

区域似大地水准面拟合方法及适用性分析*

郭春喜 聂建亮 王斌 蒋光伟

(国家测绘局大地测量数据处理中心,西安 710054)

摘要 结合地形复杂程度、面积大小、GPS/水准精度与重力似大地水准面分辨率等特点,系统分析了多种区域似大地水准面拟合方法的特点及适应性,并将其成功应用于多个省市似大地水准面精化,取得良好效果。

关键词 似大地水准面;薄板样条;BP神经网络;自适应最小二乘配置;拟合

中图分类号:P207

文献标识码:A

METHODS FOR FITTING LOCAL QUASIGEOID AND THEIR APPLICABILITY ANALYSIS

Guo Chunxi, Nie Jianliang, Wang Bin and Jiang Guangwei

(Geodetic Data Processing Center, State Bureau of Surveying and Mapping, Xi'an 710054)

Abstract The character and applicability several fitting methods for refining local quasigeoid are systematically analyzed in some examples which have the different area, the terrain complexity, the diverse accuracy of GPS/leveling data and the various resolutions of gravity quasigeoid. Finally, those methods are applied successfully in three typical projects of refining quasigeoid, and the good effects are obtained.

Key words: quasigeoid; spline; BP neural network; adaptive least square collocation; fitting

1 引言

区域似大地水准面精化一般通过高精度的GPS/水准点纠正高分辨率的重力似大地水准面实现,因此,高精度GPS/水准成果以及可靠的重力似大地水准面是决定区域似大地水准面精化精度的关键因素。目前,GPS/水准成果通常利用高精度GPS测量获取厘米级甚至毫米级的大地高成果与采用等级水准测量得到可靠的水准成果;而重力似大地水准面一般通过高阶次的重力场模型、高精度高分辨率的DEM以及重力测量资料而获取,在计算过程中,需严格考虑地形影响。在获取高精度GPS/水准成果以及高分辨率重力似大地水准面的基础上,合理有效的拟合方法成为提高区域似大地水准面精度

的一个重要因素。

拟合逼近方法通常分为函数模型逼近和统计模型逼近,其中函数模型对趋势项有很好的拟合效果,而统计模型对随机过程拟合效果较好^[1,2]。有学者已将多种拟合逼近方法应用于GPS高程与重力场等领域,以提高拟合精度^[1-19]。虽然以上拟合方法在一定条件下能得到可靠的拟合结果,但很少文献对这些方法在似大地水准面拟合的应用进行适用性分析。

本文以不同区域面积、不同地形复杂程度的实验数据为例,系统讨论最小二乘配置等多种拟合方法及其在似大地水准面精化中的应用,深入分析各种方法的特点与适用性;首次将自适应最小二乘配置应用于区域似大地水准面拟合,有效控制噪声与

* 收稿日期:2012-06-21

基金项目:国家863项目(2009AA121402-5);陕西测绘局科技创新项目(2009-03)

作者简介:郭春喜,男,1963年生,高级工程师,主要从事大地测量数据处理工作. E-mail: guochunxi1963@163.com

信号协方差矩阵关系不匹配影响,进一步提高拟合效果;采用薄板样条增强 GPS/水准成果控制作用,抑制低精度重力似大地水准面对最终结果的影响,从而提高区域似大地水准面精度。

2 拟合方法

区域似大地水准面拟合一般将离散点的 GPS/水准与重力似大地水准面的差值 $\Delta\xi$ 作为拟合量。由于重力似大地水准面与实际情况匹配以及 GPS/水准数据处理方案等问题, $\Delta\xi$ 不仅含有偶然误差,还可能含有系统误差。因此,对于不同区域面积、不同地形复杂程度的区域似大地水准面拟合,合理有效的拟合方法显得尤为重要。限于文章篇幅,文中仅介绍薄板样条、神经网络、最小二乘配置以及自适应最小二乘配置方法,而常用的多项式^[12]、球冠谐函数^[8,9]等方法可参考相应文献。

2.1 薄板样条

薄板样条是一种二维曲面,它是由一维三次样条到二维的扩展。该曲面通过所有控制点且不要求拟合点呈规则格网排列,在实际高程异常是连续渐变时,由于样条函数是曲率最小光滑的曲面,每个拟合点可控制局部范围,从而被广泛地应用于各种曲面拟合^[11]。薄板样条函数是样条函数在两维空间上的推广,具有连续、光滑的数学特性。利用薄板样条函数纠正重力似大地水准面,可以较好逼近实际似大地水准面变化趋势。

2.2 BP 神经网络

BP 神经网络理论上可以无限逼近,使计算结果更加接近于区域似大地水准面的真实趋势^[20,21]。这是因为 BP 神经网络是一种复杂的非线性映射系统,能够削弱不确定因素等的影响。区域似大地水准面拟合时,BP 神经网络不仅可以使拟合点经纬度作为输入向量中的元素,还可以考虑影响似大地水准面精度的地形信息、观测精度等因素,以便精确真实地反映区域似大地水准面的变化趋势。总之,BP 神经网络拟合区域似大地水准面时,不仅要顾及神经网络本身的局部极小值、计算结果的随机性以及训练函数与学习效率选取等因素影响,还要考虑 GPS/水准点的分布、数量、控制范围等因素。

2.3 最小二乘配置

将 GPS/水准和重力似大地水准面之差 $\Delta\xi$ 分为固定效应和随机效应两部分,较好地解决含有倾向性、随机性因素的问题,适宜于削弱 $\Delta\xi$ 中的系统误差影响^[2]。最小二乘配置的关键问题是根据协方差函数确定信号的方差-协方差矩阵 Σ_s 和 $\Sigma_{ss'}$,目前常用的协方差函数有 Gauss (Gauss) 函数、希尔伏宁

(Hirvonen) 协方差函数与似高斯 (Gauss) 函数等。

2.4 自适应最小二乘配置

最小二乘配置能够控制信号影响,提高估计精度。但观测噪声与信号的协方差矩阵一般依靠经验或者函数模型确定,可能造成两类协方差矩阵之间的关系不合理,这可以部分归结方差因子不一致,最终将导致计算精度偏低。针对该问题,杨元喜等^[22,23]提出了自适应最小二乘配置方法。该方法首先使用 Helmert 方差分量估计构造自适应因子,然后利用自适应因子合理调整观测噪声与信号的协方差矩阵之间的比例关系,进一步控制信号对计算结果的影响^[22-24]。将自适应最小二乘配置应用于似大地水准面拟合中,抑制 $\Delta\xi$ 中的信号影响,调整观测噪声与信号协方差矩阵的不匹配关系,以提高似大地水准面的拟合精度。

3 算例分析

为了充分比较分析各种方法的特点,分别选取不同面积、不同地形复杂程度的省市区域似大地水准面精化数据进行验证。在拟合计算过程中,首先对 GPS/水准数据进行粗差探测,削弱异常数据对计算结果的影响;然后根据 GPS/水准点分布情况,选取拟合点与检核点,其中选取特征点作为拟合点,另外随机选取一部分 GPS/水准点作为检核点;最后,采用不同的拟合方法进行计算,并评价计算精度。

1) 北部 S 市地区

S 市地区地势平坦,全境东西宽 60 km,南北长 50 km。该区域重力资料丰富,重力似大地水准面变化平缓,GPS/水准点分布均匀且密度较高。试验区共获取了 81 个 GPS/水准点的数据,选取均匀分布的 56 个数据点作为拟合点,剩余 25 个点为检核点。算例采用 6 种方案进行比较分析:三次多项式 (POL)、球冠谐函数 (SCH)、最小二乘配置 (CO)、自适应最小二乘配置 (ACO)、薄板样条 (SP)、BP 神经网络 (BP)。6 种方案误差统计于表 1,内、外符合误差曲线如图 1~2。

2) 东部 Q 市地区

东部 Q 市纬度跨度为 0.34° ,经度跨度为 0.53° ;该区域地势相对平坦;重力资料丰富,重力似大地水准面精度较高;GPS/水准点分布均匀,但精度稍差。收集了 Q 市 102 个 GPS/水准点,选取均匀分布的 89 个 GPS/水准点作为拟合点,剩余 13 个点为检核点。采用 S 市似大地水准面拟合所用的 6 种拟合方法纠正该区域重力似大地水准面,误差统计于表 2,误差曲线如图 3~4。

3) 西部 C 省地区

西部 C 省东西长 1 075 km,南北宽 921 km。该地区中部为盆地,盆地周围为丘陵、山地,西部是高原。由于地形复杂,重力等资料相对缺乏,重力似大地水准面精化程度不高,且变化幅度较大。选取 567 个 GPS/水准点作为拟合点,均匀地空出了 95 个 GPS/水准点作为检核点。选取 6 种方案进行处理,误差统计于表 3,误差曲线如图 5~6。

由三个典型区域的实验结果可以得出如下:

1) 对于面积较小、地势平坦、重力与 GPS/水准

表 1 各方案误差统计结果(单位:cm)

Tab.1 Statistics of error under each scheme in the city S (unit:cm)

方案	内符合精度	外符合精度
POL	1.0	1.1
SCH	1.1	1.1
CO	0.8	1.0
ACO	0.7	1.0
SP	/	1.0
BP	0.8	0.9

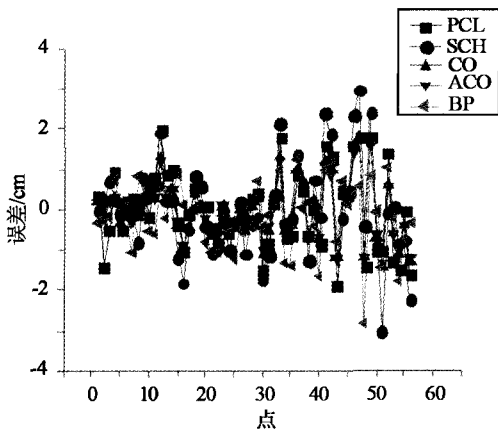


图 1 各方案内符合误差

Fig.1 Inner fitting error under the schemes

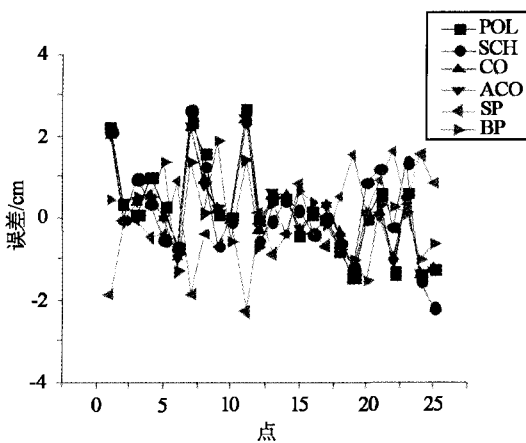


图 2 各方案外符合误差

Fig.2 Outer fitting error under the schemes

资料丰富的地区,常用拟合方法能够得到较高的拟合精度,真实逼近似大地水准面变化趋势,尤其是 BP 神经网络方法得到了最好的内、外符合精度;在面积较大、地形稍复杂的区域,常用拟合方法计算效果一般,而自适应最小二乘配置与薄板样条都能得到较好的拟合效果;在面积更大、地形非常复杂的地区,自适应最小二乘配置与薄板样条方法明显优于其他拟合方法。

2) 在多处实验区拟合中,薄板样条函数都能够得到较好的逼近效果。这是因为该方法使用过点方

表 2 各方案误差统计结果(单位:cm)

Tab.2 Statistics of error under each scheme in the city Q (unit:cm)

方案	内符合精度	外符合精度
POL	2.4	2.6
SCH	2.5	2.5
CO	1.2	2.1
ACO	1.2	2.1
SP	/	2.2
BP	1.0	2.9

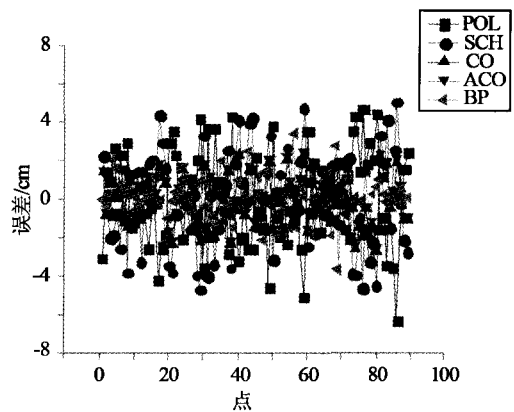


图 3 各方案内符合误差曲线

Fig.3 Inner fitting error curve under the schemes

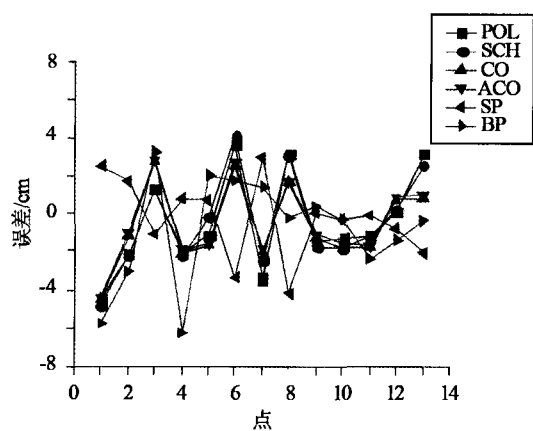


图 4 各方案外符合误差曲线

Fig.4 Outer fitting error curve under the schemes

表 3 各方案误差统计结果(单位:cm)

Tab.3 Statistics of error under each scheme in the province C(unit:cm)

方案	内符合精度	外符合精度
POL	13.2	13.1
SCH	8.3	8.2
CO	6.2	6.9
ACO	3.8	5.2
SP	/	3.9
BP	5.5	6.3

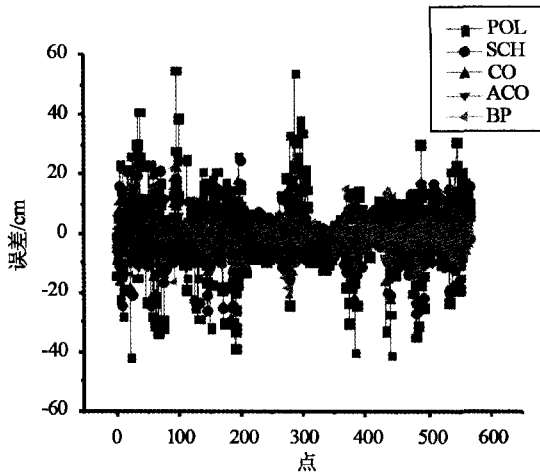


图 5 各方案内符合误差曲线

Fig.5 Inner fitting error curve under the schemes

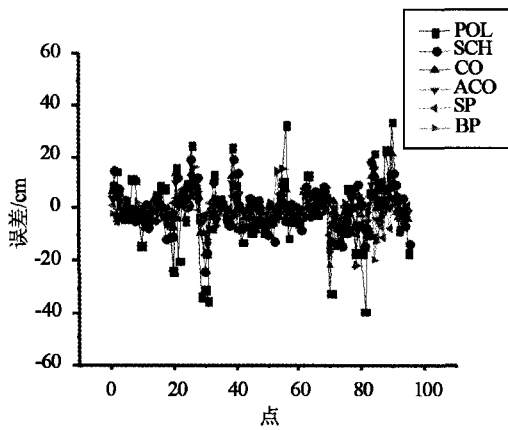


图 6 各方案外符合误差曲线

Fig.6 Outer fitting error curve under the schemes

法进行似大地水准面拟合,充分利用拟合点信息,最大限度地逼近 GPS/水准与重力似大地水准面的差值,从而能精确地反映似大地水准面的变化趋势;但该方法要求拟合点中不能存在异常数据,否则将导致似大地水准面局部变形。

3)与最小二乘配置方法相比,自适应最小二乘配置通过自适应因子的调节作用能够得到更可靠的

计算结果,这种改进效果在 C 省拟合计算中有非常明显的表现,从而证明了该方法的有效性和可靠性。其原因为最小二乘配置能较好地逼近与预测的趋势性、规律性等变化,还能较合理地反映对中的信号等的影响;利用自适应因子调整信号与噪声协方差矩阵的不匹配关系,使统计模型更加可靠,进而提高重力似大地水准面的纠正效果。

4 结论

在面积较小、地势平坦的地区,常用拟合方法能够得到较好的逼近效果;在面积较大、地形复杂、重力似大地水准面精度较差的地区,薄板样条函数能够进一步提高 GPS/水准的控制作用,提高重力似大地水准面的拟合效果;在面积较大、地形复杂、重力资料丰富、GPS/水准点分布均匀且密度较高的地区,自适应最小二乘配置能够得到可靠的似大地水准面拟合结果。自适应最小二乘配置、薄板样条等多种拟合方法在一定条件下能得到较高的拟合精度,但数据中的粗差将大大降低这些拟合方法的计算精度与可靠性。

参 考 文 献

- 1 杨元喜,刘念. 重力异常的一种逼近方法[J]. 测绘学报, 2001,30(3): 192 - 196. (Yang Yuanxi and Liu Nian. A kind of approximation method on gravity anomaly[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(3): 192 - 196)
- 2 杨元喜,刘念. 拟合推估两步极小解法[J]. 测绘学报, 2002,31(3): 192 - 195. (Yang Yuanxi and Liu Nian. A new resolution of collocation by two minimization steps[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 21(3): 192 - 195)
- 3 郭春喜,王惠民. 多面函数和格网重力异常的拟合计算[J]. 测绘通报, 1995, 3: 3 - 7. (Guo Chunxi and Wang Huimin. Hardy and the fitting of grid gravity anomaly[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1995, 3: 3 - 7)
- 4 匡翠林. 高精度 GPS 水准算法研究及其应用[D]. 中南大学, 2004. (Kuang Cuilin. A study and application about high precise GPS leveling arithmetic[D]. Central South University, 2004)
- 5 张小红,程世来,许晓东. 基于 Kriging 统计的 GPS 高程拟合方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, (2): 47 - 51. (Zhang Xiaohong, Cheng Shilai and Xu Xiaodong. Research of GPS elevation fitting model based on kriging method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, (2): 47 - 51)
- 6 陈光保,陈永奇,何秀凤. 基于改进最小二乘配置的地壳垂直形变分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, (4):

- 128 - 132. (Chen Guangbao, Chen Yongqi and He Xiufeng. Analysis of vertical crust deformation by using improved least square collocation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, (4):128 - 132)
- 7 刘念,胡荣明. 协方差函数的待定参数对最小二乘拟合推估精度的影响[J]. 西安科技学院学报, 2001, 21(1):61 - 64. (Liu Nian and Hu Rongming. Influence of the parameter of covariance function on result of the least squares collocation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2001, 21(1):61 - 64)
- 8 李建成. 物理大地测量中的谱方法[D]. 武汉测绘科技大学, 1993. (Li Jiancheng. The spectral methods in physical geodesy[D]. Wuhan Technology University of Surveying and Mapping, 1993)
- 9 彭富清. 球冠谐分析在局部重力场研究中的应用[D]. 中国人民解放军测绘学院, 1999. (Peng Fuqing. The SCHA application for local gravity field research[D]. The PLA Institute of Surveying and Mapping, 1999)
- 10 刘万林. 有限元法逼近高程异常曲面的应用研究[J]. 测绘通报, 2005, (2):20 - 22. (Liu Wanlin. Application of the finite element method approximating abnormal height curved surface[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005, (2):20 - 22)
- 11 邢锐,王猛. 基于数学曲面法的 GPS 水准拟合的研究与实现[J]. 中国西部科技, 2009, 8(18):52 - 53. (Xing Rui and Wang Meng. The research and realization of GPS level height fitting based on mathematics surface[J]. Science and Technology of West China, 2009, 8(18):52 - 53)
- 12 于来法. 用数值拟合法确定 GPS 正常高的研究[J]. 解放军测绘学院学报, 1996, 13(2):90 - 94. (Yu Laifa. Study on finding normal height of GPS with mathematical method for fitting[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 1996, 13(2):90 - 94)
- 13 丁海勇,等. 基于移动曲面拟合方法的 GPS 高程转换[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, (6):1 - 4. (Ding Haiyong, et al. GPS height transformation based on moving surface fitting[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, (6):1 - 4)
- 14 杨明清,等. 用神经网络方法转换 GPS 高程[J]. 测绘学报, 1999, 28(4):301 - 307. (Yang Mingqing, et al. Conversion of GPS height by artificial neural network method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(4):301 - 307)
- 15 吴兆福,等. 基于支持向量机的 GPS 似大地水准面拟合[J]. 测绘学报, 2004, 33(4):303 - 306. (Wu Zhaofu, et al. GPS quasigeoid fitting based on support vector machine technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(4):303 - 306)
- 16 聂建亮. 神经网络及其在大地测量数据处理中的应用[D]. 长安大学, 2007. (Nie Jianliang. Neural networks and its applications in processing of data of geodesy [D]. Chang'an University, 2007)
- 17 吴良才,胡振琪. GPS 高程转换方法和正常高计算[J]. 测绘学院学报, 2004, 21(4):256 - 258. (Wu Liangcai and Hu Zhenqi. Conversion method of GPS height and calculation of normal height[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2004, 21(4):256 - 258)
- 18 李冲,季灵运,张冬菊. GPS 高程拟合模型误差的最小二乘配置补偿[J]. 勘察科学技术, 2007, (1):27 - 30. (Li Chong, Ji Lingyun and Zhang Dongju. Compensation of least square collocation in GPS elevation fitting model errors[J]. Site Investigation Science and Technology, 2007, (1):27 - 30)
- 19 Stopar B, et al. GPS-derived geoid using artificial neural network and least squares collocation[J]. Survey Review, 2006, 38:513 - 523.
- 20 鲁铁定,钟小威. 基于改进 BP 学习算法的 GPS 高程转换[J]. 测绘通报, 2005, (12):13 - 15. (Lu Tieding and Zhong Xiaowei. GPS height conversion on the improvement of BP learning algorithm [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005, (12):13 - 15)
- 21 聂建亮,等. BP 神经网络拟合区域似大地水准面的应用分析[J]. 测绘工程, 2012, 21(1):21 - 24. (Nie Jianliang, et al. The analysis of BP neural network fitting the quasi geoid[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2012, 21(1):21 - 24)
- 22 杨元喜,张菊清,张亮. 基于方差分量估计的拟合推估及其在 GIS 误差纠正中的应用[J]. 测绘学报, 2008, 37(2):152 - 157. (Yang Yuanxi, Zhang Juqing and Zhang Liang. Variance component estimation based collocation and its application in GIS error fitting[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(2):152 - 157)
- 23 Yang Y, Zeng A and Zhang J. Adaptive collocation with application in height system transformation[J]. J Geod., 2009, DOI 10.1007/s00190-008-0226-9.
- 24 赵丽华,曾安敏. 自适应拟合推估在地壳形变分析中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, (1):132 - 134. (Zhao Lihua and Zeng Anmin. Application of adaptive collocation method to crustal deformation analysis[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, (1):132 - 134)