

基于北斗卫星的 GPS 轨迹数据异常双频定位方法

李俊杰, 陈武喝

(华南理工大学 物理与光电学院, 广州 510640)

摘要: 当前 GPS 轨迹定位方法均采用单频定位, 在数据异常情况下不能保障定位精度, 故此提出一种基于北斗卫星的 GPS 轨迹数据双频定位方法研究; 先基于北斗卫星的定位原理建立用于空间几何距离测量和地面监测点精准定位的数学模型, 并确定出伪距和载波相位的观测值的权重; 利用北斗卫星确定出标的物的空间几何距离, 及空间位置信息; 由于定位系统本身及大气电离层的影响, 得到空间定位信息内包含有误差项, 基于北斗卫星系统可以修正 GPS 轨迹误差项和异常数据, 实现对标的物位置信息的精准定位; 测试数据表明提出定位方法的精度更高, 综合定位偏差值为 0.56%, 同时定位误差的均值和方差控制表现更好。

关键词: 北斗卫星; GPS 轨迹数据; 双频定位; 电离层

Research on Abnormal Dual-frequency Positioning Method of GPS Trajectory Data Based on Beidou Satellite

Li Junjie, Chen Wuhe

(Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The current GPS trajectory positioning methods all use single-frequency positioning, which cannot guarantee the positioning accuracy under the abnormal data. Therefore, a research on the dual-frequency positioning method of GPS trajectory data based on Beidou satellite is proposed. Firstly, based on the positioning principle of Beidou satellite, a mathematical model for spatial geometric distance measurement and accurate positioning of ground monitoring points is established, and the weights of the pseudo range and carrier phase observation values are determined. The Beidou satellite is used to determine the spatial geometric distance of the object and spatial position information; due to the influence of the positioning system itself and the atmospheric ionosphere, the spatial positioning information contains error terms. Based on the Beidou satellite system, the GPS trajectory error term and abnormal data can be corrected to achieve accurate positioning of the target position information. The test data shows that the accuracy of the proposed positioning method is higher, the comprehensive positioning deviation is 0.56%, and the mean and variance control of the positioning error is better.

Keywords: Beidou satellite; GPS trajectory data; dual-frequency positioning; ionosphere

0 引言

GPS 全球定位系统是一种由美国主导建立的卫星导航定位系统^[1], 利用 GPS 导航定位系统可以实现全球范围内的三维定向导航和移动轨迹数据提取^[2-3]。此外, 基于 GPS 导航系统全球各国的用户还能够在海、陆、空立体范围内, 实现精确的卫星定位导航和测距^[4-5], 随着全球互联网及通信产业的进一步发展, GPS 全球定位系统的应用范围还会持续扩大。但现有单频 GPS 控制模式下提取的轨迹数据精度较低, 移动轨迹数据集存在异常值, 给总体的卫星定位活动带来诸多不便, 甚至会由于定位不准确给用户带来严重的经济损失^[6-8]。针对现有 GPS 定位系统存在的不足提出一种基于北斗卫星的 GPS 轨迹数据异常双频定位方法研究, 利用双频定位数学模型确定地面标的物的空间几何距离, 再调整定位误差提高系统的定位精度。北斗卫星定位

系统是与美国、俄罗斯及欧盟全球卫星定位系统齐名的全球范围的卫星导航服务机构, 经过近二十年的完善和发展北斗卫星导航系统的定位精度和测量精度得到了本质上的提高, 尤其是在双频定位精度方面相对于传统模式更有优势。北斗卫星导航系统的播发两个频点的卫星通信信号具体包括 1 561.098 MHz 和 1 268.52 MHz, 由于双频定位系统能够获得更高的冗余定位数据信息, 因而显著提高了地面物体空间定位的精度^[9-10], 进而识别出 GPS 轨迹数据集合中的错误点和奇异点。

1 GPS 轨迹数据双频定位数学模型

目前北斗卫星导航系统的主要服务地区为亚太地区, 能够为覆盖区域范围内的用户提供全天候的高效定位、导航和授时服务。北斗卫星导航系统的定位服务具体包括无源定位和有源定位两种, 无源定位系统兼具定位导航功能; 而有源定位能够提高半径 20 m 方位内的高精度的定位服务。卫星定位系统能够为用户提供精密授时服务, 授时的准确度可以达到 20 ns, 北斗系统在载体运动速度精确测量

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-03-05。

作者简介: 李俊杰(1993-), 男, 广东佛山人, 在读研究生, 主要从事电离层电子密度总含量的监测与分析方向的研究。

方面相对于传统的单频定位系统也具有显著的优势, 可以准确地捕捉到标的物在地面的运动轨迹, 总体路径偏差小于 0.01%。北斗导航系统的基本结构由用户端、空间端和地面信号接收端等几个关键的部分组成, 北斗空间端由 30 颗非静态轨道卫星和 5 颗静态轨道卫星组成; 地面端的设施设置较为灵活, 可以按照用户需求布置地面信号控制站及数据传输检测站等; 而用户端可以通过局域的王LAN 连接 PC 端、手机终端, 或直接开通移动网络流量实现准确的 GPS 轨迹数据集合的定位。目前北斗卫星系统的主要服务地区还以亚太地区为主, 预计在五年时间内将为全球范围内的其他国家提供准确的空间定位、导航和授时服务。

应用我国北斗卫星系统实施的 GPS 双频异常数据轨迹定位方法, 从本质上说也是依靠精密单点定位系统的距离观测值和载波相位设定, 并进行空间距离的测定和定位导航误差的调整。因此本文在研究北斗卫星定位的基础上, 需要基于 GPS 轨迹数据集合建立双频异常数据识别定位数学模型, 并按照设计的模型确定出标定物的空间几何距离, 利用双频定位的方式确定出定位测量的误差, 提高空间定位的精度。双频组合定位模式下识别出了频率与电离层误差项之间的关系, 利用伪距离数据组合方程剔除定位过程中的误差项。基于北斗卫星系统的电离层误差有时会超过 50 m, 在单频定位模式下这种误差不可避免; 而采用北斗卫星定位系统后能够提高标的物定位的精度, 并且双频定位方式的误差项会更低, 能够滤除 95% 以上的大气电离层误差。在北斗定位系统中双频定位的精度要显著优于传统的单频定位模式, 制约单点定位的一个重要原因就是定位导航过程中存在的大气电离层延迟误差。在北斗卫星导航系统控制下, 通过双频的定位模式就能够降低误差的干扰, 基于北斗卫星的双频定位数学模型可以表示为:

$$\begin{cases} D_i = \frac{g_1^2}{g_1^2 - g_2^2} D_1 - \frac{g_1^2}{g_1^2 - g_2^2} D_1 = \\ \rho + c\zeta t + l + \varepsilon \\ a_i = \frac{g_1^2}{g_1^2 - g_2^2} a_1 - \frac{g_1^2}{g_1^2 - g_2^2} a_1 = \\ \rho + c\zeta t + l - \lambda n_i + \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

其中: D_i 和 a_i 分别为双频定位的伪距离及载波观测值, ζ 为系统内置的时间差, l 对大气流层的延迟分量, λ 和 n_i 分别为信号观测值的波长和模糊周期, ρ 和 c 分别为数学模型的常数项。双频定位模式下消除了大气电离层对 GPS 信号的干扰, 并有效降低了原始观测值的环境噪声。双频定位解算中除了要考虑到总体数学模型的同时, 还需要关注 GPS 轨迹数据集合观测值随机控制模型, 因为观测值的伪距、载波、协方差等因素都与随机控制模型相关, 在后续的空间几何距离测量及定位误差的控制中, 不同的精度值之间有所差别, 这种差别也是影响标的物 GPS 精确定位精度的一个重要因素。由于不同观测值对于最终的定位准确率目标所起到的作用不同, 还需要估算不同影响因素间的

权重比例关系。当前大多数接收系统载波信号的观测值之间都不相关, 在实际的定位和测量中, 必须明确各个观测值之间的权重比例, 北斗卫星导航系统下采用高度角权重定位法明确观测值的重要性, 具体的算法如下所示:

$$\begin{cases} \lambda_{D(i)}^2 = \frac{\lambda_{D_0}^2}{\sin^2 \beta} \\ \lambda_{a(i)}^2 = \frac{\lambda_{a_0}^2}{\sin^2 \beta} \end{cases} \quad (2)$$

其中: β 北斗卫星的高度角, $\lambda_{D(i)}^2$ 和 $\lambda_{a(i)}^2$ 分别为伪距和载波相位的观测值, $\lambda_{D_0}^2$ 和 $\lambda_{a_0}^2$ 为载波相位的初始值, 取值区间分别为 $[-1, +1]$ m, $[-1, +1]$ cm, 此时观测值的权重矩阵 C 可以表示为:

$$C = \begin{bmatrix} \lambda_{D(1)}^2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_{a(1)}^2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_{D(n)}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_{a(n)}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

伪距和载波相位的观测值的权重确定后, 基于北斗卫星双频定位数学模型开始进入工作状态, 先利用该定位数学模型确定出标的物的空间几何距离, 并得到运动物体的 GPS 轨迹数据集合, 再消除双频定位中产生的误差项和异常数据的干扰, 就能够实现对地面物体的精准定位。

2 基于北斗卫星的空间几何距离定位与测量

GPS 轨迹数据双频定位数学模型的建立是测量标的物的空间几何距离, 并提高对物体定位精准度的基础条件之一, 但在空间定位前需要对提取原始的观测值数据进行预处理, 具体的预处理过程包括剔除粗差, 修复周跳, 对载波数据进行相位平滑处理等, 对原始的观测值数据的预处理效果将关系到最终定位的精度。双频 GPS 轨迹定位与单频定位存在明显的不同, 双频轨迹定位系统采用了双频的伪距值和载波值, 四组观测值在定位精度的控制方面更有优势。在空间几何距离的定位控制中, 伪距观测值的重要性要低于相位的观测值, 在权重赋值方面应保持合适的比例, 适当提高相位观测值的比重。确定四组观测值的权重比例后, 要历经较长周期的数据平滑计算, 大幅度地提高空间几何距离的定位与测量精度。经过平滑处理的观测值还有可能存在小周跳, 重复上述过程直到去除异常数据的干扰, 数据预处理的基本流程如图 1 所示。GPS 用户的三维行进轨迹数据由无数个空间的位置点 P_i 组成, 三维位置

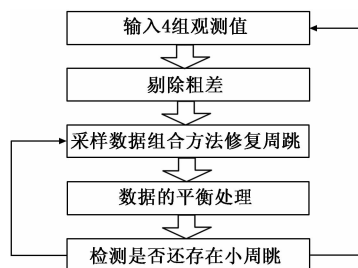


图 1 原始 GPS 轨迹数据异常观测值的预处理

信息 $v = (x_v, y_v, z_v)$, 其中时钟差为 λn_i , 此时空间卫星到 GPS 用户之间的空间几何距离 d_i 可以表示为:

$$d_i = L_i - v + \epsilon_i + c\zeta t \quad (4)$$

式中, L_i 为第 i 颗卫星的空间位置信息表示为 (x_i, y_i, z_i) , 此时空间几何距离 d_i 的求解示意图, 如图 2 所示:

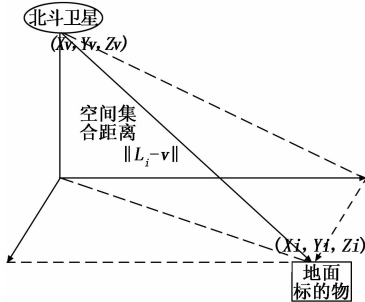


图 2 空间几何距离定位示意图

如果假设北斗卫星的数量为 n , 那么基于北斗卫星的 GPS 轨迹数据定位过程可以被描述为一个四元线性方程组的求解过程:

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(x_1 - x_v)^2 + (y_1 - y_v)^2 + (z_1 - z_v)^2} + c\zeta t_1 \\ d_2 &= \sqrt{(x_2 - x_v)^2 + (y_2 - y_v)^2 + (z_2 - z_v)^2} + c\zeta t_2 \\ &\dots\dots \\ d_n &= \sqrt{(x_n - x_v)^2 + (y_n - y_v)^2 + (z_n - z_v)^2} + c\zeta t_n \end{aligned} \quad (5)$$

方程组中每一个空间几何距离方程都与一个空间位置点 P_i 相对应, 并代表一个伪距测量值。地面标的物的空间位置信息能够从导航数据信息中提取出来。求解联立方程组的过程中, 利用空间三角学的理论知识基础就可以求出北斗卫星到信号接收系统之间的距离, 进而定位出用户的空间位置信息。

3 定位误差控制与 GPS 轨迹数据双频定位的实现

空间距离测量和载波相位测量时由于北斗卫星的星历误差、卫星时钟误差及大气层中电离层的影响, 会产生大量的定位数据误差影响定位精度。因此要实现 GPS 轨迹异常数据的精确定位必须将这些误差控制在可以接受的范围之内, 定位误差按照大小和类别区分可以分为随机误差和系统误差两个类别。GPS 轨迹数据定位时的随机误差变化快、影响小, 只需要掌握随机误差的均值变化、方差变化及频谱变化的统计特征和规律就可以降低其对定位过程的影响。而来自于北斗卫星导航系统内部的系统误差、接收终端的误差和传输路径中的误差, 会对定位的精度产生关键的影响, 因此需要在分析系统误差类别的基础上, 降低定位中系统误差的不利影响。

北斗卫星在围绕地球运行中除了受到地球引力、大气湍流的影响之外还会受到各种不同类型的宇宙摄动力的干扰, 会产生卫星星历的误差。星历时钟与地面的标准时间系统存在一定差异, 因为每一颗卫星在频率和时间上存在偏差, 最大的误差等级到底千米级, 如果不对这些误差进

行调整会严重影响定位的精度。在单点卫星定位中会采用精密时钟产品对卫星进行定位, 每隔一段时间就定位一次时钟差, 利用地面导航接收北斗卫星系统的测量距离信息。在基于双频精密定位系统的工作过程中, 不同系列的卫星会与天线中心的距离产生偏差, 这种误差是由于天线相位中心与卫星质心的不重合而导致的, 这种误差可以通过 IGS 提供的 PCO 修正文件进行改正。大气层中的电离层由大气电离子和电子构成, 当北斗卫星传递的电磁波信号穿过电离层时, 受到电子和大气电子的影响发生折射进而影响传播的速度和方向, 由于大气电离层造成的 GPS 轨迹数据误差会超过 1 km, 使通过电力层的真实值延迟超过 30%。在基于北斗卫星的异常数据双频定位中, 通常会选择利用双频线性组合消除电离层对定位数据真实性的影响, 滤除大气电离层对定位准确性的一阶影响后, 剩余数据集就可以满足 GPS 轨迹数据定位的高阶要求。消除大气电力层的误差还可以采取以下两种方式, 其中一种是采用半合修正法调整载波相位的观测值与空间几何距离的观测值; 另一种方式是建立一种高精度的电力层控制模型, 利用电离层模型网络消除大气电离层对 GPS 轨迹数据的干扰。北斗卫星的运行受到地球引力的影响, 并围绕地球做周期性的转动, 因此北斗卫星所提供的各种空间运行参数及 GPS 轨迹运行数据, 受制于北斗卫星与地球的相对运行速度和位置关系。消除北斗卫星空间定位中产生的系统误差, 可以通过修正相对地球自转模式的方式实现, 北斗卫星在空间定位中的选用的相对坐标系为 WGS-84 和 CGCS2000 型坐标系, 这两种坐标系均为以地心为参照物的坐标系统, 坐标系的中心随地心相对位置的变化而变化, 基于地球自转模式而进行 GPS 轨迹数据误差修正可以表示为:

$$\Delta d = \frac{\omega}{v_0} \quad (6)$$

$[y_i(x_0 - x_i) - x_i(z_0 - z_i) - z(y_0 - y_i)]$ 其中: (x_0, y_0, z_0) 表示被测量标的物的初始坐标, ω 为地球的自转速度, v_0 大气环境下信号传播速度。如果用 θ 表示北斗卫星位置定位是转动的角度, T 为信号传播周期, 那么 $\theta = \omega \times T$, 如果 (x', y', z') 为修正后的坐标系:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (7)$$

基于北斗卫星系统修正 GPS 轨迹异常数据的随机误差和系统误差后, 空间几何距离的测量及双频定位的精度能够明显提高, 能够更好地满足用户的空间定位需求。

4 定位测试

4.1 北斗卫星空间布置

为得到更高的 GPS 双频定位精度本文共模拟了 3 颗北斗卫星对标的物进行空间集合定位, 在广州进行 1 Hz 更新频率, 且基线长度为 4 km, 采用卫星信号卫星定位接收机校准仪, 接收卫星信号。利用电台进行数据通讯。信号接

收器如图 3 所示。



图 3 卫星信号接收器

为了介绍卫星与标的物的位置关系采用 3 维简图进行介绍, 如图 4 所示。

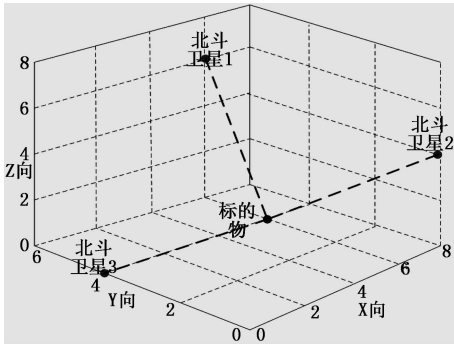


图 4 基本北斗卫星双频定位测试环境 3D 简图

定位测试实验中的 3 颗模拟北斗卫星的空间坐标及标的物的空间坐标设置, 如表 1 所示。

表 1 北斗卫星及标的物的空间坐标设置

内容	坐标值
标的物	(6,4,2)
北斗卫星 1	(6,0,6)
北斗卫星 2	(8,0,4)
北斗卫星 3	(0,4,0)

4.2 定位精度测试

在 8 km×8.5 km 的区域以汽车为标的物并分别采用传统基于单频 GPS 定位方法和文中提出的基于北斗卫星的双频定位方法的定位跟踪效果, 首先给出传统定位方法下对标的物的定位点分布情况, 如图 5 所示。

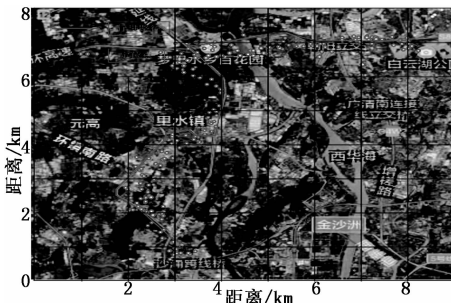


图 5 传统单频定位方法下定位点的分布情况

如图 5 所示, 在初始阶段传统单频定位方法出现了较大的偏差, 随着定位时间的增加定位的准确率有所改善, 经过统计分析综合的定位偏差率为 13.26%。在同等的条件下, 基于北斗卫星双频定位系统进行标的物的跟踪和定位, 定位结果如 6 所示。

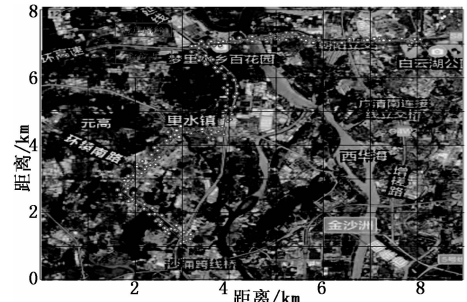


图 6 基于北斗卫星的双频跟踪定位效果

而在基于北斗卫星系统的双频定位方法控制下定位点都均匀地分布在行进路径的两侧, 经过对定位点经纬度的统计分析, 综合定位偏差为 0.56%, 定位的准确率得到了大幅度的提高和改善。最后本文对比分析了不同定位次数下两种定位方法的误差均值与方差表现, 统计结果如表 2 所示。

表 2 不同定位次数下的定位误差结果对比

定位次数	定位误差的均值		定位误差的方差	
	单频 GPS 定位方法	基于北斗的双频定位	单频 GPS 定位方法	基于北斗的双频定位
20	0.894 2	0.526 3	0.195 2	0.185 2
55	0.882 5	0.521 3	0.185 2	0.165 8
125	0.875 2	0.501 5	0.183 4	0.154 6
400	0.852 4	0.501 2	0.177 4	0.145 2
520	0.792 5	0.492 5	0.165 8	0.136 5
730	0.774 8	0.485 2	0.162 3	0.125 2
1 125	0.685 1	0.481 3	0.159 8	0.122 5
1 365	0.585 2	0.475 1	0.154 7	0.111 6
1 500	0.556 9	0.461 5	0.145 8	0.102 3
1 770	0.548 4	0.460 3	0.133 6	0.100 1
1 820	0.521 4	0.452 1	0.125 2	0.095 2
2 000	0.502 6	0.450 2	0.133 2	0.086 3

随着定位次数增加能够降低对标的行进路径误差均值和方差的控制, 均值的变化越稳定则表明定位的精度越高; 而定位误差的方差值越低, 则证明 GPS 轨迹数据越稳定, 表中的统计数据随着空间定位点密集程度的不断提高, 文中基于北斗卫星的 GPS 轨迹数据定位误差的均值变化平稳, 而定位误差的方差值持续地降低, 并逐渐地趋近于零。测试实验的数据统计结果证明了基于北斗卫星的双频定位方法的精度更高, 误差控制的表现更好。

5 结束语

近二十年全球卫星定位技术获得了快速的发展,其中高精度定位技术的应用范围越来越广,对于定位技术的实用性、准确要求也越来越高。传统单频定位技术控制下无法及时地为用户提供高精度的定位和测量服务,这主要是由于定位导航信号的传播环境十分复杂,易受到系统环境噪声、大气湍流及电离层的影响定位精度明显下降。地面信号接收系统采集到的传输信号十分微弱,因此在空间定位的准确性和时效性方面无法得到有效保证,而且采集到的 GPS 轨迹数据的异常值也较多。针对单频定位系统的缺点,本文基于北斗卫星提出了一种双频定位方法研究,利用空间的伪卫星系统辅助定位,既优化空间定位系统的总体布局,也能够准确地控制定位信号中空间距离及载波相位值,提高卫星定位的精度。随着我国北斗卫星定位系统的发展,将会为全球各国提供更为精确的双频及多频空间定位服务。

参考文献:

[1] 刘 成,郭树人,李 芳. 卫星导航定位卡尔曼滤波时延平滑方法研究 [J]. 测绘通报, 2017 (11): 9-13.

[4] Jain V, Seung H S. Natural image denoising with convolutional networks [A]. Proceedings of the 22nd Annual Conference on Neural Information Processing Systems [C]. Vancouver, Canada, 2008: 769-776

[5] Lecun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86 (11): 2278-2324.

[6] Sutton R S, Barto A G. Introduction to reinforcement learning [M]. Cambridge: MIT Press, 1998.

[7] Mnih V. Human-level control through deep reinforcement learning [J]. Nature, 2015, 518 (7540): 529-533.

[8] Silver D, Huang A, Madison C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search [J]. Nature, 2016, 529 (7587): 484-489.

[9] Lillicrap T P, Hunt J J, Pritzel A, et al. Continuous Control with deep reinforcement learning [J]. Computer Science, 2016, 8 (6): A187.

[10] Duan Y, Chen X, Houthoofd R, et al. Benchmarking deep reinforcement learning for continuous control [A]. Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning [C]. New York, USA, 2016: 1329-1338.

[11] Andrychowicz M, Denil M, Gomez S, et al. Learning to learn

[2] 樊庆富,张 磊,刘磊军,等. 基于偏移量计算的在线 GPS 轨迹数据压缩 [J]. 计算机工程与应用, 2017, 53 (8): 254-259.

[3] 肖光年,隗志才,张春勤. 基于贝叶斯网络和 GPS 轨迹数据的出行方式识别 [J]. 统计与决策, 2017 (6): 75-79.

[4] 罗青山,郭唐永,姚运生. 适用于立方体卫星的激光测距合作目标 [J]. 光学精密工程, 2017, 25 (7): 1705-1713.

[5] 战 杰,孙贵新. 双频 GPS 载波相位相对定位精度分析与评估 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (16): 70-72.

[6] 王甫红,王 军,郭 磊. NeQuick2 模型在星载单频 GPS 实时定轨中的应用 [J]. 大地测量与地球动力学, 2018 (4).

[7] 陆博文. 一种基于单频 GPS 接收机的自迭代定位算法 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42 (9): 125-128.

[8] 胡 弦,郑 福,梅懿芳,等. 区域电离层建模的单频伪距定位验证 [J]. 测绘科学, 2017, 42 (4): 43-47.

[9] 李 慧,赵 琳,李 亮,等. 一种双频非组合实时精密定位方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (11): 122-129.

[10] 张 勇,李飞腾,王昱洁. 基于 KDDA 和 SFLA-LSSVR 算法的 WLAN 室内定位算法 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54 (5): 979-985.

(上接第 221 页)

by gradient descent by gradient descent [A]. Proceedings of the Conference on Neural Information Processing Systems [C]. Barcelona, Spain, 2016: 3981-3989.

[12] Caicedo J C, Lazebnik S. Active object localization with deep reinforcement learning [A]. Proceedings of the International Conference on Computer Vision [C]. Santiago, Chile, 2015: 2488-2496.

[13] Sutton R S, Mcallester D A, Singh S P, et al. Policy gradient methods for reinforcement learning with function approximation [A]. Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems [C]. Dever. USA. 1999: 1057-1063.

[14] Watkins C J C H, Dayan P. Q-learning [J]. Machine Learning, 1992: 279-292.

[15] Watkins C J C H. Learning from delayed rewards [J]. Robotics & Autonomous Systems, 1989, 15 (4): 233-235.

[16] Gao Y, Chen S F, Lu X. Research on reinforcement learning technology: a review [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30 (1): 86-100.

[17] Ji D Y, Wilson M A. Coordinated memory replay in the visual cortex and hippocampus during sleep [J]. Nature - neuroscience, 2007, 10 (1): 100-107.