

电离层与对流层模型对北斗 RAIM 可用性的影响分析

焦卫东, 唐志虎, 沈笑云

(中国民航大学 智能信号和图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

摘要: 电离层和对流层是卫星导航系统测量的主要误差源, 也是北斗卫星导航系统可用性变化的重要因素。采用星历数据仿真分析了电离层和对流层延迟误差模型对北斗导航系统 RAIM 可用性的影响, 特别分析了不同对流层模型对民用航空的影响。实验表明电离层和对流层的延迟误差分别为 0~14.555 9 m 及 0~23.779 6 m, 且在民用航空的非精密进近阶段, 用 Saastamoinen 模型、UNB3 模型及 Hopfield 模型分别作为北斗的对流层误差模型的 RAIM 可用性分别为 99.308%、92.041 5% 和 100%, 相比较 Hopfield 模型更适合作为北斗卫星导航系统的对流层模型, 能满足民用航空的 99.9%RAIM 可用性要求。

关键词: 北斗卫星导航系统; 电离层; 对流层; RAIM 可用性; 非精密进近阶段

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

Analysis of influence of ionosphere and troposphere model on RAIM availability of COMPASS

JIAO Wei-dong, TANG Zhi-hu, SHEN Xiao-yun

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The ionosphere and troposphere are main error sources of satellite navigation system measurement and main factors of COMPASS availability. The influence of the ionosphere and troposphere delay error model on the RAIM availability of COMPASS is analyzed in simulation where ephemeris datum is adopted, and especially the influence of different troposphere models on RAIM availability in civil aviation is analyzed. The experiment at results shows that the delay error of ionosphere and troposphere changes from 0 to 14.555 9 m and 0 to 23.779 6 m correspondingly. And for the non-precision approach stage of civil aviation, when Saastamoinen model, UNB3 model and Hopfield model are used as the troposphere model of COMPASS respectively, the RAIM availability is 99.308%, 92.041 5% and 100% correspondingly. So it is more suitable that Hopfield model is used as the troposphere model of COMPASS and the 99.9% RAIM availability requirement in civil aviation can be achieved using this model.

Key words: COMPASS; ionosphere; troposphere; RAIM availability; non-precision approach

1 引言

北斗卫星导航系统 (BDS 或 COMPASS, BEIDOU satellite navigation system) 是我国自主建设, 独立运行, 并与世界其他卫星导航系统兼容的全球卫星导航系统。2012年12月27日, 第二代北斗导航系统正式建成并向亚太大部分地区提供无

源导航、授时服务。而在涉及生命安全的民用航空领域, 全球卫星导航系统 (GNSS) 正得到越来越多的市场, 从辅助导航到主用导航, 甚至唯一导航手段^[1], 人们不仅希望得到高精度的定位信息, 同时还要求定位信息具有高可靠性和稳定性, 因此对北斗导航的完好性评价至关重要。另外, 北斗系统对保障国家安全方面有十分重大的战略意义, 因此

收稿日期: 2013-11-28; 修回日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金资助项目(61079009); 中央高校基本科研业务基金资助项目(3122013 c016)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of China and the Civil Aviation Administration of China (61079009); The Central University Basic Scientific Research Business Expenses (3122013c016)

做好应用推广是北斗导航系统可持续发展的根本保证。

接收机自主完好性监测 (RAIM, receiver autonomous integrity monitoring) 是对空中导航系统最基本的要求^[2], 是内嵌在卫星导航接收机中的一种完好性监测方法, 它利用接收机收到的 6 颗以上导航卫星的信息, 进行卫星故障检测与识别, 无须借助外界其他信息^[3]。实际上, 故障检测与识别算法可以使用的前提条件是在任意时间、任意地点必须满足航空无线电委员会 (RTCA) 完好性规定的漏检率和误警率。否则, 就必须通知用户当前观测条件不能满足需求, 即为 RAIM 的可用性分析。目前, 在对民用航空的非精密进近 (NPA, non-precision approach)、区域以及航路进行预测时, 所采用的 RAIM 可用性的基本原理是相同的, 分为最大水平精度因子变化 (δH_{\max}) 法、近似径向误差保护 (ARP, approximate radial error protection) 法、水平保护水平 (HPL, horizontal protection level) 法^[4-7]。随着第二代北斗的建成, 对基于北斗的 RAIM 算法也在加强研究^[8,9]。但以往研究主要针对截止高度角、可视卫星个数和 DOP 值等因素对 RAIM 可用性的影响, 很少有分析电离层和对流层对 RAIM 可用性的影响, 且很少有说明北斗卫星对流层延迟模型的选择问题。针对电离层和对流层折射误差改正国内外学者提出了许多模型, 电离层模型主要以 Klobuchar 以及在其基础上的改进模型 (如北斗电离层模型, COMPASS ionospheric model)^[10]; 对流层模型提出诸如模型改正法、映像函数法、差分法以及参数估计法等, 近几年又提出了针对 GPS 的 Saastamoinen、Hopfield、UNB3/UNB3m 等模型^[11]、欧盟的 EGNOS 模型^[12]和针对 BEIDOU 的具有中国地域特色的 SHAO 以及 IGGtrop 模型等^[13,14]。

与以往多数研究以软件 STK 仿真星座为基础研究不同, 为了确保仿真结果与实际相符, 本文以现阶段北斗的实际星座 (5 颗 GEO、5 颗 IGSO、4 颗 MEO) 为基础, 采用历书数据进行加权 RAIM 可用性预测算法仿真验证评估北斗卫星导航性能, 并重点分析了电离层和对流层延迟误差模型对北斗卫星导航系统的 RAIM 算法可用性的影响。

2 算法分析

2.1 加权 RAIM 可用性预测算法及权值确定

完好性要求下的可用性判断是指根据当前可

见卫星的几何分布, 计算所有卫星的水平精度因子最大变化值, 决定是否适合进行完好性检测。确定 RAIM 可用性的方法是: 基于单故障并存在于最难检测卫星的假设条件下, 设置漏警概率 P_{MD} 和误警概率 P_{FA} 为已知条件, 计算 HPL 和 VPL 随卫星几何分布改变的变化值作为判决条件, 并与标准误差保护门限 HAL 和 VAL 比较, 从而判断当前卫星几何是否可用。在一段时间 RAIM 的可用性为保护水平 (XPL, 包括水平和垂直) 小于示警限制 (XAL, 包括水平和垂直) 的时间与总时间的比值。

水平和垂直定位误差保护限值 HPL 和 VPL 可确定卫星几何是否可用, 它一方面保证了系统的完整性, 另一方面反映了系统卫星几何的可用性^[15]。加权 RAIM 可用性预测算法中 HPL 定义为

$$HPL = K_{\max} T_{\min} \quad (1)$$

其中,

$$T_{\min} = \sqrt{\frac{\lambda_{\min}}{n-4}} \quad (2)$$

$$K_i = \sqrt{\frac{(A_{w,1i}^2 + A_{w,2i}^2)(n-4)}{(1-P_{w,ii})}} \quad (3)$$

T_{\min} 为符合漏检概率要求的最小检测门限, K_i 为每颗卫星的斜率值, K_{\max} 为所有可视卫星中的最大斜率值。式 (2) 中, λ_{\min} 由式 $\int_0^{T^2} f_{\chi^2(N-4,\lambda)} dx = P_{MD}$ 求出, P_{MD} 为漏检概率, 文献[16]指出漏检概率为 0.001。式(3)中,

$$A_w = (H^T W H)^{-1} H_w W \quad (4)$$

$$P_w = H A_w \quad (5)$$

而

$$W = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_n^2} \right\} \quad (6)$$

为加权矩阵, 其对角线元素分别为可见星的伪距测量方差的倒数, 伪距测量误差主要分为 5 类: 卫星时钟和星历误差、电离层延迟误差、对流层延迟误差、多径和接收机热噪声。在这 5 类误差中, 电离层和对流层为最主要的影响因素^[17,18]。如何选取各卫星的伪距测量方差 σ_i^2 , 将直接影响到加权 RAIM 算法的有效性。式(4)中的 H 为 $n \times 4$ 维观测矩阵, n

为可见卫星数目, H 等式如下

$$H = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_n & m_n & n_n & 1 \end{bmatrix}$$

其中, l_n , m_n , n_n 为接收机与卫星之间的可视化单位向量。

根据文献[19]中对 GPS 卫星观测噪声的描述, 本文按下式计算第 i 颗卫星的方差

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,URA}^2 + \sigma_{i,iono}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,mp}^2 + \sigma_{i,tcvr}^2 \quad (7)$$

其中, $\sigma_{i,URA}^2$ 为卫星时钟和星历测量方差, $\sigma_{i,iono}^2$ 为电离层延迟测量方差, $\sigma_{i,tropo}^2$ 为对流层延迟测量方差, $\sigma_{i,mp}^2$ 为接收机多径测量方差, $\sigma_{i,tcvr}^2$ 为接收机热噪声引起的测量方差。由文献[20]可知, $\sigma_{i,URA}^2$ 为 4^2 , 由文献[14]可知, $\sigma_{i,mp}^2$ 可由 $\sigma_{i,mp}^2 = (0.13 + 0.53e^{-E_i/10})^2$ 求出, (其中 E_i 为卫星仰角, 单位为度) $\sigma_{i,tcvr}^2$ 为 0.1^2 。由于对流层和电离层的多变性和不稳定性, 其不能用某一公式或具体值单一来描述, 描述它们需要具体的经验模型。

2.2 电离层模型

Klobuchar 经验模型采用三角余弦函数的形式, 将夜间的电离层延迟设为一固定的常数, 白天的电离层延迟为余弦函数的正项^[21], 模型为

$$\Delta\tau = \left[D + A \cos \frac{2\pi(t - T_p)}{P} \right] MF \quad (8)$$

其中, A 和 P 分别为导航电文中 4 个 α 参数和 4 个 β 参数所确定的余弦项的振幅和周期, $\Delta\tau$ 单位为 m, MF 为映射函数, 公式如下

$$A = \sum_{i=0}^3 \alpha_i \phi_m^i, P = \sum_{i=0}^3 \beta_i \phi_m^i, MF = \frac{1}{\cos z}$$

其中, z 为穿刺点的天顶角。

北斗电离层模型 (CIM) 与 Klobuchar 模型不同之处在于二者的映射函数不同, 北斗的电离层映射函数^[22]为

$$MF = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{6378}{6378 + 375} \cos E \right)^2}}$$

其中, E 为卫星高度角。

CIM 模型考虑了电离层的周日的振幅和周期

变化, 直观反映了电离层的周日变化特性, 在大尺度上保证了电离层预报的可靠性, 是一种比较实用而且有效的办法, 特别在中纬度地区效果更好, 文献[10]通过实验得出在北京和四川两地对北斗 GEO/IGSO 卫星, CIM 模型对电离层延迟改正率分别在 80% 和 50%~60%。

2.3 对流层模型

虽然北斗卫星导航系统空间信号接口文件给出了北斗系统的电离层参考模型为 Klobuchar 模型, 但没有给出对流层参考模型, 现有文献也很少有说明北斗卫星导航系统对流层模型的选择问题。

对流层位于高度约 40 km 以下的大气底层, 卫星信号穿过对流层时传播路径会发生弯曲, 因而会产生定位误差。在卫星导航系统的对流层的研究方面, 模型修正法用的比较广泛且精度比较高^[23]。其中, 由新布伦瑞克大学开发的 UNB3 模型是一种没有气象传感器的条件下的对流层延迟改正模型, 分为干延迟和湿延迟 2 部分; Hopfield 模型由 Hopfield 提出, 它以全球气象探测资料为基础进行分析, 该模型将大气层仅分为对流层和电离层, 同样分为干延迟和湿延迟; Saastamoinen 模型于 1973 年提出, 它是以前站纬度、高程、观测高度角、干温、水汽压为变量的函数, 把大气层分为 3 层: 对流层、对流层顶和电离层, 与上述 2 个模型同样也分为干、湿延迟。因此, 本文利用 3 个模型计算对流层延迟, 并比较三者对 RAIM 可用性的影响。

UNB3 模型分为干延迟和湿延迟 2 部分, 可用式(9)表示。

$$d_{trop} = d_{hyd}^z m_{hyd} + d_{wet}^z m_{wet} \quad (9)$$

其中, d_{trop} 为对流层总的延迟量, d_{hyd}^z 为对流层天顶方向的干延迟, d_{wet}^z 为对流层顶方向的湿延迟。

$$\begin{cases} d_{hyd}^z = (10^{-6} k_1 R_d / g_m) (1 - \beta H / T_0)^{g / (R_d \beta)} P_0 \\ d_{wet}^z = [10^{-6} k'_3 R_d / (g_m \lambda' - \beta R_d)] \times \\ (1 - \beta H / T_0)^{\lambda' g / (R_d \beta) - 1} (e_0 / T) \end{cases} \quad (10)$$

$k_1 = 77.604$ k/mbar, $k'_3 = 382\ 000$ k²/mbar, $g = 9.806\ 65$ m/s², $R_d = 287.054$ J/(kg·k⁻¹), H 为用户高程(单位: m), $g_m = 9.784[1 - 2.66 \times 10^{-3} \cos(2\Phi) - 2.8 \times 10^{-7} H]$ m/s², $\lambda = \lambda + 1$ 。气象要素可参见文献[23]通过内插得到。

UNB3 采用的是 Niell 映射模型。干、湿延迟映射函数模型如下

$$\left\{ \begin{aligned} m_{wet}^{Niell} &= \frac{1 + a_{wet} / [1 + b_{wet} / (1 + c_{wet})]}{\sin E + a_{wet} / [\sin E + b_{wet} / (\sin E + c_{wet})]} \\ m_{hyd}^{Niell} &= \frac{1 + a_{hyd} / [1 + b_{hyd} / (1 + c_{hyd})]}{\sin E + a_{hyd} / [\sin E + b_{hyd} / (\sin E + c_{hyd})]} \frac{H}{1000} + \\ &\frac{1}{\sin E} - \frac{1 + a_{hgt} / [1 + b_{hgt} / (1 + c_{hgt})]}{\sin E + a_{hgt} / [\sin E + c_{hgt}]} \\ &\frac{1}{\sin E + a_{hgt} / [\sin E + b_{hgt} / (\sin E + c_{hgt})]} \frac{H}{1000} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

其中, E 为卫星高度角 (单位为度), H 为用户高程 (单位为 m) $a_{hgt}=2.53 \times 10^{-5}$, $b_{hgt}=5.49 \times 10^{-3}$, $c_{hgt}=1.14 \times 10^{-3}$, 系数 a_{hyd} 、 b_{hyd} 、 c_{hyd} 、 a_{wet} 、 b_{wet} 、 c_{wet} 可参考文献[23]通过内插得到。

对其他几种模型本文仅简单给出结果, 不再详细分析。

Hopfield 对流层延迟改正模型为

$$d_{trop}^{Hop} = \frac{155.2 \times 10^{-7} P_0 (h_d - H) / T_0}{\sin(E^2 + 6.25)^{1/2}} + \frac{155.2 \times 10^{-7} \times 4810 e_{w0} (h_w - H) / T_0^2}{\sin(E^2 + 2.25)^{1/2}} \quad (12)$$

其中, $h_d=40\ 136+148.72(T_0-273.16)$, $h_w=11\ 000$ 。

Saastamoinen 对流层改正模型为

$$d_{trop}^{Saas} = \frac{0.002\ 277 P}{f(\Phi, H)} m_{hyd}^{Niell} + \frac{0.002\ 277 (1\ 225 / T_0 + 0.05) e_{w0}}{f(\Phi, H)} m_{wet}^{Niell} \quad (13)$$

其中,

$$e_{w0} = RH \times 6.11 \times 10^{[7.5(T_0-273.16)] / [(T_0-273.16)+237.3]} \quad (14)$$

RH 为相对湿度 (%), 其他参数含义与 UNB3 模型相同。

3 实验分析

3.1 电离层模型实验分析

本文获取北斗系统的历书文件, 为了分析复杂地形下北斗卫星导航系统性能状况, 在考虑地形因素的基础上对高原林芝机场 RNP 授权所需进近程序 (RNP AR APCH) 一固定点 (北纬 29.202° , 东经 94.184° , 高度 $3\ 785.1\text{ m}$) 的可见卫星和电离层、对流层 24 h 内变化以及 RAIM 可用性进行分析。对流层模型中的气象要素采用加拿大新布朗斯威克提供的标准大气参数 DIPOP 模型基础上运算得来,

大气压 P 为 $1013.25 \times (10.006\ 8/288.15\ h)^5$ (单位: mbar), 温度 T 为 $288.15 - 0.006\ 8\ h$ (单位: m), h 为高度湿度 RH 取标准的 50%。

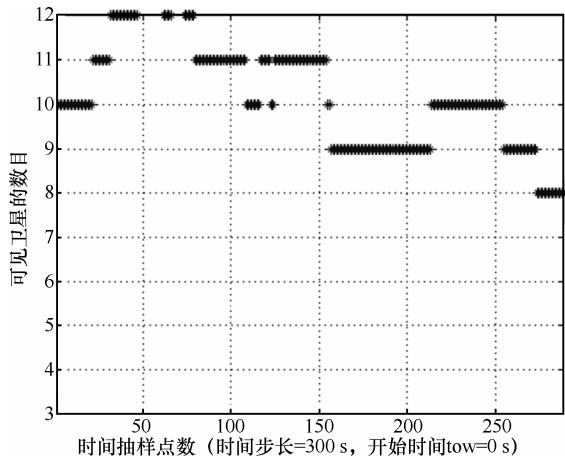
由图 1 可见, 24 h 内林芝一固定点可见卫星数目在 8~12 颗, 满足 RAIM 可用性算法最少 6 颗可见卫星的要求。通过长期的仿真发现, 林芝一固定点可见卫星均满足 RAIM 可用性算法的最低要求, 这与北斗 GEO 卫星特殊的位置有关。24 h 内电离层延迟在 0~14.555 9 m 之间 (为确保一天内数据完整性, 其中当某颗卫星不可见时, 将该时段电离层延迟设为 0), 与卫星星历误差、多径效应引起的误差以及接收机热噪声引起的误差相比可以看出, 电离层延迟为引起误差的主要因素之一。另外, 本文所得的结果与文献[10]所得的结果保持一致, 证明本文实验结果的可靠性。图 1(c)给出了 3 种不同类型卫星的电离层延迟值, 在中国境内 GEO 卫星始终可见, 因此电离层延迟随着时间的变化不会出现间断, 而 IGSO 和 MEO 卫星由于其一天内并不始终可见, 因此其在不可见的时段内无法测出电离层延迟。文献[10]中提出了 CIM 的改正率问题, 说明模型改正始终存在误差, 如何限制电离层延迟误差的大小将成为保证 RAIM 算法可用判断准确一个非常关键的因素, 在实际操作中采用实时的导航电文数据或适当的方法来拟合电离层延迟误差将成为提高 RAIM 可用性算法准确性的关键。

3.2 对流层模型实验分析

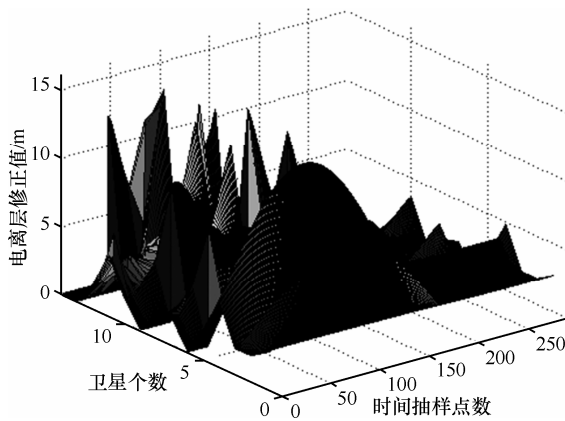
现有文献没有说明北斗卫星导航系统对流层延迟模型的选择问题。本文使用 UNB3 模型、Hopfield 模型、Saastamoinen 模型作为北斗卫星导航系统的对流层延迟模型进行其 RAIM 可用性的仿真分析, 对比 3 种模型下 RAIM 算法可用性的优劣。

对流层的仿真条件同电离层的条件, 由图 2 可见, 不同模型之间对流层延迟存在差异, 其中 UNB3 和 Saastamoinen 模型得出的延迟变化趋势接近, 二者修正值范围分别为 0~23.779 6 m 和 0~14.785 8 m (为确保对流层延迟数据完整性, 当卫星不可见时将延迟设为 0, 下同)。从图中可以看出 Hopfield 模型得出的对流层延迟明显小于上述 2 个模型, 其值范围为 0~6.222 m。总体来看, 对流层延迟也是北斗的另一个主要误差源。对比图 2(a)和图 2(b)可以发现, UNB3 模型与 Saastamoinen 模型下对流层延迟变化规

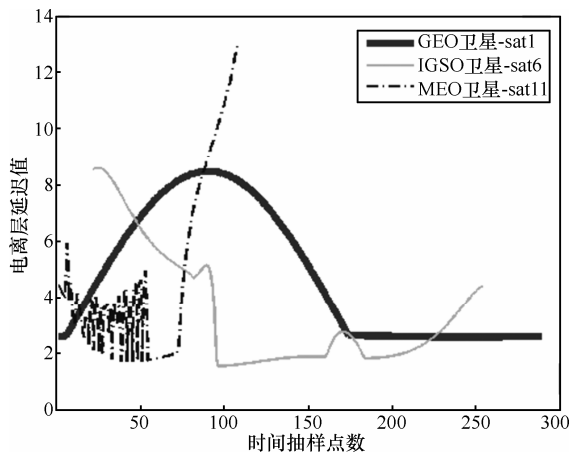
律相近,说明这 2 个模型在分析对流层延迟方面作用相近,而这 2 个模型有一个最大的区别就是后者需要实时的气象数据,而在实时性要求很高的航空飞行中,实时气象数据不易获得,因此 Saastamoinen 模型的在民航中的应用将会受到一定的限制。相对于前 2 个模型, Hopfield 模型的预测更趋于保守。



(a) 可见卫星的数目



(b) 电离层延迟



(c) 3 类北斗卫星电离层延迟对比

图 1 林芝进近一固定点 24 h 卫星可见性和电离层延迟变化情况

特别在民用航空领域,基于性能的导航 PBN (performance based navigation) 技术是基于 GNSS 导航的,而目前只有美国的 GPS 能为全球民航界提供导航服务,出于国防安全的考虑,北斗在未来将作为主用导航方式。导航性能需求与特定的航空飞行有关,民用航空飞行阶段包括远洋航路、本土航路、终端区、非精密进近和精密进近(分 I、II、III 类)等,为了确定 GPS 适用于民航的各方面性能需求,美国航空无线电委员会(RTCA)经过长期研究,确定如下 GPS 导航性能需求值(如表 1 所示),这里以其为标准来评价北斗卫星导航系统性能。

表 1 导航性能需求

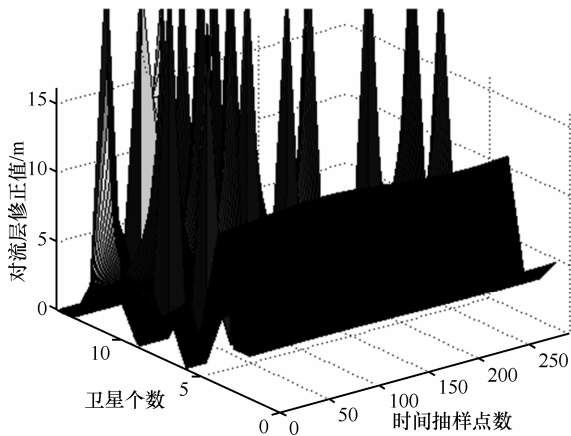
| 性能需求 | 远洋航路 | 本土航路 | 终端区 | 非精密进近 |
|---------|------------|------------|------------|------------|
| 精度(95%) | 2.0 nmile | 1.0 nmile | 0.4 nmile | 220 m |
| 告警限值 | 4.0 nmile | 2.0 nmile | 1.0 nmile | 0.3 nmile |
| 告警时间 | 1 min | 30 s | 10 s | 10 s |
| 漏警率 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 误警率 | 0.000 01/h | 0.000 01/h | 0.000 01/h | 0.000 01/h |
| 可用性 | 99.9% | 99.9% | 99.9% | 99.9% |

结合表 1 和图 3 可以看出,在实验条件下,对于非精密进近(NPA)阶段, Saastamoinen 模型、Hopfield 模型、UNB3 模型下的 RAIM 可用性分别为 99.308%、100%、92.041 5%,相比较之下,只有使用 Hopfield 对流层模型才满足非精密进近 99.9%的可用性。对于精密进近阶段,要求水平保护限值为 50 m,由于各种情况下的 HPL 值均超过 50 m,由于精密进近需要提供垂向的位置精度,而从实验中可以得出 $VPL < 50$ m 的概率小于 90%,不满足可用性的要求。由于进近阶段的安全要求,因此不能单独依靠某一导航源。为了达到进近的条件,可以增设陆基增强系统(GBAS)等作为辅助进近的手段。

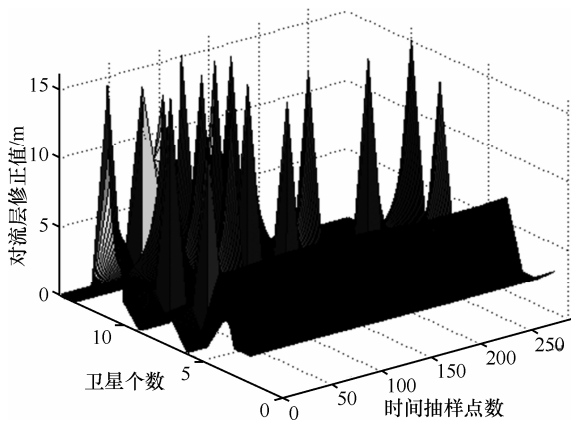
相比于进近阶段,本文还对航路和终端区进行了实验,选择的航路点为北纬 29.6°,东经 91.1°,高度为 3 622 m,结果如图 4。结合表 1 中航路和终端区的导航性能需求得出:由于不同对流层模型下的 HPL 值均小于 800 m,因此不超过这 3 个飞行阶段的安全操作的定位误差限值。对于航路以及终端区飞行,以 HPL 和 VPL 作为评价指标的 RAIM 算法可用性均满足该阶段的飞行要求。

由于 Hopfield 和 Saastamoinen 模型以实际的气象数据为基础,而 UNB3 模型是以经验参数拟合为基

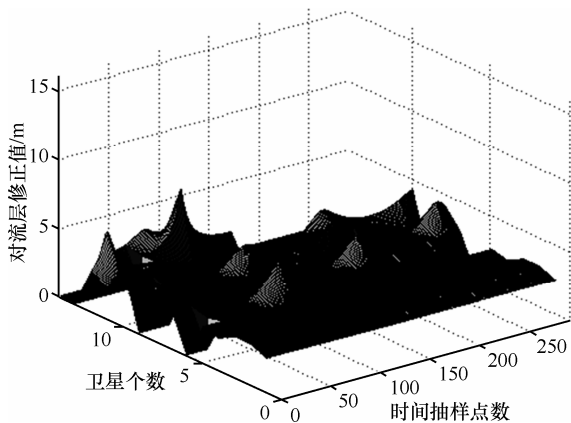
础，不依赖于测站的气象数据，因此从方便程度上来说 UNB3 模型更有优势，而 Hopfield 和 Saastamoinen 模型依据实测气象数据，将会更真实地反映测站真实的对流层延迟。通过本文实验分析可以看出，Hopfield 模型相对而言效果更理想，可以选为非精密进近期间的北斗系统的对流层参考模型。



(a) UNB3 模型

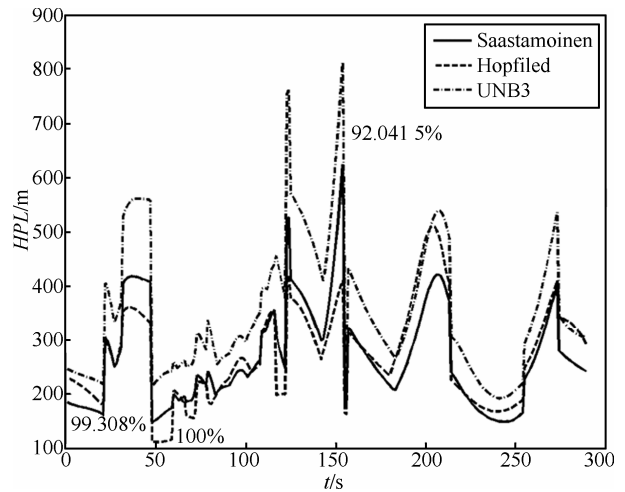


(b) Saastamoinen 模型

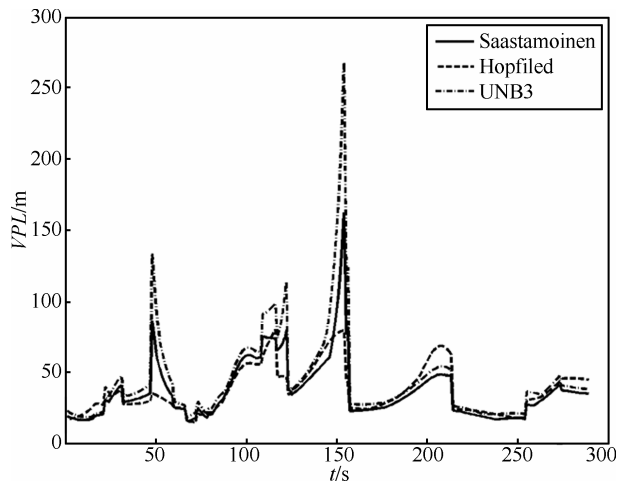


(c) Hopfield 模型

图 2 林芝进近一固定点 24 h 对流层延迟变化情况



(a) 水平保护限制



(b) 垂直保护限制

图 3 林芝进近一固定点 24 h RAIM 可用性分析

4 结束语

本文主要以 RAIM 可用性和卫星可见性作为评价北斗卫星导航系统的指标，以北斗实际星座（5 颗 GEO、5 颗 IGSO、4 颗 MEO）为基础，使用卫星历书数据，主要考虑电离层和对流层模型对北斗 RAIM 可用性的影响。通过分析对比在不同对流层模型下 RAIM 可用性，可以看出现有的北斗卫星导航系统可以满足民用航空中的远洋航路、本土航路、终端区的 RAIM 可用性要求，但对于非精密进近，UNB3 和 Saastamoinen 模型均不能满足 99.9% 可用性要求，Hopfield 模型相对而言效果更理想，可以选为非精密进近期间的北斗系统的对流层参考模型。

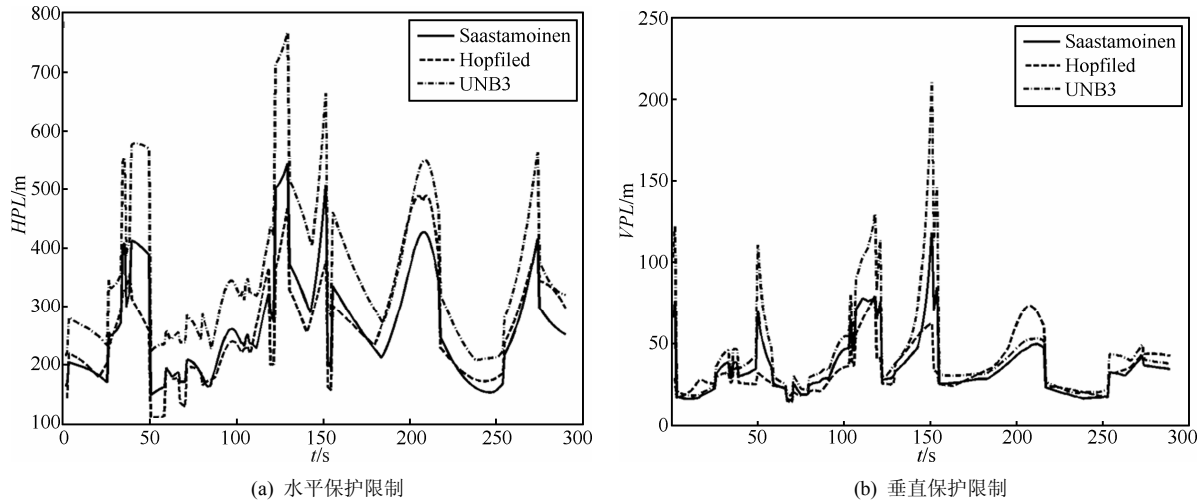


图4 航路一固定点24 h RAIM 可用性分析

参考文献:

- [1] 任锴, 杨力, 冯勇. 两种 RAIM 可用性分析方法的比较[J]. 遥测遥控, 2009, 30(2):1-3.
REN K, YANG L, FENG Y. Comparison of two RAIM availability analysis approaches[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(2):1-3.
- [2] 蔡清毅. 基于性能导航 (PBN) 技术介绍[J]. 空中交通管理, 2011, 15(4):1-2.
CAI Q Y. Introduction to performance based navigation (PBN) technologies [J]. Air Traffic Management, 2011, 15(4):1-2.
- [3] 孙隽, 韦萍萍. GPS+BD 双模接收机自主完好性监测算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(7):1-2.
SUN J, WEI P P. Research on RAIM algorithm of GPS+BD double model receiver [J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(7):1-2.
- [4] 王彩霞. GPS RAIM 预测系统的设计和算法研究[J]. 现代导航, 2012, 3:165-171.
WANG C X. Design and algorithm study of GPS RAIM prediction system[J]. Modern Navigation, 2012, 3:165-171.
- [5] FILIPE S, JOSÉ S, ANTÓNIO R. Weighted total least squares RAIM algorithm using carrier phase measurements [J]. Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 2012, 6:1-6.
- [6] 朱衍波, 张淼艳, 张军. 加权 RAIM 可用性预测方法研究[J]. 遥测遥控, 2009, 30(1):3-6.
ZHU Y B, ZHANG M Y, ZHANG J. Research on weighted algorithm to predict RAIM availability[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(1):3-6.
- [7] 徐肖豪, 杨传森, 刘瑞华. GNSS 用户端自主完好性监测研究综述[J]. 航空学报, 2013, 34(3):3-9.
XU X H, YANG C S, LIU R H. Review and prospect of GNSS receiver autonomous integrity monitoring [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2013, 34(3):3-9.
- [8] 卢虎, 廉杰. 北斗用户机自主完好性监测研究[J]. 空中工程大学学报, 2010, 11(3):1-5.
LU H, LIAN J. Research on RAIM algorithm of Beidou receiver[J]. Proceedings of the Air of Engineering University, 2010, 11(3):1-5.
- [9] 郁聪冲, 边少峰. 现阶段北斗卫星导航系统可用性分析[J]. 海洋测绘, 2012, 32(5):1-3.
YU C C, BIAN S F. Usability analysis of Beidou satellite navigation system at the present stage [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(5):1-3.
- [10] WU X L, HU X G, WANG G, ZHONG H J, TANG C P. Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning[J]. Advances in Space Research, 2012, 51(6):959-968.
- [11] LEANDRO R F, SANTOS M C, LANGLEY R B. UNB neutral atmosphere models: development and performance [J]. Proceedings of ION NTM, 2006, 1:564-573.
- [12] DODSON A H, CHEN W, BAKER H C, PENNA N T. Assessment of EGNOS tropospheric correction model [A]. Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation[C]. 1999.1401-1408.
- [13] 宋淑丽, 朱文耀, 陈钦明等. 中国区域对流层延迟改正模型 (SHAO) 的初步建立[A]. 中国卫星导航学术年会组委会[C]. 2010.557-566.
SONG S L, ZHU Y W, CHEN Q M, et al. China regional tropospheric delay correction model (SHAO) preliminary established [A]. The Organizing Committee of the Chinese Satellite Navigation Academic Conference[C]. 2010.557-566.
- [14] 李薇, 袁运斌, 欧吉坤等. 全球对流层天顶延迟模型 IGGtrop 的建立于分析[J]. 科学通报, 2012, 57(15):1317-1325.
LI W, YUAN Y B, OU J K, et al. The establishment of the global model (SHAO-G) for the tropospheric delay [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(15):1317-1325.
- [15] 郭睿, 郑勇, 杜兰. GPS 和 Galileo 系统下 RAIM 算法可用性分析[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(6):1-2.
GUO R, ZHENG Y, DU L. Analysis on RAIM availability of different navigation systems [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2006, 23(6):1-2.
- [16] 张军. 空地协同的空域监视新技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011, 30-31.
ZHANG J. Air-ground Collaborative Airspace Surveillance[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011, 30-31.
- [17] MCGRAW G A. Tropospheric error modeling for high integrity airborne GNSS navigation [J]. Position Location and Navigation Symposium, 2012, 4: 158-166.

- [18] LÖFGREN J S, BJÖRNDAHL F, MOORE A W. Tropospheric correction for InSAR using interpolated ECMWF data and GPS zenith total delay from the southern California integrated GPS network[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010,7: 4503-4506.
- [19] RTCA DO-208. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Supplemental Navigation Equipment Using Global Positioning System[S]. USA: RTCA, 1991.
- [20] JOKINEN A, FENG S J, OCHIENG W. Fixed ambiguity precise point positioning(PPP) with FDE RAIM[J]. Position Location and Navigation Symposium, 2012,4: 643-658.
- [21] PRATAP MISRA, PER E. Global Positioning System: Signal, Measurements, and Performance[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008:176-178.
- [22] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1I(1.0 版)[EB/OL]. www.beidou.gov.cn/attach, 2012-12-27/2013-11-24.
China's Satellite Navigation System Management Office. Beidou Satellite Navigation System Space Signals Interface Control File Public Service B1I(1.0)[EB/OL]. www.beidou.gov.cn/attach, 2012-12-27/2013-11-24.
- [23] 周命端, 郭际明, 孟祥广. GPS 对流层延迟改正 UNB3 模型及其精度分析[J]. 测绘信息与工程, 2008, 33(4):1-3.
ZHOU M D, GUO J M, MENG X G. GPS tropospheric delay model UNB3 and ITS accuracy analysis[J]. Journal of Geomatics, 2008, 33(4):1-3.

作者简介:



焦卫东 (1973-), 男, 陕西长武人, 博士, 中国民航大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为虚拟现实技术在民航中的应用及图像/视频处理与编码。



唐志虎 (1990-), 男, 河南信阳人, 中国民航大学硕士生, 主要研究方向为北斗卫星导航系统性能分析与仿真。



沈笑云 (1965-), 女, 江苏盐城人, 中国民航大学研究员、硕士生导师, 主要研究方向为计算机三维成像与图像仿真。