doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.03.022

# 基于数据融合的电离层VTEC反演 精度分析

## 郭承军1,2 吴玉飞1†

(1 电子科技大学电子科学技术研究院 成都 611731)(2 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

摘要 随着空间目标活动和卫星导航系统的增多,观测电离层数据的途径越来越多,探测 精度也越来越高.在Kalman 滤波的基础上,利用2016年的国际参考电离层(IRI-2016)模 型中电离层垂直电子含量(Vertical Total Electron Content, VTEC),结合地基反演得到 的VTEC值,利用数据融合算法提高电离层VTEC的近实时反演精度.针对加拿大附近 高纬度区域(130°W-150°W,60°N-70°N)、朝鲜、韩国和日本周边中纬度区域(115°E-135°E,32.5°N-42.5°N)、洪都拉斯和危地马拉附近低纬度区域(80°W-100°W,10°N-20°N)进行了观测,比较发现地基反演和数据融合技术得到的电离层VTEC精度都比较高, 但是数据融合得到的电离层VTEC在3个区域的精度都明显更好.该算法能够很好地应用 在地面基准站数量较多的区域,同时也能应用在地面基准站数量较少或者海洋、沙漠等布 设地面基准站不方便的区域,提高电离层VTEC的精度.

关键词 数据融合, Kalman滤波, IRI-2016, 地基GPS, 电离层VTEC 中图分类号: P171; 文献标识码: A

#### 1 引言

电离层是近地空间的一个重要组成部分,电离层的研究可以促进人们认识日地空间 系统,进而更好地为人类的空间活动服务,因此电离层的研究具有重要的意义.近年来, 随着人类空间活动和卫星通讯系统的增多,对电离层各种变化特征及规律(尤其是时空 变化)的监测和反演的需求也越来越强烈.由此引发了大家对电离层研究的热情,电离 层电子含量(Total Electron Content, TEC)作为电离层一个重要的观测量更是研究的热 点.虽然国内外在电离层TEC方面已经开展了大量的研究工作,但是随着电离层研究和 系统应用对电离层模型的精度和准确度要求的日益提高,如何进一步提高模型的精度和 适应性,成为研究电离层TEC时需要解决的问题.数据融合能够对多种来源的数据进行 综合利用,把各种时空上不规则分布的零散观测数据融合到背景模式中,从而实现观测 数据与背景模式的互补融合.数据融合是集成多源地理空间数据的新思路,其核心思想 是把不同来源、不同分辨率、直接或间接的数据加以集成,生成具有时间一致性、空间

<sup>2019-01-08</sup>收到原稿, 2019-02-27收到修改稿

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>wuyf0830@163.com

一致性和物理一致性的数据集. 简单地来说, 就是将多种来源的数据信息融合到一起, 进 而更准确地描述真实状态.

随着人类对电离层各类数据要求的不断提高,数据融合方法开始在电离层研究领 域蓬勃发展. Howe等<sup>[1]</sup>在电离层电子浓度经验模型的基础上,结合GPS观测数据,对 电离层电子浓度进行了最优估计. Zhang等<sup>[2]</sup>建立了一个中纬度电离层理论模型,并 同化了非相干散射雷达观测数据,讨论了中纬度地区电离层外驱动参数随时间的变 化情况. Schunk等<sup>[3]</sup> 基于Kalman滤波同化技术的资料同化分析系统,同化了卫星探 测、电离层测高仪、掩星以及地基GPS观测等多种数据源. Bust等<sup>[4]</sup>利用国际参考电离 层(International Reference Ionosphere, IRI)模型作为背景场,引入GPS、掩星、测高仪 等数据得到了电离层3维分析场. Nicolls等<sup>[5]</sup>在观测误差和背景场误差的基础上,进行 了4维变分同化,获得了连续变化的电离层分析场.

目前,利用GPS解算电离层垂直TEC (VTEC)已经成为监测电离层活动的主要技术,而国内外不同尺度、不同密度连续运行的GPS地面观测站网为电离层的局域、区域、全球特性研究提供了平台.为了提高电离层TEC反演的精度,把电离层模型和观测资料两种不同但又互补的信息融合在一起,产生更加逼近真实状态的结果<sup>[6-8]</sup>.为此,本文算法利用Kalman滤波将2016年IRI模型(IRI-2016)中的电离层电子含量和GPS双频地基反演的结果进行融合.结果表明利用该融合算法能够明显提高电离层VTEC的测量精度.对高纬、中纬和低纬区域观测数据的仿真表明该算法在3个区域都有很好的性能,同时该算法能够很好地应用在地面基准站数量较少或者海洋等区域,提高电离层VTEC的反演精度.

#### 2 IRI简介

目前存在的电离层模型基本上可以分为经验模型和理论模型.在实际的电离层时延改正中,经验模型是根据较长一段时间内收集到的观测资料建立起来的反映电离层变化规律的经验公式.这些经验模型一旦建立起来后就能长期使用,地球上绝大部分地区的用户在任一时间都能依据这些经验模型计算电离层延迟.最为著名的经验电离层模型就是IRI模型(1975)和Bent模型(1978),经验模型是基于大量观测数据构建的,这类方法对平静日电离层的空间分布具有较好效果.然而由于电离层的影响因素较多,许多因素又带有较大的随机性,而我们对各种因素相互间的关系、变化规律及其内部机制等又未完全搞清,从而使电离层延迟中产生了很多不规则变化,所以利用上述模型得到的电离层延迟的精度一般都不太好,在实际应用中精度偏低<sup>[9-10]</sup>.

利用GPS观测对电离层活动进行监测时,通常借助合理的电离层模型对垂直电离 层TEC进行参数化,不同的电离层模型有着不同的精度和延迟,也就有着不同的应用 范围,因而在不同的领域应用不同的电离层模型.IRI模型是一个目前应用非常广泛的 电离层经验模型,普遍使用在无线电波传播的研究和应用中.IRI模型是由空间研究 委员会(The Committee on Space Research, COSPAR)和国际无线电科学联合会(The International Union of Radio Science, URSI)在60年代末共同建立的,它的目标是利用 世界各地所有可用的卫星和地面观测资料建立一个标准的电离层经验模型.该模型基 于全球16个电离层探测仪的数据、非相干散射雷达的数据、火箭观测资料、卫星数据

3期

以及卫星顶面探测器的数据,综合多个大气参数模型,并引入了太阳活动的月平均参数和地磁活动指数,描述了无极光电离层在地磁宁静条件下的特定时间、特定地点上空50-2000 km范围内的电子密度、电子湿度、离子(O<sup>+</sup>、H<sup>+</sup>、He<sup>+</sup>、NO<sup>+</sup>、O<sup>+</sup><sub>2</sub>)温度、离子成分等.此外,由IRI给出的参数还包括TEC (用户可以选择积分高度的范围)以及扩展的F区、F1区和赤道垂直离子漂移,IRI模型提供了地磁平静条件下的电离层月平均状态.从2000年开始,IRI工作组就研究如何把全球电离层模型(Global Ionosphere Model, GIM)和其他空间无线电探测技术的观测结果导入IRI模型,以提高其精度.同时也考虑增加离子漂移、极光和极区电离层、磁暴效应等模型成分<sup>[11]</sup>.文章中我们选用IRI-2016进行分析计算.

## 3 载波相位平滑伪距反演电离层VTEC

GPS的出现使电离层的研究得到了飞速的发展,利用GPS观测数据不仅能够精确计 算并分析区域或全球电离层的分布特性以及它的结构特点,还能监测反演各种电离层的 活动变化,并可以发现并解释各种由于电离层影响造成的物理现象.为满足各种高精度 应用与科研的需要,必须充分考虑电离层实时变化的特点.目前,分析电离层特性最常 用的方法就是GPS双频地基反演算法,利用该算法能够较精确地测定电离层延迟.同时, 现在GPS卫星的数量较多,分布也大体均匀,在数小时内用2-4次曲面就能很好地拟合出 区域性电离层模型,时间尺度较短的不规则变化的幅度通常也较小,所以采用这类模型 时通常能取得较为理想的效果,与经验模型相比,精度大幅度提高<sup>[12-13]</sup>.

通过伪距观测方程和载波相位观测方程反演的电离层TEC,公式如下:

$$\text{TEC}_P = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} [(P_2 - P_1) + B^{\rm S} + B_{\rm R}], \qquad (1)$$

$$\text{TEC}_{\phi} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} [(L_1 - L_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - b^{\text{S}} - b_{\text{R}}], \qquad (2)$$

式中: TEC<sub>P</sub>为通过伪距观测方程反演得到的电离层TEC, TEC<sub>o</sub>为通过载波相位观测方 程反演的电离层TEC; 1、2表示两个载波频率; 上标S表示卫星, 下标R表示接收机;  $f_1$ 、  $f_2$ 为两个GPS信号频率;  $P_1$ 、 $P_2$ 分别为通过两个频率得到的观测伪距;  $B^{\rm S} = B_1^{\rm S} - B_2^{\rm S}$ 、  $B_{\rm R} = B_{{\rm R},1} - B_{{\rm R},2}, B_i^{\rm S}$ 、 $B_{{\rm R},i}$ 分别表示伪距观测中的卫星和接收机硬件延迟;  $L_1$ 、 $L_2$ 分 别为两个频率的载波相位;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 表示两个载波信号的波长;  $N_1$ 、 $N_2$ 表示对应信号频率 的载波相位整周模糊度;  $b^{\rm S} = b_1^{\rm S} - b_2^{\rm S}$ 、 $b_{{\rm R},1} - b_{{\rm R},2}, b_i^{\rm S}$ 、 $b_{{\rm R},i}$ 分别表示载波相位观测 中的卫星和接收机硬件延迟.

对于同一观测历元n,将TEC $_{P,n}$ 和TEC $_{\phi,n}$ 进行求差,该差值 $\Delta$ TEC $_n$ 可以表示为:

$$\Delta \text{TEC}_{n} = \frac{f_{1}^{2} f_{2}^{2}}{40.3(f_{1}^{2} - f_{2}^{2})} [(P_{2} - P_{1})_{n} + (B^{S} + B_{R})_{n} - (L_{1} - L_{2})_{n} + (\lambda_{1} N_{1} - \lambda_{2} N_{2})_{n} + (b^{S} + b_{R})_{n}],$$
(3)

令 $a_0 = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)},$  (3)式可以简化为:

$$\Delta \text{TEC}_{n} = a_{0}[(P_{2} - P_{1})_{n} + (B^{S} + B_{R})_{n} - (L_{1} - L_{2})_{n} + (\lambda_{1}N_{1} - \lambda_{2}N_{2})_{n} + (b^{S} + b_{R})_{n}].$$

$$(4)$$

设历元总数为N,利用递归算法,则第N个历元的 $\Delta$ TEC<sub>N</sub>可表述为:

$$\Delta \text{TEC}_N = \frac{1}{N} [(N-1)\Delta \text{TEC}_{N-1} + (\text{TEC}_{P,N} - \text{TEC}_{\phi,N})], \qquad (5)$$

将 $\Delta TEC_n$ 代入(5)式,得:

$$\Delta \text{TEC}_{N} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \{ a_{0} [(P_{2} - P_{1})_{n} + (B^{S} + B_{R})_{n} - (L_{1} - L_{2})_{n}] + a_{0} [(\lambda_{1}N_{1} - \lambda_{2}N_{2})_{n} + (b^{S} + b_{R})_{n}] \}.$$
(6)

将卫星和接收机在一天中的硬件延迟视为常量,上式可简化为:

$$\Delta \text{TEC}_{N} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} a_{0} [(P_{2} - P_{1})_{n} + (B^{S} + B_{R})_{n} - (L_{1} - L_{2})_{n}] + a_{0} [(\lambda_{1}N_{1} - \lambda_{2}N_{2}) + (b^{S} + b_{R})].$$
(7)

第N个历元的高精度平滑值TEC<sub>N</sub>为:

$$\operatorname{TEC}_{N} = \operatorname{TEC}_{\phi,N} + \Delta \operatorname{TEC}_{N}, \qquad (8)$$

联合(7)、(8)两式可得:

$$\text{TEC}_{N} = a_{0}(L_{1} - L_{2})_{N} + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} a_{0}[(P_{2} - P_{1})_{n} + (B^{S} + B_{R})_{n} - (L_{1} - L_{2})_{n}], \quad (9)$$

式中,除B<sup>S</sup>和B<sub>B</sub>以外,其他均为已知观测值或常量,(9)式可进一步简化为:

$$\text{TEC}_N = a_0 (L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_0 [(P_2 - P_1)_n - (L_1 - L_2)_n] + a_0 (B^{\rm S} + B_{\rm R}).$$
(10)

利用两个频率上伪距和载波相位的观测数据,采用载波相位平滑测距码提取电离 层TEC的方法,既可以消除模糊度参数又可以提高观测值精度,从而实现高精度电离层 绝对TEC的获取.

## 4 基于Kalman滤波的电离层VTEC融合算法

电离层数据融合的基本原理是在充分利用电离层背景信息和观测信息的基础上,利用模型数据和观测数据的误差,通过各类数学工具,给出一个背景模式和观测数据间整体偏差最小的估计结果<sup>[14-17]</sup>.本文以IRI-2016模型为背景,综合利用距离平方反比加权算法和Kalman滤波进行数据融合,从而实现GPS双频地基反演与IRI-2016模型的数据融合.

数据融合算法的基本步骤为:首先,通过GPS双频地基反演得到地面观测站在电离层中的穿刺点及穿刺点处的电离层VTEC,将GPS双频地基反演的数据与IRI模型数据做差,利用Kalman滤波将GPS双频地基反演的结果与IRI模型的数据进行融合,得到融合之后穿刺点处的VTEC误差修正值;再利用距离平方反比加权算法和各穿刺点处的VTEC差值得到待求位置处的VTEC误差值;最后,通过待求位置处的IRI背景场数据和VTEC误差得到待求位置的电离层VTEC.图1为基于Kalman滤波的电离层近实时VTEC融合流程图.



Fig. 1 Near real-time VTEC fusion flow chart based on the Kalman filter

利用Kalman滤波实现数据融合分为预测和更新两步,预测是根据k时刻的状态量预测k+1时刻的状态量,更新则是在已有观测数据的条件下对k+1时刻的状态预测值进行调整,得到k+1时刻状态量的最优估计值. 然后利用k+1时刻的状态估计量重新初始化,重复上述过程,完成所有时刻电离层VTEC的预测和更新.

预测过程可以分为两步,其中,状态一步预测为:

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k} = \boldsymbol{F} \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k} \,, \tag{11}$$

此外,一步预测协方差阵对预测的质量做了定量描述,其表达式为:

$$\boldsymbol{P}_{k+1|k} = \boldsymbol{F} \boldsymbol{P}_{k|k} \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}, \qquad (12)$$

(11)式说明了根据k时刻的状态估计值预测k + 1时刻状态的方法, (12)式对这种预测的质量优劣做了定量描述. 式中 $\hat{X}_{k+1|k}$ 是k + 1时刻的状态预测值,  $\hat{X}_{k|k}$ 是k时刻的状态分析值. **F**为k时刻到k + 1时刻线性状态变化关系, 其为一个3阶单位矩阵,  $P_{k+1|k}$ 是k + 1时刻的误差协方差矩阵,  $P_{k|k}$ 是k时刻的误差协方差矩阵, 初始误差设定

60 卷

为diag(1,1,1),  $\mathbf{Q}$ 是过程噪声方差矩阵, 其为对角矩阵, 并且在整个过程中都保持固定常数,  $\mathbf{Q} = \text{diag}(0.01, 0.01, 0.01)$ . 上面两式完成k时刻到k + 1时刻的状态预测, 将 $\hat{X}_{k+1|k}$ 作为k + 1时刻的背景场, 并计算k + 1时刻的误差协方差矩阵.

更新过程可以分为以下3步: 第1步为计算滤波增益矩阵,

$$\boldsymbol{K}_{k+1} = \boldsymbol{P}_{k+1|k} \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} [\boldsymbol{H} \boldsymbol{P}_{k+1|k} \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}]^{-1}; \qquad (13)$$

第2步进行状态更新,

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k+1} = \hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k} + \boldsymbol{K}_{k+1}\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}, \qquad (14)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1} = \boldsymbol{Z}_{k+1} - \boldsymbol{H} \hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k}; \qquad (15)$$

第3步实现协方差阵更新,

$$P_{k+1|k+1} = [I_n - K_{k+1}H]P_{k+1|k}.$$
(16)

 $\hat{X}_{k+1|k+1}$ 是k + 1时刻状态分析值, R为观测噪声方差, 是一个固定不变的对角矩阵, R = diag(10, 10, 10),  $K_{k+1}$ 是k + 1时刻的增益矩阵,  $Z_{k+1}$ 是k + 1时刻的观测值, 为GPS双频地基反演与IRI-2016之间的VTEC差值, H是观测算子, 为一个3阶单位矩阵,  $P_{k+1|k+1}$ 是k + 1时刻状态分析值的误差协方差矩阵,  $I_n$ 为单位矩阵. 更新过程利用k + 1时刻观测值调整背景场, 得到k + 1时刻的分析值和误差协方差矩阵, 并且作为下一时刻计算的基础.

#### 5 实验验证分析

基于韩国境内的3个地面观测站DAEJ、SUWN和YONS的观测数据,将GPS双频地 基反演得到的电离层VTEC和IRI-2016模型的电离层VTEC通过Kalman滤波进行数据 融合.图2所示为对纬度40°N、经度125°E上空电离层VTEC连续一周的观测数据,其 中包括仅利用GPS双频地基反演得到的电离层VTEC相对于IGS (International GNSS Service)提供数据的相对精度以及通过数据融合算法得到的电离层VTEC的相对精度.

从图2中可知在125°E、40°N的上空无论是地基反演还是数据融合算法所得到的结果都非常接近IGS发布的电离层VTEC数据,但是在某些时刻通过地基反演得到的电离层VTEC不够理想.相比之下,数据融合算法对电离层VTEC的反演效果更好,在保证电离层准实时反演的同时,能够很好地提升电离层VTEC的反演效果.

我们选取2012年12月3-5日3 d分别针对高纬、中纬、低纬区域进行观测,利用载波 相位平滑伪距反演和IRI-2016得到电离层VTEC数据,并基于Kalman滤波的数据融合算 法得到这3 d 04:00UT的电离层VTEC数据,最后计算了两种算法相对于IGS VTEC的误 差,如图3-5所示,其中(a)、(b)、(c)给出了2012年12月3-5日利用载波相位平滑伪距反演 得到的高纬、中纬、低纬区域电离层VTEC误差图,(d)、(e)、(f)为利用基于Kalman滤 波的数据融合算法得到的高纬、中纬、低纬区域电离层VTEC误差分布.

高纬度区域为130°W-150°W、60°N-70°N.利用加拿大境内的3个地面观测站FAIR、 INVK和WHIT,分别用GPS双频地基反演和数据融合算法得到加拿大附近高纬度区域 范围内的电离层VTEC.其中东经和北纬用正值表示,西经用负值表示.



图 2 地基反演和数据融合得到的VTEC相对精度对比

Fig. 2 Comparison of the relative accuracy of VTEC obtained from the foundation inversion and data fusion

通过图3比较发现两种算法在所观测的高纬度区域,都非常接近IGS给出的电离 层VTEC,数据融合算法所得到的电离层VTEC更加接近IGS所给出的值,所以在高纬度 区域数据融合的效果更好.



Fig. 3 Comparison of the errors of ground-based inversion ((a), (b), and (c)) and data fusion ((d), (e), and (f)) errors in the high-latitude regions on December 3, 4, and 5

中纬度区域为115°E-135°E、32.5°N-42.5°N.利用日本、韩国、中国境内AIRA、DAEJ、SHAO等9个地面观测站进行观测,分别用GPS双频地基反演和数据融合算法得到朝鲜、韩国和日本附近中纬度区域范围内的电离层VTEC.

通过图4对比中纬度区域朝鲜、韩国和日本附近区域两种算法的电离层残差,发现 在地面观测站数量较多的中纬度区域,由于电离层穿刺点的数量较多,两种算法得到的 电离层VTEC数据都很精确,但是相比而言融合算法得到的电离层VTEC精度明显更高.



图 4 中纬度区域12月3-5日地基反演((a)、(b)、(c))与数据融合((d)、(e)、(f))误差的对比

Fig. 4 Comparison of the errors of ground-based inversion ((a), (b), and (c)) and data fusion ((d), (e), and (f)) errors in the mid-latitude regions on December 3, 4, and 5

低纬度区域为80°W-100°W、10°N-20°N.利用洪都拉斯、危地马拉附近的3个地面观测站GUAT、MANA和SSIA,分别用GPS 双频地基反演和数据融合算法得到洪都拉斯、危地马拉附近低纬度区域范围内的电离层VTEC.

通过图5对比发现在低纬度区域范围内,数据融合算法的性能也优于地基反演算法. 某些区域由于距离3个地面观测站较远,反演精度较低,同时还因为部分区域位于海面上 空,受地理条件的限制,地面观测站的数量较少,IGS发布的电离层电子含量精度也相对 较低.在文章中选择的低纬观测区域附近由于存在大量海域,所以同高纬度区域和中纬 度区域相比较,其观测到的电离层VTEC误差较大.

通过对比图3、图4、图5中2012年12月3-5日地基反演算法和数据融合算法与IGS发 布的电离层VTEC,发现无论是在高纬、中纬还是低纬,两种算法在绝大部分区域都能 较好地得到电离层VTEC,相较而言数据融合算法的性能明显好于地基反演算法.在地 面观测站数量较多的区域,由于电离层穿刺点的数量较多,两种算法的反演精度都明显 高于地面观测站数量少的区域.在某些区域由于地理条件的限制,造成地面观测站数量 较少,利用Kalman滤波将IRI-2016模型中的电离层电子含量和GPS双频地基反演的结 果进行融合能够很大程度地提升所得电离层VTEC的精度.



图 5 低纬度区域12月3-5日地基反演((a)、(b)、(c))与数据融合((d)、(e)、(f))误差的对比

Fig. 5 Comparison of the errors of ground-based inversion ((a), (b), and (c)) and data fusion ((d), (e), and (f)) errors in the low-latitude regions on December 3, 4, and 5

## 6 结论

本文提出一种利用Kalman滤波将IRI-2016模型中的电离层电子含量和GPS双频地 基反演的结果进行融合的算法.通过实验验证分析发现GPS双频地基反演和数据融合两 种算法在高纬、中纬和低纬区域,都能够较好地反演地面测站上空的电离层电子含量, 相比较而言,数据融合算法表现出来的性能更好.通过对加拿大高纬度区域、洪都拉 斯、危地马拉附近低纬度区域上空电离层电子含量的反演,该算法能够很好地探测这些 区域上空的电离层电子含量,在地面基准站数量较少或者在海面、沙漠等布设地面基准 站不方便的情况下,利用基于Kalman滤波的融合算法能够很好地弥补地面基准站不足 的缺点,提高电离层电子含量反演的精度.与此同时,通过对朝鲜、韩国和日本附近中 纬度区域的反演,发现该算法在地面基准站数量较多的情况下也有比较好的性能,能够 提升该区域电离层的反演精度.基于Kalman滤波的数据融合算法在3个不同纬度区域都 表现出了更好的性能,能够有效地提高电离层反演的精度,并运用在实际当中.

#### 参考文献

- [1] Howe B M, Runciman K, Secan J A. RaSc, 1998, 33: 109
- $\left[2\right]$ Zhang S R, Oliver W L, Fukao S, et al. JGRA, 2001, 106: 12821
- [3] Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J, et al. RaSc, 2004, 39: RS1S02
- $\left[4\right]$ Bust G S, Garner T W, Gaussiran II T L. JGRA, 2004, 109: A11312
- $[5]\,$  Nicolls M J, Rodrigues F S, Bust G S, et al. JGRA, 2009, 114: A10316
- [6] 蔡昌盛, 李征航, 赵晓峰. 测绘工程, 2003, 12: 13
- [7] 袁运斌, 欧吉坤. 自然科学进展, 2003, 13: 885
- [8] Houtekamer P L, Mitchell H L. MWRv, 1998, 126: 796

- [9] Bilitza D. RaSc, 2001, 36: 261
- [10] Bilitza D. AdSpR, 2004, 33: 838
- [11] Bilitza D, Altadill D, Zhang Y L, et al. JSWSC, 2014, 4: A07
- [12] 章红平. 基于地基GPS的中国区域电离层监测与延迟改正研究. 上海: 中国科学院研究生院(上海天文台), 2006
- [13] 章红平,韩文慧,黄玲,等.武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37: 1186
- [14] Chen Z W, Zhang S R, Coster A J, et al. JGRA, 2015, 120: 3118
- [15] Galkin I A, Reinisch B W, Huang X, et al. RaSc, 2012, 47: RS0L07
- [16] Jakowski N, Mayer C, Hoque M M, et al. RaSc, 2011, 46: RS0D18
- [17] 乐新安, 万卫星, 刘立波, 等. 科学通报, 2007, 52: 2180

# Inversion Accuracy Analysis of Ionospheric VTEC Based on Data Fusion

#### GUO Cheng-jun<sup>1,2</sup> WU Yu-fei<sup>1</sup>

(1 Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

(2 National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

**ABSTRACT** With the increase of space target activities and satellite navigation systems, there are more and more ways to observe ionospheric data, and the detection accuracy is also higher and higher. Based on the Kalman filter, this paper uses the IRI-2016 ionospheric vertical total electron content (VTEC), and combined with the VTEC value obtained from the ground-based inversion, and the data fusion algorithm to improve the near-real-time inversion accuracy of the ionospheric VTEC. This paper observes the high-latitude area near Canada (130°W–150°W, 60°N–70°N), the middle-latitude area around North Korea, South Korea, and Japan (115°E–135°E, 32.5°N–42.5°N), the low-latitude area near Honduras and Guatemala  $(80^{\circ}W-100^{\circ}W, 10^{\circ}N-20^{\circ}N)$ , and finds that the ionospheric VTEC accuracy obtained by the ground-based inversion and data fusion techniques is very high. However, the ionospheric VTEC obtained by data fusion is significantly better in the three areas. The algorithm can be well applied in the area with a large number of ground reference stations, and in the area with a small number of ground reference stations or in the area where it is inconvenient to lay ground reference stations such as oceans and deserts, and improve the accuracy of the ionospheric VTEC.

**Key words** data fusion, Kalman filter, IRI-2016, foundation inversion, ionospheric VTEC