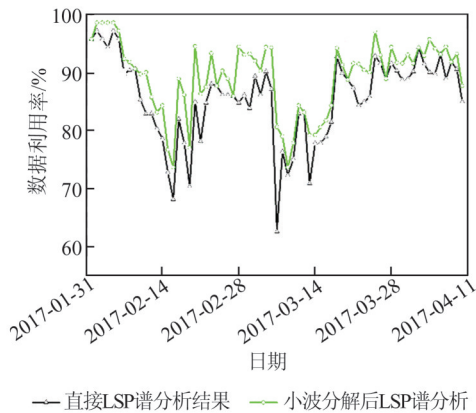


图8 两种算法数据利用率的比较

Fig.8 Comparison of Data Utilization Rate of Two Algorithms

影响上述反演结果的原因主要包括两方面,一是GNSS-R的反演结果和气象站结果的时间尺度和空间位置有一定差异,二是黄河站积雪反复积累和消融,变化复杂。因此,为进一步验证改进算法的可靠性与适用性,在观测时间段内,将积雪的变化分为雪面消融、雪面积累以及雪面稳定3个阶段,分别研究不同阶段雪厚反演结果与实测结果的差异。其中,雪面积累定义为连续3天内积雪增加量达2 cm,雪面消融定义为连续3天内积雪减少量达2 cm,雪面稳定定义为连续3天内积雪变化量在1 cm以内。由图5可以发现,该段时间内积雪经历了3次比较完整的雪面积累与雪面消融以及两次的雪面稳定,分别是年积日第32—42天、第46—55天、第74—78天的雪面消融阶段,年积日第42—46天、第62—74天、第78—84天的雪面积累以及第55—62天、第84—100天的雪面稳定。本文从反演结果与实测值的相关系数、中误差以及平均绝对误差对改进算法进行综合评估,结果如表2所示。

由表2可以发现,在积雪发生变化的时期,本文提出的改进算法的反演结果较传统算法有比较大的改善,雪面消融时,反演结果与实测值的中误差由9.02 cm下降到5.82 cm,平均绝对误差

由6.77 cm下降为5.39 cm;雪面积累时,反演结果与实测值的中误差由10.30 cm下降为5.64 cm,平均绝对误差由7.52 cm下降到4.72 cm;在雪面稳定时,改进算法反演结果也有一定的提升,但差异不太明显。可能的原因是在积雪变化时,积雪表面的物理特征参数如介电常数、积雪粒径以及表面粗糙度等发生显著变化,会对接收信号功率产生一定的影响^[17]。小波分解的去噪效果能很好地剔除这一部分噪声信号,从而很好地改善反演结果;而积雪稳定期时,积雪表面物理特征稳定,小波分解也不会改变原始信号中的频率组成,故两种算法没有明显差异。因此,本文提出的改进算法能明显提高积雪厚度变化时的反演结果精度和可靠性。

表2 不同阶段积雪反演结果比较

Tab.2 Comparison of snow Inversion Results at Different Stages

反演结果	雪面消融阶段		雪面积累阶段		雪面稳定阶段	
	传统算法	改进算法	传统算法	改进算法	传统算法	改进算法
	相关系数	0.65	0.71	0.65	0.76	0.93
中误差/cm	9.02	5.82	10.30	5.64	7.59	7.17
平均绝对误差/cm	6.77	5.39	7.52	4.72	7.00	6.73

综上所述,小波分解变换多尺度分析由整体到局部逐步观察信号的特点,能极大地减少噪声功率对原始信号的干扰,从而减少偶然误差对反演结果的影响,减少了粗差剔除率,提高了数据利用率,能极大地提高单颗卫星反演结果的可靠性以及雪厚变化时反演结果的精度。

3 结 语

由于小波分析可以很好地分离噪声功率与信号功率而不改变原始信号中固有的频率,本文提出的基于小波分解的雪厚反演算法能明显提高单颗卫星反演结果的精度和可靠性,从而提高单天雪厚反演结果的精度、可靠性和数据利用率以及雪厚变化时反演结果的精度。

本文的研究主要基于GPS L1波段卫星信号进行反演,随着全球导航卫星系统的不断发展与完善,未来的研究将聚焦于不同频率的L波段信号以及不同导航卫星星座之间数据的融合与综合利用。此外,已有的雪厚反演算法都是对一

定时间段内观测值统计分析的结果,要想得到更高时空分辨率的反演结果,仍需进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Jacobson M D. Dielectric-Covered Ground Reflectors in GPS Multipath Reception-Theory and Measurement[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3):396-399
- [2] Siegfried M R, Medley B, Larson K M, et al. Snow Accumulation Variability on a West Antarctic Ice Stream Observed with GPS Reflectometry, 2007—2017 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(15):7 808-7 816
- [3] Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al. Can We Measure Snow Depth with GPS Receivers? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): 7 502-7 506
- [4] Larson K M, Small E E. Estimation of Snow Depth Using L1 GPS Signal-to-Noise Ratio Data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4 802-4 808
- [5] Jin S, Qian X, Kutoglu H. Snow Depth Variations Estimated from GPS-Reflectometry: A Case Study in Alaska from L2P SNR Data[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1):63-77
- [6] Tabibi S, Geremia-Nievenski F, Van Dam T. Statistical Comparison and Combination of GPS, GLONASS, and Multi-GNSS Multipath Reflectometry Applied to Snow Depth Retrieval [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7):3 773-3 785
- [7] Wang Zemin, Liu Zhikang, An Jiachun, et al. Snow Depth Inversion Based on GPS and BeiDou SNR Observations and Its Error Analysis[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(1): 8-16 (王泽民, 刘智康, 安家春, 等. 基于 GPS 和北斗信噪比观测值的雪深反演及其误差分析[J]. *测绘学报*, 2018, 47(1):8-16)
- [8] Gutmann E D, Larson K M, Williams M W, et al. Snow Measurement by GPS Interferometric Reflectometry: An Evaluation at Niwot Ridge, Colorado [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(19):2 951-2 961
- [9] Zhang Shuangcheng, Dai Kaiyang, Nan Yang, et al. Preliminary Research on GNSS-MR for Snow Depth [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 234-240 (张双成, 戴凯阳, 南阳, 等. GNSS-MR 技术用于雪深探测的初步研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(2): 234-240)
- [10] Wang X, Zhang Q. Water Levels Measured with SNR Using Wavelet Decomposition and Lomb-Scargle Periodogram[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 66-80
- [11] Bilich A, Larson K M. Mapping the GPS Multipath Environment Using the Signal-to-Noise Ratio (SNR)[J]. *Radio Science*, 2007, 42(6):RS6003
- [12] Lomb N R. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data [J]. *Astrophysics and Space Science*, 1976, 39(2):447-462
- [13] Scargle J D. Studies in Astronomical Time Series Analysis: II-Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data [J]. *The Astrophysical Journal*, 1982, 263(2):835
- [14] Grossmann A J. Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape [J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1984, 15(4):723-736
- [15] Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7):674-693
- [16] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets [C]//Cbms-Nsf Regional Conference Series in Applied Mathematics, Philadelphia, USA, 1992
- [17] Yu K, Ban W, Zhang X, et al. Snow Depth Estimation Based on Multipath Phase Combination of GPS Triple-Frequency Signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9): 5 100-5 109

An Improved Algorithm Based on Wavelet Decomposition to Retrieve Snow Depth Using GNSS-R Signals

DENG Pan¹ WANG Zemin¹ AN Jiachun¹ ZHANG Xin² YU Qiuze³ SUN Wei⁴

¹ Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co. Ltd, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China

³ School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

⁴ Wuhan Geomatics Institute, Wuhan 430022, China

Abstract: Objectives: Snow depth retrieval using global navigation satellite system (GNSS) reflected signals has the characteristics of low cost, low power consumption and all-day data collection. Because the signal-to-noise ratio (SNR) observations of GNSS are greatly affected by the noise power, we aim to retrieve snow depth in low noise and analyze snow depth variations in different snow surface characteristics. **Methods:** An improved algorithm is proposed to retrieve snow depth by introducing wavelet decomposition before spectral analysis, which can effectively separate the noise power from the signal power without changing the frequency composition of the original signal. This algorithm is verified by the SNR data collected at the Arctic Yellow River Station in the Winter and Spring of 2017. Furthermore, considering the complex variation of snow depth at the Yellow River Station, the applicability of this improved algorithm under different snow surface conditions was analyzed. **Results:** Compared with the original algorithm, the maximum bias of the improved algorithm between the estimation and the measurement decreases from 13.71 cm to 9.43 cm, the root mean squared error (RMSE) decreases from 7.08 cm to 5.98 cm, the standard deviation decreases from 8.19 cm to 7.07 cm, and the data utilization rate increases from 82.60% to 89.31%. In the snow surface conditions of ablation, accumulation and stabilization, the RMSE of improved algorithm decreases from 9.02 cm, 10.30 cm, 7.59 cm to 5.82 cm, 5.64 cm, 7.17 cm, and mean absolute error decreases from 6.77 cm, 7.52 cm, 7.00 cm to 5.39 cm, 4.72 cm, 6.73 cm, respectively. **Conclusions:** It can be seen that the proposed algorithm can provide more accurate and reliable snow depth even if in the conditions of ablation and accumulation.

Key words: GNSS reflection signal; signal-to-noise ratio; snow depth retrieve; wavelet analysis

First author: DENG Pan, postgraduate, specializes in GNSS reflection signal. E-mail: dengpan@whu.edu.cn

Corresponding author: AN Jiachun, PhD, lecturer. E-mail: jcan@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41531069, 41941010); Fundamental Research Funds for Central Universities (2042019kf0220).

引文格式: DENG Pan, WANG Zemin, AN Jiachun, et al. An Improved Algorithm Based on Wavelet Decomposition to Retrieve Snow Depth Using GNSS-R Signals[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6): 863-870. DOI: 10.13203/j.whugis20190181 (邓攀, 王泽民, 安家春, 等. 利用小波分解的GNSS-R雪厚反演改进算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6): 863-870. DOI: 10.13203/j.whugis20190181)