

# 一种基于观测方程 GDOP 值的优化选站模型

胡 超<sup>1</sup> 王潜心<sup>1</sup> 王中元<sup>1</sup> 彭小强<sup>1</sup>

1 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

**摘 要:**针对 GNSS(global navigation satellite system)数据分析中心对快速、超快速轨道产品精度及时效性的要求以及全球跟踪站分布不均匀性的现状,本文提出一种基于观测方程 GDOP(geometric dilution of precision)值的优化选站 SSS(selected step by step)模型。从理论上推导出精密定轨最小地面跟踪站数与地面最优跟踪站数的计算方法,分别通过  $s^{\circ} \times s^{\circ}$  和  $k^{\circ} \times k^{\circ}$  带全球网格划分,筛选最小跟踪站全球分布,以定轨观测方程 GDOP 值最小为准则,逐步累加筛选定轨全球跟踪站最优分布。连续 6 d 的数据分析结果表明,本文提出的优化选站模型,在相同数据处理能力条件下,定轨精度可达整体处理的 90%,处理时间缩短 50% 以上;与一般策略对比表明,SSS 模型计算出的轨道精度相当,时间节约 20% 左右;此模型所选跟踪站为最优或次优,提高了分析中心数据处理效率。

**关键词:**SSS 模型; GDOP 值;精密定轨;时效性;网格划分;优化选站  
**中图法分类号:**P228 **文献标志码:**A

GNSS(global navigation satellite system)地面跟踪站的分布对卫星轨道、钟差等相关参数的解算精度与时效性有重要影响<sup>[1-3]</sup>,随着多卫星系统导航技术应用领域的不断拓展,高精度位置服务对轨道等相关产品有严格的精度和时效性要求,这对分析中心的数据处理能力提出了巨大挑战。

GNSS 分析中心处理多系统数据,截止 2015 年 6 月其卫星总数已经超过 74 颗。随着 GNSS 技术的发展,需处理的卫星数目将会进一步增加;目前全球 GNSS 跟踪网内总站已经超过 500 个,数据分析中心正面临处理海量观测数据的挑战。为了缓解分析中心数据处理的压力,优化选择跟踪站很有必要。

地面两站组成的基线距离越长,其确定的卫星轨道精度也就越高<sup>[4]</sup>,这对地面跟踪站选择有一定的参考价值。王解先指出全球均匀分布 15~20 个测站即可满足定轨精度要求<sup>[5]</sup>,但随着 GNSS 卫星数目的不断增加,此测站数目已不适用。Dvorkin 研究了 GLONASS 跟踪站分布<sup>[6]</sup>,指出在 10 个跟踪站定出 GLONASS 轨道的基础

上增加 11 个测站,卫星轨道精度可提高 4 倍左右,但当跟踪站数量提高总数的 30% 时,其精度只提高了 0.1%。文援兰等利用国内 8 个跟踪站确定了 BeiDou 轨道,并且指出增加一个海外站(澳大利亚)时,轨道精度会明显提高<sup>[7]</sup>。这些研究的数据实验大多为仿真实验,且未同时考虑时效性与轨道精度。在数据处理策略方面,陈俊平提出了通过增加数据采样间隔,提高运算效率而不明显损失轨道等产品精度<sup>[8,9]</sup>,但通过增加采样间隔并不能保证产品统一性;葛茂荣等提出参数消去法提高运算效率,该策略在分析中心已经得到运用<sup>[10]</sup>。

本文以卫星定轨观测方程 GDOP(geometric dilution of precision)值最小作为准则,通过 SSS(selected step by step)模型筛选出定轨最优测站分布。首先,从理论上分析定轨最优和最少测站数;随后,通过网格分割放大法避免大量计算,初步确定最少测站全球位置;再通过累加计算出最优测站分布;最后通过数据实验验证了此选站模型的可行性。

1 优化测站分布筛选 SSS 模型

1.1 GNSS 定轨最优测站数

在一定数量范围内,随着 GNSS 全球跟踪站数目的增加。其解算出的卫星轨道参数精度也随之提高<sup>[11,12]</sup>;但伴随测站数量的增加,其数据处理时间也会随之增加。在满足轨道产品精度条件下,确定最优测站分布,不仅可以避免解算过程中观测数据冗余,而且可有效地提高运算效率。本节从理论上分析并确定在 GDOP 值最小准则下 GNSS 卫星定轨最优测站数。

设在历元  $t_k$  时刻,跟踪站与卫星之间的观测方程为:

$$\rho_{t_k} = \rho_{t_k}^j + \Delta_{t_k} + \epsilon_{t_k} \tag{1}$$

式中, $\rho_{t_k}$  为观测值; $\rho_{t_k}^j$  为跟踪站与卫星  $j$  几何距离; $\Delta_{t_k}$  为钟差、模糊度和地球自转参数等相关参数; $\epsilon_{t_k}$  为观测噪声。

对观测方程线性化得:

$$\Delta \rho_{t_k} = \mathbf{A}_k \cdot \Delta \mathbf{X} + \epsilon'_k \tag{2}$$

式中, $\mathbf{A}_k$  为线性化系数矩阵; $\epsilon'_k$  为噪声; $\Delta \mathbf{X}$  为地固坐标系中卫星位置改正; $\Delta \rho_{t_k}$  为线性化后观测方程余项。

$$\mathbf{A}_k =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_1-r_1}}{\partial x_{t_k}^{s_1}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_1-r_1}}{\partial y_{t_k}^{s_1}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_1-r_1}}{\partial z_{t_k}^{s_1}} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_1-r_m}}{\partial x_{t_k}^{s_1}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_1-r_m}}{\partial y_{t_k}^{s_1}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_1-r_m}}{\partial z_{t_k}^{s_1}} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_n-r_1}}{\partial x_{t_k}^{s_n}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_n-r_1}}{\partial y_{t_k}^{s_n}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_n-r_1}}{\partial z_{t_k}^{s_n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_n-r_m}}{\partial x_{t_k}^{s_n}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_n-r_m}}{\partial y_{t_k}^{s_n}} & \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_n-r_m}}{\partial z_{t_k}^{s_n}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

假设卫星为  $n$  颗,地面共有  $m$  个均匀分布跟踪站参与解算,则系数矩阵  $\mathbf{A}_k$  为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_j-r_i}}{\partial x_{t_k}^{s_j}} = \frac{x_{s_j} - x_{r_i}}{\rho_{t_k}^{s_j-r_i}} \\ \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_j-r_i}}{\partial y_{t_k}^{s_j}} = \frac{y_{s_j} - y_{r_i}}{\rho_{t_k}^{s_j-r_i}} \\ \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_j-r_i}}{\partial z_{t_k}^{s_j}} = \frac{z_{s_j} - z_{r_i}}{\rho_{t_k}^{s_j-r_i}} \end{cases} \tag{4}$$

式中, $s_j$  和  $r_i$  分别对应  $t_k$  历元的第  $j$  号卫星与第  $i$

个测站; $\rho_{t_k}^{s_j-r_i}$  为第  $t_k$  历元卫星与测站间几何距离; $(x_{s_j}, y_{s_j}, z_{s_j})$  和  $(x_{r_i}, y_{r_i}, z_{r_i})$  分别对应第  $k$  历元卫星  $j$  与测站  $i$  在同一坐标系中的坐标。设

$$\mathbf{a}_i = (a_{i1} \cdots a_{ij} \cdots a_{im})^T \tag{5}$$

$$a_{ij} = \left[ \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_j-r_i}}{\partial x_{t_k}^{s_j}} \quad \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_j-r_i}}{\partial y_{t_k}^{s_j}} \quad \frac{\partial \rho_{t_k}^{s_j-r_i}}{\partial z_{t_k}^{s_j}} \right] \tag{6}$$

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \mathbf{a}_i & \\ & & & \ddots \\ & & & & \mathbf{a}_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i & \\ & & & \ddots \\ & & & & \mathbf{a}_n^T \mathbf{a}_n \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$(\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k)^{-1} = \begin{bmatrix} (\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1)^{-1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & (\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i)^{-1} & \\ & & & \ddots \\ & & & & (\mathbf{a}_n^T \mathbf{a}_n)^{-1} \end{bmatrix} \tag{9}$$

可以证明<sup>[13,14]</sup>,矩阵迹最小值可表示为:

$$\min(\text{tr}[(\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i)^{-1}]) = \frac{3}{\sqrt{m}} \tag{10}$$

式中, $m$  为矩阵维数。

则对于弧段为一天的设计矩阵可得:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \mathbf{A}_k & \\ & & & \ddots \\ & & & & \mathbf{A}_s \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中, $s$  为一天弧段历元数。

则 GDOP 值为:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} \tag{12}$$

单天弧段 GDOP 最小值为:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1)^{-1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & (\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k)^{-1} & \\ & & & \ddots \\ & & & & (\mathbf{A}_s^T \mathbf{A}_s)^{-1} \end{bmatrix} \tag{13}$$

由式(13)可得:

$$\min[\text{tr}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}]=\frac{3n}{\sqrt{m}}\times s\tag{14}$$

式中,  $n$  为卫星数,  $m$  为测站数。

对式(14)中测站个数求导:

$$\{\min[\text{tr}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}]\}'=-\frac{3}{2}n\cdot s\cdot m^{-\frac{3}{2}}\tag{15}$$

式(15)在不顾及系数情况下,得到 GDOP 变化率与测站数目之间关系如图 1。

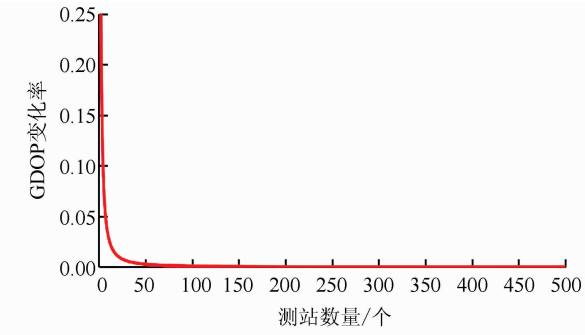


图 1 GDOP 变化率与测站数目关系  
Fig. 1 Relationship Between GDOP Change Rate and the Number of Stations

在全球测站分布均匀的情况下,随着测站数目的增加,相应的 GDOP 值随之减小,但其变化率随着测站增加到一定的数目时其接近于零,对 GDOP 贡献率也随之减少。从图 1 中可知,当全球均匀分布的一定数目跟踪站时即可满足定轨精度需求。但实际定轨过程中,考虑数据质量和测站实际分布不均匀性,可适当增加若干个地面跟踪站。

1.2 参数法确定定轨最小测站数

本节从 GNSS 精密定轨观测方程出发,在满足线性无关方程数目大于未知数(参数)数目的条件下,从方程待求参数角度确定定轨最小测站数。目前,GNSS 数据分析中心解算参数主要有卫星轨道、钟差、地球自转参数(ERP)、站坐标、对流层和模糊度参数等,现有的估计策略如表 1。

表 1 分析中心参数估计策略

Tab. 1 Parameter Estimation Strategy of Data Analysis Centers

卫星数量	$N$
测站平均跟踪卫星个数	$n$
估计轨道弧段	$d$ 天观测弧段
采样间隔	300 s
跟踪站数量/个	$X$
对流层	每小时估计 1 次
模糊度参数	时长 2 h
卫星钟	$N$ (每颗卫星 1 个)
接收机钟	$X$ (每个测站 1 个)

在全球测站分布均匀的条件下,建立参数不等式:

$$\begin{aligned} &N\times(6+5)+(N+X-1)\times(d\times86\,400)/300 \\ &+(d\times86\,400)/3\,600\times X+(d\times86\,400)/7\,200\times \\ &X+3+3\times X\leqslant(d\times8\,6400)/300\times b\times X \end{aligned}\tag{16}$$

式(16)即为参数法确定最小测站数。在全球测站分布均匀的情况下,不等式解出的  $X$  即可满足初步定轨的需要。

1.3 网格法确定最小测站分布

假设基本测站数为  $n$ ,全球分布的跟踪站为 500,则计算 GDOP 值最小一组组合至少需要计算  $C_{500}^n$  次。显然当  $n>4$  时,需要的筛选组合已超过 1 亿次,就时效性和计算机的数据处理能力来说无现实意义和可行性。为了简化选站计算和提高计算效率,现提出网格法筛选最小测站,剔除无意义的测站,减少需筛选数目;通过全球区域网放缩简化选站工作,基本思路如下。

- (1)将全球(经度  $0\sim360^\circ$ ,纬度  $0^\circ\sim90^\circ$ (南北纬))划分为  $k^\circ\times k^\circ$ ( $k$  为所划分网格跨度)等值线网格,提取网格点大地经纬度。
- (2)计算出所有精密定轨卫星相对于每个网格点每个历元高度角。
- (3)剔除网格点周围无跟踪站且位于海洋的网格点(剩余  $M$  个网格点)。
- (4)在剩余的网格点中计算出与最少测站数相同且 GDOP 值最小的一组组合的网格点分布。
- (5)在计算出的网格点附件搜索最近的测站点作为定轨最少站点位置分布。

1.4 迭代累加优化选站

迭代累加优化选站是根据计算出的最优跟踪站个数和已确定的最少测站分布,以 GDOP 值最小为准则,进行逐个测站循环累加,最终获得分析中心筛选后的测站列表,基本流程图如下。

优化选站即通过参数法与全球网格划分,筛选 GDOP 最优组合,确定出 GNSS 卫星定轨最小测站数及其全球分布。在循环累加选站开始前,为了提高选站计算效率,采用  $s^\circ\times s^\circ$  的全球网格将全球分割成若干小区域,对测站进行一步预处理。同一区域只保留一个测站点,被剔除测站作为定轨备选测站;一定范围保证测站均匀性,避免选站时不必要的数据冗余。在最小测站的基础上,逐步循环计算 GDOP 最优的站点,并以此站点作为下步循环的已知站点,逐步循环累加,直至选出最优测站。

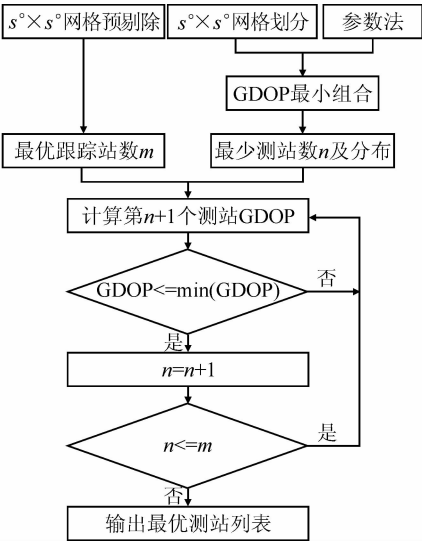


图 2 优化选站流程图

Fig. 2 Flowchart of Optimal Stations Selected

2 优化选站实验

本文以 GPS(global position system)作为计算精密轨道最优选站实验卫星系统。通过计算得到最优测站数为 62 个全球均匀分布测站。考虑数据质量问题和测站不均匀分布的现状,适当增加若干个跟踪站。本实验在 62 个观测站的基础上增加 10 个测站。由参数不等式(16)可知,设地面观测站平均可见卫星数为 7 颗,则 30 颗卫星(其余 2 颗无数据)至少需要 6 个地面观测站。实验数据处理平台为分析中心连续运行工作站,观测数据取分析中心 2015 年连续 6 d(年积日为 175 天~180 天)可下载到的 306 个全球分布的 IGS(International GNSS Service)跟踪站天观测数据(超快速和快速用小时合并数据)。

2.1 网格法确定最少跟踪站

计算可得全球 $40^{\circ}\times40^{\circ}$ 网格为本实验确定最少跟踪站最优划分法;划分后全球 45 个网格点中,考虑到实际跟踪的分布,剔除网点周围无跟踪站且位于水面的点,初步筛选 GDOP 值最小的 6 个网点(图 3 中蓝色点)。

在选出的 6 个网格点附近搜索距离网格点最小的 6 个地面跟踪站作为最少跟踪站(图 3 中红色点),表 2 列出了测站分布。

2.2 迭代累加筛选最优站

同上,本实验测站预剔除最优划分为全球 $5^{\circ}\times5^{\circ}$ 网格带。在确定的 6 个地面跟踪站基础上逐步累加,循环计算得到 GDOP 值最小测站列表,筛选结果如图 4 所示。

表 2 最小测站位置

Tab. 2 Location of Minimum Stations

测站	经度	纬度
AUKT	174. 77°E	35. 15°S
OHI3	57. 90°W	62. 67°S
SUTM	20. 81°E	31. 61°S
NKLG	9. 67°E	0. 35°N
BILB	166. 45°E	68. 06°N
WHIT	135. 22°W	60. 75°N

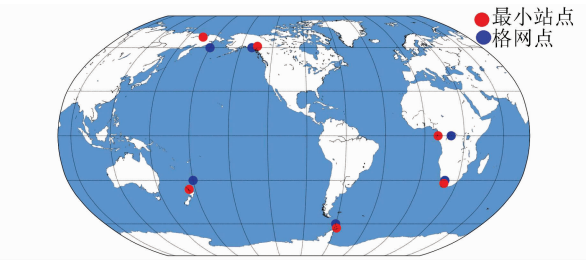


图 3 最优网格点及最少测站分布图

Fig. 3 Optimal Grid Point and Stations Distribution

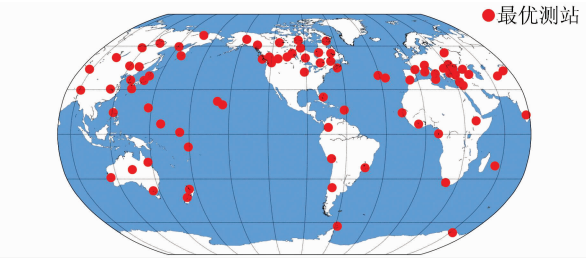


图 4 筛选出的最优测站分布

Fig. 4 Distribution of Optimal Stations

筛选过程中,随着测站数目的累加,GDOP 值变化曲线如图 5 所示(理论 GDOP 值与实验 GDOP 值分别为式(14)计算结果与循环筛选实验结果,图中略去 3 000 左右系统误差)。图 5 中,GDOP 值随着跟踪站数目的增加逐渐减小,变化率趋缓;当跟踪站数目达到一定数目时,实验 GDOP 值与理论值保持一致,二者曲线最终重合。

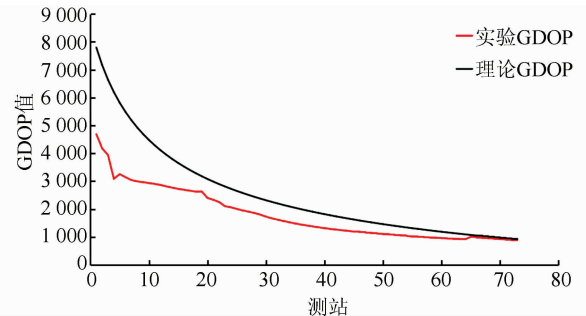


图 5 实验 GDOP 值与理论 GDOP 值对比

Fig. 5 Comparison of Experiment GDOP and Theoretic GDOP

2.3 精密定轨实验

本文定轨实验基于武汉大学开发的高精度导航定位数据处理分析软件(PANDA)。利用筛选出的测站进行定轨实验,对比筛选前后参数解算精度与时效性,以评估本文提出的选站模型有效性。

图 6 与图 7 为 SSS 模型选出的连续六天测站

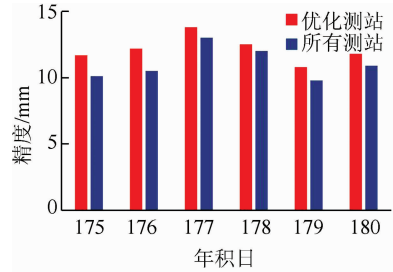


图 6 最优选站精度对比

Fig. 6 Comparing the Accuracy of Optimal Stations Consuming

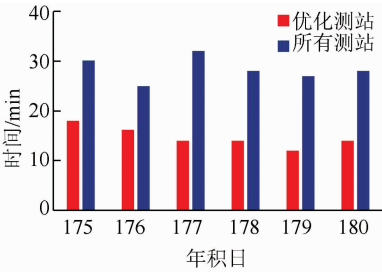


图 7 最优选站时间对比

Fig. 7 Comparing the Time Consuming of Optimal Stations

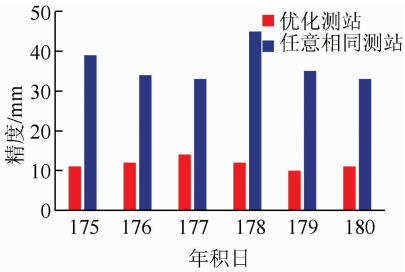


图 8 最优测站与任意站精度对比

Fig. 8 Comparing the the Accuracy of Optimal Stations

2.4 通用方法结果对比

为验证本文提出的选站模型优势,针对 GNSS 分析中心生成快速与超快速产品的解算策略,同时考虑数据源更新和产品时效性,对比本文选站模型与分析中心通用策略。分析中心解算产品通用选站策略如表 3。

为了进一步验证 SSS 模型的可行性,对超快速和快速连续 6 天可获得的测站进行筛选,图 9

~图 12 分别为针对分析中心快速、超快速采用 SSS 模型选取的测站与通用方法解算精度与时间对比。

表 3 地面测站选择策略

Tab. 3 Selected Method of Data Analysis Centers				
类型	测站可用 /个	时效性 /h	策略	优化选站数 /个
超快速	75	2	整体解算	62
快速	112	13	均匀分布 80 个	72

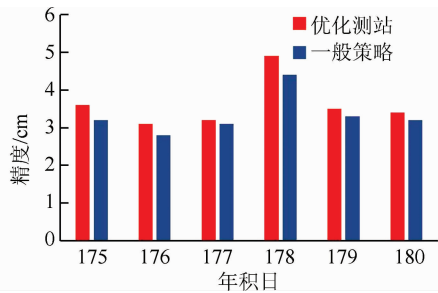


图 9 超快速轨道最优测站与任意测站精度对比

Fig. 9 Comparing the Accuracy of Optimal Stations for Ultra-rapid Orbit

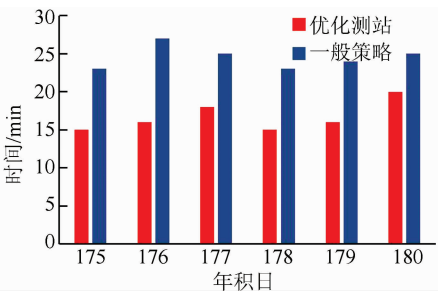


图 10 超快速轨道最优选站时间对比

图 10 Comparing the Time Consuming of Optimal Stations for Ultra-rapid Orbit

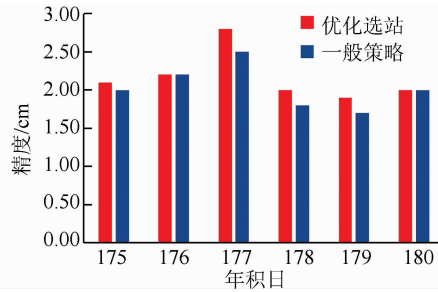


图 11 快速轨道最优测站与任意测站精度对比

Fig. 11 Comparing the Accuracy of Optimal Stations for Rapid Orbit

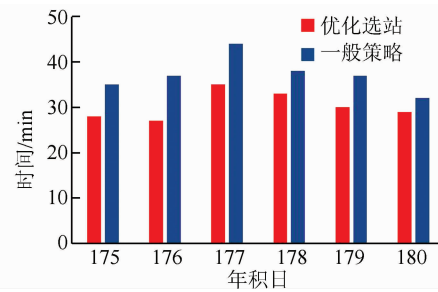


图 12 快速轨道最优选站时间对比

图 12 Comparing the Time Consuming of Optimal Stations for Rapid Orbit

3 结 语

对分析中心连续 6 d 下载的全球 IGS 观测站数据进行 SSS 筛选最优测站,并对选出的测站进行定轨实验。在选站过程中,实验 GDOP 值曲线与理论值保持一致,随着测站数目的增加,GDOP 值变化趋于零;验证了随着测站数目的增加,测站对 GDOP 贡献逐渐趋缓的结论。通过对比轨道精度和时效性可以看出,最优测站定轨精度与所有测站同时解算精度相当(90%);最优测站处理所需时间约为其 50%。同时通过任意选取与选出的测站数目相同的测站数进行定轨实验,发现任意选站的定轨精度只有最优测站定轨精度的 40%左右。另外,通过对比超快速和快速产品的通用解算方法,实验结果表明:SSS 模型所选出的最优测站分布与通用方法计算出的卫星轨道精度相当,计算时间节约 20%左右,这有助于分析中心适当推迟产品解算时间而增加可选择的测站数据。针对全球跟踪站分布不均匀的现状和对定轨精度、时效性的要求,在现有的数据处理能力的基础上,SSS 模型进行优化选站对 GNSS 分析中心数据处理具有意义。

目前,全球可跟踪接收 BDS 数据和 Galileo 数据的跟踪站数目相对较少,但 SSS 模型可作为新建跟踪站选址的一种简单而可靠的策略。随着 GNSS 技术的发展,地面跟踪站也会随之逐渐增加。SSS 模型可有效解决数据冗余问题,增加数据处理效率。

致谢:感谢国际 GNSS 监测评估系统(iG-MAS)提供的数据产品。

参 考 文 献

[1] Zhang L, Dang Y, Xue S, et al. The Optimal Distribution Strategy of BeiDou Monitoring Stations for GEO Precise Orbit Determination[C]. The 6th China Satellite Navigation Conference, Xi'an, China, 2015

[2] D'Amario L A, Bright L E, Wolf A A. Galileo Trajectory Design [J]. *Space Science Reviews*, 1992, 60(1):23-78

[3] Wang Q, Dang Y, Xu T. The Method of Earth Rotation Parameter Determination Using GNSS Observations and Precision Analysis[C]. The 4th China Satellite Navigation Conference, Wuhan, China, 2013

[4] Cannon M E, Schwarz K P, Wei M, et al. A Con-

sistency Test of Airborne GPS Using Multiple Monitor Stations[J]. *Journal of Geodesy*, 1992, 66(1):2-11

[5] Wang Jiexian. GPS Precise Orbit and Efficiency of Data Analysis for Huge GNSS Positioning [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997 (王解先. GPS精密定轨定位[M]. 上海:同济大学出版社, 1997)

[6] Dvorkin V V, Karutin S N. Optimization of the Global Network of Tracking Stations to Provide GLONASS Users with Precision Navigation and Timing Service [J]. *Gyroscopy & Navigation*, 2013, 4(4):181-187

[7] Wen Yuanlan, Liu Qixu, Zhu Jun, et al. The Effect of TT&C Deployment on the Regional Satellite Navigation System [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(1):1-6(文援兰, 柳其许, 朱俊, 等. 测控站布局对区域卫星导航系统的影响[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1):1-6)

[8] Chen J, Zhang Y, Xie Y, et al. Improving Efficiency of Data Analysis for Huge GNSS Network[C]. The 4th China Satellite Navigation Conference, Wuhan, China, 2013

[9] Chen J, Wu B, Hu X, et al. SHA: The GNSS Analysis Center at SHAO[C]. The 2th China Satellite Navigation Conference, Shanghai, China, 2011

[10] Ge M, Gendt G, Dick G, et al. A New Data Processing Strategy for Huge GNSS Global Networks [J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(4): 199-203

[11] Liu Wei. The Research on The Effect of Ground Observation Stations Distribution on the Precision of Orbit Determination[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005(刘伟. 监测站的分布对定轨精度影响的研究[D]. 武汉:武汉大学, 2005)

[12] Liu Jingbin, Wu Xiujuan, Cai Yanhui, et al. Simulation System of Ground Station for Galileo[C]. The Seventh Annual Meeting China Global Positioning System Technology Application Association, Shenzhen, China, 2003(柳景斌, 吴秀娟, 蔡艳辉, 等. 伽利略系统地面布站仿真系统[C]. 中国全球定位系统技术应用协会第七次年会, 深圳, 中国, 2003)

[13] Xue Shuqiang, Yang Yuanxi, Chen Wu, et al. Positioning Configurations with Minimum GDOP from Orthogonal Trigonometric Functions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, (7): 820-825 (薛树强, 杨元喜, 陈武, 等. 正交三角函数导出的最小 GDOP 定位构型解集[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, (7): 820-825)

[14] Xue Shuqiang, Yang Yuanxi. Nested Cones for Single-Point-Positioning Configuration with Minimal GDOP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1 369-1 374(薛树强, 杨元喜. 最小 GDOP 定位构型的一种嵌套圆锥结构[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(11):1 369-1 374)

An Optimal Stations Selected Model Based on the GDOP Value of Observation Equation

HU Chao<sup>1</sup> WANG Qianxin<sup>1</sup> WANG Zhongyuan<sup>1</sup> PENG Xiaoqiang<sup>1</sup>

1 School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

**Abstract:** With reference to the accuracy and time of rapid and ultra-rapid satellite orbit and the unbalanced distribution of global tracking stations, GNSS Data Analysis Centers are meeting with big challenge. This paper proposes an optimal stations selected model called SSS (selected step by step) which is based on the GDOP (geometric dilution of precision) value of observation equation. Firstly, the calculation methods of optimal and the minimum of ground tracking stations for precise orbit determination were deduced. Secondly, according to the global grid of  $s^{\circ}\times s^{\circ}$  and  $k^{\circ}\times k^{\circ}$ , the distribution of minimum stations were selected out. Thirdly, based on the standard of minimum GDOP, an optimal distribution of global tracking stations was gradually accumulated step by step. Six days continuous experiment shows, on the same numerical computation ability, SSS model can reach 90% level of accuracy as the whole data processing and reduce computation time at less 50%. Comparing with the ordinary methods, it shows that SSS model can get the same accuracy as the ordinary methods, while could save time reaching up 20%. Moreover, several comparison experiments indicated that SSS is the optimal or sub-optimal model for the station selected and improves the efficient of data analysis centers.

**Key words:** SSS model; GDOP value; precise orbit determination; time requirement; global grid; optimal stations selected

**First author:** HU Chao, postgraduate, specializes in GNSS orbit determination. Email: chaohu2014gnss@163.com  
**Corresponding author:** WANG Qianxin, PhD, associate professor. E-mail: wangqianxin8012@163.com  
**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41404033, 51374209; the Key Program of the State Open Research Fund Program of Key Laboratory, No. SKLGIE2014-Z-1-1; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2011QNA02; the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No. 20130095110022.