

验潮与 GPS 联合监测南极中山站 附近海冰厚度变化

谢苏锐^{1,2} 李斐^{1,2} 赵杰臣³ 张胜凯^{1,2}

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079

3 国家海洋环境预报中心,北京,100081

摘要:基于力学平衡原理,提出了一种联合验潮与 GPS 测量极区海冰厚度的新方法。由海冰上的 GPS 观测可得到海冰上表面高,验潮可提供海水面高,联合两种观测数据可计算得到海冰干弦高度,再结合海冰表面积雪厚度与冰雪密度数据,由力学平衡原理可构建海冰厚度的计算模型。根据这一原理,通过中国第 28 次南极科考队在中山站附近海冰上的实验,监测到了 2012 年 9 月 22 日至 11 月 9 日的海冰厚度变化。与钻孔实测冰厚相比,其总体精度达到了 cm 级,最大差异为 8.9 cm,差异的均方根为 5.4 cm。

关键词:GPS;验潮;干弦高度;海冰厚度;南极

中图分类号:P228.42 文献标志码:A

极区海冰在全球气候系统中扮演着举足轻重的角色。海冰及其表面分布的积雪影响着极区的光照率和能量收支,海冰还通过调节海洋与大气间的能量交换引起大洋环流强度的改变等方式影响着全球气候,而全球气候的变化又反过来影响着南北极海冰。可以说,极区海冰是气候变化的指示剂,对极区海冰进行监测有助于了解全球气候变化^[1,2]。

在 20 世纪下半叶至今全球气候变暖的背景下,由卫星和其他观测资料显示,北极海冰的范围、密集度和厚度呈现出明显减小的趋势;南极海冰的面积呈增加,而密集度和厚度呈微弱减小的趋势,南极海冰总的体积呈增加趋势,但变化并不明显^[2,3]。然而,由部分数值模拟研究预测的南极海冰总量呈减少趋势^[4,5]。对南极海冰变化特征的研究还需要更多的观测资料支持。

冰厚一直是海冰特征研究中最基本的物理量之一,目前由卫星遥感已能够获取连续可靠的海冰范围和密集度,但对厚度的卫星观测技术尚不成熟,在研究冰厚的精细变化时,通常只能依靠现场观测获取有限的观测数据。针对南极独特的环境,

已发展了多种冰厚测量技术。钻孔测量是测量冰厚最可靠的手段,但难以实现自动化,在南极恶劣的环境下实施困难,且无法实现定点连续观测^[6]。其他一些冰厚测量技术,如雷达扫描、电磁感应、声呐探测等也成功地应用于冰厚测量,但易受现场环境因素的干扰,且一般难以获得高频率长时间的冰厚序列,使用时,应根据实际需要和现场条件选择合适的方法^[6,7]。近年来,随着卫星测高技术的发展,由星载激光测高仪观测数据已能够得到有效的海冰干弦高度,再根据力学平衡原理,也能估算出冰厚值^[2,8-11]。该方法的优点在于可得到大范围内的海冰厚度值,但精度较差^[11]。

为实现冰厚的自动化连续测量,以监测其变化,本文提出了一种联合验潮与 GPS 测量冰厚的方法,通过在中山站附近海域的固定冰(fast ice)上的实验验证了该方法的可行性。

1 基本原理

由于潮汐的作用,极区海冰会随着海面升降而运动,即使在近岸的陆缘冰区,由于潮汐缝的存

收稿日期:2013-04-15

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41174019,41176173);中国极地科学战略研究基金资助项目(20120317);南北极环境综合考察与评估专项基金资助项目(CHINARE2013-04-01, CHINARE2013-02-02);湖北省自然科学基金重点创新群体资助项目(2012FFA041)。

第一作者:谢苏锐,博士生。主要从事空间大地测量与地球动力学方面的研究。E-mail:xiesurui@whu.edu.cn

在,海冰依然可以上下运动。Aoki等^[12]与King & Aoki^[13]利用GPS在南极Syowa站附近距海岸约50 m,距最近潮汐缝约30 m的固定冰上所做的潮汐观测表明,海岸对潮汐缝之外的海冰垂直运动影响极小,可视为海冰能上下自由运动。由于本文实验地点为距离海岸线约80 m,距最近潮汐缝约70 m的开阔区域的固定冰上,为简化问题,不考虑海岸对海冰垂直运动的影响。图1是极区海冰(表面可能有积雪)浮于海水中的示意图, T_s 、 T_i 和 H_f 分别表示表面积雪厚度、海冰厚度和干弦高度(干弦高度通常定义为海水面至海冰或积雪上表面高度^[9],为便于计算,在此定义海水面至海冰上表面高为干弦高度,当海水面在海冰上表面以下时,干弦为正,反之则为负)。

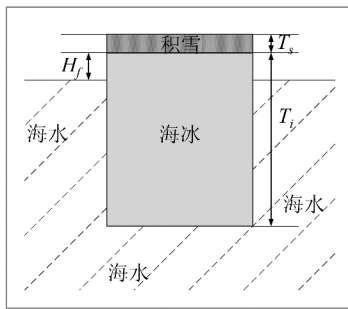


图1 极区海冰与积雪浮于海水中的示意图
Fig. 1 Snow-covered Sea Ice in Polar Regions

本文提出的方法是基于力学平衡原理得出的,假定海冰和上表面积雪所受的海水浮力与自身重力相等,由阿基米德浮力原理可知:

$$\rho_s T_s + \rho_i T_i = \rho_w (T_i - H_f) \quad (1)$$

式中, ρ_s 、 ρ_i 和 ρ_w 分别为积雪、海冰和海水的密度。文中对海冰与积雪厚度的不均匀性进行了简化处理,所得冰厚可以理解为一范围内的平均厚度。

式(1)中,冰雪和海水密度(ρ_i 、 ρ_s 、 ρ_w)可以通过抽样测定或直接使用经验值。要得出冰厚 T_i ,难点在于雪厚 T_s 与干弦高度 H_f 的测量。相比于干弦高度,雪厚较容易通过人工或由自动化仪器测量得到^[14],在此重点讨论干弦高度的测量。

由图1可知,若能分别测量到海面与海冰上表面高,二者之差便是干弦高度。海面高可由验潮仪监测得到,对于海冰上表面高,本文试图由冰上架设GPS观测得到。为提高精度,采用GPS相对定位模式。图2是联合GPS与验潮测量干弦高度的原理图, H_a 、 H_d 、 H_i 、 H_{cg} 分别是GPS连续跟踪站天线与验潮仪、海水面、海冰上表面、冰上GPS接收机天线之间的高差, H_b 是海水面与验潮仪之间的高差, H_{gi} 是冰上GPS天线高。

干弦高度 H_f 的计算式为:

$$H_f = H_d - H_i = (H_a - H_b) - (H_{cg} + H_{gi}) \quad (2)$$

其中, H_a 已在验潮仪零点标定时通过GPS联测得到^[15]; H_b 可由验潮仪监测得到; H_{cg} 可由GPS相对定位得到; H_{gi} 为冰上架设的GPS天线高,实验中通过人工量取。

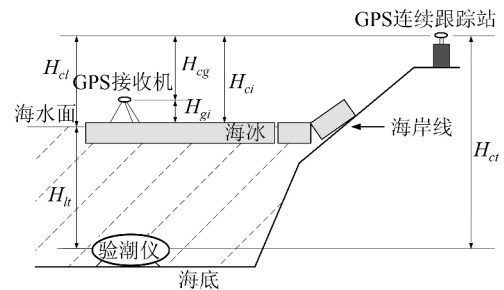


图2 验潮与GPS联合测量海冰干弦高度原理图
Fig. 2 Sea Ice Freeboard Measurement by a Combination of GPS and Tide Observations

2 实验与分析

为验证上述方法的可行性,中国第28次南极科考中山站越冬队员在中山站附近的内拉湾(Nella Fjord)海冰面上进行了现场实验,实验时间是2012-09-22~2012-11-09。实验中,还通过人工钻孔测量取得了冰厚,以做对比。

2.1 实测数据

2.1.1 冰上GPS观测

如图2所示,在距海岸线约80 m,距最近潮汐缝约70 m的固定冰上架设GPS天线与接收机,与岸上的中山GPS连续跟踪站同步观测。用于相对定位的两台GPS均为Leica双频接收机,卫星截止高度角设为 15° ,数据采样间隔15 s,通过动态相对定位确定海冰上表面高的连续变化。实验中,GPS天线高通过人工量取至海冰上表面,整个实验期间,GPS天线高的变化极小(mm级),但为了消弱因天线高度变化带来的误差,每隔数天(1~4 d)便量测一次天线高,数据处理时,某时刻天线高由相邻两次量测值线性插值得到。

2.1.2 验潮

为连续获取高精度的海面高,通常使用验潮仪进行连续观测。中国第26次南极科考队于2010年2月在中山站附近海域投放了一台海底压力式验潮仪(bottom pressure gauge, BPG),建成了中国在南极的首个永久性自动验潮站^[16]。压力式验潮仪能以极高的精度(mm级)记录海面瞬时高度。遗憾的是,因数据传输线缆被南极冬

季的海冰挤压伤损,造成该验潮仪工作不稳定,数据有部分跳变和中断。为保证潮汐序列的可靠性,使实验顺利进行,实验时,还另外使用了一台 GPS 验潮仪对海面高进行约束。Aoki 等^[12]通过在南极 Syowa 站的实验表明,由 8 个月 GPS 与 BPG 验潮得到的瞬时海面高度差值的 RMS 仅为 0.007 m,且使用 GPS 验潮还能消除 BPG 验潮中因零点漂移带来的系统性误差。有关中山站 BPG 和 GPS 验潮的方法见文献^[15]。

2.1.3 积雪与海冰厚度的人工测量

为与 GPS 观测和验潮得到的冰厚进行比对,实验中每隔数日由人工测量积雪与冰厚值。方法如下:以测量干弦的 GPS 天线为圆心,在海冰面上半径约 3 m 的圆上均匀地选择三个点,先用钢尺测量各点的积雪厚度,再在该点上使用人工钻孔的方式测量冰厚值,最后取三个点上积雪和海冰厚度的平均值作为当时此 GPS 天线位置处的积雪和海冰厚度值。表 1 给出了由人工测量得到的积雪与海冰厚度值。由于中山站冬季气旋活动频繁,风速较大,因而在整个实验期间,冰面上的积雪很少。另外,实验时间为 9 月下旬到 11 月上旬,在此期间,海冰的厚度变化并不明显。

表 1 人工测量积雪与海冰厚度

Tab. 1 Sea Ice and Snow Thickness Measured by Manual Measurements

序号	日期/月-日	钢尺测量雪厚/m	钻孔测量冰厚/m
1	09-22	0	1.507
2	09-26	0	1.525
3	09-30	0	1.550
4	10-04	0	1.563
5	10-12	0	1.595
6	10-16	0	1.598
7	10-21	0	1.608
8	10-29	0.080	1.607
9	10-31	0.040	×
10	11-02	0.008	1.612
11	11-09	0	1.597

注:×表示无对应的观测值。

2.2 计算与分析

使用高精度 GPS 定位软件 GAMIT 中的 TRACK 模块,采用动态相对定位模式解算 GPS 数据,卫星轨道采用国际导航定位服务组织 IGS 提供的最终精密星历(下载自 ftp://igswws.unavco.org/igsceb/product)。

设定起始海面与中山 GPS 连续跟踪站的高差为 -22 m,图 3 是由三天的 GPS 观测得到的海冰上表面与验潮得到的海面高的时间序列,图 4 是整个实验期间所得的时间序列,图中横坐标为年积日(day of year, DoY),纵坐标为海拔高,

蓝色代表海面,红色代表海冰上表面高。图 4 中的时间序列有部分中断,这是因为实验中采用蓄电池为冰上 GPS 接收机供电,在更换电池期间,仪器暂停工作。可以看出,海冰的垂直运动与潮汐运动特征基本一致。

Lei 等^[17]于中国第 22 次南极科考期间,在实验区附近通过取样对海冰密度与厚度等进行了系统性测量,故在下文计算中选取的冰雪密度值与 Lei 等^[17]保持一致。将海冰分为水上和水下两部分,水上部分密度取为 879 km/m³,水下部分密度取为 920 km/m³,积雪密度取为 261 km/m³,海水密度取为 1 025 km/m³,由式(1)可得海冰厚度的计算公式为:

$$T_i = \frac{\rho_s T_s + (\rho_w + \rho_{i,a} - \rho_{i,b}) H_f}{\rho_w - \rho_{i,b}} \quad (3)$$

式中, ρ_s 、 ρ_w 、 T_s 、 T_i 、 H_f 的含义同式(1); $\rho_{i,a}$ 和 $\rho_{i,b}$ 分别表示水上和水下部分的海冰密度。将冰雪和海冰密度以及实测的雪厚数据代入式(3),再联合验潮与 GPS 观测得到的干弦高度值即可计算出海冰厚度值。表 2 给出了利用本实验得到的对应于人工测量冰雪厚度时刻的海冰厚度值,图 5 给出了本次实验得到的干弦和冰厚时间序列。为便于比较,图 5 中还给出了雪厚及钻孔测量得到的冰厚值。

图 5 表明,中山站附近的海冰厚度在 9 月底至 11 月初期间变化很小,由本文方法得到的冰厚值与钻孔测量值基本符合(差异为 cm 级)。事实上,由表 2 的统计数据可以看出,联合验潮和 GPS 所得冰厚与钻孔测量值最大差异出现在 9 月 30 日,为 8.9 cm,由表 2 中两种方法所得冰厚值差异的均方根 $RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^9 dT_i^2 / 9} = 5.4 \text{ cm}$ 。考虑到钻孔测量冰厚的精度为亚 cm 级水平^[7],可认为本文方法的冰厚测量精度为 cm 级。

表 2 海冰厚度测量结果

Tab. 2 Statistics of Sea Ice Thickness

序号	日期/月-日	钻孔测量冰厚/m	验潮与 GPS 测量冰厚/m	所测冰厚差 dT/m
1	09-22	1.507	1.421	-0.086
2	09-26	1.525	1.525	0
3	09-30	1.550	1.639	0.089
4	10-04	1.563	1.590	0.027
5	10-12	1.595	1.534	-0.061
6	10-16	1.598	1.568	-0.030
7	10-21	1.608	1.546	-0.062
8	10-29	1.607	1.579	-0.028
9	10-31	×	1.615	×
10	11-02	1.612	1.636	0.024
11	11-09	1.597	×	×

注:×表示无对应的观测值。

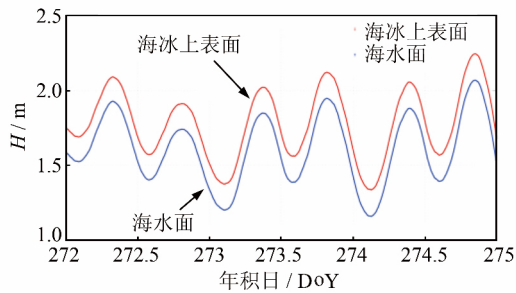


图3 海冰上表面与海面高变化特征

Fig. 3 Elevation Variations of Sea Level and Sea Ice Upper Surface

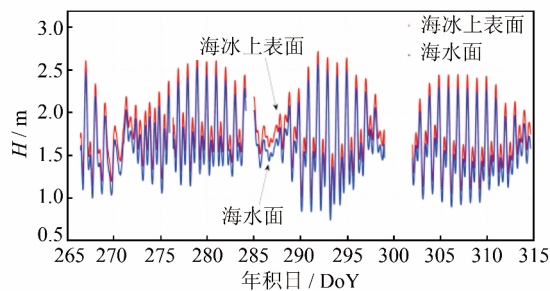


图4 整个实验期间所得海面与海冰上表面高的时间序列

Fig. 4 Elevation Variations of Sea Level and Sea Ice Upper Surface Derived from the Whole Experiment Period

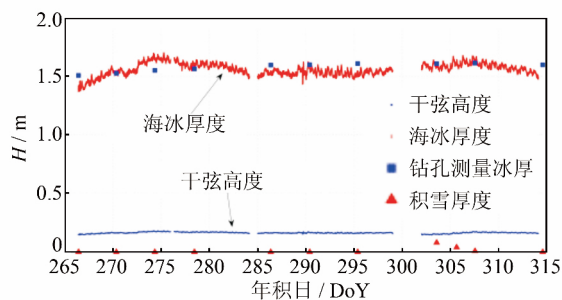


图5 联合分析得到的海冰干弦与冰厚时间序列

Fig. 5 Time Series of Sea Ice Freeboard and Thickness Derived from the Experiment

本实验中采用超短基线(冰上实验地点距中山GPS连续跟踪站约110 m)相对定位模式解算GPS数据,所得的海冰上表面相对于起始海水面的高差精度为亚cm级,由验潮所得的海面高精度亦为亚cm级水平,整个实验期间,冰面的积雪始终很少,对计算结果的影响不大。计算中可能引起较大误差的因素是海冰的密度模型,为简化问题,本文在计算时将海冰简单地划分为冰上和冰下两部分,并认为各部分的密度均匀。事实上,海冰的密度并不均匀,若使用合适的海冰密度模型或取样测量冰密度,可能得到与钻孔测量更加接近的观测结果。另外,实验中未考虑冰雪上下

表面起伏造成的影响,合适的冰雪地形模型可能有助于计算出更加精确的结果。

3 结 语

相比于传统的钻孔测量,验潮与GPS联合观测确定冰厚变化的方法可以实现对海冰厚度的自动化高频率长时间连续观测,为海冰厚度的变化研究提供一种新的数据源。通过在中山站附近海冰上的现场实验,证明该方法可以cm级的精度监测到冰厚及其变化。

由于该方法与激光测高估算海冰厚度的原理相似,但可靠性更好,精度更高,因而该方法可用于星载或机载激光测高仪观测数据的校正。

本文重点在于提出并讨论联合验潮与GPS监测海冰厚度的可行性。由于对冰雪和海水的密度以及冰雪的上下表面地形等模型进行了简化处理,因此后续还可以深入研究,考虑使用更加精细的冰雪和海水密度与冰雪上下表面地形模型,提高该方法获取海冰厚度的精度与可靠性。

致谢:感谢中国第28次南极考察队中山站越冬队员在数据采集中给予的支持。

参 考 文 献

- [1] Massom R A, Stammerjohn S E. Antarctic Sea Ice Change and Variability-Physical and Ecological Implications[J]. *Polar Science*, 2010, 4(2): 149-186
- [2] Kurtz N T, Markus T. Satellite Observations of Antarctic Sea Ice Thickness and Volume[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117 (C8): C8025
- [3] Zhang J. Increasing Antarctic Sea Ice Under Warming Atmospheric and Oceanic Conditions [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(11): 2 515-2 529
- [4] Liu J, Curry J A. Accelerated Warming of the Southern Ocean and Its Impacts on the Hydrological Cycle and Sea Ice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(34): 14 987-14 992
- [5] Gupta A S, Santoso A, Taschetto A S, et al. Projected Changes to the Southern Hemisphere Ocean and Sea Ice in the IPCC AR4 Climate Models[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(11): 3 047-3 078
- [6] Li Zhijun, Han Ming, Qin Jianmin, et al. States and Advances in Monitor of Ice Thickness Change[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 753-757 (李志军, 韩明, 秦建敏, 等. 冰厚变化的现场监测现状和研究进展[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 753-757)
- [7] Lei Ruibo, Li Zhijun, Qin Jianmin, et al. Investiga-

- tion of New Technologies for In-situ Ice Thickness Observation[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 287-292 (雷瑞波, 李志军, 秦建敏, 等. 定点冰厚观测新技术研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 287-292)
- [8] Laxon S, Peacock N, Smith D. High Interannual Variability of Sea Ice Thickness in the Arctic Region [J]. *Nature*, 2003, 425(6 961): 947-950
- [9] Zwally H J, Yi D, Kwok R, et al. ICESat Measurements of Sea Ice Freeboard and Estimates of Sea Ice Thickness in the Weddell Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C2): C2S-C15S
- [10] Kwok R. Satellite Remote Sensing of Sea-ice Thickness and Kinematics: A Review [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56: 1 129-1 140
- [11] Yang Fan, Wen Jiahong, Wang Weili. ICESat and ICESat-2 Applications: Progress and Prospect [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2011, 23(2): 138-148 (杨帆, 温家洪, Wang Weili. ICESat 与 ICESat-2 应用进展与展望 [J]. *极地研究*, 2011, 23(2): 138-148)
- [12] Aoki S, Shibuya K, Masuyama A, et al. Evaluation of Seasonal Sea Level Variation at Syowa Station, Antarctica, Using GPS Observations [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(3): 519-523
- [13] King M, Aoki S. Tidal Observations on Floating Ice Using a Single GPS Receiver [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(3): 1 138
- [14] Ryan W A, Doesken N J, Fassnacht S R. Preliminary Results of Ultrasonic Snow Depth Sensor Testing for National Weather Service (NWS) Snow Measurements in the US [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(15): 2 748-2 757
- [15] Huang J F, E D C, Zhang S K. Zero Calibration of Bottom Pressure Gauge in Antarctic: A Case Study at Chinese Zhongshan Station Using GPS Techniques [C]. The 20th International Conference on Geoinformatics, Hong Kong, China, 2012
- [16] Huang Jifeng, E Dongchen, Zhang Shengkai, et al. Processing and Analysis of Tidal Data for Zhongshan Station, East Antarctica [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(5): 63-67 (黄继锋, 鄂栋臣, 张胜凯, 等. 南极中山验潮站的数据处理与分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(5): 63-67)
- [17] Lei R, Li Z, Cheng B, et al. Annual Cycle of Landfast Sea Ice in Prydz Bay, East Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C2): C2006

Estimation of Sea Ice Thickness at Zhongshan Station in Antarctica Based on a Combination of GPS and Tide Observations

XIE Surui^{1, 2} LI Fei^{1, 2} ZHAO Jiechen³ ZHANG Shengkai^{1, 2}

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

² Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan 430079, China

³ National Marine Environmental Forecasting Center, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China

Abstract: Due to the tidal effect, sea ice in Polar Regions moves vertically along with the sea level. The elevation of the sea ice's upper surface can be detected by a GPS receiver, and sea level can be measured by tide observations. Thereupon, if we can provide the thickness of the snow cover over the sea ice, and the densities of snow and sea ice, then, according to the principle of hydrostatic balance, thickness of the sea ice can be derived by a combination of the GPS and tide observations. The experiment conducted by the 28th Chinese National Antarctic Expedition at Zhongshan Station in Antarctica during September 22, 2012 to November 9 indicates that the sea ice thickness can be estimated in centimeter-level accuracy by this approach. Compares to the measurements made by drilling holes, the maximum difference is 8.9 centimeters, the root mean square of the different values is 5.4 centimeters.

Key words: GPS; tide observation; freeboard height; sea ice; antarctica

First author: XIE Surui, PhD candidate, specializes in space geodesy and geodynamics. E-mail: xiesurui@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174019, 41176173; the Polar Strategy Project from Chinese Arctic and Antarctic Administration, No. 20120317; Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Programs, Nos. CHINARE2013-04-01, CHINARE2013-02-02; the Natural Science Foundation of Hebei Province, No. 2012FFA041.