

电离层延迟修正方法评述

吴雨航, 陈秀万, 吴才聪, 胡加艳

(北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京, 100871)

摘 要: 电离层延迟是卫星导航定位的重要误差源之一, 为了有效消除该误差的影响, 需要选择适当的电离层延迟修正方法。对电离层延迟修正精度和实时性要求不同, 选用的改正方法也不尽相同。本文在分析各修正方法原理的基础上, 论述了各方法的优缺点、存在问题、以及适用范围, 该研究对于选用电离层修正方法具有指导意义。

关键词: 双频改正法; 电离层延迟模型; Klobuchar; Bent; IRI

中图分类号: P207

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2008)02-0001-05

1 引言

地球大气受太阳辐射作用发生电离, 在地面上空形成电离层。一般情况下, 人们界定电离层的高度范围为 1000km 以下。1000km 以上电离大气的自由电子密度比较低, 对电波传播的影响基本可以忽略。电离层的下边界一般在 100km 以下, 随时间和空间而变化。当电磁波在电离层中传播时, 传播方向和传播速度会发生改变, 相对真空传播, 产生所谓电离层折射误差。对于 GPS 载波频率, 电离层对测距的影响, 最大时可达 150m; 最小时也有 5m。因此, 电离层误差是 GPS 测量中不可忽视的重大误差源之一^[1]。

国内外学者不断地致力于电离层传播效应的修正研究, 总结提出了不同的电离层延迟修正方法和模型。早在 20 世纪 70 年代就有人提出用双频改正电离层延迟误差, 并不断有人提出不同的电离层改正模型。目前各卫星导航系统、差分增强系统采用的电离层延迟修正方法有所不同, 总体而言, 以双频改正法、电离层模型法及差分改正法应用最为广泛。

2 电离层延迟修正

2.1 双频改正法

对电波传播而言, 电离层属于色散介质。不同频率的载波信号穿越电离层时产生的延迟量不同。

基于这一原理, 产生了双频改正法。

调制在载波上的测距码在电离层中以群速度传播, 而载波信号则以相速度传播。因此, 利用调制在 L1 上的测距码测得的电磁波从卫星到接收机的真实距离(传播时间为 Δt_1 时)

$$\begin{aligned} S_1 &= c\Delta t_1 - 40.28 \int_s N edS / f_1^2 \\ &= \rho_1 - 40.28 TEC / f_1^2 \end{aligned}$$

同理, 利用调制在 L2 载波上的测距码进行伪距测量时有

$$\begin{aligned} S_2 &= c\Delta t_2 - 40.28 \int_s N edS / f_2^2 \\ &= \rho_2 - 40.28 TEC / f_2^2 \end{aligned}$$

两式相减, 可得

$$\rho_2 - \rho_1 = 40.28 TEC / f_2^2 - 40.28 TEC / f_1^2 \quad (1)$$

因此有

$$\begin{aligned} I_1 &= 40.28 TEC / f_1^2 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\gamma - 1} \\ &= \frac{c(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\gamma - 1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= 40.28 TEC / f_2^2 = \frac{(\rho_2 - \rho_1)\gamma}{\gamma - 1} \\ &= \frac{c(\Delta t_1 - \Delta t_2)\gamma}{\gamma - 1} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2}$ 。若顾及到卫星发射 L1 和 L2 信号时产生的时间延迟参数时, 电离层延迟改正可表

*收稿日期: 2008-11-02

2008.2/全球定位系统

达为^[4]:

$$I_1 = 40.28 TEC / f_1^2 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\gamma - 1} - c T_{GD},$$

$$I_2 = 40.28 TEC / f_2^2 = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\gamma - 1} - c T_{GD}$$

当知道调制在 L1 和 L2 上的测距码传播的距离差或时间差时,即可反推出这两个信号各自的电离层延迟量。用该方法,还可求取总电子含量或电子密度。当然也可以用载波信号传播的距离差求取电离层延迟误差,但会涉及到载波相位和整周模糊度的解算问题。

双频改正法可以将电离层传播效应引入的距离误差修正 90% 以上。目前,为满足长距离、高精度测量的需要,Fritj K 和 Brunner 等^[4]提出了一个改进公式。该公式顾及了 f^3 和 f^4 项的影响,并且沿着弯曲的信号传播路径而不是沿着直线来进行积分,该改进公式的精度在任何情况均优于 2mm^[2]。

2.2 模型法

电离层模型大体可分为两类,一类模型是依据长期观测资料建立的反映电离层变化规律的经验公式。另一类模型则是依据某一时段中的某一区域内实际测定的电离层延迟,采用数学方法拟合出来的模型^[3]。不同模型的精度及计算的复杂程度不同,决定了它们应用的广泛性不同。

1) Bent 模型

Bent 模型属于经验模型,由美国的 Rodney Bent 和 Sigrid Llewellyn 于 1973 年提出^[5]。在该模型中,电离层的上部用 3 个指数层和一个抛物线层来逼近,下部则用双抛物线层来近似。用该模型可计算 1000km 以下的电子密度垂直剖面图,获得 VTEC (Vertical Total Electron Content, 天顶方向的总电子含量) 等参数,从而可求得电离层延迟等数据。

该模型着眼于尽可能使 VTEC 值正确,以获得较准确的电离层延迟量。该模型的输入参数为日期、时间、测站位置、太阳辐射流量及太阳黑子数等^[3],其电离层延迟修正精度达 60% 左右。

2) IRI 模型

IRI (International Reference Ionosphere) 模型由国际无线电科学联盟 (URSI) 和空间研究委员会 (COSPAR) 提出的标准经验模型,最早的模型版本为 IRI-78,发布于 1978 年^[6],之后经过多次修正,目前采用的多为 IRI-90 或 IRI-2001。IRI

模型是目前最有效且被广泛认可的经验模型,它融合了多个大气参数模型,引入了太阳活动和地磁指数的月平均参数,采用预报的电离层特征参数描述电离层剖面^[3]。

IRI 电离层模型是一种统计预报模型,反映平静电离层的平均状态,能够给出较好的全球电离层形态。该模型也适用于单频 GPS 接收机实时快速定位时进行电离层延迟改正,同时,该模型不受地域限制,适用于全球的任何地方。不足之处是由于较少或没有采用中国地区资料,根据插值求得的主要参数,在中国地区产生不同程度的偏差。如果用实测的电离层参数代替预报参数进行计算,则可提高模拟精度。

3) Klobuchar 模型

Klobuchar 模型也属于经验模型,由美国的 J. A. Klobuchar 于 1987 年提出,描述了作为时间函数的电离层时延的周日特性。该模型把晚间的电离层时延看成是一个常数,取值为 5ns,把白天的时延看成是余弦函数中正的部分,每天电离层的最大影响定位当地时间的 14:00^[2]。因而天顶方向的电离层延迟可表示为:

$$T_g = 5ns + A \cdot \cos \frac{2\pi}{T}(t - 14h) \quad (4)$$

振幅 A 和周期 T 可由式(5)计算

$$A = \sum_{i=0}^3 \alpha_i (\varphi_m)^i \quad T = \sum_{i=0}^3 \beta_i (\varphi_m)^i \quad (5)$$

其中,系数 α_i 和 β_i 是地面控制系统根据日期及前 5 天太阳的平均辐射流量而选取的,并编入 GPS 卫星的导航电文中发播给用户。

Klobuchar 模型是基于 Bent 电离层经验模型简化而来。其优点是结构简单,计算方便,适用于单频 GPS 接收机实时快速定位时电离层延迟改正,且 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。该模型的不足是电离层延迟改正精度有限,适用的空间范围限定在中纬度地区。高纬和低纬赤道地区,由于电离层变化活动剧烈,该模型不能有效反映电离层的真实状况。经验表明,Klobuchar 模型仅改正电离层影响的 50%—60%,理想情况下可改正至 75%。

4) 电离层延迟谐函数展开模型

电离层延迟谐函数展开模型是后处理模型,它的表达式^[2]为:

$$\Psi(t) = C_0 + \sum_{i=0}^n (C_i \cos(\omega_i t) + S_i \sin(\omega_i t)) \quad (6)$$

其中, $\omega_i = 2\pi/T_i$, $\Psi(t)$ 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 年和 14.77、1 天; C_i 和 S_i 是球谐函数对应于第 i 个周期的系数, ω_i 是第 i 个周期对应的角频率。

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、地磁活动之间的关系。因此, 该模型可用于预报, 如欧洲定轨中心(CODE)利用全球的 GPS 观测资料, 将电离层延迟系列展开成不同周期的球谐函数形式, 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。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。

5) Georgiadiou 三角级数展开模型

在电离层延迟一阶近似的情况下, 电离层折射与 VTEC 成正比, 因此, 电离层折射可直接通过对 VTEC 的模型化来表示, Georgiadiou 模型就是其中的一种^[2]。其表达式为:

$$\text{VTEC} = a_1 + a_2 B^s + \sum_{i=1}^n \{ a_{i+1} \cos(ih^s) + a_{i+1} \sin(ih^s) \} + a_{n+3} B^s h^s \quad (7)$$

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;

$h^s = \frac{2\pi}{T}(t-14)$ 为相位差, T 为一天 24 小时,

而 t 是观测时刻穿刺点的地方时。

该模型的优点是结构简单, 计算方便, 适用于单频 GPS 接收机实时快速定位时进行电离层延迟改正。不足是电离层延迟改正精度有限, 适用的空间范围限定在中纬度地区^[7]。

除了以上介绍的模型, 还有用来建立广域差分用的实时模型, 如二维多项式模型以及低阶球谐函数展开模型。另外还有 Fritzke 和 brunner 等人提出的电离层延迟改正模型, 如 ICED 模型、FAIM 模型等。

2.3 差分改正法

差分改正法即根据电离层延迟在短距离内具有较好的空间相关性, 利用差分定位原理进行电离

层延迟改正。由于在短距离内通常具有较好的相关性, 因而用户在短基线上进行相对定位修正电离层延迟或在基准站附近进行差分修正时, 即使采用单频接收机, 通常也可获得相当好的结果。但对于 WADGPS 和 WAAS 来讲, 用户基准站的距离可能达数百公里甚至数千公里, 故也无法依靠这种方法来消除电离层延迟^[3]。

2.4 其它电离层延迟修正方法

近几年, 随着用户需求的变化和空间段技术的发展, 各全球导航卫星系统已采用或计划采用三个频率的载波进行信号广播。因此, 运用三个频率进行电离层折射误差高阶项的消除在理论上已成为可能, 即在分析电离层折射误差模型的基础上, 运用三频伪距观测值和载波相位观测值将电离层折射误差改正至二阶项, 并推导三频载波相位观测值无电离层折射组合方程, 其误差改正可达到毫米级, 可基本上消除电离层的影响^[8]。目前该方法还不是很成熟, 实际应用效果还不理想, 只有在原始载波相位观测值的测量噪声很小、采样率很高时才有实际应用的可能。

袁运斌和欧吉坤^[9]通过建立电离层穿刺点的电离层蚀因子及其影响因子, 综合白天和夜间电离层 TEC 的不同变化规律, 兼顾电离层季节变化, 研究了利用 GPS 数据确定电离层延迟精度的电离层蚀因子法。目前该方法在理论上和应用上都需要进一步拓展。

在实际应用中为了取得更好的效果, 建立了各种区域电离层延迟改正模型^[10]。各广域增强系统(如 EGNOS、WAAS)则采用格网改正法^[11]。随着网络 RTK 技术的发展, 也有人提出基于 GPS 参考网络进行电离层延迟修正。

3 电离层延迟修正方法比较

3.1 修正方法精度比较

目前各电离层延迟修正方法中双频改正法是应用最广泛的电离层改正方法。三频改正法理论上是电离层延迟修正精度最高的方法, 双频改正法也能达到很好的修正精度, 一般可修正电离层影响至 90% 左右。差分改正法的修正精度及应用受基线长度以及基站精度限制。三角级数函数模型与多项式模型改正效果基本上是等价的。低阶球谐函数模型也可同三角级数函数模型达到同样效果。Bent 模型的精度要优于 IRI。而 Klobuchar 模型理想情况下可改正至 75%。

3.2 方法应用选择

不同方法的应用领域和范围不同,如 Klobuchar 模型、Bent 模型、IRI 模型、ICED 模型和 FAIM 模型等可进行电离层预报,其中最常用的是 Klobuchar 模型。电离层延迟谐函数展开模型是后处理模型,也可用于预报。而多项式模型则不宜用作电离层延迟改正的预报模型。Geogiadou 三角级数展开模型、低阶球函数展开模型、二维多项式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。二维多项式模型是目前最广泛应用的局部电离层模型,该模型一般只能在数小时内达到较好的拟合精度。若

基于数小时测段的卫星导航观测数据确定电离层延迟量,选择多项式模型较为适当。Geogiadou 三角级数模型能有效模拟长测段电离层延迟,对需要以天为测段进行电离层延迟确定或相关研究,Geogiadou 三角级数模型最为合适,其次是球谐函数模型。低阶球谐函数是较好的局部电离层模型,因此对区域性和全球电离层 TEC 形态研究以及对 WAAS 等大规模差分应用系统而言,低阶球谐函数模型可作为最佳的参数模型之一。而高阶球谐函数模拟全球或区域性电离层活动的效果明显好于经验模型。

表 1 电离层延迟修正方法比较

方法	复杂程度	误差改正比例	预报性	局限性	扩展性	适用范围
双频改正法	简单	90%左右	否	不适用于单频用户	较好	适于全球范围双频接收机用户
差分改正法	简单	较好,受限于基站精度	否	长基线用户不适合	一般	短基线相对定位或基准站附近差分导航定位
Bent	较简单	60%左右	是	中纬度范围	较差	广播星历用电离层改正模型
IRI	较简单	60%左右	是	计算结果在中国地区产生不同程度的偏差	较差	适用于全球实时快速定位时进行电离层延迟改正
Klobuchar	简单	50—60%	是	限定在中纬度地区,且不能有效反映电离层真实状况	较差	广域差分和广播星历用电离层改正
Geogiadou	简单	较 Klobuchar 高	否	空间范围限定在中纬度地区	较好	广域差分用电离层延迟改正

4 结论

不同的电离层改正方法描述同一地区的电离层延迟的能力是不同的,同一改正方法描述不同地区的电离层延迟也是有差异的。特定的修正方法,利用不同的输入参数或输入参数数目不同,所获得的电离层延迟改正的精度是不同的,同时不同的修正方法的复杂性也是不同的。应根据不同地区的电离层 TEC 变化特性,选择合理的电离层延迟改正方法,以实现电离层延迟的高精度修正。选择何种改正方法确定电离层延迟,应结合精度要求和复杂性两方面考虑。

参考文献:

[1] 冯铁军,唐家兵,谢世杰. GPS 定位中的电离层误差[J]. 全球定位系统, 2002, 27(1): 13~17

[2] 章红平,平劲松,朱文耀,等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 16—26

[3] 刘经南,陈俊勇,张燕平,等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京:测绘出版社, 1999: 90—114

[4] 李征航,赵晓峰,蔡昌盛. 全球定位系统(GPS)技术

的最新进展: 第五讲 利用双频 GPS 观测值建立电离层延迟模型[J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(1): 41—44

[5] A. M. Meza, C. A. Brunini, W. Bosch, etc. Comparing vertical total electron content from GPS, Bent and IRI models with TOPEX—Poseidon [J]. Advanced Space Research, 2002, 30(2): 401—406

[6] D. Bilitza. IRI: An international rawer initiative[J]. Advanced Space Research, 1995, 15(2): (2)7—(2)10

[7] 袁运斌,欧吉坤. 广义三角级数函数电离层延迟模型[J]. 自然科学进展, 2005, 15(8): 1015—1019

[8] 伍岳,孟泱,王泽民,等. GPS 现代化后的电离层折射误差高阶项的三频改正方法[J]. 武汉大学学报, 2005, 30(7): 601—603

[9] 袁运斌,欧吉坤. 基于 GPS 数据确定电离层延迟的蚀因子法[J]. 自然科学进展, 2005, 15(3): 363—366

[10] 蔡昌盛,李征航,张小红. 利用 GPS 载波相位观测值建立区域电离层模型研究[J]. 测绘通报, 2002, (11): 14—16

[11] 王刚,魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立方法与试算结果[J]. 测绘通报, 2000, (9): 1—2

Review of the Ionospheric Delay Correction Methods

WU Yu-hang, CHEN Xiu-wan, WU Cai-cong, HU Jia-yan

(Institute of Remote Sensing and GIS, Beijing University, Beijing, 100871)

Abstract: The ionospheric time-delay is an important error source for GNSS users. In order to eliminate this error, a good method for correcting ionospheric delay error must be chosen. However, different methods must be chosen to meet the need of different correction precise and different ability of real-time. In this paper, the author analyzed the virtue and flaw of these methods, problems existed, and the applicable area also was pointed out based on analyzing the principle of these methods. Conclusions drawn in this paper is significant for users to choose ionospheric delay correcting methods.

Key words: Dual-frequency correction method, Ionospheric delay model, Klobuchar, Bent, IRI

作者简介: 吴雨航, 女, 博士生, 主要从事卫星导航技术研究工作。

吴才聪, 男, 博士, 讲师。从事卫星导航技术研究工作。

麦哲伦公司推出新的 RTK 测量系统

麦哲伦导航定位公司推出一种名为 ProMark³ 的 RTK 测量系统, 该系统采用 L¹ RTK 测量解决方案。此前, RTK 测量系统采用 L¹ 和 L² 频率, 而 ProMark³ RTK 系统仅使用 L¹ 频率, 就可替代价格昂贵的采用 L¹/L² 频率的 RTK 系统。

ProMark³ RTK 测量有两种工作模式, 一种是基站+流动站, 或单独流动站。流动站可通过 GPRS 功能与实时网络相连接。另一种工作模式是基站+流动站, 这种工作模式是应用一有效扩展频谱无线电解决方案。

BLADE 技术是该公司 GNSS 处理方法的专利技术。含有 BLADE 专利技术的 ProMark³ 的 RTK 测量系统优于单频 RTK 接收机并具有实时轻便的手持机的性能。这项技术采用双星(GPS+SBAS)系统来快速驱动初始化, 以实现可靠性并达到厘米级实时测量精度。

ProMark³ RTK 还具有 FAST 测绘选择方案。这种先进的信息组集软件与价格较贵的 RTK 系统相连接, 供那些有经验的专业测量人员和 RTK 用户新手以同样的方式进行象放样、道路施工和综合设计那样的整套测量工程。

ProMark³ 系统可使用户方便升级。