

一种面向通用航空的基于飞行运动阵列的导航位置算法

丛 超

(安徽华明航空电子系统有限公司, 安徽 芜湖 241000)

✉chao_cong@huaminavic.com



摘 要: 目前, 提高导航精度的策略主要从信号源的角度出发展开分析, 多数研究没有考虑在不更改硬件设计的前提下, 仅从算法优化的角度提高导航精度。本文以不改变飞机原有导航系统硬件结构, 利用优化算法的方式提高导航精度为目标进行研究, 提出一种面向通用航空的基于飞行运动阵列的导航位置算法。该算法可以在不增加硬件成本的前提下, 进一步提高导航位置精度, 满足对成本敏感的通用航空类飞机需求, 尤其适合成本低廉的轻型运动类飞机。本文所述算法在首台国产综合航电产品CR9中得到应用与验证, 可以达到研究目标。

关键词: 导航精度; 通用航空; 轻型运动类飞机; 位置; 算法优化

中图分类号: TP273.2 **文献标识码:** A

A Navigation Position Algorithm based on Flight Motion Array for General Aviation

CONG Chao

(Anhui Huamin Avionics System Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

✉chao_cong@huaminavic.com

Abstract: The current strategies for improving navigation accuracy are mainly analyzed from the perspective of signal sources. Most studies do not consider improving navigation accuracy only from the perspective of algorithm optimization without changing the hardware design. This paper proposes a navigation position algorithm based on flight motion array for general aviation, aiming to improve the navigation accuracy by using optimization algorithms without changing the hardware structure of the aircraft's original navigation system. It can further improve the navigation position accuracy without increasing the hardware cost, and meet the needs of cost-sensitive general aviation aircraft, especially suitable for low-cost light sport aircrafts. The proposed algorithm has been applied and verified in the first domestic integrated avionics product CR9, and results show that it can achieve the research goal.

Keywords: navigation accuracy; general aviation; light sport aircraft; position; algorithm optimization

1 引言(Introduction)

飞机导航精度要求不断提高, 国内外学者为此提出不少方法, 如用惯导和卫星导航组合^[1-3]、GPS/INS组合^[4]、GPS和eLoran组合^[5]来提高导航精度, 还有基于图像识别技术^[6], 依靠优化传感器的方法^[7]提高导航精度等。但上述方法势必增加飞机的研制成本, 对通用航空而言, 更希望在不增加成本的前提下提高导航精度。

据预测, 中国通用航空飞机数量在未来将达到7,000架^[8], 但相关电子产品主要依赖进口, 国产化产品研发处于起步阶

段^[9]。轻型运动类飞机(LSA)是通用飞机中结构最简单、成本最低廉的一类飞机, 其设计的关键之一是降低飞机研制成本。本文介绍了一种基于飞行阵列的单卫星信号源的导航位置算法, 在不增加硬件成本前提下, 提高了导航精度, 实现了用相对较低的成本获得相对较高导航精度的目的。

2 导航算法简介(Introduction of navigation algorithm)

导航位置是由用纬度、经度和高度组成的球面坐标系表示的, 高度由大气数据得出, 本文主要讨论纬度和经度的计

算。基于飞行阵列的单卫星信号源的导航位置算法主要分为导航位置计算、位置数据修正两部分。

3 导航位置计算(Navigation position calculation)

第一次采集到GPS信号时，导航数据初始化为GPS发布的位置和速度数据。当前位置以前一次输出的位置为基准，依靠飞机纵向、横向加速度和两次数据更新之间的时间差来计算。

(1)纵向加速度的计算。用最后两次连续的GPS更新时的地面速度来计算飞机总的加速度。

$$a_{lon} = \frac{V_{GS,GPS}(m) - V_{GS,GPS}(m-1)}{T_{GPS}(m) - T_{GPS}(m-1)} \quad (1)$$

其中， a_{lon} 为纵向加速度， $V_{GS,GPS}(m)$ 和 $V_{GS,GPS}(m-1)$ 分别代表在 $T_{GPS}(m)$ 和 $T_{GPS}(m-1)$ 时间点收到的最近两次连续更新的GPS的地面速度。

(2)横向加速度的计算。假设飞机的倾斜是造成横向加速度的唯一因素，如图1所示。

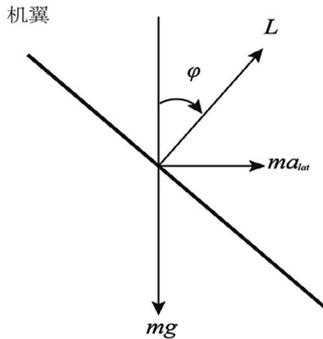


图1 横向加速度力矢量图

Fig.1 Vector diagram of lateral acceleration force

其中， L 为升力， m 为质量， ϕ 为倾斜角， g 为重力加速度， a_{lat} 为横向加速度。可得：

$$a_{lat} = g \tan(\phi) \quad (2)$$

(3)北向、东向加速度分量计算。飞机水平运动的速度、加速度和真航向的几何结构如图2所示。

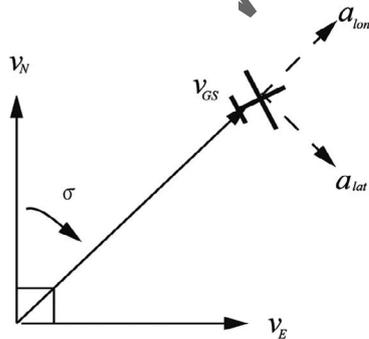


图2 水平运动的几何结构

Fig.2 Geometry of horizontal motion

加速度东、北分量为横向和纵向加速度北、东分量之和，结合公式(2)，可得：

$$a_N = \frac{a_{lon} \times v_N - g \times \tan(\phi) \times v_E}{V_{GS}} \quad (3)$$

$$a_E = \frac{a_{lon} \times v_E - g \times \tan(\phi) \times v_N}{V_{GS}} \quad (4)$$

其中， V_{GS} 为地速， v_N 为地速北分量， v_E 为地速东分量， a_E 、 a_N 为加速度东、北分量。

(4)经、纬度的计算。将笛卡尔坐标系初始化在前一次输出的位置，则北、东方向位移计算公式为：

$$D_N = \left(v_N + \frac{1}{2} \times a_N \times \Delta t \right) \times \Delta t \quad (5)$$

$$D_E = \left(v_E + \frac{1}{2} \times a_E \times \Delta t \right) \times \Delta t \quad (6)$$

其中， Δt 为上一时间步到现在的时间差，方位角计算公式为：

$$\sigma = \tan^{-1} \left(\frac{D_E}{D_N} \right) \quad (7)$$

利用前一次输出位置的经、纬度和公式(5)—公式(7)计算出当前位置数据。

4 位置数据修正(Position data correction)

由于系统软、硬件的固有缺陷及信号传输等原因，GPS信号从接收到使用的过程中必然存在一定的时间延迟，所以导航计算的当前位置并不是GPS定位时的飞机位置，因此导航算法要在接收到GPS数据后进行位置数据修正。

引入运动阵列机制用于记录飞机的运动状态。具体来说就是一个数组(以下称“阵列数组”)，其中存储了运动状态数据(速度、位置)和时间步长(导航服务器两次输出之间的时间差)。阵列数组的大小是固定的，GPS的时间延迟一般不超过1s，导航服务器的采集频率为10 Hz，那么阵列数组大小即为10，如表1所示。

表1 运动阵列数组

Tab.1 Motion array array

数组索引	0	1	...	L-2	L-1	L
运动状态	$X(n-L+1)$	$X(n-L+2)$...	$X(n-1)$	$X(n)$	$X(n-L)$

表1中， $X(n)$ 为当前的运动状态， $X(n-L)$ 为最早的运动状态。每个时间步结束时，运动状态存储在数组中。数组记录满后，索引从0开始重复滚动记录。

导航服务器输出位置时将飞机当前的运动状态记录在数组中。GPS定位的时间不太可能正好落在阵列数组的时间点上，更可能在两个记录点之间的某个时间点上，如图3所示。

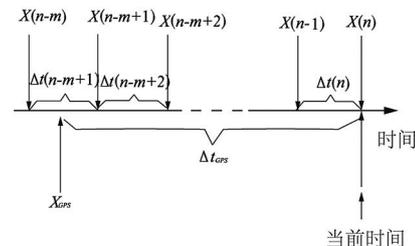


图3 GPS定位时间和数组时间示意图

Fig.3 Diagram of GPS positioning time and array time

图3中， $\Delta t(n)$ 为当前时间步， Δt_{GPS} 为GPS时间延迟， $X(n)$ 为当前运动状态， X_{GPS} 为GPS定位时计算的运动状态。

导航服务器第一次采集到GPS信号之后到第二次采集到GPS信号之前的时间段，阵列数组中的位置和速度数据初始化

为GPS发布的位置和速度数据；导航服务器第二次采集到GPS数据之后至整个导航服务生命周期截止的时间内，导航位置算法的具体实现如下。

4.1 纠正系数计算

(1)计算GPS定位时间的位置。通过比较时间步长和GPS时间延迟，确定GPS定位时间前、后元素。图3中存储 $X(n-m)$ 的元素出现在GPS定位之前，称为下限；而存储 $X(n-m+1)$ 的元素出现在GPS定位之后，称为上限。利用下限与GPS延时之差，计算出线性插值比 λ ：

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \Delta t(n-i) - \Delta t_{GPS}}{\Delta t(n-m+1)} \quad (8)$$

GPS定位时对应的阵列数组中的运动状态可计算如下：

$$X_{GPS} = (1-\lambda) \times X(n-m) + \lambda \times X(n-m+1) \quad (9)$$

(2)以插值位置为中心建立笛卡尔坐标系，将位置的距离和方位转换位移：

$$\Delta N = R \cos(\sigma) \quad (10)$$

$$\Delta E = R \sin(\sigma) \quad (11)$$

其中， R 和 σ 是GPS定位时间插入位置与定位位置之间的距离和方位角， ΔN 和 ΔE 是北、东向位移。

(3)速度差计算如下：

$$\Delta V_N = V_{N,GPS} - V_{N,int} \quad (12)$$

$$\Delta V_E = V_{E,GPS} - V_{E,int} \quad (13)$$

其中， $V_{N,GPS}$ 、 $V_{E,GPS}$ 是GPS定位数据的北、东向速度分量， $V_{N,int}$ 、 $V_{E,int}$ 是插入点的北、东向速度分量。

4.2 校正项的计算和应用

计算GPS数据与阵列数组中与之对应的存储数据之间差值(以下称“校正项”)。校正项用于从上限到最后一个元素 $(n-1)$ 之间的所有元素的修正。

(1)使用平滑系数计算位置和速度的校正项。校正项由时间相关分量和时间无关分量组成。

时间无关校正项：

$$\delta N = K_{XX} \times \Delta N \quad (14)$$

$$\delta E = K_{XX} \times \Delta E \quad (15)$$

$$\delta V_N = K_{VV} \times \Delta N \quad (16)$$

$$\delta V_E = K_{VV} \times \Delta E \quad (17)$$

时间相关校正项：

$$\delta \dot{N} = K_{XV} \times \Delta V_N \quad (18)$$

$$\delta \dot{E} = K_{XV} \times \Delta V_E \quad (19)$$

其中，平滑系数使用以下值：

$$\begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XV} \\ K_{VX} & K_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.9 \\ 0 & 0.9 \end{bmatrix} \quad (20)$$

(2)将最终位移转换为距离和方位角校正。对于表示 $(n-j)$ 次运动状态的元素：

$$\delta t(n-j) = \Delta t_{GPS} - \sum_{i=0}^{j-1} \Delta t(n-i) \quad (21)$$

$$\delta N(n-j) = \delta N + \delta \dot{N} \times \delta t(n-j) \quad (22)$$

$$\delta E(n-j) = \delta E + \delta \dot{E} \times \delta t(n-j) \quad (23)$$

$$D = \sqrt{\delta N(n-j)^2 + \delta E(n-j)^2} \quad (24)$$

$$\sigma = \tan^{-1} \left(\frac{\delta E(n-j)}{\delta N(n-j)} \right) \quad (25)$$

(3)速度的校正计算：

$$V_N(n-j) = V_N(n-j) + \delta V_N \quad (26)$$

$$V_E(n-j) = V_E(n-j) + \delta V_E \quad (27)$$

(4)执行校正循环，更新传播的位置和速度。

5 结论(Conclusion)

要加快发展航空制造业，推动通用航空产业发展，在技术方面应优先研制相对简单的通用航空器^[10]。本文以通航领域中最简单的LSA型飞机为主要适用机型，研究了一种不增加飞机硬件成本，依靠算法提高导航精度的策略。算法包含两个部分，第一部分是当前飞机位置的计算，第二部分是位置数据的自我修正。本文所述策略在国产首个航电系统产品CR9中得到应用与验证，可以达到研究目标。

参考文献(References)

- [1] 冯晓彬,王永,王磊.基于数据模拟的惯性卫星组合导航系统测试[J].电子测试,2020(11):76-78.
- [2] 王树森,张鹏,李孟委.基于ARM的SINS/GNSS紧组合导航系统设计[J].中北大学学报(自然科学版),2020,41(04):366-371.
- [3] NIKOLAY N S, VYACHESLAV F G, SERGEY V M. Application of modified ellipsoidal filter in integrated strapdown inertial navigation system[J]. Journal of Automation and Information Sciences, 2018, 50(4):35-53.
- [4] MALEK K, MOHAMED T. An efficient ultra-tight GPS/RISS integrated system for challenging navigation environments[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10):3613.
- [5] TAE H F, YOUNGKI K, SUL G P, et al. GPS and eLoran integrated navigation for marine applications using augmented measurement equation based on range domain[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020(prepublish):1-11.
- [6] 李高杰.基于图像识别的无人机导航系统设计[J].农机化研究,2021,43(01):114-118.
- [7] YASSER M M, EISAYED A E, NOUR E H I, et al. Investigation and realisation of integrated navigation system using optimal pseudo sensor enhancement method[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2019, 13(5): 839-849.
- [8] 李心明.解读我国通用航空产业应用现状[J].环球市场,2018(13):16.
- [9] 李晨.通用航空制造的必经之路[J].交通建设与管理,2020(3): 58-59.
- [10] 李晰睿.我国通用航空发展现状与对策研究[J].中国民航飞行学院学报,2020,31(1):25-28.

作者简介：

丛超(1982-),男,硕士,工程师.研究领域:飞行管理系统FMS,导航系统.