

# BDS/GPS 组合导航 RAIM 可用性分析

焦卫东<sup>1</sup> 王艳群<sup>1</sup> 沈笑云<sup>1</sup> 刘 君<sup>2</sup> 曹绪文<sup>3</sup>

(1. 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; 2. 网神信息技术(北京)股份有限公司, 北京 100080; 3. 中国国际航空股份有限公司天津分公司, 天津 300300)

**摘 要:** 采用 RINEX 数据实验比较了北斗卫星导航系统(BDS)和全球定位系统(GPS)电离层 Klobuchar 模型在 BDS/GPS 组合导航中的性能。选择相对较优的电离层模型分析了基于卫星星座类型和卫星类型两种加权情况下, 单一北斗、单一 GPS 与 BDS/GPS 组合导航系统在非精密进近(NPA)阶段和一类垂直引导进近(APV I)阶段的 RAIM 可用性。实验表明, 在 BDS/GPS 组合导航中, BDS 的 Klobuchar 模型在中国区域内能修正大量的电离层误差, 相比于 GPS 的 Klobuchar 电离层模型, 电离层延迟修正有 0~3.4364 m 左右的提高。对于两种加权 RAIM 算法, 在 NPA 阶段, 单一导航 RAIM 可用性为 90% 左右, BDS/GPS 组合导航的 RAIM 可用性达到 100%。而在 APV I 阶段, 单一导航不具备 APV I 能力, 组合导航 APV I 阶段 RAIM 可用性达到 100%, 具有提供 APV I 应用的能力。

**关键词:** 组合导航; 电离层模型; 接收机自主完好性监视; 非精密进近阶段; 一类垂直引导进近

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)09-1165-08

## Analysis of RAIM Availability for BDS/GPS Integrated Navigation

JIAO Wei-dong<sup>1</sup> WANG Yan-qun<sup>1</sup> SHEN Xiao-yun<sup>1</sup> LIU Jun<sup>2</sup> CAO Xu-wen<sup>3</sup>

(1. Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Legendsec Limited Beijing Branch, Beijing 100080, China; 3. Air China Limited Tianjin Branch, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The performance of the Klobuchar model of both Beidou satellite navigation system(BDS) ionosphere and Global Position System(GPS) ionosphere are simulated and analyzed based on the RINEX data to choose a more optimal ionosphere model for BDS/GPS integrated navigation. And by using two weighted RAIM algorithms which are satellite constellation type based and satellite type based, different RAIM availabilities are analyzed in the Non-Precision Approach (NPA) phase and Approach Vertical Guidance I (APV I) phase of the flight process respectively for the signal BDS navigation, the signal GPS navigation and the BDS/GPS integrated navigation based on the better ionosphere model. The experimental results show that more ionosphere delay can be corrected by applying the Klobuchar model of BDS compared with the Klobuchar model of GPS. The ionosphere delay correction of the BDS model has an improvement of 0 to 3.4364 m compared with that of GPS model. For both two weighted RAIM algorithms during the NPA phase, the RAIM availability of the integrated navigation is 100%, and the RAIM availability of either the signal BDS navigation or the signal GPS navigation is approximately 90%. However, for both two weighted RAIM algorithms during the APV I phase, the two single constellation navigation methods can not satisfy the APV I ability, but the RAIM availability of the BDS/GPS integrated navigation reaches 100%, and have the ability to provide the APV I application.

**Key words:** integrated navigation; ionosphere model; receiver autonomous integrity monitoring; non-precision approach; approach vertical guidance I

## 1 引言

在传统单一星座导航情况下,空间可见星数少,几何精度因子不佳(主要有空间卫星的几何构形决定)以及单频信号的测距精度不足,导致利用卫星冗余信息进行完好性监测性能不足,因此,分析 GPS 与 COMPASS 组合导航性能十分必要,尤其是系统完好性性能。目前增强系统完好性的手段主要有四种 ABAS(机载增强系统)、SBAS(星基增强系统)、GBAS(陆基增强系统)和 GRAS(陆基区域增强系统)<sup>[1]</sup>。ABAS 主要由接收机自主完好性监测(RAIM)实现<sup>[2]</sup>,RAIM 是机载导航系统最基本的要求<sup>[3]</sup>,是设在卫星导航接收机中的一种算法,它利用卫星的冗余信息,对多个导航解进行一致性检验,从而达到完好性监测的目的<sup>[4]</sup>。RAIM 研究主涉及 3 个层次内容:RAIM 算法研究、计算保护极限(PL)和 RAIM 可用性。常规的 RAIM 算法主要针对于单星座、单故障的情况,并且适用计算水平保护极限,对于多星座、多故障 RAIM 研究较少<sup>[5]</sup>。在飞机飞行过程中,并不能保证机载导航系统的 RAIM 算法在航行阶段时时可用,因此,对于航路和终端区飞行来说,需在飞行前对 RAIM 的可用性进行预测,以保证飞行过程中系统完好性监测的可用性。RAIM 可用性方法主要包括:水平精度因子最大法、近似径向误差保护法和水平保护极限法<sup>[6]</sup>。分析 RAIM 可用性需考虑系统的用户等效测距误差(UERE),主要包括卫星星历误差、星钟误差、电离层误差、对流层误差、多径效应以及接收机误差。

本文分析了北斗、GPS 以及两者组合情况下空间可见星数,以及 BD 与 GPS 的 Klobuchar 电离层模型,选择更适合于中国区域的组合导航情况下的电离层模型。并结合 RINEX 数据以及 ICAO 规定的 GNSS 的导航性能需求,分析在航路、终端区、非精密进近以及 APV I 阶段,BD/GPS 组合导航 RAIM 可用性。

## 2 算法分析

### 2.1 电离层模型

电离层是指地球上空距地面高度在 50 至 1000 km 之间的大气层。卫星电磁波信号在电离层中传播产生延迟,产生几米到几十米的误差,这是 GNSS 伪

距定位精度的主要误差之一<sup>[7]</sup>。本文对比了两种模型:BD 的 Klobuchar 电离层改正模型和 GPS 的 Klobuchar 电离层改正模型。Klobuchar 模型根据中纬度地区大量的实验资料拟合得到。

GPS 的 Klobuchar 电离层模型是基于地磁坐标系,利用电离层穿刺点的地磁纬度计算天顶电离层时间延迟,并通过映射函数投影至传播路径上,其模型如式(1)所示<sup>[8]</sup>:

$$T_{\text{GPS}} = \begin{cases} MF_{\text{GPS}} \times \left[ D + A \left( 1 - \frac{X^2}{2} + \frac{X^4}{24} \right) \right], & |X| < 1.57 \\ MF_{\text{GPS}} \times D, & |X| \geq 1.57 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $D$  为常数,值为  $5.0 \times 10^{-9}$ ;

$$A = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n, & A > 0 \\ 0, & A < 0 \end{cases} \quad (2)$$

表示白天电离层余弦曲线幅度,单位为秒;

$$X = \frac{2\pi(t - 50400)}{P} \quad (3)$$

表示余弦曲线相位,单位为弧度,

$$P = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \tilde{\varphi}_m^n, & P \geq 72000 \\ 72000, & P < 72000 \end{cases} \quad (4)$$

表示余弦曲线周期,单位为秒,其中  $\alpha_n, \beta_n$  ( $n = 1 \sim 4$ ) 是 Klobuchar 模型的 8 个参数, $t$  为接收机至卫星连线与电离层交点处的地方时。GPS 的 Klobuchar 采用的映射函数 MF 如式(5)所示:

$$MF_{\text{GPS}} = 1.0 + 16.0 \times (0.53 - E)^3 \quad (5)$$

其中  $E$  为卫星的高度角,单位为弧度。

北斗 Klobuchar 电离层模型是采用地理坐标系,利用电离层穿刺点的地理纬度计算天顶方向的延迟,再通过映射函数投影到信号的传播路径。

根据北斗空间接口文件,北斗的电离层模型如(6)式所示<sup>[9]</sup>:

$$T_{\text{BD}} = \begin{cases} MF_{\text{BD}} \times \left\{ D + A \cos \left[ \frac{2\pi(t - T_0)}{P} \right] \right\}, & |t - T_0| < \frac{P}{4} \\ MF_{\text{BD}} \times D, & |t - T_0| \geq \frac{P}{4} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $D$  为常数, 值为  $5.0 \times 10^{-9}$ ,  $t$  表示电离层穿刺点地方时, 余弦曲线幅度  $A$  计算与式(2)相同; 周期计算  $P$  与 GPS 略有不同, 如式(7)所示:

$$P = \begin{cases} 172800, & P \geq 172800 \\ \sum_{n=0}^3 \beta_n |\phi_m|^n, & 172800 > P \geq 72000 \\ 72000, & P < 72000 \end{cases} \quad (7)$$

北斗采用的映射函数如式(8)所示:

$$MF_{BD} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{6378}{6378 + 375} \cos E \right)^2}} \quad (8)$$

其中  $E$  也表示卫星的高度角, 单位为弧度。

BDS 与 GPS 电离层 Klobuchar 模型 8 参数的设置均考虑了电离层周日尺度上振幅和周期的变化, 直观的反映了电离层的周日反映特性, 从大尺度上保证了电离层预报的可靠性。由式(4)和式(7)对比可知, 相比 GPS 电离层模型, BDS 电离层模型振幅限制在 172800, 两者采用的地球半径和中心电离层高度不相同, GPS 电离层模型采用的地球半径  $R = 6371 \text{ km}$ ,  $h = 350 \text{ km}$ , 北斗电离层模型采用的地球半径  $R = 6378 \text{ km}$ ,  $h = 375 \text{ km}$ 。

本文组合导航中 BDS 采用的信号频率为 B1I (1561.098 MHz), GPS 采用的信号频率为 L1 C/A (1575.42 MHz), 利用 BDS 电离层模型计算 GPS 卫星电离层延迟时, 需要进行转换, 转换方式如式(9)所示<sup>[10]</sup>:

$$\alpha = (fB_1 / fL_1)^2 \quad (9)$$

## 2.2 加权 RAIM 可用性预测算法

完好性问题对于航空用户非常重要, 未来 GNSS 将会作为民用航空主用导航系统, 分析其完好性功能变得尤其关键。RAIM 是完好性监测技术之一, 实时监测系统定位误差。在用户视野范围内, 至少需要 5 颗可视卫星, 一旦监测存在故障, 则需要 6 颗可视卫星才能排除故障卫星。

此外, 在飞机飞行前, 需要对 RAIM 可用性进行预测, RAIM 可用性是通过输出的保护极限与告警极限进行对比<sup>[11]</sup>, 小于告警极限的时间与总的时间的百分比表示该阶段的 RAIM 可用性。

### 2.2.1 基于最小二乘法传统 RAIM 算法

RAIM 可用性方法中, 最大水平精度因子法、近

似径向误差法等效<sup>[12]</sup>, 水平最大精度因子法和水平保护极限法等价<sup>[13]</sup>。在文中传统 RAIM 可用性分析采用水平保护极限法, 是基于每颗卫星特征性斜率线, 该特征斜率线是估计的水平位置误差与统计检测量之间线性无噪声模型<sup>[14]</sup>, 与每颗卫星相关联的斜率由式(10)表示:

$$HPL = SLOPE_{\max,h} \times pbias \quad (10)$$

$SLOPE_{\max}$  所有可视卫星特征性斜率线的最大值,  $pbias$  为满足一定漏检概率 ( $10^{-3}$ ) 的检测统计量临界偏差。其中  $SLOPE_{\max,h} = \sqrt{A_{1i}^2 + A_{2i}^2} \sigma_i / \sqrt{S_{ii}}$ , 同理可得 VPL 表达式如式(11):

$$VPL = SLOPE_{\max,v} \times pbias \quad (11)$$

其中  $SLOPE_{\max,v} = \sqrt{A_{3i}^2} \sigma_i / \sqrt{S_{ii}}$ 。

$pbias$  由  $\int_0^{T^2} f_{x^2(n-4, pbias)} dx = P_{MD}$  确定, 其中  $P_{MD}$  为漏检概率, 取值为 0.001<sup>[15]</sup>。

考虑用户等效测距误差与卫星星座和卫星类型有关, 本文采用加权 RAIM 算法, 则

$$A = (H^T W H)^{-1} H^T W \quad (12)$$

$$S = I_n - H (H^T W H)^{-1} H^T W \quad (13)$$

其中  $H$  为  $n \times 4$  维观测矩阵,  $W$  为加权矩。

对于单一星座的观测矩阵  $H$  表达式如式(14)所示:

$$H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中  $a_i = (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})$  是用户指向第  $i$  颗卫星位置的方向余弦矢量, 对于基于最小二乘法的位置解算, 只需要求解四个未知数, 即用户的三维位置与预置的线性化点的偏差值、用户时间偏差和线性化时间偏差的偏移值。

对于双星座组合导航, 除了用户的三维位置, 还包括两个星座系统时间偏差的偏移, 此时观测矩阵的表达式如式(15)所示<sup>[16]</sup>:

$$H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 & 0 \\ a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} & 1 & 0 \\ b_{x1} & b_{y1} & b_{z1} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{xm} & b_{ym} & b_{zm} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中  $a_i = (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})$  表示用户指向第一个星座的第  $i$  颗卫星的方向余弦矢量,  $b_j = (b_{xj}, b_{yj}, b_{zj})$  表示用户指向第二个星座的第  $j$  颗卫星的方向余弦矢量。在双星座组合导航中, 需要求解 5 个未知数, 所以在用户视野范围内至少有 5 颗可见星。

### 2.2.2 加权矩阵的选择

本文考虑两种加权矩阵情况, 一是忽略不同卫星种类的差异, 只根据先验信息, 考虑不同卫星星座测距误差, 二是根据不同类型卫星 (GEO 卫星、IGSO 卫星及 MEO 卫星) 的测距误差性质, 选择适当的加权矩阵。

在上述的两种方法中, 无论是考虑星座的差异还是卫星种类的差异, 加权矩阵的表现形式都如式 (16) 所示, 根据不同方法, 对参数赋予不同的值。

$$W = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_i^2} \right\} \quad (16)$$

其中  $\sigma_i$  表示编号为  $i$  的卫星测距误差:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,URA}^2 + \sigma_{i,iono}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,mp}^2 + \sigma_{i,revr}^2$$

这里  $\sigma_{i,URA}$  为星钟误差和星历误差;  $\sigma_{i,iono}$  为电离层延迟误差, 采用 Klobuchar 模型;  $\sigma_{i,tropo}$  为对流层误差, 采用 Hopfield 模型<sup>[17]</sup>;  $\sigma_{i,mp}$  为接收机多径误差, 一般状况下取值为  $(0.13 + 0.53e^{-E_i/10})^2$ ,  $E_i$  为卫星仰角, 单位度;  $\sigma_{i,revr}$  为接收机噪声, 一般情况下取值为  $0.1$ <sup>[18-19]</sup>。最主要误差源为电离层和对流层误差<sup>[17]</sup>。

根据不同 BDS 与 GPS 测距误差特性, 针对不同的飞行阶段提出的完好性要求指标以及考虑不同星座伪距观测水平差异, 不同系统取不同的 UERE<sup>[20-21]</sup>, 第一种加权情况下, 对应的加权矩阵如式 (17) 所示:

$$W = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sigma_{bd,1}^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{bd,i}^2}, \frac{1}{\sigma_{gps,1}^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{gps,j}^2} \right\} \quad (17)$$

根据不同卫星类型, 相同条件下 GEO 与 IGSO 卫星引入的测距误差约为 MEO 卫星的 1.4 倍, 主要是由于 GEO 的伪距多路径误差较大<sup>[16,22]</sup>, 第二种情况下, 对应的加权矩阵如式 (18) 所示:

$$W = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sigma_{meo,1}^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{meo,i}^2}, \frac{1}{\sigma_{igso,1}^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{igso,j}^2}, \frac{1}{\sigma_{geo,k}^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{geo,k}^2} \right\} \quad (18)$$

## 3 实验分析

### 3.1 电离层模型分析

本文采用 BD 和 GPS 的星历数据, 分析北斗和 GPS 电离层模型延迟修正在中国华北、华中和西部地区区域的特性, 地点选在天津滨海机场 (39.1567N, 117.3765E), 武汉天河机场 (30.7833N, 114.2050E), 西藏高原林芝机场 (29.2020N, 94.1840E)。空间可选的卫星包括 14 颗 BD 卫星 (含 5 颗 IGSO 卫星、5 颗 GEO 卫星和 4 颗 MEO 卫星), 32 颗 GPS 的 MEO 卫星。本文首先分析了组合 BDS、GPS 星座卫星空间可见性, 如图 1 所示; 并分别利用北斗与 GPS 电离层模型分析空间所有可见卫星的电离层延迟, 仿真结果如图 2 所示。

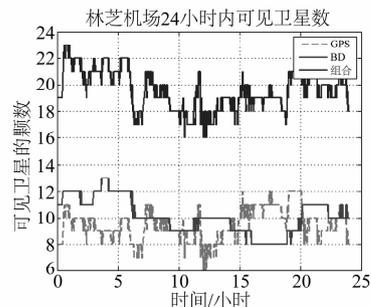


图1 BDS、GPS 与组合星座空间卫星可见性

Fig. 1 Visibility of BDS, GPS or combined BD and GPS in space

如图 1 所示, 单一北斗系统空间可见星数为 8 ~ 13, 单一 GPS 系统空间可见星数为 6 ~ 12, 而北斗与 GPS 组合星座空间可见星数为 16 ~ 23, 由于中国北斗二代系统包括 IGSO 和 GEO 卫星, 所以提高了 BDS 卫星在中国区域的可见性。而组合导航情况增加了空间卫星数目, 从而提高了空间卫星的可见性, 可以获得更多的卫星冗余信息, 这有助于利用卫星的冗余信息进行一致性校验 RAIM 算法的实现, 并且在一定程度上会提高 RAIM 算法的可靠性。

图 2 所示为 BDS 与 GPS 电离层模型延迟修正比较, 对于空间组合星座的 44 颗卫星, 结合 2014 年 12 月 20 日司南导航 RINEX 数据, 分析不同电离层模型的修正, 为了保证仿真结果的完整性, 在空间某颗卫星不可见时, 将该卫星在该时刻的电离层延迟设置为 0。图 (a1)、(b1)、(c1) 为 BDS/GPS 组合星座采用 BD 的电离层模型的修正结果, 图 (a2)、

(b2)、(c2)为 BDS/GPS 组合星座采用 GPS 的电离层模型的修正结果。由图 2 可知,天津机场、天河机场和林芝机场 BDS、GPS 电离层模型针对中国区域内电离层延迟修正如表 1 所示。

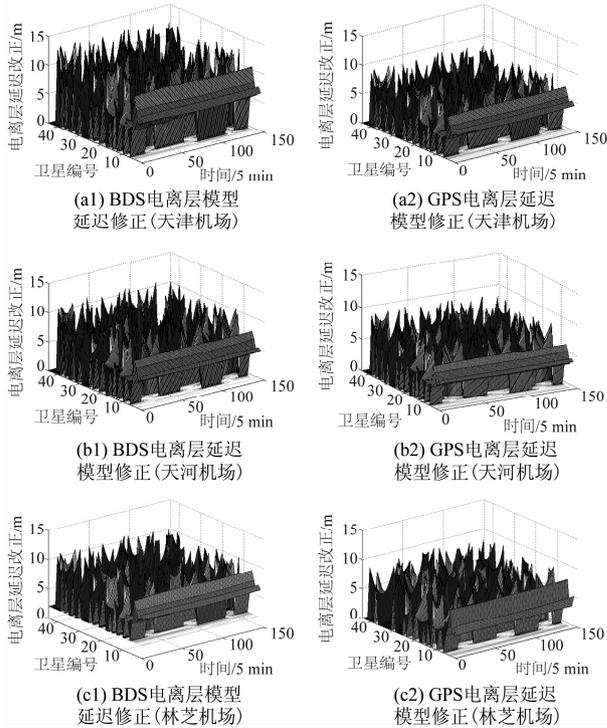


图 2 不同区域 BDS、GPS 的 Klobuchar 电离层延迟修正

Fig. 2 Ionospheric delay correction of BDS, GPS Klobuchar model at different area

表 1 BDS 与 GPS Klobuchar 电离层修正值对比

Tab.1 Ionospheric delay correction of BDS,GPS Klobuchar model

电离层模型	BDS	GPS	BDS、GPS 修正差异
天津机场	0~12.2159 m	0~11.2603 m	0~1.1176 m
天河机场	0~12.7050 m	0~9.2332 m	0~3.4364 m
林芝机场	0~13.0359 m	0~11.1994 m	0~2.2123 m

由表 1 可知,三个区域 BDS 电离层模型相比 GPS 均有所提高。这是由于 GPS 模型是预报模型,主要考虑全球大尺度范围内电离层延迟修正,在全球范围内的修正效果比较稳定,而 BDS 电离层模型是一种区域电离层模型,是基于中国区域网实时跟踪数据解算获得,对中国区域内的电离层修正比 GPS 有所提高。因此,如果采用 BDS/GPS 组合导航,在中国区域内采用 BDS 单频电离层模型分析 RAIM 可用性更为准确,同时也利于 BDS/GPS 中国区域组合导航定位。

### 3.2 组合 RAIM 可用性分析

根据上述分析,本文采用 BDS 的 Klobuchar 电离层模型,结合水平保护极限法以及具体的 GNSS 导航性能需求,继续分析单一和组合星座情况下不同飞行阶段(NPA、APVI)RAIM 的可用性。在 NPA、APVI 阶段,均采用传统 RAIM 算法分析系统完好性可用性。表 2 所示为航空导航对飞行各阶段的性能需求<sup>[23-25]</sup>。

表 2 民用航空导航中 GNSS 性能需求

Tab.2 The performance requirements of GNSS in the civil aviation navigation

飞行阶段	水平精度	垂直精度	完好性风险	告警时间	水平告警极限	垂直告警极限
航路/终端区	0.74 km	N/A	$10^{-7}/h$	15 s	1.8 km	N/A
非精密进近	220 m	N/A	$10^{-7}/h$	10 s	556 m	N/A
一类垂直引导进近	16 m	20 m	$2 \times 10^{-7}/app$	10 s	556 m	50 m
二类垂直引导进近	16 m	8 m	$2 \times 10^{-7}/app$	6 s	40 m	20 m

本文选择三种典型地形的机场,分别为天津机场(平原),天河机场(丘陵)和林芝机场(高原),并在三种地形情况下,分析 RAIM 的可用性。图 3 所示为单一和组合导航情况下非精密进近阶段 RAIM 可用性结果,水平告警极限为 556 m。图(a1)、(a2)分别为天津机场单一北斗、单一 GPS 与组合导航情况下的不同星座加权 RAIM 可用性。图(b1)、(b2)分别为天河机场单一北斗、GPS 与组合导航情况下的不同卫星类型加权 RAIM 可用性。图(c1)、(c2)分别为林芝机场单一北斗、GPS 与组合导航情况下的不同卫星类型加权 RAIM 可用性。分别由图(a1)、(b1)、(c1)和图(a2)、(b2)、(c2)可知,采用不同卫星星座加权的 RAIM 算法,无论是单一还是组合导航,系统的 RAIM 可用性均高于同等条件下的不同卫星类型的 RAIM 加权算法。由图 3 可知,组合导航的 RAIM 可用性均优于单一系统的 RAIM 可用性。因此,由于北斗二代卫星导航系统包含 MEO、GEO 和 IGSO 三种卫星,其空间几何构型优于 GPS,在 NPA 阶段,GPS 的 RAIM 可用性低于北斗系统。由于水平保护极限法与最大水平精度因子法的等价性<sup>[11]</sup>,而组合导航情况下的最大水平精度因子要低于单一导航情况下,因此组合导航 RAIM 可用性优于单一导航。

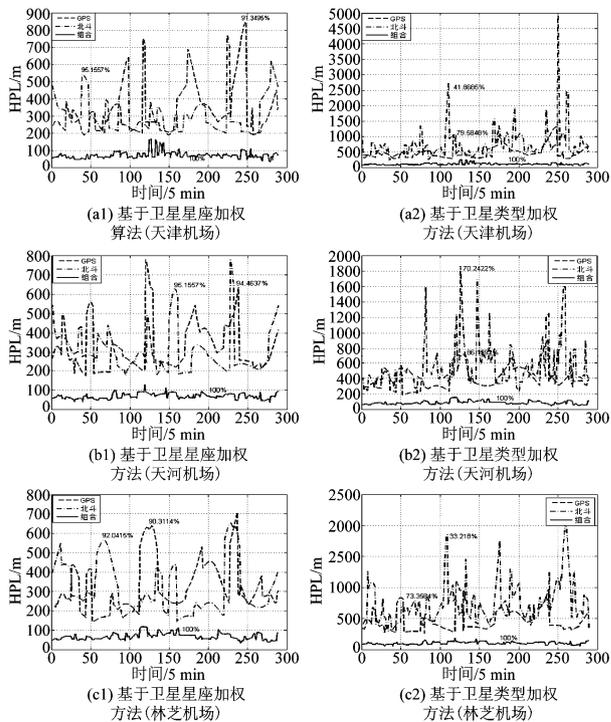


图3 不同地形机场 NPA 阶段 RAIM 可用性分析

Fig. 3 Availability analysis of RAIM during NPA phase at different terrain airport

在 APV I 阶段,水平告警极限与非精密进近阶段相同,基于图 3 仿真结果,因此分析 APV I 阶段 RAIM 可用性只需分析垂直方向的 RAIM 可用性。结果如图 4 所示,图 (a1)、(a2) 分别为天津机场单一北斗、单一 GPS 与组合导航情况下的不同星座加权的 APV I 阶段 RAIM 可用性。图 (b1)、(b2) 分别为天河机场单一北斗、GPS 与组合导航情况下的不同卫星类型加权 APV I 阶段 RAIM 可用性。图 (c1)、(c2) 分别为林芝机场单一北斗、GPS 与组合导航情况下的不同卫星类型加权 APV I 阶段 RAIM 可用性。分别由图 (a1)、(b1)、(c1) 和图 (a2)、(b2)、(c2) 可知,单一和组合导航情况下,采用不同卫星星座加权的 RAIM 算法可用性均高于同等条件下的不同卫星类型的 RAIM 加权算法。由图 4 可知,无论采用何种加权方法,组合导航的 RAIM 可用性均优于单一系统的 RAIM 可用性。同样,由于组合情况下星座空间可见星数多于单一导航,空间几何构型优于相对于单一星座,基于可视卫星的几何分布对保护限值计算的关系,空间几何构型越好,系统的 RAIM 可用性越高。而对于考虑不同卫星种

类的 RAIM 算法,其对应的卫星的空间几何精度因子并不优于基于卫星种类的空间几何精度因子<sup>[18]</sup>,从而导致其 RAIM 算法可用性低于后者。

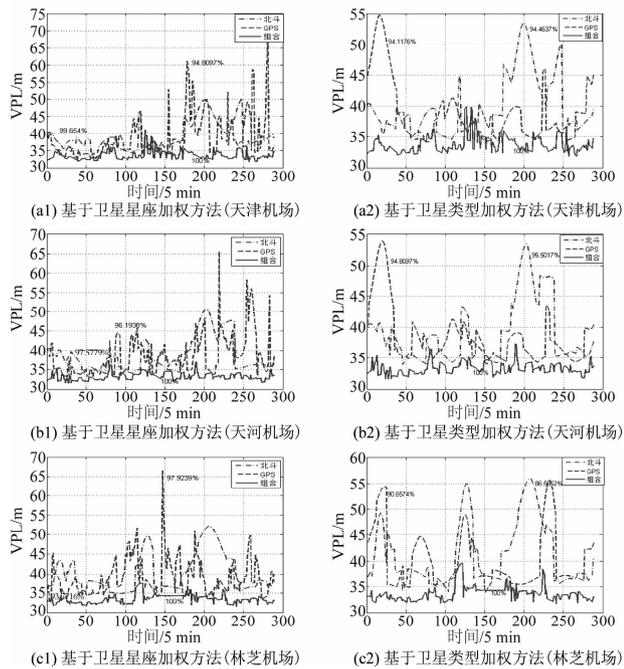


图4 不同类型机场 APV I 阶段 RAIM 可用性分析

Fig. 4 Availability analysis of RAIM during APV I phase at different terrain airport

由图3、图4可知:(1)在 NPA 阶段基于卫星星座的北斗、GPS 单一导航的 RAIM 可用性均可达到 90% 以上,但不能完全满足 NPA 性能需求,组合导航 RAIM 可用性为 100%,满足 NPA 性能需求;(2)在 NPA 阶段基于卫星类型的情况下,单一情况下,均未达到 90%,不满足 NPA 性能需求,只有组合导航的 RAIM 可用性为 100%,满足 NPA 性能需求;(3)在 APV I 阶段基于卫星星座类型的情况下,单一的北斗和 GPS 的 RAIM 可用性超过了 90%,但也不完全满足 APV I 性能需求,而在组合情况下,RAIM 可用性达到了 100%,满足 APV I 性能需求;(4)在 APV I 阶段基于卫星类型情况下,北斗、GPS 垂直方向的 RAIM 可用性介于 86% 与 96% 之间,不满足 APV I 阶段导航性能需求,而组合导航垂直方向 RAIM 可用性为 100%,满足 APV I 阶段导航性能需求。

### 4 结论

本文分析比较了北斗与 GPS 电离层延迟 Klo-

buchar模型差异,得出北斗Klobuchar电离层模型在中国区域内能修正更多电离层延迟误差的结论。在此基础上采用加权HPL算法,在单一和组合导航情况下,分析三种典型机场的RAIM可用性,分别考虑了基于卫星星座类型和卫星类型的加权RAIM可用性。仿真结果表明,两种加权RAIM算法,在非精密进近阶段相比单一导航系统,组合导航降低了系统水平保护极限,增强了系统完好性。但本文主要考虑单频双星座情况下,电离层Klobuchar修正模型,对于未来多频多星座的组合导航,需提出一种新的电离层修正模型,以消除更多电离层延迟。

#### 参考文献

- [1] ICAO, Aeronautical Telecommunications. ICAO, AN-NEX 10, 2006.
- [2] 吕小平,李欣,秦智. 二代卫星导航系统与民航卫星导航应用[J]. 中国航天, 2010, (4): 8-12.  
Lv X P, Li X, Qin Z. Second-generation satellite navigation and civil aviation applications of satellite navigation systems[J]. Aerospace China, 2010, (4): 8-12. (in Chinese)
- [3] 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 Y Q. Introduction to Performance Based Navigation (PBN) Technologies [J]. Air Traffic Management, 2011, 15(4): 1-2. (in Chinese)
- [4] 吕小平. RAIM可用性预测系统研究[J]. 中国民用航空, 2010, 111: 33-36.  
Lv X P. Study on RAIM availability Predictive System[J]. China Civil Aviation, 2010, 111: 33-36. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty. Understanding GPS Principles and Application[M]. Artech House, Norwood, 2006.
- [7] 赵玲,丁继成,马雪飞. 卫星导航原理及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2011: 134-137.  
Zhao L, Ding J C, Ma X F. Principles and Applications of satellite navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011: 134-137. (in Chinese)
- [8] ICD-GPS-200 Revision C. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces[S]. U. S. A: ARINC Research Corporation, 2003.
- [9] 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(2.0): [EB/OL]. www.beidou.gov.cn/attach, 2012-12-27/2013-11-24.  
China Satellite Navigation System Management Office. BDS space signal Interface Control Document disclosed service signals(2.0): [EB/OL]. www.beidou.gov.cn/attach, 2012-12-27/2013-11-24.
- [10] 闫丽军,连帅,高志远. 基于北斗和GPS导航系统的电离层延迟仿真分析[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(7): 74-76.  
Yan L J, Lian S, Gao Z Y. Ionospheric delay simulation and analysis based on BDS and GPS [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(7): 74-76. (in Chinese)
- [11] Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty. GPS原理与应用[M]. 寇艳红译. 北京:电子工业出版社, 2007.  
Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty. Understanding GPS: Principle and Applications[M]. KOU Y H. Beijing: Electronic Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [12] Markus Rippl, Alexandru Spletter, Christoph Gunther. Parametric Performance Study of Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring (ARAIM) for Combined GNSS Constellations[C]//Proceeding of ION ITM 2011, 2011.
- [13] 孙明茜,孙国良,郑玉簋. 接收机自主完好性监测可用性判断方法研究[J]. 遥测遥控, 2006, 27(2): 24-27.  
Sun M H, Sun G L, Zheng Y G. Research on RAIM Availability Algorithm [J]. Journal of Telemetry, Tracking and command, 2006, 27(2): 24-27. (in Chinese)
- [14] Ene A, Blanch J, Powell J D. Fault detection and elimination for Galileo-GPS vertical guidance[J]. In Proceedings of the ION NTM, San Diego, CA, 2007.
- [15] Angus, J. RAIM with multiple faults [J]. Navigation, 53, 4 (2006).
- [16] Jokinen A, Shaojun Feng, Ochieng W. Fixed ambiguity Precise Point Positioning (PPP) with FDE RAIM[J]. Position Location and Navigation Symposium, April 2012, 643-658.
- [17] 焦卫东,唐志虎,沈笑云. 电离层与对流层模型对北斗RAIM可用性的影响分析[J]. 通信学报, 2015, 3, 36(3): 2015072\_1-2015072\_8.  
Jiao W D, Tang Z H, Shen X Y. Analysis of Influence of Ionosphere and Troposphere Model on RAIM Availability

- of COMPASS [J]. Journal on Communications, 2015, 3, 36(3) 2015072\_1-2015072\_8. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] TCA DO-229C. Minimal Operation Performance Standards for Global Positioning System/ Wide Area Augmentation System Airborne Equipment [S]. U. S. A: RTCA, Inc. ,2001.
- [20] 李薇, 袁运斌, 欧吉坤, 等. 全球对流层天顶延迟模型 IGGtrop 的建立在分析[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. (in Chinese)
- [21] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学, 2014, 44(1): 72-81.  
Yang Y X, Li J L, Wang A B, et al. Basic the preliminary assessment of navigation and positioning performance for Compass regional satellite navigation system [J]. Science China Press, 2014, 44(1): 72-81. (in Chinese)
- [22] 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. (in Chinese)
- [23] US Department of Defense and US Department of Transportation. 1999 Federal Radionavigation Plan, 2000.
- [24] Minimum Aviation Performance Standards for the Local

Area Augmentation System (LAAS). RTCA DO-245, 1998-9-28.

- [25] Validated ICAO GNSS Standards and Recommended Practices (SARPS), 2000.

### 作者简介



**焦卫东** 男, 1973 年生, 陕西长武人, 博士, 中国民航大学, 副教授, 硕士生导师, 主要研究领域为虚拟现实技术在民航中的应用及图像/视频处理与编码。

E-mail: nxjiaowd@sina.com



**王艳群** 女, 1989 年生, 江西吉水人, 中国民航大学, 硕士生, 主要研究领域为 PBN 中组合卫星导航系统应用研究与仿真。

E-mail: 847302735@qq.com



**沈笑云** 女, 1965 年生, 江苏盐城人, 研究员, 中国民航大学, 硕士生导师, 主要研究领域为计算机三维成像与图像仿真。

E-mail: 838966857@qq.com

**刘君** 男, 1988 年生, 天津人, 硕士, 网神信息技术(北京)股份有限公司, 主要从事软件程序设计与网络安全。  
E-mail: liujun5297@126.com



**曹旭文** 男, 1974 年生, 天津人, 中国国际航空股份有限公司天津分公司, 主要研究方向: 民航通信系统。

E-mail: cxw10@163.com