

文章编号: 1001-5078(2004)06-0449-03

仅有角度量测的红外机动目标跟踪

孙志刚

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 针对红外机动目标跟踪仅有角度量测的特点, 引入了基于修正球坐标系的扩展 Kalman 滤波器, 并对目标状态模型及其线性化方程进行了推导, 建立了扩展 Kalman 滤波方程组。

关键词: 角度量测; 红外机动目标跟踪; 修正的球坐标系(MSC); 扩展 kalman 滤波

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Infrared Maneuver Target Tracking Using Angle-only Measurements

SUN Zhi-gang

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The extended kalman filter is introduced based on modified spherical coordinates used to infrared maneuver target tracking with angle-only measurements, with emphasis on inducing the mathematical model of target dynamic and the extended Kalman filter equations.

Key words: angle-only measurements; infrared maneuver target tracking; MSC; extended Kalman filter.

1 引言

红外成像跟踪与制导技术, 是基于对目标与背景间温差或辐射率差的探测, 获取的红外图像包含了目标形状、大小、姿态及灰度分布特征。在实际应用中, 往往只能获得目标的角度信息, 而没有距离信息, 不能直接对目标定位, 更难获得目标的速度、加速度信息。因此, 研究仅有角度量测的红外机动目标跟踪, 仅利用角度量测来估计目标的位置、速度和加速度, 对于提高跟踪性能, 加强防御能力具有重要意义和实用价值。

2 坐标系的选择

笛卡尔直角坐标系是最常用的坐标系, 人们在处理仅用角度量测的跟踪问题时发现在直角坐标系中其量测方程是非线性的, 并证明了对于仅用角度量测而言, 直角坐标系下的扩展 Kalman 滤波器

(EKF) 是不稳定, 甚至是发散的。为解决上述问题, Hbelzer 和 Stallard^[1] 提出了利用修正的球坐标系 (Modified Spherical Coordinates, MSC) 来处理仅用角度量测的问题, 在 MSC 坐标系中, 扩展 Kalman 滤波算法是稳定并接近无偏的。

建立如图 1 所示的 MSC 坐标系, 定义载机即红外传感器量测平台位于原点, X 轴指向东, Y 轴指向北, Z 轴垂直向上, 则 X - Y 平面为水平平面。设目标距离为 r , 分量 r_H 为 r 在 X - Y 平面内的投影, r_H 与 X 的夹角为方位角, r 与 r_H 的夹角为俯仰角。图中, 垂直于 $r_H - r$ 平面并位于水平平面内, 垂直于 r 并位于 $z - r$ 平面内, z 为 Z 轴上的单位

作者简介: 孙志刚(1977 -), 男, 工程师, 华北光电技术研究所在职研究生, 主要研究方向为红外成像系统与机动目标跟踪。

收稿日期: 2004-07-12

向量。初始的目标加速度分量 a_{R_T} 、 a_{R_H} 、 a_{R_V} 三矢量方向分别沿 RHV 坐标系三轴方向,具体定义为: a_{R_T} 沿着 r 方向, a_{R_H} 位于水平平面内并平行于 \dot{r} 矢量,而 a_{R_V} 位于 $r_H - r$ 平面内并平行于 \dot{r} 矢量。

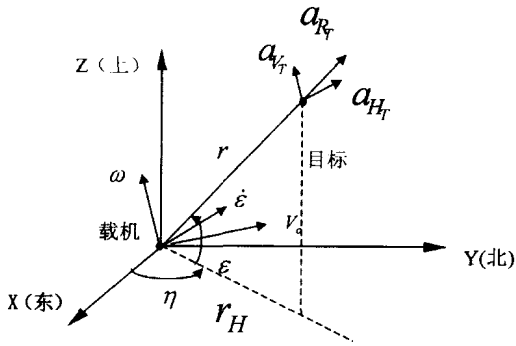


图 1 MSC 下的滤波器几何示意图

3 基于 MSC 坐标系的非线性运动方程

MSC 跟踪滤波器使用的 6 状态变量^[1,21],包括两个角度,两个角速度,距离变化率与距离比 (\dot{r}/r) 和距离 r 的倒数。具体的状态向量定义如下:

$$\mathbf{x} = [\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, s]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \quad (1)$$

其中 $\alpha = \dot{r} \cos \eta$, $\beta = \dot{R}/R$, $s = 1/R$ 。

下面推导目标的非线性运动方程:

首先设载机和目标在地面惯性坐标系中的位置分别为 X_O, Y_O, Z_O 和 X_T, Y_T, Z_T , 相应的速度为 $\dot{X}_O, \dot{Y}_O, \dot{Z}_O$ 和 $\dot{X}_T, \dot{Y}_T, \dot{Z}_T$, 加速度为 $\ddot{X}_O, \ddot{Y}_O, \ddot{Z}_O$ 和 $\ddot{X}_T, \ddot{Y}_T, \ddot{Z}_T$ 。相对位置坐标用 X, Y, Z 表示,并求一、二阶微分,则有

$$\left. \begin{aligned} X &= r \cos \alpha \cos \beta \\ \dot{X} &= \dot{r} \cos \alpha \cos \beta - r \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta - r \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta \\ \ddot{X} &= \ddot{r} \cos \alpha \cos \beta - 2 \dot{r} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta - 2 \dot{r} \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta \\ &\quad - \ddot{\alpha} r \sin \alpha \cos \beta - r \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \cos \beta + 2 \dot{r} \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \sin \beta \\ &\quad - \ddot{\beta} r \cos \alpha \sin \beta - r \dot{\beta}^2 \cos \alpha \cos \beta \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} Y &= r \cos \alpha \sin \beta \\ \dot{Y} &= \dot{r} \cos \alpha \sin \beta - r \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + r \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \\ \ddot{Y} &= \ddot{r} \cos \alpha \sin \beta - 2 \dot{r} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + 2 \dot{r} \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \\ &\quad - \ddot{\alpha} r \sin \alpha \sin \beta - r \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \sin \beta - 2 \dot{r} \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \\ &\quad + \ddot{\beta} r \cos \alpha \cos \beta - r \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \beta \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned} Z &= r \sin \alpha \\ \dot{Z} &= \dot{r} \sin \alpha + r \dot{\alpha} \cos \alpha \\ \ddot{Z} &= \ddot{r} \sin \alpha + 2 \dot{r} \dot{\alpha} \cos \alpha + r \ddot{\alpha} \cos \alpha - r \dot{\alpha}^2 \sin \alpha \end{aligned} \right\} (4)$$

根据从惯性坐标系转换到 RHV 坐标系中的旋转矩阵,对上述方程进行变换可得目标的非线性运动矢量方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -2x_2x_5 - x_4^2 \tan x_1 + x_6(a_{V_T} - a_{V_O}) \\ x_4/\cos x_1 \\ -2x_4x_5 + x_2x_4 \tan x_1 + x_6(a_{H_T} - a_{H_O}) \\ x_2^2 + x_4^2 - x_5^2 + x_6(a_{R_T} - a_{R_O}) \\ -x_5x_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

从上述矢量方程可以看出, x_1, x_3 是量测量, x_2, x_4 分别是它们的倒数,也是可观测的,同时由当载机与目标的加速度均为零时, x_5 可由第二和第四个方程求出,为可观测量,只有 x_6 (即距离的倒数)为不可观测量。因此为了使得 x_6 可观测,在假设目标不作机动运动的条件下,载机必须作机动运动,即 $a_{R_T}, a_{H_T}, a_{V_T}$ 均为零, $a_{R_O}, a_{H_O}, a_{V_O}$ 不全为零。

4 建立扩展 Kalman 滤波方程组

假设目标做匀速直线运动,可以将目标加速度看作噪声,设状态噪声矢量为 $\mathbf{w} = [a_{R_T}, a_{H_T}, a_{V_T}]^T$, 当状态噪声矢量为零,即 $\mathbf{w} = 0$ 时,对状态方程进行线性化处理,得到目标的线性运动方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{F} \mathbf{x} \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_4^2 \sec^2 x_1 & -2x_5 & 0 & 2x_4 \tan x_1 & -2x_2 & -a_{V_O} \\ x_4 \sec x_1 \tan x_1 & 0 & 0 & 1/\cos x_1 & 0 & 0 \\ x_2x_4 \sec^2 x_1 & x_4 \tan x_1 & 0 & -2x_4 + x_4 \tan x_1 & -2x_4 & -a_{H_O} \\ 0 & 2x_2 & 0 & 2x_4 & -2x_5 & -a_{R_O} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -x_6 & -x_5 \end{bmatrix} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \quad (7)$$

设离散化的目标状态转移方程为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1, k) \mathbf{x}(k) \quad (8)$$

略去高次项,状态转移矩阵 $\mathbf{A}(k+1, k)$ 可近似

表示为

$$\mathbf{A}(k+1, k) \cong \mathbf{I} + \mathbf{F}T$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_4^2 \sec^2 x_1 T & 1 - 2x_5 T & 0 & 2x_4 \tan x_1 T & -2x_2 T & -a_{v_0} T \\ x_4 \sec x_1 \tan x_1 T & 0 & 1 & T/\cos x_1 & 0 & 0 \\ x_2 x_4 \sec^2 x_1 T & x_4 \tan x_1 T & 0 & 1 - 2x_4 T + x_4 \tan x_1 T & -2x_4 T & -a_{h_0} T \\ 0 & 2x_2 T & 0 & 2x_4 T & 1 - 2x_5 T & -a_{r_0} T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -x_6 T & 1 - x_5 T \end{bmatrix} \quad x=\hat{x}(k) \quad (9)$$

因此设含有噪声的目标状态转移方程为

$$\mathbf{x}(k+1) = (k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(k+1, k)\mathbf{w}(k) \quad (10)$$

其中 $(k+1, k)$ 为上述状态转移矩阵, $\mathbf{G}(k+1, k)$ 为噪声输入矩阵, 根据运动方程可设为

$$\mathbf{G}(k+1, k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & x_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_6 & 0 & 0 \\ 0 & x_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

设状态噪声 $\mathbf{w}(k)$ 为高斯白噪声, 则其协方差阵 $\mathbf{Q}(k)$ 为

$$\mathbf{Q}(k) = E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(k)] = \text{diag}[\sigma_R^2, \sigma_H^2, \sigma_V^2] \quad (12)$$

由于红外传感器量测数据为目标俯仰角 θ 和方位角 ϕ , 若设量测向量为 \mathbf{z} , 则有 $\mathbf{z} = [\theta, \phi]^T$, 定义量测方程为:

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (13)$$

其中 $\mathbf{z}(k)$ 为 k 时刻的量测向量, $\mathbf{H}(k)$ 为 k 时刻的量测矩阵, $\mathbf{x}(k)$ 为 k 时刻的目标状态向量, $\mathbf{v}(k)$ 为量测噪声。则根据量测方程可知量测矩阵 \mathbf{H} 为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

设量测噪声 $\mathbf{v}(k)$ 为高斯白噪声, 则其协方差阵 $\mathbf{R}(k)$ 为

$$\mathbf{R}(k) = E\{\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k)\} = \text{diag}[\sigma_\theta^2, \sigma_\phi^2] \quad (15)$$

综上, 得到扩展 Kalman 滤波方程组:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}(k+1)\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)] \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = (k+1, k)\hat{\mathbf{x}}(k|k) \quad (17)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)[\mathbf{H}(k+1) \quad (18)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{P}(k+1|k) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k) = (k+1, k)\mathbf{P}(k|k) + \mathbf{G}^T(k+1, k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{G}(k+1, k) \quad (20)$$

其中, $\mathbf{P}(k+1|k+1)$ 为滤波估值误差协方差阵,

$\mathbf{P}(k+1|k)$ 为预测协方差阵, $\mathbf{K}(k+1)$ 为最优增益阵。

5 目标机动检测

由矢量方程(5)可知, 要得到载机目标间距离的估计需要首先假设目标不作机动运动, 而这在实际应用中常常不能满足假设条件, 因此必须对目标的机动探测进行讨论。

传统的机动探测方法是利用 χ^2 分布统计量进行检测^[5]。定义距离函数

$$\mathbf{D}(k) = \mathbf{d}^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k)\mathbf{d}(k) \quad (21)$$

其中新息向量 $\mathbf{d}(k)$ 为零均值高斯白噪声过程, $\mathbf{S}(k)$ 为其协方差矩阵。由新息序列的统计性质可知, $\mathbf{D}(k)$ 服从自由度为 m 的 χ^2 分布。如果目标发生机动, 新息 $\mathbf{d}(k)$ 将不再是零均值高斯白噪声过程, $\mathbf{D}(k)$ 随之增大, 因此常用下述方法检测机动的发生与消除:

- 当 $\mathbf{D}(k) > M$ 时, 表示机动发生, 增大 $\mathbf{Q}(k)$ 阵;
- 当 $\mathbf{D}(k) \leq M$ 时, 表示机动消除, 减小 $\mathbf{Q}(k)$ 阵;

6 结论

本文将基于 MPC 坐标系的扩展 Kalman 滤波引入红外机动目标跟踪系统, 得到目标状态模型及其线性状态转移矩阵, 然后建立了扩展 Kalman 滤波方程组, 并对目标机动探测进行了讨论。经过初步的 Matlab 仿真试验, 基本解决了直角坐标系下的扩展 Kalman 滤波器不稳定, 甚至发散的问题。进一步的工作是改进扩展 Kalman 滤波器的初始化参数设置, 同时研究算法运算的速度与硬件实时实现问题。

参考文献:

- [1] Stallard D V. An Angle-only Tracking Filter in Modified Spherical Coordinates[A]. Proc. 1987 AIAA Guidance Navigation and Control Conf., 1987:542 - 550.
- [2] Allen R R. Implementatin of an Angle-only Tracking Filter [J]. Signal and Data Processing of Small Targets 1991, Proc. SPIE, Vol. 1481, Apr. 1991 :292 - 303.
- [3] Samuel Blackman, Robert Popoli. Design and Analysis of Modern Tracking Systems[M]. Artch House. 1999.
- [4] 韩林频, 吴加望. 纯角度测量跟踪滤波器[J]. 现代防御技术. 1995. 5:53 - 63.
- [5] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 国防工业出版社, 1991.