doi：10.11823/j.issn.1674-5795.2023.05.15

自适应蒙特卡洛法评定全站仪测距不确定度

仇跃鑫[1,2]，朱进[1,2]，王瑛辉[1,2*]

（1.浙江省计量科学研究院，浙江 杭州 310018；

2.浙江省数字精密测量技术研究重点实验室，浙江 杭州 310018）

摘　要：全站仪测距精度的校准需要在标准基线场上进行，由于野外环境不可控和气象条件波动剧烈，因此判断全站仪的测量结果的可靠程度具有重要意义。为了解决全站仪测距不确定度评定模型的非线性和输入量强相关等问题，本文首先采用了自适应蒙特卡洛法进行不确定度评定，然后与GUM的不确定度评定结果进行对比，当测距距离为1 176 m时，自适应蒙特卡洛法评定的不确定度结果为2.2 mm，GUM为2.6 mm，结果显示两种不确定度评定方法的测量结果均在合理预期之内，且自适应蒙特卡洛法评定的不确定度置信区间更窄。自适应蒙特卡洛法结合了大量数据样本和自适应优化仿真次数的优势，不仅对全站仪测距过程中的各项误差源引入的不确定度分量评估更为全面，而且在保证了全站仪测距不确定度评定结果准确的同时，相比于蒙特卡洛法节约了70%的样本数量。

关键词：计量学；自适应蒙特卡洛法；全站仪；测量不确定度

中图分类号：TB921;TH711　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-5795(2023)05-0104-08

Evaluation of uncertainty of distance measurement by total station using adaptive Monte Carlo method

QIU Yuexin[1,2], ZHU Jin[1,2], WANG Yinghui[1,2*]

(1.Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China;

2.Key Laboratory of Digital Precision Measurement Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The calibration of total station distance measurement accuracy needs to be carried out on a standard baseline field, and it is of great significance to judge the reliability of the measurement results of the total station due to the uncontrollable field environment and the drastic fluctuation of meteorological conditions. In order to solve the problems of nonlinearity and strong correlation of inputs of the total station distance measurement uncertainty evaluation model, this paper firstly adopts the adaptive Monte Carlo method to evaluate the uncertainty, and then compares the uncertainty evaluation results with those of the GUM. When the ranging distance is 1 176 m, the uncertainty evaluation results of the adaptive Monte Carlo method is 2.2 mm, and the GUM is 2.6 mm. The results show that the measurement results of both uncertainty assessment methods are within reasonable expectations, and the uncertainty confidence interval of the adaptive Monte Carlo method is narrower. The adaptive Monte Carlo method combines the advantages of a large number of data samples and adaptive optimization of the simulation

收稿日期：2023-04-01；**修回日期：**2023-05-12

基金项目：2022年度浙江省科技厅“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C01139)

引用格式：仇跃鑫，朱进，王瑛辉. 自适应蒙特卡洛法评定全站仪测距不确定度[J]. 计测技术，2023，43(5)：104-111.

Citation：QIU Y X,ZHU J,WANG Y H. Evaluation of uncertainty of distance measurement by total station using adaptive Monte Carlo method[J]. Metrology & Measurement Technology,2023,43(5):104-111.

times, which not only provides a more comprehensive assessment of the uncertainty components introduced by various error sources in the process of total station distance measurement, but also saves 70% of samples compared with the Monte Carlo method, while guaranteeing the accuracy of the uncertainty assessment results of the total station distance measurement.

Key words: metrology; adaptive Monte Carlo method; total station; measurement uncertainty

0　引言

全站仪被广泛应用于精密测量、机械制造和大地测量领域，本质是由一个经纬仪和一个电子测距仪共同组成，这二者的精度直接决定了全站仪的精度。全站仪的角度测量系统通常在实验室内校准[1]，测距则需要在野外基线场进行校准，由于野外环境不可控和气象条件波动剧烈[2]，因此通过评定测量不确定度来判断测量结果的可靠程度具有重要意义。

Lauryna Šiaudinyte使用平面角校准方法对全站仪的竖直角度测量系统进行不确定度评定[3]，并使用测量不确定度表示指南(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement，GUM)对全站仪竖直角度校准的三角法进行了不确定度评定[4]。José L. García-Balboa使用GUM对全站仪对中的不确定度进行了评定[5]。范春艳针对GUM评定测量不确定度时存在的问题，使用蒙特卡洛法(Monte Carlo Method，MCM)对全站仪空间测量不确定度进行评定，着重分析样本数量对仿真效率和准确性的影响[6]。刘胜林使用GUM对全站仪(测距仪)测尺频率和周期误差振幅的测量不确定度进行评定[7-8]。江洪波使用GUM对全站仪测距综合标准差的测量不确定度评定和使用全站仪进行短基线测量的精度评定[9-10]。时振伟对全站仪加、乘常数检定精度的影响因素及对策进行了分析[11]。

上述研究内容主要针对全站仪的竖直角测量系统进行测量不确定度评定或者针对测距不确定度来源中的部分误差源进行不确定度评定，没有针对全站仪测距不确定度进行综合分析。

相比于使用GUM评定测量不确定度，MCM更适用于解决模型非线性和输入量强相关的问题[12-15]，随着样本数量的增加，MCM的输出量也会更加精确，但相应地也需要更多的计算时间，自适应蒙特卡洛法(Adaptive Monte Carlo Method，AMCM)是在MCM的基础上通过输出量达到统计意义上的稳定来平衡输出量的准确度和样本计算时间的矛盾[16-18]。

综上所述，本文根据全站仪测距原理，分析全站仪测距过程中的不确定度来源，建立不确定度评定模型，基于AMCM进行测距不确定度评定，并与GUM评定的测量不确定度进行比较，相互验证了二者的可靠程度。

1　不确定度评定模型

全站仪在测量基线边的标准长度D_{i0}时，测量结果D的计算公式为[19]

$$D = D_{i0} + K_c + D_i \cdot R \tag{1}$$

式中：D_{i0}为基线溯源值，D_i为经过频率、气象、倾斜等修正后的观测值，K_c为仪器和棱镜的组合常数，R为仪器乘常数。

对全站仪测距进行测量不确定度分析，其主要误差源包括：标准基线的测量误差、基线漂移、全站仪安装误差、棱镜安装误差、环境参数变化误差、全站仪量化误差、频率漂移、测距倾斜修正误差和随机测量误差。从而得到基于自适应蒙特卡洛法的全站仪测距不确定度评定模型为

$$D = D_{i0} + \frac{\Delta D_0}{D_{i0}} + \left(K_c + e_{\mathrm{ts}} + e_{\mathrm{p}} + \Delta D_e + \frac{\Delta D_f}{D_{i0}} + \sigma_K\right) + \left(D_i \cdot R + e_{\mathrm{ts}} + e_{\mathrm{p}} + \Delta D_e + \frac{\Delta D_{\mathrm{env}} + \Delta D_f + \Delta D_{tc}}{D_{i0}} + \sigma\right) \tag{2}$$

式中：ΔD_0为基线参考值引入的标准长度ΔD_{i0}变化量；e_{ts}为全站仪安装误差引入的测距变化量；e_{p}为棱镜安装误差引入的测距变化量；ΔD_{env}为环境参数变化引入的测距变化量；σ_K为仪器和棱镜的组合常数测量随机误差引入的K_c变化量，ΔD_e为量化误差引入的测距变化量，ΔD_f为频率漂移引入的测距变化量，ΔD_{tc}为倾斜修正引入的测距变化量，σ为随机测量误差引入的D_i变化量。

1）基线参考值引入的测量不确定度分量

基线参考值引入的测量不确定度主要来源于基线边标准长度的测量不确定度和基线间的距离漂移。基线边标准长度的扩展测量不确定度为1 mm/km（$k=2$），故基线边标准长度的测量不确定度引入的测距变化量ΔD_{ref}服从正态分布N（0，0.5 mm/km）。基线间距离漂移引入的测距变化量ΔD_{drf}通过基线稳定性指标表征，基线稳定性指标优于1.4 mm/km（$k=2$），故ΔD_{drf}服从正态分布N（0，0.7 mm/km）。故由基线参考值引入的标准长度变化量ΔD_0计算公式为

$$\Delta D_0 = \Delta D_{\mathrm{ref}} + \Delta D_{\mathrm{drf}} \tag{3}$$

2）安装误差引入的测量不确定度分量

全站仪安装误差包括：定位杆偏心、基座偏心和仪器整平误差[20]。全站仪定位杆安装时配合间隙导致的偏心优于0.01 mm，认为全站仪定位杆偏心引入的测距变化量e_{ts1}在0.005 mm的区间半宽内服从正态分布N（0，0.005 mm）。全站仪基座对中时配合间隙导致的偏心优于0.14 mm，认为全站仪基座偏心引入的测距变化量e_{ts2}在0.07 mm的区间半宽内服从正态分布N（0，0.07 mm）。全站仪竖轴未完全垂直于水平面时产生的仪器整平误差优于0.01 mm，认为仪器整平误差引入的测距变化量e_{ts3}在0.005 mm的区间半宽内服从正态分布N（0，0.005 mm）。故全站仪安装误差引入的测距变化量e_{ts}计算公式为

$$e_{\mathrm{ts}} = e_{\mathrm{ts1}} + e_{\mathrm{ts2}} + e_{\mathrm{ts3}} \tag{4}$$

棱镜安装误差包括：定位杆偏心和仪器整平误差。棱镜定位杆的偏心优于0.01 mm，认为定位杆偏心引入的测距变化量e_{p1}在0.005 mm的区间半宽内服从正态分布N（0，0.005 mm）。棱镜的整平误差优于0.03 mm，认为仪器整平误差引入的测距变化量e_{p2}在0.015 mm的区间半宽内服从正态分布N（0，0.015 mm）。故棱镜安装误差引入的测距变化量e_{p}为

$$e_{\mathrm{p}} = e_{\mathrm{p1}} + e_{\mathrm{p2}} \tag{5}$$

3）环境参数引入的测量不确定度分量

环境参数变化引入的测量不确定度表现为温度、湿度和气压的变化导致空气折射率发生变化，使光波在大气中的传播速度发生变化，从而影响全站仪测距结果。由气象修正公式可知温度每变化±1 ℃，大气改正数变化±1 mm/km；气压每变化±3.3 hPa，大气改正数变化±1 mm/km；湿度每变化±60% RH，大气改正数变化±0.5 mm/km。仪器和棱镜的组合常数在实验室内进行测量，两次测量期间的环境温度的变化值小于0.2 ℃，且最长测量距离为18 m，因此环境参数变化引入的测量不确定度极小，忽略不计。

在乘常数标定和实际测量过程中环境温度变化不超过±1 ℃，气压变化不超过±1 hPa，湿度变化不超过±10% RH，故由温度变化引入的测距变化量ΔD_t优于±1 mm/km，并在1 mm/km的区间半宽内服从均匀分布；由湿度变化引入的测距变化量ΔD_h优于±0.08 mm/km，并在0.08 mm/km的区间半宽内服从均匀分布；由气压变化引入的测距变化量ΔD_p优于±0.3 mm/km，并在0.3 mm/km的区间半宽服从均匀分布。故由环境参数变化引入的测距变化量ΔD_{env}为

$$\Delta D_{\mathrm{env}} = \Delta D_t + \Delta D_h + \Delta D_p \tag{6}$$

4）仪器参数引入的测量不确定度

全站仪参数变化引入的测量误差包括量化误差和频率漂移的影响。TC2003型全站仪的分辨力为0.1 mm，认为量化误差引入的测距变化量ΔD_e在0.05 mm的区间半宽内服从均匀分布。仪器标称频率为50 MHz，在开机30 min后的测距精测频率变化量不超过±5 Hz，由频率漂移引入的测距变化量ΔD_f不大于±0.1 mm/km，认为ΔD_f在0.1 mm/km的区间半宽内服从均匀分布。

距离测量值倾斜修正引入的测量误差包括标准长度基线场各观测墩之间的高度误差和仪器安装的高度误差影响。各观测墩之间的高度误差不超过2 cm，测量使用的合作目标是徕卡专用精密棱镜组，棱镜中心高与仪器高之差可以忽略不计。按测量的最短距离为48 m来计算，由其引入的倾斜修正误差ΔD_{tc}不超过±0.09 mm/km，并服从均匀分布。

5）仪器随机测量误差引入的测量不确定度

测量过程中的仪器随机测量误差引入的测量误差中的乘常数随机测量误差通过全站仪观测值的重复性指标给出，通过实验评定得到全站仪的测量重复性σ优于0.16 mm。认为σ服从正态分布

$N(0,\ 0.16\ \text{mm})$。

仪器和棱镜的组合常数在室内短基线上单独进行校准，并用于补偿全站仪测量基线边标准长度时的观测值，因此仪器和棱镜的组合常数的随机测量误差σ_K通过该常数测量过程中的测量重复性指标给出，测量重复性优于0.25 mm，故认为σ_K服从正态分布$N(0,\ 0.25\ \text{mm})$。

综上所述，将各项误差源汇总如表1所示。

表1　误差源汇总表

Tab.1　Summary of error sources

输入量	误差来源	误差区间半宽	分布类型
ΔD_{ref}	基线边标准长度的测量不确定度引入的标准长度变化量	0.5 mm/km	正态分布
ΔD_{drf}	基线间的距离漂移引入的测距变化量	0.7 mm/km	正态分布
e_{ts1}	全站仪定位杆偏心引入的测距变化量	0.005 mm	正态分布
e_{ts2}	全站仪基座偏心引入的测距变化量	0.07 mm	正态分布
e_{ts3}	全站仪的仪器整平误差引入的测距变化量	0.005 mm	正态分布
e_{p1}	棱镜定位杆偏心引入的测距变化量	0.005 mm	正态分布
e_{p2}	棱镜的仪器整平误差引入的测距变化量	0.015 mm	正态分布
ΔD_t	温度变化引入的测距变化量	1 mm/km	均匀分布
ΔD_h	湿度变化引入的测距变化量	0.08 mm/km	均匀分布
ΔD_p	气压变化引入的测距变化量	0.3 mm/km	均匀分布
ΔD_e	量化误差引入的测距变化量	0.05 mm	均匀分布
ΔD_f	频率漂移引入的测距变化量	0.1 mm/km	均匀分布
ΔD_{tc}	距离测量值倾斜修正引入的测距变化量	0.09 mm/km	均匀分布
σ	随机测量误差引入的测距变化量	0.16 mm	正态分布
σ_K	仪器和棱镜的组合常数的随机测量误差引入的测距变化量	0.25 mm	正态分布

2　测量不确定度评定

2.1　自适应蒙特卡洛法

AMCM对输入量按相应的概率密度函数进行离散抽样，通过测量不确定度评定模型传递输入量分布和计算得到输出量，进一步获得输出量的最佳估计值、标准不确定度度和包含区间。使用AMCM评定全站仪测距测量不确定度的试验过程如图1所示。

1）初始化：包括设置单组试验样本数量M、数值容差δ和试验次数$h=1$。M通过式(7)进行设置

$$M=\max\left(J,10^4\right) \tag{7}$$

式中：J为大于或等于$100/(1-p)$的最小整数，当p取99.9%时，$J=10^5$，即单组试验样本数量$M=10^5$。

数值容差δ与全站仪标准测量不确定度的有效位数相关，将全站仪的标准测量不确定度表示为$c\times10^l$，即可通过式(8)得到δ。

$$\delta=\frac{1}{2}\times10^l=0.5\times10^{-1} \tag{8}$$

2）样本抽取：根据各输入量的概率分布情况抽取M个样本数据。

3）蒙特卡洛试验：抽取的样本根据不确定度评定模型进行计算，并输出当前试验组数据。

4）第h组试验结果计算：包括输出量估计值、标准测量不确定度和概率p的包含区间的左右端点。

5）h组试验结果计算：包括输出量估计值、标准测量不确定度和概率p的包含区间的左右端点的平均值的标准偏差。

6）稳定性判断：判断输出量估计值、标准测量不确定度和概率p的包含区间的左右端点的平均

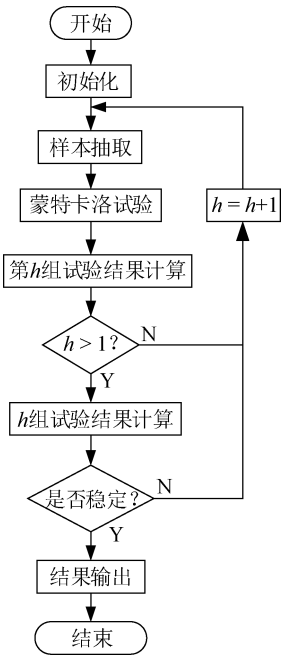


图 1 AMCM 评定测量不确定度程序流程图

Fig.1 Flowchart of measurement uncertainty evaluation by AMCM

值的标准偏差是否小于数值容差δ，若不成立则继续进行$h+1$组试验。

7）结果输出：使用$h \times M$个模型输出值计算得到输出量估计值、标准测量不确定度和概率p的包含区间。

由于 MCM 所需样本数量M的大小与输出量的概率密度函数和包含概率相关，$M = 10^6$通常会为输出量提供 95% 的包含区间，但由于 MCM 缺少对结果的验证，无法保证样本数量是否足够，所以一般需要大量样本数据进行模拟保证输出量准确，样本数据计算时间随着样本数量的增加而增加。而 AMCM 在输出结果前增加了稳定性判断这一步骤，可以实时调整样本数量，采用更少的样本数据即可得到准确可靠的输出量，因此使用 AMCM 可以解决输出量的准确度和样本计算时间的矛盾。

2.2 测量不确定度评定结果

基于不确定度评定模型，得到基线边长度分别为 72、216、432、624、1 176 m 时，全站仪观测值的不确定度评定结果如表 2 所示。

表 2 中，ΔD_0为基线边长度；E为不同测距长度下全站仪观测值的最佳估计值；U为不同测距长度下全站仪观测值的扩展不确定度，包含因子$k = 2$；

表 2 不确定度评定结果

Tab.2 Uncertainty evaluation results

ΔD_0/ m	E / mm	U / mm	$[c_1, c_2]$ / mm
72	72 000	0.6	[71 999.4, 72 000.6]
216	216 000	0.7	[215 999.3, 216 000.7]
432	432 000	1.0	[431 999.0, 432 001.0]
624	624 000	1.3	[623 998.7, 624 001.3]
1176	1 176 000	2.2	[1 175 997.8, 1 176 002.2]

$[c_1, c_2]$为 95% 置信概率的包含区间的左右端点。

该过程中试验次数$h = 3$，即样本数量$M = 3 \times 10^5$时，结果已经趋于统计稳定，相比蒙特卡洛法的样本数量M至少需要10^6个减少了 70% 的样本数量，且二者的不确定度评定结果相同，基线边长度分别为 72、216、432、624、1 176 m 时测量结果分布分别如图 2～6 所示。

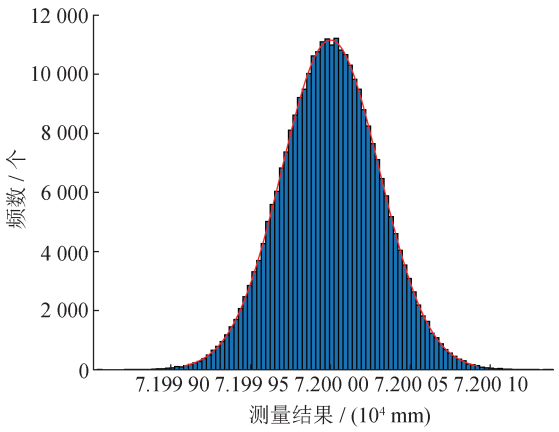


图 2 72 m 测量结果分布

Fig.2 Distribution of 72 m measurement results

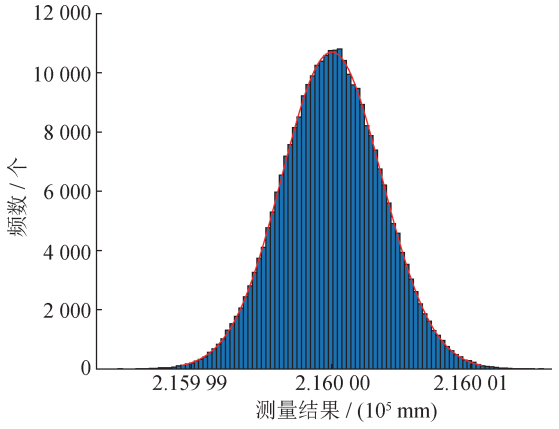


图 3 216 m 测量结果分布

Fig.3 Distribution of 216 m measurement results

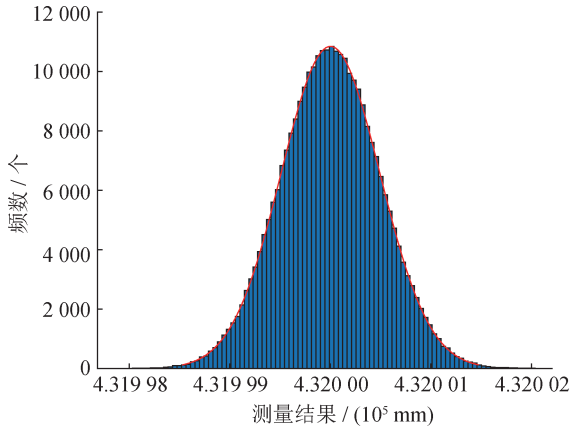


图4　432 m测量结果分布

Fig.4　Distribution of 432 m measurement results

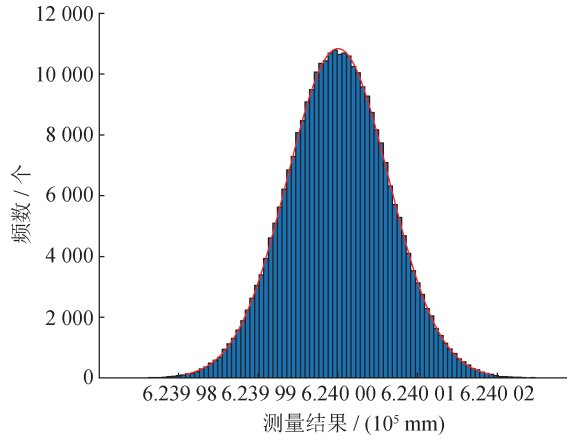


图5　624 m测量结果分布

Fig.5　Distribution of 624 m measurement results

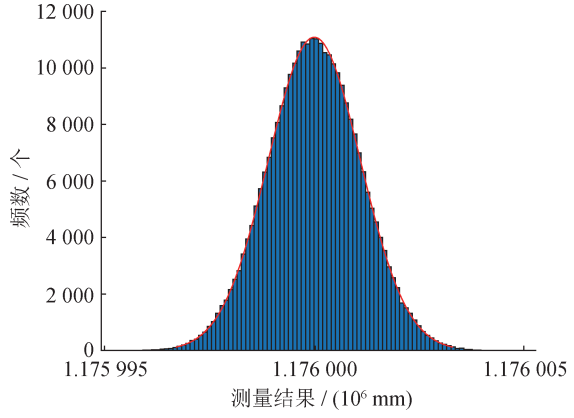


图6　1 176 m测量结果分布

Fig.6　Distribution of 1 176 m measurement results

3　评定结果验证

3.1　GUM评定结果

全国测距仪校准能力计量比对试验在中国计量科学研究院昌平基地标准基线上进行，采用“固定地点”比对方式，比对的基线边长度分别为72、216、432、624、1 176 m。测量结果如表3所示，使用GUM评定全站仪测距的扩展测量不确定度为0. 5 mm + 1. 87 mm/km × D（k = 2）。

表3　测量结果

Tab.3　Measurement results

ΔD_0/m	D/m	dev/mm	U_{GUM}/mm
72	72.010 46	0.10	0.6
216	216.017 92	−0.15	0.9
432	432.025 11	−0.38	1.3
624	624.043 43	−0.49	1.6
1 176	1 176.072 05	−1.19	2.6

表3中，D为全站仪经过频率、气象、倾斜和乘常数修正后的观测结果；dev为全站仪观测结果与参考值比较的等效结果，每段基线共测量10次，每次测量同步记录主导实验室提供的实时环境参数数据，经环境参数补偿后，取平均值作为每段基线边长度的观测结果；U_{GUM}为通过GUM评定的各基线边标准长度的扩展测量不确定度。

3.2　结果对比

由2. 2节AMCM测量不确定度评定结果和3. 1节GUM评定结果可以看出：在测距距离较短时，二者的测量不确定度接近，如测距距离为72 m时，二者的测量不确定度相同；在测距距离较长时，AMCM的测量不确定度评定结果小于GUM，如测距距离为216 m时，AMCM的测量不确定度比GUM小0. 2 mm，距离为1 176 m时，AMCM的测量不确定度比GUM小0. 4 mm，AMCM和GUM两种不确定度评定方法评定的扩展不确定度对比如图7所示。其中偏差为0的黑线为基线边长度的参考值，从图7中可以看出，两种不确定度评定方法的测量结果均在合理预期之内。

造成AMCM在测距距离较长时的扩展不确定度小于GUM的原因是：GUM假设各误差源之间互不相关，而仪器随机测量误差引入的测量不确定度分量中包含了基线参考值、环境参数和仪器参数引入的部分测量不确定度分量，且随着测距距离的增加，该部分引入的不确定度分量也随之增加，导致GUM评定的扩展不确定度可能被保守估计。

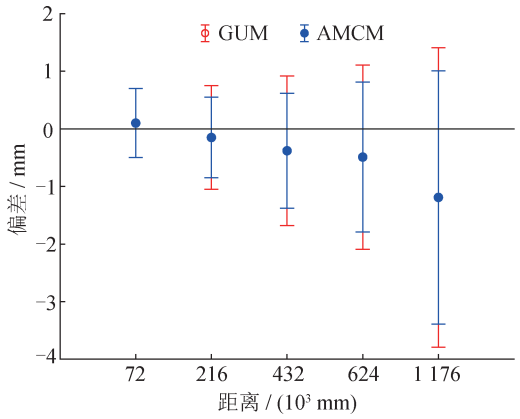


图 7 GUM 和 AMCM 评定不确定度结果对比

Fig.7 Comparison of uncertainty evaluation results between GUM and AMCM

4 结论

全站仪测距不确定度模型具有误差来源复杂和非线性的特点，本文基于 AMCM 评定全站仪测距不确定度不仅有效应对了上述问题，避免了求解灵敏系数的繁琐过程，且使用 AMCM 具有如下优点：

1）借助大量数据样本的优势，相比于 GUM 对各误差源引入的不确定度分量评估更为全面，在 95% 置信概率下，得到的扩展不确定度包含区间更窄。

2）借助自适应优化仿真次数的优势，相比于 MCM，在不影响不确定度的评定结果的前提下，需要的样本数量更少，可以提高计算效率，节省运算时间。

参 考 文 献

[1] ZRINJSKI M, BARKOVIC D, BARICEVIC S. Precise determination of calibration baseline distances[J]. Journal of Surveying Engineering, 2019, 145(4): 5019005. 1-5019005. 9.

[2] LI P, HE M Z, LI J S, et al. Calibration technology of length measurement accuracy of total station in automatic air refractive index compensation system [C]// International Symposium on Precision Mechanical Measurements 2019. 2019.

[3] ŠIAUDINYTE L, GRATTAN K. Uncertainty evaluation of trigonometric method for vertical angle calibration of the total station instrument [J]. Measurement, 2016, 86: 276-282.

[4] ŠIAUDINYTE L, SUH H S. Uncertainty evaluation of proposed setup for the calibration of vertical angle measuring systems by using means for the flat angle calibration[J]. Measurement, 2015, 67:177-182.

[5] GARCÍA-BALBOA J, RUIZ-ARMENTEROS A, RODRÍ GUEZ-AVI J, et al. A Field procedure for the assessment of the centring uncertainty of geodetic and surveying instruments[J]. Sensors, 2018, 18(10).

[6] 范春艳，刘尚国，杨世寨. 蒙特卡洛法评定全站仪测量不确定度方法分析[J]. 地理空间信息，2020，18(4)：105-109，8.
FAN C Y, LIU S G, YANG S Z. Analysis of the uncertainty method of total station measurement assessed by Monte Carlo method[J]. Geospatial Information, 2020, 18(4):105-109, 8. (in Chinese)

[7] 刘胜林. 全站仪（测距仪）测尺频率的测量结果不确定度[J]. 计量技术，2002（1）：44-45.
LIU S L. Uncertainty of measurement results of total station (rangefinder) measuring scale frequency [J]. Measurement Technology, 2002(1):44-45. (in Chinese)

[8] 刘胜林. 全站仪（测距仪）周期误差振幅的测量结果不确定度[J]. 中国计量，2002(7)：47-49.
LIU S L. Uncertainty of measurement results of total station (rangefinder) periodic error amplitude [J]. China Metrology, 2002(7):47-49. (in Chinese)

[9] 江洪波. 全站仪测距综合标准差的测量不确定度评定[J]. 科技信息，2010（17）：476-477.
JIANG H B. Measurement uncertainty assessment of the integrated standard deviation of total station ranging [J]. Science and Technology Information, 2010 (17): 476-477. (in Chinese)

[10] 江洪波. 全站仪进行短基线测量的精度评定[J]. 科技信息，2009(17)：514.
JIANG H B. Accuracy evaluation of total station for short baseline measurement [J]. Science and Technology Information, 2009(17):514. (in Chinese)

[11] 时振伟，王长云，李金鑫. 全站仪加、乘常数检定精度的影响因素及对策分析[J]. 工业计量，2021，31(4)：78-80.
SHI Z W, WANG C Y, LI J X. Analysis of the influencing factors and countermeasures of total station plus and multiplication constants calibration accuracy [J]. Industrial Metrology, 2021,31(4):78-80. (in Chinese)

[12] 赵琳，李锁印，许晓青，等. 基于蒙特卡洛法的常用玻璃量器容量测量结果不确定度评定[J]. 计测技术，2013，33(S1)：187-189.
ZHAO L，LI S Y，XU X Q，et al. Uncertainty assessment of common glass measure capacity measurement results based on Monte Carlo method[J]. Metrology & Measurement Technology，2013，33(S1)：187-189.（in Chinese）

[13] SUN Y，TAN C H. Accelerated kinetic Monte Carlo methods for general nonlocal traffic flow models[J]. Physica D：Nonlinear Phenomena，2023：446.

[14] 朱进，黄垚，朱维斌，等. 磁光阱异面空间角度测量及测量不确定度评定[J]. 仪器仪表学报，2022，43(1)：103-110.
ZHU J，HUANG Y，ZHU W B，et al. Magneto-optical trap anisotropic spatial angle measurement and measurement uncertainty assessment[J]. Journal of Instrumentation，2022，43(1)：103-110.（in Chinese）

[15] 冯亚南，李锁印，韩志国. 对GUM法量块测量不确定度评定的验证[J]. 计测技术，2013，33(S2)：62-64.
FENG Y N，LI S Y，HAN Z G. Validation of uncertainty assessment of GUM method block measurements[J]. Metrology & Measurement Technology，2013，33(S2)：62-64.（in Chinese）

[16] NA Q，HU S，TAO J，et al. Adaptive quasi-Monte Carlo method for uncertainty evaluation in centroid measurement of planetary rovers[J]. Transactions of The Institute of Measurement and Control，2021，43(3)：623-634.

[17] 王朋朋，程杰，张艳昆，等. 0.005级压力式水深测量仪器检定装置的测量不确定度评定[J]. 计量学报，2021，42(8)：1053-1060.
WANG P P，CHENG J，ZHANG Y K，et al. Measurement uncertainty assessment of 0.005 level pressure type bathymetry instrument calibration device[J]. Journal of Metrology，2021，42(8)：1053-1060.（in Chinese）

[18] 王高俊，吴昊，章明洪. 自适应蒙特卡洛法评定肥料中苯并[a]芘含量的测量不确定度[J]. 计量学报，2022，43(1)：127-132.
WANG G J，WU H，ZHANG M H. Adaptive Monte Carlo method to assess the measurement uncertainty of benzo[a]pyrene in fertilizers[J]. Journal of Metrology，2022，43(1)：127-132.（in Chinese）

[19] 陆洪波，李荃. 全站仪加常数、乘常数测量不确定度评定[J]. 北京测绘，2008(1)：11-13，10.
LU H B，LI Q. Measurement uncertainty assessment of total station plus and multiplication constants[J]. Beijing Surveying and Mapping，2008(1)：11-13，10.（in Chinese）

[20] 蒋彦，黄智. 测距基线场强制归心装置的设计与安装[J]. 计测技术，2014，34(5)：60-61.
JIANG Y，HUANG Z. Design and installation of forced homing device for ranging baseline field[J]. Metrology & Measurement Technology，2014，34(5)：60-61.（in Chinese）

（本文编辑：田艳玲）



第一作者：仇跃鑫（1972—），男，浙江杭州人，工程师，研究方向为测绘仪器计量。



通讯作者：王瑛辉（1980—），女，河北张家口人，高级工程师，主要从事测绘仪器、轨道交通领域计量技术研究工作。