0254-6124/2011/31(6)-754–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Lei Xiaolong, Fu Yang, Xue Zhengang, Du Xiaoyong, Yan Wei, Lu Xu. Validation of global VTEC maps constructed using data derived from COSMIC constellation. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(6): 754-764

利用 COSMIC 数据构建的全球垂直 TEC 图的验证研究

雷霄龙[1,2] 符 养[2] 薛震刚[2]
杜晓勇[2] 严 卫[1] 鲁 旭[1]

1(解放军理工大学气象学院 南京 211101)

2(北京应用气象研究所 北京 100029)

摘 要 在日固坐标系 (地磁纬度和地方时) 下, 累积地方时过去 24 h 的 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate) 观测资料, 通过对 110∼750 km 高度范围内的电子密度进行数值积分得到各掩星点的垂直 TEC 值, 进而利用 Kriging 方法插值产生近实时的全球地方时 MAGLat 2.5°×2 h 的 COSMIC TEC 图. 利用 2008 年 1 月 1 日至 2010 年 6 月 30 日共 30 个月的 COSMIC 数据, 逐日构建 COSMIC TEC 图, 将其与全球导航卫星系统服务组织 (International GNSS Service, IGS) 发布的全球电离层 TEC 图 (Global Ionospheric Maps, GIMs) 以及 OSTM/JASON-2 卫星高度计观测值分别进行比对, 证明利用 COSMIC 掩星资料构建全球电离层垂直 TEC 图是可行的.

关键词 电离层延迟改正, COSMIC, 全球 TEC 图, Kriging 方法

中图法分类号 P 352

Validation of Global VTEC Maps Constructed Using Data Derived From COSMIC Constellation

LEI Xiaolong[1,2] FU Yang[2] XUE Zhengang[2]

DU Xiaoyong[2] YAN Wei[1] LU Xu[1]

1(*Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 211101)

2(*Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing* 100029)

Abstract The construction of reliable global maps of vertical total electron content of the Ionosphere (Vertical TEC or VTEC Maps) is a useful but challenging task. A new technological route to construct global VTEC maps has been raised by us that COSMIC RO data points are collected during the past 24 hours in the sun-fixed coordinate system (local time and geomagnetic latitude) and then vertical TEC values within height range from 110 km to 750 km are calculated by numerical integration of electron density profiles at these RO points after quality control. At last, ordinary Kriging

2010-09-20 收到原稿, 2011-08-29 收到修定稿

E-mail: eagle_lxl@126.com

method is adopted to construct Global COSMIC TEC Maps with a grid resolution of MAGLat 2.5°× 2 h. Comparisons during the interval from DOY (Day of Year) 001, 2008 to 181, 2010 between Global COSMIC TEC Maps and IGS GIMs, from DOY 194, 2008, to 181, 2010 between Global COSMIC TEC Maps and OSTM/JASON-2 observations have been made, and differences are calculated for different seasons, local time and geomagnetic latitudes. It proves that COSMIC TEC Maps have good agreements with IGS GIMs and OSTM/JASON-2 observations, so COSMIC TEC Maps are accurate enough to be used to correct the ionospheric delay in GNSS systems. With further improvement on RO theories and commencement of new RO constellations in future, the quality and quantity of ionospheric RO data will be raised greatly with no doubt. Hence, it will be a much promising technology to apply ionospheric RO data to correct the ionospheric delay for GNSS systems.

Key words Ionospheric delay correction, COSMIC, Global TEC Maps, Kriging

1 引言

构建可靠的全球垂直 TEC (Vertical TEC) 图是非常重要的. 利用 TEC 图可以研究和考察电离层的结构和变化特征. 因此, TEC 图的用途十分广泛, 例如, 监测空间天气事件 [1], 尤其是灾害性空间天气, 像磁暴 [2−3] 等的发生、发展和演化, 监测地震前电离层异常, 为地震的短期预报提供参考 [4−6], 改正电离层延迟以提高 GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球导航卫星系统) 导航精度 [7−8] 和改善星载高度计的测量精度 [9], 以及验证理论或经验电离层模型的预报效果, 为改进电离层模型提供依据 [10] 等.

同时, 构建全球垂直 TEC 图又是一项非常困难的工作. 原因其一, 在于缺乏全球覆盖的电离层观测资料, 空间电离层观测受卫星轨道限制, 无法提供大范围的观测数据, 地基电离层观测受到地表条件的限制, 例如, 目前地基 GNSS 测站主要分布在北美和欧洲部分, 海洋上和南半球测站相对很少. 其二, 由于 GNSS 信号的载波相位和伪距分别受到模糊项和码偏差的干扰, GNSS 观测无法直接给出斜 TEC 值 [11], 因此利用 GNSS 斜 TEC (Slant TEC) 观测值重构垂直 TEC 图的技术尚需改进. 其三, GNSS 卫星轨道高度达两万公里, 卫星信号沿斜线传输至地面台站经过的距离更长, 需经过等离子体层、电离层、中高层大气和低层大气, 而目前对等离子体层和电离层物理机制的了解尚不十分清楚, 尤其是电离层随时间和空间存在变化, 特别是靠近赤道异常区 [12] 或处于磁暴期间, 因此地基电离层观测从斜 TEC 向垂直 TEC 的转化相当复杂 [13].

虽然目前利用观测资料构建垂直 TEC 图已经取得了显著的进展 [14−18], 但是如果构建全球电离层垂直 TEC 图, 观测数据的全球覆盖依旧是影响 TEC 图精度的最大问题之一. 因此, 对电离层进行长期稳定的全球性观测变得非常迫切, 而其恰恰是电离层掩星探测技术的优点所在. 该技术能够测量电离层电子密度的全球分布, 具有覆盖范围广、全天候观测、高垂直分辨率、高精度等突出优点 [19−23]. 目前, 最具代表性的电离层掩星观测系统是 COSMIC 系统 [24−27], 自 2006 年 4 月开始, COSMIC 系统每天提供约 2000 条 60∼800 km 高度的电子密度廓线, 可有效解决目前全球分布的电离层观测数据匮乏的问题, 且观测数据的精度很高 [28], 因此可以尝试用于构建电离层垂直 TEC 图.

COSMIC 系统低轨卫星共 6 颗, 其初始高度约为 515 km, 发射后的 17 个月中, 这 6 颗卫星逐步提升进入 800 km 的设计轨道. 为避免卫星高度不统一带来误差, 本文选取的 COSMIC 观测数据日期始于 2008 年 1 月 1 日, 止于 2010 年 6 月 30 日, 共 30 个月, 采用普通 Kriging 插值方法逐日建立全球 TEC 图 (简称 COSMIC TEC 图), 与 IGS GIMs 进行比对, 以便研究这种新的全球 TEC 图用于 GNSS 导航的可行性. OSTM (Ocean Surface Topography Mission)/JASON-2 作为 JASON 系列的第二颗卫星, 其上搭载的 Posidon-3 双频卫星高度计可以观测轨道高度 1336 km 至海面的垂直 TEC[29], 具有比 JASON-1 卫星高度计更高的观测精度 [30]. 因此, 选取 OSTM/JASON-2 卫星自发射以来至 2010

年 6 月 30 日的观测数据来验证 COSMIC TEC 图的精度. 本文分别研究以上两种比对试验的偏差随季节、晨昏和地磁纬度的分布, 发现偏差很小, 从而证明利用 COSMIC 掩星资料构建全球电离层垂直 TEC 图是可行的.

2 COSMIC TEC 图构建方法

2.1 数据预处理

COSMIC 资料存储中心 (CDDAC) 提供的电离层掩星电子密度廓线数据, 每一条电子密度廓线记录一次掩星事件发生的时间、经度、纬度和每层高度上的掩星平面方位角、电子密度、路径上的 TEC 及 GPS 与低轨卫星等参数.

COSMIC 系统反演电子密度廓线时, 在电离层上层接近低轨卫星 800 km 轨道高度处存在奇点, 会造成计算上的误差. 因此本文选择电子密度廓线的高度上限为 750 km. 此外, 考虑到电离层 E 层常会出现极大的扰动, 而且反演得到的电离层底层电子密度廓线数据存在负值的不在少数, 因此本文选择电子密度廓线的高度下限为 110 km.

COSMIC 原始观测资料受仪器、气象和空间环境等因素的影响, 导致部分电子密度廓线产品的品质不佳, 因此对其作进一步的处理之前必须进行质量控制. 本文选用柯孝聪 [31] 提出的 COSMIC 资料质量控制方法, 定义如下三个筛选条件:

(1) $h_{\mathrm{m}}F_2$ 存在于 150~450 km 高度区间;

(2) 490 km 和 420 km 高度上的斜率

$$S=\frac{N_{\mathrm{e},490}-N_{\mathrm{e},420}}{H_{490}-H_{420}},$$

在 $-9<S<-0.02$ 区间. 其中, N_{e} 为电子密度, H 为海拔高度;

(3) 电子密度廓线 N_{e} 进行 9 点滑动平均后, 各点的电子密度值与原值之间平均偏差

$$M_{\mathrm{D}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\left|(N_{\mathrm{e},i}-\overline{N}_{\mathrm{e}})/\overline{N}_{\mathrm{e}}\right|\right]}{N}<3.$$

满足上述三个条件的电子密度廓线, 进行 5 点滑动平均之后, 如果能够满足 110 km 以上的电子密度全部大于零则进入数据处理流程, 否则将此条廓线予以删除.

经过质量控制之后, 每天约有 30% 左右的电子密度廓线被滤去, 而剩下的 70% 左右电子密度廓线当中又有部分廓线的最高高度小于 750 km (从 668 km 到 749 km 不等), 这些廓线的数目占质量控制后电子密度廓线的比重约为 10%~30%. 一般来说, $h_{\mathrm{m}}F_2$ 以上的电子密度 N_{e} 较小, 同时考虑到需要维护电子密度廓线数据的全球均匀分布, 因此将最高高度低于 750 km 的电子密度廓线加以保留.

电离层延迟量与 TEC 的关系可由下式给出:

$$\Delta t_{\mathrm{g}}=\Delta\rho_{\mathrm{ion}}/c=\frac{40.28}{f^2c}D_{\mathrm{TEC}}\,(\mathrm{s})\,. \tag{1}$$

式中, Δt_{g} 为电离层延迟, f 为 GNSS 信号的频率, c 为光速, D_{TEC} 为 GNSS 信号传输路径上的总电子含量. 式 (1) 表明, 对 GNSS 的固定频率而言, 信号传输路径上的电离层延迟与 TEC 成线性关系, 电离层延迟改正也就是尽可能精确地计算传播路径上的 TEC. 而 TEC 与电子密度 N_{e} 关系为

$$D_{\mathrm{TEC}}=\int N_{\mathrm{e}}\mathrm{d}s. \tag{2}$$

COSMIC 电子密度廓线的垂直分辨率很高, 几乎每隔 1 km 就提供一组电子密度数据, 因此本文对电子密度廓线按高度进行样条插值后, 使用梯度法对其进行数值积分来计算 TEC. 由于掩星点随着高度下降其位置会逐渐偏移, 掩星观测提供的是空间一条斜线上的电子密度廓线, 因此通过数值积分计算出的是斜 TEC (记为 STEC). 比照 GPS TEC 的处理方法, 本文将 110 km 高度处的位置坐标作为观测点坐标, 引入映射函数将 110~750 km 高度范围内的斜 TEC 转化为垂直 TEC (记为 VTEC).

Wen 等 [13] 研究表明, 当地面台站的卫星天顶角 Z 小于 30° 时, 无论是采用薄层模型 [32] (Single Layer Model, SLM) 还是采用 Chapman 模型 [33] 或是 Chapman 模型上叠加一个等离子体层模式电子密度剖面 (例如 Gallagher 模式 [34]), 计算得到的映射函数之间几乎没有差别. 本文以 110 km 处的电离层掩星点类比地面台站, 则 750~110 km 之间电离层掩星点连线与垂直方向的夹角即为 Z. 选取 2009 年 1 月、4 月、7 月和 10 月共 123 天经质量控制后总计 150 682 条电子密度廓线数据来计算电离层掩星观测点的天顶角 Z, 统计结果如图 1 所示, 60% 以上的天顶角小于 5°, 95% 以上的天顶角小于 15°. 因

此本文采用薄层模型计算映射函数, 即

$$M(Z)=\frac{1}{\cos Z'}=\frac{1}{\sqrt{1-\left[\dfrac{(R_{\rm e}+110)\sin Z}{R_{\rm e}+h_{\rm ipp}}\right]^2}}. \quad (3)$$

式 (3) 中 Z 和 Z' 分别为地面台站 (此处对应 110 km 高度处的掩星点) 和穿透点处的天顶角, $R_{\rm e}$ 为地球半径, $h_{\rm ipp}$ 为穿透点高度. 薄层模型中, 当天顶角较小时, 穿透点高度的变化几乎不会带来映射函数精度上的变化, 这里取经验值 350 km 作为穿透点高度. 如图 1 所示, 式 (3) 计算得出的映射函数 96% 以上分布在 [1, 1.02] 区间内, 表明本文所指的天顶角 Z 对斜 TEC 向垂直 TEC 转化的影响非常小.

获得映射函数后, 采用梯度法对每条电子密度廓线 110 km (如低于 750 km, 积分上限至廓线的最高高度处) 至 750 km 之间的电子密度 $N_{\rm e}$ 进行数值积分, 利用下式即可计算出 110 km 高度处的垂直 TEC, 即

$$D_{\rm VTEC}=\frac{D_{\rm STEC}}{M(Z)}. \quad (4)$$

GNSS 卫星的高轨道使得 GNSS 地基探测中斜 TEC 向垂直 TEC 转化时, 不仅需要考虑电离层, 还需要考虑等离子体层对整层 TEC 的贡献问题 [13], 而本文提出的电离层掩星数据重建 TEC 图方法中, 涉及的空间高度范围为 110~750 km, 仅局限在电离层. 因此本文映射函数的计算问题较 GNSS 地基探测简单很多.

2.2 COSMIC TEC 网格化插值

2.2.1 Kriging 插值构建 TEC 网格

如何利用上述 COSMIC 掩星点的垂直 TEC 值构建垂直全球 TEC 图, 实质上表现为多变量插值方法的使用问题. 长期以来, 对利用观测资料进行 TEC 图的构建问题进行了大量研究. 尽管插值方法很多, 但是其中只有很少的几种方法, 例如 Kriging 方法, 可以被用来处理 TEC 数据 [35]. Kriging 方法从统计的意义上说, 是从变量相关性和变异性出发, 在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计的一种方法; 从插值角度讲, 是对空间分布的散乱、稀疏的数据求线性最优、无偏内插估计的一种方法. 该方法能够成功地解决数据点稀少所带来的采样过疏问题 [36], 其最吸引人的优点之一是可以给出每个点的估计偏差. 目前 Kriging 方法已广泛应用于采矿、地质和气象水文等领域 [37−38]. 与实测数据的比较表明, Kriging 方法优于最近距离插值、反距离加权插值等线性插值方法, 也优于样条插值法和趋势面法 [39].

Stanislawska 等引入等效电离层距离, 应用改进的 Kriging 方法分别对欧洲地区的 TEC 和中低纬度 f_0F_2 参数进行了区域重构 [40−41]. Wielgosz 等采集美国俄亥俄州 (Ohio) 5 个地基 GPS 测站的数据, 利用 Kriging 方法和多元二次多项式法重构了区域 TEC 图, 并对二者进行比较, 得到了理想的结果 [42]. Orus 等利用 Kriging 方法对 IGS 数据分析中心 UPS 发布的全球电离层 TEC 图加以改进, 使得 RMS 偏差降低了 16%[43]. Wang[44] 利用中国及周边地区 28 个 GPS 接收台站的数据, 通过采用 Kriging 方法重构区域电离层, 实现了区域电离层的短期预报. Mao 等 [45] 选取 IGS 全球 GPS 台网和中国地壳形变监测网的数据, 研究利用 Kriging 方法重构中国中北部和周边的区域 TEC 图, 并就 Kriging 方法与就近插值

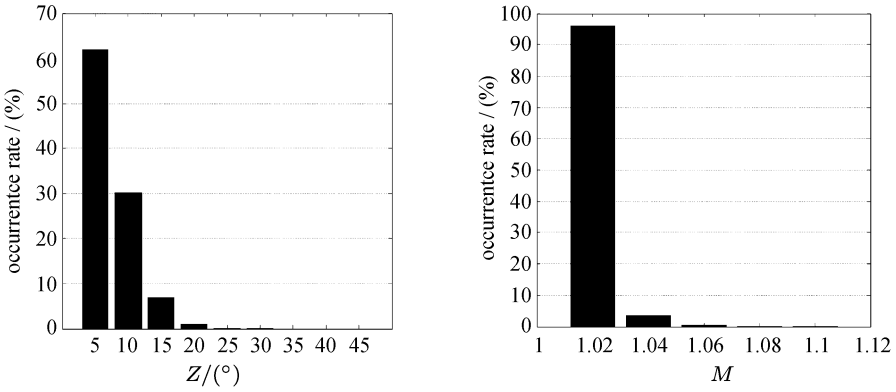

图 1 COSMIC 电离层掩星观测天顶角 (a) 和映射函数 (b) 发生率分布直方图

Fig. 1 Histogram of distribution of zenith angle (a) and mapping function (b)

算法和多项式回归算法 (5 阶) 进行了比较.

本文需要构建全球范围内的 TEC 网格图, 考虑到电离层的各向异性结构, 因此, 采用普通 Kriging 方法时, 对 TEC 网格的两个坐标分别建立变异函数, 并计算其各自的参数.

2.2.2 网格坐标选取

上述利用 Kriging 方法重构 TEC 图的各项研究大多数采用地固坐标系, 实际上, 在日固坐标系下, 电离层的变化相当缓慢, 可以认为电离层状态 24 h 近似不变, 因而可以累积到比地固坐标系中更多的数据点, 从而可以获得插值准确度更高的 TEC 图. Wielgosz[42] 等在其研究中尝试分别采用日固坐标系和地固坐标系来研究 Kriging 方法的插值结果, 证明日固坐标系下构建 TEC 具有很高的精度. Mannucci 等 [46] 为了提高 WASS 系统的精度, 提出利用日固坐标系对 WASS 系统的观测数据进行处理. 本文为解决 COSMIC 掩星数据点全球覆盖稀疏的问题, 获得近实时的全球电离层 TEC 图, 也选择采用日固坐标系.

需要指出的是, 尽管这里采用日固坐标系来累积 COSMIC 掩星观测资料, 但是 COSMIC 掩星观测点的分布仍旧不是特别均匀, 依然存在地磁纬度高纬和地方时夜间区域数据较少的问题, 这必然会给高纬地区和夜间时段 TEC 的插值结果带来一定的误差. 下一代掩星系统的出现, 会带来足够丰富且全球分布情况更优的掩星数据, 有望解决这一问题.

3 结果和分析

由于 COSMIC 系统低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星轨道高度的限制和电离层底层扰动的影响, 电子密度廓线的积分高度被局限在 110~750 km 之间. 而 GNSS 卫星的轨道高度则远高于 750 km, 以 GPS 系统为例, 其轨道高度为 20 200 km 左右, 因此 COSMIC TEC 图构建过程中存在系统性偏差. 理论上, 根据查普曼层计算的电子密度剖面所估计的垂直电子密度分布的大致情况为, 60~800 km (60~1000 km, 60~1500 km) 的电离层区域分布着 91.6% (96.9%, 99.7%) 的电子 [33], Lunt 等 [47−48] 通过模式计算得出, 在太阳活动低年, 等离子体层对垂直 TEC 的贡献在白天约为 10%~20%, 在晚上可高达 50%, 绝对值的欧洲部分约为 2 TECU, 美洲部分约为 0.5 TECU, Otsuka 等 [49] 通过对日本地基 GPS 观测网 (Earth Observation Network, GEONET) 和 MU 雷达的观测数据进行比对得出, 贡献约为 3~4 TECU. Balan 等 [50] 通过观测值和模式的比对得出, 在太阳活动高年, 等离子体层对垂直 TEC 的贡献最小为 12%, 最大为 60%, 绝对值约为 7~11 TECU. 上述区域比对的结果都说明等离子体层对垂直 TEC 的贡献显著. 而且, Yue 等 [51] 研究表明, COSMIC 电子密度廓线反演过程中由于引入电子密度分布局部球对称假设, 使得中低纬度和电离层底层 (E 层和 F_1 层) 存在电子密度廓线产品反演误差较大的区域. 因而要考察 COSMIC TEC 图是否可用于 GNSS 导航以及 COSMIC TEC 图在全球范围内的精度, 必须经过实际的比对.

本文对 COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 以及 OSTM/JASON-2 卫星的高度计观测值进行比对, 并按不同季节、地磁纬度、地方时分别进行偏差的统计分析. 数据处理方法如下.

(1) 将南半球的 11, 12, 1 月和北半球的 5, 6, 7 月作为夏季, 将南半球的 5, 6, 7 月和北半球的 11, 12, 1 月作为冬季, 将 2 至 4 月和 8 至 10 月作为春秋季.

(2) 将地磁纬度 ϕ 分为低纬 ($|\phi| < 30°$)、中纬 ($30° \leqslant |\phi| \leqslant 60°$) 和高纬 ($|\phi| > 60°$).

(3) 将地方时分为白天 (08:00 LT−16:00 LT)、夜间 (20:00 LT−04:00 LT) 和晨昏 (04:00 LT−08:00 LT 以及 16:00 LT−20:00 LT).

本文采用的误差计算公式如下.

相对偏差:

$$\overline{R(\Delta D_{\mathrm{TEC}})} = \frac{D_{\mathrm{TEC,I/J}}(i) - D_{\mathrm{TEC,C}}(i)}{D_{\mathrm{TEC,I/J}}(i)}. \quad (5)$$

绝对偏差:

$$\Delta D_{\mathrm{TEC}} = D_{\mathrm{TEC,I/J}}(i) - D_{\mathrm{TEC,C}}(i). \quad (6)$$

其中, $D_{\mathrm{TEC,I/J}}$ 为 IGS GIMs 或 OSTM/JASON-2 的 TEC 值, $D_{\mathrm{TEC,C}}$ 为 COSMIC TEC 值.

平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i. \quad (7)$$

均方差 (RMSE):

$$E_{\rm rms}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i^2}\,. \tag{8}$$

3.1 COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 的比较

IGS 发布的全球 TEC 图 (IGS GIMs) 以 IONEX 网格的形式在三维或二维地理坐标系下, 以 UT 时 2 h 为间隔, 以纬度 2.5°、经度 5° 的网格分辨率, 存放全球的 TEC 图及其精度数据, 目前被国际广泛应用, 往往被选择用来验证其他区域或全球电离层 TEC 模型. 值得注意的是, IGS 所属的各数据分析中心 (IAAC, 目前为 8 个) 选择不同的方法来构建 GIMs, 这些 TEC 产品的准确度各不相同, IGS 中心采用加权的方法将各数据分析中心的 GIMs 结合起来, 发布的全球 TEC 最终产品(Final IGS GIMs) 具有比单个数据分析中心的 GIMs 更高的准确度 [52−53].

本文选用 IGS GIMs 最终产品来验证 COSMIC 掩星数据经插值获得的全球 TEC 图的准确度. 由于采用日固坐标系处理 COSMIC 数据, 因此比对之前, 需要先从 IGS GIMs 中提取出地磁纬度和地方时坐标系下的 TEC 图.

表 1 给出 COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 偏差的全球统计结果, 可以发现两者的偏差在可控范围内. 图 2 为 30 个月 COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 比对的偏差统计分布结果, 绝对偏差峰值区基本在 ±15° 范围内, 数值最大可达 12 TECU, 沿磁赤道呈南北对称分布, 双峰结构明显, 与中低纬电离层的双峰形态的位置大致重合, 时间范围为 08:00 LT−20:00 LT, 即

表 1 COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 的偏差统计

Table 1 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and IGS GIMs

相对偏差		绝对偏差/TECU	
平均值	RMSE	平均值	RMSE
0.33	0.46	3.41	4.79

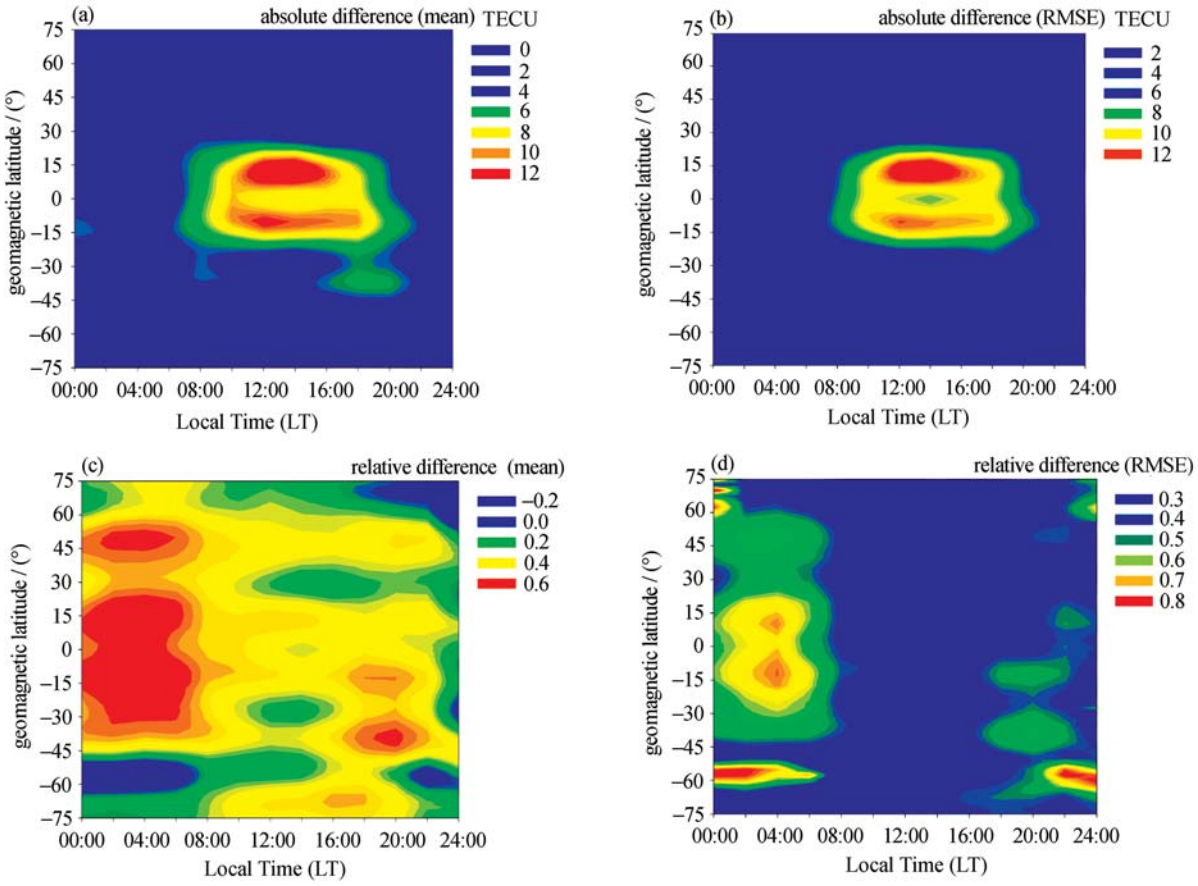

图 2 COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 绝对偏差和相对偏差分布

Fig. 2 Distribution of absolute and relative difference between COSMIC TEC Maps and IGS GIMs

白天和黄昏时段. 从所处位置上看, 如此巨大的绝对偏差除 GNSS 卫星和 LEO 卫星轨道高度差因素之外, 可能主要是由 COSMIC 反演误差所致. 中高纬度地区绝对偏差在 0~4 TECU 范围内, 明显小于低纬和磁赤道区域. 相对偏差峰值区的分布从地磁纬度看, 与绝对偏差类似, 但是时间范围为 00:00 LT−08:00 LT, 即夜间和早晨时段. 可见绝对偏差和相对偏差的峰值区所处时段呈反位相关系, 因此, 虽然白天时段低纬和磁赤道地区绝对偏差较大, 但相对偏差较小, 而夜间时段虽然相对偏差较大, 但是绝对偏差却很小. 需要指出的是, 图 2(d) 中高纬出现小区域的 80% 左右的较大相对偏差, 可能是由于相应位置 COSMIC 掩星点较少而导致插值时出现较大的误差所致, 并不代表实际的误差.

下面对 COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 的偏差按不同季节、地磁纬度、地方时来进行统计分析.

COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 分季节进行比对, 偏差的统计结果见表 2, 绝对偏差在夏季最大, 冬季最小, 春秋季介于两者之间, 而相对偏差也有类似规律, 在夏季最小, 冬季最大, 春秋季介于两者之间.

COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 按照不同地方时进行比较, 偏差的统计结果见表 3, 相对偏差的 RMSE 白天最小, 夜间最大, 晨昏时段介于两者之间, 相对偏差的平均值随地方时的变化不明显. 绝对偏差白天最大, 夜间最小, 晨昏介于两者之间.

COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 分不同地磁纬度进行比对, 偏差的统计结果见表 4, 无论相对偏差还是绝对偏差, 从低纬到高纬均依次减小.

3.2 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值对比

OSTM/JASON-2 卫星搭载的 Poseidon-3 高度计, 两个工作频率分别为 13.575 GHz (Ku 波段) 和 5.3 GHz (C 波段)[29], 本文采用 OSTM/JASON-2 Ku 波段电离层延迟观测值来计算 TEC, 剔除冰面和陆地上的数据而只选取海洋上的数据点. 由于目前海洋上的电离层观测站非常少, 因此 OSTM/JASON-2 观测的电离层延迟数据非常宝贵.

OSTM/JASON-2 卫星于 2008 年 6 月 20 日发射, 正式的数据记录开始于 2008 年 7 月 12 日, 因此本文选取 2008 年 7 月 12 日至 2010 年 6 月 30 日的数据来进行 OSTM/JASON-2 观测值和 COSMIC TEC 图的比对. 方法是利用 COSMIC TEC 图, 使用内插法来得到 OSTM/JASON-2 观测点位置上的 TEC 值, 将其与此点处 OSTM/JASON-2 的观测值进行对比. 本文选用的内插法是 WAAS 系统推荐的 Junkin 方法 [54].

表 5 给出的是 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值偏差的统计结果, 可以发现两者的偏差很小.

下面对 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值的偏差分不同季节、地磁纬度、地方时来进行统计分析.

COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值分

表 2 不同季节 COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 的偏差统计

Table 2 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and IGS GIMs for different seasons

	相对偏差		绝对偏差/TECU	
	平均值	RMSE	平均值	RMSE
夏季	0.34	0.42	3.98	5.15
冬季	0.36	0.50	2.84	4.13
春秋季	0.32	0.46	3.40	4.95

表 3 不同地方时 COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 的偏差统计

Table 3 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and IGS GIMs for different local time

	相对偏差		绝对偏差/TECU	
	平均值	RMSE	平均值	RMSE
白天	0.33	0.37	4.54	5.95
夜间	0.31	0.52	2.37	3.48
晨昏	0.37	0.46	3.52	4.74

表 4 不同地磁纬度 COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 的偏差统计

Table 4 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and IGS GIMs for different geomagnetic latitudes

	相对偏差		绝对偏差/TECU	
	平均值	RMSE	平均值	RMSE
低纬	0.40	0.48	4.96	6.45
中纬	0.31	0.45	2.62	3.42
高纬	0.22	0.43	1.70	2.65

季节进行比较, 偏差的统计结果列于表 6, 绝对偏差在夏季最大, 冬季最小, 春秋季介于两者之间, 而相对偏差则在夏季最小, 冬季最大, 春秋季介于两者之间.

COSMIC TEC 图和 OSTM/JASON-2 观测值分不同地方时进行比较, 偏差的统计结果列于表 7, 相对偏差的 RMSE 白天最小, 夜间最大, 晨昏时段介于两者之间, 相对偏差的平均值随地方时的变化不明显. 绝对偏差白天最大, 夜间最小, 晨昏时段介于两者之间.

COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值分不同地磁纬度进行比对, 偏差的统计结果列于

表 5 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值的偏差统计

Table 5 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and OSTM/JASON-2 observations

相对偏差		绝对偏差/TECU	
平均值	RMSE	平均值	RMSE
0.14	0.36	1.37	2.75

表 6 不同季节 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值的偏差统计

Table 6 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and OSTM/JASON-2 observations for different seasons

	相对偏差		绝对偏差/TECU	
	平均值	RMSE	平均值	RMSE
夏季	0.12	0.32	1.55	2.99
冬季	0.20	0.41	1.35	2.50
春秋季	0.12	0.36	1.29	2.74

表 7 不同地方时 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值的偏差统计

Table 7 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and OSTM/JASON-2 observations for different local time

	相对偏差		绝对偏差/TECU	
	平均值	RMSE	平均值	RMSE
白天	0.13	0.28	1.75	3.19
夜间	0.12	0.43	0.91	2.30
晨昏	0.16	0.36	1.43	2.68

表 8, 相对偏差从低纬向高纬缓慢增加, 而绝对偏差的 RMSE 中纬和高纬基本相当, 但是显著低于低纬地区.

图 3 给出的是 COSMIC TEC 与 OSTM/JASON-2 观测值的偏差随地磁纬度的分布. 图 3(a) (b) 分别是绝对偏差的平均值和 RMSE 随地磁纬度的分布, 图 3(c) (d) 分别为相对偏差的平均值和 RMSE 随地磁纬度的分布. 可以看到绝对偏差的分布基本呈现南北对称结构, 绝对偏差从低纬到中纬快速减小, 而且在地磁赤道两侧存在明显的双峰结构, 同时图 3(a) (b) (c) 中在 ±30° 附近均可见形成低洼区. 而相对偏差高纬较大, 中低纬略小而且存在很强的波动, 相对偏差在中低纬的峰值大致位于 ±15° 左右, 与绝对偏差的双峰结构位置相对应.

4 结论

COSMIC 电离层掩星探测能够获得全球覆盖的观测资料, 可以弥补现有电离层观测手段的不足, 尤其是能够解决海洋和气候条件恶劣地区电离层观测资料匮乏的问题. 本文利用 COSMIC 提供的电子密度廓线数据, 通过质量控制及数值积分获得各掩星点的垂直 TEC 值, 应用普通 Kriging 方法在日固坐标系构建出全球 TEC 图, 通过与 IGS GIMs 和 OSTM/JASON-2 观测值进行比对, 并通过对不同季节、地磁纬度、地方时进行分类统计分析, 得出如下结论.

(1) COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 比对, 绝对偏差的全球平均值约为 3.41 TECU, RMSE 约为 4.79 TECU. 相对偏差的全球平均值约为 0.33, RMSE 约为 0.46. 绝对偏差的峰值区主要在地磁纬

表 8 不同地磁纬度 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值的偏差统计

Table 8 Statistical results of difference between COSMIC TEC Maps and OSTM/JASON-2 observations for different geomagnetic latitudes

	相对偏差		绝对偏差/TECU	
	平均值	RMSE	平均值	RMSE
低纬	0.12	0.35	1.46	3.08
中纬	0.14	0.36	1.26	2.49
高纬	0.16	0.39	1.47	2.53

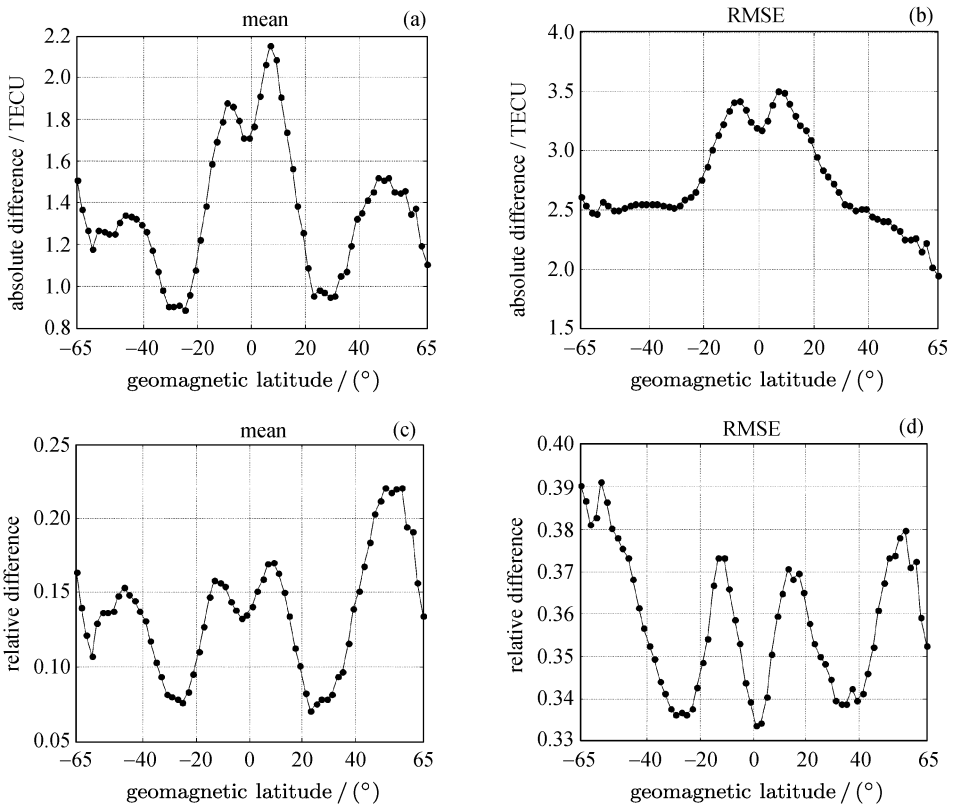

图 3 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值绝对偏差和相对偏差沿地磁纬度的分布

Fig. 3 Distribution of absolute and relative difference between CSOMIC TEC Maps and OSTM/JASON-2 observations against the geomagnetic latitude

度中低纬度, 与中低纬电离层的双峰形态的位置大致重合. 地方时坐标上绝对偏差主要出现在 08:00 LT−20:00 LT, 而相对偏差则主要出现在 00:00 LT−08:00 LT, 两者呈反位相关系. COSMIC TEC 图与 IGS GIMs 的偏差随季节和地方时变化明显. 虽然双峰区两者偏差较大, 但是区域面积较小.

(2) COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值相比, 绝对偏差的全球平均值约为 1.37 TECU, RMSE 约为 2.75 TECU. 相对偏差的全球平均值约为 0.14, RMSE 约为 0.36. 偏差主要出现在低纬地区, 也具有明显的双峰结构, 偏差随季节和地方时的变化同样很明显, 而且与 COSMIC TEC 图和 IGS GIMs 的偏差随季节和地方时的变化规律相同.

通过比对发现, COSMIC TEC 图可以用来为 GNSS 卫星和其他低轨卫星提供电离层延迟改正. 对于赤道两侧存在小区域内较大偏差的问题, 未来可以考虑利用 IRI2007 或其他电离层模型计算 60~110 km 和 750 km 以上的电离层 TEC, 进而叠加到 COSMIC TEC 图的方法加以修正. 同时 COSMIC TEC 图与 OSTM/JASON-2 观测值符合较好, 具有很高的精度, 因此有望获得广泛的应用. 考虑到 GLONASS, Galileo 系统的发展和 GPS 卫星现代化的推进, 以及新的掩星技术的出现, 电离层掩星资料相应也会更加丰富和更加精确, 全球覆盖度更高, 因此使用电离层掩星资料构建全球 TEC 图具有广阔的应用前景.

致谢 COSMIC 掩星数据由 CDAAC (COSMIC Data Analysis and Archive Center) 提供, Kp 指数和 Dst 指数由 NOAA NGDC (National Geophysical Data Center) 提供, IGS GIMs 数据由 NASA CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) 提供, OSTM/JASON-2 数据由 NASA JPL PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) 提供.

参考文献

[1] Coster A, Komjathy A. Space weather and the global

positioning system [J]. *Space Weather*, 2008, **6**:S06D04, Doi:10.1029/2008SW000400

[2] Pedatella N M, Lei J, Larson K M, Forbes J M. Observations of the ionospheric response to the 15, 2009 December 2006 geomagnetic storm: Long-duration positive storm effect [J]. *J. Geophys. Res.*, **114**, A12313, doi:10.1029/2009JA014568

[3] Araujo-Pradere E A, Fuller-Rowell T J, Spencer P S J. Consistent features of TEC changes during ionospheric storms [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2006, **68**:1834-1842

[4] Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A, Tsai Y B, Chuo Y J. Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geqslant 6.0$ Taiwan earthquakes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**:3113-3116

[5] Liu J Y, Chou Y J, Shan S J, Tsai Y B, Chen Y I. Pulinets S A, Yu S B. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement [J]. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**:1585-1593

[6] Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, *et al.* Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A04320, doi: 10.1029/2008JA013698

[7] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, Colombo O L. Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400∼1000 km and with high geomagnetic activity [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(13):2009-2012

[8] Damien J Allain, Cathryn N Mitchell. Ionospheric delay corrections for single-frequency GPS receivers over Europe using tomographic mapping [J]. *GPS Solut.*, 2009, **13**:141-151

[9] Attila Komjathy, George H Born. GPS-based ionospheric corrections for single frequency radar altimetry [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**:1197-1203

[10] Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 [J]. *Radio Sci.*, 2001, **36**(2):261-275

[11] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J. GPS data processing: code and phase Algorithms, Techniques and Recipes [OL]. http://www.gage.es/TEACHING_MATERIAL/GPS_BOOK/ENGLISH/PDGPS/BOOK_PDGPS_gAGE_NAV_08.pdf, Barcelona, issue 2E, 2008

[12] Wang Yiju, Yuan Hong, Wan Weixing, Zhou Jianhua, Zhu Mincai. An improved grid-based correction algorithm for the ionospheric delay in WAAS [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(2):129-135. In Chinese (王一举, 袁洪, 万卫星, 周建华, 朱民才. 改进的 WAAS 电离层时延网格修正算法 [J]. 空间科学学报, 2002, **22**(2):129-135)

[13] Wen Jin, Wan Weixing, Ding Feng, *et al.* Experimental observation and statistical analysis of the vertical TEC mapping function [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2010, **53**(1):22-29. In Chinese (温晋, 万卫星, 丁峰, 等. 电离层垂直 TEC 映射函数的实验检测和统计特性 [J]. 地球物理学报, 2010, **53**(1):22-29)

[14] Feltens J, Schaer S. IGS Products for the Ionosphere, IGS Position Paper [R]//Proceedings of the IGS Analysis Centers Workshop. Darmstadt: European Space Operations Center, 1998. 225-232

[15] Hernández-Pajares M. IGS Ionosphere WG status report [R]//performance of IGS Ionosphere TEC Maps-Position Paper-presented at IGS Technical Meeting, Bern, Switzerland, 2004

[16] Orus R, Cander L R, Hernández-Pajares M. Testing regional vertical total electron content maps over Europe during the 1721 January 2005 sudden space weather event [J]. *Radio Sci.*, 2007, **42**:RS3004. doi:10.1029/2006RS003515

[17] Feltens J. Development of a new three-dimensional mathematical ionosphere model at European Space Agency/European Space Operations Center [R]. Space Weather 5: S12002. 2007, doi:10.1029/2006SW000294

[18] Dow J M, Neilan R E, Gendt G. The International GPS Service (IGS): celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade [R]. *Adv. Space Res.*, 2005, **36**(3):320-326

[19] Melbourne W G, Davis E S, Duncan C B, *et al.* The application of Space borne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring [J]. JPL Publ., 1994. 94-18

[20] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, Linfield R P, Hardy K R. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D19):23 429-23 465

[21] Rocken C, *et al.* Analysis and validation of the GPS/MET data in the neutral atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D25):29 849-29 866

[22] Wickert J, *et al.* Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(17):3263-3266

[23] Hajj G A, Kursinski E R, Romans L J, Bertiger W I, Leroy S S. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2002, **64**:451-469

[24] Lin C H, Li J Y, Fang T W, *et al.* Motions of the equatorial ionization anomaly crests imaged by FORMOSAT-3/COSMIC [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(19):L19101

[25] Liou Y A, Pavelyev A G, Liu S F, *et al.* FORMOS AT-3/COSMIC GPS radio occultation mission: Preliminary results [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2007, **45**(11):3813-3826

[26] Sokolovskiy S V, Rocken C, Lenschow D H, *et al.* Observing the moist troposphere with radio occultation signals from COSMIC [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(18):L18802

[27] Wang K Y, Lin S C. First continuous GPS soundings of temperature structure over Antarctic winter from

FORMOSAT-3/COSMIC constellation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(12):L12805

[28] Schreiner W, Rocken C, Sokolovskiy S, *et al.* Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(4):L04808

[29] OSTM/Jason-2 Products Handbook [M/OL]. http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_CATALOG/ostmuserhandbook_v2.pdf, November, 2008

[30] Tseng Kuo-Hsin, Shum C K, Yi Yuchan, *et al.* Regional validation of Jason-2 dual-frequency ionosphere delays [J]. *Marine Geodesy*, 2010, **33**(1):272-284

[31] Ko Hsiao-Tzung. The Quality Control of Formosat-3/COSMIC Ionospheric Data [D]. Taiwan: National Central University, 2007. In Chinese (柯孝聪. 福伟三号电离层资料品质控管 [D]. 台湾: 国立中央大学, 2007)

[32] Orus R, Hernandez-pajares M, Juan J M, *et al.* Performance of different TEC models to provide GPS ionospheric corrections [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**(18):2055-2062

[33] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [D]. Switzerland: Astronomical Institute of the University of Bern, 1999

[34] Gallagher D L, Craven P D, Comfort R H, *et al.* An empirical model of the Earth plasmasphere [J]. *Adv. Space Res.*, 1998, **8**(8):15-24

[35] Foster M P, Evans A N. An evaluation of interpolation techniques for reconstructing ionospheric TEC maps [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2008, **46**(7):2153-2164

[36] Blanch J. An Ionospheric Estimation Algorithm for WAAS Based on Kriging [R], Proceedings of ION GPS 2002, Portland, OR, 2002

[37] Boucher A, Seto K, Journel A. A novel method for mapping land cover changes: Incorporating time and space with geostatistics [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2006, **44**(11):3427-3435

[38] Wei Fengying, Cao Hongxing. Geostatistics and its application to meteorological studies [J]. *Meteor. Monthly*, 2002, **28**:3-5. In Chinese (魏凤英, 曹鸿兴. 地统计学分析技术及其在气象中的适用性 [J]. 气象, 2002, **28**:3-5)

[39] Su Shu, Lin Anwen, Liu Qinghua. Ordinary Kriging algorithm applied for interpolation [J]. *J. Southern Yangtze Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2004, **3**(1):18-21. In Chinese (苏姝, 林爱文, 刘庆华. 普通 Kriging 法在空间内插中的运用 [J]. 江南大学学报 (自然科学版), 2004, **3**(1):18-21)

[40] Stanislawska I, Juchnikowski G, Cander L R, *et al.* The Kriging method of TEC instantaneous mapping [J]. *Adv. Space Res.*, 2002, **29**(6):945-948

[41] Stanislawska I, Juchnikowski G, Cander L R. Kriging method for instantaneous mapping at low and equatorial latitudes [J]. *Adv. Space Res.*, 1996, **18**(6):217-220

[42] Pawel Wielgosz, Dorota Grejner-Brzezinska, Israel Kashani. Regional ionosphere mapping with Kriging and multiquadric methods [J]. *J. Global Posit. Sys.*, 2003, **2**(1):48-55

[43] Orus R, Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J. Improvement of global ionospheric VTEC maps by using Kriging interpolation technique [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2005, **67**:1598-1609

[44] Wang Jianping. Study of the Short-term Forecasting of the Ionospheric TEC in China and its surrounding area [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. In Chinese (王建平. 中国及周边地区电离层 TEC 短期预报方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008)

[45] Mao Tian, Wan Weixing, Sun Lingfeng. Central and northern TEC map using the Kriging method [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(4):279-285. In Chinese (毛田, 万卫星, 孙凌峰. 用 Kriging 方法构建中纬度区域电离层 TEC 地图 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(4):279-285)

[46] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N. An Improved Ionospheric Correction Method for Wid-Area Augmentation Systems [G]. Proceedings of IONGPS-95, Palm Springs, CA, 1995. 1199-1208

[47] Lunt N, Kersley L, Bailey G J. The influence of the protonsphere on GPS observation: model simulations [J]. *Radio Sci.*, 1999, **34**(3):725-732

[48] Lunt N, Kersley L, Bishop G J, *et al.* The effect of the protonsphere on the estimation of GPS total electron content: validation using model simulations [J]. *Radio Sci.*, 1999, **34**(5):1261-1271

[49] Otsuka Y, Ogawa T, Saito A, Tsugawa T, Fukao S, Miyazaki S. A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan [J]. *Earth Planets Space*, 2002, **54**:63-70

[50] Balan N, Otsuka Y, Tsugawa T, Miyazaki S, Ogawa T, Shiokawa K, Bailey G J. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan, submitted to Earth [J]. *Earth Planets Space*, 2002, **54**:71-79

[51] Yue X, Schreiner W S, Lei J, Sokolovskiy S V, Rocken C, Hunt D C, Kuo Y H. Error analysis of Abel retrieved electron density profiles from radio occultation measurements [J]. *Ann. Geophys.*, 2010, **28**:217-222

[52] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, *et al.* The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 [J]. *J. Geod.*, 2009, **83**:263-275

[53] Kouba J. A guide to using international GPS service (IGS) products [OL]. Available: http://igscb.jpl.nasa.gov/faqs.html. May, 2009

[54] Zhang Yi, Lian Baowang, Li Yong. On two calculations needed by ionospheric grid rectification for difference satellite for GPS [J]. *J. Northwes. Polytechn. Univ.*, 2004, **l22**(6):757-760. In Chinese (张怡, 廉保旺, 李勇. 差分 GPS 卫星定位网格校正的算法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2004, **l22**(6):757-760)