

基于 SAR 辅助的 INS/Doppler 组合导航系统研究*

彭广林, 吴训忠, 刁 鹏

(空军工程大学工程学院, 西安 710038)

摘 要: INS/Doppler 组合导航系统具有输出水平速度误差和平台角误差较小的优点, 但经纬度误差仍随时间增大, 故不能作为独立的精确导航定位系统; 由于合成孔径雷达(SAR)能够提供高精度的经纬度和航向信息, 文中对基于 SAR 辅助的 INS/Doppler 组合导航系统进行了研究。仿真结果表明, 该系统导航定位精度高、自主性强, 比较适用于对导航精度要求较高的大型飞机。

关键词: 合成孔径雷达; 惯性/多普勒组合导航; 数学仿真

中图分类号: V249.328 **文献标志码:** A

The Study on INS/Doppler Integrated Navigation System Based on the Assistance of SAR

PENG Guanglin, WU Xunzhong, DIAO Peng

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: INS/Doppler integrated navigation system has the advantages of less level velocity errors and platform angles errors, but its longitude and latitude errors will increase with time. So it can not be used as an independent rigorous navigation positioning system. Because SAR can output the precise information of level position and heading angle, the INS/Doppler integrated navigation system based on the assistance of SAR has been discussed. The simulation results show that the system can achieve high precision position, and it can be used in the big airplane which needs the high precision of navigation position.

Keywords: synthetic aperture radar; INS/Doppler integrated navigation; mathematical simulation

0 引言

INS/Doppler 组合导航系统利用多普勒雷达测出的地速与惯导系统进行速度综合, 能有效提高导航精度。由于它是一种速度综合, 只能减小位置误差随时间增长的速度, 并不能改变位置误差随时间增长的基本性质^[1]。因此, 为提高位置精度, 需要进行位置组合。

合成孔径雷达(SAR, synthetic aperture radar)可以在能见度极差的气象条件下获得类似于光学照相的极高分辨率的地面目标图像, 把即时获得的雷达图像信息与机载数字地图或影像信息进行比较和辨识, 即可准确地确定载体所处的即时位置^[2,4]。

基于以上两点, 文中对 SAR 辅助的 INS/Doppler 组合导航系统进行了研究。通过分析组合系统的特性, 建立了状态方程和量测方程, 并进行了数学仿真。仿真结果表明该系统能实现高精度的导航定位。

1 合成孔径雷达

SAR 是一种主动式微波成像雷达。它能提供高分辨率图像, 在军事领域中有着广泛的应用和发展前景。首先, 它的全天候、高分辨率及侧视等方面的优点使它成为战场和战术侦察方面的有力工具; 其次, 它可以作为引导设备的显示装置, 引导高速投掷武器轰击敌方目标; 再者, 利用 SAR 图像信息可以得到载体的即时位置,

* 收稿日期: 2008-01-14

作者简介: 彭广林(1983-), 男, 河南商水人, 硕士研究生, 研究方向: 惯性导航与组合导航。

SAR 与 INS 进行组合,能够获得与 GPS 军用 P 码一样的水平定位精度^[2-4]。鉴于其广泛和实际的应用前景,SAR 在雷达、遥感、导航及众多学科领域已受到关注,是目前研究热点之一。

SAR 成像处理过程实际上就是 SAR 信号的距离向和方位向的聚焦过程,过程中要求载体保持匀速直线的平移飞行。而载体偏离航向的非直线运动以及绕 3 个坐标轴的偏航、俯仰、横滚角运动都会引入相位误差,造成回波多普勒信号畸变,影响成像质量^[4-5]。因此,为提高 SAR 图像质量,必须进行运动补偿,这也是 SAR 系统中最为关键的核心技术。

2 系统建模与仿真

基于 SAR 辅助的 INS/Doppler 组合导航系统原理如图 1 所示。由 SAR 向 INS/Doppler 组合系统提供高精度的水平位置和航向信息,经修正后的 INS/Doppler 系统能够获得高精度的导航信息。然后利用该信息对 SAR 进行运动补偿和视区定位参数计算,以提高 SAR 成像质量。通过二者互补,实现高精度的导航定位。

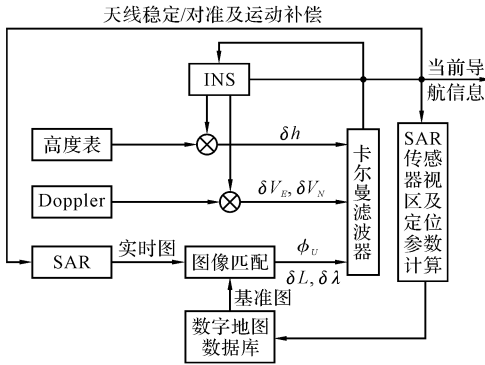


图 1 SAR 辅助的 INS/Doppler 组合系统原理框图

2.1 系统状态方程

由于 SAR 图像与数字地图匹配时只能提供水平位置和航向信息,惯导系统的垂直通道也是不稳定的,而多普勒雷达提供的垂直速度精度又很低,因此采用气压高度表提供垂直通道信息。惯导系统的误差状态取 3 个平台误差角、3 个水平速度误差、3 个位置误差和 3 个陀螺误差定义为常值漂移和白噪声,3 个加速度计误差定义为零偏和白噪声。

多普勒雷达的误差状态,考虑为测速误差、

刻度系数误差和偏流角误差。分别取下列数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \delta\dot{V}_d &= -\beta_d \delta V_d + \xi_d \\ \dot{\Delta} &= -\beta_\Delta \Delta + \xi_\Delta \\ \delta\dot{K} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

可得系统的状态方程为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t)$$

其中:

$$\mathbf{X} = [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \epsilon_{bx}, \epsilon_{by}, \epsilon_{bz}, \mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y, \mathbf{V}_z, \delta K, \Delta, \delta V_D]^T$$

2.2 系统量测方程

系统的量测值可以分为三部分。一部分取惯导系统输出的速度与多普勒雷达测出的速度之差作为量测值。量测方程为:

$$\left. \begin{aligned} Z_E &= -\delta V_E + V_N \phi_U + V_N \Delta + V_E \delta K + \\ &\quad \delta V_D \sin \phi_v + \eta_E \\ Z_N &= \delta V_N + V_E \phi_U + V_E \Delta - V_N \delta K - \\ &\quad \delta V_D \cos \phi_v + \eta_N \end{aligned} \right\}$$

表示为:

$$\mathbf{Z}_1(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & V_N & -1 & 0 & & V_E & V_N & \sin \phi_v \\ 0 & 0 & V_E & 0 & 1 & \mathbf{0}_{2 \times 10} & -V_N & V_E & -\cos \phi_v \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}(t) + \begin{bmatrix} \eta_E \\ \eta_N \end{bmatrix}$$

第二部分取水平方向的量测值,由 INS 输出的航向角和经纬度与 SAR 图像匹配给出的航向角和经纬度的差值构成。

$$\mathbf{Z}_2(t) = \begin{bmatrix} \phi_I - \phi_s \\ (L_I - L_s) R_M \\ (\lambda_I - \lambda_s) R_N \cos L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_U \\ R_M \delta L \\ R_N \cos L \delta \lambda \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} V_\phi \\ V_L \\ V_\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0}_{3 \times 2} & 0 & 0 & 0 & 0 & R_M & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_N \cos L \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}(t) + \begin{bmatrix} V_\phi \\ V_L \\ V_\lambda \end{bmatrix}$$

第三部分取垂直方向的测量值,由 INS 和气压高度表输出的高度之差构成。

$$\mathbf{Z}_3(t) = [h_1 - h_r] = \delta h + V_h = [\mathbf{0}_{1 \times 8} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{1 \times 9}] \mathbf{X}(t) + V_h$$

综合以上三式,可得系统的量测方程为:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t)$$

其中: $Z(t) = \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \\ Z_3(t) \end{bmatrix}; H(t) = \begin{bmatrix} H_1(t) \\ H_2(t) \\ H_3(t) \end{bmatrix}$

$V(t) = [\eta_E \quad \eta_N \quad V_\psi \quad V_L \quad V_\lambda \quad V_h]^T$

$V(t)$ 中的元素为互不相关的测量白噪声。

状态方程和量测方程离散化得:

$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1}$

$Z_k = H_k X_k + V_k$

式中: $\Phi_{k,k-1} = \sum_{n=0}^{\infty} [F(t_k) T]^n / n!$;

$\Gamma_{k-1} = \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{n!} (F(t_k) T)^n \right] G(t_k) T \right\}$;

T 为迭代周期。

滤波器采用集中式闭环卡尔曼滤波。

2.3 仿真结果

假设飞机作机动飞行,包含滑跑、爬升、平飞、加速、转弯等飞行状态。飞行轨迹如图 2 所示。初始位置为北纬 34°,东经 109°,高度 0m;陀螺常值漂移为 0.1°/h,陀螺白噪声为 0.01°/h;加速度计零偏为 10⁻⁴g(g 为重力加速度),加速度计白噪声为 2.5×10⁻⁴g。

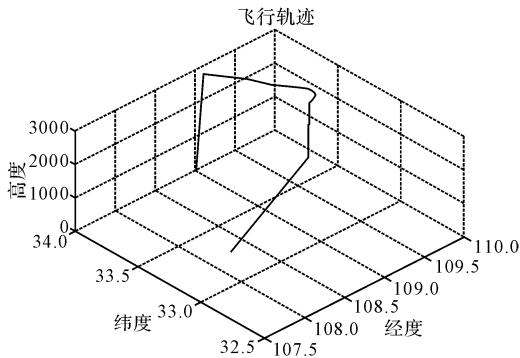


图 2 飞行轨迹

设 SAR 图像匹配定位的精度为位置误差,为 30m,航向角误差为 40";气压高度表输出的高度误差为 30m;Doppler 的速度测量误差为 0.1m/s;仿真时间为 1000s。

下面分别给出两种组合导航系统输出导航参数与飞行轨迹对应参数的误差曲线(其中 A 代表 INS/Doppler 组合系统,B 代表 SAR 辅助的 INS/Doppler 组合导航系统),两个系统都有高度表提供垂直通道信息。

由图 3 可以看出,A 系统的经纬度误差呈现

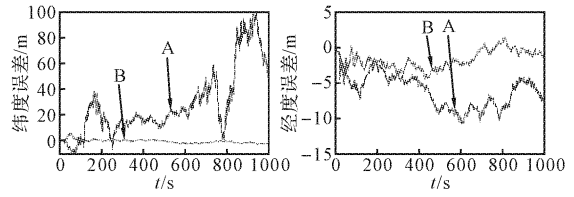


图 3 经纬度误差曲线

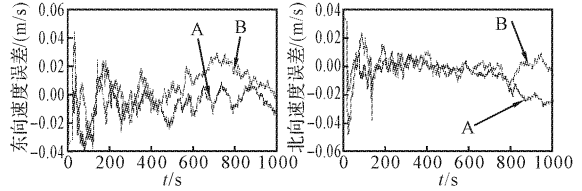


图 4 速度误差曲线

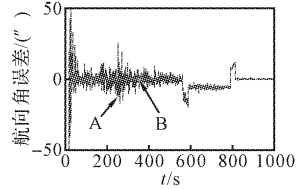


图 5 航向角误差曲线

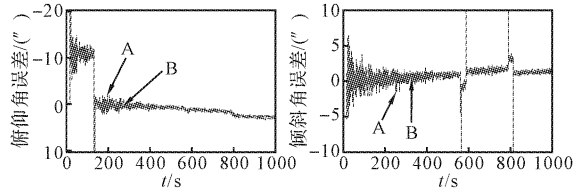


图 6 俯仰角和倾斜角误差曲线

缓慢增长趋势,这是由于该系统是速度综合,只能减小位置误差随时间增长的速度,并不能改变位置误差随时间增长的基本性质^[1]。而 SAR 通过图像匹配能够获得载体高精度的水平位置信息,所以 B 系统的水平定位精度很高,在 5m 以内,这是 A 系统无法达到的。从图 4 可以看出,由于两系统都有 Doppler 提供载体的地速,所以二者的速度误差相差不大,从而也反映出 SAR 提供的信息对位置的校正是第一位的,其次才是对速度精度的提高^[6]。从姿态误差曲线可以看出,在转弯阶段航向误差和倾斜误差有所增加,在爬升阶段俯仰角误差有所增大,而整体姿态误差较小。这是由于在位置速度组合时,平台误差角的观测能力通过重力耦合在速度误差方程中,可以提高平台误差角的观测力。在 B 系统中,SAR 图像匹配时能够直接提供 INS 的航向误差信息作为观测量,所以航向角误差比辅助前有较大改观。

3 结论

从仿真结果可以看出, SAR 辅助的 INS/Doppler 组合导航系统能提供高精度的位置、速度和姿态信息,降低对 INS 精度和成本的要求。SAR 除了上述功能外,还具有防区外探测能力、穿透性的观察视场以及目标的识别和跟踪功能。另外多普勒雷达波束很窄,且以很陡的角度指向地面,所以很难对其实施欺骗和干扰^[7],因而隐蔽性和抗干扰性好。鉴于该系统为双雷达体制,安装时对载体体积要求高,因此该系统在对导航精度要求过高、需要实现目标识别和跟踪等功能的大型飞机上有着很大的应用前景。

参考文献:

- [1] 袁信,俞济祥,陈哲. 导航系统[M]. 北京:航空工业出版社,1993:228-232.

(上接第 76 页)

超调量、上升时间和调节时间与 NCD 法、ACO 算法相比均得到了不同程度的改善,具有良好的控制系统指标。

4 结论

遗传算法作为一种自适应全局优化概率搜索算法,在最优化问题的求解中取得了良好的效果。蚁群算法作为一类模拟生物群体突现聚集行为的非经典算法,已成为近年来研究的热点。文中将遗传算法融入蚁群算法,提出了 ACO-GA 混合优化策略,利用遗传算法的选择、交叉和变异操作指导蚁群系统的信息素更新,增强了全局和局部搜索的能力,通过 PID 控制器参数整定实验表明,混合优化策略利用整数编码,实现简单,对参数的敏感性低,并具有更快的收敛速度和更高的效率以及全局收敛性,是一种适用于工程应用的参数寻优方法。

- [2] 冷雪飞,刘建业,熊智. 合成孔径雷达在导航系统中的应用[J]. 传感器技术,2004,23(10):4-7.
- [3] 邹维宝,任思聪,李志林. 合成孔径雷达在飞行器组合导航系统中的应用[J]. 航天控制,2002(1):71-81.
- [4] 高社生,李华星. INS/SAR 组合导航定位技术与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004.
- [5] 郑波浪. 机载高分辨率合成孔径雷达运动补偿研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.
- [6] 安东,董光明,任思聪. INS/SAR 组合导航系统的原理及其性能研究[J]. 西北工业大学学报,1997,15(4):586-591.
- [7] 干国强. 导航与定位:现代战争的北斗星[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [8] 秦永远,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998:33-35.

参考文献:

- [1] Dorigo M. Optimization, learning and nature algorithms[D]. Department of Electronics, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [2] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Trans. Evol. Comp, 1997(1):53-66.
- [3] Dorigo M. ACO algorithms for the traveling salesman problem[M]. John Wiley & Sons, 1999.
- [4] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [5] 何克忠. 计算机控制系统[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [6] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 刘兴堂,吴晓燕. 现代系统建模与仿真系统[M]. 西安:西北工业大学出版社,2001.