0254-6124/2018/38(1)-037–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Chen, LIU Changjian, BAO Yadong, FENG Xu. Some problems pertinent to shell height in ionospheric modeling (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(1): 37-47. DOI:10.11728/cjss2018.01.037

电离层薄层高度对电离层模型化的影响 *

刘 宸[1,2] 刘长建[2] 鲍亚东[3] 冯 绪[2]

1(北京卫星导航中心 北京 100094)

2(信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

3(西安测绘总站 西安 710054)

摘 要 利用 IRI2012 模型分析了电离层薄层高度的时空变化规律, 提出了基于应用中 STEC 的电离层改正误差分析理论, 分析了电离层薄层高度变化的相关影响. 结果表明, 电离层薄层高度变化对电离层穿刺点位置、投影映射函数值、电离层建模结果、电离层模型精化和电离层模型精度评估结果的影响较大. 高度截止角为 10° 时, 电离层薄层高度变化导致电离层穿刺点的经纬度差异最大可达 3.2°, 投影映射函数最高可引入约 15.46% 的误差, 电离层建模结果差异和建模实用误差最高分别达 9.71%, 3.64%, 采用不同薄层高度数据的电离层模型参数拟合和模型精化结果最大可引入约 9.26% 的误差, 采用不同电离层薄层高度数据进行模型精度评定时最大可引入约 9.62% 的误差. 根据这些研究结果可知: 在实际应用中应采用电离层薄层高度模型, 并选取较大的卫星高度截止角来减小薄层高度变化引入的误差; 采用固定高度时, 区域电离层建模采用与实际电离层薄层一致的固定高度; 进行精度评估时, 参考数据的电离层薄层高度与需要精度评估的电离层模型薄层高度相等.

关键词 电离层薄层高度, 建模误差, 实用误差, 精化误差, 精度评估误差

中图分类号 P 352

Effects of Ionosphere Shell Height on Ionospheric Modeling

LIU Chen[1,2] LIU Changjian[2] BAO Yadong[3] FENG Xu[2]

1(*Beijing Satellite Navigation Center, Beijing* 100094)

2(*School of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou* 450001)

3(*Xi'an Division of Surveying and Mapping, Xi'an* 710054)

Abstract The spatial-temporal variations of shell height are analyzed by utilizing IRI2012 model. The method for precision evaluation of the ionosphere models based on STEC differences in applications is presented, and the relevant influences of shell height on the positions of Ionospheric Pierce Point (IPP), mapping function, ionospheric modeling, ionospheric elaboration and ionospheric accuracy evaluation are discussed. When satellite elevation cut-off angle is set to be 10°, the shell height

* 国家自然科学基金项目资助 (41374041)

2017-03-12 收到原稿, 2017-08-26 收到修定稿

E-mail: 791387368@qq.com

has important impact on the above quantities. The maximum deviation in latitude or longitude is about 3.2°. The maximum error of mapping function is about 15.46%. The maximum deviation and practical error are about 9.71%, 3.64% respectively. The maximum error in ionospheric elaborations is about 9.26%, and the maximum error in ionospheric accuracy evaluation is about 9.62%. According to the above results, the following suggestions are given. Firstly, a shell height model and a larger elevation cut-off angle should be adopted to reduce the above errors. Secondly, when a fixed shell height is adopted, the same height should be used in regional ionospheric modeling. Thirdly, the shell height of reference data should be the same to the be-assessed data in accuracy assessment.

Key words Ionosphere shell height, Modeling error, Practical error, Elaboration error, Accuracy evaluation error

0 引言

电离层单层模型 (Single Layer Model, SLM) 假定电离层所有自由电子集中在质心高度为 H 的无限薄的球层上, 如图 1 所示. 该模型广泛应用于导航卫星信号的电离层延迟改正理论、方法与应用研究中.

电离层等效薄层高度随着经纬度、太阳活动、地方时等因素变化. 电离层等效薄层高度沿纬度方向变化很大, 不可忽略; 沿经度方向变化很小, 在实际工程应用中可以忽略 [1]. 文献 [2] 通过对多普勒观测数据的研究, 给出了电离层薄层高度日变化的经验公式:

$$H = 375 + 25\cos\Big(\frac{t-3600}{43\,200}\Big). \tag{1}$$

式中, H 为电离层薄层高度, 单位 km; t 为地方时日内秒 (从 00:00:00 LT 开始计算的秒数). Yang[3] 对南极上空臭氧层空洞的研究发现, 自 1958 年至 1998 年电离层顶已下降 8 km, 2001 年电离层电子含量峰值平均高度只有 298 km, 且有下降的趋势.

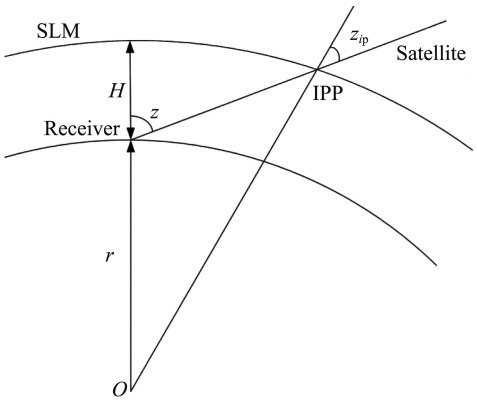


图 1 电离层单层模型

Fig. 1 Single Layer Model (SLM) of the ionosphere

电离层薄层高度为电离层的等效平均高度, 一般采用电子密度的质心高度. 实际应用中质心高度通常采用经验公式估计 [4,5]:

$$H = h_{\mathrm{m}}F_2 + 80. \tag{2}$$

其中 $h_{\mathrm{m}}F_2$ 为电离层 F_2 层电子密度最大值处的高度. 因此单层电离层高度通常根据经验固定在 300~450 km 之间的某一高度 [3,4].

GPS Klobuchar 电离层模型采用的薄层高度为 350 km, BDS Klobuchar 电离层模型采用的薄层高度为 375 km, 国际电离层工作组的分析中心发布的 GIM 数据所用的电离层薄层高度为 450 km. 此外, 武汉测地所提出的 IGGDCB 方法采用的电离层薄层高度为 375 km. 文献 [6] 在电离层建模时采用的电离层薄层高度是在中纬地区与电离层 Chapman 剖面投影一致性最好的 428.8 km. 文献 [7] 在电离层建模时采用的电离层高度为 365 km. 文献 [8, 9] 在计算电离层延迟时采用的高度为 400 km. 文献 [10] 认为电离层平均高度为 355 km. 文献 [11−14] 在电离层建模时, 为了利用 GIM 数据进行精度评估, 一般采用 450 km.

文献 [15] 利用电离层高度为 450 km 的 GIM 数据拟合了北斗电离层预报模型 (高度 375 km) 的参数, 并分析了各参数的大小与变化情况. 文献 [16] 根据 GIM 预报电离层数据进行 Klobuchar 模型参数拟合, 并利用 IGS 提供的事后电离层地图进行精度分析, 对不同 Klobuchar 模型参数的性能进行了比较. 文献 [17] 在利用经验模型外推进行 GPS Klobuchar 模型参数拟合以及对拟合效果进行评估时, 采用薄层高度为 450 km 的区域 GIM 数据. 文献 [7]

在对近海区域电离层建模过程中采用的电离层高度为 365 km, 但在精度评估时采用了电离层高度为 450 km 的 GIM 数据. 文献 [18] 以 GIM 为基准评估了 GPS, BDS, Galileo 广播电离层模型的精度.

综上可知, 电离层薄层的等效高度是变化的, 且目前并未统一. 实际应用中利用不同薄层高度电离层模型的 VTEC (Vertical Total Electron Content) 数据进行电离层参数拟合、模型精化以及精度评估的现象比较普遍. 在 SLM 中将电离层薄层高度固定为某一个特定值是否合理, 不同电离层的薄层高度是否适用, 利用不同薄层高度电离层模型的 VTEC 数据进行电离层参数拟合、模型精化以及精度评估是否合适, 这些问题均与电离层薄层高度有关.

1 电离层薄层相关量的计算

在电离层建模及电离层模型使用过程中, 需要计算电离层穿刺点位置和电离层映射函数. 这两个量均与电离层薄层高度密切相关.

1.1 穿刺点坐标计算

卫星视线与电离层薄层的交点称为电离层穿刺点. 电离层穿刺点的经纬度是指电离层穿刺点在地球表面投影点的经纬度. 电离层穿刺点 M 的地理纬度 ϕ_{m}、地理经度 λ_{m} 计算公式为

$$\begin{aligned}\phi_{\mathrm{m}} = &\arcsin(\sin\phi_{\mathrm{u}}\cos\psi + \\ &\cos\phi_{\mathrm{u}}\sin\psi\cos A),\end{aligned} \tag{3}$$

$$\lambda_{\mathrm{m}} = \lambda_{\mathrm{u}} + \arcsin\Big(\frac{\sin\psi\sin A}{\cos\phi_{\mathrm{m}}}\Big). \tag{4}$$

其中, ϕ_{u} 为接收机地理纬度, λ_{u} 为接收机地理经度, 二者单位均为弧度; A 为卫星方位角, 单位为弧度; ψ 为接收机和穿刺点的地心张角, 单位为弧度, 其计算公式为

$$\psi = z - \arcsin\Big(\frac{R_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{e}}+H}\sin z\Big), \tag{5}$$

或者

$$\psi = \frac{\pi}{2}h - \arcsin\Big(\frac{R_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{e}}+H}\cos h\Big). \tag{6}$$

其中, R_{e} 为地球半径, 一般取 6378.137 km; H 为电离层薄层高度; z 为接收机天顶方向与卫星视线的夹角, 即卫星天顶角, 单位弧度; h 为卫星高度角, 单位弧度.

1.2 映射函数

在 GNSS 电离层建模中, 常利用某指定的映射函数将卫星视线方向 STEC (Slant Total Electron Content) 转换成穿刺点处天顶方向的总电子含量 VTEC. 在电离层模型应用中, 则是将离层穿刺点处的 VTEC 转换成 STEC 进行电离层延迟修正.

在使用单层电离层模型时, 一般采用与之相对应的映射函数即投影映射函数, 又称标准单层映射函数 [19]. BDS, GIM 采用的映射函数为投影映射函数, GPS 导航定位系统采用的映射函数为广播星历映射函数. 广播星历映射函数是投影映射函数在薄层高度为 350 km 时的近似公式 [20,21]. 投影映射函数可表示为

$$F(z) = \frac{1}{\cos z} = \frac{1}{\sqrt{1-\sin^2 z_{i\mathrm{p}}}}. \tag{7}$$

$$\sin z_{i\mathrm{p}} = \frac{R_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{e}}+H}\sin z. \tag{8}$$

或者

$$\sin z_{i\mathrm{p}} = \frac{R_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{e}}+H}\cos h. \tag{9}$$

其中, $z_{i\mathrm{p}}$ 为穿刺点处的卫星天顶角.

2 基于 STEC 的电离层改正误差分析理论

实际应用中常用的电离层电子含量参数是 STEC, 所以电离层建模结果误差采用 STEC 差异进行评估. 这里给出基于 STEC 的电离层误差分析理论, 并利用该理论计算不同电离层薄层高度的电离层的建模结果、参数拟合和精度评估结果所引入的误差. 该理论也可用于电离层模型的精度评估.

电离层穿刺点在不同卫星高度角下出现的概率不同. 假定穿刺点在电离层薄层上分布的概率相等, 则某卫星高度角对应的穿刺点出现概率可由该高度角下穿刺点分布面积占指定卫星高度截止角时薄层面积的比值来确定. 图 2 给出了薄层高度为 H、卫星高度角大于 h 时电离层穿刺点所在薄层区域, 该区域为不含截面圆的球冠表面.

该球冠的面积为

$$S(h) = 2\pi(R_{\mathrm{e}}+H)^2(1-\cos\psi). \tag{10}$$

结合式 (7) 与式 (8) 可知, 该薄层区域面积是电离层

薄层高度和卫星高度角 (或者天顶距) 的函数. 当 Δh 趋向无穷小时, 可以得到高度角为 h 时穿刺点分布的薄层面积

$$\Delta S(h) = S(h+\Delta h) - S(h). \tag{11}$$

不同卫星高度角下穿刺点的出现概率

$$P_{\rm h} = \frac{\Delta S(h)}{S(h_{\rm cut})}. \tag{12}$$

式中, $h_{\rm cut}$ 为卫星高度截止角. 电离层建模和卫星导航应用中卫星高度截止角多采用 10°, 因此这里也选取卫星高度截止角为 10°. $P_{\rm h}$ 表示卫星高度角为 h 时穿刺点分布所占面积的比率, 可视作卫星高度角为 h 时的权重.

在误差计算中, 选取参考电离层电子总含量后, 高度角为 i 时 STEC 偏差比率

$$V_i = \left|\frac{N_{\rm e} - N_{\rm e}^{\rm ref}}{N_{\rm e}^{\rm ref}}\right| \times 100\%. \tag{13}$$

其中, $N_{\rm e}^{\rm ref}$ 为参考电离层电子总含量. 在计算 STEC 的误差时, 可通过对不同高度角上的误差率进行加权得到整体平均 STEC 误差率, 从而对 STEC 的精度进行评估, 即

$$V_{\rm mean} = \sum_{i=1}^{\max} V_i P_i. \tag{14}$$

需要指出的是, 在计算整体平均 STEC 误差率过程中, 电离层电子总含量与参考电离层电子总含量的差值 $(N_{\rm e} - N_{\rm e}^{\rm ref})$ 均非正 (或非负) 时, 式 (13) 可以写为

$$V_i = \frac{N_{\rm e} - N_{\rm e}^{\rm ref}}{N_{\rm e}^{\rm ref}} \times 100\%. \tag{15}$$

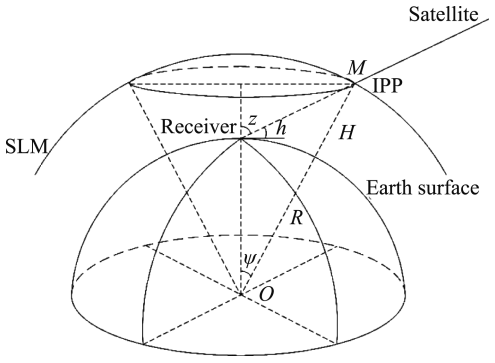


图 2 卫星高度角大于 h 时电离层穿刺点所在薄层区域

Fig. 2 Thin layer region with IPP when satellite elevation angle is larger than h

此时, 薄层高度变化引起的误差为系统误差, 计算得到的整体平均 STEC 误差率可用于对该系统误差进行修正.

3 电离层薄层高度

为分析电离层薄层的等效高度变化, 验证电离层薄层高度的波动范围, 利用式 (2) 对 Online IRI2012*获取的 $h_{\rm m}F_2$ 数据进行分析, 结果表明电离层薄层等效高度在时间及空间上的变化趋势一致, 只是在数值上相差 80 km.

图 3 给出了 2016 年 1 月 1 日 50°N, 40°E 处的 $h_{\rm m}F_2$ 日变化情况. 从图 3 可以看出, $h_{\rm m}F_2$ 在夜间较高, 约为 340 km; 白天较低, 约为 240 km. 太阳升起时 (电离层位置的日出) 的过渡速率大于太阳落下时 (电离层位置的日落) 的过渡速率. 可以认为 $h_{\rm m}F_2$ 在 02:00 LT 左右达到最大值, 将其作为夜间 $h_{\rm m}F_2$ 的代表; 在 09:00 LT 左右达到最小值, 将其作为白天 $h_{\rm m}F_2$ 的代表.

图 4 给出了 2016 年 1 月 1 日 $h_{\rm m}F_2$ 的空间变化情况. 图 4(a) 为 50°N 处 $h_{\rm m}F_2$ 随经度的变化, 图 4(b) 为 40°E 处 $h_{\rm m}F_2$ 随纬度的变化. 从图 4 可以看出, $h_{\rm m}F_2$ 随经度变化比较平缓, 且其在白天的数值低于夜间的数值; $h_{\rm m}F_2$ 随纬度变化比较剧烈, 除赤道附近外, 其在白天的数值略低于夜间的数值.

图 5 给出了 50°N, 40°E 处的 $h_{\rm m}F_2$ 长时间序列变化情况. 图 5(a) 为 2015 年 $h_{\rm m}F_2$ 的变化情况, 图 5(b) 为一个太阳活动周期内 (2005 年至 2015 年) $h_{\rm m}F_2$ 的变化情况. 从图 5(a) 可以看出, $h_{\rm m}F_2$ 一年

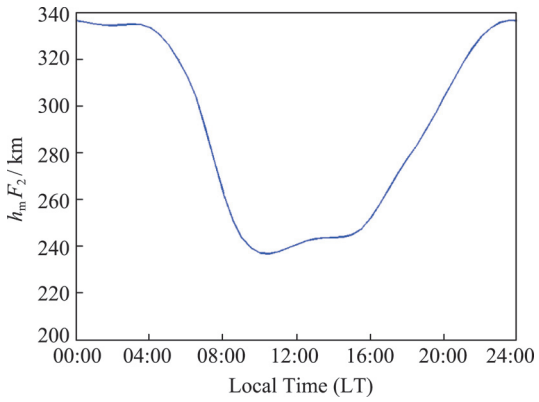


图 3 $h_{\rm m}F_2$ 日变化情况

Fig. 3 Diurnal variation of $h_{\rm m}F_2$

*http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html

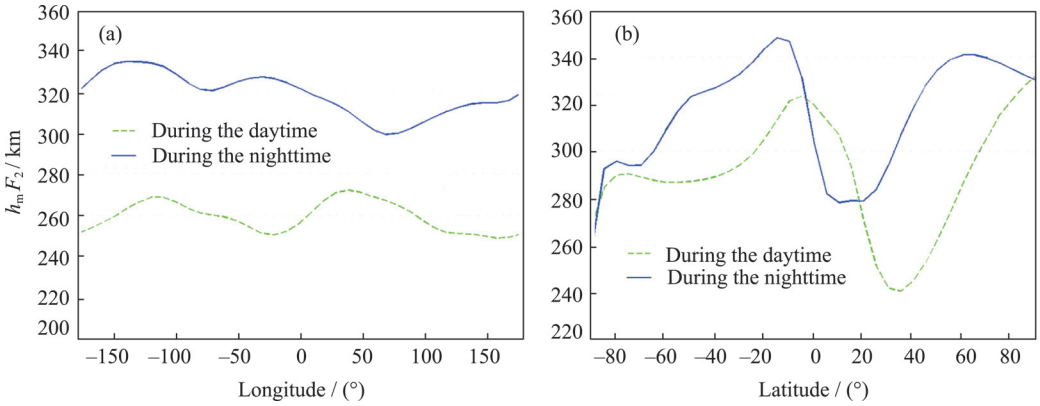


图 4　h_mF_2 空间变化情况

Fig. 4　Spatial variation of h_mF_2

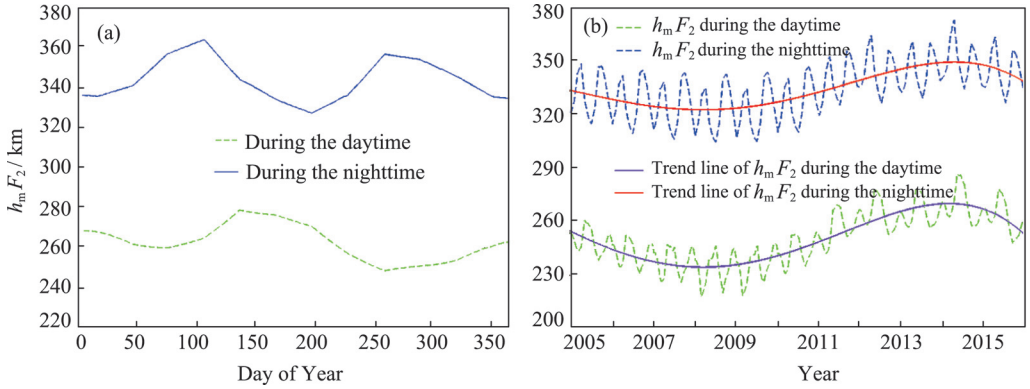


图 5　h_mF_2 长时间序列的变化情况. (a) h_mF_2 在 2015 年的变化, (b) h_mF_2 在一个太阳活动周期内的变化

Fig. 5　Long-term variation of h_mF_2. (a) Variation of h_mF_2 in 2015, (b) variation of h_mF_2 in a solar activity cycle

内白天和夜间的变化剧烈程度相当, 均约为 50 km. 但是, 除年积日 80—110 和 140—200 日二者变化一致外, 其余时间二者变化趋势基本相反, 即春秋季白天的 h_mF_2 高于夏冬季, 而春秋季夜间的 h_mF_2 低于夏冬季. 从图 5(b) 可以看出: 一个太阳活动周期内白天和夜间的 h_mF_2 变化剧烈程度相当, 约为 70 km; 一个太阳活动周期内 h_mF_2 变化范围约为 220~370 km; h_mF_2 白天和夜间的变化趋势一致, 且太阳活动低年 (2008 年) 的 h_mF_2 略低于太阳活动高年 (2014 年).

4　电离层薄层高度变化影响分析

h_mF_2 在一个太阳活动周期内的变化范围大致为 220~370 km, 根据式 (2) 可知, 电离层薄层高度 H 的主要变化范围为 300~450 km. 此结论与文献 [3] 和 [4] 给出的电离层薄层高度范围一致. 因此, H 固定在 300~450 km 之间的某一高度存在一定合理性.

4.1　薄层高度对穿刺点位置的影响

在模拟实验中不给出卫星方位角, 无法直接计算电离层穿刺点的位置. 因此, 采用穿刺点下电离层投影点与接收机间的地心角 ψ (如图 2) 计算分析电离层薄层高度对电离层穿刺点位置的影响. 地心角 ψ 的几何意义为接收机处卫星高度角与穿刺点处卫星高度角的差值, 数值上为穿刺点与接收机间纬度和经度最大差值. 取电离层薄层高度分别为 300, 350, 375, 400, 450 km, 计算穿刺点与接收机间的地心角 ψ. 计算结果列于表 1.

由表 1 可知, 地心角随电离层薄层高度增高而逐渐增大, 随卫星高度角增加而逐渐减小. 同一卫星高度角下, 不同电离层薄层高度对应的地心角之间存在差异. 图 6 给出了不同电离层薄层高度下地心角与薄层高度为 375 km 时地心角之间的差值曲线.

表 1 不同卫星高度角和电离层薄层高度下的地心角

Table 1 Geocentric angle with different satellite elevation angle and ionosphere shell height

卫星高度角/(°)	电离层薄层高度/km				
	300	350	375	400	450
0	17.2389	18.5620	19.1836	19.7820	20.9174
5	12.9282	14.2007	14.8007	15.3796	16.4805
10	9.8529	11.0004	11.5462	12.0752	13.0877
15	7.7006	8.6977	9.1764	9.6430	10.5422
20	6.1713	7.0248	7.4377	7.8420	8.6262
30	4.1958	4.8175	5.1213	5.4207	6.0064
40	2.9766	3.4316	3.6552	3.8763	4.3109
50	2.1271	2.4575	2.6203	2.7816	3.0996
60	1.4752	1.7064	1.8205	1.9336	2.1571
70	0.9340	1.0811	1.1538	1.2259	1.3685
80	0.4535	0.5251	0.5605	0.5956	0.6651
90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

注 地心角单位 (°)

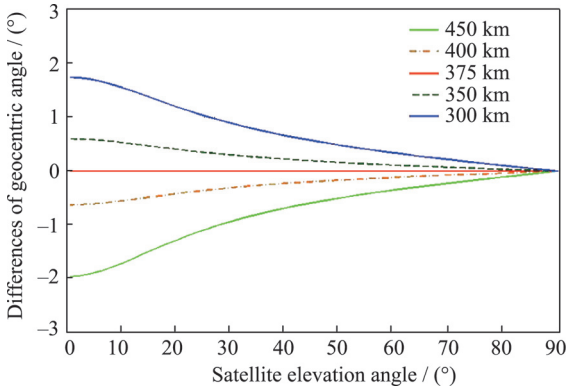


图 6 不同电离层薄层高度下地心角与 $H = 375\,\text{km}$ 时地心角的差值

Fig. 6 Differences of geocentric angle with the one when $H = 375\,\text{km}$

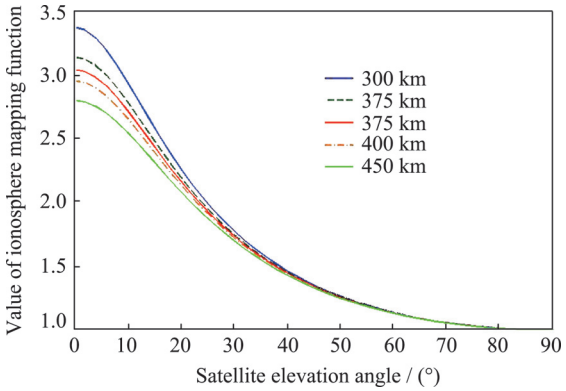


图 7 不同薄层高度对应的投影映射函数值

Fig. 7 Ionosphere mapping functions with different shell heights

由图 6 可见, 不同电离层薄层高度下地心角与 $H = 375\,\text{km}$ 时地心角的差值随着卫星高度角增大而减小, 且高度值相差越小时地心角的差值也越小. 在导航定位中, 卫星高度截止角一般取为 10°, 则薄层高度每相差 50 km, 地心角相差最大约 1.05°, 地心角最大差异为 3.2°. 因此, 精度要求较高时需要对电离层薄层高度进行精确测量或者估计.

4.2 薄层高度对投影映射函数的影响

投影映射函数是单层模型的标准映射函数, 与电离层的薄层高度密切相关. 图 7 给出了电离层薄层高度为 300, 350, 375, 400, 450 km 时的投影映射函数曲线.

由图 7 可见, 投影映射函数随着卫星高度角增大而减小, 且减小速率逐渐变小. 不同电离层薄层高度的投影映射函数之间存在差异. 卫星高度角较

小时投影映射函数之间的差异较大, 随着卫星高度角的增加这些差异越来越小, 高度角大于 40° 时这些差异可以忽略不计. 为了更加详细地比较不同电离层薄层高度对应的投影映射函数之间的差异, 以薄层高度为 450 km 时的投影映射函数为标准, 计算不同高度下投影映射函数差异的百分比, 结果列于表 2. 该百分比的另一个含义是, 当 VTEC 相同时, 以薄层高度为 450 km 时的 STEC 为标准, 不同薄层高度 STEC 差异的百分比.

由表 2 可知, 随着电离层薄层高度与 450 km 差值的增加, 投影映射函数的差值比率也越来越大, 即薄层高度为 300 km 时差值比率最大, 薄层高度为 400 km 时差值比率较小. 在导航定位中, 卫星高度截止角一般取为 10°, 此时薄层高度每相差 50 km 引入最大为 5% 的误差, 而薄层高度相差最大时 (分别为 300 km 和 450 km) 引入最大为 15.46% 的误差. 这意味着不考虑其他方面的误差, 电离层薄层高度对映射函数在 VTEC 到 STEC 的转换中引入最大为 15.46% 的误差. 因此, 精度要求较高时, 需要对电离层薄层高度进行精确测量或者估计. 当不能精确估计电离层薄层高度时, 固定的薄层高度应选取为电离层薄层高度比较集中的高度或者基于长期统计数据得出的平均高度.

4.3 薄层高度对电离层建模的影响

电离层建模过程中通常采用测站的双频观测数据测定得到 STEC, 然后减去卫星与接收机的差分码偏差, 再通过指定的映射函数转换成 VTEC. 电离层薄层高度随着经纬度、太阳活动、地方时等因素变化, 若在电离层建模过程中采用固定高度, 将引入一定误差. 在各项误差的计算过程中, 采用同一经纬度上的穿刺点, 不同卫星高度角对应的分布概率与同一测站时一致, 避免了比较 VTEC 需要进行的位置归一化处理. 在计算利用不同电离层薄层高度进行电离层建模结果差异分析时, 采用的参考 VTEC 是利用实际电离层高度建模得到的. 实际电离层高度即电离层质心高度, 模拟电离层质心高度分别为 300, 350, 375, 400, 450 km.

表 3 给出卫星高度截止角为 10° 时利用不同电离层薄层高度进行建模的结果差异百分比. 由表 3 可知, 当电离层建模采用的薄层高度与实际电离层薄层高度不一致时, 建模结果存在差异. 电离层建模采用的薄层高度与实际薄层高度之间的差距越大, 建模结果间的差异越大. 卫星高度截止角为 10° 时, 差异最大可达 9.71%, 此时电离层薄层实际高度为 300 km,

表 2 不同薄层高度对应的投影映射函数与 $H = 450$ km 时投影映射函数的相对差异 (%)

Table 2 Relative difference (%) between projection mapping function values of different shell height and the one of $H = 450$ km

卫星	电离层薄层高度/km				
高度角/(°)	300	350	375	400	450
0	20.47	12.15	8.65	5.48	0.00
5	18.95	11.34	8.09	5.15	0.00
10	15.46	9.42	6.77	4.34	0.00
15	11.72	7.28	5.28	3.40	0.00
20	8.62	5.43	3.97	2.58	0.00
30	4.59	2.96	2.18	1.43	0.00
40	2.47	1.60	1.19	0.78	0.00
50	1.30	0.85	0.63	0.42	0.00
60	0.63	0.42	0.31	0.21	0.00
70	0.25	0.17	0.12	0.08	0.00
80	0.06	0.04	0.03	0.02	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

模型薄层高度为 450 km, 与文献 [22] 给出的实验结果一致. 电离层薄层高度主要集中在 300~450 km, 当电离层薄层高度在该区间分布概率相近时, 电离层建模结果的差异可由表 3 中的均值进行评估. 当建模选取的电离层薄层高度接近薄层高度分布区间的中点 (375 km) 时, 电离层建模结果的差异最小.

模型使用时建模结果的实用误差比率列于表 4. 由表 4 可知, 当电离层建模采用的薄层高度与实际电离层薄层高度不一致时, 建模结果实用误差大小不等, 但均小于建模结果间的差异, 原因是映射函数减弱了其间差异. 此外, 当电离层建模采用的薄层高度与实际薄层高度之间差距越大时, 建模结果实用误差越大, 卫星高度截止角为 10° 时差异最大可达 3.64%, 此时电离层薄层实际高度为 450 km, 模型薄层高度为 300 km. 电离层薄层高度在 300~450 km 区间内分布概率相近时, 电离层建模结果的实用误差可由表 4 中的均值进行评估. 因此, 建立区域电离层模型时, 建议采用相应区域的电离层薄层高度模型或者选取与实际电离层薄层高度一致的固定高度.

4.4 薄层高度对模型精化、精度评估的影响

由文献 [7, 15−18] 可知, 利用不同薄层高度的电离层模型 VTEC 数据进行电离层模型参数拟合、模型精化以及精度评估的现象比较普遍. 实际上此方法会引入一定的误差, 原因在于参数拟合、模型精化和精度评估时以 VTEC 的一致性为目标, 但实际应用中采用的是 STEC, 而 VTEC 到 STEC 的转换需要用到与电离层薄层高度相关的投影映射函数, 从而导致了误差的产生.

在采用不同电离层薄层数据进行电离层模型参数拟合和模型精化时, 目标是两者的 VTEC 相近或者相等. 因此, 该过程由薄层高度不一致引入的误差为 VTEC 相等时通过相应投影映射函数计算得到的 STEC 差异. 该误差列于表 5.

由表 5 可知, 当数据源的电离层薄层高度与需

表 3 不同薄层高度建模结果的相对差异 (%)

Table 3 Relative differences (%) of modeling results under different shell height

薄层高度/km	建模采用的薄层高度/km					平均值
	300	350	375	400	450	
300	0.00	3.24	4.66	5.97	8.31	4.44
350	3.43	0.00	1.51	2.89	5.38	2.65
375	5.07	1.55	0.00	1.423	3.97	2.41
400	6.66	3.05	1.46	0.00	2.61	2.76
450	9.71	5.93	4.27	2.74	0.00	4.53

表 4 不同薄层高度建模结果的相对误差 (%)

Table 4 Relative errors (%) of modeling results under different shell heights

薄层高度/km	建模采用的薄层高度/km					平均值
	300	350	375	400	450	
300	0.00	1.35	1.97	2.56	3.64	1.90
350	1.34	0.00	0.61	1.19	2.26	1.08
375	1.94	0.61	0.00	0.58	1.64	0.95
400	2.51	1.18	0.57	0.00	1.06	1.06
450	3.54	2.22	1.62	1.05	0.00	1.69

要参数拟合、模型精化的薄层高度不一致时, 会引入一定误差, 而且高度差异越大, 引入的误差越大. 卫星高度截止角为 10° 时, 差异最大可达 9.26%, 此时数据源薄层高度为 450 km, 参数拟合或模型精化薄层高度为 300 km. 因此, 电离层模型参数拟合、模型精化应选取相同电离层薄层高度的数据源, 或者将电离层模型的高度统一到数据源的电离层薄层高度.

采用不同电离层薄层高度数据进行电离层模型精度评定针对的是两者的 VTEC 相近程度, 而不同薄层高度的电离层模型在相同 VTEC 时得到的 STEC 不相等, 存在一定误差. 以参考数据的薄层高度计算得到的 STEC 为参考标准时, 计算得到的误差与电离层模型参数拟合、模型精化时的误差相等, 如表 5 所示. 由文献 [7, 15−18] 可知, 大部分电离层精度评估时选取的数据是电离层薄层高度为 450 km 的 GIM 数据, 而 GIM 数据建模时采用的电离层数据的薄层高度仍然分布在 300~450 km 高度范围内. 电离层薄层高度分别为 300, 350, 375, 400, 450 km 时, 利用高度为 450 km 建模得到的 VTEC 对不同薄层高度的电离层模型进行精度评估时引入的误差列于表 6.

由表 6 可知, 电离层高度为 450 km 时, 利用薄层高度为 450 km 建模得到的 VTEC 对薄层高度为 450 km 的模型进行精度评估时不会产生误差, 而其余各种情况均引入大小不等的误差, 电离层薄层实际高度和模型薄层高度均为 300 km 时, 最大误差可达 9.71%. 当电离层薄层高度在分布区间上的分布概率相近时, 以薄层高度为 450 km 的 GIM 数据进行电离层模型精度评估的误差可根据表 6 中的均值进行评估. 由表 6 可知, 以薄层高度为 450 km 的 GIM 数据进行电离层模型精度评估均引入一定量的误差, 且所评估模型的电离层薄层高度与 450 km 相差越

表 5 参数拟合和模型精化时薄层高度变化引入的相对误差 (%)

Table 5 Relative errors (%) induced by shell height variation in parameter fitting and model refinement

数据源的薄层高度/km	参考拟合或模型精化的薄层高度/km				
	300	350	375	400	450
300	0.00	3.37	4.94	6.44	9.26
350	3.29	0.00	1.53	3.00	5.75
375	4.77	1.52	0.00	1.45	4.18
400	6.16	2.94	1.44	0.00	2.70
450	8.69	5.53	4.06	2.65	0.00

表 6 参考电离层数据薄层高度为 450 km 时精度评估的相对误差 (%)

Table 6 Relative errors of accuracy assessments when the shell height of reference data is 450 km (%)

薄层高度/km	建模采用的薄层高度/km					平均值
	300	350	375	400	450	
300	9.71	9.56	9.55	9.58	9.71	9.62
350	6.16	5.93	5.88	5.87	5.93	5.95
375	4.60	4.33	4.24	4.24	4.27	4.34
400	3.37	2.86	2.74	2.74	2.74	2.89
450	3.63	2.25	1.63	1.06	0.00	1.71

远, 引入的误差越大. 薄层高度为 300, 350, 375, 400, 450 km 的电离层模型进行精度评估时引入的误差分别为 9.62%, 5.95%, 4.34%, 2.89%, 1.71%. 因此, 进行精度评估时, 选取的参考数据的电离层薄层高度要尽量与待评定电离层模型的薄层高度一致.

5 结论

分析了电离层薄层等效高度的时空变化规律, 验证了电离层薄层高度的区间分布, 分析了电离层薄层高度对电离层穿刺点位置及投影映射函数的影响; 分析了采用不同电离层薄层高度时电离层建模结果的差异和实用误差, 以及采用不同薄层高度的电离层数据源进行电离层模型参数拟合、模型精化以及精度评估时引入的误差. 主要结论如下.

(1) 除赤道附近外, 夜间的电离层薄层高度高于白天的等效薄层高度, 且日出时的过渡速率大于日落时的过渡速率; 夜间和白天的电离层等效薄层高度在一年内的变化剧烈程度相当, 但变化趋势基本相反; 一个太阳活动周期内夜间和白天的电离层等效薄层高度变化趋势一致, 变化剧烈程度相当; 电离层等效薄层高度主要变化范围为 300~450 km.

(2) 电离层穿刺点与测站的距离随着电离层薄层高度的增加而增加, 但随着卫星高度角的增加而减小; 电离层薄层高度相差越大, 电离层穿刺点与测站的距离差异越大; 电离层薄层高度对电离层穿刺点位置的影响较大, 卫星高度截止角为 10° 时, 经纬度最大差异可达 3.2° 左右.

(3) 投影映射函数值随着电离层薄层高度、卫星高度角的增加而减小; 电离层薄层高度相差越大, 投影映射函数值的差异越大; 高度截止角为 10° 时最大引入 15.46% 的误差. 因此, 电离层薄层高度对投影映射函数值的影响较大.

(4) 电离层建模采用的薄层高度与实际的电离层等效薄层高度不一致时, 建模结果存在差异, 导致建模结果出现误差, 该误差随着薄层高度间的差异增大而增大; 卫星高度截止角为 10° 时, 建模结果差异、建模实用误差最大分别可达 9.71%, 3.64%. 因此, 电离层薄层高度对电离层建模结果的差异和建模误差影响较大.

(5) 采用不同电离层薄层数据进行电离层模型参数拟合和模型精化时, 引入的误差随着两者高度差异的增大而增大. 卫星高度截止角为 10° 时, 差异最大可达 9.26%. 采用不同电离层薄层数据进行电离层模型精度评定时, 均会引入一定的误差, 最大可达 9.62%. 因此, 电离层薄层高度对电离层模型精化和电离层模型精度评估有一定的影响.

综上所述, 精度要求较高时, 需要对电离层薄层高度进行精确测量或者估计. 不能精确估计电离层薄层高度时, 固定的薄层高度应选取为薄层高度比较集中的高度或该区域基于长期统计数据得出的平均高度. 卫星数足够的情况下, 尽量选取较大的卫星高度截止角以减小电离层薄层高度不准确对电离层穿刺点位置、投影映射函数计算的影响. 电离层建模时, 建议采用电离层高度变化模型. 当不能精确估计电离层薄层高度时, 区域电离层模型建议采用与实际电离层薄层高度一致的固定高度. 进行精度评估时, 建议选取与待评估电离层模型薄层高度一致的参考数据.

参考文献

[1] WANG Yiju, YUAN Hong, WAN Weixing. A numerical study on the shell height of thin-shell model [J]. *J. Jingzhou Teach. Coll.*: *Nat. Sci.*, 2002, **25**(5): 36-38 (王一举, 袁洪, 万卫星. 电离层薄层模型等效高度随时空变化的数值模拟 [J]. 荆州师范学院学报: 自然科学版, 2002, **25**(5): 36-38)

[2] HAN Guilin. On determination of the total electron content from observation data of differential Doppler measurement [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1989, **9**(1): 70-73 (韩桂林. 从微分多普勒观测数据确定电离层总电子含量 [J]. 空间科学学报, 1989, **9**(1): 70-73)

[3] YANG Li. Theory and Research of Atmospheric Effects on the GPS Measurement [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2001 (杨力. 大气对 GPS 测量影响的理论与研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2001)

[4] LIU Changjian. Study on Modeling Method and Model Quality Control of Ionosphere Based on GNSS [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2011 (刘长建. GNSS 电离层建模方法与质量控制研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011)

[5] 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 (温晋, 万卫星, 丁锋, 等. 电离层垂直 TEC 映射函数的实验观测与统计特性 [J]. 地球物理学报, 2010, **53**(1): 22-29)

[6] ZHANG Hongping. Research on Regional Ionospheric Monitoring and Delay Correction in China Based on Ground-based GPS [D]. Shanghai: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006 (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 [D]. 上海: 中

国科学院研究生院, 2006)

[7] WU Xianbing, XU Tianhe, LI Shijia. Coastal regional ionospheric modeling based on GPS data and its accuracy assessment [J]. *Hydrogr. Surv. Chart.*, 2015, **35**(3): 29-31 (吴显兵, 徐天河, 李施佳. 基于 GPS 数据的近海区域电离层建模及其精度评估 [J]. 海洋测绘, 2015, **35**(3): 29-31)

[8] LIN Laosheng, Chris Rizos. An algorithm to estimate GPS satellite and receiver L1/L2 differential delays and its application to regional ionosphere modeling [J]. *Geomat. Res. Aus.*, 1996, **65**: 1-26

[9] WANG Yiju, ZHOU Jianhua. Ionospheric incline and its influence on the additional delay of the ionosphere[C]//The Seventh Annual Conference on Radio Propagation in China. Hefei: Chinese Institute of Electronics, 2007: 110-113 (王一举, 周建华. 电离层倾斜及其对电离层附加时延的影响 [C]//全国第七届电波传播学术讨论年会. 合肥: 中国电子学会, 2007: 110-113)

[10] SARDON E, RIUS A, ZARRAOA N. Ionospheric calibration of single frequency VLBI and GPS observations using dual GPS data [J]. *Bull. Géod.*, 1994, **68**(4): 230-235

[11] GAO Guanghui, WANG Xiaoya, WU Bin. Global ionospheric modeling using GPS data with parallel algorithms [J]. *Ann. Shanghai Observ. Acad. Sin.*, 2011(32): 35-44 (高广辉, 王小亚, 吴斌. GPS 全球电离层 TEC 的并行算法建模及初步结果分析 [J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2011(32): 35-44)

[12] GENG Changjiang. Theory and Method on Real Time Monitoring of Ionospheric Delay Using Ground Based GNSS Data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011 (耿长江. 利用地基 GNSS 数据实时监测电离层延迟理论与方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011)

[13] BAO Yadong. Research on Modeling and Application of VTEC Model based on GNSS [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2016 (鲍亚东. GNSS 电离层 VTEC 模型建立及其应用研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2016)

[14] LIU Chen, LIU Changjian, FENG Xu, *et al.* Klobuchar-like ionospheric model for different scales areas [J]. *Acta Geodaet. Cartogr. Sin.*, 2016, **45**(S2): 54-63 (刘宸, 刘长建, 冯绪, 等. 适用于不同尺度区域的 Klobuchar-like 电离层模型 [J]. 测绘学报, 2016, **45**(S2): 54-63)

[15] DONG Enqiang, WU Xiaoli, TANG Yun, *et al.* Simulation analysis and application research on the long-term variation of BDS ionospheric delay model parameters [J]. *Geomat. Sci. Eng.*, 2014(2): 65-69 (董恩强, 吴晓莉, 唐云, 等. 北斗电离层延迟模型参数长期变化模拟分析与应用研究 [J]. 测绘科学与工程, 2014(2): 65-69)

[16] WANG Fei, WU Xiaoli, ZHOU Tian, *et al.* Performance comparison between different Klobuchar parameters [J]. *Acta Geodaet. Cartogr. Sin.*, 2014, **43**(11): 1151-1157 (王斐, 吴晓莉, 周田, 等. 不同 Klobuchar 模型参数的性能比较 [J]. 测绘学报, 2014, **43**(11): 1151-1157)

[17] GAO Yang, JIAO Cheng, LIU Xiao, *et al.* Fitting Klobuchar coefficients using ionospheric data in Chinese area [J]. *GNSS World of China*, 2014(5): 37-40 (高杨, 焦诚, 刘萧, 等. 利用中国区域电离层数据拟合 Klobuchar 参数 [J]. 全球定位系统, 2014(5): 37-40)

[18] CHENG Na. Study on Methods of Precision Monitoring and Assessment of Broadcast Ionospheric Model of GNSS [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015 (程娜. GNSS 广播电离层精度监测评估方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015)

[19] NOGUEIRA P A B, ABDU M A, SOUZA J R, *et al.* Longitudinal variation in Global Navigation Satellite Systems TEC and topside ion density over South American sector associated with the four-peaked wave structures [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2013, **118**(12): 7940-7953

[20] KLOBUCHAR J A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1987, **AES-23**(3): 325-331

[21] LIU Chen, LIU Changjian, YE Youlong, *et al.* The effects on navigation precision: an ionospheric mapping function perspective [J]. *Eng. Surv. Mapping*, 2016, **25**(11): 25-30 (刘宸, 刘长建, 叶有龙, 等. 不同电离层映射函数对导航精度的影响分析 [J]. 测绘工程, 2016, **25**(11): 25-30)

[22] WANG Xiaolan, MA Guanyi. A study of ionospheric height's effects on the derivation of GPS-TEC [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings. Nanjing: China Satellite Navigation System Administration Office, 2014: 1-5 (王晓岚, 马冠一. 电离层高度对 GPS-TEC 反演影响研究 [C]//中国卫星导航学术年会. 南京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2014: 1-5)