

技术交流

航空光电平台目标定位自适应卡尔曼滤波方法的应用研究^{*}

宋悦铭, 刘晶红, 沈宏海, 戴明, 谭力刚

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

[摘要] 针对航空光电平台目标定位的标准卡尔曼滤波方法易发散的缺点, 提出一种改进型 Sage自适应卡尔曼滤波方法。该方法适用于空中运动载体对地面动态目标的定位, 数值滤波稳定性好, 精度高, 克服了标准卡尔曼滤波方法易发散的缺点。

[关键词] 目标定位; 坐标转换; 卡尔曼滤波; 自适应

[中图分类号] V 249.32⁺ 3

[文献标识码] A

[文章编号] 1003-5451(2011)01-0047-04

Application Research of Aircraft Photoelectric Platform Target Location by Self-adaptation Kalman Filter

SONG Yue-ming LU Jing-hong SHENG HONG-hai et al

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033)

[Abstract] Aiming at divergence of standard Kalman filter method for aircraft photoelectric platform target location, a kind of improved Sage self-adaptation Kalman filter method was presented. The method is used by dynamic target location on ground to aerial moving carriers. Its numerical filter was stabilization and high-precision and overcame the divergence of standard Kalman filter method. The method had fast convergence and good self-adaptation. The method proved had higher precision than standard Kalman filter by semi-physical simulation.

[Keywords] target location; coordinates transformation; Kalman filter; self-adaptation

1 引言

随着全球定位系统 (GPS) 技术、地理信息系统 (GIS) 技术和计算机技术的发展, 我们不再满足于航空光电侦察系统探测到的目标在测量坐标系下的信息, 而是希望经过一定的坐标变换将此信息转换到指定的 WGS-84 坐标系或北京 54 坐标系, 将目标定位在需要的电子地图上, 从而可以获得目标环境信息, 为决策者提供目标更丰富的地理信息。

在文献^[2]中研究了航空光电平台侦察目标在 WGS-84 坐标系电子地图上定位的方法。即已知目标的三维坐标 (距离、方位、俯仰), 和载机的 GPS 信息及姿态角, 通过一系列齐次坐标变换求出目标的经纬度和大地高程。此方法在各参数相对准确的情况下有较高的精度, 但在实际的飞行中, 各参数均有不同程度的误差, 尤其在对运动目标进行定位时载机 GPS 信息和姿态角的偏差对最终的定位结果影响较大, 使得估算出的目标坐标和真实值之间存在一定误差。

本文通过应用运动目标当前统计模型, 取三轴

^{*} 国家高技术研究发展计划 (2008AA121803)

运动的位置和速度为观测量建立目标动态定位模型,从而增加了系统的可观测性和定位测算精度。此外,针对传统标准卡尔曼滤波法在动态滤波方面的不足进行了分析,提出了改进型的自适应卡尔曼滤波法。该方法在递推和滤波过程中不断地修正模型参数,始终保持状态噪声统计量和观测噪声统计量接近于真实模型,从而避免了标准卡尔曼滤波法中因建模不准确可能导致的滤波发散等问题,较好地解决了目标动态定位中状态变量维数与滤波快速性之间的矛盾,以及状态噪声和观测噪声建模不准确和时变的问题。

2 目标定位的空间坐标转换方法

为了建立测量方程,首先建立坐标系,然后按照各坐标系间的关系建立坐标系间的转换方程,最后综合各个转换方程就可得到目标测量方程。由于在试验的装置配备中,是将惯导系统直接安装在光电平台上,并且为了简化运算,在这里我们忽略了基座坐标系及其后面的坐标转换过程,这样就得到了下面4个坐标系。

2.1 坐标系的定义

大地坐标系 $C(O_c - X_c Y_c Z_c)$

原点在地球质心, Z_c 轴指向地球北极, X_c 轴由原点指向格林尼治平子午面与地球赤道交点, Y_c 轴垂直于 $X_c O_c Z_c$ 平面并与 Z_c 轴, X_c 轴构成右手坐标系。在大地坐标系中任一点的坐标表示为: (B, L, H) , 分别表示这点的纬度、经度和大地高。

大地直角坐标系 $G(O_g - X_g Y_g Z_g)$

大地直角坐标系于大地坐标系完全重合。在大地直角坐标系中任一点的坐标表示为: (x_g, y_g, z_g) 。

地理坐标系 $S(O_s - X_s Y_s Z_s)$

原点是某一时刻载机所处的位置 (x_s, y_s, h_s) , Z_s 是正北方向, X_s 指向天顶, Y_s 与 Z_s, X_s 构成右手坐标系。在地理坐标系中任一点的坐标表示为: (x_s, y_s, z_s) 。

载机坐标系 $A(O_p - X_p Y_p Z_p)$

原点与地理坐标系的原点重合,当载机坐标系相对地理坐标系的三轴姿态角为零时,其三轴指向与地理坐标系三轴指向重合。设 $\alpha_{ps}, \beta_{ps}, \gamma_{ps}$ 为三轴姿态角,分别是绕 Y_p (俯仰), Z_p (横滚), X_p (偏航) 的转角。在载机坐标系中任一点的坐标表示为: (x_p, y_p, z_p) 。

2.2 定位过程中的坐标转换

定位过程,即已知目标相对载机坐标系的位置 (x_p, y_p, z_p, R) , α 是俯仰角, β 是方位角, R 是斜距。求解目标大地坐标 (B, L, H) 的过程。

(1) 求出目标在载机坐标系中的坐标 (X_p, Y_p, Z_p)

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ R \cos(\alpha) \sin(\beta) \\ R \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 然后参照文献^[3]对各坐标系之间转换矩阵的定义,进行坐标变换求出目标大地直角坐标系中的坐标 (X_g, Y_g, Z_g)

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \\ 1 \end{bmatrix} = (Q_6 Q_5 Q_4 Q_3 Q_2 Q_1)^{-1} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(3) 进行大地空间直角坐标系到大地坐标系的转换

$$L = \arctan\left(\frac{Y_g}{X_g}\right) \quad (3)$$

$$\tan u = \frac{bZ_g}{ar} \left(1 + e^2 \frac{b}{R}\right) \quad (4)$$

$$B = \arctan\left(\frac{Z_g + e^2 b \sin^3(u)}{r - e^2 a \cos^3(u)}\right) \quad (5)$$

$$H = r \cos(B) + Z_g \sin(B) - a \sqrt{1 - e^2 a \cos^3(u)} \quad (6)$$

$$r^2 = X_g^2 + Y_g^2 \quad (7)$$

$$R^2 = X_g^2 + Y_g^2 + Z_g^2 \quad (8)$$

通过以上几个公式的计算即可由目标的载机坐标求得目标的大地坐标值 (B, L, H) 。

3 运动目标位置的标准卡尔曼滤波系统数学模型

因为航空光电侦察平台一般从几千米高空侦察地面运动的目标,考虑到目标移动的速度以及飞机的速高比不是很大,可以将运动目标空间三维的直线运动情况简单等效为在三个轴向上做匀速运动。应用当前统计模型,目标的运动状态方程如下:

$$X(k) = A(k)X(k-1) + B(k)U(k) + W(k) \quad (9)$$

目标的运动状态向量 $X = [x, x, y, y, z, z]$, 其中状态变量 x_b, x 及 y_b, y 和 z_b, z 分别为运动目标的纬度和南北方向的速度,经度和东西方向的速度,大地高程和垂直方向的速度。当系统没有控制量时, $B(k) = 0$ A

$(k) = [1 T, 0 0 0 0 0 1, 0 0 0 0 0 1 T, 0 0 0 0 0 1, 0 0 0 0 0 1 T, 0 0 0 0 0 1]$, T 为采样周期。当取运动目标在三个轴向的位置和速度为观测量时, 系统的观测方程如下:

$$Y(k) = H(k)X(k) + V(k) \quad (10)$$

式中 $H(k)$ 为系统的观测矩阵, 且 $H(k) = [1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1]$ 。 $W(k)$, $V(k)$ 分别为运动目标定位的系统状态噪声和观测噪声 $W(k) = [w_1(k), w_2(k), w_3(k), w_4(k), w_5(k), w_6(k)]$, $V(k) = [v_1(k), v_2(k), v_3(k), v_4(k), v_5(k), v_6(k)]$ 。其中 $w_i(k)$ 和 $v_i(k)$ 是数学期望为 0 的高斯白噪声。并且 $W_i(k)$ ($i=1, 2, \dots, 6$) 是相互独立的变量。 $V_i(k)$ ($i=1, 2, \dots, 6$) 是相互独立的变量。 $W(k)$ 的协方差矩阵是 Q , $V(k)$ 的协方差矩阵是 R , Q 和 R 均为常量。由于试验系统没有输入控制量, 所以取 $B(k) = 0$ 标准卡尔曼滤波的 5 个递推方程如下:

$$X(k/(k-1)) = A(k)X(k-1) \quad (11)$$

$$P(k/(k-1)) = A(k)P(k-1)A^T(k) + Q \quad (12)$$

$$Kg(k) = P(k/(k-1))H^T(k) / \{H(k)P(k/(k-1))H^T(k) + R\} \quad (13)$$

$$X(k) = X(k/k) = X(k/(k-1)) + Kg(k) \{Y(k) - H(k)X(k/(k-1))\} \quad (14)$$

$$P(k) = P(k/k) = \{I - Kg(k)H(k)\}P(k/(k-1)) \quad (15)$$

在给定状态初值和噪声协方差时, 由上述递推过程可得到状态变量的最佳估计值, 能有效地提高动态目标的定位精度, 大大减少定位误差。对于高动态三维运动目标, 为了更加准确的描述的目标的运动状态, 通常将运动目标的三轴加速度放入状态变量和观测量中, 即将状态变量和观测量则取至 9 维, 这样可以得到更好的滤波效果, 但运算量和先验估计量的难度也会随之增大。

4 目标位置的自适应卡尔曼滤波算法模型及原理

采用标准的卡尔曼滤波递推方程, 虽能明显提高测量定位精度, 但存在以下不足:

由于受计算工具等客观条件的限制, 滤波算法在计算机上运行时, 易产生舍入误差积累, 误差协方差

阵可能因此而失去正定性或对称性, 从而出现数值计算不稳定现象。一般情况下, 当状态向量维数超过 10 时, 滤波过程中就可能出现滤波不稳定现象。

标准卡尔曼滤波视系统的动态噪声和观测噪声为零均值, 且统计特性已知, 但这些条件对于动态目标定位测量实际上难以严格地满足, 例如, 在观测方程中, 当飞机姿态角, 斜距值等定位参数有较大偏差时, 观测噪声就不是零均值噪声, 这必然引起建模误差, 且易引起滤波发散。

针对在目标动态定位时, 状态方程和观测方程均较为精确, 但系统噪声和观测噪声的统计特性不明确的特点, 作者应用 Sage 自适应滤波方法 (又称极大后验估计器), 并对该法加以改进。其基本过程是: 根据每次测量值 $\{Y(k) = Y(0), Y(1), \dots, Y(k-1), Y(k)\}$ 所获得的新信息, 推算出当前时刻的系统噪声和观测噪声的统计特性的估算值, 并求出状态估值 $X(k)$ 。

对于式 (9) 和式 (10) 所描述的动态系统, 视 $W(k)$, $V(k)$ 为均值不为零的独立的正态白噪声, 即

$$E\{W(k)\} = q(k) \quad (16)$$

$$E\{V(k)\} = r(k) \quad (17)$$

$$E\{W(k)W(j)\} = Q(k) \quad (18)$$

$$E\{V(k)V(j)\} = R(k) \quad (19)$$

式中噪声的均值 $q(k)$ 与 $r(k)$ 以及协方差矩阵 $Q(k)$ 与 $R(k)$ 都是未知的; Sage 自适应滤波就是基于观测值 $\{Y(0), Y(1), \dots, Y(k-1), Y(k)\}$ 求取状态估值 $X(k)$ 。由极大后验估计 (MAP) 原理, 可估算出 $q(k)$, $r(k)$, $Q(k)$, $R(k)$, $X(k)$ 。 $q(k)$ 和 $r(k)$ 都是一维列向量。时变系统的卡尔曼滤波各递推公式如下:

滤波方程:

$$X(k/(k-1)) = A(k)X(k-1) + q(k-1) \quad (20)$$

预报方程:

$$P(k/(k-1)) = A(k)P(k-1)A^T(k) + Q(k-1) \quad (21)$$

最佳增益矩阵:

$$Kg(k) = P(k/(k-1))H^T(k) / \{H(k)P(k/(k-1))H^T(k) + R(k-1)\} \quad (22)$$

状态更新方程:

$$X(k) = X(k/k) = X(k/(k-1)) + Kg(k) \{Y(k) - H(k)X(k/(k-1)) - r(k-1)\} \quad (23)$$

更新方程:

$$P(k) = P(k/k) = \{I - Kg(k)H(k)\}P(k/(k-1)) \quad (24)$$

我们用相当数量的误差的算术平均值来近似代替误差的数学期望。再用这些误差和它们的数学期望求得误差的近似方差。经推理证实这样的近似代替是一种无偏估计。公式如下：

$$q(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \{X(j/j) - A(k)X((j-1)/(j-1))\} \quad (25)$$

$$q_w(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \{X(j/j) - A(k)X((j-1)/(j-1)) - q(k)\} \quad (26)$$

$$r(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \{Y(j) - H(k)X((j/j-1))\} \quad (27)$$

$$r_v(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \{Y(j) - H(k)X((j/j-1)) - r(k)\} \quad (28)$$

以 $q_w(k)$ 中每一个元素的平方作为对角线元素，而其他元素都为 0 的方阵就是 $Q(k)$ 。以 $r_v(k)$ 中每一个元素的平方作为对角线元素，而其他元素都为 0 的方阵就是 $R(k)$ 。利用上面的递推公式便可交替估算系统噪声和观测噪声的统计量。但对噪声量是时变的系统而言，显然，对于新、旧数据应分别对待，即应逐渐淡化或遗忘过于陈旧的历史数据，而对新数据的加权系数适当加大。在这里我们使用一种简单实用的方法来实现新旧数据的交替。即每次都当前状态量之前的 100 个数据来对噪声统计量进行无偏估计。这样就可以实时、准确的对当前状态量进行估算了。

5 试验数据和仿真

为了比较标准卡尔曼滤波和改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波的性能，进行了实验与仿真研究。应用半物理仿真，标准卡尔曼滤波时认为位置和速度的观测噪声均是高斯白噪声，其噪声方差分别为： $\sigma_1^2 = 6400m$ ， $\sigma_2^2 = 0.04m/s$ 观测量取位置和速度，采样周期为 GPS 信号的刷新周期即 1s。测量目标从北纬 43 8815 开始匀速向北运动。

标准卡尔曼滤波动态定位实验的误差曲线如图 1 所示。可以看出滤波后的定位误差相比原始值测量值小了很多，但仍然有近 150m 的偏差。改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波动态定位实验的仿真曲线如图 2 所示。取开始阶段的 400s 采样时间进行分析。从图中可以看出，测量值

相比真实值有近 250m 的误差，经过改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波后，误差大大减小了，基本可以控制在 50m 之内。从采样时间看，开始的 100s 处于数据积累和验算过程，因此定位结果相对发散，从 100s 到 150s 定位数据快速收敛，并最终贴近真实值。

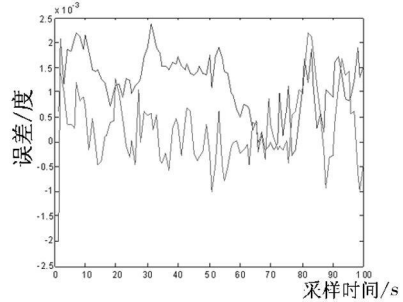


图 1 标准卡尔曼滤波动态定位实验的误差曲线

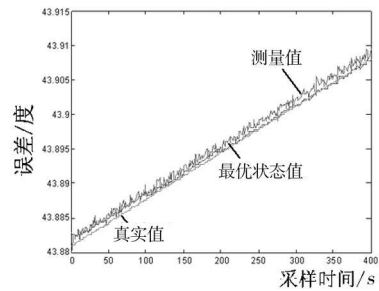


图 2 改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波动态定位曲线

标准卡尔曼滤波和改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波的误差曲线如图 3 所示。可以看出，后者的定位误差相比前者减小了很多，同时定位速度并没有降低。

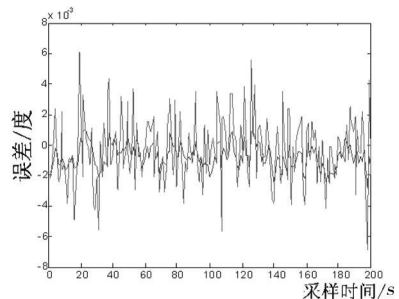


图 3 两种算法的定位误差比较曲线

无论是标准卡尔曼滤波还是改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波，定位精度均比原始定位数据高。但改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波比标准卡尔曼滤波有更高的滤波精度，并且不容易发散。二者在滤波后的误差平均值有较大变化，从标准滤波的 150m 提高到改进型自适应滤波的 50m。 (下转第 54 页)

基本上涂层只有一种元素——纯净的铜。在刚涂覆的钢表面区段用氩离子喷射以后,涂层便脱落,从而观察到基体钢的俄歇电子光谱(光谱 2)。主要是含有铁、铬和镍的元素。如果对涂覆后的涂层进行离子喷射的定时控制,可以绘制出元素沿涂层深度的分布关系,诸如供所有被研究的试件用的元素浓度与喷射时间的函数式 $C=f(t)$ 。

图 3 上列举了在钢 12 18H10T 和钛 BT1- O 上沿铜涂层厚度的元素分布。从图中可见,涂层区域的界限不明显。与沉淀的涂层不同,这种涂层的元素分布是热扩散涂层所特有的。根据涂层的厚度和铜分布的特点可以大致将曲线分成 4 个区域。对于不锈钢及其铜涂层而言,这些区域的特征情况如下:

区 - 涂层的铜含量高(不小于 90%),其他元素少,元素分布稳定;

区 - 涂层铜含量明显降低,基体元素明显增加,在 - 区边界上钢的有效组份(铁、铬)浓度变高;

区 - 是铜在铁中的固溶体基础上的过渡底层;

区 - 基体金属,铁、铬、镍含量稳定,铜含量小于 5%。

在 4 个区域中,区和区可以相对认为是已形成的涂层有效区。区和区可作为涂层与基体金属

之间的过渡扩散区。 - 区形成总的涂层厚度。

6 结语

综上所述,对于异种金属材料的钎焊而言,建立中间涂层是解决钎焊困难的有效方法。采用盐浴浸涂法制造中间涂层,可在基体金属与涂层之间通过宽度为 1~4 mm 的热扩散区在金属联系的等级上将两者连接起来。盐浴浸涂法除了涂覆质量好以外,还避免了冗长的涂覆时间,大大地提高了劳动生产率。

参考和借鉴俄罗斯学者的研究思路和经验,在寻求各种不同的异种金属钎焊连接困难的解决办法时,一定可以通过中间涂层的研究获得圆满解决。

参考文献:

1. [J]. , 2009, (2): 22- 26 (收稿日期 2010- 03- 10)

(上接第 50 页)

6 结论

改进型 Sage 自适应卡尔曼滤波方法适用于运动载体动态定位的 GPS 动态定位系统,数值滤波稳定性好,精度高,克服了标准卡尔曼滤波方法易发散的缺点。由于应用观测新值不断地对系统的动态噪声和观测噪声进行递推和更新,且引入了遗忘因子对新、旧数据区别对待,故该方法具有较快的收敛性和较强的自适应性,比标准卡尔曼滤波法具有更高的精度。

参考文献

- [1] 贾平,张葆.航空光电侦察平台关键技术及其发展 [J], 光学精密工程, 2003 11(1): 82- 88
- [2] 孙辉,张葆,刘晶红,等.航空光电成像电子稳像技术 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1280- 1286

- [3] 王家骐,金光,颜昌翔.机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析 [J]. 光学精密工程 2005, 13(2): 105- 116
- [4] 金光.机载光电跟踪测量的目标定位误差分析和研究 [D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001
- [5] 秦永元,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
- [6] 常军.机载雷达目标的大地坐标定位 [J]. 电讯技术, 2003, 43(2): 97- 100
- [7] JohnB Lundberg. A ltemative A lgorithm s for the GPS Statict positioning Solution[J]. AppliedM athematicsand Computation, 2001, 119: 21- 34

(收稿日期 2010- 08- 15)

作者简介:宋悦铭(1981-),男,吉林长春人,工学硕士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航测部助理研究员,主要研究航拍成像的补偿算法及航空光电侦察平台自主定位技术。