

雷达技术在珠穆朗玛峰冰雪层厚度测定中的应用

孙占义,张江齐,张鹏

(国家基础地理信息中心,北京 100044)

摘要:介绍了2005年我国首次采用雷达测深技术精确测定珠穆朗玛峰峰顶冰雪层厚度的情况,经过对数据的处理与分析,获得了峰顶觐标处的冰雪层厚度为3.50 m。同时介绍了雷达探测技术(GPR)原理、GPR与GPS的硬件集成情况。

关键词:珠穆朗玛峰,雷达探测,冰雪层厚度,GPR,GPS

中图分类号:P631,TN959.3

文献标识码:A

文章编号:1000-8918(2006)02-0179-04

珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)是世界第三极,峰顶常年冰雪覆盖、高寒、缺氧、低压。过去对峰顶雪面到岩石面的厚度测量一直采用探杆测深的方法。1975年,中国登山队在珠峰顶采用木质探杆插进冰雪层,直到插不动为止,测得深度为0.92 m;而在1992年中国和意大利珠峰科研合作中,意大利登山人员在峰顶用钢质探杆插进雪层直到插不动,测得厚度2.55 m,2次的测量结果相差迥异。因此围绕珠峰的冰雪厚度一直争论不休,也是业内学者们十分关注的问题。峰顶恶劣环境以及当时技术条件是制约测量结果的主要因素,利用雷达探测技术进行冰雪层厚度测量是一种新的尝试。

2005年5月22日11时08分,中国登山测量队成功登上珠峰,随即展开珠峰峰顶的测量工作。11时50分觐标成功树立在峰顶雪面最高处,11时59分雷达探测仪(Ground Penetrating Radar,GPR)拖动剖面测量开始,12时20分峰顶测量结束。

2005年10月9日,国家测绘局通过新闻发布会向世界公布了新的珠峰岩石高程为8 844.43 m,冰雪层厚度3.50 m。此次珠峰高程测量我国首次采用了雷达探测手段测定峰顶冰雪层厚度,通过更为科学、精度和可靠性更高的现代测量技术确定峰顶冰雪层厚度,实现对珠峰高程更为准确的认定,这也是此次珠峰高程测量中最具挑战性的工作之一。

1 探测原理

雷达探测是利用电磁波在地下媒介中的传播和反射特性进行地下不可见目标体或界面的探查与定位分辨。峰顶拖动测量时,雷达在雪面上持续不断

地向地下发射电磁波,电磁波在冰雪和岩石介质变化的界面上产生散射,根据散射回波的时延、形状、强度等信息,可解译出分界面的深度等信息。

与探杆手段相比,雷达探测方法的优点在于:突破探杆手段探测的局限性,探杆因长度不够或遇到硬质冰而可能无法深入到岩石界面,雷达探测方法是无破坏探测,效率更高,探测的连续剖面数据成果可反映更多、更全面的层位信息,克服探杆探测的随机性,成果可靠。其不足是仪器设备工作环境条件要求较高、较重,操作程序复杂。

雷达探测技术在矿产探测、市政设施探测等领域得到很好的应用。在南极冰架等冰川研究中也得到了应用,由于条件恶劣,此次珠峰冰雪深度测量则要求更高、更特殊。

2 GPR与GPS集成的峰顶专用设备

2.1 GPR

普通的探地雷达探测仪无法适应峰顶环境恶劣、高寒及负重等条件的要求,为了保证雷达探测仪能够在峰顶正常工作,使用了尺寸小、重量轻、操作方式简单、带加热保温装置的意大利冰雪探地雷达。配置900 MHz天线,时窗设为100 ns,采样间隔为50 ps,扫描速率采用10 Hz,采样点设为2 048,采样采用时间模式。

与普通雷达设备相比,经专门设计和改进完善的设备具备以下特点。

(1)系统重量小于4 kg,尺寸重量完全符合登山负重的要求,设备操作简便,没有插拔,参数已经预设置,通过几个按钮及LED显示灯,可监测工作

状态及温度。整个设备由内置软件运行,无需登山测量者操作更多指令,这可以保证系统处于最优工作状态。

(2)系统操作简单,包括1个加热开关键、雷达的电源开关键和雷达工作开关键,LED指示灯指明系统内部工作温度和工作状态,操作者可通过仪器或遥控器上的1个键便可开始或停止工作。

(3)有MARK标记功能,用于标示测量的位置和开始与结束。设计的平衡雪橇用于控制测量剖面时,保持拖动仪器的平衡姿态,不至于受风和软雪的影响而翻滚。

(4)主机合天线放置在具有保护合保温功能的主机箱内,同时内部有预热装置,保证仪器工作所需温度。

(5)特殊的可充电锂电池,电量充足,可满足7 h以上的连续测量。

调研过程中对该设备也进行了实地模拟测试。在北京挖设了1个4.2 m×2.5 m×1.5 m的模拟沙坑,设计了2个模拟山形。实验结果显示,其探测精度可达到1~2 cm。

2.2 GPS

全球卫星定位系统(GPS)测量技术主要用于空间定位。目前可达到相当高的精度和可靠性,其仪

器制造水平和数据处理分析技术的发展使GPS在珠穆朗玛峰这样的恶劣环境条件下的应用成为可能。

此次选用的GPS为双频、高精度(目前标称最高精度),采样率可达到1 Hz以上,天线具有较强抗干扰性能和相位中心稳定性,1 Hz采样率下可存储记录3 h以上的数据,具有事件标记功能,此外还满足单套设备的重量限制不得超过5 kg、抗低温、操作简便的要求,具备一键开关机的能力,具备外接电源接口等。

2.3 GPR-GPS 集成

为了有效地将雷达测深结果与其所在空间位置结合起来,实现了GPR与GPS的集成。

此次设计构思并实现了GPR与GPS的集成(图1)。集成的主要内容包括两方面:一是GPR与GPS硬件组合的实现,在GPR的顶部固定GPS天线,精确确定雷达的空间位置;二是通过数据接口,将GPS时间与GPR测深时间同步,创新地设计利用事件标记控制器触发同步标记信号来实现两者时间的精确同步,解决2种设备的时间参考的一致性问

题。改进集成后的GPS-GPR如图2所示。GPS选用高精度双频接收机,采样率设置1 Hz,具有事件标记功能。

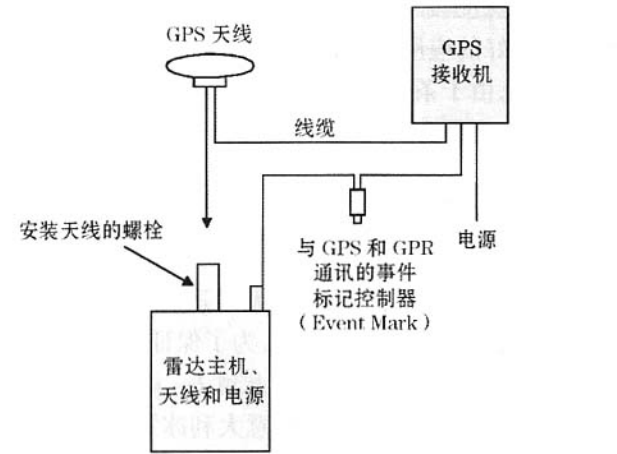


图1 GPS-GPR 集成设计方案

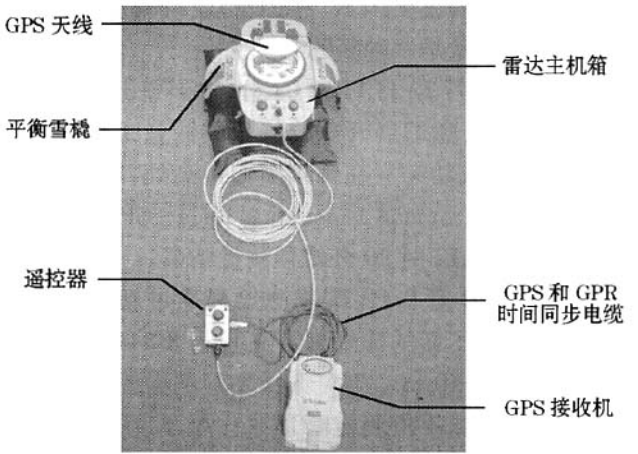


图2 集成的冰雪层厚度雷达探测仪

3 峰顶测量情况

2005年5月22日成功登顶后,测量队员按计划围绕觐标、主山脊、垂直主山脊等位置展开冰雪层厚度雷达探测工作,共获得了峰顶4个剖面的雷达探测数据和40 min 1 Hz采样率的动态GPS数据。各剖面的位置、数据测量时间长度见表1。

由于冰雪雷达探测仪集成了GPS,因此可获得

了雷达在峰顶的运动轨迹(图3)。从图中可以看出峰顶雷达探测仪是在约7 m×5 m的范围内进行拖动测量的,也可看出各个剖面在峰顶的位置分布。

表1 雷达剖面测量数据情况

剖面	剖面位置描述	测量时间长度
1	绕觐标处(绕觐标2圈)	3 min 25 s
2	主山脊	57 s
3	垂直主山脊	1 min 36 s
4	主山脊延伸	7 min 5 s

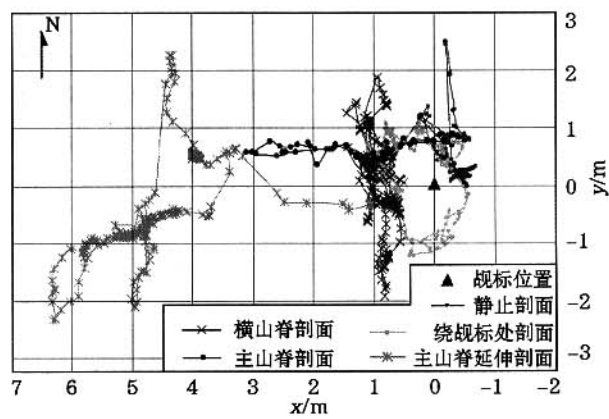


图3 峰顶雷达探测仪运动轨迹

4 雷达测深数据处理与分析

4.1 速度标校

根据电磁波在介质中的传播速度 v 和其传播往返时间差 t ,确定探测深度 h

$$h = v \times t/2 \quad (1)$$

因此传播速度的是否准确很重要。一般采用目标体标定法来实际标校速度 ,即通过获取已知目标体的深度 h ,然后实测该目标体的反射回波的双程时间 t ,利用公式 (1)反算出地下介质中的传播速度 v 。该方法通常在测量前的试验中完成 ,从大量试验及实际经验来看 ,该方法的对测深的相对误差通常为 2% 左右 ,一般不超过 3%^[2 6-7]。

珠峰冰雪层的雷达速度标校理想情况下应该在峰顶实地进行 ,但在峰顶如此恶劣的条件、繁重的任务和有限的体力、时间情况下 ,在峰顶实地钻空来标校几乎不可能。因此我们选择了在与峰顶相似的冰雪环境下同样为高海拔、高寒情况下的 6 500 m 和 7 028 m 高度的地方进行目标体标定法标校速度 ,标校目标体采用钢质冰锥 ,长约 40 cm ,直径 2 cm。

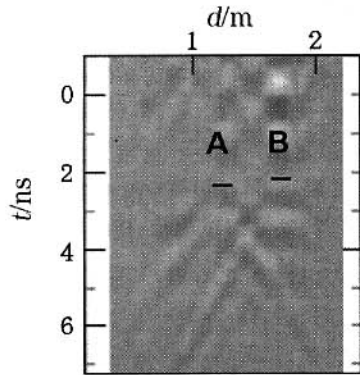


图4 7 028m 高度标校时的雷达剖面

在 7 028 m 米高度时采用反射法获得的实地标校剖面见图4。图中 A 标示的位置实测为 0.37 m ,

B 标示的位置实测为 0.34 m。标校软件采用 IDS-GRED/S。经标校 ,冰雪层的传播速度为 230 m/ μ s ,该值作为这次计算采用值。

4.2 冰雪层厚度剖面处理与分析

雷达测深的数据处理和分析软件采用 IDS-GRED/S 和 REXLEXW。经过原始数据读取、参数设置、漂移去处、背景去噪、信号增益、滤波处理、去除坏道、时-深转换等处理步骤 ,就获得带有深度的层位信息。

数据处理中主要对绕视标处探测剖面雷达数据进行了分析处理 ,处理后的剖面见图 5 所示。由于 2 种不同介质的过渡 ,在雷达图中反映为从正相位到负相位或是从负相位到正相位(取决于不同的介质)的过渡 ,因此选取雷达波的正相位和负相位之间的交界线作为冰雪层和岩石层的分界线。图中标示了冰雪层与岩石层的分界线。利用已标校的冰雪层传播速度值 ,对分界线进行采样点分析 ,计算出视标处冰雪层厚度为 3.50 m。

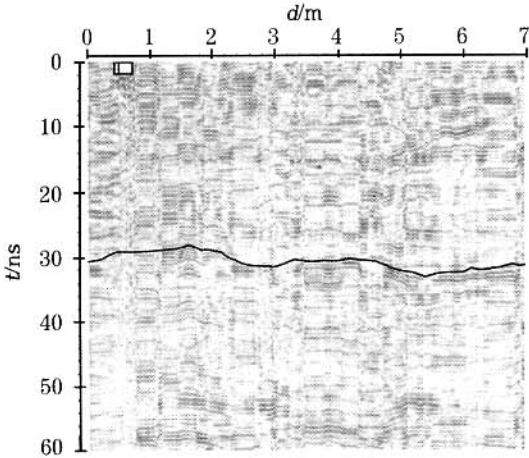


图5 绕视标处冰雪层厚度剖面

4.3 精度估计

对式 (1)两边取微分 ,并除原式可得

$$\frac{dh}{h} = \frac{dv}{v} + \frac{dt}{t}。$$

上式说明 ,探测深度的误差由速度误差和时间误差两部分组成。由于时间误差很小 ,可以不予考虑。上式即为

$$\frac{dh}{h} = \frac{dv}{v}。 \tag{2}$$

根据实际的速度标校情况 ,顾及目标法标校速度相对误差范围 ,估计此次峰顶测量标校速度误差为 $\pm 5\text{ m}/\mu\text{s}$,因此对于 3.50 m 的冰雪层厚度 ,由式(2)可得探测厚度的误差为 $\pm 0.08\text{ m}$ 。

同时也应当顾及雷达设备本身的深度分辨率。理论上可把电磁波波长 $1/8$ 作为分辨率的极限^[2] ,实用中也有分辨率采用 $1/4$ 波长的。根据厂家提供的资料 ,这里采用 $1/6$ 波长作为分辨率 ,即对于 900 MHz 的天线其分辨误差为 $\pm 0.055\text{ m}$ 。

综合以上 2 个方面的影响 ,计算出冰雪层厚度探测精度为 $\pm 0.097\text{ m}$ 。

5 结 论

2005 年珠穆朗玛峰高程测量项目中 ,经过精心

设计和集成创新改进 ,首次使用雷达探测技术测定了珠峰冰雪深度。对峰顶实测的雷达探测数据进行处理与分析后 ,得到珠穆朗玛峰高程测量峰顶觐标处冰雪层厚度为 3.50 m ,综合评定其精度误差为 $\pm 0.097\text{ m}$ 。这是一次成功的尝试。

参考文献 :

[1] 陈俊勇.我国卅五年来珠峰高程测定的思考[J].测绘学报 , 2001 30(1).
[2] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京 :地质出版社.1994.
[3] 何茂兵,杨亚新,陈越,等.浅谈探地雷达在冰川研究中的应用[J].华东地质学院学报,2003 (3).
[4] 赵永辉,吴健生,万明浩,等.不同地下介质条件下探地雷达的探测深度问题分析[J].电波科学学报,2003 (4).
[5] 戴前伟,吕绍林,肖彬,等.地质雷达的应用条件探讨[J].物探与化探 2000 24(4).
[6] 张山,陆曙明.地质雷达检测公路面层厚度的可靠性和必要性[A].江苏省公路学会道路工程优秀论文集 C].1999.
[7] 胡平,肖都,方慧.高频探地雷达技术在香港工程质量检测中的应用[J].物探与化探,2004 28(8).
[8] Seapple M P. The structural geometry , metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif ,High Himalaya of Nepal-South Tibet[J]. Journal of the Geological Society ,London ,2003 ,160 345.

THE APPLICATION OF RADAR TECHNIQUE TO DETERMINING NIVEAL BED THICKNESS OF MOUNT QOMOLANGMA

SUN Zhan-yi , ZHANG Jiang-qi , ZHANG Peng

(National Fundamental Geographical Information Center , Beijing 100044 , China)

Abstract : This paper describes the principle of the Ground Probing Radar technique (GPR) , the hardware integration of GPR and GPS , and the measurement condition at the top of Mount Qomolangma. The elevation of Mount Qomolangma was measured again in 2005 , and the ground probing technique was used for the first time to determine the precise thickness of the niveal bed. The processing and analysis of data reveal that the thickness of the niveal bed is 3.50 m at the surveyor's beacon of Mount Qomolangma.

Key words : Mount Qomolangma ; radar depth sounding ; GPR ; GPS

作者简介 : 孙占义(1972 -) ,男 ,辽宁省新宾县人 ,毕业于武汉大学 ,获工学硕士学位 ,高级工程师 ,现在国家基础地理信息中心工作 ,主要从事大地测量与测量工程、GPS 数据处理与分析等工作。