

2005 珠峰高程测定的技术进展

陈俊勇^{*} 岳建利 郭春喜 张燕平 张鹏

(国家测绘局, 北京 100830; 武汉大学测绘学院, 武汉 430079)

摘要 2005 年中国对珠穆朗玛峰高程进行了新的测定. 重点介绍了 2005 珠峰测高中大地测量数据获取和处理方面的技术进步: 其中峰顶 GPS 测量是整个珠峰测高中的关键, 总结了以往珠峰峰顶 GPS 测量的经验教训, 采取多种技术措施, 大幅度提高了峰顶 GPS 测量的精度; 增加地面测站对峰顶觇标的激光测距, 以提高测定珠峰觇标平面位置和高程的精度; 采用雷达探测结合 GPS 技术, 测定珠峰峰顶冰雪覆盖层的厚度, 提高了测量峰顶冰雪覆盖层厚度的精度和可靠性; 利用珠峰地区的重力、GPS 水准和 DTM 资料, 结合不同的地球重力场模型, 计算了珠峰地区两种栅格(30"×30"和 2.5'×2.5')的重力异常, 精化了珠峰地区局域重力场和似大地水准面. 最后给出了 2005 珠峰测高的成果: 珠峰峰顶雪面正常高为 8846.67 m, 珠峰峰顶雪面正高(海拔高)为 8847.93 m, 珠峰峰顶岩面正高为 8844.43 m, 珠峰峰顶冰雪层厚度为 3.50 m.

关键词 珠穆朗玛峰 高程测定 GPS 雷达测深 大地水准面

珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)位于中尼边界东段, 是中国最高峰, 也是世界的最高峰. 它地处西藏块体和印度块体边缘的碰撞地带, 一直是地学研究的一个热点^[1-7]. 珠峰北坡在中国西藏境内, 雪线高度为 5800~6200 m, 每年 3 月至 5 月是该地区风季过度至雨季的春季, 因此从北坡测量珠峰高程只能安排在五月中下旬. 为了提高珠峰测高的精度和可靠性, 在 2005 珠峰测高中, 珠峰北坡(以下简称珠峰地区)的地面测站一般都布设在距珠峰较近的约十余公里的山上, 其高度都在 5000 m 以上, 由于严寒和缺氧, 在这个高度上获取大地测量数据是异常艰苦的测量技术工作.

珠峰测高从大地测量数据获取方面考虑, 要精确测定珠峰高程, 其前提条件就是在进行测高的这一时间段内, 珠峰峰顶必须要设立一个稳定的、唯一的一个测量点位标志, 例如测量觇标、GPS 天线等等, 只有这样才能谈到精确的珠峰测高. 中国从 1975 年开始, 历次公布珠峰峰顶的岩面高高程, 因此更新珠峰峰顶冰雪层厚度的测量技术至关重要.

从珠峰测高的大地测量数据处理方面考虑, 要将珠峰地区的地面高程用经典大地测量技术, 如单向三角高程测量方法, 传递至峰顶, 高差近 4000 m, 在计算时必须顾及其中的折光、垂线偏差、地球曲率等项影响; 用 GPS 技术测高时, 如何将它测得的大地

收稿日期: 2005-10-13; 接受日期: 2006-02-09

* E-mail: jychen@ihep.ac.cn

高精度的转换为海拔高, 这涉及珠峰地区局域重力场的精化问题; 珠峰远离中国黄海高程基准, 因此对所涉及的高程传递和珠峰地区局域大地水准面精化的数据处理时, 要顾及相应的地形、潮汐、重力等多种影响。

中国对珠峰高程的测定给予了很大关注, 1966年以来曾对珠峰高程及其邻近地区的地形变进行了多次测量和考察^[3,7-10]。1975年国家对珠峰高程进行了正式测定^[8-10]。30年来由于地壳运动、全球变化等方面的影响, 中国决定在2005年对珠峰高程进行新的测定(以下简称2005珠峰测高), 通过在珠峰地区的GPS、水准、重力、三角高程、激光测距、高程导线、雷达探测、气象探测等技术, 获得了大量珠峰测高所需要的数据。

2005年5月22日北京时间11时08分中国登山测量队成功登上世界最高峰珠穆朗玛峰峰顶, 11时30分测量觇标成功地树立在珠峰峰顶; 珠峰峰顶的GPS接收机于11时43分开始工作, 12时19分结束, 记录了约36 min的数据; 测量冰雪层深度的雷达探测仪(GPR)于11时38分开始工作, 12时18分结束, 记录了约39 min的数据; 12时20分中国登山测量队队员得到结束在珠峰峰顶测量任务的命令后下撤。

1 2005 珠峰测高的数据获取

获取2005珠峰测高的大地测量数据主要有以下六个方面的工作。

1.1 高程控制数据的获取

2005珠峰测高的高程传递是从距珠峰约160 km的一等水准点“萨拉40基”开始, 用二等、三等水准将高程传递至珠峰地区的地面测站。各种等级的水准测量路线(图1)的总长度累计约400 km。此外, 这些水准点都尽可能和GPS点结合起来, 形成珠峰地区的GPS水准网, 为精化该地区的大地水准面准备数据。在水准测量无法作业的地区, 则高程数据的传递采取测距高程导线形式, 累计长度达20.5 km。

1.2 平面控制数据的获取

2005珠峰测高中的平面位置主要采用GPS技术加以确定。按不同需要施测了3个GPS网。(1) 青藏

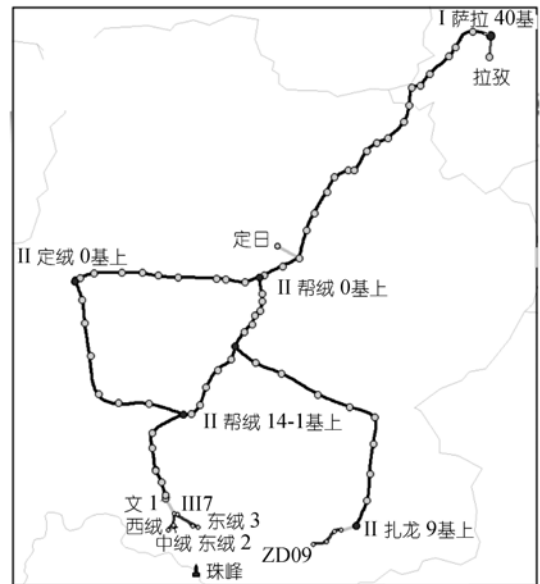


图1 2005 珠峰测高水准路线

地区GPS监测网(以下简称GPS监测网), 由30个GPS点组成。该网为2005珠峰测高时平面位置的起算网, 该GPS监测网与该地区的国家2000GPS控制网点进行了联测, 以作检核。(2) 珠峰地区GPS控制网(以下简称GPS控制网), 由32个GPS点组成, 该网和上述GPS监测网有6个重合点。GPS控制网的主要功能是将GPS监测网的坐标传算至下面的GPS联测网。(3) 与珠峰峰顶GPS接收机联测的峰顶GPS联测网(以下简称GPS联测网, 图2), 该网由包括珠峰峰顶1个GPS点和与其联测的7个地面GPS点构成。该网中2个点与GPS控制网重合。

1.3 获取新的地面重力数据

由于珠峰地区的地壳运动比较剧烈, 获取该地区现势性好的地面重力数据对确定珠峰地区重力场精细结构有重要意义。2005珠峰测高时, 在该地区施测了二等以下重力点96个, 包括了在珠峰登山路线上的5个重力点, 其中重力点最高的达7790 m。

1.4 珠峰高程数据的获取

2005年珠峰高程数据通过两种技术途径, 即GPS技术和经典大地测量技术(三角高程测量、激光测距等)获取。因此在珠峰峰顶上所树立的测量觇标

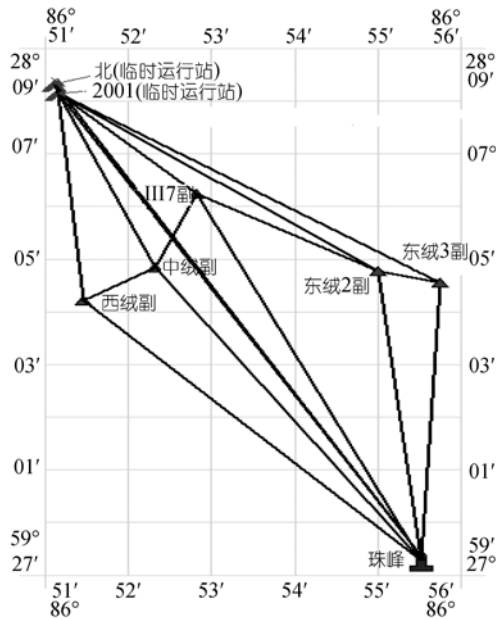


图 2 珠峰峰顶 GPS 联测网(GPSSN)

上,除了安装标笼外还架设了 GPS 天线和反射棱镜,以供三角高程测量精确照准、接收 GPS 信号和反射激光测距的信号。

1.5 珠峰峰顶冰雪层厚度数据的获取

在中国珠峰测高的历史中,第一次采用雷达和 GPS 集成探测技术对峰顶觇标处的冰雪覆盖层厚度进行了测定。

1.6 大气折光数据的获取

采用经典大地测量技术进行珠峰测高时,地面测站相对珠峰峰顶的高差大,而且都是单向进行观测,因此大气折光对光学观测成果的影响较大^[8~11],必须通过在珠峰测高时段内的当地气象参数进行计算改正。

综合以上 2005 珠峰测高六个方面的大地测量数据获取工作可以看出,它基本环绕三个目的:一是利用 GPS,三角测量,激光测距及导线测量等技术确定珠峰的平面位置;二是利用 GPS,水准测量,重力测量,DEM 等数据,结合全球重力场模型,精化珠峰地区的局域重力场及其大地水准面;三是在珠峰峰顶树立测量觇标,利用 GPS,三角高程测量,激光测距

和雷达测深等技术测定珠峰峰顶的雪面和岩石面高程。

2 2005 珠峰测高的数据处理

2005 珠峰测高数据处理主要有以下四方面的内容。

2.1 珠峰地区高程控制的数据处理

这主要涉及水准测量数据与测距高程导线测量数据的处理。对珠峰地区水准测量的观测数据都进行了水准标尺长度误差改正、正常水准面不平行改正、重力异常改正。对二等水准路线,还顾及了日月引力改正。2005 珠峰测高的高程起算点“1 萨拉 40 基”相对于青岛水准原点的高程中误差,按一等水准测量的误差传递公式并顾及这两者之间一等水准路线的长度,为 ± 47.45 mm。

2.2 珠峰地区三个 GPS 网的数据处理

数据处理时, GPS 监测网以周边地区 17 个 IGS 的 GPS 连续运行站为框架点, GPS 控制网以 GPS 监测网点为基准,而 GPS 联测网则以 GPS 控制网为基准。所有这些 GPS 网的数据处理都按照以下规定进行,即采用 IGS 精密星历、WGS-84 坐标系统和 GLOBK10.2 版软件进行整体平差,平差时坐标框架采用 ITRF2000,历元采用平均瞬时观测历元。根据上述规定进行数据处理后的 GPS 监测网点的水平方向精度优于 ± 1.2 mm,高程方向精度优于 ± 3.5 mm; GPS 控制网点的水平方向精度优于 ± 4.9 mm,高程方向精度优于 ± 12.8 mm; GPS 联测网点的水平方向精度优于 ± 4.6 cm,高程方向精度优于 ± 3.0 cm。

2.3 分别计算用采两种技术所测定的珠峰峰顶雪面大地高

以经典大地测量技术测定珠峰峰顶雪面大地高时,要注重顾及垂线偏差和大气折光等对观测成果的改正。在大本营等 6 个点处以单向三角测高和激光测距技术交会珠峰觇标以测定珠峰峰顶雪面大地高,经典大地测量技术测定珠峰峰顶雪面大地高的权平均值为 8821.694 m,精度为 ± 0.056 m。用 GPS 技术测定珠峰峰顶雪面大地高时,采用珠峰 GPS 联测网 8

个点(含珠峰峰顶)的 GPS 观测数据,按上面提及的珠峰地区 GPS 数据处理规定和在 GPS 控制网点坐标的约束下,求得以 GPS 技术测定珠峰峰顶雪面大地高为 8821.402 m,精度为 ± 0.030 m。

2.4 珠峰地区局部重力场精化

这项工作的主要成果是求定珠峰地区的 $30'' \times 30''$ 和 $2.5' \times 2.5'$ 的栅格平均空间异常。在广泛收集和加密地面重力和地形资料的基础上,通过移去恢复法和爱黎-海斯卡宁方法计算布地均异常来完成此项工作。

在精化珠峰地区重力场的基础上,进行珠峰地区垂线偏差和似大地水准面的精化计算。以 EGM96 地球重力场模型为基础,利用上述精化后的珠峰地区重力栅格($2.5' \times 2.5'$)资料,采用移去恢复法,求得 EGM96 在珠峰地区精化后的垂线偏差和重力似大地水准面,然后用该地区的 44 个 GPS/水准点与它进行拟合,求得珠峰地区精化后的似大地水准面。

3 2005 珠峰测高中的技术进步

在 2005 珠峰测高的大地测量数据获取和数据处理中,有以下三个方面的技术进步。

3.1 珠峰地区似大地水准面的精化

这项工作的重点是加密珠峰地区的栅格重力值及其相应的定义于中国高程基准的大地水准面。2005 珠峰地区局部重力场精化时,其重力基准采用 2000 国家重力基本网,坐标系统采用 WGS-84 坐标系,高程基准采用 1985 国家高程基准。根据珠峰地区的地形和地质构造的特点,采用均衡学说,收集和利用由地面技术与空间技术测得的该地区的重力资料和地形资料,精化珠峰地区的局部重力场和相应的大地水准面^[13-17]。下面简要叙述一下在 2005 年这一计算中曾予以重点关注过的一些技术问题。

(1) 珠峰地区重力均衡模型及其均衡深度的确定。2005 珠峰测高中计算珠峰地区的均衡重力异常时,对采用普拉特-海福特均衡模型还是采用爱黎-海斯卡宁均衡模型进行了比较。比较时,普拉特-海福特模型的均衡低偿深度仍采用 1975 年珠峰测高计算中研究确定所采用的 113.7 km^[8-10,13-17],爱黎-海斯卡宁模型的均衡低偿深度经试算比较后,决定采用 34 km。

采用爱黎-海斯卡宁模型归算后的位于珠峰地区各考虑点的均衡重力异常值,相对于用普拉特-海福特模型所算得的相应点值而言,它们的数值及彼此间的变化都较小。因此在 2005 珠峰测高中,计算该地区的均衡重力异常时采用爱黎-海斯卡宁均衡模型。

(2) 珠峰地区栅格地形数据的采集和确定。在利用移去恢复法计算和推估珠峰地区重力值时,由于该地区的重力资料、特别是高分辨的重力资料严重匮乏,因此必须充分利用数字地形模型(DTM)来弥补这一不足。珠峰地区栅格地形数据的国内部分主要以国家测绘局 1:5 万($1'' \times 1''$)DTM 为基础,结合 SRTM3 ($3'' \times 3''$)的数字地表模型(DSM),而珠峰地区相邻的国外部分则以 SRTM3 的 DSM 为基础,结合 GTOPO30 ($30'' \times 30''$)的 DTM。

在进行了珠峰地区重力值的空间改正、布格改正、地形改正与均衡改正等计算后,为 2005 珠峰测高提供了珠峰地区两种栅格形式($30'' \times 30''$ 和 $2.5' \times 2.5'$)的重力空间异常、布格异常、均衡异常的计算。这一栅格值基本相应于下面要采用的地球重力场模型的分辨率。

(3) 珠峰地区似大地水准面计算^[15-17]。选用 EGM96, WDM94, IGG05B, DQM2000D 和 CG03C 五个地球重力场模型为基础,利用移去恢复法,结合上述珠峰地区地形与重力的栅格数据,分别求得以这五个地球重力场为基础的,精化后的珠峰地区的(5 个局域)重力似大地水准面。它的分辨率和精度有了很大提高。

为了将它们拟合和定位于中国黄海高程基准,因此选用珠峰地区的 44 个 GPS/水准点,采用二元二次多项式,与这些精化后的 5 个局域重力大地水准面分别进行拟合,获得 5 个具有较高分辨率和较好精度的珠峰局域似大地水准面,以便选用。

将上述 44 个 GPS/水准点以外的一些 GPS/水准点的高程异常值,与上述五个珠峰局域似大地水准面相应点的高程异常值进行比较,根据这些比较而得的差值,分别统计了上述 5 个珠峰局域似大地水准面的精度,其数值都在 $\pm 0.08 \sim \pm 0.09$ m 的区间内。也就是说,与这五个精化后的局域重力大地水准面相应的,这五个珠峰局域似大地水准面的精度彼此很

接近, 或者说是等效的. 与 EGM96 相应的上述珠峰局域似大地水准面的精度虽然在 5 个中是最低的一个, 只有 ± 0.09 m, 但考虑到这一重力场在全球的广泛应用和在中国的应用实践, 决定仍采用经上述步骤所获得的, 与 EGM96 精化后的局域重力大地水准面相应的珠峰局域似大地水准面, 为 2005 珠峰测高计算中所依据的似大地水准面(图 3).

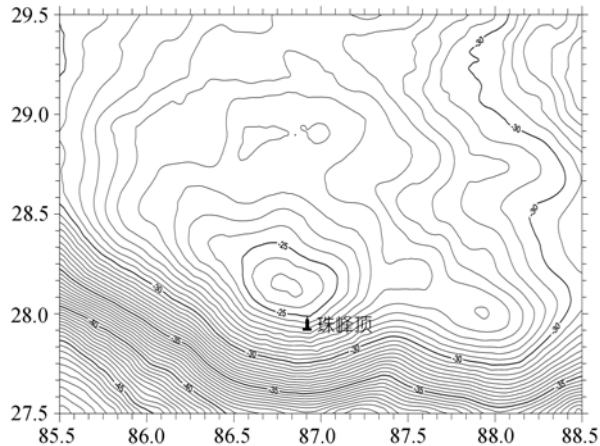


图 3 2005 珠峰地区局域似大地水准面(单位: m)

3.2 珠峰峰顶冰雪层厚度测量

珠峰峰顶常年冰雪覆盖, 珠峰峰顶冰雪层厚度与珠峰峰顶岩面的高程及其变化, 一直是学者关注的一个问题. 对珠峰峰顶雪面到岩石面的厚度测量, 过去一直采用人力探杆测深的方法. 1975 年珠峰测高时, 中国登山队员在珠峰峰顶采用端头为包铁的木质探杆插进冰雪层, 测得厚度为 0.92 m^[7-10]. 1992 年中意合作进行珠峰测高, 意大利登山队员在峰顶用钢质探杆插进冰雪层, 测得厚度为 2.55 m^[5,7,11,12].

2005 年珠峰测高时, 中国登山测量队员采用雷达探测技术测定珠峰峰顶冰雪覆盖层的厚度, 提高了测峰顶雪深的精度和可靠性. 2005 珠峰测高中所使用的便携式 GPS 雷达探测仪(GPS-GPR, 以下简称雷达)是由中国技术人员集成的. 集成主要包括两个方面: 一是实现 GPR 与 GPS 硬件的集成, 其中包括 GPS 天线的安置和与 GPS 和 GPR 主机的线缆连接等; 二是实现 GPS 时间与 GPR 测深时间的同步, 解决了在同一时刻 GPR 的空间位置与其所探测深度的匹配问题.

根据雷达的 GPS 与珠峰峰顶觇标上的 GPS 进行差分动态解算, 并换算至海拔高程, 可描绘出该雷达经过范围内的珠峰峰顶雪面地形(图 4). 以绕珠峰峰顶觇标处的雷达探测值形成剖面, 获得觇标处的冰雪层厚度值为 3.50 m. 综合评定其精度为 ± 0.097 m (图 5).

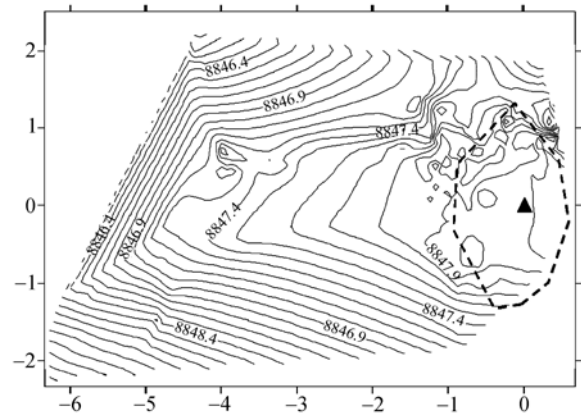


图 4 珠峰峰顶(局部)雪面地形(单位: m)
(图中三角形为觇标位置)

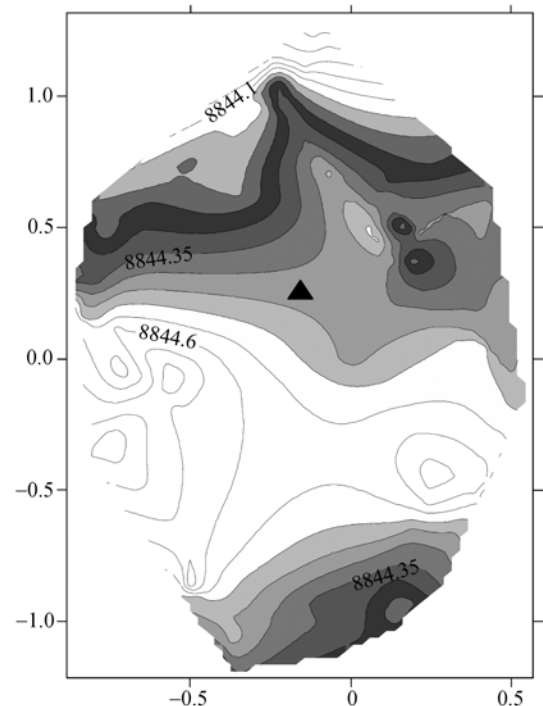


图 5 珠峰峰顶(局部)岩面地形(单位: m)
(图中三角形为觇标位置)

根据 2005 年珠峰峰顶雷达测深反射波波长和波形的分析, 在 3.50 m 的厚度中, 最上一层厚度为 1.0 m, 密度最低, 应是雪层; 第二层厚度为 1.5 m, 密度稍大, 应是冰层; 第三层厚度为 1.0 m, 其密度低于 3.50 m 深度以下的岩石层, 但大于第二层的冰层, 估计是冰、泥、石等的混合层。由此可见, 1975 年探测到的 0.92 m 深度可能是珠峰峰顶冰面以上的雪层厚度, 而 1992 年探测到的 2.55 m 深度可能是峰顶的冰雪层厚度, 但还是没有达到岩面。

3.3 提高珠峰峰顶测量的精度和可靠性

(1) 2005 珠峰测高中的峰顶 GPS 测量是提高测高精度和可靠性的关键。在 1992 年^[5,11,12]和 1999 年^[6,7]的珠峰测高中, GPS 天线都放在珠峰峰顶的雪面上, 采样率则仍按常规取为 30 s。由于峰顶活动范围有限和上面的人员走动, 在短短几十分钟的峰顶 GPS 测量中 GPS 信号曾被阻断了二十余次, 非常不利于峰顶 GPS 的精确定位。此外在 1999 年珠峰测高中, 与珠峰峰顶 GPS 联测的只有设于珠峰南坡的 2 个 GPS 站(数据处理时引用的 IGS 站不计在内)。

回顾了峰顶 GPS 测量的这些经验和教训。2005 年在峰顶 GPS 测量时, 采用了 3 个技术措施以提高测定珠峰峰顶水准平面位置和高程的精度。一是升高 GPS 接收机天线的位置, 将其置于高 2.5 m 测量水准的顶部, 以减少对 GPS 的信号干扰和阻断; 二是缩短 GPS 信号的采样间隔, 考虑到峰顶 GPS 测量时间短的特点, 因此整个 GPS 联测网的 GPS 数据采样间隔设置为 1 s。三是在珠峰北坡布设了 7 个与峰顶 GPS 联测的 GPS 测站, 其中一个还是相距珠峰仅 70 km 专为珠峰测高设立的 GPS 连续运行站。采取这些措施后, 珠峰 GPS 测高的精度与以前的结果相比, 提高了近 20% 以上。

(2) 2005 珠峰测高中对提高以经典大地测技术测定珠峰高程的精度也作了考虑。除了对珠峰峰顶水准标进行三角高程测量外, 还在珠峰北坡的 5 个地面站上对峰顶水准标进行了激光测距, 采用了三角高程和测距相结合的珠峰定位和测高。此外, 为了削弱由大气折光所带来的经典大地测量测高误差, 在中国科学院科学考察队的支持下, 2005 珠峰测高时施放高

空探候气球的地点, 由往常的定日(距珠峰 70 km)移到离珠峰较近的大本营(18 km), 在测高期间, 每天还增加了施放高空探候气球的次数, 由过去的一天 2 次, 增加到一天 4~6 次。因此由经典大地测量技术所取得的珠峰平面位置和高程成果的精度有了显著改善。

4 珠峰高程及其精度评估

4.1 珠峰峰顶雪面大地高

上面已经提及, 由 GPS 技术测定的珠峰峰顶(即测量水准标处, 下同)雪面大地高为 8821.402 ± 0.030 m。由传统大地测量技术测定珠峰峰顶雪面大地高为 8821.694 ± 0.056 m。取上述两者的权平均值后, 得到珠峰峰顶雪面大地高为 8821.467 ± 0.027 m。

4.2 珠峰峰顶雪面正常高

由珠峰峰顶雪面大地高推算相应的正常高, 必须计算相应的高程异常值。根据珠峰地区精化的似大地水准面及珠峰峰顶水准标处的坐标, 可得珠峰峰顶水准标处的高程异常值为 -25.199 m。由于珠峰峰顶处高程异常值是在珠峰地区似大地水准面的边缘, 因此该值的误差取 EGM96 精化后的珠峰地区似大地水准面误差的 1.5 倍, 即 $1.5 \times 0.090 \text{ m} = 0.135 \text{ m}$ 。

已知珠峰峰顶雪面的大地高 8821.467 m 和珠峰的高程异常值 -25.199 m 。由此求得珠峰峰顶雪面正常高为 8846.666 m , 其精度为 $[(0.027)^2 + (0.135)^2]^{1/2} = \pm 0.138 \text{ m}$ 。

4.3 珠峰峰顶雪面正高

珠峰峰顶水准标处的大地水准面低于相应处的似大地水准面 1.267 m , 这一数值的计算和精度评定方法经试算比较后, 仍采用类同于 1975 年珠峰高程中的相应计算原理^[1-3,13], 由此得到该差值的精度为 $\pm 0.128 \text{ m}$, 因此珠峰峰顶雪面的正高(海拔高)为 8847.933 m , 其精度为 $[(0.138)^2 + (0.128)^2]^{1/2} = \pm 0.188 \text{ m}$ 。

4.4 珠峰峰顶岩面正高

根据珠峰峰顶雪面的正高 8847.933 m 和相应点的冰雪层厚度 3.50 m , 即得珠峰峰顶岩面正高为

8844.433 m. 上文已经提及, 2005 珠峰测高中雷达测冰雪层精度为 ± 0.097 m, 因此珠峰峰顶岩面正高测定值的精度为 $[(0.188)^2 + (0.097)^2]^{1/2} = \pm 0.212$ m.

根据上面的计算, 2005 珠峰测高中珠峰峰顶岩面正高(海拔高)的国家采用值为 8844.43 m, 精度为 ± 0.21 m.

致谢 2005 珠峰测高项目由国家测绘局领导和组织国家基础地理信息中心、陕西测绘局, 在西藏登山协会的协助下完成的, 特此向该项目作出贡献的测绘队员们、登山队员们表示衷心地感谢.

参 考 文 献

- Molnar P, Caen H L. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. *Geophys J Int*, 1989, 123
- Zhu Wenyao, Cheng Zongyi, Xiong Yongqing, et al. Preliminary results of measuring the crustal deformation in Qinghai-Tibet area using GPS technique. *Science in China, Ser D*, 1998, 41(3): 314~318
- Angusleppan P V. The height of Mt. Everest. *Survey Rev*, 1982, (26): 367~385
- Gulatee B L. The height of Mt. Everest: A new determination (1952~1954). New Deli: Survey of India, 1954
- Poretti G, Marchesinie C, Beinat A. GPS Surveys Mount Everest. *GPS World*, 1994, (10): 32~44
- Washburn B. New official height of Everest. *National Geographic*, 1999, (11): 76
- 陈俊勇, 庞尚益, 张骥, 等. 对我国 35 年来珠峰高程测定的思考. *测绘学报*, 2001, 30(1): 1~5
- 陈俊勇. 珠穆朗玛峰高程计算. *测绘通报*, 1975, (4): 19~27
- 朱亮. 珠穆朗玛峰高程测定. *中国科学*, 1976, 19(2): 74~77
- Chen J Y. A new determination of the height of the World Highest Peak. *《OZfV》*, 1980, (1): 1~6
- 陈俊勇, 张骥, 刘允诺, 等. 珠穆朗玛峰高程的一次最新测定. *测绘通报*, 1993, (6): 3~6
- Chen J Y. The newest height determination for the world's highest peak: Mt. Everest *Bull Di Geod E Scien Affini*, 1994, (4): 367~374
- 陈俊勇, 刘允诺, 张骥, 等. 在板块边缘的冲撞地区重力场的求定. *测绘学报*, 1994, 23(4): 241~246
- 陈俊勇, 张骥, 刘允诺, 等. 珠穆朗玛峰及其北部毗邻地区的地壳运动、重力场和大气折光. *科学通报*, 1994, 39(13): 1204~1207
- Chen J Y. Crustal movement, gravity field and atmospheric refraction in the Mt. Everest. *ZfV*, 1994, (8): 389~400
- Chen J Y, Chang G, Lee Y L, et al. An improved local geoid in the Mt. Everest area. *ZfV*, 1999, (11): 362~363
- 陈俊勇, 张骥, 李毓麟, 等. 珠峰地区似大地水准面精确求定. *测绘学报*, 1999, 28(3): 278~280