 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i1.4496

Reliability analysis of global Positioning system (GPS) in civil aviation navigation

Hangcheng Zhao

Beijing Aircraft Maintenance Engineering Co., Ltd. Aviation Technology Training Department Chengdu Training Area, Chengdu, Sichuan, 610212, China

Abstract

In order to deeply analyze the reliability of global positioning system (GPS) in civil aviation navigation, explore its application advantages in the aviation field, and seek ways to improve its reliability and safety. This paper deeply studies the working principle and technical characteristics of GPS system and its practical application in civil aviation navigation to evaluate the performance of GPS in aviation navigation. It is found that GPS system has significant advantages in civil aviation navigation, such as high precision, all-weather and global coverage, but it has some limitations in signal interference and multi-path effect. Through the research of existing technologies and the application of improvement measures, the reliability of GPS in aviation navigation is effectively improved.

Keywords

GPS system; civil aviation navigation; reliability

全球定位系统（GPS）在民用航空导航中的可靠性分析

赵航程

北京飞机维修工程有限公司航空技术培训部成都培训区，中国 · 四川 成都 610212

摘　要

为深入分析全球定位系统（GPS）在民用航空导航中的可靠性，探讨其在航空领域的应用优势，并寻求提升其可靠性和安全性的方法。本文通过对GPS系统的工作原理、技术特点及其在民用航空导航中的实际应用进行深入研究，评估GPS在航空导航中的性能表现。研究发现，GPS系统在民用航空导航中具有高精度、全天候、全球覆盖等显著优势，但在信号干扰、多路径效应等方面存在一定局限性。通过对现有技术的研究和改进措施的应用，有效提高了GPS在航空导航中的可靠性。

关键词

GPS系统；民用航空导航；可靠性

1 引言

全球定位系统（GPS）通过卫星信号实现对地面接收器的精确定位，为民用航空导航提供了高精度、实时的定位服务。GPS 在民用航空导航中的应用，不仅提高了航班的运行效率，还显著降低了飞行成本。然而，GPS 系统的可靠性问题不容忽视。本文旨在通过对 GPS 系统原理、特点及其在民用航空导航中的应用进行深入研究，分析 GPS 在民用航空导航中的可靠性优势，并提出相应的改进措施和建议，以期为提高 GPS 在民用航空导航中的可靠性和安全性提供理论依据。

2 全球定位系统（GPS）概述

2.1 GPS 系统的组成和工作原理

全球定位系统（GPS）由以下三个主要部分组成：

（1）空间部分：由 24 颗卫星组成，均匀分布在 6 个轨道平面上，轨道高度约为 2.02 万公里。（2）地面控制部分：包括主控站、监控站和用户站。主控站负责卫星的跟踪、控制和调度；监控站负责收集卫星信号和地面数据；用户站负责接收卫星信号，进行定位计算。（3）用户设备：包括接收机、数据处理软件和显示设备等。

GPS 系统利用卫星信号进行定位。用户设备接收到卫星发射的信号，这些信号包含卫星的轨道参数和发射时间。用户设备根据卫星信号到达的时间差和已知的卫星轨道参数，计算出用户设备与卫星之间的距离。用户设备通过求解距离方程组，得到用户设备的经纬度和高度。

2.2 GPS 系统的特点和优势

GPS 系统的定位精度可以达到厘米级别，适用于各种定位需求。GPS 系统覆盖全球，无论用户位于何处，都能接收到至少 4 颗卫星的信号。用户只需购买 GPS 接收设备，即可实现实时定位。随着技术的进步，GPS 接收设备的成本逐渐降低，使得更多用户能够使用。GPS 系统具有较好的抗干扰能力，在恶劣环境下仍能保持较高的定位精度。

【作者简介】赵航程（1973–），男，中国四川安县人，本科，工程师，从事航空电子研究。

GPS 系统在交通运输、测绘、地质勘探、军事等领域具有广泛的应用。

3 GPS 在民用航空导航中的应用

3.1 GPS 在民用航空导航中的发展历程

早期阶段（1970 年代），GPS 技术起源于美国国防部的军事需求，主要用于军事导航。这一阶段的 GPS 系统精度较低，且信号主要面向军事用户。发展阶段（1980 年代），随着 GPS 技术的不断成熟，民用航空部门开始关注 GPS 在航空导航中的应用。这一阶段，GPS 系统的精度和可靠性得到显著提高。应用阶段（1990 年代至今），随着 GPS 系统的不断完善，民用航空导航逐渐广泛应用 GPS 技术。目前，GPS 已成为民用航空导航的主要手段之一。

3.2 GPS 在民用航空导航中的具体应用领域

GPS 在民用航空导航中的具体应用领域主要包括航空器定位、航路设计、空域管理、民航雷达系统及民航通信系统等方面。航空器定位方面，GPS 可以精确测定航空器的位置，为飞行员提供实时、准确的导航信息。航路设计方面，通过 GPS 定位，可优化航线设计，提高飞行效率，降低燃油消耗。空域管理方面，GPS 在空域管理中的应用，有助于提高空中交通流量，确保飞行安全。民航雷达系统方面，GPS 与民航雷达系统相结合，实现航迹跟踪和实时监控。民航通信系统方面，GPS 与民航通信系统相结合，提高通信效率，确保飞行安全。

3.3 GPS 与其他导航系统的结合应用

GLONASS（俄罗斯全球导航卫星系统）与 GPS 结合，可提高定位精度和可靠性，降低信号干扰。Galileo（欧洲全球导航卫星系统）与 GPS 结合，为用户提供更多导航选择，提高系统抗干扰能力。Beidou（中国北斗导航系统）与 GPS 结合，实现多系统融合，提高导航精度和可靠性。

4 GPS 在民用航空导航中的可靠性分析

4.1 GPS 信号的可靠性评估

4.1.1 信号强度和稳定性

GPS 信号的强度是衡量其可靠性的重要指标。信号强度直接关系到 GPS 接收机的定位精度。卫星高度角越高，信号强度越强。因此，飞机在较高空飞行时，GPS 信号质量较好。大气层对 GPS 信号有衰减作用，尤其是在高层大气中，信号衰减更为明显。地面和空间电磁干扰会影响 GPS 信号强度，降低导航精度。GPS 信号的稳定性也是保证导航可靠性的关键。卫星发射的信号质量直接影响到地面接收机的信号接收效果。接收机的性能决定了其捕捉和处理信号的能力，进而影响信号稳定性。

4.1.2 多路径效应和干扰

多路径效应是指 GPS 信号在传播过程中遇到障碍物，产生反射、折射等现象，导致信号到达接收机时路径复杂。这会使得接收机难以准确捕捉到原始信号，从而降低定位精度。采用抗多路径技术，如使用天线阵列、提高接收机性能等，可以有效降低多路径效应的影响 [1]。GPS 信号容易受到电磁干扰，包括人为干扰和自然干扰。人为干扰、自然干扰等因素可能导致干扰。人为干扰包括地面雷达、通信设备等产生的电磁波干扰。自然干扰包括太阳黑子、雷电等自然现象产生的电磁干扰。

4.2 GPS 系统的精度和准确性分析

4.2.1 定位误差来源

在民用航空导航中，GPS 系统的定位误差主要来源于卫星信号传播误差、卫星钟差、卫星轨道误差、接收机误差及地球自转和地球椭球形状误差等几个方面。由于大气层、电离层等因素的影响，卫星信号在传播过程中会发生折射和延迟，导致定位误差。卫星上的原子钟存在一定的误差，导致定位结果不准确。卫星轨道参数的不确定性也会对定位精度产生影响 [2]。接收机的硬件和软件误差，如天线相位中心偏差、接收机内部噪声等，也会对定位精度造成影响。地球自转和地球椭球形状的不规则性也会对 GPS 定位精度产生一定影响。

4.2.2 提高精度的方法

为了提高 GPS 在民用航空导航中的精度，可以选用具有高灵敏度和低噪声的接收机，提高信号接收质量。通过将地面基准站和飞机上的接收机进行同步观测，实时获取差分修正信息，从而提高定位精度。利用 GPS 系统中的 L1 和 L2 两个频率进行观测，通过频率组合技术提高定位精度。在卫星信号传播条件较好的时段进行观测，如白天、晴朗天气等。合理选择卫星星座，提高卫星信号的覆盖范围和连续性。对观测数据进行预处理、滤波和后处理，提高定位结果的精度。结合区域导航系统（如 VOR、ILS 等）与 GPS 技术，实现互补定位，提高导航精度。

4.3 GPS 系统的完整性监测

4.3.1 故障检测和排除

GPS 系统通过实时监控卫星信号、用户接收机数据以及系统内部参数，对系统运行状态进行持续监测。一旦发现异常，系统将立即启动故障检测机制。通过分析故障信号特征，定位故障发生的位置，如卫星、地面控制站或用户接收机等。针对故障定位结果，采取相应的措施进行故障排除，如切换到备用卫星、调整地面控制站参数或更新用户接收机软件等 [3]。在故障排除后，系统需进行故障恢复，确保 GPS 系统恢复正常运行。

4.3.2 冗余设计和备份系统

GPS 系统采用多颗卫星同时工作，当某颗卫星出现故障时，其他卫星可以继续提供服务，保证系统的可靠性。建立地面备份系统，如地面测控站，对卫星信号进行实时监测和校正，提高 GPS 系统的精度和可靠性。鼓励用户配备备用接收机，以应对主接收机故障的情况。在 GPS 系统软件层面，采用冗余设计，如多线程处理、故障转移等，提高系统的健壮性。对 GPS 系统关键数据进行备份，如卫星轨道参数、系统状态信息等，以便在故障发生时快速恢复。建立预警系统，对 GPS 系统可能出现的故障进行预测，提前采取预防措施，降低故障发生概率。

4.4 环境因素对 GPS 可靠性的影响

4.4.1 天气条件

天气条件是影响 GPS 可靠性的重要因素之一。大气折射、电离层扰动、极光干扰等是几种常见的天气条件。大气折射是由于大气层对电磁波的折射作用，使得 GPS 信号在传播过程中产生偏差。在雨、雾、雪等恶劣天气条件下，大气折射现象更加严重，导致 GPS 定位精度降低。电离层是地球大气层中的一层，对 GPS 信号产生折射和吸收作用。在太阳活动高峰期，电离层扰动增大，GPS 信号传播速度和路径发生变化，影响定位精度。极光是由太阳风与地球磁场相互作用产生的，对 GPS 信号产生干扰。在极光活动频繁的地区，GPS 信号受到的干扰较大，定位精度降低。

4.4.2 地形和建筑物遮挡

地形和建筑物遮挡也是影响 GPS 可靠性的重要因素。高海拔地区、密集建筑物区域、峡谷、山谷等复杂地形都会对 GPS 可靠性造成影响。在高海拔地区，GPS 信号传播距离较长，容易受到地形遮挡。此外，高海拔地区大气密度较低，大气折射现象更加明显，进一步降低 GPS 定位精度。在城市等密集建筑物区域，GPS 信号容易受到遮挡 [4]。当 GPS 信号被建筑物遮挡时，定位设备无法接收到足够的信号，导致定位失败或精度降低。在峡谷、山谷等复杂地形，GPS 信号传播路径受到限制，容易产生多路径效应。多路径效应会导致 GPS 信号相互干扰，降低定位精度。

5 提高 GPS 在民用航空导航中可靠性的措施

5.1 技术改进和创新

5.1.1 增强信号抗干扰能力

可以采用抗干扰技术，如多路径干扰消除、信号放大、滤波等，降低外部干扰对 GPS 信号的影响；优化 GPS 接收机设计，提高信号接收灵敏度，降低噪声干扰；采用多频段 GPS 接收技术，提高抗干扰能力；研发新型抗干扰算法，如自适应滤波、自适应干扰抑制等，实现实时动态抗干扰；建立卫星导航干扰监测与预警系统，实时监测 GPS 信号干扰情况，为抗干扰措施提供数据支持。

5.1.2 改进定位算法

应优化定位算法，提高定位精度和稳定性，如采用高精度定位算法、自适应滤波算法等；引入辅助定位技术，如差分 GPS（DGPS）、伪卫星技术等，提高定位精度；研究多系统融合定位技术，如 GPS、GLONASS、Galileo 等卫星导航系统融合，提高定位可靠性；开发实时动态定位算法，实现实时动态调整定位参数，提高定位精度；研究基于人工智能的定位算法，如机器学习、深度学习等，提高定位算法的智能性和适应性。

5.2 加强系统监控和维护

5.2.1 实时监测 GPS 系统性能

通过部署先进的监控系统，对 GPS 接收机的信号质量、定位精度、系统稳定性等进行实时监控。实时采集 GPS 系统运行数据，通过专业软件进行分析，及时发现潜在问题。当系统性能出现异常时，立即发出预警，确保相关维护人员能够迅速响应。

5.2.2 定期维护和更新设备

定期对 GPS 设备进行检查，确保其硬件和软件处于良好状态。及时更新 GPS 设备的软件，以适应新的技术标准和规范。储备必要的备件，以便在设备出现故障时能够及时更换，减少停机时间。对维护人员进行专业培训，提高其设备维护和故障排除能力。

5.3 制定应急预案和容错机制

5.3.1 应对 GPS 系统故障的紧急措施

建立备用导航系统，在 GPS 系统出现故障时，可以迅速切换到备用导航系统，如地面无线电导航系统（VOR、ILS 等）或卫星导航系统（GLONASS、Galileo 等），以确保飞机的正常导航 [5]。在 GPS 系统故障期间，加强地面与空中交通管制员的通信，确保飞行员和管制员之间能够及时、准确地传达信息，共同应对故障。制定详细的紧急程序，包括飞机的紧急备降、绕飞、改变航线等，确保在 GPS 系统故障时，飞机能够安全、有序地执行任务。

5.3.2 提高系统的容错能力

将 GPS 信号与其他导航系统（如 GLONASS、Galileo 等）的信号进行融合，提高导航系统的可靠性和准确性。改进 GPS 接收机的算法，提高其在复杂环境下的抗干扰能力和抗遮挡能力。在 GPS 系统中设置冗余设备，如备用天线、备用接收机等，以防止单一设备故障导致整个系统瘫痪。对 GPS 系统进行实时监控，及时发现并处理潜在故障，确保系统的稳定运行。

6 结论

GPS 系统具有全球覆盖、高精度、实时性强等特点，为民用航空导航提供了可靠的定位服务。应建立完善的信号监测系统，实时监测 GPS 信号质量，及时发现并预警潜在的信号干扰和故障。将 GPS 与其他导航系统（如 GLONASS、Galileo 等）进行信息融合，提高导航的可靠性和鲁棒性。通过技术手段提高 GPS 接收机的抗干扰能力，降低信号干扰对导航精度的影响。针对 GPS 系统可能出现的故障，制定相应的应急预案，确保在紧急情况下能够及时切换到备用导航系统。

参考文献

[1] 谢文泽.民用航空机场导航信号干扰因素及应对策略[J].科技风,2022,(10):61-63.

[2] 封世领,罗文军,周兵.民用航空通信导航系统仿真设计[C]//中国航空学会.第五届中国航空科学技术大会论文集.中电科航空电子有限公司;,2021:4.

[3] 民用航空通信导航监视设备飞行校验管理规则[J].中华人民共和国国务院公报,2021,(27):34-41.

[4] 侯敬,王鸿锋.当民用航空导航测距仪（DME）地面设备被无线电干扰后的操作与措施[J].中国航班,2021,(16):104-107.

[5] 贾宇.卫星导航地基增强系统在民用航空的发展与应用[J].现代导航,2020,11(04):272-276.