

基于高性能 ARM 的不同 GPS 定位算法的性能分析与对比

周 彬 李荣冰 刘建业 刘 浩

(南京航空航天大学导航研究中心 南京 210006)

摘 要: 近年来, GPS 技术和嵌入式技术在导航、定位、测量等领域都有良好的应用。为了对比分析 3 种常用的定位算法(最小二乘法、加权最小二乘法、卡尔曼滤波)的性能优缺点, 针对不同的接收机以及考虑到性能、成本、运算效率、稳定性等多方面问题, 设计了一套基于高性能 ARM(STM32F429IGT6)的 GPS 定位仿真系统, 实验分别采用两种不同性能的 GPS 接收机(NEO-M8T 和 LEA-6T), 实验运行结果表明, 3 种定位算法均能使 GPS 定位精度提高, 但基于不同性能的接收机, 其优化性能的程度是不一样的。该研究为工程实现中定位算法的选择提供有效的参考价值, 同时基于高性能 ARM 的 GPS 定位系统为今后做差分定位, 载波相位测姿以及组合导航等前沿技术研究提供良好的硬件和软件基础, 在卫星导航定位领域中具有重要意义。

关键词: GPS 定位系统; ARM; 最小二乘法; 加权最小二乘法; 卡尔曼滤波

中图分类号: TP2; TN014 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Analysis and comparison of performance of different GPS localization algorithm based on high-performance ARM

Zhou Bin Li Rongbing Liu Jianye Liu Hao

(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210006, China)

Abstract: In recent years, GPS technology and embedded technology have a good application in navigation, positioning, measurement and other fields. In order to research and analyze the performance of three kinds of common positioning algorithms (least square method, weighted least square method and kalman filter), for different receivers and considering the performance, cost, operation efficiency, stability, and other aspects of the problems, this paper designs a GPS positioning system based high-performance ARM. The experiment uses two different kinds of receivers(NEO-M8T, LEA-6T). The practical operation results show that the three filtering algorithms can improve the positioning accuracy of GPS, but it has different degrees of optimization performance on the receiver with different performance. This study provides an effective reference value for selection of location algorithm in engineering implementation, at the same time, GPS positioning system with high-performance provides a good base of hardware and software for differential positioning technology, carrier phase measurement, integrated navigation and other cutting-edge technology research, and has important significance in the field of satellite navigation and positioning.

Keywords: GPS positioning system; ARM; least square method; weighted least square method; Kalman filter

1 引 言

目前, GPS 技术在诸如导航、定位、定时、测量等方面都有良好的应用, GPS 作为全球定位系统, 已被广泛用于航天器自主导航、大型工程变形监测、武器瞄准、无人机、车载导航等领域^[1]。为了进一步提高 GPS 接收机定位性能, 可采用不同的定位优化算法。目前研究中主要采用的是最

小二乘法(least square method)、加权最小二乘法(weighted least square)和卡尔曼滤波(Kalman filter)。为了研究分析这 3 种常用的定位算法的性能优缺点, 设计了一套基于高性能 ARM 的 GPS 定位仿真系统^[2]。为了进一步对这 3 种定位算法进行比较, 实验采用两款不同性能的接收机(NEO-M8T 和 LEA-6T)。

通过对两个接收机的定位结果, 研究并分析了 3 种常

用定位算法的性能优缺点。结果显示,3 种算法各有其特点,定位精度均得到提高,但在不同性能的接收机上定位精度优化的程度是不同的。针对不同的接收机以及考虑到性能、成本、运算效率、稳定性等多方面问题,如何采用最适合的定位算法是工程实现的研究热点^[3]。同时,基于高性能 ARM 的 GPS 定位系统为今后做差分定位,载波相位测速以及组合导航等前沿技术研究提供良好的硬件和软件基础,在卫星导航定位领域具有重要的意义。

2 GPS 定位

2.1 GPS 卫星位置计算

GPS 接收机通过对接收到的卫星信号进行载波解调和伪码解扩,得到 50 bps 的数据码,按照导航电文的格式最终将数据码编译成导航电文。《GPS 界面控制文件 IS-GPS-200H》定义了 GPS 空间星座部分和用户设备部分的接口规范,该系统根据该文件将接收到的数据码进行编译,得到导航电文,根据导航电文中时间、卫星运行轨道、电离层延时等重要信息进行 GPS 卫星位置计算。本文采用的卫星计算公式为:

$$X_k = x_k \cos \Omega_k - y_k \cos i_k \sin \Omega_k \quad (1)$$

$$Y_k = x_k \sin \Omega_k + y_k \cos i_k \sin \Omega_k \quad (2)$$

$$Z_k = y_k \sin i_k \quad (3)$$

式中: X_k, Y_k, Z_k 为卫星在地心地固坐标系中的坐标,即卫星的位置, Ω_k 为观测时刻的升点经度, x_k 和 y_k 为卫星在轨道平面的位置, i_k 分别为经过摄动修正的轨道倾角。

2.2 最小二乘法计算 GPS 定位

如图 1 所示,接收机的伪距方程为:

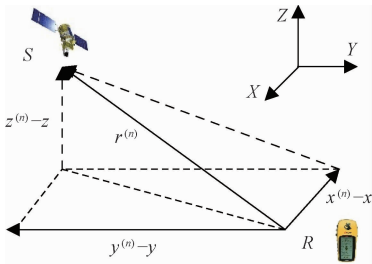


图 1 从 GPS 指向卫星的观测矢量

$$\rho_{cj} = [(x_j - x_u)^2 + (y_j - y_u)^2 + (z_j - z_u)^2]^{+} + b_u + v_j \quad (4)$$

式中: v_j 为修正后的伪距误差, (x_u, y_u, z_u) 和 (x_j, y_j, z_j) 分别表示用户和卫星 j ($j = 1, 2, 3, \dots$) 在 ECEF 坐标系中的位置坐标, ρ_{cj} 为经过伪距修正的卫星 j 到用户的伪距, b_u 为用户钟差产生的等效距离误差,观测卫星数为 n ,接收机位置和时钟偏差由概略位置坐标、概略钟差和修正量 3 部分组成。

$$x_u = \hat{x}_u + \Delta x_u \quad (5)$$

$$y_u = \hat{y}_u + \Delta y_u \quad (6)$$

$$z_u = \hat{z}_u + \Delta z_u \quad (7)$$

对伪距观测方程在 $(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{b}_u)$ 处进行泰勒级数展开,忽略高次项得到:

$$\rho_{cj} = R_j + \hat{b}_u + v_j - \frac{x_j - \hat{x}_u}{R_j} \Delta x_u - \frac{y_j - \hat{y}_u}{R_j} \Delta y_u - \frac{z_j - \hat{z}_u}{R_j} \Delta z_u + \Delta b_u \quad (8)$$

定位方程常数项 $L_j = R_j - \rho_{cj} + \hat{b}_u$,接收机到卫星 j 的观测矢量:

$$l_j = \frac{x_j - \hat{x}_u}{R_j}, m_j = \frac{y_j - \hat{y}_u}{R_j}, n_j = \frac{z_j - \hat{z}_u}{R_j} \quad (9)$$

式中: R_j 为卫星 j 到概略位置的距离,故伪距残差可表示为:

$$\Delta \rho_j = l_j \Delta x_u + m_j \Delta y_u + n_j \Delta z_u - \Delta b_u \quad (10)$$

$$\Delta \rho_j = \sqrt{(x_j - \hat{x}_u)^2 + (y_j - \hat{y}_u)^2 + (z_j - \hat{z}_u)^2} + \Delta b_u - \rho_j \quad (11)$$

式中有 4 个未知量 $\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u, \Delta b_u$ ($\Delta b_u = c \cdot \Delta t$),可以用 4 颗卫星进行距离测量将它们解出来,由于方程中要用到接收机的概略位置,所以必须采用迭代的方法进行计算^[4],概略位置可以任意选取,当概略位置接近真实位置时迭代的次数较少,当连续两次计算出来的 $\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u, \Delta b_u$ 值差别非常小时,即可停止迭代, ρ_j 为实际测得的伪距经过一系列修正后的伪距。

对上述式子写成矩阵的形式,有:

$$\Delta \rho = H \cdot \Delta x \quad (12)$$

式中:

$$\Delta \rho = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \Delta \rho_4 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 1 \\ l_4 & m_4 & n_4 & 1 \end{bmatrix}, \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -\Delta b_u \end{bmatrix} \quad (13)$$

所以式(12)的解为:

$$\Delta x = H^{-1} \Delta \rho \quad (14)$$

当参与计算的卫星数目大于或等于 4 颗时可以运用最小二乘法进行计算,计算结果为:

$$\Delta x = (H^T H)^{-1} H^T \Delta \rho \quad (15)$$

2.3 加权最小二乘法计算 GPS 定位

考虑到不同的输出值 v_n 有着不同大小的测量误差,可对每一个输出值 v_n 设定一个权重 w_n ,当权重 w_n 越大时,它对应的输出值 v_n 在最小二乘的解中起更大的作用。卫星测量的误差 σ_i 可根据卫星仰角进行设定,提高仰角较高的卫星在位置解算中的重要度,从而提高计算精度。在加权最小二乘法中, Δx 的计算公式如下:

$$\Delta x = (H^T W H)^{-1} H^T W \Delta \rho \quad (16)$$

式中: $\Delta x, \Delta \rho, H$ 为如前所示矩阵; W 为一个 $n \times n$ 的权系数矩阵,其中

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.4 卡尔曼滤波法计算 GPS 定位

GPS 卡尔曼滤波方法及模型在许多著作中都有论证^[5],本文主要采取了常用的卡尔曼滤波模型^[6],系统的状态向量为:

$$\mathbf{x} = [e, v_e, n, v_n, t, v_t, c_b, c_d]^T \quad (18)$$

式中: e, n, t 分别为 GPS 的东、北和天方向上的位置分量, v_e, v_n, v_t 分别为 GPS 的东、北和天方向上的速度分量, c_b 和 c_d 分别为钟差和时钟漂移误差。

系统的系统方程为:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (19)$$

观测方程为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k \quad (20)$$

式中: $\mathbf{x}_k$ 为状态向量; $\mathbf{A}$ 为状态转置矩阵; $\mathbf{W}_{k-1}$ 为系统过程噪声向量; $\mathbf{y}_k$ 为观测向量, $\mathbf{V}_k$ 为测量噪声向量; $\mathbf{H}$ 为观测

向量和状态向量的观测矩阵, $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi \end{bmatrix}, \Phi =$

$$\begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Delta t \text{ 为时钟采样周期。}$$

$$\mathbf{R}_k = \text{diag}\{\sigma_e^2, \sigma_{v_e}^2, \sigma_n^2, \sigma_{v_n}^2, \sigma_t^2, \sigma_{v_t}^2, \sigma_{c_b}^2, \sigma_{c_d}^2\} \quad (21)$$

式中: $\sigma_e^2, \sigma_{v_e}^2, \sigma_n^2, \sigma_{v_n}^2, \sigma_t^2, \sigma_{v_t}^2$ 分别为 GPS 在东、北和天向上的位置误差方差和速度误差方差, $\sigma_{c_b}^2, \sigma_{c_d}^2$ 分别为钟差方差和时钟漂移误差方差,这些参数可根据接收机参数进行设置。

3 系统设计

本文设计了一套基于高性能微处理器 STM32F429IGT6、软件开发平台为 Keil5 的 GPS 定位仿真系统。具体设计如图 2 所示。

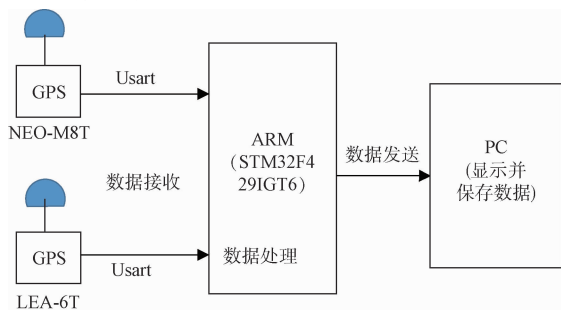


图 2 GPS 定位系统设计

该系统由 GPS 接收机模块、天线、数据接收、处理和发送模块和计算机组成如图 2 所示。数据接收、处理和发送模块由 ARM 处理器及其外围电路组成^[7]。它的主要任务为

- 1) 负责提供电源以及对 GPS 接收机进行 UBX 配置;
- 2) 接收 GPS 发送的原始观测数据和星历数据;
- 3) 对接收到的 GPS 数据进行定位解算得到 GPS 卫星位置和速度;
- 4) 利用不同的滤波算法计算 GPS 的位置速度和计算卫星几何分布精度;
- 5) 进行不同误差的修正;
- 6) 发送处理后的数据给计算机并储存;

STM32F429IGT6 内核带有 FPU 的 ARM32 位 Cortex-M4CPU,主频高达 180 MHz,具有 DSP 指令集^[8]。随着嵌入式技术的发展,以嵌入式为代表的 32 位微处理器凭借其高性能、低功耗、低成本、体积小等优点,在现实中获得了广泛的应用^[9]。另外,基于单片机的 GPS 定位系统只能进行简单的程序编程,对于相关的需要还要进行二次开发。而嵌入式 ARM 的 GPS 定位系统稳定出色,有着优秀的编译和调试工具,并且有大量的程序开发例程,程序开发方便。

GPS 接收机选用的是 u-blox 公司的最新型号 NEO-M8T 和性能较低的 LEA-6T,NEO-M8T 具有体积小、低成本、低功耗、高性能等优点,它能够输出多种卫星的原始观测数据和星历数据,是一款高性能、高精度、多功能的接收机^[10]。该两款接收机均支持伪距、载波相位等原始数据输出,该系统能对接收机众多卫星信息进行筛选,提取出 GPS 的原始观测数据(伪距、载波相位、多普勒等信息)和星历数据,进行精确的解码,并将当前的经度、纬度、高度等信息输出给计算机。

4 实验分析与比较

实验采用 2 个不同型号的 GPS 接收机在同一环境中分别接入 ARM 中,实物连接图如图 3 所示。为了方便比较定位误差,在实验时,接收机保持静止状态,位置固定,当地位置的标准纬度、经度和高度分别为 $31.939\ 001^\circ$ 、 $118.732\ 396\ 12^\circ$ 、 36.1 m 。

实验过程中,首先对 LEA-6T 和 NEO-M8T 这两个接收机进行 1 000 s 的连续数据处理,得到的解算结果并保存,再分别用不同的滤波算法对该结果进行分析,最后对定位结果进行比较。

LEA-6T 的定位结果如图 4~6 所示。

NEO-M8T 的定位结果如图 7~9 所示。

利用 MATLAB 得到接收机定位的误差和经纬度方差,结果如表 1 所示。在定位误差方面,为了方便观察,我们以最小二乘法的定位误差为基础性能进行对比分析。对于 LEA-6T 接收机,采用加权最小二乘法定位使其定位性

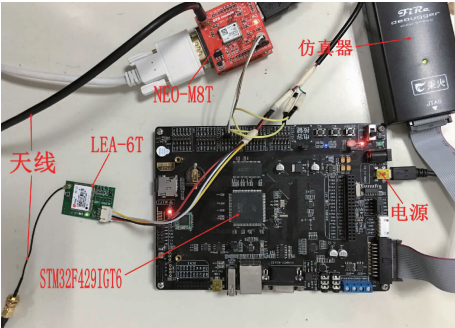


图 3 GPS 定位系统实物

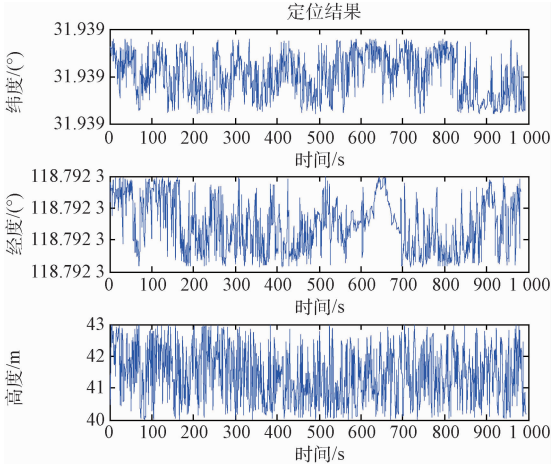


图 6 卡尔曼滤波定位

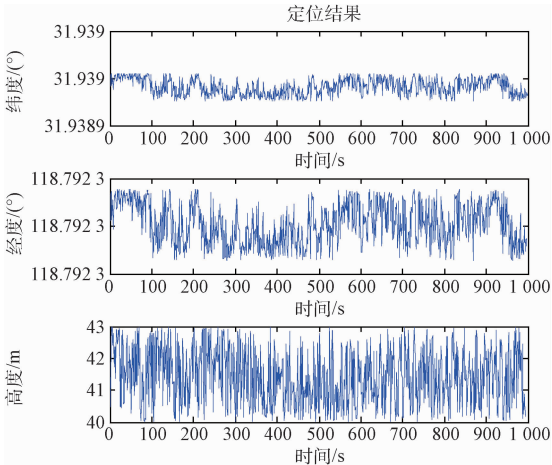


图 7 最小二乘法定位

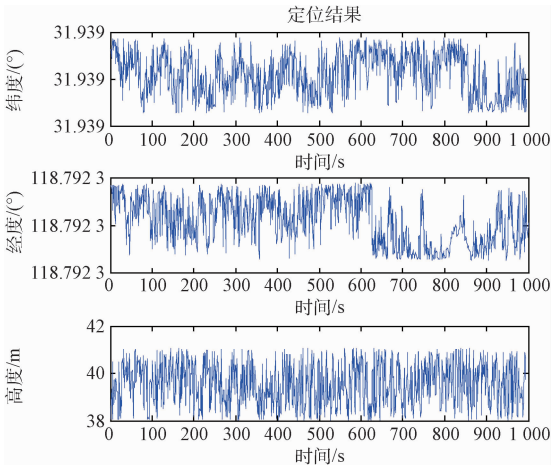


图 8 加权最小二乘法定位

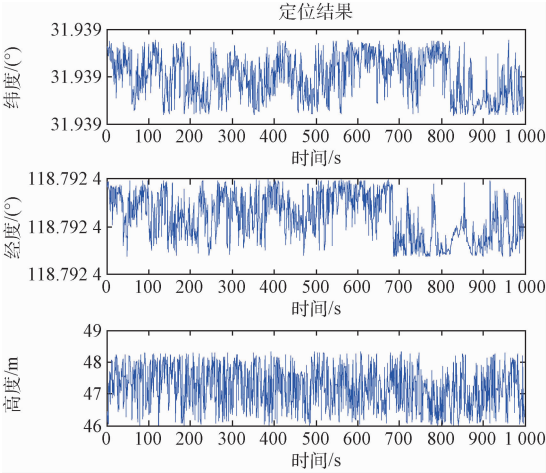


图 4 最小二乘法定位

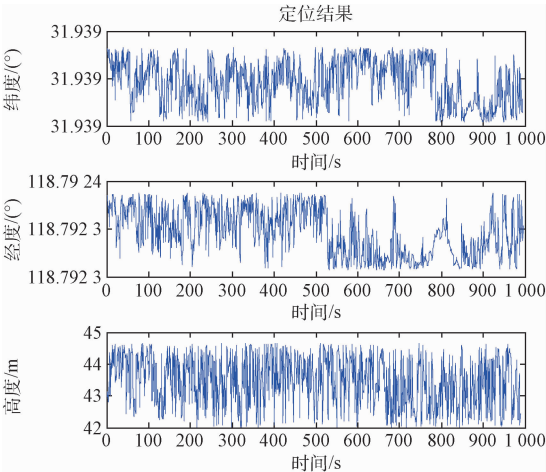


图 5 加权最小二乘法定位

能相比于采用最小二乘法定位性能提高了 17.14%，采用卡尔曼滤波算法使其定位性能提高 37.08%。而对于 NEO-M8T，采用加权最小二乘法使其定位性能提高了 41.89%，采用卡尔曼滤波算法使其定位性能提高了 63.03%。

通过定位结果和误差分析可得，NEO-M8T 接收机在不同滤波算法中定位性能均优于 LEA-6T，另外 NEO-M8T

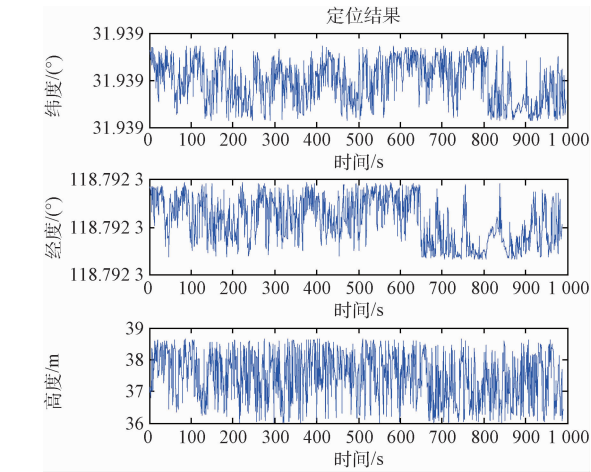


图 9 卡尔曼滤波定位

表 1 定位误差均值

定位误差/m	LEA-6T	优化性能	NEO-M8T	优化性能
最小二乘法	21.418		17.457	
加权最小二乘法	17.742	17.14%	10.145	41.89%
卡尔曼滤波	13.475	37.08%	6.451	63.03%

表 2 经纬度误差方差

		定位方差/m	
		LEA-6T	NEO-M8T
最小二乘法	经度	20.26	15.96
	纬度	22.48	16.51
加权最小二乘法	经度	16.29	9.24
	纬度	17.87	10.34
卡尔曼滤波算法	经度	10.18	4.93
	纬度	12.41	5.58

还有着快速定位和稳定性高等优点。与此同时,分析和比较了最小二乘法、加权最小二乘法以及卡尔曼滤波在不同接收机定位性能情况,结果证明三种滤波方式均能提高定位精度,但是其提高性能程度是不同的。

5 结 论

本文设计了一套基于高性能 ARM 的 GPS 定位仿真系统,在此基础上,分别基于 LEA-6T 和 NEO-M8T 两种型号的接收机进行试验分析,结果证明基于 NEO-M8T 的定位系统在快速性、稳定性以及精确定位上有着明显的优势。

同时,作为常用的 3 种滤波算法,3 种定位算法各有其特点:

1)最小二乘算法简单易行,运算速度快,但其缺点是定

位精度低和稳定性差。

2)加权最小二乘算法定位时根据卫星仰角进行计算,不依赖于接收机的性能指标,通用性好,在初始迭代时收敛较快,但是不能对观测量进行误差分析,因此定位精度受观测量误差影响比较大,定位精度在静止时较好,稳定性较低,动态性能较低。

3)卡尔曼滤波算法在 GPS 定位优化算法中是一个有效地解决误差的方法。其优点是对于动态系统有着较好的跟踪效果,运算速度快,精度较高,满足实时定位的要求。但是受接收机初始位置影响较大,如果初始坐标误差较大,则有可能导致测量方程不准确,造成滤波发散。具体参数设计也依赖于接收机的性能指标,所以在性能较低的 LEA-6T 上其影响尤其明显。

目前,在实际应用中,加权最小二乘法和卡尔曼滤波广泛应用于 GPS 定位中。针对不同的接收机以及考虑到性能、成本、运算效率、稳定性等多方面问题,如何采用最适合的定位算法是工程实现的研究热点,在实际应用中,还可以考虑将其与其他算法结合使用。同时,基于高性能 ARM 的 GPS 定位系统有着低成本、高性能、易开发等优点,为今后做差分定位、载波相位测姿以及组合导航方面的研究提供良好的硬件和软件基础,具有广阔的应用前景,有待将来进一步的研究。

参考文献

[1] 韩萍,桑威林,何伟琨,等. 基于迭代中心差分卡尔曼滤波的飞机姿态估计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1):187-193.

[2] 乐联华,江剑. 基于 STM32 的远程定位与监控终端的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10): 67-72.

[3] MOHAMMED J, MOORE T, HILL C, et al. An assessment of static precise point positioning using GPS only, GLONASS only, and GPS plus GLONASS[J]. Measurement, 2016(88): 121-130.

[4] 刘春,马颖. 改进卡尔曼滤波在北斗伪距定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 779-785.

[5] 孙超,张美君. 基于 Kalman 滤波的头盔运动姿态的预测方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 82-86.

[6] YANG Y, LI J, WANG A, et al. Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of BeiDou regional navigation satellite system[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(1):144-152.

[7] 李远茂,刘桂雄,曾成刚. 基于 GPS 的室外放射源信息监控系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1244-1254.

(下转第 146 页)