

基于北斗二代/气压高度组合导航的 APVI/II 飞行程序应用

黄晋

中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 德阳 618307

摘要 APVI/II 是依靠卫星定位系统提供导航引导的飞行程序, 不依靠地面导航设备就可将飞机精确地引导到跑道。国外依赖美国的 GPS 系统建立广域增强系统, 从而实现 APVI/II 程序的大规模应用。中国有自主研发的北斗二代卫星导航系统, 但当前北斗系统的垂直导航精度达不到 APVI/II 程序要求, 可通过与气压高度融合, 提高北斗垂直定位精度, 以尽快实现 APVI/II 在中国的运行。在 2020 年北斗系统组网完成覆盖全球后, 在其 GEO 卫星上添加星基增强信号, 则可以使 APVI/II 应用得以广泛地实施。本文对北斗二代/气压高度组合导航的算法和程序安全性进行分析, 论证现阶段中国使用北斗系统实施 APVI/II 飞行程序应用的可行性。

关键词 北斗二代; APVI/II; 垂直导航精度; 飞行程序

中图分类号 V249.32*8

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.013

Application of APVI/II flight procedure based on combined navigation of Beidou II and baro-altimeter

HUANG Jin

College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618307, China

Abstract APVI/II flight procedure is to rely on a satellite positioning system to provide navigation guidance instead of relying on the ground navigation aids. China has built its own Beidou II satellite navigation system, but the current vertical navigation accuracy has not reached the requirements for APVI/II procedure. Therefore, integrating the Beidou II satellite positioning and barometric altitude improves the Beidou II vertical altitude accuracy to satisfy APVI/II operation requirement. Global networking construction of Beidou system will be completed in 2020. Its GEO satellite sends satellite-based enhancement signal, which enables wide application of APVI/II. This paper analyzes the algorithm and safety of the flight procedure based on combined navigation of Beidou II/barometric altitude, demonstrating the feasibility of application of Beidou II system in APVI/II flight procedure in China.

Keywords Beidou II; APVI/II; vertical navigation accuracy; flight procedure

当前世界各国的全球卫星导航主要使用美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)^[1], 但 GPS 对外只提供民用频率导航定位服务, 其水平定位精度约 25 m, 垂直定位精度约 43 m^[2]。按照国际民航组织(international civil aviation organization) ICAO 附件 10 对各类导航运行的精度要求, 该精度只能用于非精密进近运行, 无法满足垂直引导进近程序(approach procedure with vertical guidance) APVI/II 水

平精度 16 m、垂直精度 20 m 的要求^[3]。为此世界各国纷纷利用差分增强技术建立自己的广域星基增强导航系统, 从而实现 APVI/II 进近运行, 如美国建立的广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)、欧洲建立的欧洲静地星导航重叠服务系统(European geostationary navigation overlay service, EGNOS)、日本建立的多功能 GPS 卫星星基增强系统(multi-functional satellite augmentation system, MSAS)^[4]等。

收稿日期: 2014-11-21; 修回日期: 2015-03-12

基金项目: 中国民用航空局民航科技创新引导资金项目(MHRD20130211)

作者简介: 黄晋, 副教授, 研究方向为民航通信导航监视、空中交通管理和航空公司运行管理, 电子信箱: whhglngjing@163.com

引用格式: 黄晋. 基于北斗二代/气压高度组合导航的 APVI/II 飞行程序应用[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 75-78.

上述国家通过建立广域增强系统已开始大规模实施 APVI 运行应用^[5]。

中国已开始建设自主研发的全球卫星导航系统^[6], 北斗二代系统的星座规划有地球同步卫星, 可提供星基增强服务, 在未来可用于 APV 的运行实施^[7], 但是中国北斗二代的星基增强功能需要在 2020 年组网完成之后才能实施。而当前中国北斗系统的垂直导航精度为 30~40 m, 无法满足 APVI 至少 20 m 的垂直导航精度要求^[3]。为此本文探讨通过北斗二代与机载气压高度系统组合导航^[8], 提高垂直定位精度, 以满足实施 APVI/II 运行所要求的垂直导航精度, 推动 APVI/II 运行在中国尽快实施。

1 APVI/II 飞行程序

1.1 APVI/II 飞行程序的导航精度要求

根据 ICAO《目视和仪表飞行程序设计》(ICAO, DOC8168)的定义和分类原则, 民航航空导航按飞行阶段分为航路导航、终端区导航和进近导航 3 个部分^[1]。进近是飞机从约 2000 m 高度至跑道着陆之前的飞行阶段。这一阶段飞行高度低, 飞机与障碍物之间的垂直间隔小, 飞行员需要依靠飞行仪表来引导飞机下降。如果飞机导航定位的精度越高, 飞行员就能够在没有看见目视参考之前, 将飞机下降得越低, 从而更容易发现跑道并实施着陆。

依据导航系统提供的引导能力差异, 进近飞行又分为非精密进近、APV 和精密进近 3 类。非精密进近对定位精度的要求相对较低, 只能为飞机提供水平航迹引导, 飞机应飞的垂直高度由飞行员根据飞机距跑道入口的距离人工计算确定; 精密进近的导航精度最高, 能够在提供水平方向引导的同时, 提供垂直方向的下滑指引, 可在低能见度情况下, 引导飞机到跑道上实施着陆。上述 3 种进近类别的导航精度要求, 参见表 1^[3]。由表 1 可知, 非精密进近的水平导航精度要求为 220 m, 对垂直导航精度不作要求。按照中国北斗二代系统建设预期, 在 2020 年之前, 北斗二代系统能够达到的垂直定位精度约 30~40 m; 因此单独依赖当前的北斗二代系统不能满足实施 APVI 类进近的垂直定位精度要求。

表 1 各类导航运行类型的空间信号精度标准
Table 1 Signal-in-space performance requirements for various types of navigation operation

导航运行类型	95%水平导航 精度/m	95%垂直导航 精度/m	告警时 间/s
航路	3700	不要求	300
终端区	740	不要求	15
非精密进近	220	不要求	10
APVI	16.0	20	10
APVII	16.0	8.0	6
精密进近	16.0	4~6	6

针对这种情况, 可对北斗系统定位信息与机载高度表进行融合计算^[9], 提高飞行高度的定位精度, 从而满足 APVI 飞行应用标准。

1.2 APVI/II 飞行程序的优势

APVI/II 进近程序可在不依赖机场地面设备的情况下, 为飞机提供类似 ILS (instrument landing system) 进近的连续稳定下降, 其着陆的天气标准稍高于仪表着陆系统进近, 但要求高度可低至 80~100 m^[1]。由于地形、障碍物等原因无法安装 ILS 系统的大中型机场, 由于经费限制无法安装 ILS 系统的中小型机场, 使用 APVI/II 程序的优势十分明显。APVI/II 飞行程序是由机载计算机生成虚拟的下滑线来引导飞行, 因此 APV 的飞行程序设计可以构建从进场到落地包括转弯的连续下降程序, 有利于降低燃油消耗、减小噪音, 符合 ICAO 大力推广的连续下降运行 (continuous descent operation, CDO) 要求^[10]。由于 APVI 使用障碍物评估面 (obstacle assessment surface, OAS) 进行障碍物评价, 保护区面积较小, 有也利于山区和复杂空域的飞行程序构建。

2 北斗二代与气压高度组合导航

北斗二代/气压高度导航属于组合导航, 将来自北斗二代机载系统和机载大气数据系统的高度数据进行融合, 从而获得更高精度的高度位置信息^[8]。

2.1 气压高度表工作原理

气压高度表是利用大气压力随着高度增加而减少的规律来测定飞机的气压高度, 标准的气压高度公式^[2]为

$$H = T_b / \beta \left[\left(P_H / P_b \right)^{-\beta R / g_n} - 1 \right] + H_b \quad (1)$$

式中, P_H 为大气压力; P_b 、 H_b 、 T_b 分别为国际标准大气在相应层的大气压力、重力势高度和大气温度的下限值; β 是温度梯度, R 为空气专用气体常数, g_n 为标准重力加速度。

气压高度表受测量方法、仪表系统精度以及温度等影响, 数值显示存在偏差, 特别是气压高度容易受到气温变化的影响。相同的气压高度, 温度高则实际高度偏高, 温度低则实际高度偏低^[7]。在飞机着陆前的最后阶段, 飞机与障碍物的最小垂直间隔只有 75 m^[1], 如果机载系统的气压高度误差过大则有可能危及飞行。因此将卫星导航系统的高度信息与气压高度信息进行融合, 将能够提高飞机垂直导航精度。

2.2 北斗二代/气压高度组合

北斗二代/气压高度融合方法是来自大气系统的气压高度和来自北斗二代系统的经纬度、高度等定位信息及北斗系统的相关误差参数等输入数据融合模块, 在该模块中按算法进行计算, 得到优化后的飞机高度^[4]。

在数据融合模块中, 采用卡尔曼滤波器实现数据的融合和优化。卡尔曼滤波器按照线性、无偏, 以误差方差最小的准则, 对两个导航模块的信息进行数据融合和最优估算。估算的基本原理是前一时间对下一时刻飞机位置进行组合导航估算, 并根据其与下一时刻的实际位置值之间的偏差及考

虑北斗系统误差进行垂直高度的优化计算,提高垂直高度精度。卡尔曼滤波算法的状态方程包括描述飞机的位置、速度、加速度及气压高度表误差等运动状态信息,卡尔曼滤波算法的整体状态变量为

$$\mathbf{X}=[L, \lambda, h, v_e, v_n, v_w, a_e, a_n, a_w, \delta h_b]^T \quad (2)$$

式中, L, λ, h 分别为飞机的经度、纬度和高度; $v_e, v_n, v_w, a_e, a_n, a_w$ 分别为飞机在向东、向北、向天 3 个方向上的速度和加速度分量; δh_b 为气压高度误差。

卡尔曼滤波算法的系统离散状态方程为

$$\mathbf{X}(k)=\Phi(k, k-1) \mathbf{X}(k-1)+\mathbf{W}(k-1) \quad (3)$$

式中, $\Phi(k, k-1)$ 为 $k-1$ 时刻到 k 时刻主用系统的噪声矩阵; $\mathbf{W}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的主用系统噪声矢量, 均值为 0, 方差为高斯白噪声序列。

组合导航状态变量来自北斗二代接收机和气压高度表, 可分别构建两个部分的测量方程:

$$\mathbf{Z}_1(k)=\mathbf{H}_1(k) \mathbf{X}(k)+\mathbf{V}_1(k) \quad (4)$$

$$\mathbf{Z}_2(k)=\mathbf{H}_2(k) \mathbf{X}(k)+\mathbf{V}_2(k) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{Z}_1(k)$ 为来自北斗二代接收机的高度, $\mathbf{Z}_2(k)$ 为来自气压高度表的高度; $\mathbf{H}_1(k), \mathbf{H}_2(k)$ 分别为北斗二代接收机和气压高度表的高度观测值修正矩阵; $\mathbf{V}_1(k), \mathbf{V}_2(k)$ 分别为北斗二代接收机和气压高度表的观测残余量矩阵。

根据上述系统状态方程(3)和测量方程(4)、(5)可构建组合导航系统的卡尔曼滤波方程:

$$\hat{\mathbf{X}}(k, k-1)=\Phi(k, k-1) \hat{\mathbf{X}}(k-1) \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k)=\hat{\mathbf{X}}(k, k-1)+\mathbf{K}(k)[\mathbf{Z}(k)-\hat{\mathbf{Z}}(k, k-1)] \quad (7)$$

$$\mathbf{P}(k, k-1)=\Phi(k, k-1) \mathbf{P}(k-1) \Phi^T(k, k-1)+\mathbf{Q}(k-1) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(k)=[\mathbf{I}-\mathbf{K}(k) \mathbf{H}(k)] \mathbf{P}(k, k-1) \quad (9)$$

式中, $\hat{\mathbf{X}}(k, k-1)$ 为 $k-1$ 对 k 时刻状态的预测值; $\hat{\mathbf{X}}(k)$ 为 k 时刻的状态估计值; $\mathbf{K}(k)$ 为 k 时刻的滤波增益阵; $\mathbf{P}(k, k-1)$ 为 $k-1$ 时刻对 k 时刻的预测误差估计的协方差阵; $\mathbf{P}(k)$ 为 k 时刻的误差估计协方差阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; $\mathbf{Q}(k-1)$ 的取值通过系统参数获得。在一个滤波周期中, 通过时间的更新, 飞机的定位参数不断得到优化更新, 以提高飞机高度定位信息的精度。

2.3 组合垂直导航的仿真性能对比

根据上述组合导航算法, 使用 Matlab 进行仿真计算^[8]。北斗二代仿真模块计算出飞机的位置信息, 气压高度表仿真模块给出气压高度信息; 卡尔曼滤波器对送入的两类导航信息进行数据融合, 得到优化的实时高度导航解, 本研究将优化前后的数据进行对比。仿真时间为 3600 s, 滤波周期为 1 s; 测量噪声方差 \mathbf{R}_i 及初始误差估计协方差阵 \mathbf{P}_0 的取值根据当前北斗系统的定位性能设定为

$$\mathbf{R}_1=\text{diag}\{15^2, 15^2, 30^2\}, \mathbf{R}_2=10^2$$

$$\mathbf{P}_0=\text{diag}\{20^2, 5^2, 1.2^2, 20^2, 5^2, 1.2^2, 30^2, 5^2, 1.2^2, 8^2\}$$

按照上述算法, 根据飞机实际的飞行性能参数, 使用 Matlab 软件仿真飞机从 500~10000 m 的飞行高度, 进行上升、

平飞、下降、转弯、加速、减速等飞行运行。通过仿真计算得到不同精度的北斗二代单独导航与组合导航的高度值。数据对比分析, 如表 2 所示。由表 2 可知, 使用单独北斗二代系统导航时的垂直高度的最大误差超过 ± 100 m, 均方差为 29.5 m; 通过组合导航, 垂直高度的最大误差减小到 ± 70 m 左右, 垂直定位精度的均方差减小至 9.2 m, 基本达到 APVI 进近垂直高度 20 m 的定位精度要求。因此使用北斗二代/气压高度表组合导航可以满足实施 APVI 运行对高度的精度要求。

表 2 高度优化前后的北斗二代系统垂直定位精度对比
Table 2 Comparison of vertical positioning accuracy of Beidou II before and after optimization

项目	高度最大正偏差/m	高度最大负偏差/m	高度 RMS 均方差/m
单独定位	105.15	-116.65	29.55
组合定位	73.13	-77.40	9.17

3 APVI 的飞行程序

3.1 飞行程序的设计

在 ICAO DOC8168 文件中已经列出了 APVI 飞行程序的相应设计标准, 欧美国家也已经开始 APVI 程序的广泛使用。APVI 程序基本采用精密进近的程序设计方法。其精密航段采用与 ILS 系统类似的 OAS 面来进行障碍物评价^[1]。APVI 的 OAS 面由 W 面、X 面、Y 面和 Z 面构成, 该 OAS 面可从中间进近定位点 (intermediate fix, IF) 开始, 包括最后进近定位点 (final approach fix, FAF) 直至 300 m 复飞高。其对障碍物的评价更精确, 可对下滑航径 (glide path, GP) 和复飞航径进行保护, 具体如图 1 所示。在确定决断高度时, APVI 程序采用高度损失 (height lost, HL) 作为超障余度, 有利于降低 APVI 飞行程序对能见度的要求。

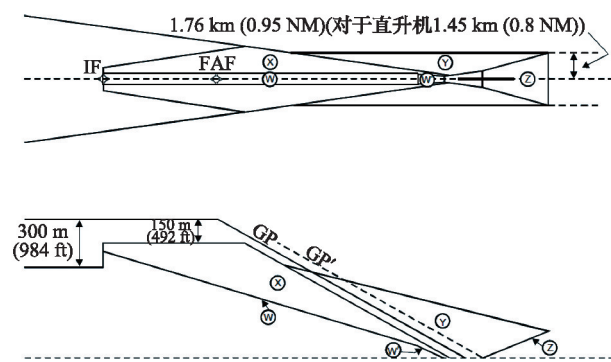


图 1 SBAS/APV 的障碍物评估面

Fig. 1 Obstacle assessment surface of SBAS/APV

3.2 APVI 飞行程序的障碍物限制面

APV 飞行程序分为 APVI 和 APVII, 差别在于使用导航系统所能提供的垂直保护水平 (vertical protect level, VPL) 和

水平保护门限(horizontal protect level,HPL)的不同。VPL和HPL是机载系统根据全球导航卫星系统(globe navigation satellite system,GNSS)卫星的空间几何布局变化,计算在非故障条件下各种因素对垂直导航定位和水平导航的影响水平。垂直告警门限(vertical alert level,VAL)和水平告警门限(horizontal alert level,HAL)是导航系统用于发出位置告警的误差门限值,其大小与具体的运行种类相关。VAL和HAL的概念原理,如图2所示。

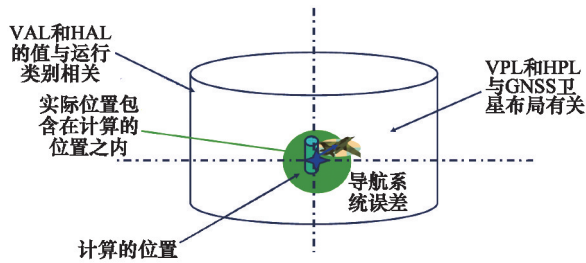


图2 VPL和HPL告警门限示意

Fig. 2 Schematic of VPL and HPL alarm thresholds

在ICAO附件10中,APVI的垂直告警门限为50 m,水平告警门限为40 m,APVII的垂直告警门限为20 m,水平告警门限也为40 m^[9]。在实施APV导航的过程中,机载系统不断计算飞机实际的VPL和HPL值,当实际HPL>40 m,APVI的VPL>50 m或APVII的VPL>20 m时,机载导航系统发出告警,飞行员就不能继续进行对应的APVI或APVII运行。

APVI垂直告警门限为50 m,I类ILS的垂直偏差告警门限为12 m。因此APVI程序的OAS面比ILS程序的OAS面低38 m^[1]。APVI程序对障碍物的要求更严格,所以APVI程序的决断高度(decision altitude,DA)通常比ILS高。APVI和ILS飞行程序的OAS面的对比与如图3所示,上面的绿色的是I类ILS的OAS面,下面浅蓝色的是APVI的OAS面。

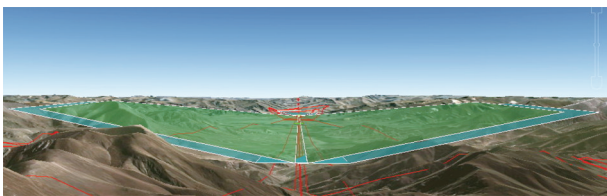


图3 APVI与ILS的OAS面的谷歌地球对比

Fig. 3 Comparison of OAS of APVI and ILS using Google Earth

3.3 APVI飞行程序的运行特点

在APVI运行过程中需要机载系统具备提供安全告警能力,当前中国的民航飞机已经普遍安装机载导航完整性自主监视告警系统(autonomous integrity monitoring alarm system,RAIM),该系统具备计算飞机实际VPL和HPL值并给出告警的能力。中国北斗二代系统也可为RAIM提供导航源,从而提高APVI飞行程序实施的安全性。

由于APVII飞行程序设计标准与ILS飞行程序相似,因此在中国有ILS飞行程序的机场均可构建APVI飞行程序,以作为ILS飞行程序的备份,2020年以后,北斗二代的星基增

强功能开始实施,导航精度达到APVII的要求时,就可直接将APVI程序升级为APVII类飞行程序,而不需要额外的障碍物处理,不需增加电台和机场地面设备。

4 结论

在中国北斗二代导航系统建设完成之前,星基增强功能还未开通的情况下,将北斗二代导航系统的高度信息和气压高度表的高度信息相互融合,利用卡尔曼滤波提高垂直定位精度,可达到实施APVI运行的垂直精度要求。由于APVII程序的程序设计方法与ILS飞行程序类似,中国有ILS飞行程序的机场都具备构建APVII飞行程序的条件。在不增加机场成本的前提下,构建APVII飞行程序可提高中国机场的运行能力。在2020年后,中国北斗二代具备星基增强功能后,该组合导航也可继续为APVII飞行程序的垂直导航提供额外的安全保障。因此建议使用北斗二代/气压高度组合导航技术,尽快推动APVII飞行程序在中国的广泛实施。

参考文献(References)

- [1] International Civil Aviation Organization. DOC 8168, Aircraft operations [S]. Sixth Edition. Colorado, USA: IHS Incorporated, 2014, 567-575.
- [2] Kaplan E D. GPS原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 208-222.
Kaplan E D. Understand GPS principles and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 208-222.
- [3] International Civil Aviation Organization. Annex10 aeronautical telecommunications[S]. Sixth Edition. Colorado, USA: IHS Incorporated, 2007, 96-97.
- [4] 蒋宇志. 卫星导航广域增强系统结构及特点[J]. 电讯技术, 2010, 50(7): 26-30.
Jiang Yuzhi. Architecture and character of satellite navigation wide area augmentation system (WAAS)[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(7): 26-30.
- [5] Deutsche Flugsicherung. Implementation and use of EGNOS in Germany [R]. Bremen Germany: Bremen Airport, 2013: 20-23.
- [6] 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[S]. 北京: 2012, 36-61.
China Satellite Navigation System Office. Beidou satellite navigation system signal in space interface control document B1I[S]. Beijing: 2012, 36-61.
- [7] 中国民用航空局. 中国民航PNB实施路线图[R]. 2009: 27-28.
Civil Aviation Administration of China. China civil aviation performance based navigation implementation roadmap[Z]. Beijing: 2009, 27-28.
- [8] 刘瑞华, 陈杨. 基于北斗二代/气压高度表的优化算法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(6): 105-108.
Liu Ruihua, Chen Yang. The optimization algorithms based on BeidouII/ barometric altimeter[J]. Computer Simulation, 2011, 28(6): 105-108.
- [9] 陈家斌, 袁信. 气压高度表辅助下GPS接收机自备完善性监测可用性研究[J]. 航空学报, 1996, 17(5): 562-565.
Chen Jiabin, Yuan Xin. GPS raim availability with a barometric altimeter aiding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(5): 562-565.
- [10] International Civil Aviation Organization. ICAO DOC 9931, Continuous descent operation (CDO)[S]. Colorado, USA: IHS Incorporated, 2010: 9-14.

(编辑 陈华姣)