

一种片上电离层 TEC 准实时卡尔曼滤波算法*

李靖华 马冠一 万庆涛 范江涛

(中国科学院国家天文台 北京 100101)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 提出一种适用于片上的电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 准实时算法, 可降低电离层 TEC 监测设备的成本、体积、功耗和待传数据量, 并在 ARM 芯片上进行了验证. 为降低数据存储量和计算复杂度, 该算法收集和缓存 20 min 的 GNSS 双频伪距和相位观测值, 用载波相位平滑伪距的方法得到 20 min 内卫星至接收机视线路径上的斜向 TEC (Slant TEC, STEC), 采用 5 min 的滑动步长进行下一组 STEC 的数据处理. 利用映射函数和多项式模型构建卡尔曼滤波的量测方程, 通过卡尔曼滤波迭代, 准实时给出测站上空的电离层垂直 TEC (Vertical TEC, VTEC), 并与积累一天数据得到的 STEC 作为观测量进行卡尔曼滤波得到的 VTEC 进行了对比, 结果表明, 采用 20 min 的数据长度和 5 min 的步长对 STEC 进行准实时处理的方法是可行的.

关键词 电离层 TEC, 卡尔曼滤波, 准实时算法, 电离层监测仪

中图分类号 P352

A Quasi-real-time On-chip Ionospheric TEC Kalman Filtering Algorithm

LI Jinghua MA Guanyi WAN Qingtao FAN Jiangtao

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract An on-chip quasi-real-time algorithm is proposed for monitoring the ionospheric Total Electron Content (TEC). The algorithm can run on a standard commercial chip. In this way, the cost, power consumption, size and data to be transferred of TEC monitor are reduced. To minimize the cache capacity needs and computational load, the algorithm collects the GNSS dual-frequency pseudorange and phase measurements in 20 minutes. The TEC, based on phase measurements, is fitted to the TEC derived from pseudorange measurements to achieve high-precision TEC along the line-of-sight path (Slant TEC, STEC) within 20 minutes. A 5-minute step is employed to compute the subsequent set of STEC. A thin-shell ionospheric model and Vertical TEC (VTEC) polynomial model are used to construct the measurement equation of Kalman filter and acquire the quasi-real-time VTEC above the monitor. These

* 国家自然科学基金面上项目 (12273062, 12473095) 和中国科学院-日本学术振兴会协议项目 (178GJHZ2023180MI) 共同资助

2024-08-30 收到原稿, 2024-09-26 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

VTEC values are compared with the results based on STEC from 1-day measurements. The results show that the quasi-real-time algorithm is effective. The algorithm is implemented on i.MX283 (Arm9™ Core).

Key words Ionospheric TEC, Kalman filtering, Quasi-real-time algorithm, Ionosphere monitoring

0 引言

地球高层大气吸收太阳紫外线和 X 射线而发生部分电离, 在地面以上约 60~1000 km 处形成电离层. 电离层中含有足够多的电子, 足以影响射电天文、雷达、卫星导航、卫星通信和短波通信等系统, 是空间物理和无线电系统应用领域的主要研究对象.

电离层除了受太阳辐射控制外, 还受地磁活动、中性大气等诸多因素影响, 除了具有区域特征外, 还存在明显的日变化、季节变化、年变化、不同尺度的波动结构以及复杂的电离层扰动. 电离层模型可以描述电离层长期的大尺度的变化, 但不能很好地反映电离层的区域特性以及逐日变化. 因此开展电离层监测, 进而实施空间天气预警和预报至关重要.

随着全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的发展和广泛应用, GNSS 接收机因具有全天时、全天候、成本低、便于设置等优势, 成为电离层监测的一种重要手段. 电离层是一种色散介质, 折射指数与信号频率和电子密度相关^[1], 利用双频 GNSS 接收机的伪距和相位观测量可以获得电离层的关键参数——电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC)^[2,3]. 双频 GNSS 接收机成为电离层 TEC 反演或监测的主要设备.

基于 GNSS 的电离层 TEC 反演或准实时监测, 通常在收集一天的双频 GNSS 数据后, 在计算机上利用网格法^[3]、多项式^[2,4]或球谐函数^[5,6]等方法, 进行数据后处理获得电离层 TEC. 卡尔曼滤波是一种递归算法, 适用于实时数据处理, 很多研究者试图将卡尔曼滤波方法应用于解算电离层 TEC^[7-15]. 卡尔曼滤波方法不用保存大量过去的测量数据, 能满足实时在线处理的要求, 一些研究人员以天或小时为单位从 GNSS 观测网上获取 GNSS 双频观测数据, 用卡尔曼滤波方法获得近实时的电离层 TEC^[12,13]. 但这些方法都是在计算机后端进行处理, 设备体积和功耗都较大, 不适用于数据传输、供电功耗和体积受限的观测区域. 目前, 国际上应用较多的电离层闪烁监测仪为 GPStation-6 和 Sepetentro PolaRx5 S, 其主要用于监测电离层闪烁, 同时其输出的电离层穿刺点处的垂

直 TEC 并不是对 TEC 和卫星、接收机的硬件偏差进行实时解算得出的, 而是在 TEC 不可能出现负值的假设下, 加上偏差所得的, 并不是真正的电离层 TEC.

为此, 本文提出了一种片上的电离层 TEC 准实时卡尔曼滤波算法. 该算法数据存储空间小、运算量低, 可以在普通的商用芯片上准实时计算测站上空的电离层 TEC, 并在 ARM 9 芯片上进行测试, 结果表明该算法降低了对电离层 TEC 监测设备的体积、功耗和数据存储和传输量的需求, 对偏远地区、海洋等数据传输、体积和功耗受限的应用场景具有重要的意义.

1 利用 GNSS 反演电离层 TEC 算法理论基础

电离层是一种色散介质, 利用 GNSS 双频信号可获得卫星至接收机视线路径上的斜向 TEC (Slant TEC, STEC)^[2]. 定义符号 δ_{STEC} 代表 STEC, 基于双频伪距和双频相位观测量获得的 STEC 可分别表达为

$$\begin{aligned}\delta_{\text{STEC},\rho}^j &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.28 \times (f_1^2 - f_2^2)} (\rho_2^j - \rho_1^j), \\ \delta_{\text{STEC},L}^j &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.28 \times (f_1^2 - f_2^2)} (L_1^j \lambda_1 - L_2^j \lambda_2).\end{aligned}\quad (1)$$

式中, ρ 为伪距观测量, L 为相位观测量, f 为信号频率, λ 为信号波长. 上角标 j 表示第 j 颗卫星, 下角标 1 和 2 表示 GNSS 信号的两个频率.

伪距观测量噪声大, 获得的 STEC 精度很差; 相位观测量噪声小, 精度高, 但存在整周模糊度的问题, 得到的 STEC 存在一个未知的偏差. 通常利用载波相位平滑伪距的方法获得较高精度的 STEC. 第 j 号卫星相位平滑伪距后的 STEC 为

$$\delta_{\text{STEC}}^j = \delta_{\text{STEC},L}^j + B_{\text{rs}}^j. \quad (2)$$

式中, 基线值 B_{rs}^j 可表示为^[3]

$$B_{\text{rs}}^j = \frac{\sum_{k=1}^N (\delta_{\text{STEC},\rho,k}^j - \delta_{\text{STEC},L,k}^j) \sin^2 \alpha_k^j}{\sum_{k=1}^N \sin^2 \alpha_k^j}. \quad (3)$$

其中, α 为卫星仰角, 下角标 k 表示第 k 个观测历元,

上角标 j 表示第 j 号卫星, N 为同一个相位观测弧段内的观测历元数.

假定电离层是位于地球上空 400 km 高度处的薄层, 接收机、卫星和电离层穿刺点 (Ionospheric Piercing Point, IPP) 的关系如图 1 所示. 第 j 号卫星 IPP 处的垂直 TEC (Vertical TEC, VTEC) 用 δ_{VTEC}^j 表示, 可写为

$$\delta_{\text{VTEC}}^j = (\delta_{\text{STEC}}^j - b_{r,m} - b_s^j) \cos \chi^j. \quad (4)$$

式中, χ^j 为第 j 颗卫星的天顶角; $b_{r,m}$ 表示接收机中各 GNSS 接收系统的硬件偏差, 下标 r 表示接收机, m 表示第 j 号卫星所属的卫星导航系统; b_s^j 为第 j 号卫星的卫星硬件偏差.

接收机上空电离层 VTEC 可用一阶多项式模型表示^[2], 有

$$\delta_{\text{VTEC}}^j = a + b \cdot (\lambda_s^j - \lambda) + c \cdot (\phi_s^j - \phi). \quad (5)$$

式中, a, b, c 为多项式系数; ϕ, λ 分别为接收机天顶处 IPP 点的纬度和经度; a 表示 (ϕ, λ) 处的 VTEC. δ_{VTEC}^j 为第 j 颗卫星 IPP 点处 (ϕ_s^j, λ_s^j) 的 VTEC, ϕ_s^j, λ_s^j 分别为第 j 颗卫星 IPP 点处的纬度和经度.

结合式 (4) 和式 (5), TEC 方程可进一步写为

$$\delta_{\text{STEC}}^j = \delta_{\text{VTEC}}^j \cdot \frac{1}{\cos \chi^j} + b_s^j + b_{r,m} = \frac{1}{\cos \chi^j} \cdot a + \frac{\lambda_s^j - \lambda}{\cos \chi^j} \cdot b + \frac{\phi_s^j - \phi}{\cos \chi^j} \cdot c + b_s^j + b_{r,m}. \quad (6)$$

利用式 (6) 可以构建观测量 δ_{STEC}^j 与未知数 $a, b, c, b_s^j, b_{r,m}$ 之间的方程. 利用最小二乘法求解式 (6) 中的

未知数, 得到接收机天顶处的 VTEC (即式中的 a) 以及卫星与接收机的硬件偏差.

2 低运算量及低数据存储量的电离层 TEC 准实时处理方法

2.1 斜向 TEC 获取的数据预处理方法

在利用 GNSS 观测量反演电离层 TEC 的数据处理过程中, 通常收集一天的数据, 基于卫星在整个可视弧度内的观测信息, 利用式 (3) 计算 $\delta_{\text{STEC},\rho}^j$ 和 $\delta_{\text{STEC},L}^j$ 之间的基线值 B_{rs}^j , 进而获得式 (2) 中载波相位平滑后的 δ_{STEC}^j , 这样可以得到更为可信的结果. 但这种方法因数据存储量大、计算量大, 通常需要在计算机上完成, 不适用于在资源有限的芯片上实现电离层 TEC 的监测.

为尽可能地节约硬件资源, 减少数据存储量和运算量, 同时准实时获得可信的 TEC 的结果, 提出如下方法. 选用 10 s 采样间隔、20 min 的数据长度对数据进行预处理, 获取式 (3) 中的基线值 B_{rs}^j . 然后, 取 20 min 内第 10 min 的 $\delta_{\text{STEC},L}^j$ 利用式 (2) 计算该时刻卫星至接收机路径上的 δ_{STEC}^j , 相应的 IPP 的经纬度也可根据卫星和接收机的位置关系计算得出. 为了保证数据的连续性, 对数据进行滑动处理, 每次滑动 5 min, 即数据长度的窗口为 20 min, 滑动步长为 5 min. 第一次选取第 0~19 min 的观测数据, 第二次选取第 5~24 min 的观测数据. 以此类推, 每 5 min 获得一组数据卫星至接收机路径上的 δ_{STEC}^j . 数据预处理的流程如图 2 所示, 为了消除低仰角带来的多径误差, 选取截止仰角为 30°.

利用此方法获得的卫星至接收机路径上的 δ_{STEC}^j 如图 3 所示. 图 3 给出的是 2023 年 9 月 6 日 (年积日第 249 天) 在北京观测到的北斗系统的 7 号卫星的 STEC, 灰色实线是基于伪距观测的 $\delta_{\text{STEC},\rho}^j$, 黑色虚线是利用整个载波弧段内的观测数据得到的 $\delta_{\text{STEC},\text{arc}}^j$, 黑色实线是利用 20 min 窗口长度和 5 min 滑动步长得到的 $\delta_{\text{STEC},20\text{min}}^j$. 可以看出, 利用 20 min 的窗口长度得到的 STEC 与利用整个载波弧度的观测数据得到的 STEC 具有很好的一致性. 以整个弧段内的观测数据长度进行载波相位平滑伪距得到 STEC (即图中黑色的虚线) 为参考, 评价 20 min 数据窗口长度和 5 min 的步长得到 STEC (即图中黑色的实线) 的误差. 误差的均值为 0.002 TECU, 标准偏差

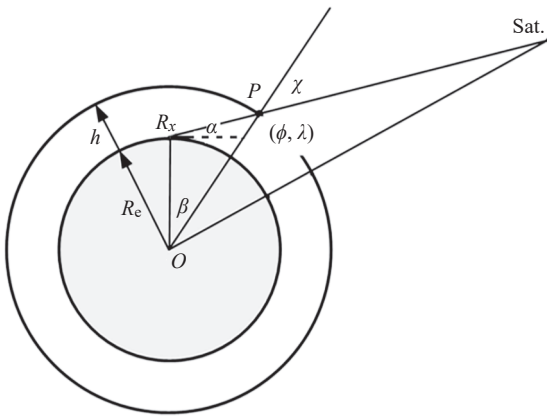


图 1 电离层薄层模型下卫星、接收机与星下点的关系

Fig. 1 Satellite, receiver, and the IPP under ionospheric thin layer model

(standard deviation, std) 为 1.31 TECU. 这表明本文所提出的数据预处理方法是可用的, 以小于 2 TECU 的观测精度损失, 换来了观测量的准实时处理.

2.2 VTEC 反演的数据处理方法

在利用式 (6) 进行 TEC 反演的过程中, 如果一整天或几个小时的数据进行最小二乘求解, 通常需要进行大量的矩阵运算, 消耗较多的硬件资源. 卡尔曼滤波作为一种递归估计算法, 其核心在于不断地根据先前的估计信息和当前测量值来迭代更新状态估

计值, 以适应新的观测数据, 非常适合用于处理大量数据流的情况. 在基于 GNSS 观测的电离层 TEC 反演中, 卡尔曼滤波不用保存大量的历史观测数据, 是一种适用于准实时数据处理的方法^[10-12]. 为此, 本文采用卡尔曼滤波的方式进行 VTEC 的准实时估计.

假设 k 时刻共观测到来自 m_n 个 GNSS 系统的 J 颗卫星, 利用式 (6) 构建卡尔曼滤波的量测方程, k 时刻的量测方程可写为

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k. \quad (7)$$

其中, 下标 k 代表时刻, $\mathbf{z}_k$ 为 k 时刻相位平滑伪距后的 STEC 测量值 $\delta_{\text{STEC},k}^j$ 的集合, 有

$$\mathbf{z}_k = [\delta_{\text{STEC},k}^1, \delta_{\text{STEC},k}^2, \dots, \delta_{\text{STEC},k}^j, \dots, \delta_{\text{STEC},k}^J]^T.$$

$\mathbf{X}_k$ 为第 k 时刻的待估参数矢量, 有

$$\mathbf{X}_k = [a_k, b_k, c_k, b_{r,m_1,k}, \dots, b_{r,m_n,k}, b_{s,k}^1, b_{s,k}^2, \dots, b_{s,k}^J]^T.$$

$\mathbf{V}_k$ 为 k 时刻各颗卫星 $\delta_{\text{STEC},k}^j$ 的量测噪声. $\mathbf{H}_k$ 为量测矩阵, 满足

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_3 & B_3 & C_3 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

$$A_1 = 1/\cos \chi^1, A_2 = 1/\cos \chi^2, A_3 = 1/\cos \chi^J;$$

$$B_1 = (\lambda_s^1 - \lambda)/\cos \chi^1, B_2 = (\lambda_s^2 - \lambda)/\cos \chi^2,$$

$$B_3 = (\lambda_s^J - \lambda)/\cos \chi^J;$$

$$C_1 = (\phi_s^1 - \phi)/\cos \chi^1, C_2 = (\phi_s^2 - \phi)/\cos \chi^2,$$

$$C_3 = (\phi_s^J - \phi)/\cos \chi^J. \quad (8)$$

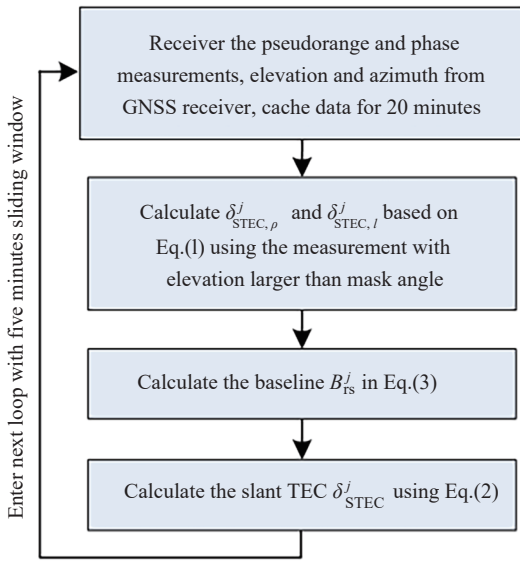


图 2 数据预处理流程

Fig. 2 Flow chart to obtain the slant TEC

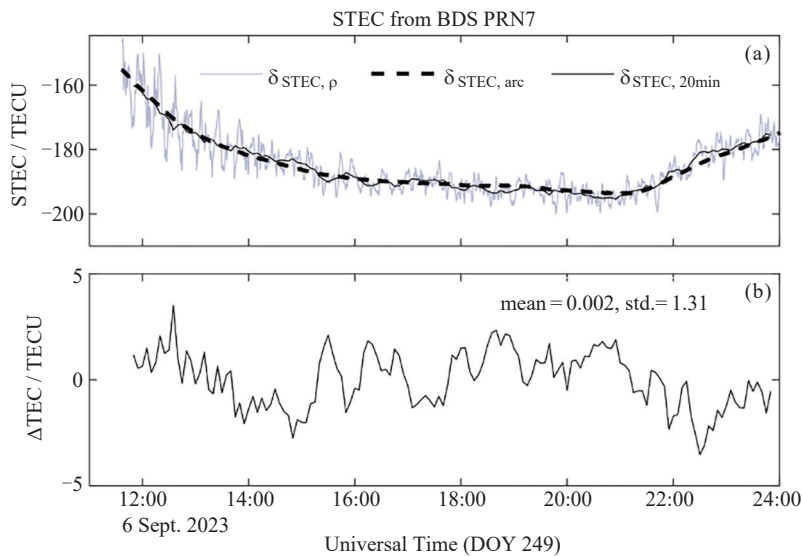


图 3 利用 20 min 的窗口长度和 5 min 滑动步长得到的 STEC

Fig. 3 STEC using the measurements in 20 min with 5 min step

卡尔曼滤波的状态方程为

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k. \quad (9)$$

其中, $\Phi_{k,k-1}$ 为第 $k-1$ 时刻到第 k 时刻的状态转移矩阵, $\mathbf{X}_{k-1}$ 为第 $k-1$ 时刻的待估参数矢量, $\mathbf{W}_k$ 为 k 时刻的系统噪声矩阵.

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & B & C & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中, $B = \lambda_{s,k}^j - \lambda_{s,k-1}^j$, $C = \phi_{s,k}^j - \phi_{s,k-1}^j$.

通常假设量测噪声 $\mathbf{V}_k$ 和系统噪声 $\mathbf{W}_k$ 均为零均值白噪声序列, 对应的协方差矩阵分别为 $\mathbf{R}_k$ 和 $\mathbf{Q}_k$.

在利用卡尔曼滤波进行 VTEC 计算的过程中, 因卫星的运动, 待估参数中 b_s^j 的个数随可视卫星数 J 变化, 并不是一个固定的向量. 卡尔曼滤波过程中的待估参数和矩阵也会随观测量的变化而变化.

为了减少可视卫星数量和编号变化对卡尔曼滤波结果的影响, 保证卡尔曼滤波结果的正确性, 需要处理卫星进出的问题. 假设 k 时刻有第 j 号卫星, $k+1$ 时刻第 j 号卫星从视线消失, i 时刻再次出现, 则 i 时刻再次出现时, 继承 k 时刻该卫星的硬件偏差估计值和与之相关的估计值协方差. 因此即使卫星在 $k+1$ 时刻低于截止仰角或不可见, 不参与估计和迭代, 与该颗卫星相关的估计值和估计值的协方差也需要保留. 为此需要在片上处理时开辟专用的内存空间, 缓存这些信息. 在卡尔曼滤波迭代的过程中, 每次参与估计的变量和矩阵需要根据当前的可视卫星数进行调整.

图 4 给出卡尔曼滤波算法流程. 按照数据预处理方法每 5 min 计算一组 STEC 以及相应的 IPP 点处的天顶角、经度和纬度, 构建卡尔曼滤波方程, 开始卡尔曼滤波迭代过程.

卡尔曼滤波迭代步骤如下.

(1) 如果是第一次进行卡尔曼滤波, 对待估参数赋初值 0, 对误差协方差矩阵赋初值; 如果不是第一次, 从缓存区取前一次的估计值和估计误差的协方差矩阵, 对于第一次出现的卫星, 硬件偏差估计值和相应的协方差赋值为 0.

(2) 根据经验对测量噪声和系统噪声的协方差矩阵 $\mathbf{R}_k$ 和 $\mathbf{Q}_k$ 赋值. 采用 10 s 采样率的载波相位平滑后

的斜向 STEC 进行卡尔曼滤波计算 VTEC 的过程中, $\mathbf{R}_k$ 和 $\mathbf{Q}_k$ 分别取为

$$\mathbf{R}_k = \text{Cov}(\mathbf{V}_k) = 0.0005 \mathbf{I}_J. \quad (11)$$

其中, $\mathbf{I}_J$ 为 $J \times J$ 阶单位矩阵, J 为可视卫星数.

$$\mathbf{Q}_k = \text{Cov}(\mathbf{W}_k) = 7.5 \times 10^{-10} \cdot \mathbf{I}_{(3+m_n+J) \times (3+m_n+J)}. \quad (12)$$

$\mathbf{I}_{(3+m_n+J) \times (3+m_n+J)}$ 为 $(3+m_n+J) \times (3+m_n+J)$ 阶单位矩阵.

(3) 计算状态转移矩阵 $\Phi_{k,k-1}$ 和量测矩阵 $\mathbf{H}_k$.

(4) 计算预测误差的协方差矩阵和卡尔曼滤波增益矩阵 $\mathbf{K}_k$.

$$\hat{\mathbf{P}}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_k, \quad (13)$$

$$\mathbf{K}_k = \frac{\hat{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^T}{\mathbf{H}_k \hat{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k}. \quad (14)$$

(5) 计算当前时刻的估计值和估计误差的协方差矩阵 $\mathbf{P}_k$, 并进行缓存.

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}), \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \hat{\mathbf{P}}_k. \quad (16)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵.

(6) 取下一组观测值, 进行下一轮卡尔曼滤波迭代.

3 测试结果

在以 Arm9™ 为核的 i.MX283 芯片上实现了上述算法, 并将实现了该算法的接收机放置在室外进行了测试. 在 Arm9™ 芯片上进行 VTEC 的计算时, 采用北斗和 GPS 双系统进行 VTEC 的计算, 卫星截止仰角为 30°, 每个观测历元大于截止仰角的卫星数按 20 颗预估. 暂存 20 min 的观测数据 (包含观测时间、卫星系统、卫星编号、仰角、方位角、双频相位、双频伪距), 数据量约为 100 kByte; 在一次卡尔曼滤波计算过程中, 待估参数共 25 个 (20 颗星的硬件偏差, 3 个多项式系数和 2 个接收的系统硬件偏差), 需要进行 7 次 25×25 阶的矩阵相乘运算, 2 次 25×25 阶的矩阵和 25×1 阶的向量相乘运算, 乘法运算次数约为 11 万次. 在 Arm9™ 芯片上执行一次卡尔曼滤波运算的时间约 15 s.

2023 年 9 月 4 日至 9 月 7 日 (DOY 247–250) 测站上空 (40.00°N, 116.38°E) 的接收机在 Arm9™ 芯

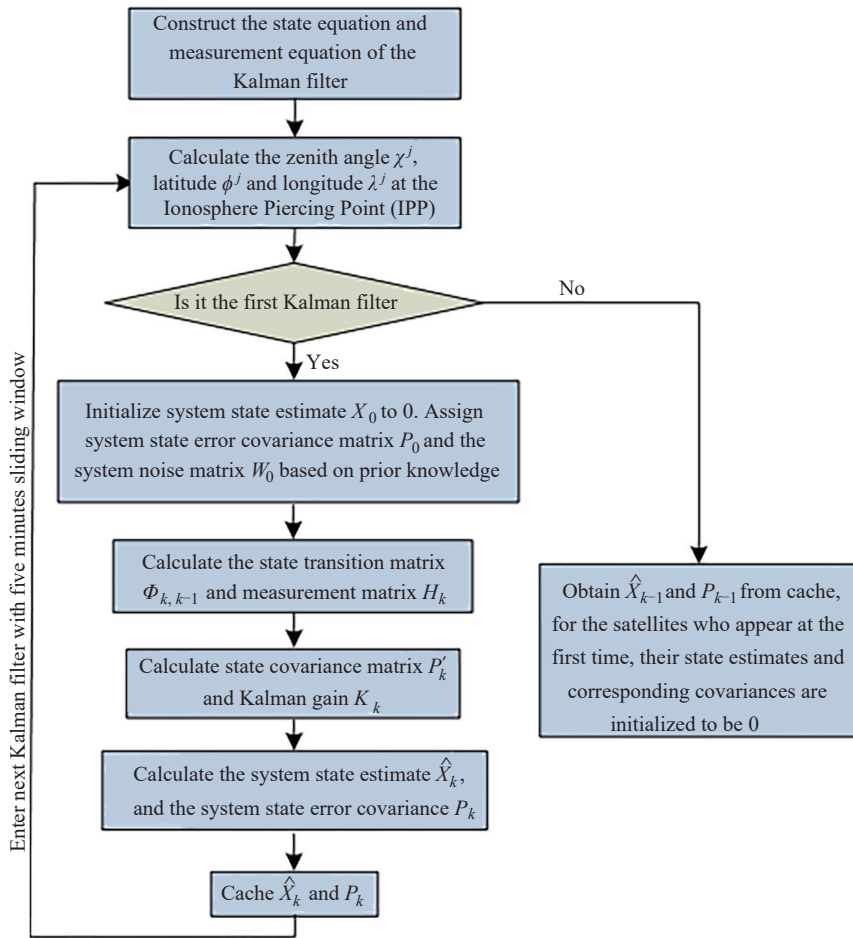


图 4 卡尔曼滤波算法实现流程

Fig. 4 Flow chart of Kalman filter algorithm

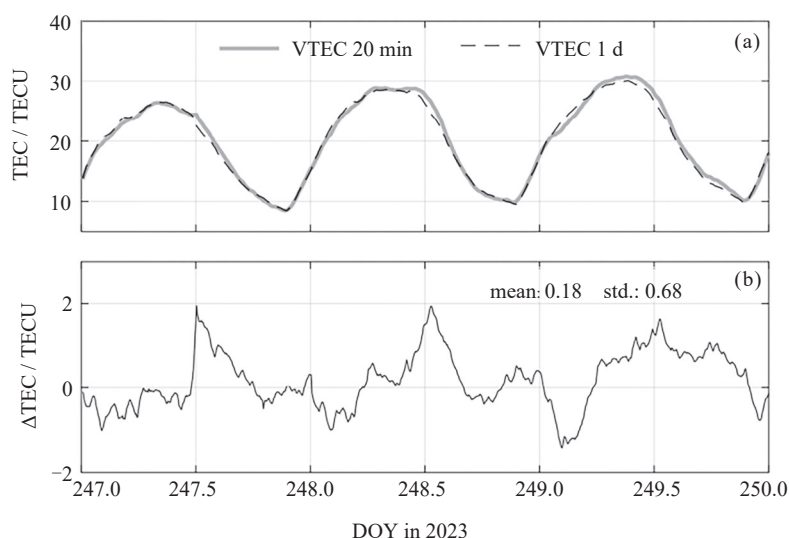
片上准实时计算得到的 VTEC 如图 5(a) 中的灰色实线所示. 为了与后处理结果进行比较, 黑色的虚线给出了计算机处理得到的 VTEC. 后处理数据的采样条件与芯片实时计算的采样条件相同. 积累一天的采样数据后, 先利用整个弧段内的数据进行载波相位平滑伪距得出 STEC, 再进行卡尔曼滤波得到的 VTEC.

图 5(b) 是两种方法得到的 VTEC 的差值变化 (20 min 长度数据 ARM 芯片上实时得到的结果减去 1 天数据长度的后处理结果), 差值范围为 $-2 \sim 2$ TECU, 均值为 0.18 TECU, 标准偏差为 0.68 TECU. 从图 5 中可以看出, 两种方法得到的 VTEC 具有很好的一致性, 表明采用 20 min 长度的数据和 5 min 滑动窗口得到的结果是可用的.

4 结论

针对片上存储量和计算能力受限的特点, 设计了

一种准实时获得测站上空电离层 TEC 和硬件偏差的方法. 该方法对 20 min 内观测到的伪距和相位数据进行载波相位平滑伪距的预处理, 获得卫星至接收机路径的 STEC, 以及相应的电离层穿刺点的位置和卫星的天顶角信息, 然后利用卡尔曼滤波进行测站上空 VTEC 的估计. 采用 5 min 的步长获取卡尔曼滤波的下一组 20 min 的观测量 STEC, 进行下一轮的卡尔曼滤波估计. STEC 的数据预处理结果表明, 利用 20 min 数据长度、5 min 步长得到的 STEC 与积累 1 天的数据获得的 STEC 具有很好的一致性, 标准偏差小于 2 TECU. 该方法在以 Arm9TM 为核的芯片上进行了验证, 进行一次 VTEC 计算耗时约为 15 s. 采用 20 min 长度的数据在 ARM 芯片上准实时计算获得的 VTEC 与积累 1 天的数据在计算机上后处理得到的 VTEC 也具有很好的一致性, 标准偏差 std 小于 2 TECU, 表明本文所提出的片上准实时数据处理方法是可行的.

图 5 电离层监测仪得到的测站上空的 TEC (a) 和 Δ TEC (b)Fig. 5 TEC (a) and the Δ TEC (b) above the monitor (40.00°N, 116.38°E)

参考文献

- [1] PARKINSON B W, SPILKER J J JR. Global Positioning System: Theory and Applications[M]// Washington: American Institute of Astronautics and Aeronautics, 1996
- [2] LANYI G E, ROTH T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations[J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 483-492
- [3] MA G, MARUYAMA T. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan[J]. *Annales Geophysicae*, 2003, **21**(10): 2083-2093
- [4] COCO D S, COKER C, DAHLKE S R, *et al.* Variability of GPS satellite differential group delay biases[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, **27**(6): 931-938
- [5] XIONG B, WANG Y Q, LI X L, *et al.* Constructing a global ionospheric TEC map with a high spatial and temporal resolution by spherical harmonic functions[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2022, **367**(9): 85
- [6] ZOU Yucong. TEC Reconstruction of Low Latitude Ionosphere Based on GNSS[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024
- [7] SARDÓN E, RIUS A, ZARRAOA N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations[J]. *Radio Science*, 1994, **29**(3): 577-586
- [8] LI Qiang, FENG Man, ZHANG Donghe, *et al.* Methods of estimation of GPS instrumental bias from single site's GPS data and comparative study of results[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, **44**(1): 149-156
- [9] XUE Weifeng, NI Yude. Optimization of Kalman filtering in estimating ionospheric delay[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(2): 273-278 (薛伟峰, 倪育德. Kalman 滤波估算电离层延迟的一种优化方法[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(2): 273-278)
- [10] WANG Jun. Monitoring and Application of GNSS Regional Ionospheric TEC[D]. Beijing: Institute of Geodesy and Geodynamics, Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2008
- [11] LI Lei, LI Jing, YANG Chen. Short-term ionospheric TEC prediction based on KF-LSTM combination model[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, **43**(10): 1020-1025
- [12] ANGHEL A, ASTILEAN A, LETIA T, *et al.* Near real-time monitoring of the ionosphere using dual frequency GPS data in a Kalman filter approach[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Cluj-Napoca: IEEE, 2008
- [13] CARRANO C S, ANGHEL A, QUINN R A, *et al.* Kalman filter estimation of plasmaspheric total electron content using GPS[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A10
- [14] QIAO J D, LIU Y, FAN Z Q, *et al.* Ionospheric TEC data assimilation based on Gauss-Markov Kalman filter[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(10): 4189-4204
- [15] TANG J, ZHANG S M, HUO X L, *et al.* Ionospheric assimilation of GNSS TEC into IRI model using a local ensemble Kalman filter[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(14): 3267

作者简介



李婧华(通信作者) 1983 年出生于河南, 现为中国科学院国家天文台应用天文学部高级工程师, 硕士生导师, 主要从事卫星导航与通信、电离层物理、电离层对卫星导航的影响等相关研究工作。

E-mail: jhli@bao.ac.cn