

文章编号: 1000-8349(2006)01-0016-11

# 电离层延迟改正模型综述

章红平<sup>1,2</sup>, 平劲松<sup>1</sup>, 朱文耀<sup>1,3</sup>, 黄 斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 同济大学  
现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 电离层延迟改正模型通常可以分为广播星历用的预报模型、广域差分用的实时模型、后处理模型 3 类, 不同应用要求需要选择不同的模型。主要比较分析了几种常用的电离层延迟改正模型: 用于广域差分中生成格网模型的三角级数模型、多项式模型、低阶球谐函数模型等都可以获得很好的改正效果, 且这 3 种模型基本上是等价的; 电离层延迟谐波函数展开模型可以用来分析电离层长时间系列的变化特征; 国际电离层参考模型 IRI 的改正精度一般可以达到 60% 的效果; 而 GPS 星历采用的 Klobuchar 模型的参数设置存在一些不足, 对此提出了一些改进措施。

**关键词:** 天体测量学; 电离层延迟改正模型; 综述; Klobuchar 模型; GPS

**中图分类号:** P129 **文献标识码:** A

## 1 引 言

受太阳紫外线、X 射线辐射以及高能粒子的影响, 地面上空数十至数千千米范围内的大气被部分电离, 形成了电离层。电离层会反射、折射、散射、吸收无线电信号。它的存在及其时空变化对卫星与地面测控站之间的微波通信产生很大的影响, 如导致无线电观测信号的延迟以及相位、振幅的不规则变化等。

对于卫星导航定位系统而言, 来自电离层的影响主要表现为地面站接收到的卫星载波和伪距信号的附加时延效应。这种时延效应最大可达到几十米, 将严重削弱卫星导航定位的精度和准确度, 是卫星导航定位中的主要误差源之一。通常可以利用电离层延迟效应与信号频率的平方反比关系, 采用双频或多频组合方式有效地消除这种影响。

对于单频实时导航定位用户而言, 采用有效的电离层延迟改正模型可以很好地削弱该误差源的影响。例如现行的 GPS 系统导航电文中的电离层模型 (broadcast ionospheric delay model)

---

**收稿日期:** 2005-01-26; **修回日期:** 2005-09-13

**基金项目:** 中国科学院百人计划基金资助项目 (804156); 国家自然科学基金资助项目 (40174009); 中国科学院  
知识创新工程重要方向资助项目 (KJ CX2-SW-T1); 上海科技发展基金资助项目 (JC14012)

可以消除 60% 左右的延迟误差，而广域增强系统 (WAAS) 差分改正中格网电离层模型可以消除 80% 以上的延迟误差。实际上，不同的电离层延迟改正模型其改正精度往往是不一样的。为此，本文将对常用的电离层延迟改正模型进行比较分析。

## 2 模型分类

根据校正电离层延迟建模对实时性要求的差异，电离层延迟改正模型可分为 3 类：广域差分用的实时模型、后处理模型、广播星历用的预报模型。

广域差分用的实时模型又可以分为格网模型和函数模型。其中函数模型一般是区域性的电离层模型，在太阳方向固定的地磁坐标系或地理坐标系中进行数学多项式或三角级数模拟可以满足较低精度用户的定位要求。

后处理模型用于研究电离层长时间尺度变化或全球尺度变化特性，利用球谐函数或经验正交函数 (EOF) 等可分析电离层时空上大尺度、不同周期 (11、1、0.5 yr 和 27、1 d 等周期) 的变化。特定日期不同经、纬度上电离层延迟周日变化的振幅、初相，以及周期变化是准确确定电离层延迟的重要参数，而大尺度长时间序列的后处理模型有利于人们比较准确地确定这些参数，了解特定日期下电离层延迟的周日变化在长周期 (11、1、0.5 yr 和 14.77 d) 变化曲线中的大致位置。但由于大尺度长时间序列的后处理模型往往是平均化滤波后的模型，它只能从粗线条上确定上述这些参数，而电离层高频变化部分已经被抹平。事实上，电离层高频部分的影响不能被忽略，其周日变化的振幅、初相和周期并不像轨道力学中各天体引力那样具有确定的性质。因此，需要借助实测数据不断地更新这些参数。

广播星历用的预报模型只能在周日尺度上反映电离层的变化特性。

目前，常用的电离层延迟改正模型包括：

(1) Geogiadiou 三角级数展开模型<sup>[1]</sup>

它的表达式为

$$VTEC = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^n \{ a_j \cos(ih^s) + a_{j+1} \sin(ih^s) \} + a_{2n+3} B^s h^s ,$$

式中， $VTEC$  是垂直总电子含量， $B^s$  是卫星穿刺点的足下点纬度与展开点纬度之差， $h^s = \frac{2\pi}{T}(t - 14^h)$  为相位差， $T$  为一天  $24^h$ ，而  $t$  是观测时刻穿刺点的地方时。

(2) 低阶球函数展开模型<sup>[2]</sup>

它的表达式为

$$I(\lambda, \varphi) = J_0 + J_1 \sin \varphi + (C_{11} \cos \lambda + S_{11} \sin \lambda) \cos \varphi ,$$

式中， $\lambda$ 、 $\varphi$  为太阳-地球坐标框架中的球面坐标； $J_0$ 、 $J_1$ 、 $C_{11}$ 、 $S_{11}$  为球谐函数的系数。该模型已经被许多学者用来建立广域差分用的实时模型。

(3) 二维多项式模型<sup>[3]</sup>

它的表达式为

$$VTEC = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k,$$

式中,  $\varphi_0$  为测区中心点的地理纬度;  $S_0$  为测区中心点  $(\varphi_0, \lambda_0)$  在该时段中央时刻  $t_0$  时的太阳时角,  $\lambda_0$  为测区中心点的地理经度;  $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$ ,  $\lambda$  为信号路径与单层交点  $P'$  的地理经度,  $t$  为观测时刻。当观测时段长度为  $4^h$ 、测区范围不超过一个洲时, 泰勒级数展开式中的最佳阶数为:  $\varphi - \varphi_0$  项取  $1 \sim 2$  阶, 时角  $S - S_0$  项取  $2 \sim 4$  阶。单层模型对单层高度  $H$  的取值不敏感。  $H$  变化  $100 \text{ km}$  时所引起的基线长度比约为  $0.04 \times 10^{-6}$ , 实际应用中往往取  $H = 365 \text{ km}$ , 它不作为待估参数。当时段长度为  $4^h$  且只根据一个基准站的资料来建立区域性模型时, 通常只需要用  $9$  参数模型。该模型也已经被许多学者用来建立广域差分用的实时模型。

(4) Klobuchar 模型<sup>[4]</sup>

它的表达式为

$$I_z(t) = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos \left[ \frac{2\pi(t - A_3)}{A_4} \right], & |t - A_3| < A_4/4 \\ A_1, & t \text{ 为其他值} \end{cases},$$

式中,  $I_z$  是垂直延迟 (以  $s$  为单位);  $t$  为接收机至卫星连线与电离层交点 ( $M$ ) 处的地方时 (以  $s$  为单位);  $A_1 = 5 \times 10^{-9} s$  为夜间值的垂直延迟常数;  $A_2$  为白天余弦曲线的幅度, 由广播星历中的  $\alpha_n$  系数求得, 有

$$A_2 = \begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 \phi_M + \alpha_3 \phi_M^2 + \alpha_4 \phi_M^3, & \text{当 } A_2 \geq 0 \\ 0, & \text{当 } A_2 \leq 0 \end{cases},$$

$\phi_M$  是电离层穿刺点的地磁纬度;  $A_3$  为初始相位, 对应于余弦曲线极点的地方时, 一般取为  $50400 s$  (当地时间  $14:00$ );  $A_4$  为余弦曲线的周期, 根据广播星历中  $\beta_n$  系数求得, 有

$$A_4 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_M^n, & \text{当 } A_4 \geq 72000 \\ 72000, & \text{当 } A_4 < 72000 \end{cases}.$$

该模型已经被广泛应用于建立广域差分用的实时模型和广播星历用的预报模型。

(5) 电离层延迟谱函数展开模型<sup>[5]</sup>

$$\Psi(t) = C_0 + \sum_{i=0}^n (C_i \cos(\omega_i t) + S_i \sin(\omega_i t)),$$

$$\omega_i = 2\pi/T_i.$$

式中,  $\Psi(t)$  是  $t$  时刻电离层延迟趋势函数;  $C_0$  为常数项;  $n$  为电离层趋势变化的周期数, 一般考虑  $5$  种周期:  $11$ 、 $1$ 、 $0.5 \text{ yr}$  和  $14.77$ 、 $1 \text{ d}$ ;  $C_i$  和  $S_i$  是球谐函数对应于第  $i$  个周

期的系数,  $\omega_i$  是第  $i$  个周期对应的角频率。该模型一般用来分析电离层大尺度长时间系列的周期变化特性。实际上, 经验正交函数 (EOF) 模型也往往用来分析电离层大尺度长时间系列的变化特性。

### 3 模型比较分析

事实上前 3 种模型是实时模型, 可以用作广域差分电离层延迟改正的函数模型, 而且都可以达到很好的改正效果。为了比较这几种模型的改正效果, 我们处理了 2002 年 10 月 17 日北京时间 10:00~14:00 时段、中国区域内 24 个 GPS 跟踪站采集的数据, 建立了电离层延迟改正的二维多项式模型, 并用该模型校正了 SHSS (上海佘山) 站在该时段内观测的各卫星的电离层延迟。图 1 给出了该模型计算的延迟与实测延迟之间的差异, 这是我们利用 GPS 校正 VLBI 观测 S 波段电离层延迟时的研究工作。图 1 表明, 当高度角大于  $30^\circ$  时, 二维多项式模型可以很好地校正 S 波段 2.2 GHz 观测倾斜路径上的电离层延迟, 误差基本上在 1 ns 以内。换算到 L 波段, 信号倾斜路径上电离层延迟的改正效果可以控制在 0.6 m 以内。这就表明, 电离层延迟改正的二维多项式可以很好地校正卫星信号的电离层延迟。

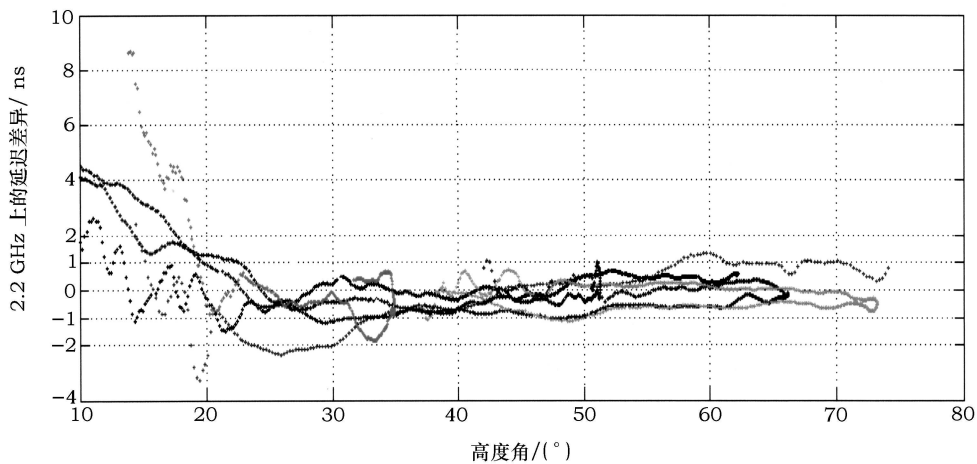


图 1 二维多项式电离层延迟改正模型计算的电离层延迟与实测电离层延迟的差异

图 2 给出了三角级数函数模型与多项式模型计算的各卫星到上海浦东 (SHPD) 站倾斜路径上电离层延迟的差异情况。计算数据源于 2004 年年积日为 287 d UTC 00:00~04:00 观测时段内中国区域 GPS 跟踪站的采样, 其中多项式模型分两个时段 (00:00~02:00 和 02:00~04:00) 分别求解模型参数, 而在该时段内只求解了一套三角级数模型参数 (5 个参数)。从图 2 可以看出, 两种模型计算得到的各路径上电离层延迟的差别很小, 这表明两种模型基本上是等价的。另外, 图中曲线呈现出的弧形与高度角的变化有关, 而曲线上的跳跃与多项式模型分段拟合时段间的不连贯有关。实际上, 这种结果是后处理得到的, 但在广域差分中保证实时性以及空间分布合理的条件下, 电离层状态变化不大, 由此建立的电离层延迟改正模型效果会很好。

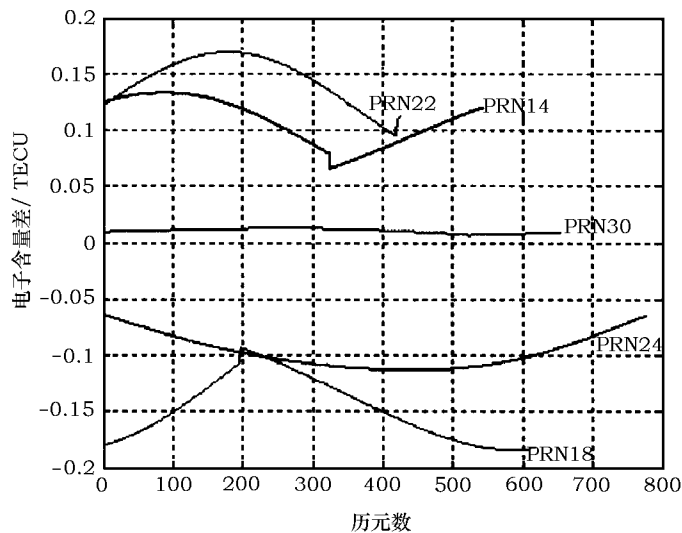


图 2 电离层延迟改正的三角级数模型与多项式函数模型的结果比较

事实上, 电离层延迟改正的低阶球谐函数模型也能达到同样的效果, 但这并不意味着这 3 种模型的预报效果会很好, 因为空间上特定一点电离层延迟, 其周日变化表现出类似余弦曲线形式。而从数学形式上看, 三角级数函数模型实际上是将电离层延迟的周日变化展开成周期为 1、0.5、1/3 d 的傅里叶级数, 并考虑电离层延迟空间变化的差异项。因此, 它只是对电离层周日变化余弦曲线的逼近 (或拟合), 没有直观地描述电离层的周日变化项。它会很好地拟合观测时段内电离层状态, 但用它进行观测时段外的电离层延迟预报时, 电离层状态已经发生了变化, 其效果就不是很理想。我们曾根据 GPS 建立电离层延迟改正模型来校正 VLBI 观测量的 S 波段电离层延迟, 在利用三角级数函数建立模型并用它来预报电离层延迟时, 其效果并不好, 甚至会出现负值情况。

而在地球 - 太阳方向固定的地磁坐标系中, 利用二维多项式来建立电离层延迟改正模型也存在同样问题。用多项式模型描述 1 d 的电离层延迟变化时, 需要将 1 d 的数据分成很多时段, 时段之间的电离层延迟往往不连贯, 如图 2 所示。因此, 多项式模型也不宜用作电离层延迟改正的预报模型。

电离层延迟谐函数展开模型实际上是后处理模型。用该模型可以很好地将电离层延迟的长时间系列展开成不同周期项的组合表达式, 并用来分析电离层长时间尺度上的变化与太阳活动、地磁场活动之间的关系。该模型可以用于预报, 如欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 利用全球的 GPS 观测资料, 将电离层延迟系列展开成周期为 11、1、0.5 yr 和 14.77、1 d 的球谐函数形式, 并依据当天以前的 GPS/VTEC 系列, 采用最小二乘配置方法, 预报当天或后两天的电离层延迟 Klobuchar 模型参数, 达到了较好的改正效果。

另外, 许多文献中还用到了大量电离层延迟改正的数学模拟模型。这些模型大多用作广域差分的电离层实时函数模型, 在时段内进行电离层拟合时, 效果往往很好, 但其预报的稳定性、时效性值得研究。

### 3.1 Klobuchar 模型

实际应用中, 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 广播星历中的电离层延迟预报模型只需要从周日尺度上描述电离层的变化, 不需要从更长的周期项上对电离层延迟进行函数展开, 描述电离层延迟周日变化的振幅、周期变化、初始相位这 3 个参数对于电离层延迟的建模很重要。Klobuchar 模型是三角余弦函数形式, 其参数设置正考虑了电离层周日尺度上振幅和周期的变化, 直观简洁地反映了电离层的周日变化特性。其中, 模型中的振幅  $A_2$  和周期项  $A_3$  均考虑了不同纬度上的差异。因此, Klobuchar 模型基本上反映了电离层的变化特性, 从大尺度上保证了电离层预报的可靠性。但是它主要从全球应用角度来考虑, 是 GPS 系统的预报模型, 其改正效果一般在 60% 左右。这主要受两方面因素制约, 一是电离层延迟改正全球尺度的考量降低了 Klobuchar 模型的有效性, 二是 Klobuchar 模型自身参数设定的限制。

注意到 Klobuchar 模型在改正 L1 波段延迟时夜间电离层延迟被看成常数, 即  $A_1 = 5 \text{ ns}$ , 相当于 9.0 TECU, 也就是将全球电离层夜间 VTEC 的平均值假定为 9.0 TECU。实际上国际 GPS 服务组织 (International GPS Service, IGS) 1994~2004 年的观测结果表明, 全球电离层夜间 VTEC 的平均值与太阳活动相关, 在一个太阳活动周期内它会从 6 TECU 增加到约 20 TECU。因此, 固定  $A_1$  本身就会导致整个模型的平均偏差为 20%~30%。Klobuchar 模型完成于 1980 年初, 当时的 ionosonde 和法拉第旋转技术并没有给出一个精确的电离层模型, 历史的局限导致了其在实际应用中使用时固定的  $A_1$ 。为此, 我们对 Klobuchar 模型进行了改进, 把  $A_1$  作为时间的变量, 并且用  $DC = A_1 + B(t - t_0)$  代替它。

另外, Klobuchar 模型中的三角函数使用了固定的初始相位, 即假定在任意地磁纬度上空的天顶方向上, VTEC 最大值出现在当地正午过后  $2^{\text{h}}$ 。实际的 VTEC 全球分布表明, 在不同磁纬上空 VTEC 含量最大值一般出现在地方时正午过后  $0\sim 4^{\text{h}}$  左右。图 3 和图 4 给出了两个时间段内不同经、纬度上电离层延迟的变化曲线。其中, 图 3 的结果是利用中国局部区域 ( $N25\sim 45, E105\sim 125$ ) 内 10 个 GPS 测站的数据建立  $5\times 5$  格网模型 (每 30 min 给出一格网模型) 后, 提取部分格网点上的周日变化曲线。由图可见, 2004 年 10 月 13 日, 3 个格网点表征的同一纬度不同经度上, 其 VTEC 周日变化曲线都在地方时 13:00 左右达到峰值, 而纬度为  $35^\circ$  的格网点的 VTEC 周日变化曲线都在地方时 12:00 左右达到峰值。而图 4 给出的结果表明, 2002 年 11 月 1 日上海地区上空的 VTEC 在地方时 13:30 左右达到峰值。这就说明, 不同纬度上 VTEC 达到峰值的地方时有差别。因此, Klobuchar 模型中的初始相位固定为 14:00 会引入 3%~10% 的模型误差。如果初始相位差达到  $2^{\text{h}}$ , 这种误差最大会达到 14% 左右, 所以不能忽略这一影响。我们对 Klobuchar 模型中的初始相位进行了调整, 将其表示为地磁纬度的函数, 其表达式如下:

$$A_3 = \sum_{i=0}^3 \gamma_i \phi_M^i.$$

此时, Klobuchar 模型将包括 14 个实时发布的可变参数。根据以上分析, 以国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 经验物理模型为背景场, 利用实测数据的准确性不断校正改进后的 Klobuchar 模型参数, 可以提高该模型的改正精度。

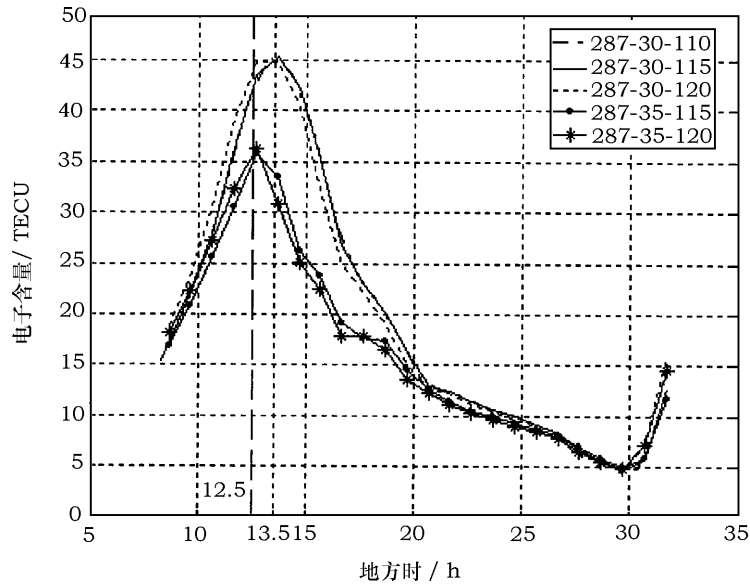


图 3 2004 年 10 月 13 日不同经、纬度上 VTEC 的周日变化

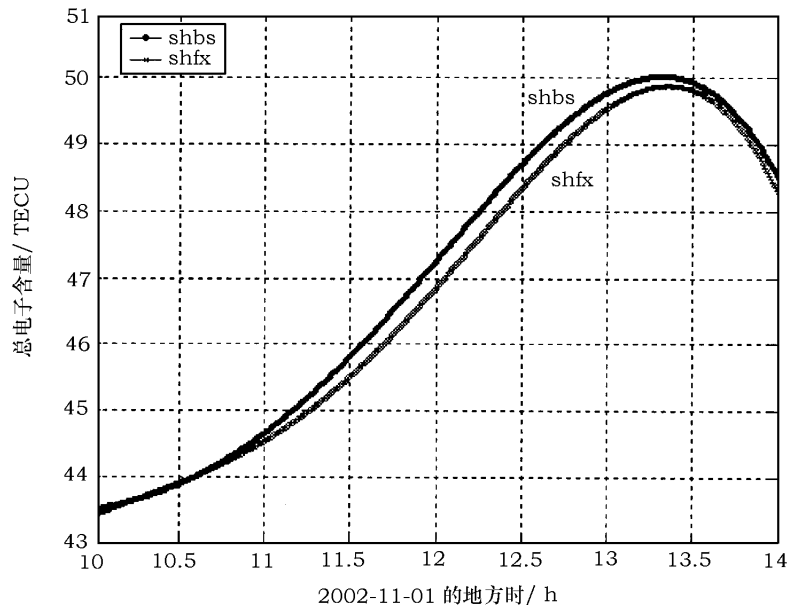


图 4 利用上海地区 GPS 综合应用网的数据建模计算得到的 2002 年 11 月 1 日 SHFX (上海奉贤站) 和 SHBS (上海宝山站) 上空的电离层变化

### 3.2 IRI 模型

目前,常用的电离层经验、半经验物理参数模型包括 Chiu、Bent、Penn State Mk III、SLIM、FAIM 等,而 IRI 模型是目前最有效且被广泛认可的半经验物理电离层模型。该模型

是在国际空间研究委员会 (Committee On Space Research, COSPAR) 和国际无线电委员会 (International Union of Radio Science, URSI) 的联合资助下, 从 1960 年开始由 IRI 工作组通过 30 多年的努力, 利用可以得到的所有数据资料 (包括 ionosondes、非相干散射雷达、卫星资料、探空火箭资料) 建立的标准经验模型<sup>[6]</sup>。它融汇了多个大气参数模型, 引入了太阳活动和地磁  $A_p$  指数的月平均参数, 描述了无极光电离层在地磁宁静条件下特定时间、特定地点上空 50~2000 km 范围内的电子密度、电子温度、离子 ( $O^+$ 、 $H^+$ 、 $He^+$ 、 $NO^+$ 、 $O_2^+$ ) 温度、离子成分、电子含量等月平均值。目前公布的最新模型是 IRI2001, 于 2003 年发布。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。

图 5 是我们利用 IRI2001 模型计算的上海地区上空太阳活动极大和极小年正午和子夜的 VTEC 高度分布。该图表明, 电离层 D 层通常在太阳活动峰年出现, 白天出现的 E 层到了晚上可能会变薄甚至消失; 白天天顶方向 VTEC 比晚上高 5~10 倍, 正午的 VTEC 在太阳活动峰年时比谷年高 2~3 倍。

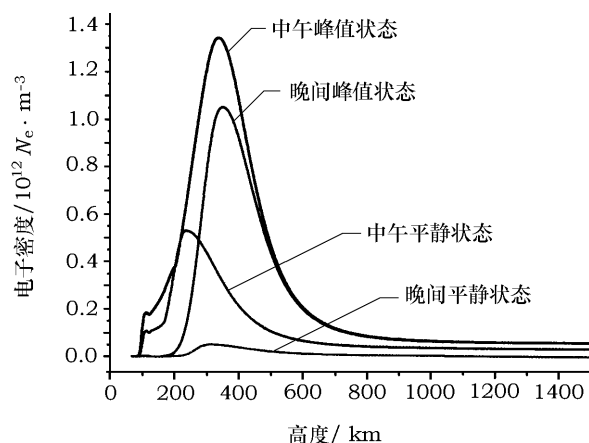


图 5 上海上空太阳活动极大和极小年的正午和子夜的 VTEC 高度分布

为了分析 IRI2001 模型计算结果的有效性, 我们比较了太阳活动峰年 (2001~2003 年) 卫星全球观测得到的 VTEC 与 IRI2001 模型预报值的差异, 如图 6 所示。实际上, 这一时间段内电离层已经超出了地磁宁静的条件范围。图 6 表明, 垂直方向上 IRI 模型计算得到的 VTEC 结果与 GPS 观测结果 (假定为真值) 之间的日平均差异一般小于 8 TECU, 一天中各观测历元上的差异一般为 10~20 TECU。而这两年的 VTEC 一般在 100~200 TECU 之间, 故垂直方向上最大为 10 TECU 的日平均偏差、一天中各历元的 10~15 TECU 均方差表明, IRI2001 模型可以有效消除电离层延迟对卫星发射的无线电信号影响。

实际上, 图 6 给出了太阳活动高峰年 IRI2001 的表现, 而在太阳活动极小年的地磁宁静条件下, IRI 模型可以很精确地描述天顶 TEC 分布。图 7 给出了 1996 年 10 月中旬某一个星期中欧洲 6 个 IGS 站上观测的电离层延迟与早期的 IRI90 计算结果的比较<sup>[7]</sup>, 表 1 则是其对应的 IRI 预报的 TEC 与 GPS 计算的 TEC 之间的差异。



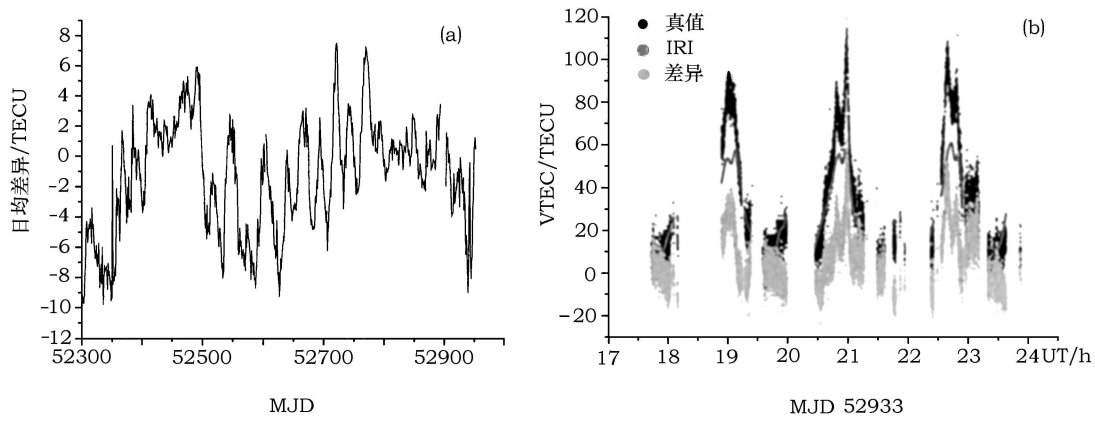


图6 太阳活动峰年 IRI 与总电子含量 TEC 实测值的偏差

(a) 日平均; (b) 沿穿刺点轨迹

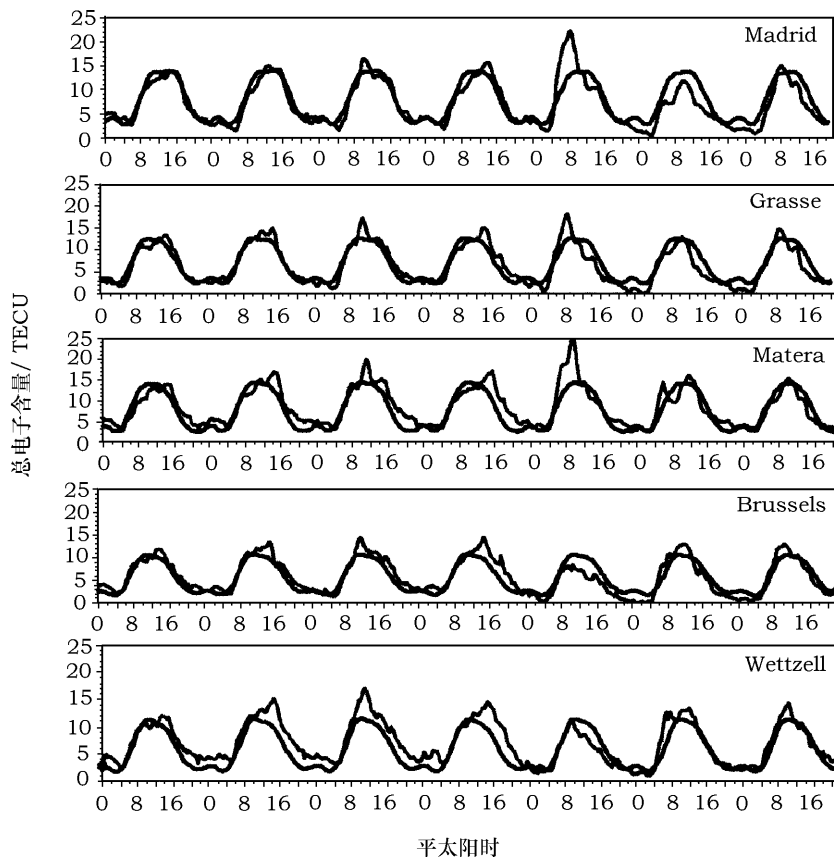


图7 1996年10月中旬某一个星期内欧洲6个IGS站上观测到的VTEC连续变化曲线与IRI90计算结果的比较<sup>[7]</sup>

表 1 IRI90 预报的 TEC 与 GPS 计算的 TEC 的比较

测站	平均差异	差异的标准差
	/TECU	/TECU
Madrid	-0.7	1.5
Grasse	-0.4	1.8
Matera	0.5	2.3
Brussels	0.2	1.5
Wetzell	1.1	1.7
Onsala	0.3	1.5

从图 7 和表 1 可见, IRI 模型在太阳活动极小年计算的 VTEC 与实际观测的偏差较小, 一般在 1~2 TECU, 对应的距离为 20~30 cm, 比太阳活动峰年小 10 倍左右。考虑到这段时间内全球平均 VTEC 也较小, 一般为 10~20 TECU, 即太阳活动峰年的 VTEC 比太阳活动极小年的 VTEC 高 10 倍左右, 因此, IRI 模型的相对精度在太阳活动峰年和太阳活动极小年大体上是相当的, 改正效果都在 60% 以上。目前, IRI 工作组正考虑把 GIM 的结果引入到 IRI 模型中, 未来的 IRI 模型给出的 TEC 结果即使在太阳活动极大期也可以精确地描述 TEC 的全球分布。

## 4 小 结

卫星导航定位系统中, 电离层延迟是一个很重要的误差源。为了有效削弱该误差源的影响, 提高导航定位的精度, 需要选择一个很好的电离层延迟改正模型。对于不同的用户而言, 电离层延迟改正模型的精度要求不一样, 实时性要求也不尽相同。为此, 我们比较详细地比较分析了导航卫星系统中的电离层延迟改正模型, 并进行了相应的分类。通常, 电离层延迟改正模型可以分为预报模型、实时模型、后处理模型 3 类。第一类模型一般用作导航系统 (如 GPS, Galileo) 的预报模型, 第二类模型往往用作广域差分的电离层延迟校正, 第三类模型则常常用作事后的数据分析中。此外, 我们还简要分析了国际参考电离层 IRI 模型的实际改正效果, 并针对预报模型——Klobuchar 模型的存在问题, 提出了相应的改进方法。

### 参考文献:

- [1] de Oliveria Camargo P, Francisco G M J, Danilo D F L. Earth Planets Space, 2000, 52: 1083
- [2] 王刚, 魏子卿. 测绘通报, 2000, 9: 1
- [3] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平等. 广域差分 GPS 原理和方法, 北京: 测绘出版社, 1999: 109
- [4] 余明, 郭际明, 过静军. 测绘通报, 2004, 6: 5
- [5] Stefan S. Ph.D Thesis, Bern: Bern University, 1999: 68
- [6] 刘瑞源, 权坤海, 戴开良等. 地球物理学报, 1994, 37(4): 422
- [7] Komjathy A, Langley R B. <http://gauss.gge.unb.ca/grads/attila/papers/ionntm/ion96.htm>

## Brief Review of the Ionospheric Delay Models

ZHANG Hong-ping<sup>1,2</sup>, PING Jin-song<sup>1</sup>, ZHU Wen-yao<sup>1,3</sup>, HUANG Cheng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Key Laboratory of Advanced Engineering Survey of SBSM, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Usually, the ionosphere delay models can be sorted as three types—the forecast model, the real-time model and the post-processing model. Different purpose for the application of these models is required to choose one that can be used to correct the ionospheric delay efficiently. Here we compare several ionosphere delay models often used, such as the functional model used for Wide Area Augmentation System (WAAS)—trigonometric series function, polynomial model, and low degree spheric harmonics function. The three models are roughly equivalent to each other in the ionosphere delay correcting for WAAS. The TEC harmonic expansion trend function can be used to analyze the long-trend variations of the ionosphere. The International Ionosphere Reference (IRI) model, as an empirical one, can reach 60 percent of the correcting effect. The Klobuchar model as the GPS broadcast model can also achieve same effect although there are some shortcomings in the parameters setting. This model will be discussed here and some improving methods are presented.

**Key words:** astrometry; ionospheric delay model; review; Klobuchar model; GPS