

Locata 定位系统整周模糊度在线解算

孟世杰, 苑克剑, 韩明

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘要: Locata 定位技术是全球导航卫星系统(GNSS)不可见或不能满足定位需求情况下的定位替代技术。到目前为止的许多研究已经证明, Locata 定位技术利用载波相位测量可以提供厘米甚至亚厘米级的定位精度。现在的 Locata 系统中, 其浮点载波相位整周模糊度是在已知精确坐标的位置上采用静态初始化方法得到的。但是在许多实际情况下, Locata 的载波相位整周模糊度需要在线解算, 在线解算 Locata 的载波相位整周模糊度过程中, 面对观测方程方法奇异等问题, 采用了一种基于 Tikhonov 正则化原理和 LAMBDA 搜索方法的在线解算算法。仿真分析表明这种方法可以正确得到 Locata 的载波整周模糊度解。

关键词: 定位系统; Locata; 全球导航卫星系统; 整周模糊度

中图分类号: O213.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)03-0077-05

Online Resolution of Integer Ambiguity for Locata Positioning System

MENG Shi-jie, YUAN Ke-jian, HAN Ming

(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Locata positioning technology is the substitute technology of GNSS in the invisible environment or unavailable situation. As is shown by many studies, centimeter-level positioning accuracy can be achieved with carrier phase measurement by Locata positioning technology. In Locata system, the float carrier phase ambiguity can be obtained at a precise coordinate point with the initializing method. However, in many cases, Locata carrier phase integer ambiguity needs to be resolved in real-time. In the real-time resolution of Locata carrier phase integer ambiguity, an online resolution method based on TIKHONOV regularization principle and LAMBDA searching method is used to solve the problems such as singular equation. Simulation analysis shows that correct integer ambiguity resolution can be obtained by using the method.

Key words: positioning system; Locata; GNSS; integer ambiguity

0 引言

全球导航卫星系统(GNSS)能够在世界范围内提供全天候的定位服务, 定位精度可以达到分米甚至厘米级。但是在高楼林立的城市市区和室内等环境下, GNSS 卫星信号完全接收不到或者严重衰减, GNSS 无法提供高精度定位服务, 不能满足人们的定位需求。澳大利亚 Locata 公司研制的 Locata 定位系统^[1]弥补了 GNSS 的这点不足。Locata 定位系统是一种新型定位系统, 可以用于“城市峡谷”、室内环境高精度定位、

大坝监测、矿业测量和机械控制等领域。Locata 系统工作在 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical) 频段, 通过 Locata 系统的陆基智能收发器 (LocataLite) 发射双频定位信号。Locata 公司经过许多实验^[2-3]证明 Locata 系统利用载波相位测量量可以实现厘米级的定位精度, 然而载波相位测量量的使用引入了新的问题——整周模糊度的解算。至今, Locata 大都在已知接收机精确坐标的位置上采用静态初始化的方法来实现整周模糊度的解算, 在实际应用中, 整周模糊度的在线解算会令这项技术更易被人们采用。

在最小二乘法的基础上利用用户端多个时刻的观测测量可以实现整周模糊度浮点解的在线解算。用户端在初始化时不断移动, 多个时刻的观测测量可以提供观测方程的空间多样性, 很多情况下空间多样性的不足

收稿日期: 2015-03-31

修回日期: 2015-05-11

基金项目: 中央高校科技业务项目(3122014P001)

作者简介: 孟世杰(1988—), 男, 河北衡水人, 硕士生, 研究方向为陆基导航、动目标检测与估计。

致使观测方程组的法矩阵出现奇异,导致最小二乘浮点解不可靠的情况。针对此问题,本文提出了基于TIKHONOV正则化原理和LAMBDA搜索算法来解算Locata载波相位整周模糊度的浮点解的解算方法。

以前的Locata定位系统中,Locata整周模糊度与GPS的不同被定义为浮点数,目前Locata公司正在对系统进行改善^[4],使Locata整周模糊度属性与GPS取得一致。本文借鉴了GPS的整周模糊度整数解的LAMBDA搜索算法,实现Locata整周模糊度的搜索,仿真算例表明了这种方法的准确性和有效性。

1 Locata 数学观测模型

Locata定位系统中Locata信号接收机(Locata Rover) A 对应于Locata信号发射器(LocataLite) i 的基本载波相位观测方程为

$$\varphi_A^i = \frac{1}{\lambda}(r_A^i + \tau_{\text{trop},A}^i + c \cdot \delta t_A) - N_A^i + \varepsilon_A^i \quad (1)$$

式中: φ_A^i 为Locata Rover A 相对于LocataLite i 的载波相位观测值; λ 为LocataLite信号波长; r_A^i 为Locata Rover A 与LocataLite i 之间的几何距离; $\tau_{\text{trop},A}^i$ 为信号对流层延时; c 为光速; δt_A 为Rover A 的时钟误差; N_A^i 为整周模糊度; ε_A^i 代表其他干扰误差。

Locata Rover A 对在同一时刻不同LocataLite之间的观测方程做单差,可以消除观测方程当中的接收机时钟误差。将LocataLite i 作为参考站,LocataLite j 为其他的“伪卫星”,LocataLite i 同LocataLite j 之间的单差定位方程为

$$\lambda \cdot \Delta\varphi_A^{ij} = \lambda \cdot (\varphi_A^i - \varphi_A^j) = \Delta r_A^{ij} + \Delta\tau_{\text{trop},A}^{ij} - \lambda \cdot N_A^{ij} + v \quad (2)$$

式中,几何距离的单差为

$$\Delta r_A^{ij} = \sqrt{(x_A - x_i)^2 + (y_A - y_i)^2 + (z_A - z_i)^2} - \sqrt{(x_A - x_j)^2 + (y_A - y_j)^2 + (z_A - z_j)^2}, \quad (3)$$

式中: (x_A, y_A, z_A) 为Locata Rover A 的位置坐标; (x_i, y_i, z_i) 和 (x_j, y_j, z_j) 分别为LocataLite i 和LocataLite j 的位置坐标; N_A^{ij} 为整周模糊度的单差。

2 Locata 整周模糊度的解算

2.1 模糊度的浮点解

当LocataNet由 $m+1$ 颗LocataLite组成时,Locata Rover A n 时刻的观测值可以得到 $n \times m \times 1$ 维的单差观测向量 \mathbf{z} 和 $(3n+m) \times 1$ 维的未知向量 \mathbf{x} 。 \mathbf{z} 的表达式为

$$\mathbf{z} = (\Delta\varphi_{A,t_1}^1, \Delta\varphi_{A,t_1}^2, \dots, \Delta\varphi_{A,t_1}^m, \Delta\varphi_{A,t_2}^1, \Delta\varphi_{A,t_2}^2, \dots, \Delta\varphi_{A,t_2}^m, \dots, \Delta\varphi_{A,t_n}^1, \Delta\varphi_{A,t_n}^2, \dots, \Delta\varphi_{A,t_n}^m)^T. \quad (4)$$

\mathbf{x} 的表达式为

$$\mathbf{x} = (x_{A,t_1}, y_{A,t_1}, z_{A,t_1}, \dots, x_{A,t_n}, y_{A,t_n}, z_{A,t_n}, N_A^1, N_A^2, N_A^3, \dots, N_A^m)^T. \quad (5)$$

未知向量 \mathbf{x} 可以被分为未知的位置信息 \mathbf{x}_c 和未知的单差整周模糊度 \mathbf{x}_N 两部分,即 \mathbf{x} 可以写为

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}_c \quad \mathbf{x}_N)^T.$$

由式(1)~式(5)得单差载波相位定位方程组为

$$\Delta\mathbf{z} = \mathbf{A}_{cc} \Delta\mathbf{x}_c + \mathbf{A}_{NN} \Delta\mathbf{x}_N + \mathbf{v}. \quad (6)$$

根据最小二乘法理论,式(6)可以改写为

$$\min_{\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_N} \|\Delta\mathbf{z} - \mathbf{A}_{cc} \Delta\mathbf{x}_c - \mathbf{A}_{NN} \Delta\mathbf{x}_N\|_{\mathbf{R}_{\Delta\mathbf{z}\Delta\mathbf{z}}}^2 \quad (7)$$

式中: $\Delta\mathbf{z}$ 为观测值与初始值的差; $\Delta\mathbf{x}_c$ 为坐标信息初始值的增量; $\Delta\mathbf{x}_N$ 为单差整周模糊度; \mathbf{A}_{NN} 和 \mathbf{A}_{cc} 分别为整周模糊度和位置坐标的雅克比矩阵; $\mathbf{R}_{\Delta\mathbf{z}\Delta\mathbf{z}}^{-1}$ 为加权最小二乘法的权系数矩阵,一般取测量值误差协方差矩阵逆矩阵的值^[5]。

已知坐标位置某时刻的雅克比矩阵为

$$\mathbf{A}_{cc,t_i} = \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial z_{t_i}^1(\mathbf{x})}{\partial x_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} & \left. \frac{\partial z_{t_i}^1(\mathbf{x})}{\partial y_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} & \left. \frac{\partial z_{t_i}^1(\mathbf{x})}{\partial z_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} \\ \left. \frac{\partial z_{t_i}^2(\mathbf{x})}{\partial x_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} & \left. \frac{\partial z_{t_i}^2(\mathbf{x})}{\partial y_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} & \left. \frac{\partial z_{t_i}^2(\mathbf{x})}{\partial z_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} \\ \left. \frac{\partial z_{t_i}^m(\mathbf{x})}{\partial x_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} & \left. \frac{\partial z_{t_i}^m(\mathbf{x})}{\partial y_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} & \left. \frac{\partial z_{t_i}^m(\mathbf{x})}{\partial z_{A,t_i}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

n 个观测时刻的雅克比矩阵为

$$\mathbf{A}_{cc} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{cc,t_1} & \mathbf{0}_{n \times 3} & \dots & \mathbf{0}_{n \times 3} \\ \mathbf{0}_{n \times 3} & \mathbf{A}_{cc,t_2} & \dots & \mathbf{0}_{n \times 3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{n \times 3} & \mathbf{0}_{n \times 3} & \mathbf{0}_{n \times 3} & \mathbf{A}_{cc,t_n} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

某时刻整周模糊度的雅克比矩阵为

$$\mathbf{A}_{NN,t_i} = -\lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

n 观测时刻的整周模糊度雅克比矩阵为

$$\mathbf{A}_{NN} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{NN,t_1} \\ \mathbf{A}_{NN,t_2} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{NN,t_n} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

由式(6),根据最小二乘(LS)原理,得到载波相位定位法方程

$$\mathbf{N}_0 \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Z} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{A} = (\mathbf{A}_{cc} \quad \mathbf{A}_{NN})$; $\hat{\mathbf{Y}} = (\Delta\mathbf{x}_c \quad \Delta\mathbf{x}_N)^T$; $\mathbf{N}_0 = \mathbf{A}^T \mathbf{R}_{\Delta\mathbf{z}\Delta\mathbf{z}}^{-1} \mathbf{A}$; $\mathbf{Z} = \mathbf{A}^T \mathbf{R}_{\Delta\mathbf{z}\Delta\mathbf{z}}^{-1} \Delta\mathbf{z}$ 。

最小二乘解为

$$\hat{Y} = (N_0^T N_0)^{-1} N_0^T Z \quad (13)$$

在观测时间短等因素的影响下, LocataLite 与 Locata Rover 之间的几何图形变化较小, Locata Rover 对各 LocataLite 之间的观测量具有较强的相关性, 严重不足的观测空间多样性, 造成法方程系数矩阵 N_0 严重病态。严重病态的法方程系数矩阵使法方程矩阵的求逆变得不稳定, 这将导致解算的模糊度的浮点解与准确解相差较大^[6], 不能利用最小二乘搜索获得整周模糊度的正确解。为了提高最小二乘法整周模糊度浮点解的准确性和稳定性, 削弱法方程病态性在 Locata 系统中对整周模糊度浮点解的影响, 本文将采用 TIKHONOV 正则化^[7]方法。

根据 TIKHONOV 正则化原理, 采用如下估计准则求解式(12)

$$\|N_0 \hat{Y} - Z\|^2 + \alpha \Omega(\hat{Y}) = \|N_0 \hat{Y} - Z\|^2 + \alpha \hat{Y}^T R \hat{Y} = \min \quad (14)$$

式中: α 是正则化参数; $\Omega(\hat{Y})$ 是稳定泛函; R 是正则化矩阵; $\|\cdot\|$ 表示欧式 2-范数。与一般 LS 原理相比, TIKHONOV 正则化原理增加了要求稳定泛函极小的约束, 有助于解算法方程病态问题。

式(14)求解的关键是确定正则化参数 α 和正则化矩阵 R , 根据文献[8]提出的方法, 多次试验得到

$$\alpha = 1, R = k \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中: k 为采样时刻数; $I_{3 \times 3}$ 为单位矩阵。

式(14)的实质是在分量对应部分附加微小约束, 从而达到克服法方程矩阵严重病态影响的目的。

2.2 模糊度的整数解搜索

整周模糊度的搜索算法主要有模糊度函数法、最小二乘搜索法 (LSAST)、最小二乘降相关搜索法 (LAMBDA) 和快速模糊度解算法 (FASF) 等。在单差观测方程组中, 需要解算的整周模糊度之间具有一定的相关性, 本文通过比较以上几种算法, 决定采用 LAMBDA 算法解决相关性数据搜索空间中正确整周模糊度整数解的搜索问题。LAMBDA 算法^[9]主要由 Z 变换^[10]和条件最小二乘搜索两部分组成。

整周模糊度的整数解搜索解决方案转换为

$$\min_N \|N - \hat{N}\|_{Q_N}^2 \quad (16)$$

的求解。 Q_N 的 Z 变换过程如下所述。

1) 对 Q_N 进行上三角变换。

对 Q_N 进行 UDU^T 分解

$$Q_N = U_1 D_{U_1} U_1^T \quad (17)$$

对 U_1 各元素取正后求逆为 Z_{U_1} 。

2) 上三角变换后的协方差矩阵为

$$Q_{Z_{U_1}} = Z_{U_1} Q_N Z_{U_1}^T \quad (18)$$

3) 对 $Q_{Z_{U_1}}$ 进行下三角变换。

对 $Q_{Z_{U_1}}$ 进行 $L D L^T$ 分解

$$Q_{Z_{U_1}} = L_1 D_{L_1} L_1^T \quad (19)$$

对 L_1 各元素取正后求逆为 Z_{L_1} 。

4) 下三角变换后的协方差矩阵为

$$Q_{Z_{L_1}} = Z_{L_1} Q_{Z_{U_1}} Z_{L_1}^T \quad (20)$$

重复上述过程, 直到经过 k 次迭代后得到的三角矩阵是单位矩阵为止, 则得到整数高斯变换矩阵

$$Z = \prod_{i=k}^1 Z_{L_i} Z_{U_i} \quad (21)$$

浮点解的整数变换为

$$Z_N = Z \hat{N} \quad (22)$$

协方差矩阵变换为

$$Z_{Q_N} = Z Q_N Z \quad (23)$$

变换后的搜索空间为

$$(Z_N - Z_N) Z_{Q_N}^{-1} (Z_N - Z_N)^T < \chi^2 \quad (24)$$

Z 变换的目的是将协方差矩阵对角化。Z 变换后利用条件最小二乘搜索即可获得模糊度的整数解。

3 实验仿真结果及分析

实验仿真采用已经建立的 Locata 系统^[11], 实验 LocataNet 由 5 个 LocataLites 组成, 其二维坐标分布和实景分布见图 1 和图 2, LocataLites 的准确坐标见表 1。载波相位的观测噪声是均值为零、方差为 0.025 周的高斯白噪声; Locata Rover 与 LocataLite 间的时钟误差是均值为 9 ns、方差为 2 的高斯噪声。在本系统中, Locata Rover 天线对视线信号具有良好的跟踪特性, 故本次实验忽略了多径效应对系统的影响。伪距定位结果误差能够达到分米级, 作为初始值将不会对整周模糊度的求解造成影响。

表 1 LocataLite 的准确坐标

Table 1 Exact coordinate of LocataLite

LocataLite	东西方向 X/m	南北方向 Y/m	高度/m
Master	2	2	5.5
LocataLite 1	90	-25	10
LocataLite 2	-90	25	3
LocataLite 3	15	35	6
LocataLite 4	-15	-35	5

实验中取 8 个连续时刻的观测数据作为实验数据, 以此来解算未知单差整周模糊度, 目标的运动轨迹见图 3。根据最小二乘得到法方程的系数矩阵的条件数为 10^{13} , 属于严重病态矩阵。利用 TIKHONOV 正则化原理和 LAMBDA 搜索算法解算单差整周模糊度解。TIKHONOV 正则化前后, 法方程系数矩阵的特征值对比如图 4 所示, 由图 4 可看出, TIKHONOV 正则化将法

矩阵远远小于零的特征值进行了调整,以此来削弱矩阵的病态性。

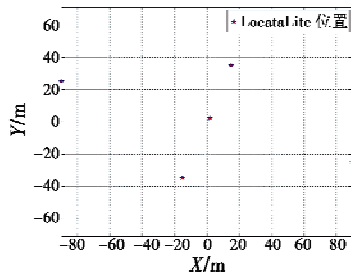


图1 LocataLite 二维布局

Fig.1 Two dimensional layout of LocataLite

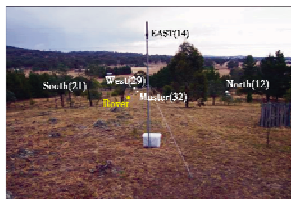


图2 LocataNet 实景布局

Fig.2 LocataNet virtual layout

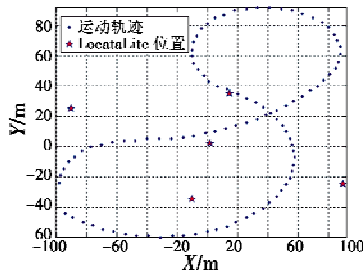


图3 目标运动轨迹

Fig.3 Target trajectory

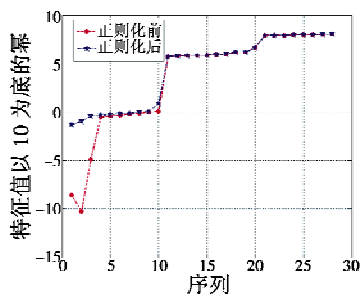


图4 病态矩阵正则化前后特征值比较

Fig.4 Eigenvalues of ill-conditioned matrix before and after regularization

LAMBDA 与 TIKHONOV 正则化方法的浮点解与整周搜索结果对比见表2。

由表2可以看出,法方程系数矩阵的严重病态性导致 LAMBDA 的浮点解严重偏离真实值,由此搜索得到的整周模糊度解不可靠;利用 TIKHONOV 正则化原理得到的浮点解非常接近真实值,通过 LAMBDA 算法搜索可以得到正确的整周模糊度解。

表2 两种方法的整周解

Table 2 Ambiguity solution of two methods

单差整周	LAMBDA 浮点解	LAMBDA 模糊度解	正则化后的浮点解	正则化后的整周模糊度解	真值
N_{A}^{15}	664.4345	660	503.1976	503	503
N_{A}^{25}	-1531.34	-1554	-84.6310	-85	-85
N_{A}^{35}	236.1951	237	265.0211	265	265
N_{A}^{45}	-332.2644	-336	-294.9601	-295	-295

文献[12]中提出了EKF方法,EKF方法由于在某时刻的观测方程数量小于未知量的个数,因此EKF方法的精确度严重依赖状态方程的准确性。在目标做匀速运动的条件下,利用伪距对初始信息进行初始化,相同条件下同时利用本文方法和EKF方法对目标进行定位跟踪,结果如图5~图8所示。

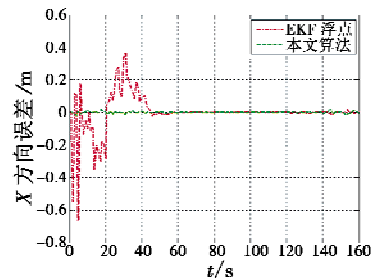


图5 X轴误差对比

Fig.5 Contrast of X-axis error

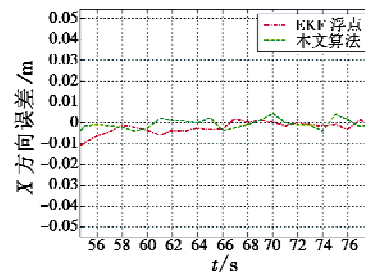


图6 X轴稳定后的误差对比

Fig.6 Contrast of stabilized X-axis error

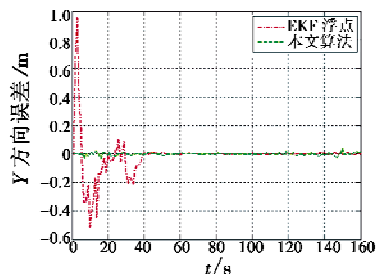


图7 Y轴误差对比

Fig.7 Contrast of Y-axis error

在实验环境中,通过理论和实验可知,LAMBDA + 正则化方法可以利用4个连续时刻的观测量来实现整周模糊度的解算和目标定位,而通过对比上面两组图可以看出,EKF方法的收敛至少需要40个时刻的观测量,且收敛段内的定位误差明显大于LAMBDA + 正则化方

法;在算法收敛后两种方法的定位精度不相上下。

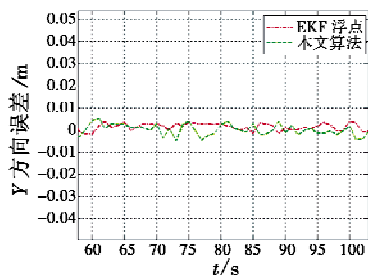


图8 Y轴稳定后的误差对比

Fig. 8 Contrast of stabilized Y-axis error

4 结束语

本文详细介绍了 Locata 系统整周模糊度的 TIKHONOV 正则化原理 + LAMBDA 算法。仿真表明,针对 Locata 单差法方程系数矩阵提出的 TIKHONOV 正则化原理可以有效解决最小二乘浮点解不可靠的问题。利用 LAMBDA 搜索算法对浮点解空间进行搜索可以得到 Locata 整周模糊度的正确值,与常规的最小二乘法相比,提高了整周模糊度解的成功率。

参考文献

- [1] MONTILLET J P, MENG X, ROBERTS G W. Achieving centimeter level positioning accuracy in urban canyons with locata technology [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2007, 6(2):158-165.
- [2] BARNES J, RIZOS C, KANLI M. A positioning technology for classically difficult GNSS environments from Locata [C]//Position, Location, and Navigation Symposium, 2006 IEEE/ION, San Diego, 2006:715-721.
- [3] RIZOS C. Locata: a positioning system for indoor and outdoor applications where GNSS does not work [C]//The 18th Association of Public Authority Surveyors Conference (APA2013), 2013:73-83.
- [4] BERTSCH J, CHOUDHURY M, RIZOS C. On-the-fly ambiguity resolution for Locata [C]//IGNSS Symposium on International Global Navigation Satellite Systems Society, 2009:232-243.
- [5] 谢岗. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京:电子工业出版社, 2009:183-185. (XIE G. GPS receiver and design principle [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009:183-185.)
- [6] 郭秋英, 胡振琪. GPS 快速定位方程的病态性对整周模糊度及基线解的影响 [J]. 测绘科学, 2007, 32(3):42-44. (GUO Q Y, HU Z Q. The impact of GPS rapid positioning ill equation for ambiguity and baseline solution [J]. Surveying and Mapping, 2007, 32(3):42-44.)
- [7] 王振杰, 耿吉坤, 柳林涛. 单频 GPS 快速定位中病态问题的解法研究 [J]. 测绘学报, 2005, 34(3):196-201. (WANG Z J, OU J K, LIU L T. Method of single frequency GPS rapid positioning morbid problems [J]. Surveying Education, 2005, 34(3):196-201.)
- [8] 孔令杰, 黄观文. 基于 Tikhonov 正则化的短基线单历元模糊度解算方法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2):148-151. (KONG L J, HUANG G W. Short baseline single epoch ambiguity resolution method based on Tikhonov regularization [J]. Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2):148-151.)
- [9] TENUISSEN P. The least squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation [J]. Journal of Geodesy, 1995, 70(1):65-82.
- [10] TENUISSEN P. Least-squares estimation of the integer GPS ambiguity, invited lecture in section IV theory and methodology [C]//IAG General Meeting, Section IV Theory and Methodology, Beijing, 1993:26-34.
- [11] BARNES J, RIZOS C, WANG J. LocataNet: the positioning technology of the future? [C]//The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services, Melbourne, 2003:22-25.
- [12] RIZOS C, ROBERTS G. Experimental results of locata: a high accuracy indoor positioning system [C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2010:1-7.

电光与控制入选 RCCSE 中国核心学术期刊 A

2015年6月8日,接武汉大学中国科学评价研究中心通知,《电光与控制》入选2015-2016“RCCSE中国核心学术期刊(A)”。此次入选航空航天类核心期刊的共计15种,《电光与控制》排名第8位,相比上一届提前4个名次,并从核心期刊A-级上升至A级,《电光与控制》已第4次入围RCCSE期刊评选。