

基于 TOPSIS 的 GNSS 数据质量评估方法研究

魏 勇¹ 李建文¹ 郭亮亮¹ 魏 来²

1 信息工程大学导航与空天目标工程学院,郑州市科学大道 62 号,450001
2 卫星导航应用国家工程研究中心,北京市阜成路 16 号,100048

摘 要:在当前数据质量评估指标(多路径效应、数据完整率、周跳以及信噪比等)基础上增加数据有效率指标,首次提出利用多指标综合评价方法对全球 iGMAS、MGEX、IGS 等观测站的 GPS 数据进行数据质量分析,建立了 TOPSIS 综合评价模型,并将该模型综合评价结果与各指标进行 Pearson 相关分析,综合评价结果与数据完整率和数据有效率指标呈强相关;并采用静态 PPP 结果与该综合评价结果进行相关分析,亦呈显著相关。
关键词:数据质量;TOPSIS;相关分析;多指标综合评价
中图分类号:P228 **文献标识码:**A

GNSS 高精度测量工作分为野外测量和室内后处理两大环节。在野外测量环节中,对 GNSS 原始观测数据的质量进行初步检核是防止测量粗差和测量返工的最有效途径,在 GNSS 高精度测量中得到广泛应用。另外,开展原始数据的质量分析,也是室内后处理环节中重要的工作步骤,可有效提高数据处理的精度与速度。

UNAVCO Facility 研发的 TEQC 是目前国际上应用最为广泛的 GNSS 数据质量分析软件之一,已更新至最新版本 2015-06-23^[1-2]。德国法兰克福联邦测绘局(Federal Agency for Cartography and Geodesy, Frankfurt, Germany)也研发了 BKG Ntrip Client(BNC)软件,其数据质量模块也可以处理 GNSS 观测数据,但仅限于 GPS、GLONASS、Galileo。瑞士联邦办公室在 2014 年 EUREF 的多 GNSS 工作组报告中提出对于 rinex3 格式的数据质量分析软件采用 Anubis,该软件为捷克共和国的 GOP^[3](geodetic observatory Pecny, GOP)研制,可处理 GPS、GLONASS、BDS、Galileo 数据。广州中海达卫星导航技术股份有限公司研发了数据处理软件 HGO(hi-target geomatics office),该软件集成对 GPS、GLONASS 和 BDS 的数据质量分析功能。航天飞行动力学技术重点实验室编写了 GNSS 数据质量检测软件 BQC^[4],可以处理以 RINEX 格式第 2 版或第 3 版存储的 GPS、GLONASS、BDS、Galileo、SBAS 和 QZSS 数据。

上述各软件的分析指标包含数据完整率、数据有效率、周跳比、伪距多路径、信噪比等,表 1 给出其统计情况(“√”表示分析该指标,“×”表示不分析该指标)。

表 1 不同软件数据质量分析指标统计
Tab. 1 Statistics of data quality analysis index from different software

软件	指标类型				
	数据完整率	数据有效率	周跳比	伪距多路径	信噪比
BQC	√	×	√	√	√
HGO	√	×	√	√	√
TEQC	√	×	√	√	√
BNC	√	√	√	√	√
Anubis	√	√	√	√	√

在上述的数据质量评估软件中,所评估的指标并不单一,而且相互间都有差异。大多数据质量评估软件的方法和思路都来源于 TEQC,对观测数据的质量采用了完整率、多路径、周跳等指标分别进行评估^[2,4-5],未将数据完整率、多路径和周跳等指标信息进行综合,不能从整体上反映数据的质量情况。

Hwang 和 Yoon 于 1981 年首次提出 TOPSIS 方法(the technique for order preference by similarity to ideal solution),该方法是通过检测评价对象与最优解、最劣解的距离来进行排序。若评价对象最靠近最优解同时又最远离最劣解,则为最好;否则不为最优。本文采用该方法进行数据质量的综合评价。

本文利用数据完整性、数据有效率、伪距多路

径、信噪比以及周跳比等 5 个指标,对全球测站进行数据质量分析,并运用多指标综合评价方法给出测站数据质量的综合评价结果。

1 TOPSIS 综合评价模型

基于当前国内外数据质量分析软件,可初步得到数据完整率、数据有效率、伪距多路径、周跳比、信噪比等指标。综合评价过程就是通过数学模型,将多个评价指标“整合”成一个整体性的综合评价指标。本文利用 TOPSIS 综合评价模型对 IGS、iGMAS 和 MGEX 等测站的观测数据进行综合评估,流程如图 1。

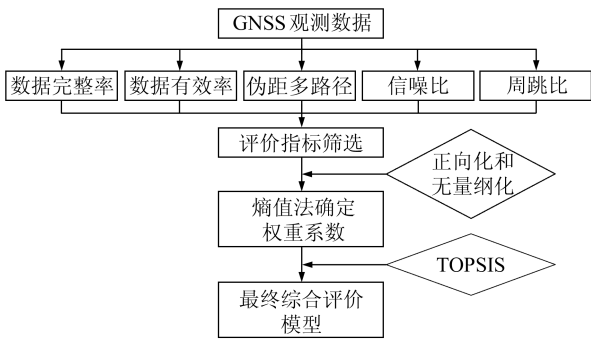


图 1 TOPSIS 综合评价流程图

Fig. 1 Flowchart of TOPSIS comprehensive evaluation

通过对测站观测数据的质量分析,得到对应测站的数据完整率、数据有效率、伪距多路径、信噪比和周跳比等指标值。通过对上述指标的筛选以及对指标的正向化和无量纲化,采用熵值法确定权重系数,利用 TOPSIS 确定最终的综合评价模型,从而得到最终的评价结果。

1.1 评价指标预处理

在多指标综合评价中,有些是指标值越大评价越好的指标,称为正向指标(也称效益型指标或望大型指标);有些是指标值越小评价越好的指标,称为逆向指标(也称成本型指标或望小型指标);还有些是指标值越接近某个值越好的指标,称为适度指标。

在综合评价时,首先必须将指标同趋势化。一般是将逆向指标和适度指标转化为正向指标,所以也称为指标的正向化。不同的评价指标往往具有不同的量纲,为了消除由此带来的不可公度性,还应将各评价指标作无量纲化处理^[6]。

1) 指标的正向化

采取的方法是将极小型转化为极大型。将极小型指标 x_j 的倒数变换为 $x'_j = \frac{1}{x_j}$,则可以将极小型转化为极大型。

2) 指标的无量纲化

综合评价的指标值都是客观数值时,一般可用均值化方法对指标进行无量纲化,即 $x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bar{x}_j}$ 。均值化后,各指标的均值均为 1,其方差为:

$$\text{var}(y_j) = E[(y_j - 1)^2] = \frac{E(x_j - \bar{x}_j)^2}{\bar{x}_j^2} = \frac{\text{var}(x_j)}{\bar{x}_j^2} = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}_j}\right)^2$$

即均值化后各指标的方差是各指标变异系数 \bar{x}_j 的平方,它保留了各指标变异程度的信息。

1.2 指标权重系数确定方法

熵值法是根据一种综合评价指标的数值所提供的信息量大小来确定权重系数的方法。对于第 i 个被评价对象的第 j 项指标值,如果对确定的 j ,相应地有 $I_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij})$, $k > 0$, x_{ij} 之间的差异越大,则说明该项指标的相对作用越大,即所提供的信息量越大,其熵值也就越小。具体的计算过程如下。

首先,计算第 j 项指标的熵值:

$$I_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij})$$

式中, $k > 0$ 为常数,取 $k = \frac{1}{\ln(n)}$; $p_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^*}$ 为

第 i 个评价对象的第 j 项指标的特征比重, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。

然后,计算第 j 项指标的差异系数:

$$r_j = 1 - I_j$$

差异系数是反映综合评价指标作用大小的一个量。其值越大,指标的作用就越大;反之亦然。

最后,计算第 j 项指标的权重系数:

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{k=1}^m r_k}$$

综上所述,基于指标差异的赋权方法是一类“求大异存小同”的方法,其共同特点是:客观性强,无主观因素的影响,评价过程的透明性和可再现性好。

1.3 最终综合评价模型

针对 n 个被评价对象, m 项评价指标 x_1, x_2, \dots, x_m , 其指标值分别为 x_{ij}^* ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$), 相应的权重系数向量为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 构造合适的综合评价函数 $y = f(w, x_{ij}^*)$ (即综合评价)的数学模型。

假设理想点为 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)$, 选择待评估模型中各数据质量指标的最优值,数据完整率和数据有效率为 100%,多路径取各频点的最小

值,信噪比和周跳比取最大值。对于一个被评价对象的指标值 $(x_{i1}^*, x_{i2}^*, \cdots, x_{im}^*)$, 定义二者之间的加权距离为:

$$y_i = \sum_{j=1}^m c_j d(x_{ij}^* x_j^*), i = 1, 2, \cdots, n$$

式中, c_j 为待定的权重系数, $d(x_{ij}^*, x_j^*) = (x_{ij}^* - x_j^*)^2$, 则综合评价函数为:

$$y_i = \sum_{j=1}^m c_j (x_{ij}^* - x_j^*)^2, i = 1, 2, \cdots, n$$

该式反映出第 i 个被评价对象的指标值与理想点的差异程度。按 $y_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 值的大小对各评价对象进行排序。显然,其值越小,则相应的对象越好。

2 试验分析

对 iGMAS、MGEX、IGS 等 434 个站点的数据进行质量分析,得到各站的数据完整率、数据有效率、伪距多路径、周跳比和信噪比。按照上述评价指标无量纲化的差异,综合评价方法设计如下 3 种方案:方案 1,指标正向化+标准化方法+熵值法+TOPSIS;方案 2,指标正向化+功效系数方法+熵值法+TOPSIS;方案 3,指标正向化+均值化+熵值法+TOPSIS。

利用上述方案对 GNSS 观测数据的评价结果进行相应的试验验证,评价模型的可用性和适用性。

1)相关性分析

在高精度定位数据处理中,多路径和周跳是影响定位结果的重要指标。将所得的数据质量综合评估结果分别与数据完整率、数据有效率、多路径、信噪比和周跳比等指标进行相关性分析,从而评估该综合评价模型中的各个指标与综合评价结果的相关程度。

根据典型 Pearson 简单相关分析,序列之间的相关性可根据下式计算:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, \bar{x} 为序列 $\{x_i\}$ 的平均值, \bar{y} 为序列 $\{y_i\}$ 的平均值。表 2 表示不同相关系数的相关程度描述。

表 2 不同相关系数值所表示的相关程度
Tab. 2 Degree of correlation represented by correlation coefficient

相关程度	完全相关	高度相关	显著相关	低度相关	微相关	不相关
相关系数值	± 1	$\pm 0.8 \sim 1$	$\pm 0.5 \sim 0.8$	$\pm 0.3 \sim 0.5$	$0 \sim 0.3$	0

3 种方案的综合评价结果与数据完整率、数据有效率、多路径、信噪比以及周跳比等指标的相关性大小的具体统计结果见表 3。

表 3 综合评价结果与各项指标相关分析结果
Tab. 3 Correlation analysis results between comprehensive evaluation and the data quality indicators

方案	数据完整率	数据有效率	MP ₁	MP ₂	信噪比 S ₁	信噪比 S ₂	周跳比
方案 1	0.452	0.429	0.002	0.004	0.789	0.711	0.132
方案 2	0.886	0.907	0.087	0.073	0.103	0.073	0.323
方案 3	0.818	0.779	0.053	0.033	0.132	0.144	0.394

由表 3 可知,方案 1 的综合评价结果与信噪比相关性较大;方案 2 的综合评价结果与数据完整率、数据有效率相关性较大;方案 3 的综合评价结果与方案 2 类似,但是在数据完整率和数据有效率方面相关性较弱。由于数据质量评估主要参考数据完整率和数据有效率,综合考虑上述 3 个方案,可使用方案 2 进行数据质量的综合评估。

2)PPP 评估验证

采用 MGEX (zimj、usn5、abmf、gop6、rgdg、sutm、unbn)、IGS (bzrg) 和 iGMAS (chu1 和 kun1)2015 年第 154 天观测数据进行静态 PPP 试验。

根据相应测站的数据完整率、数据有效率、伪距多路径、周跳比和信噪比等指标评估结果,挑选差异化指标的测站,并给出综合评价结果,见表 4。

对上述测站的观测数据采用 PPP 评估验证, GPS 的精密产品采用 ESA 分析中心提供的 30 s 精密钟差产品和 15 min 的精密星历。在数据预处理阶段,使用 TurboEdit 方法探测周跳。卫星截止高度角为 10°,对于相对论效应、固体潮汐、地球自转效应、相位缠绕效应以及卫星 PCO、PCV 进行模型改正。为排除精密轨道和钟差产品的末端效应对评估结果的影响,将 PPP 试验时间定为 02:00~22:00。表 5 为参数和其估计策略,精度评估采用内符合评估模式,表 6 为 PPP 评估结果。

根据测站数据质量综合评价结果可知,abmf 测站的数据质量最差,bzrg 站数据质量最好,并且综合评价结果和各测站的数据质量指标反映的数据质量情况一致。在 PPP 试验中,abmf 定位精度最差。尽管 bzrg 测站的定位精度不是最好,但是对上述的综合评价结果和三维 RMS 结果进行相关性分析,得到的相关系数为 0.685,为显著相关,说明该综合评价结果与定位精度的一致性较强,从侧面表明了该综合评价模型的正确性。

表 4 测站各指标统计值和综合评价结果
Tab. 4 The results of comprehensive evaluation and the data quality indicators

测站	数据完整率/%	数据有效率/%	MP ₁	MP ₂	信噪比 S ₁	信噪比 S ₂	周跳比	综合评价
zimj	100.00	100.00	1.131	1.249	45.08	45.82	1 082	886.5
chu1	100.00	95.00	0.534	0.578	45.72	47.62	1 441	708.9
kun1	100.00	100.00	0.270	0.306	48.28	41	414	471.9
usn5	100.00	100.00	0.300	0.277	48.16	44.22	499	493.1
abmf	29.83	29.69	1.847	2.214	44.58	43.03		1 167.1
gop6	21.08	21.08	0.276	0.295	48.02	42.2	109	708.1
rgdg	100.00	100.00	0.379	0.379	44.74	31.6	759	690.8
suttm	90.63	85.42	0.995	1.031	44.11	30.25	598	941.7
unbn	100.00	100.00	0.264	0.287	46.68	40.19	1 580	493.7
bzrg	100.00	100.00	0.295	0.292	48.3	42.82	3 564	427.2

表 5 参数及其估计策略 Tab. 5 Estimation parameters and strategy	
参数	处理策略
测站坐标	参数估计,静态按常数处理,动态以 SPP 解作为初始值,初始标准差为 100 m
接收机钟差	白噪声处理,初始标准差为 100 m
对流层延迟	干延迟模型计算,湿延迟参数估计,初始标准差 0.5 m,过程噪声密度 $1\times10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$
模糊度	按常数处理,初始标准差 100 m,若发生周跳重置标准差为 100 m

表 6 PPP 评估结果
Tab. 6 Evaluation results with PPP

测站	RMS/m			三维 RMS/m
	X	Y	Z	
zimj	0.001	0.000 4	0.000 7	0.001 3
chu1	0.001 4	0.000 6	0.003 8	0.004 1
kun1	0.000 9	0.000 4	0.001 5	0.001 8
usn5	0.000 6	0.000 3	0.001	0.001 2
abmf	0.101 7	0.232 5	0.479	0.542 1
gop6	0.001 7	0.001 1	0.003 2	0.003 8
rgdg	0.001 1	0.001	0.002 6	0.003 0
suttm	0.002 7	0.000 9	0.004 3	0.005 2
unbn	0.001 3	0.000 5	0.001 3	0.001 9
bzrg	0.001 6	0.000 6	0.001 3	0.002 1

结合 gop6 测站和 abmf 测站综合评价结果,虽然 abmf 测站数据有效率和完整率高于 gop6 测站,但是 abmf 测站多路径情况较为严重,总体来说 gop6 数据质量结果较好;usn5 和 unbn 数据质量综合评价结果接近,但是 usn5 数据质量稍好,在 PPP 评估中 usn5 的结果相对 unbn 也较好;zimj 测站和 chu1 测站就数据质量而言,chu1 相对较好,但是就 PPP 结果而言,zimj 测站结果相对较好。由此可见,数据有效率对于 PPP 结果的影响大于多路径对于 PPP 结果的影响,从而佐证了上述综合评估结果与数据有效率的相关性大于其与多路径的相关性。

3 结 语

本文综合考虑影响数据质量的各大指标,采用 TOPSIS 方法对测站观测数据质量进行综合评价,并采用 Pearson 对综合评价结果与数据质量

评价各指标进行相关性分析。基于方案 2 的综合评价结果与数据完整率、数据有效率呈高度相关。结合各测站的数据质量指标和最终综合评估结果进行分析,该结果能够全面评估观测数据质量,证明了该综合评价模型的合理性。选择 10 个数据质量评估结果不同的测站进行静态 PPP 试验,并将综合评价结果与测站的内符合定位评估精度进行相关性分析,可知二者呈显著正相关,即 PPP 定位精度越好(RMS 越小),综合评价值越小,数据质量越好。建立的 GNSS 数据质量综合评价模型可用于精密定轨。根据观测数据综合评价结果,选取观测数据质量好的测站进行 GNSS 卫星定轨,将有助于提高 GNSS 定轨精度。该综合评价模型也存在缺陷,即未考虑各指标之间存在的相关性,如不同频点之间伪距多路径的相关性。

致谢:感谢信息工程大学 iGMAS 分析及 Lou Estey 对本文工作的支持。

参考文献

[1] <http://facility.unavco.org/software/teqc/tutorial.html>
[2] Estey L H, Meertens C M. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data [J]. GPS Solutions, 1999,3(1): 42-49
[3] <http://www.pecny.cz>
[4] 刘荟萃.多系统 GNSS 数据质量检测软件 BQC 的算法与性能[C]. 第五届卫星导航学术年会,2014 (Liu Huicui. The Algorithms and Performances of a New Multi-GNSS Data Quality Check[C]. CSNC,2014)
[5] 张小红,丁乐乐.北斗二代观测值质量分析及随机模型精化 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2013, 38(7): 832-836 (Zhang Xiaohong, Ding Lele. Quality Analysis of the Second Generation Compass Observables and Stochastic Refining [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2013, 38(7):832-836
[6] 叶宗裕.关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择 [J]. 统计科学与实践,2003 (4): 24-25 (Ye Zongyu. The Choice of Index Positive and Index Nondimensionalization in Multi-Index Comprehensive Evaluation[J]. Statistical Science and Practice,2003(4):24-25)

Research on GNSS Data Quality Evaluation Based on TOPSIS

WEI Yong¹ LI Jianwen¹ GUO Liangliang¹ WEI Lai²

1 College of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450001, China
2 Beijing Satellite Navigation Engineering Center, 16 Fucheng Road, Beijing 100048, China

Abstract: Currently GNSS observation data for quality evaluation is based on multipath, data integrity, cycle slips and SNR. In this paper, the factor of data efficiency is increased to assess data quality. The method of multi-index comprehensive evaluation firstly proposed is applied to evaluate GPS data quality based on GPS observations from iGMAS, MGEX and IGS. A comprehensive evaluation model is developed based on TOPSIS. Pearson correlation analysis is conducted between the results of the comprehensive evaluation model and various data quality indicators, showing that a strong correlation exists between the results of comprehensive evaluation and data integrity as well as data efficiency. The results of correlation analysis between static PPP results and the comprehensive evaluation show a significant correlation.

Key words: data quality; TOPSIS; correlation analysis; multi-index comprehensive evaluation

About the first author: WEI Yong, postgraduate, majors in GNSS observation data processing and analysis, E-mail: 1397703620@qq.com.

+++++
(上接第 891 页)

[5] Rohm W, Bosy J. The Verification of GNSS Tropospheric Tomography Model in a Mountainous Area[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(10): 1 721-1 730

[6] 何林,柳林涛,苏晓庆,等. 水汽层析代数重构算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 32-38 (He Lin, Liu Lintao, Su Xiaoqing, et al. Algebraic Reconstruction Algorithm of Vapor Tomography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(1): 32-38)

[7] Böhm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7)

[8] Böhm J, Möller G, Schindelegger M, et al. Development of an Improved Empirical Model for Slant Delays in the Troposphere (GPT2w)[J]. GPS Solutions, 2015, 19(3): 433-441

[9] Cai C, Gao Y, Pan L, et al. Precise Point Positioning with Quad-Constellations: GPS, Beidou, GLONASS and Galileo[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(1): 133-143

Analysis of Three-Dimensional Water Vapor Tomography Using Integrated GPS/GLONASS Observations

DONG Zhounan¹ CAI Changsheng¹

1 School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, 932 South-Lushan Road, Changsha 410083, China

Abstract: Based on data collected for six days at fifteen stations of Hong Kong satellite positioning reference station network (SatRef) in 2014, we combine GPS and GLONASS to perform a three-dimensional water vapor tomography experiment. The results show that the integrated GPS/GLONASS system can significantly increase the number of voxels which are passed through by the signals. The system improves the accuracy of distribution of water vapor by an average improvement rate of 36% in comparison with a GPS-only system.

Key words: water vapor tomography; GPS; GLONASS; troposphere

Foundation support: Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department, No. 13K007; Hunan Provincial Innovation Platform and Talents Program, No. 2015RS4007.
About the first author: DONG Zhounan, postgraduate, majors in date processing of GNSS and modeling of water vapor tomography, E-mail: ZNDongCSU@163.com.