

GNSS-MR 技术用于雪深探测的初步研究

张双成¹ 戴凯阳¹ 南 阳¹ 张 勤¹ 瞿 伟¹ 李振宇¹ 赵迎辉¹

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

摘 要:积雪是全球水循环中的重要组成部分,积雪深度与雪水当量的精确监测对全球气候变化研究极其重要。随着 GNSS 研究与应用的不断深入,基于多路径效应的 GNSS-MR(GNSS multipath reflectometry)技术用于地表环境监测(植被、土壤湿度、雪深、海平面等)已成为一种新兴的遥感手段。分析了 SNR(signal-to-noise ratio)信噪比的变化特性,详细给出了基于 SNR 观测值的 GNSS-MR 技术探测雪深的基本原理及其计算流程图。为了验证算法的有效性,利用科罗拉多州 17 d 连续跟踪站 NWOT 的 GPS 数据反演了降雪厚度,其结果与实测的雪深记录数据吻合较好,误差均值为 0.07 m。初步研究结果验证了 GNSS-MR 技术用于积雪深度探测的可行性,并为后续充分利用现有的全球密集 GNSS 跟踪站数据开展地表环境监测提供重要参考。

关键词:全球导航卫星系统;GNSS 遥感;GNSS 多路径反射;信噪比;积雪深度;Lomb-Scargle 周期图法

中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

随着 GNSS 系统研究与应用的不断深入,GNSS 多路径误差逐渐被掌握的更加透彻。GNSS 的无线电导航信号经过反射面后,被反射的 GNSS 多路径信号承载反射面的特性信息,通过对 GNSS 反射信号中波形、极化特性、振幅、相位和频率等参数的分析,可有效获取反射面的物理特性,这也成为一种全新概念的 GNSS 遥感方法^[1]。基于此,近年来出现了两种 GNSS 多路径遥感新技术,一种是 GNSS 干涉(GNSS reflectometry,GNSS-R)遥感技术,另一种是 GNSS 多路径反射(GNSS multipath reflectometry,GNSS-MR)遥感技术。

GNSS-R 遥感技术特点是需要两副天线进行工作:一副是方向朝天顶的接收右旋极化信号,用于接收直达波信号和定位;另外一副是方向朝下,接收海面或陆地反射的左旋极化信号。GNSS-R 技术凭借低成本、小功耗和高时空分辨率等优点近年来在海洋和湖面测高、海面风速、土壤湿度等领域得到广泛的研究与应用,但其必须使用特殊的左极化和右极化两个 GNSS 接收机才能进行有效的接收和处理,其在硬件上的严格要求极大地限制了 GNSS-R 技术的开展与应用^[2]。基于

此,GNSS-MR 遥感技术基于常规测量型 GNSS 接收机记录下的观测数据便可对降雪、土壤水分、植被生长、海平面变化等地表环境参数进行监测反演,从而使得该技术也成为当前 GNSS 遥感领域的最新研究热点。

利用 GPS-MR 技术进行地表环境监测,目前在欧美已有一定的研究基础,国内当前也陆续开展了相关研究。文献[3]较早对 GPS 的信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)观测值中直射与反射分量的分离、反射分量与反射环境之间的关系进行了研究,并以此修正相位观测值。文献[4-9]提出并发展了 GPS-MR 技术,主要利用 SNR 观测值的多路径反射分量进行雪深、海平面、土壤湿度、植被变化、火山喷发等其他表征多路径误差的地表环境监测,并获得了一系列极有参考价值的研究与应用成果。文献[10]针对 GPS-MR 技术中使用 SNR 观测值的不足,提出了一种基于 GPS 无几何距离的 L4 观测值进行雪深探测算法,并获取了与 SNR 较一致的探测结果。文献[11]提出了三频组合的 GPS-MR 算法,分别对基于 SNR、L4 和三频组合的 GPS-MR 算法进行了实测数据验证,获得了较好的反演结果。文献

[12]利用 GPS 的信噪比 SNR 观测值有效地跟踪了土壤湿度的变化趋势,测站的最大有效测量范围约 45m,并定量描述了 SNR 多路径延迟相位与土壤湿度之间的关系。文献[13]利用 GPS 的无几何距离组合 L4 观测值对降雪厚度和雪面温度等地表特征参数开展了反演研究,并采用非参数统计估计模型获取了精确的降雪天气的地表参数。文献[14]利用 GPS 的 SNR 观测值对荒漠草地、小麦、苜蓿草等 3 种植被的含水量进行了探测,通过与实测数据比对验证了 GPS-MR 用于植被含水量探测的有效性。目前国内外有关 GNSS-MR 技术才处于初步研究阶段,需对诸多关键问题进行深入研究,以尽快推动 GNSS-MR 进入实际应用阶段。

降雪是全球重要的淡水资源,是影响全球气候的重要因素之一。对降雪的覆盖范围、雪深或雪水当量的监测一方面可以提高雪灾多发区的积雪监测能力,另一方面可以为当地的水资源管理与生态建设提供可靠的信息保障。传统的雪深监测方法是利用离散的气象站点进行监测,其精度受监测站点的数量和分布影响较大。卫星遥感技术被用于不同时空分辨率的积雪信息提取,但其精度受云层和大气折光等因素影响比较严重。近年基于多路径效应发展起来的 GNSS-MR 技术为雪深探测提供了一种全新的监测手段。GNSS-MR 技术用于雪深探测具有覆盖面积大、时间分辨率高、全天候、实时自动化、充分利用现有的密集 GNSS 监测站(如陆态网络、各区域 CORS 站)等优点,为气象部门进行高精度雪深监测提供一种新的传感器。

目前国内基于 GNSS-MR 技术开展雪深探测研究较少,本文详细深入地探讨了该技术涉及的理论体系,并采用实测数据进行了验证分析。

1 基于 SNR 的 GPS-MR 探测雪深基本理论

GPS 多路径已成为当前制约高精度定位的主要误差源,GPS 多路径的产生主要与反射面的结构和电介质参数密切相关。GPS 接收机接收到的信号是直射信号和经地表反射后的合成信号(见图 1)。

图 1 为利用 GPS-MR 技术探测雪深的示意图。设 H 为天线高,即接收机天线相位中心到裸露土地表的距离; h 为接收机天线相位中心到积雪顶层的距离,文中统一简称为垂直反射距离,

h_{snow} 为积雪的厚度, E 为直射信号与积雪表面的夹角。

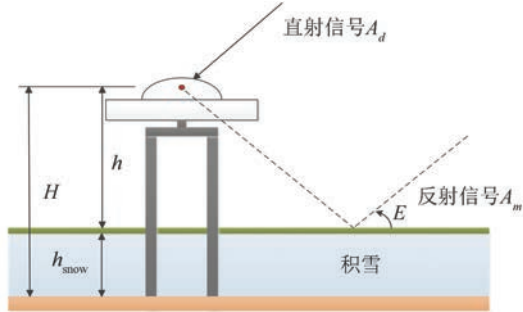


图 1 GPS-MR 探测雪深示意图
Fig.1 Diagram of GPS-MR for Snow Depth

GPS 中的信噪比 SNR 观测值是表征接收机天线所接收到信号大小的一个量值(见图 2)。图 2 为利用 2011 年第 225 天北美 NWOT 站 PRN29 号卫星的信噪比 SNR 变化图。研究表明,SNR 值的变化主要受卫星信号发射功率、天线增益、卫星到接收机的距离和多路径效应等因素影响^[3]。在高度角较高条件下,天线增益较大使得 SNR 得到有效提高;而在高度角较低条件下,一方面天线增益减小,另一方面由于多路径效应使得 SNR 下降较为严重(见图 2 中的红色框区域)。由此可见,低高度角下信噪比 SNR 受多路径影响严重,因此信噪比 SNR 值常用于评价多路径和多路径误差建模。反过来,GPS 多路径反射会直接影响 GPS 信噪比,因此通过 SNR 的频谱分析可获取引起 GPS 多路径反射的地表环境参数,也即 GPS-MR 技术。

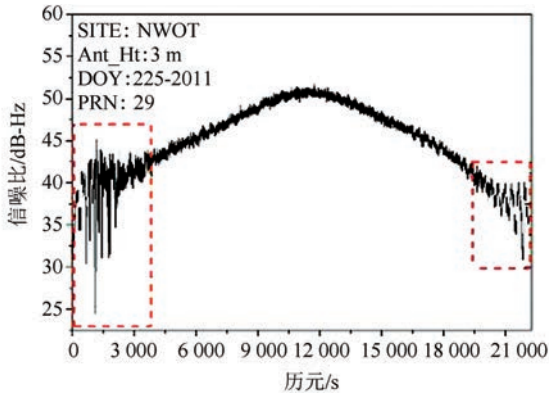


图 2 GPS 卫星信号的 SNR 变化图
Fig.2 SNR Variations of GPS Signal

图 1 中 GPS 接收机天线接收到是直射信号和经地表反射信号的合成信号,设直达信号和反射信号的振幅分别为 A_d 和 A_m 。对于大地测量型的 GPS 接收机天线而言,为了有效抑制地表反射引入的多路径观测误差,直达信号和反射信号

的振幅存在如下关系：

$$A_d \gg A_m \tag{1}$$

式(1)表示 GPS 接收机捕获的合成信号 A_c 中,直射信号 A_d 决定着合成信号的总体变化趋势,即相当于信号的整体趋势项(见图 2 中的 SNR 整体分布),而反射信号 A_m 则表现为局部的周期性震荡,认为其主要是由于低高度角多路径影响所致(见图 2 中的红色框区域)。SNR 观测值是大地测量型 GPS 接收机的附带观测数据,SNR 与信号振幅存在如下关系^[4]:

$$SNR^2 = A_c^2 = A_d^2 + A_m^2 + 2 A_d A_m \cos Q \tag{2}$$

式中, A_c 为合成信号的振幅; $\cos Q$ 为直射信号与反射信号夹角的余弦值。

为了获取 SNR 中因地表反射引起 GPS 多路径的变化信息,多路径效应需从接收到的 SNR 观测值中分离出来。结合式(1)可知,因多路径效应对信噪比的影响很小(主要在低高度角),即 A_d 与 A_m 在数值上相差很大,通常可采用低阶多项式来消除趋势项 A_d 。

图 2 给出了 2011 年第 225 天 NWOT 站 PRN29 号卫星的 L2 频率的 SNR 变化图,采样率为 1 Hz。由图 2 可知,SNR 趋势项呈抛物线形式,可采用二次多项式进行拟合,而 SNR 两端主要是在低高度角时受多路径变化的影响所致。将图 2 中的整体趋势项去除后,即可得在低高度角条件下受多路径影响所致的 SNR 残差序列,见图 3 所示。

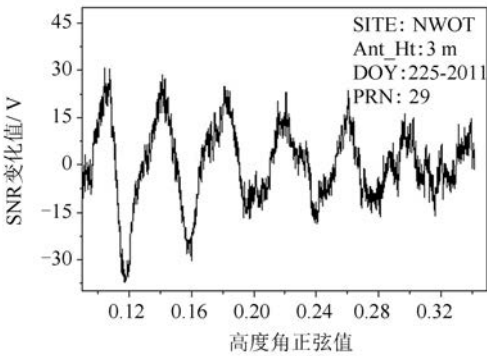


图 3 去除趋势项的 SNR 残差序列
Fig.3 SNR Variations after Detrending

图 3 给出了图 2 中 PRN29 号卫星在下降阶段扣除趋势项后的 SNR 残差序列,其截止高度角为 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。与图 2 相比,图 3 中的横坐标为随高度角变化的重采样时间点,而非图 2 中的等间隔观测历元;纵坐标为 SNR 值的线性变化值伏特,而非图 2 中的指数变化 dB-Hz。研究表明,图 3 中的 SNR 残差序列主要为低高度角多路径影响

所致,进而为利用多路径反演地表参数提供了重要数据。

设图 3 中多路径反射信号的振幅可表示为^[5]:

$$A_m = A \cos \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin E + \varphi \right) \tag{3}$$

式中, λ 为载波波长; E 为卫星高度角; h 为垂直反射距离;若记为 $t = \sin E$, $f = \frac{2h}{\lambda}$,则式(3)可简化为标准的余弦函数表达式:

$$A_m = A \cos (2\pi f t + \varphi) \tag{4}$$

式(4)中频率 f 包含了图 1 中的垂直反射距离参数 h ,若对式(4)进行频谱分析,便可求取频率 f ,进而便可获取降雪厚度 h_{snow} 。图 3 中的横轴 $\sin E$ 是随高度角变化的已知量,但 $\sin E$ 非等间隔采样,致使 SNR 残差序列无法保证整周期截断,因此可采用 Lomb-Scargle 谱分析方法(简称 L-S 谱分析)解决快速傅里叶变换 FFT 无法解决的非等间隔采样问题^[15]。Lomb-Scargle 傅立叶变换法不仅能有效地从时域序列中提取出弱周期信号,还可以在在一定程度上减弱时域序列的不均匀性产生的虚假信号。此外,该方法还能给出各个频率信号存在的虚警概率和显著性。

通过对图 3 中的 SNR 残差序列进行 L-S 谱分析可得到 GPS 多路径反射信号 A_m 的频率 f ,由 $f = 2h/\lambda$ 即可得到垂直反射距离 h 。因图 1 中的天线高 H 为可实际量测的已知量,积雪厚度可由公式 $h_{\text{snow}} = H - h$ 计算得出。由此,实现了由 SNR 观测值进行雪深的测量。

综上所述,基于 SNR 观测值的 GPS-MR 技术探测雪深主要计算流程如下。

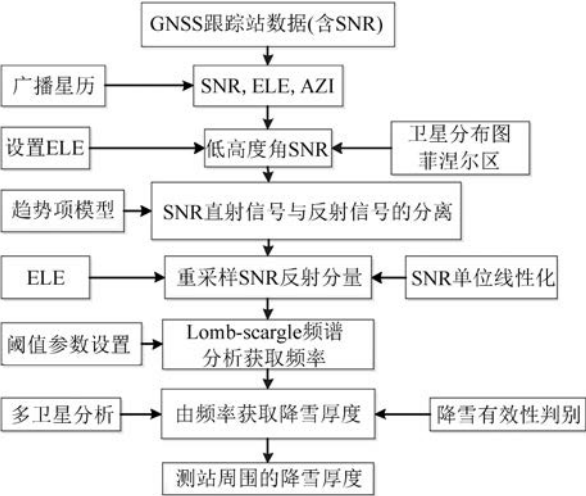


图 4 GPS-MR 探测雪深计算流程图
Fig.4 Flowgraph of GPS-MR for Snow Depth

2 GPS-MR 探测雪深算例分析

为了验证上述 GPS-MR 探测雪深理论的有效性,本文收集了实测的 GPS 观测数据进行算例分析。GPS 实验数据来自 NWOT 站,该站位于美国科罗拉多州中部的博尔德(Boulder)地区。NWOT 站因处于洛矶山脉的山脚,平均海拔 1 655 m,距离丹佛市约 40 km。冬季寒冷多雪,山峰部分有时终年被深雪所覆盖。洛矶山脉地区每年的降雪量可高达 10 m 以上,丹佛全年的降雪量平均可达 150 cm。NWOT 站使用的是大地测量型 Trimble NetRS 接收机,天线为 TRM41249。该站为了防止被积雪盖过,其天线至地面距离高度为 3 m,整体稳定的钢架结构可避免风的影响。图 5 即为 NWOT 站点接收机安置图及观测环境。

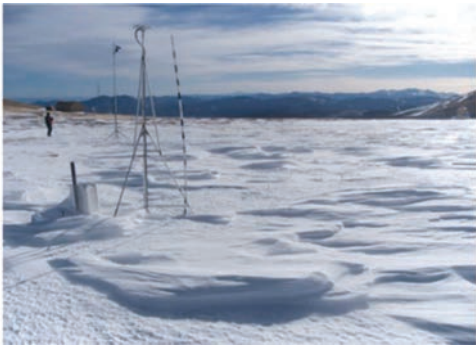


图 5 NWOT 站周围的观测环境(Ethan D.G 2012)

Fig.5 Site Map at NWOT Station(Ethan D.G 2012)

本文收集了 NWOT 站 2011 年全年分布均匀的 17 天采样率为 1Hz 的数据,年积日分别为第 002、030、070、085、101、115、130、145、160、165、170、180、185、195、225、226 和 227 天。然后依据流程图 4 的步骤进行了 GPS-MR 探测雪深的计算,其中提取 SNR 高度角区间为 5°~25°。为了节省篇幅,本文给出 17 d 中有代表性的第 145、225 两天获取的 PRN29 号卫星 SNR 残差序列和 L-S 频谱分析结果进行分析。

图 6、图 7 分别给出了两天 PRN29 号卫星的 SNR 反射分量序列和对应的 L-S 谱分析结果,第 145、225 天对应的实际降雪厚度分别为 2.25 m 和 0 m。图 6(b)和图 7(b)中的横轴表示天线相位中心到降雪表面的距离,它是将频谱分析后得到

的频率 f ,通过 $f=2h/\lambda$ 转换成相应的 h ,即垂直反射距离;纵轴表示输入 SNR 反射信号各频率的 L-S 频谱振幅。L-S 频谱振幅的峰值对应的距离为有效探测的垂直反射距离,图 6(b)和图 7(b)中有效探测的垂直反射距离对应的频谱振幅分别为 19.371 和 13.774,可以看出随着降雪厚度的减小,SNR 反射分量的频谱振幅峰值逐渐变小。L-S 谱分析结果也说明降雪厚度的变化与低高度角 SNR 反射分量能量谱变化密切相关,也进一步验证了降雪厚度会改变 SNR 的频谱,进而为利用 SNR 反射信号探测雪深提供了手段。

本文通过处理 17 d 的 SNR 数据,利用 L-S 谱分析可获取每天天线相位中心至降雪顶层的垂直距离 h 。NWOT 站 GPS 天线相位中心距离地面的天线高 H 为 3 m,根据公式 $h_{\text{snow}}=H-h$ 便可得到每天对应的降雪厚度。为了验证采用 GPS-MR 技术探测雪深的精度,获取了雪深记录仪实测的观测资料,两者对比结果见表 1 和图 8 所示。

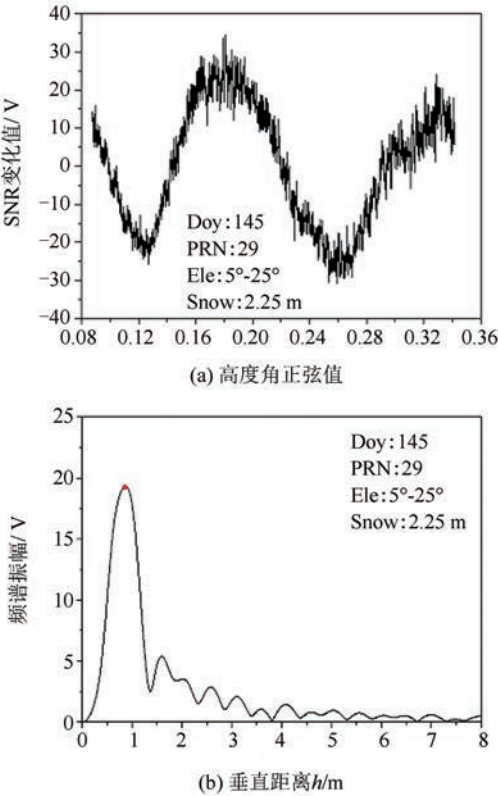


图 6 PRN29 号卫星 SNR 序列(DOY145)及 SNR 序列 L-S 谱分析(DOY145)

Fig.6 SNR Variations for PRN29(DOY145) and L-S results for SNR Variations(DOY145)

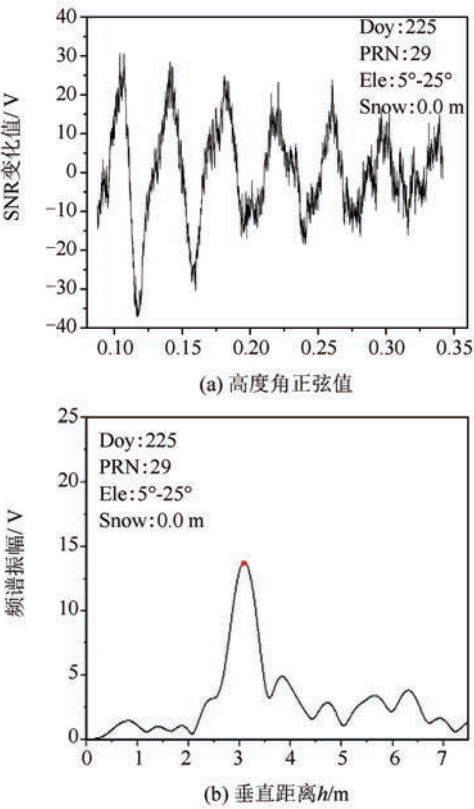


图 7 PRN29 号卫星 SNR 序列(DOY225)及 SNR 序列 L-S 谱分析(DOY225)

Fig.7 SNR Variations for PRN29(DOY225) and L-S Results for SNR Variations (DOY225)

表 1 GPS-MR 探测雪深与实测雪深对比统计表

Tab.1 Comparison of GPS-MR and Snow Depth Data

年积日	实测雪深/m	反演雪深/m	较差/m
002	0.95	0.8	0.15
030	0.75	0.61	0.14
070	1.19	1.15	0.04
085	1.35	1.26	0.09
101	1.51	1.44	0.07
115	2.05	2.17	-0.12
130	2.07	2.1	-0.03
145	2.25	2.14	0.11
160	1.76	1.69	0.07
165	1.48	1.4	0.08
170	1.29	1.25	0.04
180	0.77	0.64	0.13
185	0.2	-0.01	0.21
195	0	-0.13	0.13
225	0	-0.09	0.09
226	0	-0.09	0.09
227	0	-0.09	0.09

图 8 中横轴表示年积日,纵轴表示降雪厚度,图中黑色方块表示用记录仪获取的实测雪深数据,红色三角形表示用 GPS-MR 技术探测的雪深数据。结合表 1 和图 8 的对比结果,可得出如下结论。

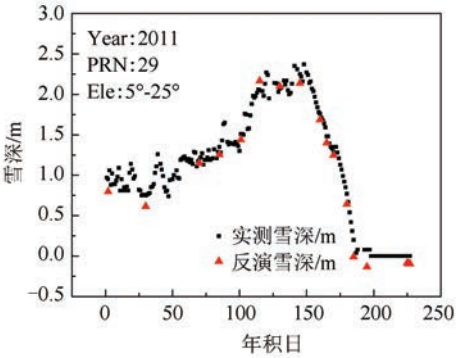


图 8 NWOT 站 GPS-MR 探测雪深与实测雪深对比图

Fig.8 Comparison of GPS-MR and Snow Depth Dataat NWOT

1)采用实测 GPS 数据验证了基于 SNR 的 GPS-MR 算法的可行性,并获取了对应的雪深厚度数据;

2)图 8 对比结果表明,基于 SNR 的 GPS-MR 探测雪深与实测雪深数据在整体趋势上吻合一致,进一步验证了 GPS-MR 技术可用于实时雪深监测的可行性,尤其是降雪量较大的地区;

3)表 1 统计结果两者的较差均值为 0.08 m,较差标准差为 0.07 m。从图表对比结果可知本文基于 GPS-MR 技术获取的降雪厚度精度还比较差,主要原因一是因为算法还存在不足(如综合多颗卫星 SNR 数据进行反演、SNR 趋势项剔除算法的选取、SNR 残差序列的谱分析方法等);二是因为用于验证本文 GPS-MR 反演结果的实测雪深传感器与 GPS 站有一定距离,应采用并址雪深传感器资料进行检核。

4)图表结果证实降雪对 GPS 信号中的 SNR 值有较大影响,也即降雪会加剧多路径现象的发生。因此,需考虑降雪环境下多路径误差对 GNSS 精密定位的影响。

3 结 语

降雪厚度、降雪密度和雪水当量及其变化的准确和长期监测对全球淡水资源和气候环境科学研究具有重要意义。本文在详细给出基于 SNR 的 GNSS-MR 探测雪深基本理论基础之上,利用实测 GPS 数据对算法进行了有效性验证,并获取了初步的研究结果。GPS-MR 技术借助 SNR 观测值将这种曾作为噪声的多路径信号转变为一种极具价值的有用信号。利用 SNR 观测值探测雪深以传统大地测量型 GPS 接收机为基础,能有效节约成本和扩展 CORS 网络的应用领域。毋庸

置疑,针对本文获取的初步研究结果,存在如下问题亟待研究与解决。

- 1)综合 GNSS 跟踪站多颗卫星进行雪深探测;
- 2)GNSS 跟踪站 SNR 数据的特征分析,长弧段多卫星探测雪深的数据综合;
- 3)接收机天线类型及其距离地面的高度对 GNSS-MR 的影响分析;
- 4)基于 SNR 数据精化降雪环境下 GNSS 多路径模型误差。

GNSS-MR 技术的出现为实时监测地表环境(降雪、植被、土壤湿度、海平面等)提供了一种全新的遥感手段,也进一步拓展了 GNSS 的应用领域。这项日益受关注的新技术其诱人之处在于,未来的几年内人们可充分、免费利用 GNSS 系统提供的百余颗卫星多波段信号,借助密集的 GNSS 跟踪站(如 PBO、陆态网络)可开展实时、高精度的地表环境监测,进一步弥补常规仪器和卫星雷达监测地表环境在时空分辨率上的不足,进而发挥 GNSS 在全球环境变化监测中的重要作用。

致谢:感谢美国地球透镜(Earthscope)计划授权使用 GPS 数据,感谢美国 PBO H₂O 课题组提供的参考资料和实验数据。

参 考 文 献

[1] Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17: 331-355

[2] Liu Jingnan, Shao Lianjun, Zhang Xunxie. Advances in GNSS-R Studies and Key Technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 2007, 32(11): 955-960(刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(11): 955-960)

[3] Bilich A, Larson K M, Axelrad P. Observations of Signal-to-noise Ratios (SNR) at Geodetic GPS Site CASA: Implications for Phase Multipath[J]. *Proceedings of the Centre for European Geodynamics and Seismology*, 2004, 23: 77-83

[4] Larson K M, Small E E, Gutmann E, et al. Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations: Initial Results[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(3): 173-177

[5] 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

[6] 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): 1-5

[7] 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

[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] Larson K M, Nievinski F G. GPS Snow Sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1): 41-52

[10] Ozeki M, Heki K. GPS Snow Depth Meter with Geometry-free Linear Combinations of Carrier Phases [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 86(3): 209-219

[11] Lv C X, Zhang X H. Measuring Snow Depth with GPS Triple-frequency Carrier Phase Observations [C]. *International Workshop on GNSS Remote Sensing for Future Missions and Sciences*, Shanghai, 2011

[12] Ao Minsi, Zhu Jianjun, Hu Youjian, et al. Comparative Experiments on SoilMoisture Monitoring with GPS SNR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 2015, 40(1): 117-121(敖敏思, 朱建军, 胡友健, 等. 利用 SNR 观测值进行 GPS 土壤湿度监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(1): 117-121)

[13] Jin S G, Najibi N. Sensing Snow Height and Surface Temperature Variations in Greenland from GPS Reflected Signals [J]. *Advances in Space Research*, 2014, 53(11): 1 623-1 633

[14] Wei W, Larson K M, Small E E, et al. Using Geodetic GPS Receivers to Measure Vegetation Water Content[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 237-248

[15] Xu Bin, Yang Tao, Tan Baohua, et al. The Simulate Study of Detection Based on Lomb-Scargle Algorithm[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2011, 31(6): 702-705(徐斌, 杨涛, 谭保华, 等. 基于 Lomb-Scargle 算法的周期信号探测的模拟研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(6): 702-705)

Preliminary Research on GNSS-MR for Snow Depth

ZHANG Shuangcheng¹ DAI Kaiyang¹ NAN Yang¹ ZHANG Qin¹
QU Wei¹ LI Zhenyu¹ ZHAO Yinghui¹

1 College of Geology Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Snow is a critical storage component in the hydrologic cycle; accurate measurements of snow depth and snow water storage are very important for global climate research. As research and application of GNSS deepens, GNSS-MR based multipath has emerged as a new technology of remote sensing for environmental monitoring of vegetation, soil moisture, snow depth, sea levels, and so on. The characteristics of change in SNR data are analyzed and the fundamental principles of GNSS-MR based SNR and calculation flow chart are introduced. Experiments with GPS data collected for 17 days at the NWOT station, Colorado, verify the validity of GNSS-MR based SNR. The retrieval result was consistent with the snow depth recorder; the standard deviation was 0.07m. Results also show that the GNSS-MR for snow depth is very effective and useful for environmental monitoring with abundant global GNSS stations.

Key words: GNSS; GNSS-MR (GNSS multipath Reflectometry); GNSS remote sensing; SNR (signal-to-noise ratio); snow depth; lomb-scargle periodogram

First author: ZHANG Shuangcheng, PhD, specializes in the theories and methods of GNSS ground environment monitoring. E-mail: shuangcheng369@vip.163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41104019, 41674001, 41731066; the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, No. 310826172202.

++++++
(上接第 233 页)

Application of Parallel Computing with OpenMP in Global Ionosphere Mapping

ZHANG Qiang¹ ZHAO Qile¹

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Computation-intensive tasks in the data processing for global ionosphere mapping are analyzed. A parallel algorithm with OpenMP technique is proposed for data preprocessing incorporating normal equation matrix stacking, parameter pre-elimination, and normal equation matrix inversion. A validation experiment was executed on a single server. Results indicate that the computing time for rapid global ionosphere mapping is only about 10~13 minutes with a speedup of about six, the time for final global ionosphere mapping is only about 39-47 minutes and the speedup is about five. The precision for global ionosphere products are about 2.8~3.8 TECUs compared with IGS final products, and the final solutions are at higher precision, about 0.2 TECUs in contrast to rapid solutions. The parallel algorithm proposed in this paper is very useful for the optimal testing of global ionosphere mapping, when reprocessing long time span data extending over periods such as 10 years, as well as for the real-time ionosphere mapping.

Key words: OpenMP; parallel computing; GNSS; global ionosphere mapping; total electron content

First author: ZHANG Qiang, PhD candidate, specializes in GNSS ionosphere and PPP. E-mail: zhangqiang@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Qile, PhD, professor. E-mail: zhaoql@whu.edu.cn

Foundation support: The National High-tech R&D Program of China, No. 2014AA121501; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2014618020202.