

CORS 网型结构对网络 RTK 服务性能的影响研究

张熙¹ 黄丁发¹ 廖华² 周乐韬¹ 张德强¹

1 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,610031

2 四川地震局减灾救助研究所,四川 成都,610014

摘要:网型单元是 CORS 网络 RTK 的基本服务单元,定量评价网内各单元的服务能力对于指导和优化 CORS 网络建设有着积极作用。本文提出了一种基于主参考站服务能力的网型结构评价因子,结合美国 CRTN 网 5 个测站年积日 2010.93 的数据,分析了网型单元中不同主参考站对网络改正数精度的影响;并针对川渝 CORS 网络 25 万 km²服务范围、82 个三角服务单元,分析了网型结构与区域实时差分定位服务性能的关系。结果表明,CORS 站网型结构是影响网络 RTK 定位服务性能的主要因素之一;本文提出的网型结构因子可用于 100 km 级参考站网络网型结构的评价指标。

关键词:CORS; 网络 RTK; 服务性能; 网型结构因子

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

随着 GNSS 技术在各领域的广泛深入应用,全球范围各类型 CORS 网络的建设如火如荼^[1-3]。影响网络 RTK 服务性能的关键在于大气延迟、卫星轨道等空间相关误差影响的有效建模。目前,经过精密预报星历修正的卫星轨道在 200 km 内的误差影响为亚 mm^[4],因此,大气延迟误差就成了影响长距离动态模糊度解算精度的主要因素。电离层和水汽含量存在各项异性,且随时空变化异常复杂,现有的 Klobuchar、Hopfield 等模型^[5-6]无法满足 RTK 的需求。黄丁发等^[7-9]利用内插建模得到了 100 km CORS 网络优于 4 cm 的大气改正精度,并开发成功实用有效的网络 RTK 服务系统(ARSNet/VERNUS)^[10],进一步证实了基于 CORS 网络的区域大气改正数内插模型能够很好地满足广域 RTK 的需求。

Dorota 等^[11-12]的研究和实践显示,网型结构、站间距会影响动态差分结果的精度和可靠性,表明 CORS 网型与大气改正模型的精度存在直接关系^[7,13-15]。本文在此基础上提出网型结构因子的概念,研究网型结构因子与网络 RTK 定位服务性能的关系,得到了有益的结论,定量化地描述了参考站网络布设的网形结构对网络 RTK 定

位性能的影响,对于优化和提高 CORS 网建设与服务性能评价给出了理论和实用化的技术指标。

1 CORS 网型结构因子构建

目前用于 CORS 网络的内插模型主要有 LCM(线性组合法)、LIM(线性内插法)、DIM(距离相关内插法)和 LSM(低阶表面拟合法),参见文献[13]。实践表明,正常情况下,LIM 方法在 100 km 级 CORS 网络中体现了良好的大气改正数内插效果。本文对修正了对流层高差影响的大气改正数进行统一的 LIM 内插分析。

1.1 内插改正数的精度

由于内插模型会将参考站的残余误差积累到流动站上,因此实际应用中都以参考站网络的三角形网作为一个内插单元(服务单元)。假设大气双差改正数 Atm 与 CORS 站平面坐标差 (ΔN , ΔE) 成线性关系,可以得到大气双差改正数 LIM 模型如下:

$$\Delta \nabla Atm_{i,b} = a_1 \Delta N_{i,b} + a_2 \Delta E_{i,b} + a_3 \quad (1)$$

式中, b 是主参考站; i 是参考站编号。当 CORS 站总数 $n \geq 3$ 时,可以求得模型系数阵:

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{R}_{3,n} Atm \quad (2)$$

收稿日期:2013-10-30

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41374032);国家 863 计划资助项目(2012AA12A209)。

第一作者:张熙,博士生,主要从事 CORS 网数据处理与分析研究。E-mail: zhangxi@my.swjtu.edu.cn

通讯作者:黄丁发,博士,教授。E-mail: dfhuang@swjtu.edu.cn

式中, $\alpha = [a_1 \ a_2 \ a_3]_{3 \times 1}^T$; $Atm = \begin{bmatrix} \Delta \nabla Atm_{1,b} \\ \vdots \\ \Delta \nabla Atm_{n,b} \end{bmatrix}_{n \times 1}$; $R_{3,n} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta N_{1,b} & \Delta E_{1,b} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta N_{n,b} & \Delta E_{n,b} & 1 \end{bmatrix}_{n \times 3}$ 。

令 $\mathbf{X}_u = [\Delta N_{u,b} \ \Delta E_{u,b} \ 1]_{1 \times 3}$, 则流动站 u 与主参考站 b 的大气双差改正数为:

$$\Delta \nabla Atm_{u,b} = \mathbf{X}_u \alpha \quad (3)$$

假设已知参考站网的大气双差改正数方差阵为:

$$\mathbf{D}_{Atm} = \begin{bmatrix} \sigma_{1,b}^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_{n,b}^2 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (4)$$

$$r(\mathbf{D}_{Atm}) = n - 1$$

式中, $r()$ 是求矩阵的秩。根据误差传播定律可知 $\Delta \nabla Atm_{u,b}$ 的先验方差为:

$$\sigma_{u,b}^2 = \mathbf{X}_u \mathbf{D}_a \mathbf{X}_u^T \quad (5)$$

$$\mathbf{D}_a = \mathbf{R} \mathbf{D}_{Atm} \mathbf{R}^T$$

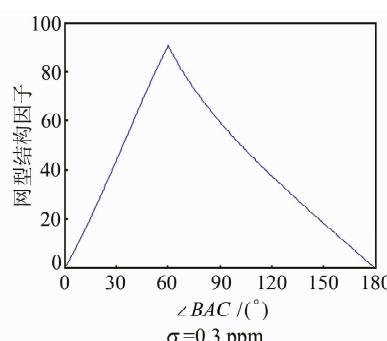
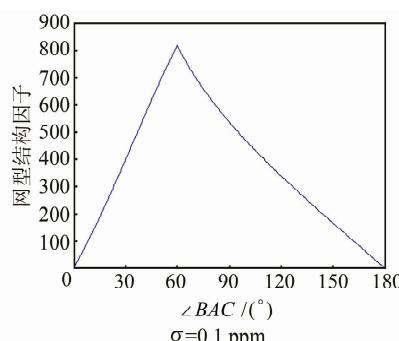
易知 \mathbf{D}_a 的秩等于 2, 即 $\sigma_{u,b}^2$ 由内插单元中的任意两条基线确定; 然而, 测试结果表明, 三角形内插单元中参考站间基线解算的大气改正数可能存在不符值(闭合差), 从而给不同主参考站的内插服务带来差异。可见, 评价网型结构单元的质量需要综合考虑各主参考站的服务能力。

1.2 网型结构因子

展开式(5)可知, $\sigma_{u,b}^2$ 的等值线是关于 $(\Delta N_{u,b}, \Delta E_{u,b})$ 的二元二次函数, 通过 \mathbf{D}_a 对角化可变换为先验方差分布标准椭圆方程:

$$\frac{x^2}{\sigma_{u,b}^2} + \frac{y^2}{\lambda_2} = 1 \quad (6)$$

式中, $\{\lambda_1, \lambda_2; \lambda_1 \leq \lambda_2\}$ 是 \mathbf{D}_a 的非零特征值, 从而得到椭圆的面积, 即方差小于 $\sigma_{u,b}^2$ 的服务面积:



$$S_i = \pi \times \frac{\sigma_{u,b}^2}{\sqrt{\lambda_1 \lambda_2}}; i = \{1, 2, 3\} \quad (7)$$

可知, 确定先验方差 $\sigma_{u,b}^2$ 后, S_i 只与矩阵 \mathbf{D}_{Atm} 和 \mathbf{B} 有关, 而 \mathbf{D}_{Atm} 是实测精度, \mathbf{B} 包含了服务单元的网型信息。由此, 在同时顾及服务单元内各主参考站的服务面积与服务差异的情况下, 作者提出先验方差小于 1 mm^2 时各主参考站服务面积的总和乘以最小值与最大值的比值作为评价该网型结构的因子:

$$d = \underbrace{\text{sum}(S)}_{\textcircled{1}} \times \underbrace{(\min(S)/\max(S))}_{\textcircled{2}} \quad (8)$$

式中, $S = \{S_1, S_2, S_3\}$; sum、min、max 分别是求和函数、最小值函数和最大值函数; 第①项代表了服务单元内方差小于 1 mm^2 的有效服务面积, 第②项代表了服务单元内不同主参考站服务能力的差异。根据式(4)可知, 该网型结构因子顾及了服务单元实时的解算质量 \mathbf{D}_{Atm} , 因此, 该因子具有时效性, 且在大气空间变化平稳时, 只与网型有关。

1.3 网型结构因子分布分析

假设测区内的大气延迟改正精度与距离成线性关系, 模拟变化夹角的两条等长基线, 如图 1 所示, 固定 AB , 旋转 AC 。

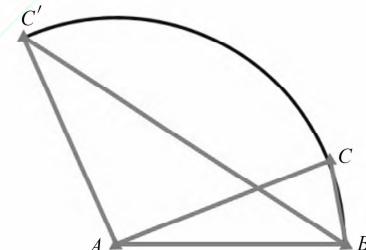


图 1 网型结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Network Structure

以 0.1 ppm 、 0.3 ppm 的等效距离误差, 100 km 基线长度, 模拟测试得到不同夹角 $\angle BAC$ 的网型结构因子分布曲线分别如图 2(a)、2(b)所示。

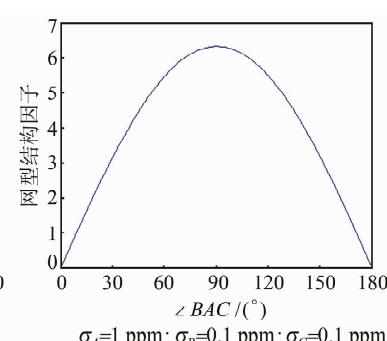


图 2 网型结构因子分布曲线

Fig. 2 Distribution Curve of Network Structure Factor

图 2(a)和 2(b)中清晰显示了在大气变化平稳时,若 $\angle BAC=60^\circ$ (即 $\triangle ABC$ 为正三角形),网型最优;图 2(c)是模拟参考站 A 的大气误差异常时(10 倍于参考站 B 和 C 的大气误差)网型因子与参考站空间结构的关系,可以看出此时的最佳网型不再是正三角形,且整体服务质量较差。对

比显示,该网型结构因子能够综合反映参考站空间分布和大气解算误差信息。具体表现为:测站网型越好,网型结构因子越大;大气误差越小,网型结构因子越大。

分别选取图 2(a)中 $\angle BAC=60^\circ$ 和 30° 时,各主参考站服务的先验方差分布情况如图 3 所示。

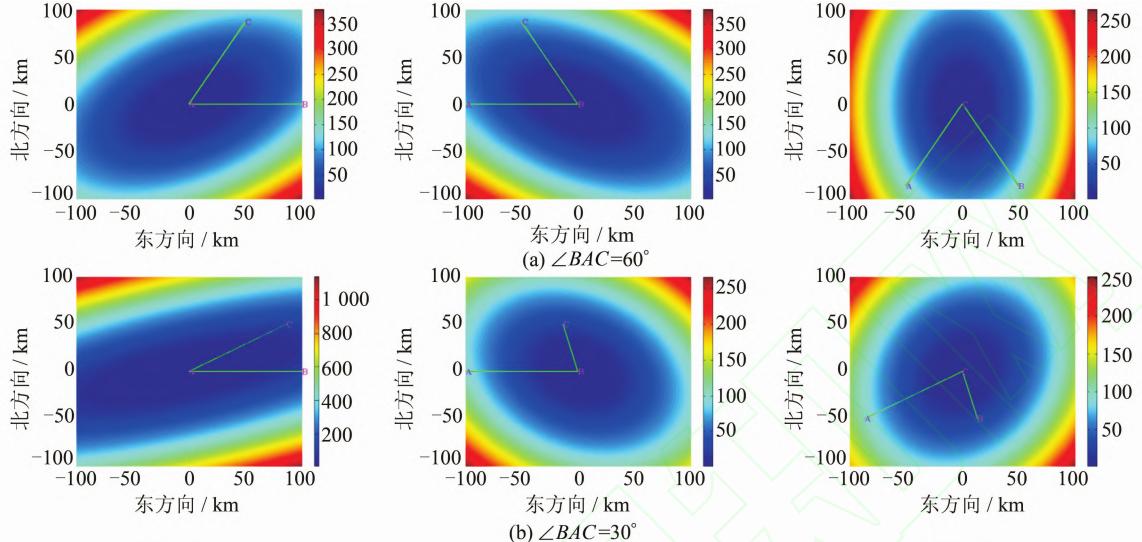


图 3 不同网型结构各参考站服务的先验方差分布图

Fig. 3 Prior Variance's Distribution Maps of Every Reference Stations Under the Different Network Structures

由图 3(a)、3(b)对比显示,主参考站的服务质量分布存在明显的方向性;大气变化平稳的情况下,夹角方向的服务质量要优于其他方向,且网型越差,各参考站服务能力的差异越大。

2 主参考站服务质量的差异

为了说明实测中选择不同主参考站的服务质量存在差异性,实验选取了美国 CRTN 网 5 个测站的年积日 2010.93 数据,基站分布如图 4 所示,最长基线有 83.6 km,最大高差为 750 m,以对流层双差改正数内插为例,对比分析了不同主参考站的影响。

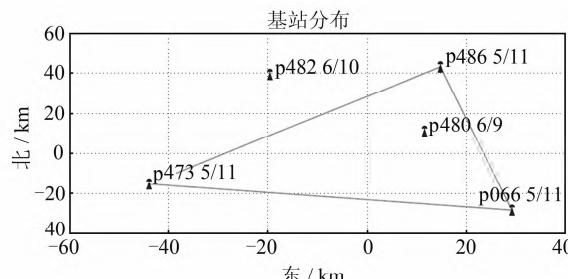


图 4 基站分布图

Fig. 4 The Distribution of Stations

以 p473-p486-p066 为三角服务单元,p480 和 p482 分别作为网内和网外的流动站改正数校验

点。实验利用 GAMIT 软件解算得到各测站一天 12 个时段的天顶对流层延迟量,并以此作为标准值,统计对比了不同主参考站服务时 VENUS 软件解算的相应基线对流层双差改正数在校验点的内插值和外推值偏差。采样间隔为 30 s,内插方法采用 LIM 模型和 Saastamoinen 模型(标准大气参数)改正高差影响,p480 和 p482 在不同主参考站服务时的改正值偏差序列如图 5、图 6 所示。

统计得到各主参考站的内插和外推精度以及不同参考站的改正值差异如表 1、表 2 所示。

表 1 各主参考站的内插和外推精度/mm

Tab. 1 Accuracy of the Interpolated and Extrapolated Values for Each Reference Station/mm

参考站	p480 的改正值精度	p482 的改正值精度
p486	11	19
p066	7	24
p473	9	22

表 2 不同参考站的改正值差异/mm

Tab. 2 The Difference of the Corrections Among the Reference Stations/mm

校验点	p486-p066	p486-p473	p066-p473
p480	11	9	6
p482	11	10	7

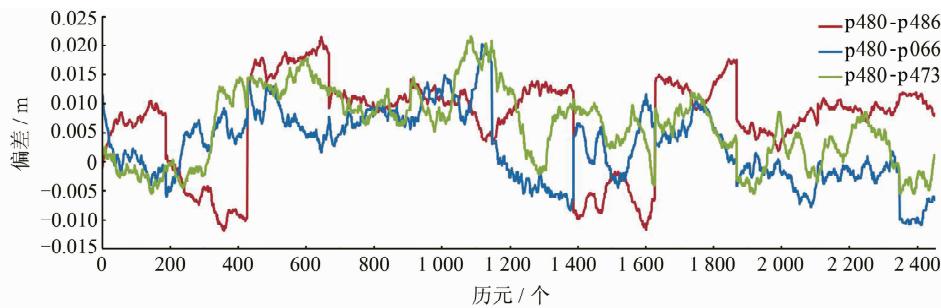


图 5 各主参考站在 p480 的内插值与标准值的偏差

Fig. 5 Deviation of Interpolated Value with the Standard at Point p480

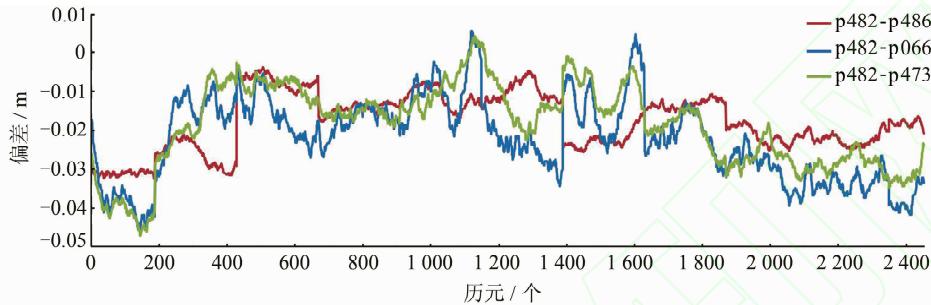


图 6 各主参考站在 p482 的外推值与标准值的偏差

Fig. 6 Deviation of Extrapolated Value with the Standard at Point p482

由上可见,内插精度优于外推精度,且不同主参考站的改正精度基本一致,但是在单个历元时刻的改正质量存在 cm 级的差异。分析可知,各参考站卫星观测条件的差异,尤其是低高度角卫星的影响在长距离基线网解算中越显突出,加之 Saastamoinen 模型的改正质量的影响,造成了各主参考站内插质量的差异。

3 网型结构因子实用性验证

川渝 CORS 网络有效服务覆盖面积达 25 万 km^2 ,包括 48 个 CORS 站,82 个基本服务单元,平均站间距约 80 km,具有较好的测试环境。实验对服务区域内均匀分布的 141 个点的 RTK 初始时间、定位精度、外延距离等指标进行了采样,并与网型结构因子分布情况进行了对比分析。

3.1 川渝 CORS 网络网型结构因子

在 CORS 网中选择均匀分布的 10 个结构单元,利用 VENUS 软件进行解算,得到各条基线固定后双差改正数无异常,等效距离误差平均约为 0.3 ppm,从而认为在测试期间该网范围的大气变化平稳。以 0.3 ppm 的等效距离误差统计各服务单元网型结构因子的分布情况如图 7 所示。

图 8 显示 CORS 网西北部、东部、东南部网型结构因子较低,统计得到川渝 CORS 的网型结

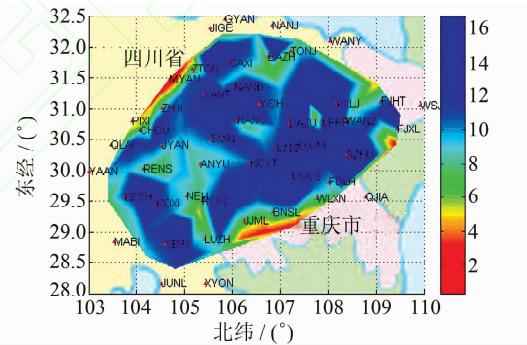


图 7 网型结构因子分布图

Fig. 7 Distribution Map of Network Structure Factors in Sichuan-Chongqing CORS

构因子主要分布在 8~16 之间,整网的平均值为 10.3。

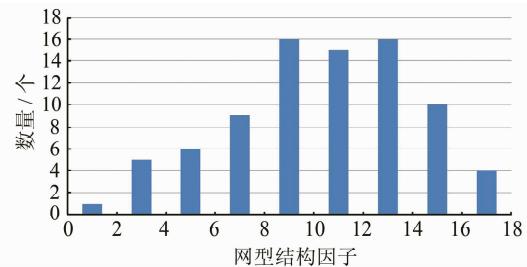


图 8 川渝 CORS 网型结构因子分布统计直方图

Fig. 8 Statistical Histogram of Sichuan-Chongqing CORS' Network Structure Factors

3.2 网络 RTK 服务性能指标

初始化时间、定位精度、外延距离等信息是网络 RTK 服务在客户端的最终体现,常被作为网络 RTK 服务性能的评定指标。川渝 CORS 网络 RTK 服务性能指标统计结果如下。

1) 初始化时间

图 9 显示整个 CORS 网动态测试点的初始化时间分布大部分比较均匀,网络正北、东北、西南,尤其东南方向的部分测试点初始化时间明显增长。统计结果表明本次测试的平均初始化时间为 46.0 s,其中,70% 小于 40 s、86% 小于 80 s、95% 小于 240 s。

2) 定位精度

对初始化成功的测试点进行内符合精度统计,得到了如图 10 所示的内符合精度均匀性分布和坐标精度情况。

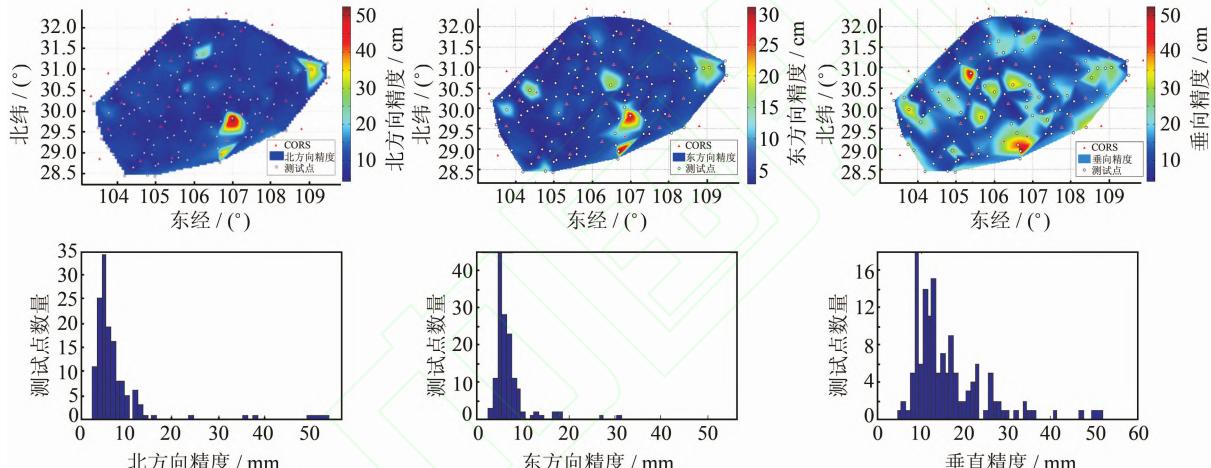


图 9 初始时间均匀性分布图

Fig. 9 Uniform Distribution of Initial Time

3) 外延距离

根据图 7 的网型结构因子分布情况选择了 4 条外延线路,统计了流动站用户在超出网络覆盖区一定范围的服务性能衰减情况。

图 11 中记录 4 种不同网型的外延服务能力,图上显示 RTK 的初始化时间随外延距离增加而逐渐增长。其中,图 11(a)和 11(c)的外延服务距离可达 35~50 km;图 11(b)外延一定距离后,初始化时间明显增加;图 11(d)只在网型覆盖边缘实现了初始化,且初始化时间需要大约 300 s。对比服务单元的网型结构因子可以发现,网型结构因子大的外延服务能力更强。

3.3 对比分析

将图 9~图 11 与图 7 对比可以发现,网型结构因子与初始化时间、定位精度、外延距离存在明

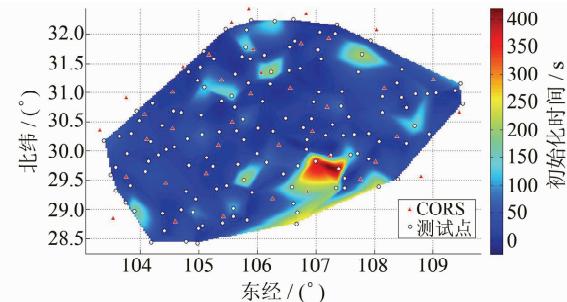


图 9 初始时间均匀性分布图

Fig. 9 Uniform Distribution of Initial Time

从图 10 可以看出,CORS 网东部和东南部误差显著,而其他区域的水平精度分布比较均匀,且 3 个方向具有一致性。受 GNSS 定位模型影响,垂向精度整体较水平方向低。平均内符合精度在北、东、高方向上分别为 7.2 mm、6.9 mm、16.1 mm。

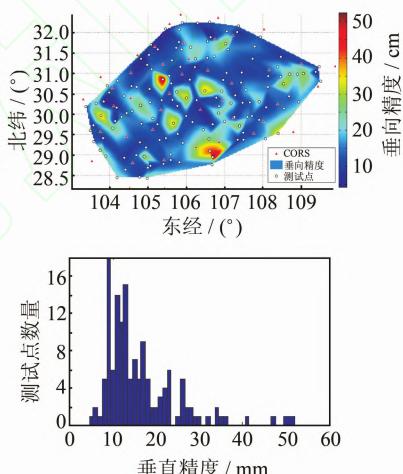


图 10 内符合精度均匀性分布图与各坐标分量精度直方图

Fig. 10 Uniform Distributions and Statistical Histograms of Inner Precision

显的对应关系,显示广域实时差分定位服务性能受网型结构影响显著。具体表现为网型结构因子差的区域,初始化时间较长,定位精度较低,有效外延距离较短。从川渝 CORS 网络 RTK 的整体服务性能来看,该网整体的网型结构良好(平均网型结构因子为 10.3)。

由于网络 RTK 服务性能还受流动站观测环境、数据通讯等因素共同影响,加上采样数量有限,使得对照关系中存在部分差异,但整体分布相互吻合,说明该网型结构因子是有效的,可以作为评价 CORS 站网型结构的指标;另外,该因子具有时效性,能够及时反映当前系统各参考站的大气改正质量,从而可以起到监测 CORS 网各服务单元实时服务性能的作用。

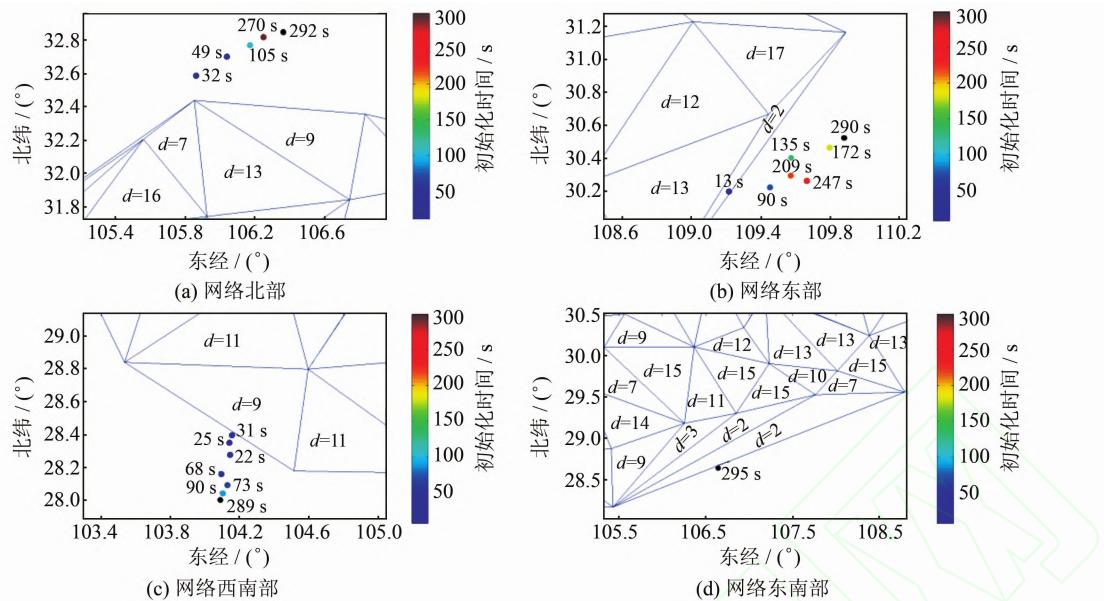


图 11 外延测试点初始化概略图

Fig. 11 Initialization Situation of Epitaxial Test Points

4 结论与建议

本文提出了评价 CORS 网络 RTK 服务单元网型结构因子的概念,该因子以先验方差小于 1 mm^2 时,各主参考站服务面积的总和乘以最小值与最大值的比值作为评价指标,集中考虑了参考站网络的空间分布和大气解算误差信息,并通过理论与实际网络测试分析证明了该指标可用于评价 CORS 网络的实时服务性能。相关研究和实践成果表明,平面内插模型可以满足 100 km 级的广域网络 RTK 差分定位服务需求,因此,该因子可适用于 100 km 级基线网的 CORS 网络站网型结构质量评价指标。

川渝 CORS 网络 RTK 服务性能测试结果表明,CORS 站网型结构是影响广域实时差分定位服务性能的主要因素之一,建立网型结构因子对于 CORS 网建设、网型优化和服务质量监测等均有着重要意义;受网型结构影响,网络东南部服务质量较差,可以通过增设 CORS 站或者共享其他 CORS 网以改善该区域的网型。

参 考 文 献

- [1] Chen Junyong, Dang Yamin. Recent Progress in Global Navigation of Satellite System[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2005, 30(2):9-12(陈俊勇,党亚民. 全球导航卫星系统的新进展[J]. 测绘科学, 2005,30(2):9-12)
- [2] Guo Jingjun, Wang Li, Zhang Peng. The Application and Expectation of CORS in International and China [J]. *GNSS World of China*, 2008, 33(1): 1-10(过静珺,王丽,张鹏. 国内外连续运行基准站网新进展和应用展望[J]. 全球定位系统, 2008, 33(1): 1-10)
- [3] Zhang Baogang. Building Current Status of Continuous Operating Reference Station in China[J]. *GNSS World*, 2011, 4 (S1):25-27(张保钢. 我国连续运行基准站网(CORS)的建设现状[J]. 导航天地, 2011, 4 (S1):25-27)
- [4] Li Chenggang, Huang Dingfa, Zhou Dongwei, et al. On Real-Time Precise Orbit Biases Correction Technique for Gps/Vrs Network[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(1): 96-99(李成钢, 黄丁发, 周东卫, 等. GPS/VRS 网络实时精密轨道改正算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 96-99)
- [5] Klobuchar J A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users[J]. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 1987 (3): 325-331
- [6] Hopfield H S. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(18): 4 487-4 499
- [7] Huang Dingfa, Li Chenggang, Wu Yaoqiang, et al. Study of the Real-Time Network Correction Generation Approach for GPS/VRS Technique[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(3): 256-261(黄丁发, 李成钢, 吴耀强, 等. GPS/VRS 实时网络改正数生成算法研究[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 256-261)
- [8] Li Chenggang, Huang Dingfa, Yuan Linguo, et al.

- [8] Ionospheric Biases Modeling Technique for GPS Multiple Reference Stations[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2005, 40(5): 610-615(李成钢, 黄丁发, 袁林果, 等. GPS 参考站网络的电离层延迟建模技术[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 610-615)
- [9] Li Chengang, Huang Dingfa, Zhou Letao, et al. Research on Tropospheric Delay Modeling Technology Based on GPS/VRS Reference Station Network [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(4): 29-31(李成钢, 黄丁发, 周乐韬, 等. GPS/VRS 参考站网络的对流层误差建模技术研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(4): 29-31)
- [10] Huang Dingfa, Zhou Letao, Li Chengang, et al. Development of Enhanced VRS Network Utility System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(2): 172-176(黄丁发, 周乐韬, 李成钢, 等. 增强虚拟参考站网络系统软件 (VENUS) 研制[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(2): 172-176)
- [11] Grejner-Brzezinska D A, Kashani I, Wielgosz P. On Accuracy and Reliability of Instantaneous Network RTK as a Function of Network Geometry,
- Station Separation, and Data Processing Strategy [J]. *GPS Solutions*, 2005, 9(3): 212-225
- [12] Jiang Chenguang, Zhu Youguo, Huang Qibei, et al. Impact of Network Structure on GPS Positioning Precision[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2005, 28(5): 13-14(姜晨光, 朱佑国, 黄奇璧, 等. 网型结构对 GPS 定位精度的影响[J]. 现代测绘, 2005, 28(5): 13-14)
- [13] Dai L, Han S, Wang J, et al. A Study on GPS/GLO-NASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning [C]. Proceedings of ION GPS, Salt Lake City, 2001
- [14] Wu Beiping. Principle and Mathematical Model Research for GPS Network RTK [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2003(吴北平. GPS 网络 RTK 定位原理与数学模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2003)
- [15] Wu Beiping, Li Zhenghang. Relations Between Interpolation Method and Linear Combination Method for GPS Network RTK[J]. *Journal of Geomatics*, 2003, 28(5): 27-28(吴北平, 李征航. GPS 网络 RTK 线性组合法与内插法关系的讨论[J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(5): 27-28)

Impacts of CORS Network Structure for Real-Time Differential Positioning Service Performance

ZHANG Xi¹ HUANG Dingfa¹ LIAO Hua² ZHOU Letao¹ ZHANG Deqiang¹

¹ School of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

² The Institute of Disaster Relief of the Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract: The structural unit is the basic cell for CORS network RTK service. Evaluating the service performance of each unit quantitatively has a positive effect when guiding and optimizing the CORS network. In this paper, the priori variance distribution of atmospheric corrections is analyzed with a linear interpolation model (LIM). An evaluation factor for the network structure is also proposed based on service performance of the structural unit. Five stations from CRTN net in U. S. (DOY 2010. 93) are tested to understand the different performances with different stations used as the master reference station. Finally, the relationship between network structure and service performance is analyzed in the Sichuan-Chongqing CORS (it has 82 triangle service units, with a service area covering 250,000 square kilometers). Experimental results show that the CORS network structure is one of the main factors that affect the service performance of wide-area real-time differential positioning. The proposed network structure factor can be used for evaluating the structure of a CORS network with 100 km level baseline length.

Key words: CORS; network RTK; service performance; network structure factor

First author: ZHANG Xi, PhD candidate, specializes in CORS network data processing and analysis. E-mail: zhangxi@my.swjtu.edu.cn

Corresponding author: HUANG Dingfa, PhD, professor. E-mail: dfhuang@swjtu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41374032; the National Hi-Tech Research and Development Program (863 Program), No. 2012AA12A209.