

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.06.014

低纬度地区电离层对地基增强系统的影响研究

陈浩翔, 王明甲

(民航中南空管局空管设备应用技术开放实验室, 广州 510406)

摘要: 低纬度地区电离层活动频次高、强度大, 对地基增强系统 (Ground-based augmentation system, GBAS) 的定位精度、完好性及服务连续性构成关键威胁。目前面向低纬度地区的电离层威胁模型与影响评估体系尚不完善, 难以满足中国 GBAS 导航的运行需求。基于此, 通过对某低纬度地区机场的电离层活动进行长期连续观测, 创新性地构建了低纬度地区电离层威胁模型, 系统分析了该模型下的 GBAS 运行误差与故障包络。通过完成全年监测数据、历史极端电离层场景及威胁缓解措施下的 GBAS 服务性能评估, 明确了电离层活动对 GBAS 的关键影响规律, 为中国低纬度地区 GBAS 台站建设、数据处理标准制定等提供了针对性技术参考, 兼具理论与工程价值。

关键词: 低纬度地区; 电离层; 地基增强系统; 威胁模型; 导航精度; 性能评估

中图分类号: V249.32⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)06-1177-12

Impact of Ionosphere on Ground-Based Augmentation System in Low-Latitude Regions

CHEN Haoxiang, WANG Mingjia

(Air Traffic Management Equipment Application Technology Open Laboratory, Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Guangzhou 510406, China)

Abstract: The high frequency and intensity of ionospheric activity in low-latitude regions pose a critical threat to the positioning accuracy, integrity, and service continuity of ground-based augmentation systems (GBAS). Currently, ionospheric threat models and impact assessment systems for low-latitude regions are incomplete and insufficient to meet the operational needs of GBAS navigation in my country. Therefore, this paper innovatively constructs a low-latitude ionospheric threat model through long-term continuous observation of ionospheric activity at an airport in a low-latitude region, and systematically analyzes the GBAS operational errors and fault envelopes based on this model. This paper evaluates GBAS service performance through annual monitoring data, historical extreme ionospheric scenarios, and threat mitigation measures, and clarify the key impact patterns of ionospheric activity on GBAS. This provides targeted technical references for the construction of GBAS stations and the formulation of data processing standards in low-latitude regions of China, as well as both theoretical and engineering values.

Key words: low-latitude regions; ionosphere; ground-based augmentation system (GBAS); threat model; navigation accuracy; performance evaluation

收稿日期: 2025-04-10; 修订日期: 2025-10-01

通信作者: 陈浩翔, 男, 工程师, E-mail: 657404514@qq.com。

引用格式: 陈浩翔, 王明甲. 低纬度地区电离层对地基增强系统的影响研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(6): 1177-1188. CHEN Haoxiang, WANG Mingjia. Impact of ionosphere on ground-based augmentation system in low-latitude regions[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(6): 1177-1188.

空中交通管理从现有陆基导航系统向星基导航系统过渡已成为未来发展的必然趋势,卫星导航系统可以提供全球、全天候、连续实时的导航,具备成为支持民用航空的主导航系统的能力^[1-2]。为保证飞行安全,民航精密进近和着陆在精度、完好性和可用性等方面都对卫星导航提出了很高的要求^[3]。为此,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)提出了地基增强系统(Ground-based augmentation system, GBAS)的概念^[4-5]。GBAS在通过差分定位提高卫星导航精度的基础上,增加了一系列完好性监视算法^[6],提高了系统完好性、可用性、连续性的指标,使机场覆盖空域范围内配置相应机载设备的飞机获得到达 I 类(Category I, CAT I)甚至更高的精密进近、着陆引导服务^[7]。

GBAS的研究和应用始于 20 世纪 90 年代,主要集中在民航领域。在欧美等航空发达地区,GBAS 已经被视为替代传统的地面导航系统的重要技术手段。ICAO 对 GBAS 的研究和标准化工作提供了支持,已发布了一系列规范和要求。美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)和其他研究机构在 GBAS 的研究和应用中走在前列。自 2000 年代以来,多个机场已经实施了 GBAS 系统,例如洛杉矶国际机场和纽约机场。欧洲航空安全局(European union aviation safety agency, EASA)也推进了 GBAS 的标准化工作,并且一些欧洲机场,如伦敦希思罗机场,已经开展了 GBAS 的实验和部署。在中国,GBAS 技术的研究和应用起步较晚,但近年来随着民航业的发展和对航空安全的重视,GBAS 的研究也取得了显著进展。中国民用航空局(Civil aviation administration of China, CAAC)对 GBAS 的需求日益增加。在机场精确导航和着陆方面,GBAS 提供了更高的安全性和效率^[8]。

GBAS 虽然能够提供高精度的导航和定位服务,但也易受到电离层活动的影响。电离层是地球大气层的一部分,位于 60~1 000 km 的高度,主要由带电粒子构成。当电离层发生活动,特别是太阳活动引发的电离层扰动时,全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)信号会发生传播延迟,导致定位精度下降。这种延迟可能导致由 GBAS 提供的修正信号不再准确,影响航班的安全性和效率。

根据《卫星导航地基增强系统开放与运行管理实施细则(试行)》^[9],中国(境)内电离层活跃度区域以北纬 30° 线为界进行分割。北纬 30° 线及以北

地区电离层活跃度较低,称为中纬度地区;北纬 30° 线以南地区电离层活动较频繁,称为低纬度地区。虽然都处于低纬度范围,但靠近赤道和稍远离赤道区域的电离层也有差异。靠近赤道的区域受赤道电急流等因素影响,电离层等离子体的运动更为复杂,电离层闪烁现象更频繁,对卫星信号传输干扰更大;稍远离赤道的低纬度地区,发生这些现象的频率和强度相对较低。

在下一个太阳活动高年到来之前,为了最大程度地做好 GBAS 安全运行的应对措施,也为了更加深入地研究中国低纬度地区的电离层分布情况和活动情况,本文拟在中国南部沿海地区机场开展电离层活动对 GBAS 的影响分析。由于南部沿海为中国可建设大型民用机场的最低纬度区域,电离层活动相对最为频繁,因此基于该纬度区域建立的电离层模型基本覆盖了中国低纬度地区电离层活动对 GBAS 影响最严重的情况。本文的研究成果将为中国在低纬度地区机场建设 GBAS 提供重要参考。

1 电离层异常对 GBAS 的影响类型

GBAS 地面子系统,在 I 类精密进近服务中,应保护用户不受电离层异常的影响。正常条件下,电离层梯度很小(中纬度地区为 4 mm/km)。电离层的这种“正常”行为对位置误差和相关垂直保护级(Vertical protection level, VPL)的影响非常有限。在这种情况下,GBAS 提供的用户位置完全可用于精密进近。但当电离层暴或者电离层空泡这些电离层异常出现时,电离层梯度和电离层闪烁效应会给 GBAS 用户带来威胁^[10]。电离层异常通常分为以下两种情况。

(1) 电离层梯度异常^[11]

电离层梯度是指从一个穿刺点到另一个穿刺点之间,电离层延迟变化情况。在电离层梯度异常情况下,飞机接收到的 GNSS 信号延迟和 GBAS 地面设备接收到的 GNSS 信号延迟之间的差异可能会产生飞机无法接受的较大位置误差。

(2) 电离层闪烁异常^[12]

电离层闪烁产生的原因,本质上是接收机和卫星之间的电离层中的不均匀体,对通过信号的反射和散射,造成短时间内接收机收到的信号剧烈变化。在低纬度地区和高纬度地区,闪烁现象发生较为频繁。在电离层闪烁异常情况下,可能导致接收机对 GNSS 卫星失锁。这会造成可用卫星数的减少,在极端情况下,会造成 GBAS 服务不可用。

2 电离层建模与评估方法

本文对本地电离层的建模和评估方法主要分为 3 个部分:第 1 部分是利用本地长期累积的 GNSS 数据,结合亚太地区电离层威胁模型^[13],建立本地电离层威胁模型;第 2 部分是在已建立的本地电离层模型基础上,对电离层影响下的 GBAS 服务性能进行评估;第 3 部分是在最差电离层条件下,采取必要的缓解措施后,对电离层影响下的 GBAS 服务性能进行评估。

2.1 电离层威胁模型

2.1.1 ICAO 的电离层威胁模型

针对异常电离层威胁,国际民航组织 ICAO 在《国际民用航空公约—附件十》^[14]的附录 B 中规定了移动楔形电离层异常模型,如图 1 所示。该模型将严重的电离层空间梯度建模为倾斜电离层延迟中恒定线性变化的移动楔块。该模型的关键参数为梯度斜率 $g(\text{mm}/\text{km})$ 、楔块宽度 $w(\text{km})$ 、延迟变化幅度 $D(\text{m})$,以及楔块相对于地面上固定点移动的速度 $v(\text{m}/\text{s})$ 。

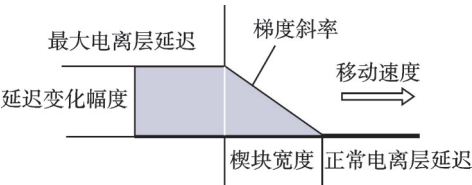


图 1 移动楔形电离层异常模型
Fig.1 Moving wedge ionospheric anomaly model

在模型中, g 的上限取决于表 1 中指定的楔块速度,该值与卫星仰角无关。 w 的宽度在 25~200 km 内。 D 的最大值是 50 m,为了保持模型有效性,必须满足 $D = g \times w$ 。

表 1 梯度斜率的上限

Table 1 Upper bound on gradient slope	
传播速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	梯度上限 $g/(\text{mm}\cdot\text{km}^{-1})$
<750	500
$[750,1\ 500)$	100

2.1.2 亚太地区的电离层威胁模型

在亚太地区 GBAS 电离层威胁模型 (Asia-Pacific GBAS ionospheric/tropospheric model, APAC GITM) 中,无论卫星仰角如何,梯度幅值的上限都设置为 600 mm/km。图 2 显示了电离层研究工作组 (Ionospheric study task force, ISTF) 分析获得的大于 100 mm/km 的电离层梯度。上界是日本观测到的最大电离层梯度 (518 mm/km),在香港和新加坡也能观测到几乎同等量级的电离层梯度。

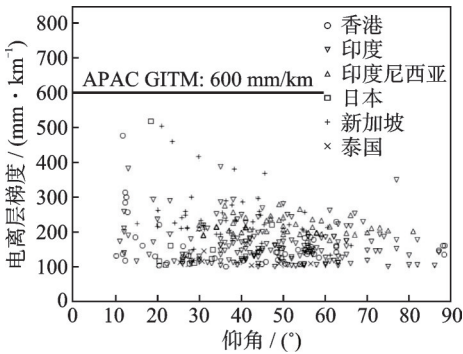


图 2 APAC GITM
Fig.2 APAC GITM

2.2 本地电离层威胁模型

在前期研究中发现,中国的历史电离层数据存在时间不连续、测量结果不准确、不覆盖典型区域等问题。因此本研究在机场周围建立了电离层监测站,用来收集质量可控的电离层观测数据。监测数据的收集处理主要包括对电离层梯度和电离层闪烁进行长期的监测与分析。

(1) 电离层梯度监测

电离层异常梯度,是本地电离层威胁模型的关键参数之一,也是影响 GBAS 单频用户的关键安全因素之一。采用 3 个步骤对电离层异常梯度进行后处理监测:①对各个监测站的数据收集并预处理;②分别计算各监测站的电离层延迟^[15];③采用双站法^[16],即采用监测站两两配对的方式对机场区域电离层梯度进行计算。

在双站法中,首先选择有一定地理距离的 GNSS 接收站组成站对,然后分别计算同一颗卫星在这两个站观测的电离层延时,同时刻的电离层延时的差值除以这两个站和卫星连线对电离层薄壳模型的穿刺点之间的距离就得到了所计算时刻的两个穿刺点之间的电离层梯度

$$g_{i,j}^k(t) = \frac{I_i^k(t) - I_j^k(t)}{d_{\text{IPP},i,j}^k} \tag{1}$$

式中: $g_{i,j}^k(t)$ 表示卫星 k 在 t 时刻接收机 i 和接收机 j 之间的电离层梯度; $I_i^k(t)$ 表示 t 时刻接收机 i , 卫星 k 的电离层延迟; $I_j^k(t)$ 表示 t 时刻接收机 j , 卫星 k 的电离层延迟; $d_{\text{IPP},i,j}^k$ 表示接收机 i,j 分别和卫星 k 所对应的电离层穿刺点之间的距离。

对于为机场终端区航班提供导航信息的 GBAS,需要依靠电离层监测来进一步提升终端区范围内航班进近过程中导航定位的准确性,以满足精密进近的要求。结合机场终端区区域范围和实际应用经验,组成 GNSS 接收站站对的地理间距一般选择 3~60 km。如果双站间距过小,可能无法准确捕捉到电离层参数的变化,导致计算出的梯度

误差较大;间距过大,又可能超出电离层参数变化的特征尺度,使得双站观测到的电离层状态差异过大,不符合计算梯度所基于的局部线性假设。

为了统计本地区正常电离层活动的规律,需要统计电离层梯度的均值、方差等参数,这些参数是建立本地电离层正常模型的关键参数,同样也是GBAS系统所需的关键参数。采用3个步骤对全年电离层正常梯度进行后处理统计:①计算两组站对之间的正常电离层梯度;②统计所有梯度全年的均值、方差随时间的变化规律;③使用膨胀高斯分布包络尾函数的方法,给出全年电离层垂直梯度的标准差。

标准高斯分布的概率密度函数(Probability density function, PDF)为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中: μ 为均值, σ 为标准差, x 为随机变量。高斯分布在 μ 附近最为集中,随着 x 离开均值,概率密度急剧下降。

在实际应用中,高斯分布的标准差会受到一些外部因素的影响,如噪声增加、信号衰减或系统不稳定等。这些外部因素会导致分布的宽度增加,即高斯分布的标准差变大,尤其是尾部部分。膨胀高斯分布为

$$f_{\text{expanded}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{expanded}}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_{\text{expanded}}^2}} \quad (3)$$

式中 σ_{expanded} 为膨胀后的标准差,它比原始的标准差 σ 更大。膨胀系数 f 就是描述这种变化的参数,通常与外部干扰、信号衰减或其他系统因素相关。膨胀系数 f 的表达式为

$$f = \frac{\sigma_{\text{expanded}}}{\sigma} \quad (4)$$

若膨胀系数 f 大于1,则表示分布变宽;若小于1,则表示分布变窄。

包络尾函数是描述高斯分布尾部的变化或扩展的数学表达式。在膨胀高斯分布的情境下,包络尾函数可以用来描述概率密度函数 $f(x)$ 在远离均值时的衰减速度和尾部扩展情况。假设希望了解高斯分布的尾部(即 $|x-\mu|$ 较大的地方)的情况,可以引入包络函数来量化这种扩展。膨胀高斯分布的包络尾函数通常表示为

$$g(x) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_{\text{expanded}}^2}} \quad (5)$$

该函数表示了高斯分布尾部的衰减速度。对于膨胀高斯分布来说,标准差 σ_{expanded} 的增大意味着尾部衰减得更慢,因此 $g(x)$ 将比标准高斯分布的

尾部 $e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ 更为平缓。

(2) 电离层闪烁监测

本文通过闪烁指数 S_4 (每分钟卫星信号强度的归一化标准差)判定电离层闪烁^[12]。闪烁指数 S_4 是用于描述卫星信号强度波动的一种量化指标,常用于评估卫星信号的闪烁程度。它反映了卫星信号强度的变化幅度,并有助于评估电离层扰动对GNSS系统性能的影响。

闪烁指数 S_4 的计算公式为

$$S_4 = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} \quad (6)$$

式中: σ_I 为信号强度 I 的标准差, \bar{I} 为信号强度 I 的平均值。 S_4 的值通常在0到1之间,值越大表示信号强度的波动越剧烈,即闪烁现象越显著。 $S_4=0$ 表示信号强度没有波动,而 $S_4=1$ 表示信号强度的波动非常剧烈。因此,监控 S_4 指数的变化对于预测和防范信号失锁具有重要意义。

本文在对电离层闪烁的长期监测与分析中,使用高性能的GNSS电离层闪烁监测接收机采集数据。为了减小地面多径效应带来的干扰,设置卫星跟踪仰角的截止角度,并选择适当的 S_4 指数值作为电离层闪烁异常事件的判断门限。经过长期的数据累积与分析,最后统计出监测区域的电离层闪烁规律。

2.3 电离层影响下的GBAS运行评估

根据中国民航对GBAS提供I类精密进近服务的要求,评估GBAS运行的性能指标是否满足:准确性(95%概率下,水平精度优于16 m,垂直精度优于4 m)、完好性(优于 $1-2 \times 10^{-7}$ /进近)、连续性(优于 $1-8 \times 10^{-6}$ /15 s)和可用性(不低于0.999 2)。其中连续性和甚高频(Very high frequency, VHF)数据广播(Data broadcast, DB)丢包相关,可用性是满足精度、完好性与连续性要求的运行时长与总运行时长的比值,本文不进行评估。而准确性、完好性都和电离层影响相关,本文对这些进行分析和评估。

在准确性评估方面,由于飞机进近安全对垂直定位误差(Vertical position error, VPE)非常敏感,而水平误差绝大多数情况是满足指标要求的,因此,本文将重点关注飞机在决断位置时的VPE是否满足95%的累计概率小于4 m门限。在完好性评估方面,同样重点考虑飞机在决断位置时的垂直定位误差VPE和垂直保护级垂直保护级别(Vertical protection level, VPL)之间的关系,来评估电离层对GBAS完好性造成的影响。

基于当前监测期间的历史数据进行电离层对GBAS运行影响的评估。为了探究电离层梯度和

电离层闪烁是否对GBAS运行带来风险,综合考虑了全年的电离层梯度和电离层闪烁特征。假设以下场景:飞机最终决断点与GBAS监测站之间的距离为3 km,卫星掩角为 5° ,同时保守取同一时刻所有站对之间最大的电离层测量梯度作为监测期间的电离层梯度,如果发现存在电离层闪烁,则将电离层闪烁影响的卫星排除120 s,模拟闪烁造成接收机失锁现象。

由于当前处于太阳活动低年,电离层活跃程度较低,为了保证评估结果的完整性和充分性,还利用实际监测数据并基于亚太地区的电离层威胁模型,假设最差电离层情况,进行电离层对GBAS运行影响的评估。具体做法是:使用APAC GITM模型^[13]的上限600 mm/km,替代监测期内所有大于100 mm/km的电离层梯度;同时,考虑到最差电离层情况下,电离层活动总体水平也会明显提升,因此,将监测期间观测到的正常电离层梯度加上0均值正态分布的随机量,这个随机量的方差为观测期间的最大方差;其他假设与监测期间的评估相同。

2.4 增加缓解措施后电离层影响下的GBAS运行评估

如果GBAS不能针对所有电离层异常情况保护用户安全运行,则需要增加缓解电离层异常的措施来满足安全运行指标要求。国际上提出的异常电离层缓解措施是使用完好性监测器来检测和排除受电离层扰动影响的异常测距源。

本文采用实时电离层监测系统,该系统和GBAS设备交联,实时监测并筛选受电离层异常影响的大梯度卫星。在现有技术手段下,使用200 mm/km作为异常梯度的筛选门限会带来一些无法实时排除的虚警,这也是在捕获电离层梯度异常时需要人工检定的原因。综合考虑之下,以300 mm/km为门限,既可以满足实时处理的要求,也能满足GBAS运行性能的要求。其他场景上的假设与最差情况下的评估假设相同。基于上述假设,再次进行电离层对GBAS运行影响的评估。

3 某机场电离层模型的建立与验证

3.1 某机场本地电离层模型

某机场位于中国南部,属于亚太低纬度地区,选取更为严苛且更符合地区特征的APAC GITM作为基础电离层模型。对该机场2019年8月~2020年8月的GNSS数据处理分析,并对该机场电离层模型进行了初步验证,结果表明该地区的电离层活动未超出APAC GITM覆盖范围,具体结果如图3所示。

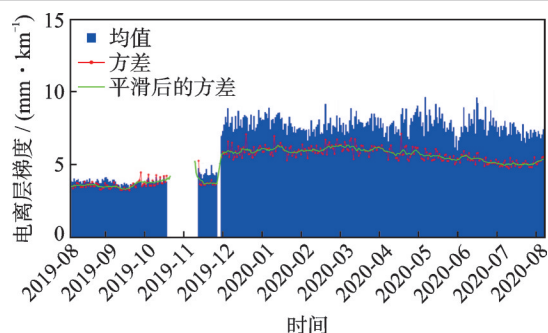


图3 2019—2020年电离层垂直梯度均值、标准差变化情况
Fig.3 Changes in the mean and standard deviation of the ionospheric vertical gradient in 2019—2020

图3为某机场在2019年8月~2020年8月的电离层垂直梯度变化情况。蓝色柱状图是梯度的均值,红色线条是梯度的标准差,绿色线条是以7天为周期进行平滑后的梯度标准差。需要说明的是,由于监测期间存储设备故障以及重新更换调试接收机等情况,造成了部分数据丢失以及前后结果明显差异。但丢失的数据量不到总数据量的9%,且该机场全年电离层梯度数据总体稳定。同时,在相近纬度地理距离不超150 km另一机场部署的电离层监测站未发现电离层梯度异常情况。因此,该机场部分数据丢失几乎不影响整体数据的均值、标准差以及高斯分布概率密度曲线,可正常进行电离层模型的建立和验证。

图4为实际电离层垂直梯度的PDF与零均值高斯分布之间的关系图,其中黑色点为实际电离层垂直梯度PDF,绿色曲线为实际电离层垂直梯度标准差的高斯分布PDF曲线。从图4中可以看出,绿色曲线(1σ 标准高斯分布)仅能拟合实际分布的“中心区域”,无法覆盖“拖尾区域”。说明标准高斯分布仅适用于电离层“平静态”的小幅度梯度波动。若直接采用标准高斯分布作为电离层梯度威胁模型,会严重低估极端梯度事件的概率,导致

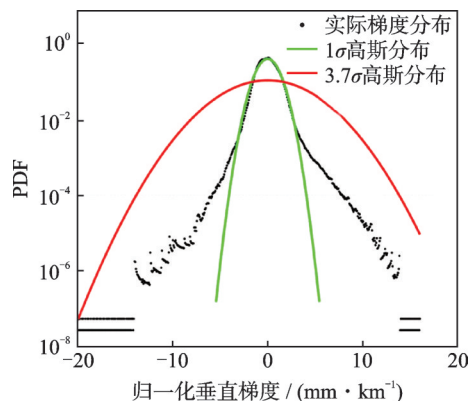


图4 高斯分布与实际电离层梯度PDF

Fig.4 Gaussian distribution and actual ionospheric gradient PDF

GBAS 的完好性风险。因此,本文拟在不改变模型框架的前提下,使用标准差经过膨胀的高斯分布概率密度曲线来建立电离层梯度威胁模型,如图 4 红色曲线所示。通过膨胀标准差,将高斯分布的置信区间扩大,可覆盖实际分布中绝大多数高概率的梯度事件(如图 4 中实际分布的主要拖尾区域),避免因模型过于乐观导致的安全隐患,这是保障民航系统安全运行的有效方案。

从 2019 年 8 月~2020 年 8 月的电离层梯度结果来看,电离层梯度均值在 4 mm/km 左右,此后电离层梯度均值保持在 7~9 mm/km;从电离层梯度分布来看,在监测期内的电离层梯度标准差为 7.41 mm/km,膨胀系数 $f=3.70$,膨胀后的高斯分布的标准差为 27.41 mm/km。

从电离层梯度监测结果来看,电离层活动水平整体处于平静期,这与美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)给出的太阳活动预测图中 2019—2020 年处于太阳活动低谷期的事实相吻合。

由于机场纬度较低,存在电离层闪烁的风险,因此,仅基于 APAC GITM 初步建立的机场电离层模型是不完整的。本文建立电离层闪烁模型作为该机场电离层模型的一部分,对电离层模型进行补充。通过对某机场 2019 年 8 月~2020 年 8 月的 GNSS 数据处理分析,针对电离层闪烁建立了电离层闪烁模型,统计结果如图 5 和图 6 所示。

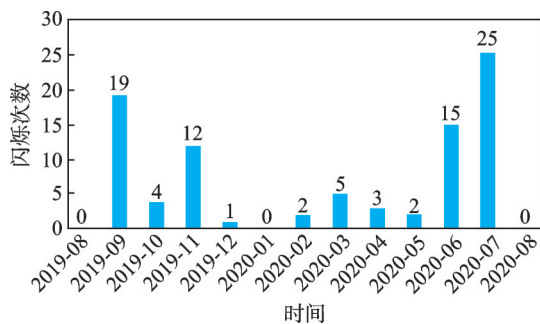


图 5 2019—2020 年每月累计电离层闪烁次数统计

Fig.5 Monthly cumulative ionospheric scintillation statistics in 2019—2020

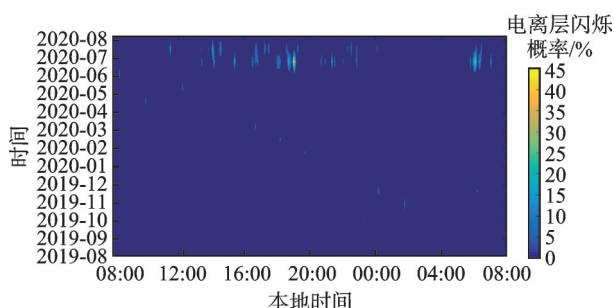


图 6 2019—2020 年电离层闪烁热力图

Fig.6 Ionospheric scintillation heatmap in 2019—2020

电离层闪烁的时间规律与太阳活动、季节变化以及昼夜变化密切相关。电离层闪烁的强度通常在白天较弱,夜间较强。白天时,太阳辐射较强,电离层中的电子密度较高,因此不规则性相对较小。进入夜间后,太阳辐射减少,电离层电子密度降低,电子密度不规则性增加,闪烁现象变得更加显著。同时,在夏季,电离层的活动通常较为剧烈,因为太阳辐射强度较高,电离层中的电子密度变化更大,导致闪烁现象更为明显。冬季时,由于阳光较弱,电离层活动较少,闪烁现象的强度有所减弱^[11]。

从图 5 和 6 的电离层闪烁统计结果来看,该机场区域在 2019 年 8 月~2020 年 8 月期间,电离层闪烁存在一定的季节规律性。其中 6、7、9 和 11 月发生电离层闪烁概率相对较高;同时存在一定的时段规律性,其中本地时 17:00~24:00 及 6:00~7:00 等夜间发生电离层闪烁的概率相对较高。

此外,电离层闪烁会导致接收机对卫星信号失去锁定,造成卫星可用性风险。卫星信号的失锁概率和 S_4 指数表现为正相关,如图 7 所示。当 S_4 指数增大时,说明信号的强度波动加剧,即信号的质量变得更加不稳定。这种波动可能会导致接收机暂时失去对信号的锁定,特别是在较长时间内信号强度不稳定的情况下。因此, S_4 指数和失锁概率之间表现出正相关关系, S_4 指数越高,信号的不稳定性越强,接收机失锁的概率也就越高。

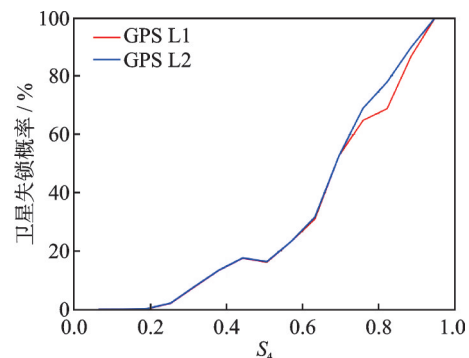


图 7 2019—2020 年卫星失锁的概率与 S_4 的关系

Fig.7 Relationship between the probability of satellite loss of lock and S_4 in 2019—2020

3.2 某机场本地电离层模型的验证

通过对某机场 2019 年 8 月~2020 年 8 月的数据处理与分析,已初步建立某机场电离层模型。但当前处于太阳活动低年,还需要更多的数据对电离层模型进行验证和优化。本文将针对该机场区域在 2020 年 8 月~2021 年 7 月期间的电离层监测结果进行模型验证。

图 8 为该机场区域在监测期内的电离层垂直梯度变化情况。从图 8 中可以看出,电离层垂直梯

度均值方面,全年均值围绕 10 mm/km 上下波动。在 7~11 月,梯度均值略小于 10 mm/km,11 月以后直到次年 7 月,梯度均值基本上保持在 10~13 mm/km 之间;电离层垂直梯度均值最大值为 14.25 mm/km,发生在 12 月初。电离层垂直梯度标准差反应的是电离层活动的波动程度,从图 8 中可以看到,梯度标准差总体变化不大,为 6~10 mm/km。相对平静期在 6 月中旬至 7 月,随后电离层波动程度逐渐增大,相对活跃期在 2 月底至 4 月和 11 月中旬至 12 月中旬。从监测期内的电离层垂直梯度的均值和方差的总体趋势来看,两者基本保持稳定,说明在监测期内电离层活动相对稳定。

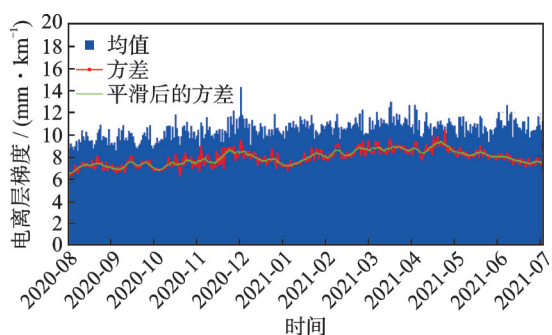


图 8 2020—2021 年电离层垂直梯度均值、标准差变化情况

Fig.8 Changes in the mean and standard deviation of the ionospheric vertical gradient in 2020—2021

由于 GBAS 在计算保护级时,需要知道本地电离层正常梯度的分布规律,分布的标准差就是需要播发的参数 σ_{vig} 。因此,对两组站对全年垂直电离层梯度统计结果进行归一化处理,并统计全年的垂直梯度分布情况,如图 9 所示。

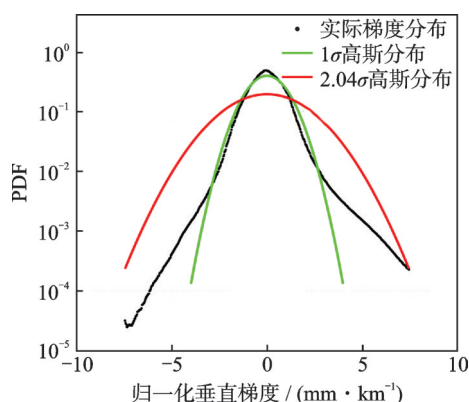


图 9 高斯分布与归一化梯度 PDF

Fig.9 Gaussian distribution and normalized gradient PDF

图 9 为该机场区域监测期内电离层的归一化的梯度概率密度高斯分布图。其中黑色点为实际电离层垂直梯度概率密度分布,绿色曲线为标准差为 1σ 的高斯分布概率密度曲线,红色曲线为标准

差经过膨胀的高斯分布概率密度曲线。从图 9 中可看到,实际的电离层梯度概率密度均存在非高斯左、右尾函数。统计结果显示,在整个监测期内未膨胀的电离层垂直梯度的标准差为 9.44 mm/km,为了将实际电离层垂直梯度分布全包围,膨胀系数为 $f=2.04$,膨胀后的高斯分布的标准差为 19.26 mm/km。

综合上述结果得出结论:从梯度总体变化趋势来看,该机场区域在 2020 年 8 月~2021 年 7 月期间,电离层梯度整体变化不大,仅在 2 月底至 4 月以及 11 月中旬至 12 月出现相对活跃的情况;从梯度概率密度分布来看,总体呈现高斯分布,也存在非高斯左、右尾函数,其标准差为 $\sigma_{\text{vig}}=9.44$ mm/km,膨胀系数 $f=2.04$,膨胀后的 σ_{vig} 为 19.26 mm/km。

从上述结论来看,在监测期内电离层梯度的总体活动水平较低,这依然与 NOAA 给出的太阳黑子数演化规律的事实相吻合,电离层梯度参数处于该机场电离层模型范围内。

在电离层闪烁模型方面,通过监测期内的 GNSS 数据处理与分析,发现依然存在电离层闪烁告警事件(电离层幅度闪烁指数 $S_4>0.4$),但并非所有事件都是由于真正电离层闪烁造成。因此,经过人工排除虚警后的电离层闪烁告警事件累计 34 星次,结果如表 2 所示,电离层闪烁事件每月的分布情况如图 10 所示。图 10 为该机场区域监测期内,经过人工排查后的每月累计电离层闪烁次数统计图。从图 10 中可以看出,该机场区域电离层闪烁事件主要集中在 10、11 和 3 月,其余月份存在少量电离层闪烁异常事件,处于相对平静期。

图 11 为该机场区域电离层监测站在 2020 年 8 月~2021 年 7 月,电离层闪烁指数 $S_4>0.4$ 的概率热力图统计结果。从图 11 中所展示的月份来看,整个监测周期内, $S_4>0.4$ 的概率整体均处于较低水平,发生闪烁的月份主要集中在 10 月中旬至 11 月底以及 3 月,其余月份较少发生 S_4 指数超限情况。从发生闪烁的时段来看, $S_4>0.4$ 的情况主要集中在本地时间 20:00~次日 24:00;其次是凌晨 01:00~03:00;除上述时段外,偶尔也会发生电离层闪烁,但发生概率很低。

为了探究闪烁指数 S_4 与卫星失锁之间的关系,本文对监测期内的数据进行了相关统计,得出如图 12 所示结果。图 12 给出的是监测期内,不同 S_4 指数下, GPS L1 信号失锁的概率变化情况。从图 12 中可以看出,在闪烁指数 $S_4<0.2$ 时, GPS 双频信号几乎不会发生失锁情况;当 $S_4>0.2$ 以后,卫星信号失锁概率开始逐渐增大,当 S_4 在 0.35 左右

表 2 监测期内电离层闪烁事件统计结果

Table 2 Statistics of ionospheric scintillation events during the monitoring period

GPS 卫星号	UTC 时间	持续时间/s
G27	2020-10-15,12:36	180
G27	2020-10-15,12:47	180
G11	2020-10-17,14:50	360
G27	2020-10-18,12:24	1 200
G11	2020-10-18,14:48	120
G11	2020-10-18,14:55	240
G11	2020-10-18,15:07	180
G27	2020-10-22,12:07	180
G11	2020-11-02,13:39	540
G11	2020-11-02,13:57	480
G21	2020-11-02,13:59	360
G11	2020-11-09,13:11	360
G1	2020-11-17,14:04	120
G7	2020-11-19,17:55	360
G7	2020-11-25,17:27	600
G7	2021-01-01,15:02	60
G9	2021-02-21,13:53	540
G13	2021-02-21,16:12	120
G16	2021-02-25,01:56	60
G15	2021-03-05,20:21	60
G28	2021-03-08,13:11	1 680
G14	2021-03-08,13:21	660
G5	2021-03-08,13:30	900
G13	2021-03-08,15:12	1 620
G24	2021-03-08,17:55	360
G28	2021-03-09,13:42	300
G13	2021-03-11,14:55	180
G13	2021-03-11,15:03	60
G7	2021-05-14,05:45	60
G4	2021-05-23,01:42	120
G20	2021-06-27,09:58	60
G26	2021-07-01,20:24	60
G16	2021-07-01,21:31	60
G26	2021-07-01,21:36	120

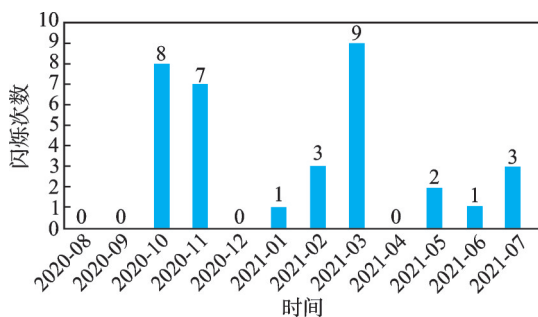


图 10 2020—2021 年每月累计电离层闪烁次数统计
Fig.10 Monthly cumulative ionospheric scintillation statistics in 2020—2021

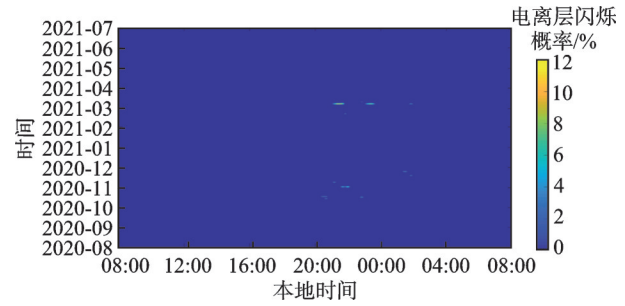
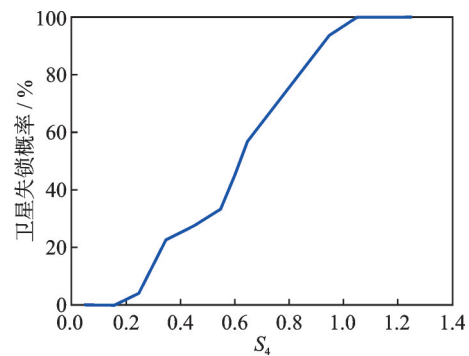


图 11 2020—2021 年电离层闪烁热力图

Fig.11 Ionospheric scintillation heatmap in 2020—2021

图 12 2020—2021 年卫星失锁的概率与 S_4 的关系Fig.12 Relationship between the probability of satellite loss of lock and S_4 in 2020—2021

时,卫星信号的失锁概率大约为 20%;随着 S_4 指数继续增大,卫星信号的失锁概率与 S_4 指数为正相关,当 $S_4 > 1$ 以后,卫星信号失锁概率基本等于 100%。

从上述结果来看,在监测期内电离层闪烁活动的总体水平较低,电离层闪烁参数处于该机场电离层模型范围内。

4 电离层对 GBAS 服务性能影响评估

4.1 基于全年电离层监测数据的 GBAS 服务性能评估

VPE 累积概率是用于描述定位系统在垂直方向上定位误差分布情况的一种统计方法,表示在一系列定位测量中,VPE 小于或等于某一特定值的概率,它是衡量定位系统垂直定位精度的重要指标。通过分析 VPE 累积概率,可以了解定位系统在不同误差水平下的性能表现,帮助评估系统是否满足特定应用的精度要求。由于飞机进近安全对垂直误差非常敏感,本文以累积概率 95% 的 VPE 是否超过 I 类精密进近的 VPE 门限 4 m,作为评估 GBAS 服务准确性的标准。图 13 为某机场在实际电离层影响下飞机在决断点的 VPE 估算结果图。

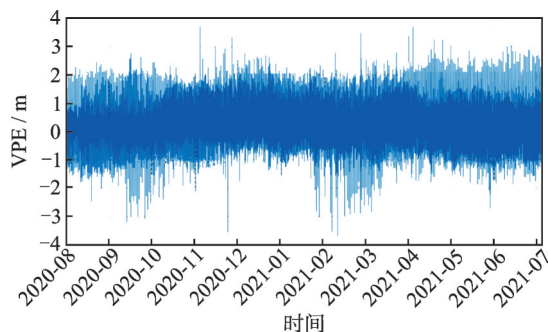


图 13 监测期内 VPE 结果

Fig.13 VPE results during the monitoring period

从图 13 中可以看到,在该机场区域全年监测期内,未发现垂直误差超过误差门限的情况。当排除因电离层闪烁而模拟失锁的卫星后,如果其余卫星位置分布相对较差,会导致 VPE 明显增大,最差情况下, VPE 结果为 3.703 m,但结果仍然处于 I 类精密近进的 4 m 门限以内。

图 14 为监测期内 VPE 累积概率曲线。统计结果表明,累积概率 95% 的 VPE 小于 1.236 m。

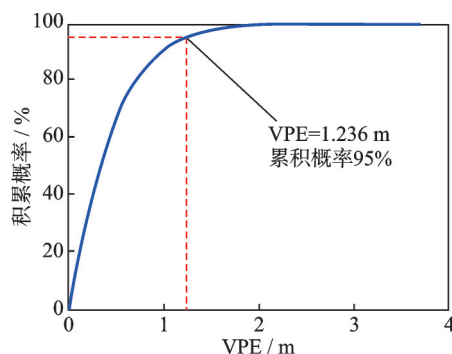


图 14 VPE 累积概率曲线

Fig.14 VPE cumulative probability curve

在完好性评估方面,飞机在决断位置时的垂直定位误差 VPE 和 VPL 之间的关系称为斯坦福图,使用它来评估电离层对 GBAS 完好性造成的影响,如图 15 所示。通过 VPE 和 VPL,将每个历元标记在误差保护级关系图上,当垂直保护级 VPL 超过保护级告警门限值,服务不可用。危险误导信息 (Hazardous misleading information, HMI) 区域表示落入其中的历元误差大于保护级且大于保护级门限,即在落入 HMI 区域的历元,实际导航误差已经超出了误差容限,系统却未能及时发出有效告警,机载用户仍会认为自己安全,这就带来了完好性风险,统计落入 HMI 区域的历元数,就可以得到完好性结果。误导信息 (Misleading information, MI) 区域表示落入其中的历元误差大于保护级,但当保护级大于保护级门限时,系统依旧可以及时发出有效告警,MI 区域定位信息虽有误导性,但未达到 HMI 那样严重的误差程度和风险等级。

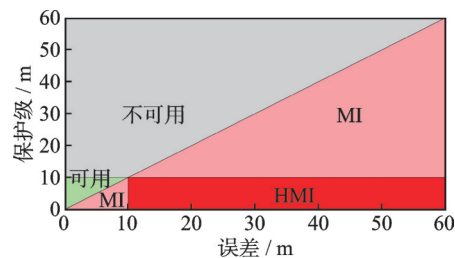


图 15 定位误差和保护级关系图

Fig.15 Relationship between positioning error and protection level

对于 GBAS 完好性,本文通过统计误差保护级关系图中落入危险误导区域 HMI 的历元来计算。从图 16 中可以看出,在观测期间,没有历元落在 HMI 区域,所以 GBAS 在电离层影响下的完好性为 100%。

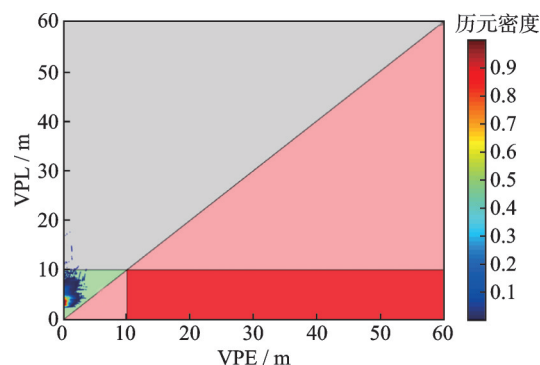


图 16 VPE 和 VPL 关系图

Fig.16 Relationship between VPE and VPL

综上所述,对于该机场在监测期间,GBAS 服务可以满足 I 类精密进近性能要求,未受到电离层异常影响。

4.2 历史电离层最差情况对 GBAS 服务性能影响评估

由于当前监测期处于太阳活动低年,无法评估最差电离层情况下的 GBAS 服务性能。因此,将 ISTF 工作组建立的 APAC GITM 作为历史最差情况,进行模型性能评估。具体做法是:使用 APAC GITM 模型的上限 600 mm/km,替代监测期内所有大于 100 mm/km 的电离层梯度;同时,考虑到最差电离层情况下,电离层活动总体水平也会明显提升,因此,将监测期间观测到的正常电离层梯度加上 0 均值正态分布的随机量,这个随机量的方差为观测期间的最大方差 9 mm/km;其他场景上的假设与监测期间的评估相同。

以累积概率 95% 的 VPE 是否超过 I 类精密进近的 VPE 门限 4 m,作为评估 GBAS 服务准确性的标准。得到的飞机进近决断点的 VPE 估计如图 17 所示,VPE 累积概率如图 18 所示。

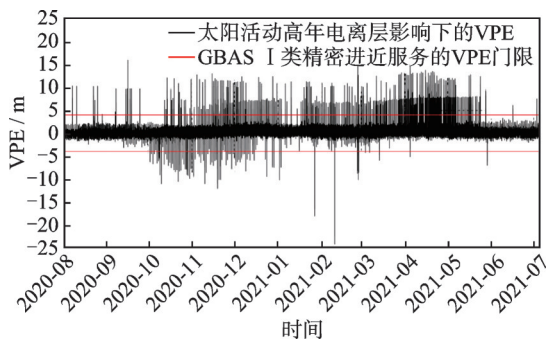


图 17 最差电离层情况 GBAS 垂直定位误差

Fig.17 GBAS vertical positioning error under the worst ionosphere condition

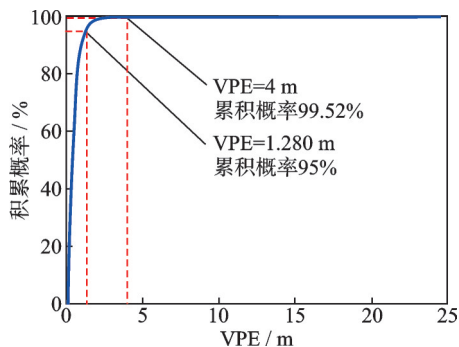


图 18 最差电离层情况 VPE 累积概率

Fig.18 VPE cumulative probability under the worst ionosphere condition

在最差电离层情况假设下,梯度异常造成了明显的 VPE 超限。在监测期内,发现有 307 405 历元 (约占总历元数的 0.481%) 的 VPE 超 4 m 门限。其中,最大的 VPE 达到 24.37 m,这无疑会影响 GBAS 的正常运行,并对飞行带来安全风险。

图 18 为监测期内 VPE 累积概率曲线。结果表明,累积概率 95% 的 VPE 为 1.280 m,大于太阳活动低年的情况,但仍满足中国民航对 GBAS 运行的准确性要求。

电离层梯度异常造成了明显的 VPE 增大,如果 VPL 是基于正常情况下的误差模型来设定的,那么电离层梯度过大引起的额外 VPE 就可能使 VPE 大于 VPL,甚至大于 VPL 告警门限,造成完好性风险。如图 19 所示,落在绿色可用区域的历元

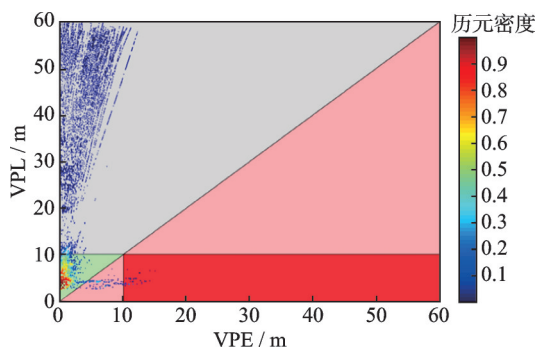


图 19 最差电离层情况 VPE-VPL

Fig.19 Relationship between VEP and VPL in the worst ionospheric condition

元数减少,落在 MI 区域和 HMI 区域的历元增加,完好性降为 99.914%,不满足中国民航对 I 类 GBAS 精密进近完好性要求。

4.3 对电离层威胁采取缓解措施的 GBAS 服务性能影响评估

根据评估结果,发现当前电离层威胁模型,在应对极端电离层威胁的情况时,存在 GBAS 运行指标无法满足中国民航的性能指标要求。所以需要采取缓解措施以应对上述最差电离层情况。具体做法是:增加实时电离层监测系统,通过该系统和 GBAS 设备交联,实时监测并筛选受电离层异常影响的大梯度(例如大于 300 mm/km)卫星。在增加缓解措施后,得到与最差电离层情况影响下的 GBAS 的 VPE 对比估计如图 20 所示。

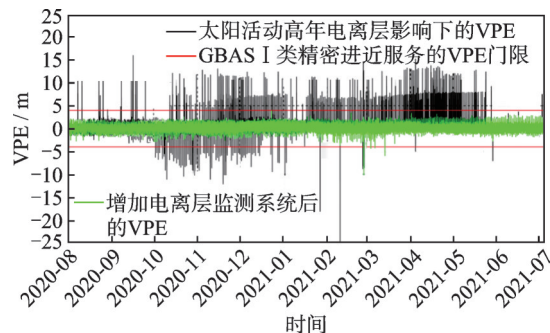


图 20 增加电离层监测系统后与增加之前最差电离层情况下的 VPE 对比图

Fig.20 Comparison of VPE under the worst ionosphere condition before and after adding the ionosphere monitoring system

图 20 中黑色曲线所示是最差电离层影响下估计的 GBAS 垂直误差,绿色部分表示通过电离层监测系统实时筛选大于 300 mm/km 梯度卫星后的估计 GBAS 垂直误差,红色直线表示 GBAS I 类精密进近服务要求的垂直门限 4 m。

在最差电离层情况假设下增加实时电离层监测,筛选受到电离层异常影响的卫星后,梯度异常虽然同样造成了明显的 VPE 超限(最大 VPE 为 10.221 m)。但统计结果表明,在 VPE 累积概率方面,如图 21 所示,累积概率 95% 的 VPE 为 1.237 m,相较未加实时监测时有所减小,能够满足中国民航对 GBAS 运行的准确性要求。

由于 VPE 的减小,也极大降低了其大于 VPL 甚至大于 VPL 告警门限可能性,增强了 GBAS 的完好性。从图 22 可以看出,增加电离层监测系统后,GBAS 系统的完好性恢复到 100%。但由于筛选假设受到电离层异常影响的卫星,减少了可用卫星,影响了卫星的几何分布,造成了不可用区域历元数的些许的增加。需要说明的是,将低年所有

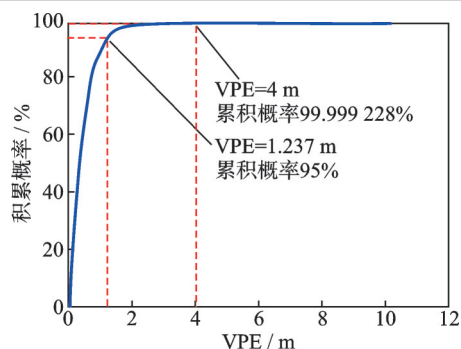


图 21 增加电离层监测系统后最差情况下的 VPE 累积概率

Fig.21 VPE cumulative probability under the worst condition after adding the ionospheric monitoring system

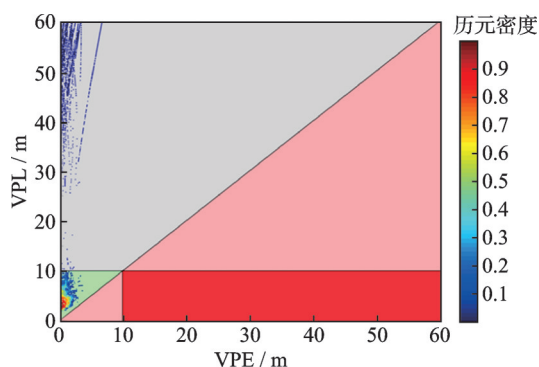


图 22 最差电离层情况增加电离层监测后的 VPE-VPL 关系图

Fig.22 VPE-VPL relationship after adding ionospheric monitoring in the worst ionospheric condition

100 mm/km 以上梯度都认为会在最差情况中大于 300 mm/km 而予以筛选的假设是较为苛刻的,因为实际中很少出现大于 300 mm/km 梯度。增加电离层监测系统后,即使在最差电离层情况下,也可以提供 GBAS I 类精密进近服务。

5 结 论

本文通过研究 ICAO 的电离层威胁模型及 APAC GITM 威胁模型,结合实际电离层监测站观测数据,成功建立并验证了低纬度地区电离层威胁模型。同时,分析了 GBAS 在该模型条件下的运行误差和故障包络情况,完成了 3 项关键评估:基于全年电离层监测数据的 GBAS 服务性能评估、基于历史电离层最差情况对 GBAS 服务性能影响评估、基于对电离层威胁采取缓解措施的 GBAS 服务性能影响评估。最终确认,增加电离层监测系统后,即使在最差电离层情况下,GBAS 系统仍可提供 I 类精密进近服务。为中国低纬度地区民航电离层台站建设、数据采集处理、电离层模型建立、常态化数据分析标准提供了参考依据。

尽管本文取得了一定的研究成果,但仅依靠单一机场的电离层监测站,难以全面反映中国低纬度地区复杂的电离层分布与活动特征。由于低纬度电离层受地理、地磁及太阳活动等多重因素影响,区域差异显著,单一监测点的数据覆盖范围有限,可能导致对大范围电离层扰动规律的研究不够深入,也难以充分支撑区域性 GBAS 系统的整体性能评估与风险预警。

因此,本文后续将从以下方向开展研究:

(1) 在多个低纬度民用航空机场逐步架设各自相对独立的局域性电离层监测站,持续监测并收集电离层活动数据,为各机场电离层监测分析评估提供数据基础。

(2) 将各机场的电离层监测站连成较长基线的电离层监测站对,组成较大区域的电离层监测网,深入研究低纬度地区较大范围的电离层活动情况,在电离层扰动到达机场之前提供告警信息,以达到保证 GBAS 安全运行的目的。

参考文献:

- [1] 李清栋,叶家全,魏童.中国民航空中导航系统及设施综述和展望[J].无线电工程,2024,54(5):1183-1196.
LI Qingdong, YE Jiaquan, WEI Tong. Overview and prospects of air navigation system and facilities in civil aviation of China[J]. Radio Engineering, 2024, 54(5): 1183-1196.
- [2] 王尔申,宋远上,徐嵩,等.基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视技术研究[J].南京航空航天大学学报,2019,51(5):586-591.
WANG Ershen, SONG Yuanshang, XU Song, et al. Navigation and surveillance technology based on “Bei-Dou” for general aviation aircraft in low altitude airspace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(5): 586-591.
- [3] 张建军,韩明,李延波,等.低纬度地区 GBAS 运行性能评估与分析[C]//第十届中国指挥控制大会论文集.北京,中国:[s.n.],2023:657-662.
- [4] 程松. GBAS 进近服务技术演进[J].现代导航,2024,15(2):79-84.
CHENG Song. Technology evolution of GBAS approach service[J]. Modern Navigation, 2024, 15(2): 79-84.
- [5] 李飞,胡凤亮.北京首都国际机场运行 GBAS 的考虑[J].现代导航,2024,15(4):240-244.
LI Fei, HU Fengliang. Considerations of operating GBAS at Beijing capital international airport[J]. Modern Navigation, 2024, 15(4): 240-244.
- [6] 喻思琪.多频多系统 GBAS 完好性监测与评估方法

- 研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- YU Siqi. Research on monitoring and evaluation method of GBAS integrity in multi-frequency and multi-system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [7] 吴德庆. 乌鲁木齐机场 GNSS 地基增强 I 类精密进近研究与实现[J]. 现代导航, 2022, 13(6): 408-413.
- WU Deqing. Research and implementation of GNSS ground-based augmentation system in category-I precision approach for Urumqi Airport[J]. Modern Navigation, 2022, 13(6): 408-413.
- [8] 蔺永峰. 地基增强系统在拉萨贡嘎国际机场的应用研究[J]. 现代导航, 2025, 16(2): 111-116.
- LIN Yongfeng. Research on application of ground-based augmentation system at Lasa Gongga International Airport[J]. Modern Navigation, 2025, 16(2): 111-116.
- [9] 中国民用航空局. 卫星导航地基增强系统开放与运行管理实施细则(试行)[EB/OL]. [2020-10-19]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202112/t20211208_210452.html.
- [10] 陈楚天, 王岸石, 胡耀坤. 特大磁暴期间低纬度地区电离层特征研究[J]. 现代导航, 2025, 16(2): 129-135.
- CHEN Chutian, WANG Anshi, HU Yaokun. Research on ionospheric characteristics at low latitude during severe magnetic storms[J]. Modern Navigation, 2025, 16(2): 129-135.
- [11] 徐鑫, 李亮, 李家祥, 等. 顾及电离层梯度监测的 JPALS 阵列接收机设计[J]. 航空学报, 2025, 46(8): 346-359.
- XU Xin, LI Liang, LI Jiaxiang, et al. JPALS reference receivers topology design for ionospheric gradient monitoring[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(8): 346-359.
- [12] 耿威. 中国及周边地区电离层闪烁效应特性与建模研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2021.
- GENG Wei. Characteristics and modeling of ionospheric scintillation effect in China and its surrounding areas[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [13] 中国华能集团有限公司. 中国电科 22 所牵头完成亚太电离层观测研究项目[J]. 电世界, 2023, 64(4): 62.
- [14] ICAO. Annex 10 to the convention on international civil aviation: Aeronautical telecommunications[S]. 8th Edition. Montreal, Canada: ICAO, 2023.
- [15] 吴胤霖, 战杰. 卫星测量数据电离层延迟误差多频修正方法[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5): 110-112.
- WU Yinlin, ZHAN Jie. Multi-frequency correction method for ionosphere error in satellite measurements[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(5): 110-112.
- [16] 纵瑞龙. 威胁 GLS 安全运行的电离层异常评估[D]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- ZONG Ruilong. Assessment of ionospheric anomaly threatening the safe operation of GLS[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2023.

(编辑: 张蓓)