

基于双频数据组合的可见星电离层延迟研究

杨腾飞,高法钦,李斯凡,岳滕飞

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

摘 要: 电离层延迟是引起卫星定位误差的主要因素之一,为了有效消除该误差的影响,提出一种基于可见卫星双频数据几何无关组合解算电离层延迟的方法。用卫星双频伪码和载波观测量的差分组合对可见卫星进行电离层延迟建模,然后将组合变换为原始观测量的线性形式进行差分解算,最后演化成对观测量的几何无关组合修正电离层延迟。仿真实验得到某一时间段可见卫星的坐标轨迹、电离层延迟以及模型误差。将各种模型的延迟和误差进行比较,结果发现该方法可不同程度有效修正电离层延迟。

关键词: 电离层延迟;可见星;无关组合;Klobuchar 模型;载波相位

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851 (2016) 02-0265-07 **引用页码:** 030506

0 引 言

GNSS 导航定位中有多种误差源,包括电离层效应、对流层效应、相对论效应、轨道误差、地球潮汐效应、多径效应、钟差以及接收机噪声等。其中电离层效应引起的误差对卫星导航定位精度影响最大。以 GPS 定位系统为例,由电离层效应引起的伪距误差最大为 150 m,最小时也有 5 m 左右^[1-2]。电离层是一种散射介质,即其折射系数是电波频率的函数。因此,双频接收机的观测值可借助这一特点校正电离层延迟^[2]。另外,电离层会呈现日变化特性,在这种日变化中,通常下午 3 点左右电离作用最强,而在午夜几个小时电离作用最弱。另外,电离层效应还受太阳活跃变化的影响,很难精确建模。因此,电离层误差是全球定位系统(GPS)测量中主要误差源,它更是限制单频 GPS 接收机测程的主要因素。对电离层的研究就成了必不可少的课题。

在目前比较实用的三大类电离层延迟改正模型中,经验模型,即根据全球各电离层观测站长期积累的观测资料建立全球性的经验公式,这类模型可用

来计算任意时刻和任意地点的电离层参数^[3]。Klobuchar 于 1975 年通过大量数据建模提出了 Klobuchar 模型,李文文等^[4]对 BDS 和 GPS 的 8 参数 Klobuchar 模型进行了比较分析,黄逸丹等^[5]对中国电离层资料提出了 14 参数的电离层改正模型。Radicella^[6]提出计算任意点垂直方向电子总含量和斜距方向上电子总含量,用参数 Nm2F 和 Im2F 来表示给定时间和位置的电子浓度,从而得到改进电离层的垂直剖面图的 NeQuick 模型。Meza 等^[7]对 Bent 于 1973 年提出的以地点、时间、天气等为参数描述电离层区间内电子密度、电子温度、电离层成分的 Bent 模型进行了改进和比较。之后,COSPAR 等组织将所有电离层资料融合大气参数模型、太阳活动和地磁 Ap 指数的月平均参数建立的标准经验 IRI 模型等。一般 Bent 模型和 IRI 模型需要上百个系数,改正精度可达到 75%左右^[8-9]。

实测数据模型,为满足用户实时需求或进行短期预报的需要,利用 GPS 卫星信号观测值或其他手段实际测定电离层延迟,通过数学拟合建立覆盖全球或区域的电离层延迟模型。全球模型如 CODE

收稿日期: 2015-05-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61402417);浙江省自然科学基金项目(LY14F030025)

作者简介: 杨腾飞(1989-),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事卫星导航方面的研究。

通信作者: 高法钦, E-mail: wenxiuli6@126.com

数据分析中心提供的 GIM 模型,改正效果一般在 80%~90%^[8-9];区域模型有曲面拟合模型、距离加权法、多面函数法等^[8-9]。

双频改正模型,即利用 GNSS 双频观测值来直接计算电离层延迟或双频观测组合进行消电离层计算。其中,由于伪码观测量精度不高,使用伪码观测量进行电离层误差计算的精度也不高。载波观测量的精度相对较高,但使用载波观测量进行电离层修正要考虑卫星可见性和整周模糊度的影响,而整周模糊度的求解较为复杂,又很难实时计算。因此,考虑将伪距和载波观测量组合来计算研究电离层延迟,可达到更客观的反应电离层效应得目的。本文采用对真实的卫星双频数据进行提取,解算卫星相对用户的可见性,在此基础上对可见星的伪距和载波观测量进行载波差分组合和无关组合解算,并将无关组合计算仿真的结果与单频信号模型和载波相位差分计算的结果进行比较,分析和验证本方法的可行性和可取之处,并分析相应的电离层效应的影响。

1 电离层信号传播

空间距地球表面 60~1000 km 的大气层被定义为电离层,由受太阳辐射而电离的气体组成,是近地空间环境的重要组成部分。电离产生了大量分布不均匀的自由电子云,这些带电粒子由于受到地球磁场的作用,将会对电磁波信号的传播产生影响,即电磁波信号的传播路径发生弯曲和传播速度发生改变,从而产生信号的延迟^[10]。

信号在介质中传播路径长度的变化与折射率有关,而电离层空间的折射率与电离层电子密度和电磁波频率直接相关。其中,天顶方向上的电子总量定义为对电子密度 N_e 沿天顶方向路径的积分^[11-12]:

$$TEC_z = \int_{zenith} N_e ds \quad (1)$$

TEC 可由特定的模型计算,若合并天顶方向和信号传播路径上的 TEC,还需要引入一个倾斜因子或映射函数 F ^[12]。几种典型的映射函数有投影映射、几何映射和椭球映射等。投影映射和几何映射都是在假定自由电子是均匀分布的情况下的一种近似模型,而椭球模型则较接近真实的地球电离层情况。有映射函数的广播电离层模型延迟可表示为^[12]:

$$\begin{cases} \delta_g(f_1) = cF \times 5 \times 10^{-9}, & |x| \geq 1.57 \\ \delta_g(f_1) = cF \times (5 \times 10^{-9} + Q(1 - x^2/2 + x^4/4)), & |x| < 1.57 \end{cases} \quad (2)$$

其中: c 表示光速, Q 表示振幅。

由 $L1$ 的电离层延迟和 $L1$ 、 $L2$ 的频率可得出 $L2$ 频点的电离层延迟:

$$\delta_g(f_2) = (f_1^2/f_2^2) * \delta_g(f_1) \quad (3)$$

2 双频组合电离层修正

文献^[12]中提出,伪距测量中只有电离层效应与电磁波频率有关,双频伪距的简单差分可消除电离层效应外的其他影响,进而确定电离层延迟;另外电离层效应也可由双频载波相位观测量确定,用两个频率相位伪距的差分组合可确定相应电离层延迟值。

如上所述,利用伪码观测量和载波相位观测量分别进行差分求各自电离层延迟有其固有的优点^[13],直接伪距和相位差分即可表示电离层延迟,计算量小。但也分别有其缺点,由于伪码观测量精度不够高导致电离层延迟精度不高,再者,对其他误差的忽略也对电离层延迟精度造成影响。若使用同一观测点同一接收机 GPS 观测数据的无关组合进行计算,则可以避免分别求解带来的问题。

若不考虑误差,媒介为真空时,所测伪距等于几何距离,载波相位可简单的表示为接收机参考相位与接收卫星信号相位的差分:

$$R_r^k(t_r, t_e) = (t_r - t_e) \cdot c \quad (4)$$

$$\Phi_r^k(t_r) = \Phi_r(t_r) - \Phi^k(t_r) + N_r^k \quad (5)$$

其中:下标 r 和上标 k 分别表示接收机和卫星; t_r 和 t_e 分别表示接收机接收信号时刻和卫星信号发射时刻; R_r^k 表示接收机与卫星之间的相对伪距; Φ_r^k 表示接收机与卫星之间测量的相位; Φ_r 表示接收机振荡器产生的相位; Φ^k 表示接收卫星信号的相位; N_r^k 表示接收机 r 和卫星 k 相对模糊度。

理想状态下,伪距实际上是一个关于两个时间变量的函数。而实际卫星发射时间未知,可令信号传播时间为 $\Delta t_\omega = t_r - t_e$ 。则用传播时间来表示几何距离表示为:

$$\rho_r^k(t_r, t_e) = \rho_r^k(t_r) + [d\rho_r^k(t_r)/dt] \Delta t_\omega \quad (6)$$

其中,式(6)等号右侧为几何距离函数在接收时间 t_r 展开的泰勒级数, $d\rho_r^k(t_r)/dt$ 表示卫星与接收机之间径向距离对时间的求导,以上便是理想状态下伪距观测量。

卫星信号相位传播过程中,接收机在接收时刻接收的卫星信号相位恰好等于发射时刻的卫星信号相位,此时令 GPS 信号传播的时间为 $\Delta t_\omega = \rho_r^k(t_r, t_e)/c$ 。其中, $\rho_r^k(t_r, t_e)$ 表示的意义与式(6)中的

相同。假定初始时间为零,将接收的卫星信号相位由接收机参考信号的频率表示,则有 $\Phi_r(t_r) = f \cdot t_r$ 和 $\Phi_r^k(t_r - \Delta t_{ca}) = f \cdot (t_r - \Delta t_{ca})$ 。

将上述信号传播时间和相位代入到式(5),可得

$$\Phi_r^k(t_r) = \rho_r^k(t_r, t_e) \cdot f/c + N_r^k \quad (7)$$

又有 $c = f\lambda$,则载波相位模型可进一步表示为:

$$\lambda\Phi_r^k(t_r) = \rho_r^k(t_r, t_e) + \lambda N_r^k \quad (8)$$

由以上伪距和载波相位观测量模型,考虑钟差、电离层效应、对流程效应、地球潮汐和海水负荷潮汐效应、相对论效应以及剩余误差的影响,其观测量可分别简化为如下:

$$R_i = \rho + (\delta t_r - \delta t_k) \cdot c + \delta_{ion}(i) + \delta_{trop} + \delta_{tide} + \delta_{rel} + \epsilon_c \quad (9)$$

$$\lambda_i\Phi_i = \rho - (\delta t_r - \delta t_k) \cdot c + \lambda_i N_i - \delta_{ion}(i) + \delta_{trop} + \delta_{tide} + \delta_{rel} + \epsilon_p \quad (10)$$

其中: i 是频率 f 的下标; ρ 为卫星与接收机之间的距离; δt_r 和 δt_k 分别为接收机和卫星在 t_r 和 t_e 时刻的钟差; N_i 是相对于接收机和卫星的整周模糊度; $\delta_{ion}(i)$ 为频率上的电离层延迟; δ_{trop} 、 δ_{tide} 和 δ_{rel} 分别为对流层、潮汐和相对论效应; ϵ_c 和 ϵ_p 分别表示码伪距观测量和载波相位观测量残差,其中,测量误差的主要来源为跟踪环路的热噪声。

根据式(9)和式(10),有伪距-伪距、相位-相位差分组合和相位-伪距几何无关组合可表示如下:

$$R_1 - R_2 = \delta_{ion}(1) - \delta_{ion}(2) + \Delta\epsilon_c \quad (11)$$

$$\lambda_1\Phi_1 - \lambda_2\Phi_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 - A_1/f_1^2 + A_1/f_2^2 + \Delta\epsilon_p \quad (12)$$

$$\lambda_i\Phi_i - R_i = \lambda_i N_i - 2\delta_{ion}(i) + \Delta\epsilon_{pc}, i = 1, 2 \quad (13)$$

其中:定义电离层延迟差 $\Delta\delta_{ion} = \delta_{ion}(1) - \delta_{ion}(2) = A_1/f_1^2 - A_1/f_2^2$; A_1 为电离层参数,可表示为 $A_1 = (R_1 - R_2) \cdot f_1^2 f_2^2 / (f_2^2 - f_1^2)$; $\Delta\epsilon_c$ 、 $\Delta\epsilon_p$ 和 $\Delta\epsilon_{pc}$ 表示残差。

将上述组合变为原始观测量 $L = (R_1 \ R_2 \ \lambda_1 \ \Phi_1 \ \lambda_2 \ \Phi_2)^T$ 的线性变换形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \lambda_1 \Phi_1 \\ \lambda_2 \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & g \\ \lambda_1 & -\lambda_2 & -g \\ \lambda_1 & 0 & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ A_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\epsilon_c \\ \Delta\epsilon_p \\ \Delta\epsilon_{pc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中: $g = (1/f_1^2 - 1/f_2^2)$; $d = -2/f_1^2$; $N_1 = \Phi_1 - (\Phi_w - N_w) \cdot f_1/f_w - R_1 \cdot f_2/(\lambda_1 \cdot f_w) + R_2 \cdot f_1/(\lambda_2 \cdot f_w)$, $f_w = f_1 - f_2$, $\Phi_w = \Phi_1 - \Phi_2$, $N_w = \Phi_w - (f_1 - f_2) \cdot (R_1/\lambda_1 + R_2/\lambda_2)/(f_1 + f_2)$; $N_2 = N_1 - N_w$; 由于各残差差值较小可以忽略,对任意的可见 GPS 卫星,上述线性方程是可解的。解线性方程组式(14),将结果代入式(11)和式(12)即可得出差分电离层延迟。

对式(13)中 $i = 1, 2$ 时分别做整理,忽略 $L1$ 和 $L2$ 的相位整周模糊度,由伪距、载波相位和信号频率的关系可得载波观测量与伪距联合的电离层延迟为:

$$\delta_{ion}(1) = M(\lambda_1\Phi_1 - R_1)/(-1 + f_1^2/f_2^2) \quad (15)$$

$$\delta_{ion}(2) = M(\lambda_2\Phi_2 - R_2)/(-1 + f_1^2/f_2^2) \quad (16)$$

通常电离层延迟需要延迟误差来衡量,其中 Klobuchar 模型的电离层误差可由文献[14]介绍的利用信号穿刺点 TEC 值来计算延迟误差,如式(17)。Klobuchar 模型是一种实用有效的电离层改正模型,其改正效果一般在 60% 左右,理性情况下可达到 75%,电离层误差可达到厘米或分米级,基本上可保证电离层预报的可靠性。

据 IGS 公司提供的电离层 TEC 数据和采用的 0.1 TECU 作为数据单位,其中 1 TECU = 10^{16} (电子数/ m^2),在确定信号传播路径和信号穿刺点的 TEC 值后就可以通过以下公式计算 Klobuchar 模型电离层延迟误差^[14]:

$$\Delta\delta_K = 40.28 \frac{TEC}{f^2} (m) \quad (17)$$

Klobuchar 误差模型计算简单,但精度不高。但对于双频 GPS 卫星信号,需实现任意时刻,任意经纬度的电离层延迟仿真。双频组合观测量可消去电离层一阶误差,剩下的电离层误差即为高阶项误差,其延迟误差最大可达厘米级。电离层二阶误差可有效的反映电离层延迟精度,三阶或更高阶误差很小可忽略不计。二阶误差可表示为:

$$\Delta\delta_D = 37635B \cdot \cos\theta \cdot \frac{TEC}{f^3} (m) \quad (18)$$

其中: B 表示地球磁场强度, θ 表示信号的传播方向与地球磁场方向的夹角。

3 可见星双频电离层仿真

3.1 可见星的电离层仿真

从 GPS 双频卫星信号数据中,提取卫星星历 16 参数进行卫星轨道计算,对卫星的可见性进行估算。

基于星历参数的卫星地心地固坐标系中的空间直角坐标可表示为:

$$\begin{cases} X_k = x_k \cos \Omega_k - y_k \cos i_k \sin \Omega_k \\ Y_k = x_k \sin \Omega_k + y_k \cos i_k \cos \Omega_k \\ Z_k = y_k \sin i_k \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中: x_k, y_k 为 k 时刻卫星在升交点轨道直角坐标系中的坐标; Ω_k 卫星的升交点经度; i_k 为卫星轨道向径校正项。至此, 便可解算卫星的轨道坐标, 对可见星进行估算。

为研究本课题内容, 本文采用仿真能力强大的 Matlab 软件以 GPS YUMA 星历(第 691 周, 周内第 181267s)中的双频数据作依据, 先对星历数据进行提取并对卫星位置轨迹进行计算, 确定卫星的可见时间段。该星历包含 31 颗卫星(1—31 号卫星), 确定在数据时间内可见卫星的情况, 由可见星数据绘制的卫星可见时间段如图 1 所示。

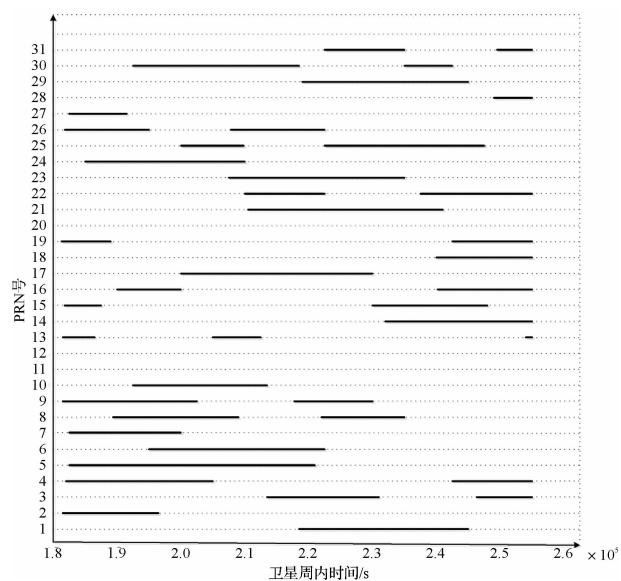


图 1 卫星周内时间的可见星分布

图 1 表明在整周内各卫星可见时间段分布情况, 说明了由于空间卫星星座分布特征, 对于特定时间指定用户的可见卫星是一定的。如 PRN 1 号卫星仅在周内 $2.17 \times 10^5 \sim 2.43 \times 10^5$ s 时间段可见, 即 1 号卫星在这个时间段内对指定用户具有有效的导航定位作用, 其导航数据可被地面接收机接收, 而在其他时间段内该卫星在其他时间对指定用户不具有导航定位数据信息。而 PRN 3 号卫星在周内 $2.13 \times 10^5 \sim 2.32 \times 10^5$ s 和 $2.48 \times 10^5 \sim 2.54 \times 10^5$ s 时间段内可见。PRN 11 号卫星在卫星整周内均不可见。图 2 表示 PRN 6 号卫星周内时间的各坐标轴的坐标轨迹。由图 2 可知, 在周内开始时间到 197 364 s 内卫星不可见, 对这段时间内卫星位置不

做计算, 从 197 364 s 开始对该可见卫星进行位置的解算并有各坐标的曲线图。

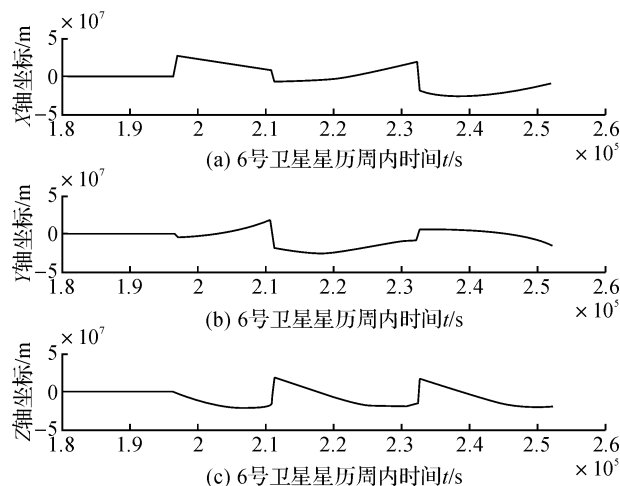


图 2 PRN6 卫星周内时间坐标

3.2 可见星电离层延迟计算

下面以 PRN 6 号卫星为例对卫星数据进行计算仿真。对该卫星星历的 6 个开普勒参数, 6 个调谐参数, 1 个轨道倾角速率改正参数, 1 个升交点赤经速率改正参数, 1 个平均角速度改正参数和 1 个参考时刻星历数据进行卫星瞬时位置仿真计算, 确定卫星可见性。

延迟修正研究过程, 则先用 Klobuchar 模型计算单一频率电离层延迟, 然后用双频模型分别对 L1、L2 频率的载波电离层延迟进行计算, 最后用本文提到载波相位和伪距的无关组合进行电离层延迟的解算, 最后将 3 种模型计算出的电离层延迟结果进行对比, 比较模型计算误差并验证本文提到的双频数据无关组合计算电离层延迟方法的可行性。

图 3 和图 4 给出了 Klobuchar 模型计算一天时间内电离层延迟和对应卫星俯仰角情况, 其中给出

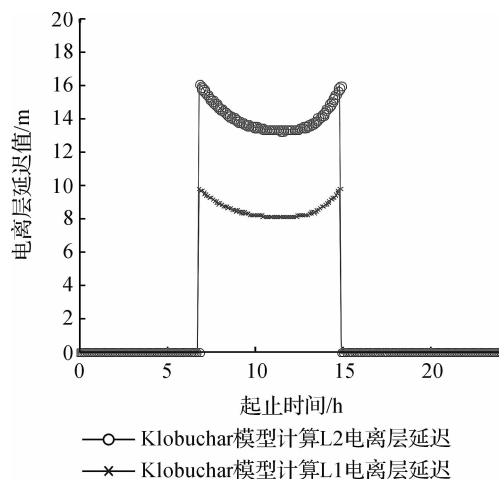


图 3 PRN6 卫星 Klobuchar 模型计算电离层延迟

了约 7~15 h 的卫星相对用户可见时间段。图 3 L1 电离层延迟和 L2 电离层延迟分别由式(2)和式(3)得出。由仿真结果可得出电离层延迟与俯仰角密切相关。计算过程中剔除卫星俯仰角低于 5° 时的值,在可见卫星俯仰角较小时计算电离层延迟较大,当卫星俯仰角较大或接近天顶方向时计算卫星的电离层延迟较小。图 4 显示了卫星从可见时刻开始俯仰角逐渐增大,经过天顶位置后俯仰角逐渐减小,最后从用户可见区域消失的过程。俯仰角最大值时表示卫星在用户天顶所在的面上。

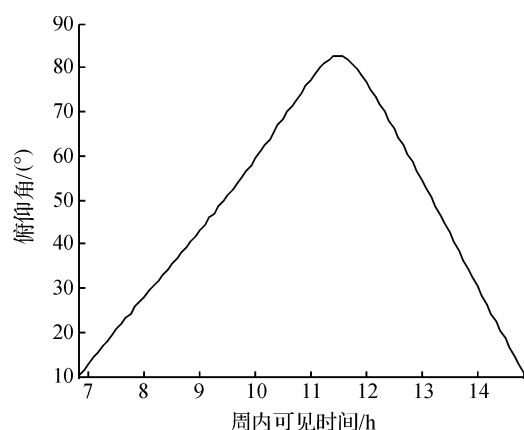


图 4 PRN6 卫星电离层延迟对应的俯仰角

解线性方程组式(14),将结果代入式(11)和式(12)可得出差分电离层延迟。对 PRN6 号卫星载波双频数据进行上述计算仿真,选取一天内约 2 h 的卫星周内时间,可得如图 5 所示的仿真结果,载波相位差分计算的双频电离层延迟在忽略一些残差和整周模糊度的情况下,其电离层延迟曲线平缓上凸却没有表现出与俯仰角的关系,但修正的电离层延迟与 Klobuchar 模型的计算结果相近。

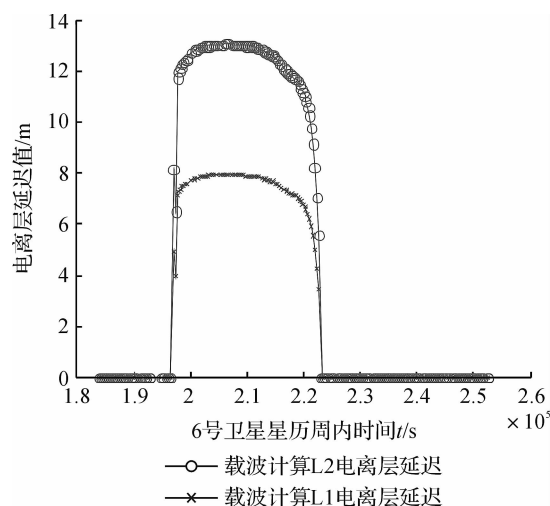


图 5 PRN6 卫星双频模型计算载波电离层延迟

图 6、图 7 仿真结果是由式(15)和式(16)计算得出的 6 号和 8 号卫星电离层延迟,有效延迟计算时间由图 1 可见星分布情况给出,显示了用伪距与载波观测量的几何无关组合对电离层延迟的修正。仿真结果表明,电离层延迟曲线趋势与 Klobuchar 模型相似,双频无关组合能很好的反映电离层效应与卫星俯仰角的关系,L1 频率的延迟修正可控制在 8~10 m 内,而频值较低的 L2 载波延迟修正范围较大,可控制在 13~16.3 m 内。由分析可知,电离层延迟最小出现在卫星于用户接收机天顶方向或者在天顶方向所在的垂直面内,且此时卫星在可见时间段的中间时刻。双频无关组合融合伪距和载波观测量,这种组合方案确保仿真信号实时性要求的基础上,最大限度提高了仿真延迟精度,其结果比图 5 中电离层延迟有很大的改进。

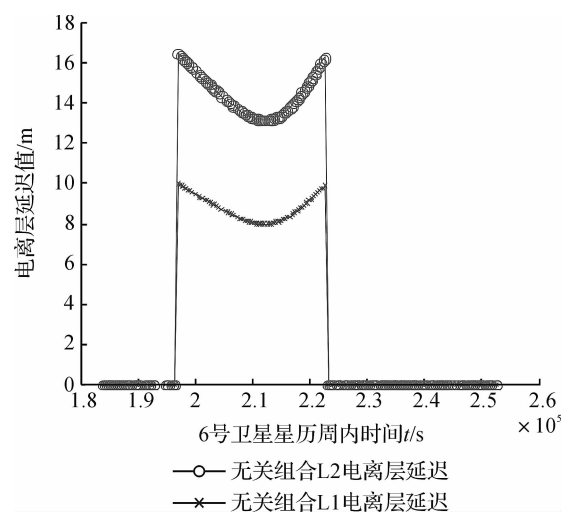


图 6 PRN6 卫星双频几何无关组合修正电离层延迟

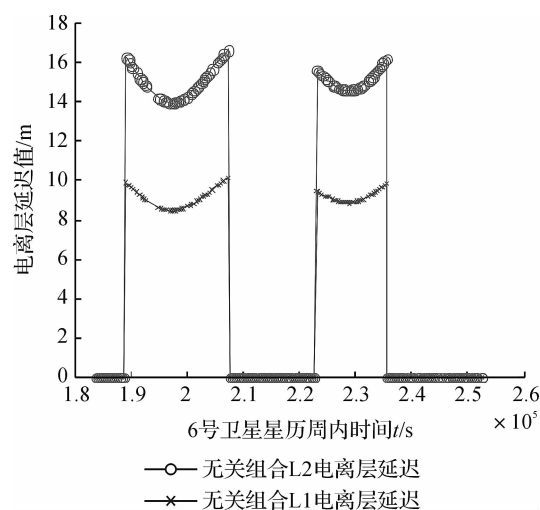


图 7 PRN8 卫星双频几何无关组合修正电离层延迟

改变 PRN 序号,可得 31 颗卫星在本周可见时间内的电离层延迟状态。从 31 颗卫星相对用户接收机位置关系,取其对用户接收机有定位导航实际

意义的卫星信号对其进行电离层延迟修正,表 1 给出了本文仿真研究的 PRN6 和 PRN8 卫星各种模型延迟修正情况。

表 1 各模型计算卫星电离层延迟比较

PRN 号	Klobuchar 计算模型				载波计算模型				无关组合模型			
	L1/m		L2/m		L1/m		L2/m		L1/m		L2/m	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
6	9.76	8.10	16.07	13.33	7.93	7.83	13.06	12.90	9.87	7.97	16.26	13.12
8	9.73	8.27	15.69	13.60	6.84	6.82	11.27	11.24	10.0	8.46	16.60	13.94

表 1 中电离层延迟最小值即为天顶方向电离层的最小延迟,而最大值为卫星在周内稳定时间段的最大延迟。经组合计算可得知修正后的 L1 延迟在 7.97~10.00 m 之间,L2 在 13.12~16.60 m 之间。结果表明,用伪距和载波观测量的无关组合进行双频电离层延迟修正,能得到与其他模型相近的延迟结果,可见双频无关组合的方法可有效计算实时电离层延迟。

在衡量模型优劣方面则需要考虑模型的延迟误差,利用各种模型得到的卫星信号电离层延迟与电离层参考值相减,即可得到 GPS 的电离层延迟精度。计算电离层参考值数据 TEC 可从 IGS 的 IONEX 文件中获取,其中电离层 TEC 数据每 2h 更新一次,选取卫星俯仰角较大时间段的参考值数据 TEC 为 48.8704 TECU,由电离层延迟误差式(17)可得出延迟参考值,差分即得 Klobuchar 模型误差 $\Delta\delta_{\text{ion}}(L_1)=0.1687$ m,再由电离层参考值和载波模型计算出的载波延迟差分。针对于无关组合模型的误差则可用改正过的二阶误差式(18)计算得到。以卫星在天顶时刻电离层延迟误差为依据比较上述 3 种模型对电离层延迟精度的优劣,假定此时信号传播方向与地球磁场方向夹角是一定值。

由表 2 中各种误差可见,单频的 Klobuchar 模型和载波差分模型有相同数量级的精度,且精度相差不大,而无关组合模型仿真计算电离层误差可达到厘米级,比 Klobuchar 模型和载波差分模型有很大改进。可见,双频无关组合电离层延迟修正模型能有效修正电离层延迟。

表 2 各模型误差比较

	Klobuchar 模型	载波模型	无关组合模型
误差/m	0.1687	0.1033	0.0379

4 结 语

本文提出对双频卫星数据建模校正电离层延迟,通过对卫星位置轨迹的解算,确定在卫星周内卫

星的可见性,并对可见星进行 Klobuchar 单频模型计算、载波差分模型计算和伪距与载波的无关组合电离层延迟计算。由于电离层是个复杂的空间体,电离层延迟与高度、时间、周跳、整周模糊度等因素有关,双频无关组合仿真研究忽略一些不影响客观规律的其他误差和因素。仿真结果显示,伪码和载波相位无关组合后延迟修正的误差较小可达到厘米级。对延迟修正分析后认为延迟小的时刻应该在用户天顶方向或者夜间卫星可见且稳定的时刻,而延迟较大的时刻应在光照较强的中午或者出现周跳的时刻。总之,周内延迟误差在这个范围内是难免的。

本方法避免了对整周模糊、周跳和残差的计算,这些因素在一定程度上影响了本文提出的延迟修正方法的精度。后续工作要研究在一定程度上消除整周模糊和周跳的影响。

参考文献:

- [1] 常志巧,胡小工,苏冉冉. 区域卫星导航系统无电离层组合定位精度分析[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(6): 556-560.
- [2] 严伏朝,王水平,谢世杰. GPS 定位的电离层误差[J]. 测绘通报, 2000(9): 10-12.
- [3] 程娜,贾小林. 基于双频伪距组合评估北斗广播电离层精度[J]. 导航定位学报, 2015, 3(1): 74-77.
- [4] 李文文,李敏,胡志刚,等. 两种电离层模型对卫星导航定位精度的影响分析[J]. 2013, 1(3): 43-47.
- [5] 黄逸丹,王明远. 基于中国电离层资料对 Klobuchar 模型的改进[C] // 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十九次学术会议, 2006: 459-766.
- [6] RADICELLA S M. The NeQuick model genesis, use and evolution[J]. Annals of Geophysics, 2009, 52(3/4): 417-422.
- [7] MEZA A M, BRUNINI C A, BOSCH W. Comparing vertical total electron content from GPS, Bent and IRI models with TOPEX-Poseidon[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(2): 401-406.
- [8] 张强,赵齐乐,章红平,等. 北斗卫星导航系统电离层模

- 型精度的研究[C] // 第四届中国卫星导航学术年会, 2013: 129-134.
- [9] 许承东, 李怀建, 张鹏飞, 等. GNSS 数学仿真原理及系统实现[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014: 153-162.
- [10] 何玉晶. GPS 电离层延迟改正及其扰动监测的分析研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [11] ALIZADEH M M, SCHUH H, TODOROVA S. Global ionospheric maps of VTEC from GNSS, satellite altimetry, and formosat-3/COSMIC data[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(12): 975-987.
- [12] 许国昌, 李强. GPS 理论, 算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 41-44, 83-88.
- [13] WANG X Y, SUN Y Q, DU Q F, et al. A real-time dual-frequency ionosphere correction method [J]. Beijing: Science Technology and Engineering, 2012 (5): 1671-1815.
- [14] 谢杰, 姚志成, 刘鑫昌, 等. 双频 GPS 信号仿真的电离层补偿模型研究[J]. 微计算机信息, 2012, 28(5): 133-135.

Study on Ionospheric Delay in Visible Satellites Based on Dual-frequency Data Combination

YANG Tengfei, GAO Faqin, LI Sifan, YUE Tenfei

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The ionospheric delay is one of the main factors for satellite positioning error. In order to effectively eliminate the effect of this error, this paper proposes a method for calculating ionospheric delay based on dual-frequency independent geometric data combination of visible satellites. Use the difference combination of satellite dual-frequency pseudo-code and observed quantity of carrier for ionospheric modeling of visible satellites; then convert the combination into a linear form of the original observed quantity for differential calculation. Finally, it is evolved into a geometric combination to fix ionospheric delay. The results show coordinate tracks, ionospheric delay and model error of visible satellites in the certain period of time. Comparison of delays and errors of various models verified that this method can effectively amend ionospheric delays in different extents.

Key words: ionospheric delay; visible satellites; independent model; Klobuchar model; carrier phase

(责任编辑: 陈和榜)