引文格式：宋少辉,吴学睿,赵乐文. 基于GPS-IR的复杂寒区地表冻融状态监测研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(4): 65-70. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.04.015

基于GPS-IR的复杂寒区地表冻融状态监测研究

宋少辉[1]，吴学睿[2]，赵乐文[1*]
（1. 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院，江苏 南京 210044；2. 中国科学院上海天文台 天文地球动力学研究中心，上海 200030）

摘　要：针对复杂寒区地表冻融状态情况，基于GPS-IR（Global Positioning System-Interference Reflectometry）技术进行地表冻融状态监测精度研究。采用2017—2022年PBO（The Plate Boundary Observatory) GPS站点数据，结合SNOTEL气象站地表实测数据，充分考虑了复杂寒区地表积雪深度、土壤湿度和地表冻融状态对GPS（Global Positioning System）多路径观测值的影响，基于GPS-IR技术利用卫星反射信号来进行地表冻融状态监测。结果表明：在积雪深度和土壤湿度时间序列平稳的状态下，GPS-IR技术的冻融监测精度为90.63%，积雪深度和土壤湿度的波动都会导致监测精度下降。实验表明GPS-IR技术的监测精度会受到积雪深度和土壤湿度的影响，在地球物理参数小范围变化的情况下监测精度较好，对地表冻融状态响应敏感，是一种有效监测复杂寒区冻融特性的有效手段。

关键词：GPS-IR；积雪深度；土壤湿度；地表冻融状态；多路径观测值
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）04-0065-06

Surface Freezing-thawing Monitoring in Complex Cold Region Based on GPS-IR

SONG Shaohui[1], WU Xuerui[2], ZHAO Lewen[1]
(1. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the situation of surface freezing-thawing state in complex cold regions, we studied the monitoring accuracy of surface freezing-thawing state based on GPS-IR technology. We used PBO GPS site data from 2017 to 2022 and SNOTEL meteorological in-situ data, considering the effects of snow depth, soil moisture and surface freezing-thawing process on GPS multipath observables, and based on GPS-IR technology, used the satellite reflected signal to monitor surface freezing-thawing status. The results indicate that the retrieval accuracy is 90.63% when the time series of snow depth and soil moisture keep stable, while the fluctuations of snow depth and soil moisture will both decrease the final retrieval accuracy. The soil freezing-thawing process detection is sensitive to the geophysical parameters, and can achieve a good accuracy as the other influence factors keep in a small variation range.

Key words: GPS-IR, snow depth, soil moisture, surface freezing-thawing state, multipath observation

地表冻融循环分布广泛且动态性强，随着季节变化会重复发生，与水循环、碳循环、植被净初级生产量以及能量平衡过程关系紧密，是全球气候变化的重要指示器[1-2]。冻融土壤分为冻土和融土，冻土和融土最直观的判别因素是土壤温度，传统冻融监测方法主要采用现场测点的方法，研究者主要是在研究区内布设站点的方式来进行地表冻融的监测，这种方法的好处是测量的温度指标准确，精度很高，然而冻土区域非常宽广，且具有广泛的异质性，现场观测站需要的人力成本高、耗时长且分布不均匀，时空分辨率差不能满足实际需要。随着全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）技术研究的不断发展，多路径效应不再作为误差源，经地面反射的卫星信号已经发展为一种新兴遥感信号源，利用接收到的反射信号可以反演出地球环境参数，GPS-IR（global positioning system-interference reflectometry）技术作为GPS反射测量的一个分支，是利用地球测绘或地球物理中GPS接收机中的多路径数据对地物参数进行遥感监测的新方法，该种遥感方式存在着体积小、重量轻、功耗低和时空分辨率高等显著特点。其应用领域目前主要涉及土壤水分[3-4]、植被含水量[5-6]、积雪深度[7-8]和海平面高度[9-10]等地表环境参数的研究。

收稿日期：2022-11-23。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（42061057、42104018）；江苏省高校自然科学研究资助项目（20KJB170008）。
第一作者简介：宋少辉（1996—），硕士研究生，研究方向为全球导航卫星系统干涉反射测量，E-mail：shsong96@yeah.net
通信作者：赵乐文（1991—），博士，讲师，研究方向为北斗/GNSS高精度导航、定位理论方法、软件系统及其应用，E-mail：lwzhao@nuist.edl。

基于GPS-IR技术进行地表冻融状态监测是一个相对崭新的应用领域，相关研究人员利用前向GPS多路径模型和GPS双站雷达积分信号模型，在地表冻融特性微波散射模型的基础上，已经在理论上验证了GPS-IR技术进行地表冻融特性监测的有效性[11-13]。同时结合IGS（International GNSS Servics）台站数据和CYGNSS（Cyclone Global Navigation Satellite System）数据进行了相关性分析[14-15]。但上述研究基本只考虑在地球物理参数变化平稳状态下相关性的好坏，对复杂寒区中积雪厚度和土壤湿度的影响研究相对较少。鉴于此，本文通过GPS接收机获取卫星数据，基于GPS-IR技术在积雪、土壤湿度平稳以及相对变化较大的时段下对复杂寒区地表冻融状态进行监测，分析不同地球物理参数下对其监测精度的影响。

1 理论与方法

1.1 冻融状态监测原理

针对冻融地表，冻结土壤可以看作是由空气、固体颗粒、自由水、结合水和冰5种物质组成，其符合介电常数理论上受入射电磁波的频率、温度和土壤含水量等因素影响，土壤最终的介电常数是由各个成分之间相互作用的结果。介质混合介电模型[16-21]是用来计算土壤和水的混合物的介电常数，其公式为：

$$\varepsilon^{\alpha}=V_s\varepsilon_s^{\alpha}+V_a\varepsilon_a^{\alpha}+V_{fw}\varepsilon_{fw}^{\alpha}+V_{bw}\varepsilon_{bw}^{\alpha}+m_{vi}\varepsilon_i^{\alpha} \quad (1)$$

式中，ε为介电常数；V为土壤中不同成分的体积；上标α为形状常数因子；下标S、a、fw、bw和i分别指固体土壤、空气、自由水、结合水和冰。

土壤介质混合介电模型求出介电常数后作为后续实验分析时的参数输入，图1[14]所示的是实验得出冻土和融土的介电常数，二者差异明显，冻融转换会改变地表土壤的散射特性，进而改变地表反射率的变化，这是GPS-IR技术监测地表冻融状态的理论依据。

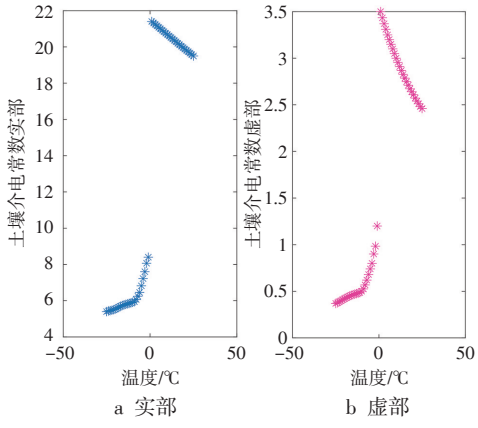


图1 土壤介电常数与土壤温度关系图

冻融转换时由图1可以看出在GPS L1载波频率下，土壤介电常数实部1a和虚部1b随土壤温度的变化情况，融化土壤的介电常数比冻结土壤的介电常数大得多。当土壤温度低于0℃时，介电常数的实部和虚部随土壤温度的增加而增大；当土壤温度大于0℃时，变化趋势正好相反。当土壤从冻结（融化）状态变为融化（冻结）状态时，土壤介电常数有很大差异。土壤介电常数实部反映的是电磁波的折射和反射现象，虚部与电磁波衰减（吸收和转换）有关。因此，土壤介电常数在冻融转换期间具有明显的变化规律，介电常数的变化会导致地表反射率的变化，地表反射率变化会导致GPS多路径观测值改变。

1.2 GPS-IR原理

GPS接收机不仅接收来自卫星发射的直射信号，也接收经过地面反射的反射信号，如图2所示。每个历元下GPS接收机记录导航电文、载波相位与伪距观测值以及信噪比（signal-noise ratio，SNR）。

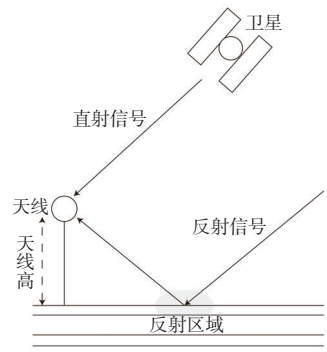


图2 GPS-IR原理示意图

GPS-IR技术就是利用SNR数据中的反射信号来估算地球物理参数，SNR观测值是由具体的直射信号、反射信号和2种信号干涉而成，具体关系如下：

$$\mathrm{SNR}\propto P_d+P_r+2\sqrt{P_dP_r}\cos\varphi \quad (2)$$

式中，SNR为合成信号的信噪比；P_d、P_r和φ分别为直接功率、反射功率和干扰相位；P_d和P_r项两者为信噪比的趋势项，由Nievinski和Larson[22-23]开发的可以同时考虑GPS信号极化、天线和地表响应的全极化前向GPS多路径模型得到。

由于GPS接收机接收到的一阶SNR是由直接信号功率决定的，需要将反射信号功率从GPS接收的多路径信息中分离出来，SNR与相位φ之间存在一种正弦或余弦关系，且去除GPS直射信号后的反射信号与卫星高度角正弦值存在一种线性关系故去除直接信号的信噪比表示为：

$$\mathrm{SNR}_r=A\cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin\theta+\varphi\right) \quad (3)$$

式中，SNR_r 为反射信号分量；A 为反射信号相对幅度；h 为天线高度；λ 为波长；θ 为卫星高度角。基于以上条件，卫星信号的好坏对地表冻融监测精度非常重要，所以在数据处理前要筛选出较好的卫星信号用以实验分析。

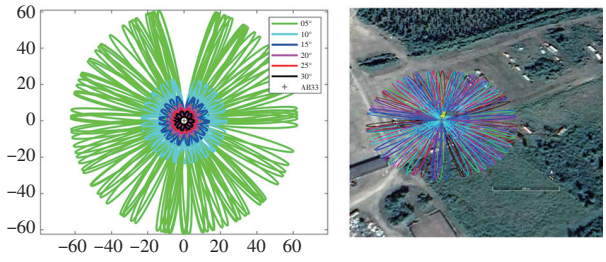
2　研究区及数据预处理

2.1　研究区

针对本研究的复杂寒区冻融地表，要求研究区地表观测量同时包含地表温度，土壤湿度和积雪深度信息，进而分析各种参数对最终GPS多路径数据的影响。

因此，本研究选择了一个PBO观测网中的GPS站点用于接收GPS多路径观测值用于监测地表冻融状态，该站点为ColdFoot_AK2006，ID为AB33，站点位于阿拉斯加（经度：67.25；纬度：－150.17；海拔334.76 m），站点属于亚温带气候，站点周围常年积雪，气候环境较为恶劣，接收机周围无障碍物遮挡，信号良好，AB33站点环境如图3所示。AB33站点数据数据格式为RINEX，以ASC Ⅱ格式像公众提供。站点数据采样率间隔15 s。

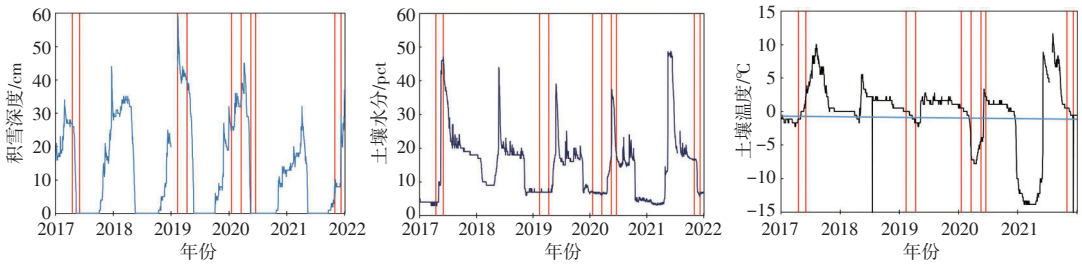
AB33站中的接收机天线与地面垂直高度为2 m，2种视角下的菲涅尔反射区如图3所示，图3a表明在高度角5~30°下的AB33站点可以接收到附近60 m的反射信号。图3b是AB33站点地图视角下的菲涅尔反射区，根据图中彩色条带分布范围可以确定在0~360°方位角范围内都可以接收到来自地面的反射信号。



a 菲涅尔反射区/m　　b 地图视角下的菲涅尔反射区

图3　不同视角下的菲涅尔反射区

考虑到GPS-IR分辨率[12]在1 km内选取了一个SNOTEL气象站（http://pbo.unavco.org）站点ColdFoot（Site Id 958）（纬度：67.25；经度：－150.18；海拔：316.99 m）。本研究的时间范围从2017—2022年之间。图4显示2017—2022年的积雪深度、近地表土壤湿度和土壤温度的时间序列，图4a显示的是积雪深度的时间序列图，每年大约5月到10月期间没有降雪；图4b是土壤湿度的时间序列图，土壤湿度的变化没有固定规律；图4c是土壤温度的时间序列图。图4中红色竖线区间是接下来实验选用的数据，在进行近地表冻融状态监测时，为了突出问题方便研究，选择在地表冻融转换发生的时期进行研究分析。



a 积雪深度序列图　　b 土壤湿度序列图　　c 土壤温度序列图

图4　Coldfoot站点地球物理观测参数

2.2　数据预处理

2.2.1　频段选择

GPS卫星星座的任何频率都可以用于地球物理参数的研究，不存在微波散射差异，在进行冻融转换监测时选用L载波频率是因为水和冰的介电常数差异在L波段更为显著，对地表冻融状态转换的监测更为敏感；L载波频率的波长范围在15~30 cm，穿透深度更深，L载波波长远大于土壤、植被、积雪层中散射体尺寸，有机会获取植被和干雪覆盖之下的土壤冻融信息。

对于L波段载波频率，土壤介电常数的实部和虚部变化从－1℃到1℃，如表1所示。在冻融转换发生时时，L波段载波频率相对应介电常数几乎相同，具有非常相似的散射特性，故GPS L波段载波频率在介电常数方面的影响可以忽略。因为L_2和L_5载波频率接收的卫星信号和SNR数据不如L_1载波，为保证监测精度不受信号干扰，后续数据处理和实验分析选择L_1载波频率。

表1　GPS L_1和L_2载波频率下冻（－1℃）融（1℃）土壤的介电常数

土壤温度/℃	L_1载波频率		L_2载波频率		L_5载波频率	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
－1	8.67	1.03	8.71	1.17	8.71	1.20
＋1	21.11	3.54	21.27	3.50	21.31	3.51

2.2.2 选星处理

为排除监测精度受卫星信号的干扰，数据处理前需要将信号较好的卫星选择出来，对卫星信号LSP（LombScargle Periodogram）频谱分析，得到去趋势项后的SNR序列图，分析信号振荡幅度选出信号强度较好的卫星。如图5所示，5a为PRN12卫星的去趋势SNR干涉图，卫星信号振荡幅度超过25°，认为该PRN12是信号较好的卫星，反观5b，PRN6卫星信号的振荡幅度比较小，不符合选星的要求。

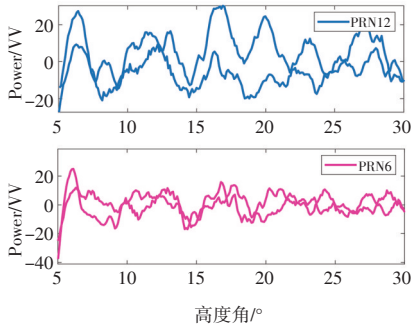


图5 卫星信号对比

2.2.3 判别指标的计算及精度评定

将用于结果分析的卫星数据文件中所有的信号较好的卫星筛选出来进行预处理，预处理是将所有信号良好、卫星高度角等于25°时的SNR反射信号分量计算得出，再求其均值，便得到冻融监测的判别指标。

结果分析判定冻结或判定融化状态是通过以下地表冻融状态判别公式[24]所得：

$$\mathrm{AvgDetrSNR}=\left|\Gamma_{mdB}\right|-\left|\Gamma_{dB}\right| \tag{4}$$

式中，AvgDetrSNR为判别指标，判别指标大于0即判定为融化，反之小于0则判定为冻结，类似平均地表土壤温度大于0℃土壤处于融化状态，小于0℃处于冻结状态，处于0℃定义为冻融临界点；Γ_{mdB}为反射区域内的月平均反射信号；Γ_{dB}为日平均反射信号分量，二者的绝对值即得出判别指标。

对于使用GPS-IR监测地表冻融状态的评价，使用8 cm浅层土壤温度数据进行精度验证并通过一下方式判别：

$$\mathrm{Accuracy}=\frac{FF+TT}{FF+FT+TF+TT}\times 100\% \tag{5}$$

式中，FF为实测土壤状态为冻结土壤且判别指标判定为冻结的情况；TT为实测土壤状态为融化土壤且判别指标判定为融化的情况；FT为误判为融土；TF为误判为冻土，通过以上来计算结果分析时的判别精度。

3 复杂寒区冻融特性数据分析结果

为了进一步实验分析，在冻融发生的时间段内，对不同地球物理参数情况下分析GPS-IR监测复杂寒区地表冻融状态精度变化原因。

图6a为136 d（2020年）至167 d（2020年）的气候实测数据，土壤湿度为18%~37%，变化平稳，且期间无降雪，积雪深度一直维持在0 cm；图6b利用GPS-IR技术对复杂寒区地表冻融状态的判别精度为90.63%。在积雪深度和土壤湿度平稳的监测环境下，GPS-IR技术监测复杂寒区地表冻融状态精度较好，影响监测精度的原因有GPS接收机的温度、土壤湿度和积雪深度等因素，积雪深度和土壤湿度平稳状态下对GPS信号影响较小，对监测精度的影响会降低；考虑到一般GPS接收机的组成，当设备温度在0℃上下浮动时，它的介电性能变化并不是很大，水的介电常数为85，其他固体材料的介电常数通常在1~6之间，有小节2.1实验得出土壤具有显著的介电特性变化，故在土壤冻融转换过程中，考虑到电磁波在设备本体中的传播，GPS设备温度的影响可以忽略不计。故在复杂寒区积雪深度和土壤湿度平稳的条件下，完全是可以通过GPS-IR监测浅层地表冻融状态。为了对比分析积雪深度和土壤水分对GPS-IR技术对地表冻融状态监测的影响，选取积雪深度或土壤水分变化较大和无降雪与土壤水平稳的2个时间段进行对比分析。

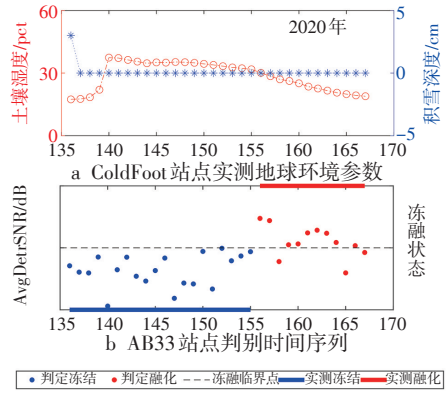


图6 环境参数平稳条件下的判别时间序列

图7a为40 d（2019年）至99 d（2019年）的气候实测，期间土壤湿度含量为7%~8%，几乎没任何变化，有降雪，积雪在40 cm范围波动，图7c计算得出地表冻融状态判别精度为86.67%；图7b为15 d（2020年）至75 d（2020年）气候实测数据，期间土壤水分含量为6%~8%，降雪平稳，积雪深度在25~35 cm，图7d地表冻融状态判别精度为85.24%。从监测结果可知，在土壤湿度含量小范围波动、有降雪的时间段期间，因为地球物理参数的改变影响了GPS信号，导致GPS-IR对复杂寒区地表冻融状态的监测精度会有所降低；虽然利用GPS-IR技术能够监测浅层地表土

壤（10 cm以内）的冻融状态，并且在地球物理参数相对平稳的情况下判别精度达到82%以上，但是仍存在地表冻融判别误差，无法准确获得浅层地表土壤过渡期的冻融状态。在冻融过渡期较长的阶段，冻融土壤长期处在冻结（融化）向融化（冻结）的阶段，无法仅用冻结或者融化描述冻融状态。另外，在气温日变化较大的地区，GPS-IR技术监测浅层地表冻融状态时可能会因为浅层地表土壤反复冻融导致判别失误，影响监测精度。

图8a为第105 d（2017年）至152 d（2017年）的气候实测数据，期间土壤湿度含量为0~60%，变化较大，期间有降雪，积雪深度从2 cm变化至25 cm，由图8c得出地表冻融状态监测精度为78.72%。图8b为第301 d（2021年）至339 d（2021年）的气候实测数据，期间土壤湿度含量为5%~17%，期间有降雪，积雪深度在1~10 cm波动，由图8d得出地表冻融状态判别精度为79.49%。从结果中分析得出土壤温度从0℃以下变化到0℃以上，土壤湿度和积雪深度这2个地球物理参数变化较大对GPS-IR对复杂寒区地表冻融状态的监测精度影响较大。

在提升GPS-IR监测复杂寒区地表冻融状态的精度时，首先可以从卫星信号方面入手，在处理数据时，筛选出信号较强的卫星，接收机接收到的SNR信号质量受地面环境影响相对较少；在不同地区选择不同的极化方式，结合当地环境调试出一个适合的极化方式，但对于土壤冻融监测过程中最灵敏的极化组合还需要进一步研究探讨；在冻融监测过程中寻找最敏感的仰角，由于目标物体的散射特性是各向异性，敏感的仰角有利于信噪比观测的提取和土壤冻融过程的监测。

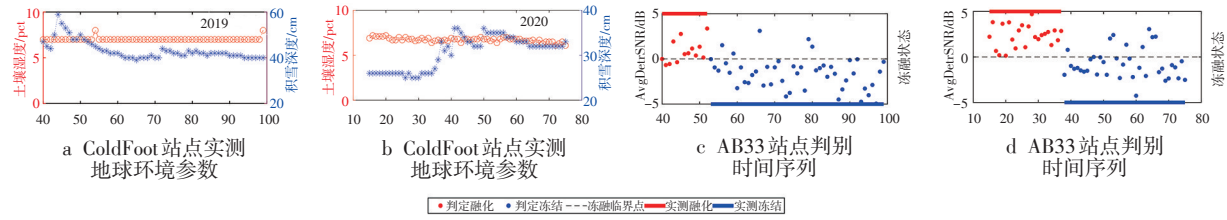


图7　环境参数小范围变化下的判别时间序列

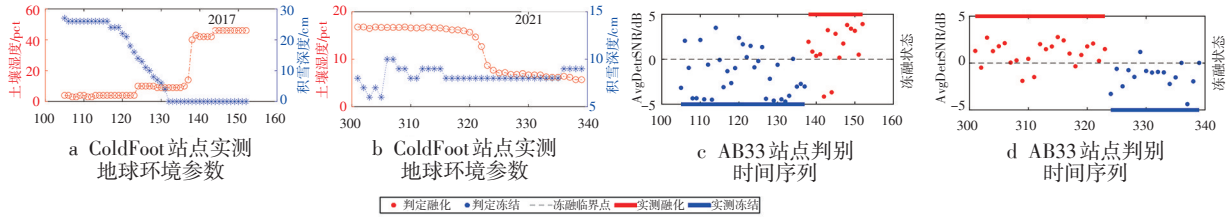


图8　环境参数大范围变化下的判别时间序列

4　结　语

本文提出利用GPS-IR技术对复杂寒区地表冻融状态监测，通过实验证实了该技术对复杂寒区地表冻融状态响应敏感，扩充了该技术的监测对象，拓宽了其应用范围。对实验分析得出以下结论：

1）地表冻融转换时，土壤介电常数发生显著变化，进而导致直射信号与反射信号在冻融前后变化差异明显，实验分析表明浅层土壤温度的改变会使多路径信息发生改变。

2）GPS-IR进行复杂寒区地表冻融状态监测时，实验结果表明L波段载波的实部和虚部的介电常数变化差异非常小，任意L波段载波对监测精度的影响可以忽略；土壤状态从冻结（融化）转化到融化（冻结）时，积雪深度和土壤湿度都会导致多路径信息在幅度和相移方面改变。

3）2020年1-3月积雪深度和土壤湿度变化平稳的时间序列内，GPS-IR监测地表冻融状态精度90.63%；2019年和2020年5-6月积雪深度波动和土壤湿度平稳的时间序列内，GPS-IR对地表冻融状态的监测精度分别为86.67%和85.24%；2017年和2021年积雪深度和土壤湿度都在波动的时间序列内，GPS-IR对地表冻融状态监测精度为78.72%和79.49%；积雪深度和土壤湿度波动较大会改变多路径信息，导致监测精度变差，反之越平稳监测精度越高。

为了科研和应用的需要，GPS-IR技术在地表土壤冻融监测方面的普适性，特别是不同冻融地区的适用性需要进一步研究和确认，如何发展自适应的GPS-IR监测方法是未来重要的研究工作。

参考文献

[1] Judge J, Galantowicz J F, England A W, et al. Freeze/Thaw Classification for Prairie Soils Using SSM/I Radiobri Ghtnesses[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1997, 35(4):827-832

[2] Zhang T. Investigation of the Near-surface Soil Freeze-thaw Cycle in the Contiguous United States: Algorithm Development and Validation[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(22):2 101-2 114

[3] Larson K M, Small E E, Gutmann E D, et al. Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(24):1-5

[4] Chew C C, Small E E, Larson K M, et al. Effects of Near-surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1):537-543

[5] Small E E, Larson K M, Braun J J. Sensing Vegetation Growth with Reflected GPS Signals[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(12):1-5

[6] Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al. Can we Measure Snow Depth with GPS Receivers?[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 36(17):1-5

[7] Chew C C, Small E E, Larson K M, et al. Vegetation Sensing Using GPS-interferometric Reflectometry:Theoretical Effects of Canopy Parameters on Signal-to-noise Ratio Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(5):2 755-2 764

[8] Mccreight J L, Small E E, Larson K M. Snow Depth, Density, and SWE Estimates Derived from GPS Reflection Data: Validation in the Western U. S. [J]. Water Resources Research, 2015, 50(8):6 892-6 909

[9] Larson K M, Loefgren J S, Haas R. Coastal Sea Level Measurements Using a Single Ggeodetic GPS Receiver[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(8):1 301-1 310

[10] Lofgren J S, Haas R, Johansson J M. Monitoring Coastal Sea Level Using Reflected GNSS Signals[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(2):213-220

[11] Wu X, Jin S. Can We Monitor the Bare Soil Freeze-thaw Process Using GNSS-R?: A Simulation Study[C]// SPIE Asia Pacific Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2014

[12] 吴学睿, 夏俊明, 白伟华, 等. GNSS-R/IR监测地表冻融状态对延迟多普勒波形和多路径数据影响分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(8):1 059-1 066

[13] Wu X R. Jin S G, Ouyang X. A Full Polarization GNSS-R Delay-Doppler-Map (DDM) Simulation for Bare Soil Freeze/Thaw Process Detection[J]. Geosci. Lett. , 2020, 7(1):1-9

[14] Wu X R, Dong Z N, Jin S G, et al. First Measurement of Soil Freeze/Thaw Cycles in the Tibetan Plateau Using Cygnss GNSS-R data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2 361-2 373

[15] Wu X R, Jin S G, Chang L. Monitoring Bare Soil Freeze-thaw Process Using GPS-Interferometric Reflectometry: Simulation and Validation[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1):14-32

[16] Hallikainen, M T, Ulaby, et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-part 1:Empirical Models and Experimental Observations[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1985, 23(1):25-34

[17] Dobson M C. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 1985, 23(1):35-46

[18] Bracaglia M, Ferrazzoli P, Guerriero L. A Fully Polar Imetric Multiple Scattering Model for Crops[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(3):170-179

[19] Chen K S, Wu T D, Tang L, et al. Emission of Rough Surfaces Calculated by the Integral Equation Method with Comparison to Three-dimensional Moment Method Simulations[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41(1):90-101

[20] Peplinski N R, Ulaby F T. Dielectric Properties of Soils in the 0. 3-1. 3-GHz Range[J]. IEEE Trans on Geosci. & Remote Sensing, 1995, 33(3):803-807

[21] Zhang L, Shi J, Zhang Z, et al. The Estimation of Dielectric Constant of Frozen Soil-water Mixture at Microwave Bands[C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2003

[22] Nievinski F G, Larson K M. An Open Source GPS Multipath Simulator in Matlab/Octave[J]. GPS Solutions, 2014, 18(3):473-481

[23] Comite D, Cenci L, Colliander A, et al. Monitoring Freeze-thaw State by Means of GNSS Reflectometry: An Analysis of Tech DemoSat-1 Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020(13):2 996-3 005