

一种新的单站被动跟踪方案

易 旭, 李立萍

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】在被动跟踪系统中,只利用测向技术不能快速、高精度地跟踪目标,此外使用传统的EKF算法进行跟踪滤波,得到的误差较大,容易产生发散现象。该文提出利用相位变化率和SR-UKF算法相结合的方案,有效克服了上述问题,大大提高了跟踪的速度和精度,滤波器的稳定性也得到增强,跟踪性能得到提高,其有效性通过仿真得到了证明。

关键词 单观测器; 被动跟踪; 相位变化率; SR-UKF算法

中图分类号 TN953; TN959.73 文献标识码 A

A New Method for Single Observer Passive Tracking

YI Xu, LI Li-ping

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In passive tracking system, the method using bearings-only can't determine the position of target quickly with high precision. What is more, the EKF is traditional algorithm for passive tracking, but it produces large errors and easily leads to divergence. This paper introduces a new method using phase difference rate and SR-UKF algorithm. It can amend aforementioned flaws, lead to filter stability in use, and significantly improve the performance of tracking. The method is validated by the results of the simulation experiment.

Key words single observer; passive tracking; phase difference rate; SR-UKF algorithm

使用单观测器对目标进行跟踪,避免了复杂的时间同步,独立性强,机动性好,所以实用价值很大。当观测器和目标之间存在相对运动,并且满足可观性,就可以对目标进行跟踪。然而在被动跟踪系统中,只利用测向技术不能快速、高精度地跟踪目标,使用相位变化率的技术可以充分利用观测平台和目标之间的相对运动信息^[1],达到在很短的时间内,获得较高的跟踪精度。EKF(Extended Kalman Filter)是一种传统的跟踪滤波算法,它是非线性动态系统为了应用卡尔曼滤波器,把非线性函数进行泰勒级数展开,并作一阶近似,该算法在滤波的同时产生了较大误差并且容易发散。Julier S J和Uhlmann J K提出了UKF(Unscented Kalman Filter)算法^[2,3],其基本思想是选择特殊的 $2M+1$ (M 为变量的维数)个Sigma点通过非线性系统,去捕获随机变量通过非线性系统后的均值和方差。该算法在高斯噪声下,可以使线性化误差达到三阶精度,因此精度很高,鲁棒性好,但计算量稍大。SR-UKF(Square-Root Unscented Kalman Filter)算法是UKF的平方根形式^[4],它在迭代过程中使用协方差矩阵的平方根,这样就保证了协方差矩阵在传播过程中的半正定性,同时具有很好的数值特性,该算法还利用了矩阵的分解和更新,使计算复杂性下降,提高了运算速度。本文将提出把SR-UKF算法应用于相位变化率的跟踪技术。

收稿日期: 2004-12-21

基金项目: 国防科研基金资助项目

作者简介: 易旭(1976-),男,硕士,主要从事定位跟踪方面的研究;李立萍(1963-),女,副教授,主要从事无源定位方面的研究。

1 跟踪的原理和模型

假设观测器沿着X轴运动, 而目标沿V_t方向运动。定义运动目标的状态向量 $X_t = [x_t, y_t, v_{tX}, v_{tY}]^T$, v_{tX} 、 v_{tY} 是目标在X、Y轴方向的速度, 向量 $V_t = [v_{tX}, v_{tY}]^T$ 。再定义观测器的状态向量 $X_o = [x_o, y_o, v_{oX}, v_{oY}]^T$, v_{oX} 、 v_{oY} 是观测器在X、Y轴方向的速度, 向量 $V_o = [v_{oX}, v_{oY}]^T$ 。r 是目标与观测器的距离, β 是 r 与Y轴方向的夹角, α 是观测器的天线基线法方向与Y轴方向的夹角。假设观测器携带二单元天线阵来测量相位变化率, 两个天线阵元分别为A、B, 接收来波信号的相位差 φ , 那么:

$$\varphi = \omega_t \Delta t = 2\pi f_t \frac{d \sin(\beta - \alpha)}{c} \quad (1)$$

式中 f_t 是目标信号的发射频率; d 是天线阵的基线长度; c 是电磁波速度; 对式(1)求导得:

$$\frac{d\varphi}{dt} = 2\pi d \frac{f_t}{c} \cos(\beta - \alpha) \left(\frac{d\beta}{dt} - \frac{d\alpha}{dt} \right) \quad (2)$$

由图1可以看出:

$$\beta = \arctan[(x_t - x_o)/(y_t - y_o)] \quad (3)$$

求得:

$$d\beta/dt = [(v_{tX} - v_{oX})(y_t - y_o) - (v_{tY} - v_{oY})(x_t - x_o)] / [(x_t - x_o)^2 + (y_t - y_o)^2] \quad (4)$$

由前面的式(3)、(2), 可以得到测量方程组为:

$$\begin{cases} \beta = \arctan[(x_t - x_o)/(y_t - y_o)] \\ \frac{d\varphi}{dt} = (2\pi d f_t / c) \cos(\beta - \alpha) \left(\frac{d\beta}{dt} - \frac{d\alpha}{dt} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $d\beta/dt$ 的表达式为(4)。根据测量方程组(5), 就能定义离散化的测量向量 $Y(n) = [\beta(n), d\varphi(n)/dt]^T$ 。此外, 跟踪匀速运动目标的可观性是, 单观测器具有加速度, 并且它和目标的运动不在同一条直线上^[1]。

当观测器对目标进行跟踪时, 离散状态方程如下:

$$X_t(n+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X_t(n) + v_1(n) \quad (6)$$

式中 $X_t(n) = [x_t(n), y_t(n), v_{tX}(n), v_{tY}(n)]^T$; $v_1(n)$ 为离散过程噪声; T 为采样周期。

2 SR-UKF算法

2.1 SR-UKF算法中的参数

M : 状态向量 $X_t(n)$ 的维数, N : 观测向量 $Y(n)$ 的维数。

λ : 标度参数, 表达式为 $\lambda = \alpha^2(M + \kappa) - M$, 其中参数 κ 通常设为零, α 取较小的正数(如0.001)。

$W_0^{(m)} = \lambda / (M + \lambda)$, $W_0^{(c)} = \lambda / (M + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \eta)$, $W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = 1 / [2(M + \lambda)]$ $i=1, 2, \dots, 2M$ 。

$W_0^{(m)}$ 、 $W_0^{(c)}$ 、 $W_i^{(m)}$ 、 $W_i^{(c)}$ 是计算随机变量均值和方差的权, m 代表均值, c 代表方差。

η : 是一个常数, 它是状态向量 $X_t(n)$ 分布的先验知识, 对高斯分布一般取2。

Sigma点的生成: $\chi_0 = \bar{X}_t$, $\chi_i = \bar{X}_t \pm (\sqrt{(M + \lambda)} S)_i$, $i=1, 2, \dots, 2M$, 其中 $\pm(\sqrt{(M + \lambda)} s)_i$, $i=1, 2, \dots, 2M$ 代表平方根矩阵的第*i*列, s 代表协方差矩阵的平方根形式。

Q_1 : 是均值为零的过程噪声 $v_1(n)$ 的协方差矩阵, Q_2 : 是均值为零的测量噪声 $v_2(n)$ 的协方差矩阵。

F : 是非线性传输函数, 代表式(6)中对状态变量 $X_t(n)$ 的运算。

C : 是非线性测量函数, 代表式(5)中测量方程等式右边的运算。

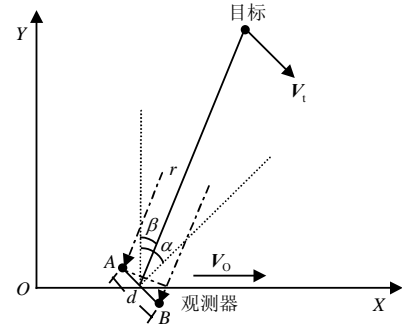


图1 单观测器对目标跟踪的几何解释

2.2 利用相位变化率技术对目标进行跟踪的SR-UKF算法

2.2.1 初始化过程：

$$\bar{X}_t(0) = E[X_t(0)] \quad (7)$$

$$S(0) = \text{chol}\{E[(X_t(0) - \bar{X}_t(0))(X_t(0) - \bar{X}_t(0))^H]\} \quad (8)$$

2.2.2 滤波过程

1) 计算Sigma点

$$x_0(n-1) = \bar{X}_t(n-1) \quad (9)$$

$$x_i(n-1) = \bar{X}_t(n-1) \pm (\sqrt{(M+\lambda)S(n-1)})_i, \quad i=1,2,\dots,2M \quad (10)$$

2) 时间更新

$$x_i(n|n-1) = F(x_i(n-1)), \quad i=0,1,2,\dots,2M \quad (11)$$

$$\bar{X}_t(n|n-1) = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(m)} x_i(n|n-1) \quad (12)$$

$$S(n|n-1) = \text{qr}\{\sqrt{W_1^{(c)}} (x_{1-2M}(n|n-1) - \bar{X}_t(n|n-1)) \sqrt{Q_1}\} \quad (13)$$

$$S(n|n-1) = \text{cholupdate}\{S(n|n-1), x_0(n|n-1) - \bar{X}_t(n|n-1), W_0^{(c)}\} \quad (14)$$

$$\gamma_i(n|n-1) = C(x_i(n|n-1)), \quad i=0,1,2,\dots,2M \quad (15)$$

$$\bar{Y}(n|n-1) = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(m)} \gamma_i(n|n-1) \quad (16)$$

3) 测量更新

$$S_y(n) = \text{qr}\{\sqrt{W_1^{(c)}} (\gamma_{1-2M}(n|n-1) - \bar{Y}(n|n-1)) \sqrt{Q_2}\} \quad (17)$$

$$S_y(n) = \text{cholupdate}\{S_y(n), \gamma_0(n|n-1) - \bar{Y}(n|n-1), W_0^{(c)}\} \quad (18)$$

$$P_{xy}(n) = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(c)} (x_i(n|n-1) - \bar{X}_t(n|n-1)) (\gamma_i(n|n-1) - \bar{Y}(n|n-1))^H \quad (19)$$

$$G(n) = (P_{xy}(n) / S_y^H(n)) / S_y(n) \quad (20)$$

$$\bar{X}_t(n) = \bar{X}_t(n|n-1) + G(n)(Y(n) - \bar{Y}(n|n-1)) \quad (21)$$

$$U(n) = G(n)S_y(n) \quad (22)$$

$$S(n) = \text{cholupdate}\{S(n|n-1), U(n), -1\} \quad (23)$$

$\text{chol}\{\}$ 运算代表对矩阵进行Cholesky分解。假设 $\text{cholupdate}\{S, U, \pm v\}$ ，它表示对矩阵 S 进行Cholesky更新，相当于计算 $\text{chol}\{SS^H \pm vUU^H\}$ 。如果 U 不是向量，而是矩阵，那么 cholupdate 意味着用 U 矩阵的每一个列向量连续进行更新。在式(8)中，为了获得计算Sigma点所需要的平方根矩阵 $S(0)$ ，对初始协方差矩阵进行Cholesky分解。在式(13)中，对加权的 $2M$ 个Sigma点和过程噪声的平方根组成的混合矩阵实施QR分解。然后，再对式(14)进行 cholupdate 运算，其中 $W_0^{(c)}$ 可能是负数。同样的运算，在式(17)、(18)中，又实施了一次。在式(23)中， $U(n)$ 可能不是向量， cholupdate 运算是按列向量逐次更新。对于式(20)，有两个“/”运算，该等式代表解 $x(S_y(n)S_y^H(n)) = P_{xy}(n)$ 方程，由于 $S_y^H(n)$ 、 $S_y(n)$ 都是三角矩阵，因此很容易通过简单的迭代，求出方程中 x 的解，即 $G(n)$ 。由于运算中没有对矩阵求逆，所以加快了运算速度。

3 计算机仿真

观测器： $x_0(0) = 10 \text{ km}$ ， $y_0(0) = 10 \text{ km}$ ， $v_{ox}(0) = 0.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $a_{ox}(0) = 0.005 \text{ km} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

目标： $x_t(0) = 80 \text{ km}$ ， $y_t(0) = 40 \text{ km}$ ， $v_{lx}(0) = 0.177 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $v_{ly}(0) = 0.177 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $T = 1 \text{ s}$ ， $\sigma_\beta = 20 \text{ m rad}$ ， $\sigma_{d\varphi/dr} = 30 \text{ m rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $f_t = 3.0 \text{ GHz}$ ， $d = 20 \text{ m}$ 。

$K(0) = \text{diag}[200, 200, 0.1, 0.1]$ ， $X_t(0) = [70, 50, 0, 0]^T$ 。

观测器以 $a_{ox}(0) = 0.005 \text{ km} \cdot \text{s}^{-2}$ 的加速度运动 40 s 后，速度达到 $v_{ox} = 0.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，此后，观测器再以同样的加速度减速 40 s ，回到原来的速度。仿真后得到的收敛曲线如图2，图3所示。

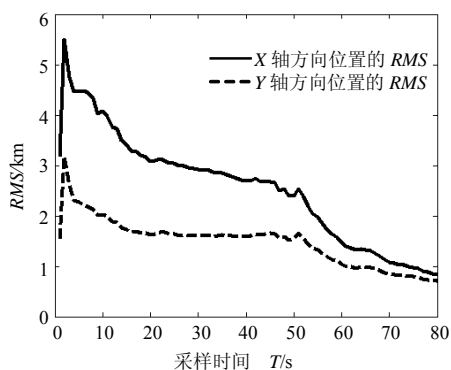


图2 X和Y轴方向位置的RMS

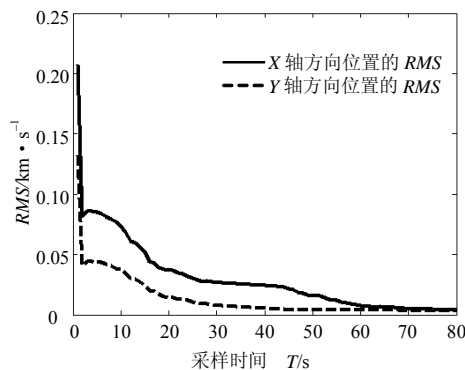


图3 X和Y轴方向速度的RMS

图2, 图3是一个典型的目标跟踪例子, 该仿真在进行100次Monte Carlo实验后, 得到了均方误差收敛曲线。除此之外, 根据设置不同实验参数所做的仿真, 得出以下结论:

- 1) 使用相位变化率跟踪技术, 误差收敛速度快, 跟踪精度高。提高测量方程中任何一个测量参数(方位角、相位变化率)的测量精度, 跟踪误差都会显著变小。
- 2) 提高观测器的加速度和延长观测器的加速时间都有助于误差收敛。
- 3) 当观测器仅作匀加速直线运动时, 跟踪误差的收敛性并不是很好。但观测器在直线上先加速再减速, 或者做转向机动时, 可以让跟踪误差很快收敛下来。例如本仿真实例, 在40 s, 观测器开始作减速机动后, 跟踪误差又有一个较大的下降。
- 4) SR-UKF滤波算法计算速度快, 精度高, 很稳定, 没有出现发散现象。

4 结束语

被动跟踪系统可观性弱, 存在收敛速度慢、误差较大的问题, 这是跟踪原理和滤波算法两大难点不易解决造成的。本文针对这两大难点提出了将相位变化率技术和SR-UKF算法相结合的解决方案, 大大提高了收敛速度, 降低了跟踪误差。仿真证明该方案具有以下优点: 1) 跟踪精度高; 2) 鲁棒性好; 3) 运算速度快; 4) 有较好的数值特性。特别值得一提的是, 随着跟踪原理的发展, 测量方程越来越复杂, 如果使用EKF算法来滤波, 计算雅可比矩阵非常困难, 有时甚至不可能, 而使用SR-UKF算法不需要计算雅可比矩阵, 因此很容易实施。

参 考 文 献

- [1] 许耀伟. 对固定和运动辐射源的移动单站无源定位和跟踪技术[C]. 单站无源定位文集. 上海: 信息产业部电子第五十一研究所, 2001. 30-35
- [2] Julier S, Uhlmann J, Durrant-Whyte H. A new approach for filtering nonlinear systems[C]. In: Presented at Proc. of American Control Conference, Seattle, WA, 1995. 1 628-1 632
- [3] Wan E A, Van der Merwe R. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation[C]. In: Proc. of IEEE Symposium 2000 (AS-SPCC), Lake Louise, Alberta, Canada, 2000. 153-158
- [4] Van der Merwe R, Wan E A. The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation[C]. In Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001 (ICASSP '01), 2001. 6: 3 461 - 3 464

编 辑 徐安玉