

北斗地基增强系统国产民机试飞性能评估*

张 展, 郭九源

(中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心 北京 102200)

摘要: 由于 GPS 在国际上的技术和标准优势, 目前在民用航空领域使用的星基导航大多为 GPS。随着我国民航领域的蓬勃发展和北斗卫星导航系统宣告全球组网成功, 亟需开展北斗地基增强系统在民航领域的应用性能评估, 以验证其是否可满足民航飞机对卫星导航系统的要求。针对民航飞机的 I 类精密进近过程, 梳理了该航段中国际民航组织对卫星导航系统的性能需求, 推导了北斗地基增强系统垂直保护级计算数学模型, 制定了搭载试飞试验的加改装方案和飞行科目, 在国产某型号民机上开展了北斗地基增强系统搭载试飞试验, 并对定位精度和垂直保护级进行了分析评估。结果表明: 在搭载试飞试验中, 北斗地基增强系统可满足 I 类精密进近对卫星导航系统垂直精度的需求, 同时系统不存在告警和误警。

关键词: 卫星导航系统; 航空无线电导航; 北斗卫星导航系统

中图分类号: V249.3 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)06-0064-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220310001

引用格式: 张展, 郭九源. 北斗地基增强系统国产民机试飞性能评估[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 64–69.

Performance assessment of BDS GBAS based on domestic civil aircraft flight test

ZHANG Zhan, GUO Jiuyuan

(Commercial Aircraft Corporation of China Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102200, China)

Abstract: Due to the technical and standard advantages of GPS in the world, most of the satellite based navigation systems used in the field of civil aviation are GPS. With the rapid development of civil aviation in China and completion of BDS-3 constellation deployment, it is necessary to evaluate the application performance of the BDS ground based augmentation system in the civil aviation field, to verify whether it can meet the requirements of civil aviation aircraft for satellite navigation system. According to CAT-I operations of civil aircrafts, this paper has investigated the performance requirements of ICAO for the satellite navigation system during precision approach, derived the mathematical model of the vertical protection level of the BDS GBAS, formulated the modification scheme and flight subjects for carrying test flight, performed BDS GBAS flight test, and analyzed the positioning accuracy and vertical protection level of BDS GBAS. The results show that the BDS GBAS in this flight test can meet the vertical precision requirements of CAT-I operations to the satellite navigation system, and there is no alarm and false alarm in the system.

Key words: Satellite navigation system; Aviation radio navigation; BeiDou navigation satellite system

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220310001

Citation: ZHANG Zhan, GUO Jiuyuan. Performance assessment of BDS GBAS based on domestic civil aircraft flight test[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 64–69.

引 言

随着民用航空运输业的高速发展, 我国空中交通流量与日俱增, 部分核心枢纽机场的终端区空域和跑道容量已接近饱和^[1,2]。国际民航组织提出的基于性能的导航技术能够大大提高民航飞机的导航精度, 减小民航航路的最小保护间隔, 进而提高终端区空域和跑道的使用效率, 有效地缓解机场的拥堵程度^[3,4]。

*基金项目: 国家自然科学基金(民航机载系统安保风险识别与防护理论, U2133203)

收稿日期: 2022-03-10 收修改稿日期: 2022-05-12

目前,我国民航基于性能的导航技术主要依赖于美国的 GPS (Global Position System),其中基于 GPS 的地基增强系统能够为民航飞机提供 CAT-I (Category I) 精密进近和着陆引导服务^[5-7]。随着北斗卫星导航系统建设完成并步入推广应用阶段,亟需开展北斗地基增强系统在民航领域的应用性能评估,为今后的设备研发、标准制定和应用推广奠定基础,提高北斗卫星导航系统的国际影响力和我国民用航空领域导航系统的安全性。

北斗地基增强系统包含导航卫星系统、机载子系统和地面子系统这三部分,通过采用差分伪距技术来提高北斗卫星导航系统的定位精度,是一套具备为用户提供广域实时米级定位精度能力的系统。地面子系统利用已知准确位置坐标的地面基准站计算各可视导航卫星的伪距修正值,并将其通过甚高频通信链路发送给机载子系统。机载子系统在定位解算中加入得到的伪距修正值,从而得到更精确的定位结果^[8]。目前,国内已有许多学者正在积极研究基于北斗的地基增强系统,以验证评估其用于民航导航系统的性能。文献[9]搭建了地基增强系统 GBAS (Ground Based Augmentation Systems) 验证系统,并在真实工作环境中,多次开展了静态测试、动态跑车测试。通过对真实环境中测试得到的数据进行分析,来验证使用北斗导航卫星作为民航地基增强系统的导航星座是否可以满足 CAT-I 精密进近的精度要求。文献[10]参照美国航空无线电委员会相关标准过程,分别仿真分析了北斗地基增强接收机在静态和动态场景下的偏差输出,验证其是否满足民航飞机精密进近引导的需求。文献[11]基于性能的导航相关要求,提出了能够兼容北斗的 GBAS 进近着陆定位算法,并搭建北斗地基增强仿真系统,为未来的进近飞行试验奠定了基础,对北斗地基增强系统在民航领域的应用起到了一定推动作用。文献[12]基于 GPS 的地基增强系统在国内机场搭建了北斗地基增强系统,并在通航飞机上开展了试飞试验,以验证北斗卫星导航系统是否可替代 GPS 作为 GBAS 导航源,及北斗地基增强系统是否可用于 CAT-I 精密进近。

本文梳理了国际民航组织对各航段导航系统的性能需求,推导了北斗地基增强系统垂直保护级计算数学模型,针对能够使用北斗地基增强系统的 CAT-I 精密进近航段,开展了国产某型号民机搭载试飞试验,通过对定位精度和垂直保护级的分析,评估验证北斗地基增强系统的性能。

1 北斗地基增强系统性能要求

在民用航空领域,导航系统的性能与机载人员的生命安全息息相关,因此国际民航组织 ICAO (International Civil Aviation Organization) 对机载导航系统的性能有着极为严格的要求。基于性能的导航规范中 ICAO 规定了不同航段下导航系统的性能要求。民用航空的飞行航线主要包括远洋航线、大陆航线、终端区和进近区。而飞行航线的进近区又包括进场航段、起始进近航段、中间进近航段和最终进近航段四个航段。其中最终进近航段可以依据机载导航系统是否具备可靠的垂直引导能力分为非精密进近和精密进近^[13,14]。机载导航系统必须具有垂直导航引导能力才能够实现精密进近,而非精密进近对机载导航系统无此类要求。精密进近又可以依据决断高度分为 CAT-I、CAT-II 和 CAT-III。相较于传统进近方式,基于性能的导航 PBN (Performance Based Navigation) 增加了具有垂直引导的方法 APV (Approach With Vertical Guidance) 进近阶段,该阶段也能够同时提供水平引导和垂直引导,但其垂直引导精度无法达到精密进近水平^[15]。

不同的飞行航段对导航性能的需求不同,例如,ICAO 规定了不同航段下导航系统的性能需求^[16],详见表 1。表中括号内的精度指标为告警门限,ICAO 仅对 I 类精密进近做出了规定,FAA 补充了 II 类、III 类精密进近的要求。对于地基增强

表 1 各飞行航段对导航系统的性能需求
Table 1 Performance requirements of navigation system for each flight segment

飞行航段	水平精度(95%)	垂直精度(95%)
航路	3.7 km(7.4 km)	-
终端	0.74 km(1.85 km)	-
非精密进近	220 m(556 m)	-
APV-I	220 m(556 m)	20 m(50 m)
APV-II	16 m(40 m)	8 m(20 m)
CAT-I	16 m(40 m)	4 m~6 m(10 m~15 m)
CAT-II	6.9 m(17.3 m)	2 m(5.3 m)
CAT-III	6.9 m(17.3 m)	2 m(5.3 m)

系统而言, 目前获得批准的系统仅有提供 CAT-I 精密进近的系统。因此, 本文将针对 CAI-I 精密进近的性能需求评估北斗地基增强系统的性能。

2 北斗地基增强系统保护级计算

在飞机进近过程中, 地基增强系统依据当前的定位精度和导航卫星的几何分布来判断系统是否符合完好性要求, 即计算并比较保护级与规定的告警限之间的关系, 当系统的告警限小于保护级时, 则不符合完好性要求。ICAO 将造成 GBAS 发生完好性风险的因素分为 3 类假设: 被 GBAS 所有的测距源和参考接收机都工作正常的情况被称为 H_0 假设; 仅存在 1 台参考接收机发生故障的情况称为 H_1 假设; 除以上 2 种假设之外的所有情况被称为 H_2 假设。保护级是 GBAS 的定位误差置信上限, 在上述三种假设中只有在 H_0 和 H_1 假设情况下的误差服从高斯分布, 从而可分别计算 2 种假设情况下的垂直保护级 VPL (Vertical Protection Level) 和水平保护级 LPL (Lateral Protection Level)^[17-19]。VPL 和 LPL 的计算方法类似, 但卫星的几何分布造成 GBAS 的水平定位精度优于垂直定位精度, 而 ICAO 的导航系统性能需求对垂直定位精度更为严格, 因此 VPL 的计算评估变得更为重要^[20]。

对于 H_0 假设, 伪距域误差服从均值为零的高斯分布, 保护级的计算可以通过将误差的标准差线性变换投影到定位域获得:

$$VPL_{H_0} = K_{\text{ffmd}} \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{\text{Apr_vert},i}^2 \sigma_i^2} \quad (1)$$

对于 H_1 假设, 存在一台发生故障的参考接收机, 伪距误差服从均值不为零的高斯分布。同 H_0 假设相同, 保护级的计算可将伪距域误差高斯分布线性变换投影到定位域得到:

$$VPL_{H_1} = \max \left\{ |B_{j,\text{vert}}| + K_{\text{md}} \sigma_{\text{vert},H_1} \right\} \quad (2)$$

其中, $S_{\text{Apr_vert},i} = S_{v,i} + S_{x,i} \times \tan \theta_{\text{gs}}$, $S_{x,i}$ 为 S 矩阵中第 i 颗可用卫星对应水平沿航线方向的值, θ_{gs} 是飞行下滑道的仰角, $S_{v,i}$ 为 S 矩阵中第 i 颗可用卫星对应垂直方向的值。

S 是伪距域误差向定位域投影的投影矩阵, 有:

$$S = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot W \quad (3)$$

式中, G 是伪距观测矩阵, W 是权重矩阵, 有:

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

K_{ffmd} 和 K_{md} 为无故障漏检概率和漏检概率对应的乘子, 可根据 GBAS 的服务等级和参考接收机的数量计算得到, 详见表 2。

$B_{j,\text{vert}}$ 为 H_1 假设情况中第 j 台参考接收机发生故障时定位域垂向误差均值的估计, 可由下式得到:

$$B_{j,\text{vert}} = \sum_{i=1}^N S_{\text{Apr_vert},i} B_{i,j} \quad (5)$$

σ_i 是第 i 个测距源的测距误差标准差, 包含 4 个部分: $\sigma_{\text{tropo},i}$ 、 $\sigma_{\text{pr_gnd},i}$ 、 $\sigma_{\text{iono},i}$ 和 $\sigma_{\text{air},i}$, 有:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{tropo},i}^2 + \sigma_{\text{pr_gnd},i}^2 + \sigma_{\text{iono},i}^2 + \sigma_{\text{air},i}^2 \quad (6)$$

式中: $\sigma_{\text{tropo},i}$ 是对流层延迟校正残差, $\sigma_{\text{pr_gnd},i}$ 表示地面设备提供的校正值的无故障噪声标准差, $\sigma_{\text{iono},i}$

表 2 无故障漏检概率乘子与漏检概率乘子

Table 2 The values of K_{ffmd} and K_{md}		GLS	A,B,C	D,E,F (侧向)	D,E,F (垂向)
K_{ffmd}	M=2	5.762	6.9	6.8	
	M=3	5.810	7.0	6.9	
	M=4	5.847	7.0	6.9	
K_{md}	M=2	2.935	3.9	3.8	
	M=3	2.898	3.9	3.7	
	M=4	2.878	3.9	3.7	

是电离层延迟校正残差, $\sigma_{air,i}$ 是伪距校正后机载设备产生的误差, σ_{vert,H_1} 为 H_1 假设情况下的定位域垂直向误差标准差, 可由下式得到:

$$\sigma_{vert,H_1}^2 = \sum_{i=1}^N S_{Apr_vert,i}^2 \left(\frac{M\sigma_{pr_gnd,i}^2}{M-1} + \sigma_{air,i}^2 + \sigma_{tropo,i}^2 + \sigma_{iono,i}^2 \right) \tag{7}$$

在系统的运行中, 接收机无法确定实际情况属于 H_0 假设或者 H_1 假设, VPL 应取二者之中较大的值, 即:

$$VPL = \max \{VPL_{H_0}, VPL_{H_1}\} \tag{8}$$

3 搭载试飞试验

依托国产某型号飞机平台, 按照卫星导航和卫星着陆国际民航标准及中国民航资讯通告要求, 通过试飞试验, 对北斗地基增强系统功能、性能验证, 与现有 GPS 地基增强功能、性能对比, 验证北斗地基增强系统实现 I 类精密进近的功能性能。如图 1 和图 2 所示分别为北斗地基增强系统测试框图和搭载改装示意图。

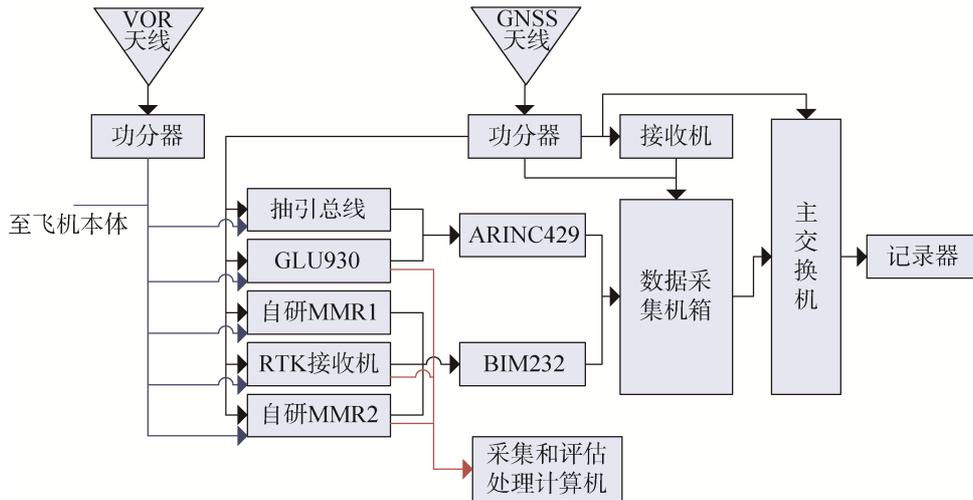


图 1 北斗地基增强系统测试框图

Fig. 1 Test block diagram of Beidou ground-based augmentation systems

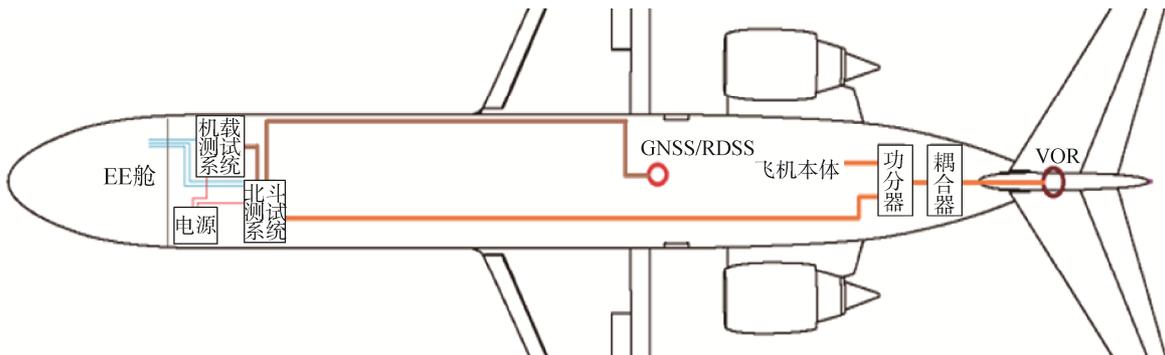


图 2 搭载改装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flight test refitting

试飞科目的设置参照美国联邦航空管理局 FAA (Federal Aviation Administration) 的《Standard Flight Inspection Manual 8200.1c》第 17 章中对 GLS (GBAS Landing System) 的监测要求, 详见表 3。进近飞行的水平轨迹和垂直轨迹分别如图 3、图 4 所示。在试飞过程中实时记录北斗地基增强系统的定位结果、原始观测量等试验数据, 依据推导的北斗地基增强系统垂直保护级计算数学模型处理试飞数据, 评估其

是否满足 I 类精密进近的功能性能。

表 3 北斗地基增强系统原型样机试飞科目

Table 3 Flight test subjects of BDS GBAS

序号	试飞科目	高度 (ft)	时间 (h)	架次
1	进近飞行	按需	6	2
2	连续进近飞行	按需	6	2
总计	N/A	N/A	12	4

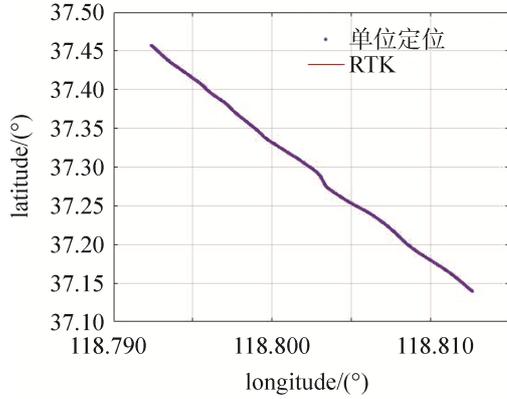


图 3 飞机进近飞行的水平轨迹

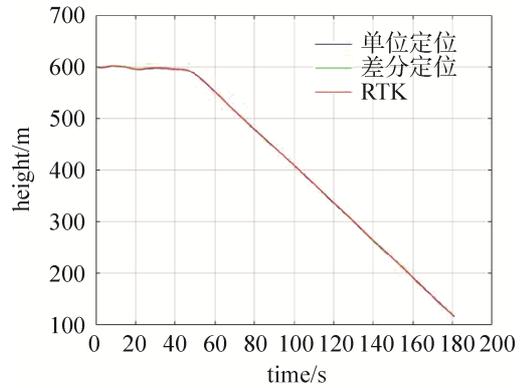


图 4 飞机进近飞行的垂直轨迹

Fig. 3 Horizontal trajectory of aircraft approach flight Fig. 4 Vertical trajectory of aircraft approach flight

在对试飞数据精度的处理中, 将 RTK (Real time kinematic) 接收机的定位结果作为定位基准, 对 12 小时的试飞数据处理统计得到北斗地基增强系统差分垂直精度 (95%) 为 1.534 2 m~3.422 5 m, 优于 CAT-I 对导航系统 4 m 的垂直精度要求。图 5 所示为试飞数据中截取的 500 s 定位精度结果。

在完好性方面, 计算试飞试验中北斗地基增强系统的 VPL, 并与接收机的垂直定位精度和告警限进行比较。统计 12 小时的试飞数据, VPL 未超过 CAT-I 精密进近性能需求的最大告警限 15 m, 未出现误差超过保护级和告警限、保护级超过告警限的情况, 即不存在告警和误警。图 6 所示为试飞数据中截取的 1 800 s 数据对比结果。

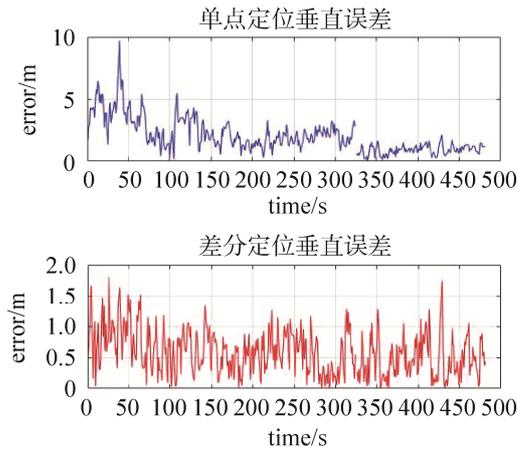


图 5 北斗地基增强系统定位精度

Fig. 5 Positioning accuracy of BDS GBAS

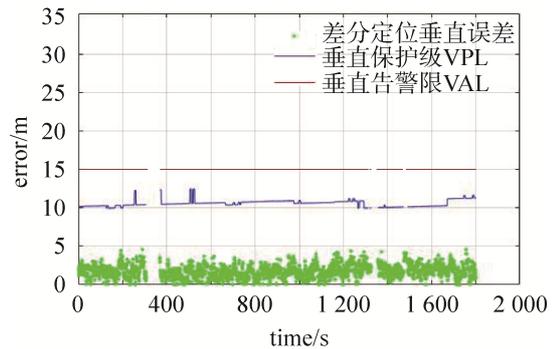


图 6 北斗地基增强系统垂直保护级

Fig. 6 VPL of BDS GBAS

4 结束语

本文通过在国产某型号飞机上的搭载试飞试验, 针对 CAI-I 精密进近的性能需求, 评估北斗地基增

强系统的性能。通过对试飞数据处理,可以得到本次搭载试飞试验中北斗地基增强系统的性能评估结果如下:精度方面,北斗地基增强系统差分垂直定位精度优于4 m,可满足I类精密进近对卫星导航系统垂直精度的需求;完好性方面,VPL未超过CAT-I精密进近性能需求的最大告警限15 m,未出现误差超过保护级和告警限、保护级超过告警限的情况,即系统不存在告警和误警。

参考文献

- [1] 明朝辉. PBN技术下的空中交通若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [2] 杨洪海, 张光明. 中国民航PBN发展战略及实施现状[J]. 中国民用航空, 2010, 120(12): 19-22.
- [3] ICAO. Performance-based Navigation (PBN) Manual (Doc9613)[R]. ICAO, 2008.
- [4] 中国民用航空局. 中国民航基于性能的导航实施路线图[R]. 北京: 中国民航出版社, 2009.
- [5] 淡志强. GBAS完好性评估方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.
- [6] 中国民用航空局飞行标准司. 在终端区和进近中实施RNP的运行批准指南AC-91-FS-2010-01R1[S]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201511/P020151103346759184320.pdf>.
- [7] 魏二虎, 刘学习, 刘经南. 北斗+GPS组合单点定位精度评价与分析[J]. 测绘通报, 2017, (5): 1-5.
WEI Erhu, LIU Xuexi, LIU Jingnan. Accuracy evaluation and analysis of single point positioning with BeiDou and GPS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, (5): 1-5.
- [8] 方鸿涛. 基BP神经网络的GBAS系统完好性优化算法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [9] 耿永超, 胡耀坤, 梁绍一. 基于北斗的地基增强系统试验性能分析[C]//第六届中国卫星导航学术年会论文集—S05 卫星导航增强与完好性监测, 2015: 63-67.
- [10] 刘瑞华, 高伟. 北斗GBAS机载接收机最后进近航段偏差研究[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(4): 1-7.
LIU Ruihua, GAO Yi. Deviation of Beidou GBAS airborne receiver in final approach segment[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2021, 39(4): 1-7.
- [11] 张裕, 刘志忠, 张雪丽, 等. 基于GNSS的GBAS高精度进近着陆定位算法研究与仿真[C]//第十届中国卫星导航年会论文集—S01 卫星导航行业应用, 2019: 104-108.
- [12] 于耕, 张洪亮, 耿雪松, 等. 基于北斗的地基增强系统飞行试验性能[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18): 331-335.
YU Geng, ZHANG Hongliang, GENG Xuesong, et al. Performance of GBAS flight test based on Beidou[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 331-335.
- [13] 王艳群. PBN中多星座组合导航应用研究与仿真[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- [14] 王红力. PBN导航系统性能分析与研究[D]. 四川: 中国民用航空飞行学院, 2011.
- [15] FAA. Criteria for approval of Category I and Category II weather minima for approach[S]. FAA, 2002.
- [16] 姚鑫雨, 张晓林, 霍航宇. 基于高效数值积分的实际导航性能评估方法[J]. 遥测遥控, 2016, 37(4): 26-31.
YAO Xinyu, ZHANG Xiaolin, HUO Hangyu. An actual navigation performance evaluation method based on efficient numerical integration[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(4): 26-31.
- [17] RTCA SC-159. Minimum operational performance standards for GPS local area augmentation system airborne equipment[S]. Washington D.C, 2017.
- [18] RTCA. Minimum aviation system performance standards for the local area augmentation system (LAAS)[S]. RTCA, 2004.
- [19] ICAO. GBAS CAT II/III development baseline SARPs [EB/OL]. [2017-05-18]. <https://docplayer.net/29679842-Gbas-cat-T1-III-development-baseline-sarps.html>.
- [20] 于耕, 张斌浩, 赵龙. BDS/GPS双系统组合GBAS性能评估[J]. 测绘通报, 2018, (4): 88-91.
YU Geng, ZHANG Binhao, ZHAO Long. Performance evaluation of BDS/GPS dual system combination GBAS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018, (4): 88-91.

[作者简介]

张 展 1981年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航空电子系统。

郭九源 1992年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为北斗卫星导航系统。

(本文编辑: 傅 杰)