民航 GPS 地基区域完好性监视系统设计与实现

朱衍波 张晓林 薛 瑞 张淼艳

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 结合中国地域和空中交通流量分布的特点,提出了中国民航全球卫星定位系统 GPS(Global Positioning System)地基区域完好性监视系统 GRIMS(Ground-based Regional Integrity Monitoring System)的概念. 一个包含 7 个监测站的地面监测网监测视界内的 GPS 卫星,判断其可用状况,并将判断结果和重要的监测数据发送到主控站. 主控站计算中国范围内的接收机自主完好性监测 RAIM(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)空洞,同时推算全国民航飞机的实时位置,并向所有位于 RAIM 空洞中的飞机及时发送完好性告警信息. 从卫星出现故障到飞机收到告警信息之间的告警延迟小于 7 s. 该系统已经应用于中国民航,在保证飞行安全的同时提高了飞行效率.

关 键 词: 卫星导航; 故障检测; 全球定位系统

中图分类号: P 228.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0797-05

Design and implementation of GPS ground-based regional integrity monitoring system for China civil aviation

Zhu Yanbo Zhang Xiaolin Xue Rui Zhang Miaoyan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A GPS(global positioning system) GRIMS(ground-based regional integrity monitoring system) was established by considering the particularities of Chinese terrain and the distribution of air traffic flow. A ground-based monitoring network composed of 7 monitoring stations gathered data of all GPS satellites in view and made primitive judgments of GPS satellites' health from all the data gathered. The judgments and important original data were then sent to master station. All RAIM(receiver autonomous integrity monitoring) holes in Chinese airspace, as well as positions of all airplanes of Chinese airlines, were calculated in master station. All airplanes that were considered to be in any RAIM hole would receive a notification message. The time limitation of the whole process from gathering monitoring data to the notification be received was 7 s. GRIMS is used in China civil aviation and improvs both safety and efficiency.

Key words: satellite navigation aids; fault location; global positioning system

目前,中国民航客机已经基本装备了全球卫星定位系统 GPS(Global Positioning System)卫星导航设备. 将 GPS 用于中国民航,在东部地区作为辅助导航系统,可提高导航精度,避免再对陆基导航系统进行投资;在西部地区可作为主用导航系统,提高导航精度、航行安全和飞行效率,克服在西部边远地区建台困难和依靠惯性导航系统误差大的难题.

但民用航空是对安全性要求极高的部门,无论将 GPS 作为辅助航空导航系统还是作为主用航空导航系统,除了导航精度外,还必须满足完好性要求[1-2]. GPS 系统在航路和进近阶段能满足民航所规定的精度要求,但远不能满足民航对完好性的要求. 因此必需建立 GPS 卫星完好性监视

收稿日期: 2005-08-18

作者简介: 朱衍波(1970-),男,浙江舟山人,博士生, zyb@adcc.com.cn.

系统,满足民用航空对卫星导航系统的需求.

目前,国际上已经建成和正在建设中的GPS完好性监视和增强系统有:WAAS(美国)[3]、LAAS(美国)[4]、EGNOS(欧盟)[5]、GRAS(澳大利亚)、MSAS(日本)和GAGAN(印度)等.由于星基完好性增强系统的建设和维护费用相当高,且中国的空中交通流量主要集中在东部经济发达地区,东西部空中交通流量的差别相当大,因此一个可灵活部署、扩展的地基系统将更适用于中国民航.为此,本文研究了中国民航GPS地基区域完好性监视系统概念,提出了具体方案,考虑了中国区域特点和民航需求,解决了系统中应用的关键算法和关键技术,具有重要应用价值.

1 GRIMS系统设计

在接收机内,仅依靠接收机自身获取的定位信号进行完好性监视的方法,称为接收机自主完全好监测RAIM(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)[6-7].但是RAIM算法依赖于所观测卫星的几何分布,在卫星几何分布不好的地区(即RAIM空洞),结果有较大误差.因此必须在RAIM基础上附加地基完好性监视系统,在两个系统的共同作用下,使GPS系统在边远地区达到用作主用导航系统的性能要求;在航路、终端区达到用作辅助导航系统的性能要求.

中国民航地基区域完好性监测系统GRIMS(Ground-based Regional Integrity Monitoring System)的原理就是通过地基监测网监测航路上飞行的所有飞机视界内的GPS卫星状态,并按照美国航空无线电技术委员会RTCA(Radio Technical Commission for Aeronautics)公布的GPS完好性要求,对不同的飞行阶段给出卫星可用/不可用信息,并利用适当的数据链向飞机发布.

中国民航GRIMS系统包括3部分:地面监测网、主控中心和地空数据链.如图1所示.

地面监测网监视视界内所有GPS卫星的健康状况,当有GPS卫星发生故障或从故障中恢复时,向主控中心发送完好性信息.主控中心计算并预测一段时间(10 min)内全国各地区GPS卫星导航服务的可用/不可用状况;同时,主控中心接收并处理通过飞机通信寻址报告系统ACARS(Aircraft Communication, Addressing and Reporting System)数据链下传的全国民航飞机的起降和位置报文,以此推算全国民航飞机的实时位置,通过ACARS数据链向飞机发送告警信息.

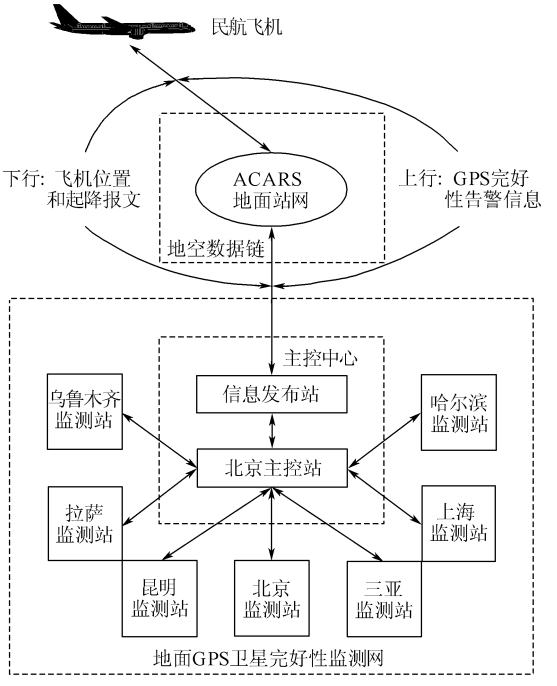


图1 GRIMS系统组成框图

1.1 地面监测网

地面监测网由7个地面监测站、一个主控站和地面通信网络组成(见图2).7个地面监测站分别位于哈尔滨、上海、三亚、昆明、拉萨、乌鲁木齐和北京;主控站位于北京.主控站、监控站系统之间通过民航地面通信网络连通.

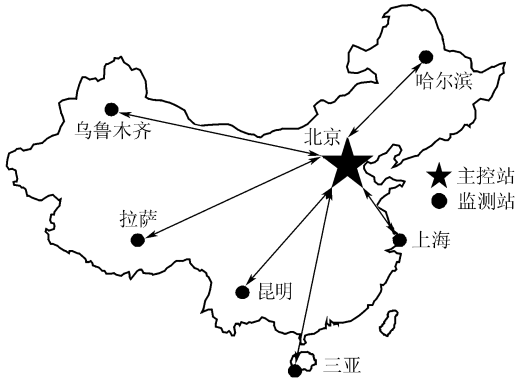


图2 地面监测网站址

为了保证系统的时间同步,在系统设计中采用单向时间同步方法.主控站用GPS授时接收机将主控站的时钟精确地同步到世界协调时UTC(Universal Time Coordinated)时间.各监测站将时钟信息传送到主控站,主控站将各个监测站与主控站时钟进行比对,计算出各监测站与主控站之间的钟差,并将钟差返回到各监测站修正监测站时钟,从而使监测站与主控站统一时钟.主控站向系统内所有其它设备或系统(如信息发布站等)发布校时报,使整个系统时间同步.

1.2 主控中心

地面监测网主控站、信息发布站和ACARS

网络中心均位于主控中心. 地面监测网主控站将 GPS 卫星的可用性信息发送给信息发布站;同时,ACARS 网络中心将接收到的全国民航飞机的起降和位置报文也发送给信息发布站. 信息发布站计算全国范围内的 RAIM 空洞,推测全国民航飞机的实时位置,向所有位于 RAIM 空洞内的飞机发送告警信息.

信息发布站软件系统结构如图 3 所示.

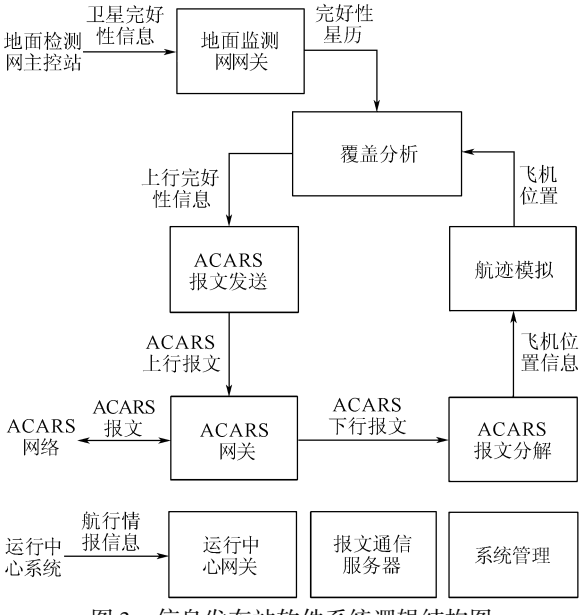


图 3　信息发布站软件系统逻辑结构图

1.3　地空数据链

中国民航已经建立了一个 ACARS 地空数据链网络. ACARS 系统通过一个覆盖全国的甚高频地面站网络与飞机通信.

机载的多功能控制显示单元 MCDU(Multi-function Control Display Unit)可以显示地面上传的文本信息;ACARS 数据通信速率可以满足完好性信息数据的上传要求;主控站输出的卫星完好性信息可以通过民航的通信专线连接到 ACARS 数据链的网控中心. 因此,在不改变飞机的任何设备和飞行程序的情况下,使用 ACARS 数据链上传卫星完好性信息将使飞机驾驶员能尽快地利用 GPS 完好性信息.

2　系统关键技术与算法

2.1　卫星完好性判断算法

GPS 系统的水平位置误差 σ_{Hor} 为:$\sigma_{\mathrm{Hor}}=d_{\mathrm{HDOP}}\times\sigma_{\mathrm{Pr}}$. 其中,$d_{\mathrm{HDOP}}$ 为 GPS 星座的水平几何因子;σ_{Pr} 为伪距测量误差. 由此可见 σ_{Hor} 与 d_{HDOP} 成正比. 因此,必须限定一个最大水平几何因子 $d_{\max}$. 当用户视界内卫星的 $d_{\mathrm{HDOP}}>d_{\max}$ 时,则认为不能用 GPS 进行导航.

每个监测站对视界内的可视卫星的伪距误差 $\Delta\rho$ 进行测量,并按照误差大小排序,即 $\Delta\rho_1>\Delta\rho_2>\Delta\rho_3>\cdots>\Delta\rho_n$. 最坏的情况是用户使用误差为 $\Delta\rho_1$,$\Delta\rho_2$,$\Delta\rho_3$ 和 $\Delta\rho_4$ 的 4 颗卫星来定位. 在 $d_{\mathrm{HDOP}}=d_{\max}$ 的情况下,如果此时定位误差仍不超出其飞行阶段的误差门限,那么便判定所有卫星信号对该飞行阶段可用;反之,为了安全,判定误差为 $\Delta\rho_1$ 的卫星信号不可用. 接下来,判断误差为 $\Delta\rho_2$,$\Delta\rho_3$,$\Delta\rho_4$ 和 $\Delta\rho_5$ 的 4 颗卫星在 $d_{\mathrm{HDOP}}=d_{\max}$ 定位时的 σ_{Hor} 是否超差:如果不超差,则除误差为 $\Delta\rho_1$ 的卫星外的所有卫星可用;反之,如 σ_{Hor} 仍然超差,则判定误差为 $\Delta\rho_2$ 的卫星不可用. 这样进行下去,判定其他所有卫星是否可用,直至卫星数少于 4 颗为止.

这种序列计算在 GAIMS 监测站中每秒完成一次,只有当在连续 3 次计算结果都判定某颗或某些卫星不可用时,才宣布这颗或这些卫星为不可用.

2.2　GPS 卫星运行覆盖区域计算

卫星覆盖区域推测主要功能是根据卫星星历计算所有 GPS 在轨卫星对地面仰角大于 8°的覆盖区域. 该模块以 1 min 为间隔推算卫星覆盖区域,计算未来 10 min 内每个卫星的覆盖区域.

GPS 卫星广播星历的坐标系是世界大地坐标系 WGS-84,星历参数包括开普勒轨道参数、轨道摄动参数和时间参数,根据这些参数可以计算第 k 颗卫星在 WGS-84 坐标系中的坐标.

首先根据星历中给出的轨道长半轴平方根 $\sqrt{A}$ 和平均角速度修正量 Δn 计算平角速度 n:

$$n=\sqrt{\mu}/(\sqrt{A})^3+\Delta n$$

其中,$\mu=3.986\,005\times10^{14}\ \mathrm{m^3/s^2}$,为地球引力常数.

然后根据参考时刻 T_{oe} 的平近点角 M_0 计算观测时刻 t 的平近点角 M_k:

$$M_k=M_0+n\times(t-T_{\mathrm{oe}})$$

按式(1)迭代计算近点角 E_k:

$$M_k=E_k-e\sin E_k \tag{1}$$

其中,e 为卫星轨道偏心率.

然后计算真近点角 v_k 和卫星矢径 r_k:

$$v_k=\arctan\frac{\sqrt{1-e^2}\sin E_k}{\cos E_k-e}$$

$$r_k=(\sqrt{A})^2(1-e\cos E_k)$$

根据星历中给出的近地点角距 ω 计算升交点角距 ϕ_k:

$$\phi_k=v_k+\omega$$

得到卫星在轨道平面内的坐标(x'_k, y'_k):

$$\left.\begin{aligned} x'_k &= r_k\cos\phi_k \\ y'_k &= r_k\sin\phi_k \end{aligned}\right\}$$

再根据星历中给出的准经度Ω_0和赤经变化率$\Delta\Omega$计算改正升交点的经度Ω_k:

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\Delta\Omega - \omega_e)t_k - \omega_e T_{oe}$$

其中,$\omega_e = 7.292\,115\,146\,7\times10^{-5}$ rad/s,为地球自转角速度.

根据星历中给出的轨道倾角变化率Δi计算轨道倾角i_k:

$$i_k = 0.96 + \Delta i \cdot t_k$$

求出卫星在WGS-84坐标系中的坐标(x_k, y_k, z_k)为

$$\left.\begin{aligned} x_k &= x'_k\cos\Omega_k - y'_k\cos i_k\sin\Omega_k \\ y_k &= x'_k\sin\Omega_k + y'_k\cos i_k\cos\Omega_k \\ z_k &= y'_k\sin\Omega_k \end{aligned}\right\}$$

据此可计算卫星星下点位置(x_{sk}, y_{sk}, z_{sk}):

$$\left.\begin{aligned} x_{sk} &= x_k \times R/r_k \\ y_{sk} &= y_k \times R/r_k \\ z_{sk} &= y_k \times R/r_k \end{aligned}\right\}$$

其中,$R = 6\,378\,137$ m为地球椭球长半径.

当仰角下限为δ_0时,卫星的覆盖区域相应的地球中心角β为:

$$\beta = \arccos\left(\frac{R\cos\delta_0}{r_k}\right)$$

若地球上某点与卫星星下点的地心角小于β值,则判定此点在此卫星覆盖区内.

2.3 飞机航迹模拟算法实现

GRIMS系统通过ACARS系统,可以实时接收中国空域内所有飞机的起降和位置报文,以1 min为间隔,实时对未来10 min内飞行中飞机的轨迹进行模拟和预测.

在进行飞行模拟时,不是完全依赖航空公司的当日航班计划,只有当收到飞机的起飞报和落地报后,才开始模拟.每当到达进行航迹模拟的时间间隔(1 min)点,系统会自动对所有飞机的未来10 min的位置进行一次计算.每接收到一份位置报文,将对该航班的模拟航迹进行校正.具体实现见图4.

航迹模拟算法实现过程为:从航班计划表里读取某架航班的当日航班计划,按照其航路信息即可确定此航班必经的导航台,以这些导航台为基准进行推测.收到飞机起飞报,则以其起飞机场位置为起始位置,沿着指向第一个导航台的直线方向,按照飞机飞行速度模拟飞机在未来10 min内的位置;当收到飞机位置报时,立即以实际位置更改当前时间的模拟位置,沿着当前位置指向此时飞机的目的导航台的直线方向,按照飞机速度模拟飞机在未来10 min内的位置;当飞机距离降落机场50 km以内时,飞机受机场导航设备的控制,不再需要卫星导航信息,将停止对此架飞机的模拟,收到落地报后将其从动态飞机列表中删除.

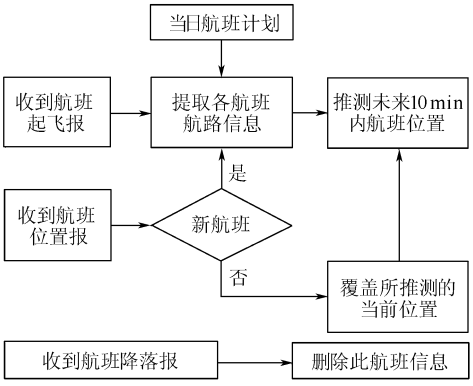


图4 航迹模拟实现过程

经实际运行证明,在没有特殊情况时,如航班的突然改航或由于天气变化引起的绕飞等,按照此算法模拟出的航班位置与实际位置偏差可以忽略.按照整个系统的同步时间,在每个分钟点将中国空域内所有航班的当前位置及未来10 min的位置发给覆盖分析模块.

2.4 卫星导航服务可用/不可用信息计算

由于飞机位置和卫星覆盖区域均是实时变化的,需要计算出受不可用卫星影响的飞机,对其进行告警,实时发送卫星是否完好的信息.

覆盖分析模块每次收到航迹模拟信息时,计算一次每架飞机每个位置点的可见星状态,航迹模拟和卫星轨迹推算都预测未来10 min的情况,所以覆盖分析可以计算出未来10 min内,每架航班的每分钟的卫星覆盖情况,得出处于RAIM空洞范围内的航班.一旦收到卫星故障信息,该模块立即计算该故障卫星的覆盖区域,并求出当前或未来10 min内处于RAIM空洞内的航班,通过ACARS数据链向其发送卫星故障告警信息.当飞机飞出RAIM空洞后,将发送告警解除信息.

3 系统模拟运行

系统分别仿真模拟了27颗、24颗、20颗和16颗GPS卫星运行时,单架飞机或25架飞机飞行,产生RAIM空洞和完好性问题进行报警的情形,从接收到卫星星历数据和飞机位置报文,系统可以在5 s之内完成计算、处理和发送完好性信

息,达到了民航对告警能力的要求.

为了验证系统运行结果,采用 AGI 公司 STK (Satellite Tool Kit)和本系统的程序分别进行计算. 两者的结果是基本一致的,证实了系统设计的正确性.

图 5 显示了分别采用 STK 软件和本系统程序进行可见卫星数目模拟的结果比较,取 2004 年 9 月 1 日 9 点 0 分 0 秒卫星历书数据(24 颗 GPS 卫星)和 5 条航迹数据,比较结果为两者最大时间偏差不超过 5 min.

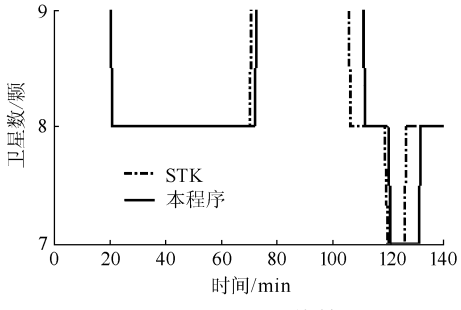


图 5　STK 和 GRIMS 系统结果比对

4　结 束 语

本文首次提出将卫星完好性信息上传飞机显示的具体算法,特别是实现了针对卫星与飞机都在实时运动这种动态情况下的行之有效的实时计算及预测算法. 系统现已初步运行,反映良好. 本系统的建立增强了民航的飞行安全,对中国民航合理、可靠使用卫星导航系统,补充现有导航设备的不足有重要意义.

参考文献 (References)

[1] RTCA DO-208, Minimum Operational Performance Standards for Airborne Supplemental Navigation Equipment Using Global Positioning System (GPS) [S]

[2] FAA TSO-C129a, Airborne Supplemental Navigation Equipment Using the Global Positioning System (GPS) [S]

[3] FAA E-2892b, Specification for the Wide Area Augmentation System (WAAS) [S]

[4] RTCA DO-246B, GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Signal-in-space Interface Control Document (ICD) [S]

[5] 过静珺, 卢建刚. 欧洲伽利略导航系统的发展[J]. 测绘通报, 2002(2): 51-52
Guo Jingjun, Lu Jiangang. The development of Galileo system [J]. Journal of Survey, 2002(2):51-52(in Chinese)

[6] Young C Lee. Receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) capability for sole-means GPS navigation in the oceanic phase of flight [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1992, 7(5):29-36

[7] Pieter Bastiaan Ober. Integrity prediction and monitoring of navigation systems[M]. Leiden: Integricom Publishers, 2003

(责任编辑:彭　徽)

(上接第 796 页)

[3] 石晓荣,张明廉. 一种基于混沌神经网络的拟人智能控制方法[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(9):889-892
Shi Xiaorong, Zhang Minglian. Human-imitating control based on chaotic neural networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004,30(9):889-892(in Chinese)

[4] 司昌龙,张明廉. 一种拟人智能控制的控制律定量方法[J]. 系统仿真学报,2004, 16(3):381-383
Si Changlong, Zhang Minglian. A method of quantifying the qualitative control law of human-imitating intelligent control[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(3):381-384(in Chinese)

[5] Hassan K K. Nonlinear systems[M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002

[6] Krstic M, Sun J, Kokotovic P V. Robust control of nonlinear systems with input unmodeled dynamics[J]. Automatic Control, 1996, 41(6):913-920

[7] Sepulchre R, Jankovic M, Kokotovic P V. Constructive nonlinear control[M]. London: Springer, 1997

[8] 杨亚炜. 基于物理模型的拟人智能控制理论研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,1999
Yang Yawei. Research on personified intelligent control based on physical model[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999(in Chinese)

[9] 司昌龙. 拟人智能控制及控制律转化研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2003
Si Changlong. Research on human-imitating intelligent control and the control law quantifying[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)