

文章编号: 1001-893X(2010)11-0010-05

多站无源定位系统中的机动目标跟踪算法^{*}

陈 玲, 陈德煌

(空军第一航空学院 航空电子工程系, 河南 信阳 464000)

摘 要:针对多站测向无源定位系统提出了一种杂波环境下机动目标的被动跟踪算法——CM-IMMPDF 算法。该算法首先用转换测量的卡尔曼滤波(CMKF)替代了传统的扩展卡尔曼滤波, 克服了后者精度不高易发散的缺点, 并将其结合交互多模型(IMM)算法及概率数据关联(PDF)算法, 有效地完成了多站无源定位系统对杂波环境下机动目标的跟踪。仿真结果证明了该算法的有效性。

关键词:无源定位系统; 机动目标跟踪; 转换测量卡尔曼滤波; 交互多模型算法; 概率数据关联算法

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.11.003

Tracking Algorithm for Maneuvering Target in Multiple Passive Sensor System

CHEN Ling, CHEN De-huang

(Department of Aeronautic Electronic Engineering, The First Aeronautical
Institute of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: An tracking algorithm of maneuvering target is proposed for multiple passive sensor system. It is called CM-IMMPDF algorithm. The converted measurement Kalman filter(CMKF) algorithm is used instead of the conventional extended Kalman filter(EKF) to improve the tracking performance. The proposed algorithm combines CMKF with both Interactive Multiple Model(IMM) algorithm and Probabilistic Data Association(PDA) algorithm. Simulation results show that the CM-IMMPDF algorithm is effective to track a maneuvering target in clutter for multiple passive sensor system.

Key words: passive sensor system; maneuvering target tracking; CMKF; IMM algorithm; PDF algorithm

1 引 言

多站测向无源定位系统是通过高精度的测向设备在两个或两个以上的观测站对辐射源进行测向(方位角和俯仰角), 然后根据各观测站测得的数据以及观测站之间的距离, 经过几何运算, 确定出辐射源的位置。

要利用多站测向无源定位系统对杂波环境下的机动目标进行跟踪, 则要解决以下三方面的问题。首先, 为解决目标运动状态不确定性问题, 必须建立

合理的目标运动模型, 以保证它能够准确描述目标的运动规律且易于进行数学处理; 为解决量测信息的不确定性, 则必须采用优化的滤波算法, 以获得高精度的滤波值; 为了解决密集杂波造成的测量模糊, 则需采用有效的数据关联算法, 将目标从杂波中提取出来。本文将从以上三个方面解决多站测向无源定位系统对机动目标的跟踪问题。

由于多站测向无源定位系统对目标进行观测所获得的观测方程是非线性的, 因此通常只能采用扩展卡尔曼滤波算法, 但是扩展卡尔曼滤波算法的缺点是精度不高且易发散^[1]。为了解决这个问题, 本

^{*} 收稿日期: 2010-07-15; 修回日期: 2010-09-02

文用转换测量的卡尔曼滤波(CMKF)算法替代扩展卡尔曼滤波算法,为了建立合理的运动模型和解决杂波问题,将 CMKF 算法与交互多模型(IMM)算法、概率数据关联(PDF)算法相结合,即得到 CM_IMM-PDF 算法。用 CM_IMMPDF 算法对杂波环境下的机动目标进行跟踪,跟踪效果与传统方法相比有很大改善,仿真结果验证了该算法的有效性。

2 转换测量的卡尔曼滤波算法

假设无源测向定位系统由 $S_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $S_2(x_2, y_2, z_2)$ 两个观测站组成,利用它们对辐射源 $T(x, y, z)$ 进行定位。其中, S_1 站测得目标的方位角和俯仰角分别为 ϕ_1 和 ϵ_1 , S_2 站测得目标的方位角和俯仰角分别为 ϕ_2 和 ϵ_2 , 利用这些测量数据可实现对目标的定位。

定位方程可表示如下:

$$\begin{cases} \frac{\sin\phi_1}{\cos\phi_1} = \frac{y-y_1}{x-x_1} \\ \frac{\sin\epsilon_1}{\cos\epsilon_1} = \frac{z-z_1}{x-x_1} \cdot \cos\phi_1 \\ \frac{\sin\phi_2}{\cos\phi_2} = \frac{y-y_2}{x-x_2} \\ \frac{\sin\epsilon_2}{\cos\epsilon_2} = \frac{z-z_2}{x-x_2} \cdot \cos\phi_2 \end{cases} \quad (1)$$

定位方程可表示成矩阵的形式:

$$AX = B \quad (2)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} \sin\phi_1 & -\cos\phi_1 & 0 \\ \sin\epsilon_1 & 0 & -\cos\phi_1\cos\epsilon_1 \\ \sin\phi_2 & -\cos\phi_2 & 0 \\ \sin\epsilon_2 & 0 & -\cos\phi_2\cos\epsilon_2 \end{bmatrix};$$
$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix};$$
$$B = \begin{bmatrix} x_1\sin\phi_1 - y_1\cos\phi_1 \\ x_1\sin\epsilon_1 - z_1\cos\phi_1\cos\epsilon_1 \\ x_2\sin\phi_2 - y_2\cos\phi_2 \\ x_2\sin\epsilon_2 - z_2\cos\phi_2\cos\epsilon_2 \end{bmatrix}。$$

把方程(2)的最小二乘估计作为目标位置进行粗略估计:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (3)$$

由式(3)可计算出 $t = 1$ 和 $t = 2$ 时刻的目标位

置,从而得到起始目标航迹。

在无源测向定位系统中,由于系统获得的测量信息为角度信息(方位角和俯仰角),由式(1)不难看出角度信息所对应的观测方程是非线性的,所以通常滤波时要采用扩展卡尔曼滤波算法。但是,扩展卡尔曼滤波具有精度不高且易发散的缺点,为了克服这一缺点,我们采用转换测量的卡尔曼滤波算法替代扩展卡尔曼滤波算法。转换测量的卡尔曼滤波算法实际上就是通过目标位置解算方程(1)将角度观测信息 $(\phi_1, \epsilon_1, \phi_2, \epsilon_2)^T$ 转换成目标位置信息 $(x, y, z)^T$,从而使观测方程线性化。转换测量的卡尔曼滤波算法的状态方程和观测方程可分别表示为

$$X_k = F X_{k-1} + W_{k-1} \quad (4)$$

$$Z_k = H \cdot X_k + V_k \quad (5)$$

式中,观测信息为目标的位置信息,记作: $Z_k = [Z_x \ Z_y \ Z_z]^T$,该观测是通过计算式(1)得到的;状态方程中的 F 与观测方程中的 H 取决于选取的目标运动模型; V_k 为零均值的高斯白噪声,可记作: $V_k = [v_x \ v_y \ v_z]^T$,其中 v_x, v_y, v_z 不是统计独立的。

观测协方差阵:

$$R_k = E[V_k V_k^T] = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

解算观测协方差阵是转换测量卡尔曼滤波的核心问题。实际上,观测协方差阵可由已知的方位角和俯仰角的方差($\sigma_\phi^2, \sigma_\epsilon^2$)计算得到。下面将给出计算观测协方差阵的步骤。

式(1)中已给出了目标位置解算公式,对其中各式进行微分得:

$$\begin{cases} d\phi_1 = -\frac{\sin^2\phi_1}{y-y_1} \cdot dx + \frac{\cos^2\phi_1}{x-x_1} \cdot dy \\ d\epsilon_1 = -\frac{(z-z_1) \cdot \cos\phi_1}{R_1^2} \cdot dx - \frac{(z-z_1) \cdot \sin\phi_1}{R_1^2} \cdot dy + \frac{\cos\epsilon_1}{R_1} \cdot dz \\ d\phi_2 = -\frac{\sin^2\phi_2}{y-y_2} \cdot dx + \frac{\cos^2\phi_2}{x-x_2} \cdot dy \\ d\epsilon_2 = -\frac{(z-z_2) \cdot \cos\phi_2}{R_2^2} \cdot dx - \frac{(z-z_2) \cdot \sin\phi_2}{R_2^2} \cdot dy + \frac{\cos\epsilon_2}{R_2} \cdot dz \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}, i = 1, 2$$

将式(7)写成矩阵形式:

$$dV = C dX \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} dV &= [d\phi_1 \quad d\epsilon_1 \quad d\phi_2 \quad d\epsilon_2]^T; \\ dX &= [dx \quad dy \quad dz]^T; \\ C &= \begin{bmatrix} -\frac{\sin^2\phi_1}{y-y_1} & \frac{\cos^2\phi_1}{x-x_1} & 0 \\ -\frac{(z-z_1)\cdot\cos\phi_1}{R_1^2} & -\frac{(z-z_1)\cdot\sin\phi_1}{R_1^2} & \frac{\cos\epsilon_1}{R_1} \\ -\frac{\sin^2\phi_2}{y-y_2} & \frac{\cos^2\phi_2}{x-x_2} & 0 \\ -\frac{(z-z_2)\cdot\cos\phi_2}{R_2^2} & -\frac{(z-z_2)\cdot\sin\phi_2}{R_2^2} & \frac{\cos\epsilon_2}{R_2} \end{bmatrix}^0. \end{aligned}$$

由式(8)可得:

$$d\hat{X} = (C^T C)^{-1} C^T dV \quad (9)$$

令 $B = (C^T C)^{-1} C^T$, 由式(9)不难得到观测协方差阵的表达式:

$$\begin{aligned} R &= E[dX \cdot dX^T] = \\ &B \cdot E[dV \cdot dV^T] \cdot B^T = \\ &B \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{\phi_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\epsilon_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\phi_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\epsilon_2}^2 \end{bmatrix} \cdot B^T \quad (10) \end{aligned}$$

计算出观测协方差阵之后,就不难写出转换测量的卡尔曼滤波方程式,其形式与标准卡尔曼滤波方程^[1]一致,故此处不再列出。下面将详细介绍 CM_IMMPDF 算法的步骤。

3 CM_IMMPDF 算法

对于机动较复杂的目标而言,用任何一种运动模型都无法准确描述其运动规律。交互多模型(IMM)算法^[2,3]则巧妙地将有限多的目标运动模型结合在一起,共同描述目标的运动规律。该算法的特点是不需要机动检测,而且具有全面自适应跟踪能力。概率数据关联(PDF)算法^[4-6]是 Bar-shalom 和 Tse 在 1975 年提出的,它主要用于解决杂波环境下单目标的跟踪问题。将 IMM 算法与 PDF 算法相结合,即 IMMPDF 算法可有效解决杂波环境下机动目标的跟踪问题。

本文将 IMMPDF 与转换测量的卡尔曼滤波算法有机结合,有效解决了多站无源定位系统中杂波环境下的机动目标跟踪问题。

设目标运动规律是由多个运动模型组成的混合

系统描述的,因此状态方程可表示为

$$X_k^i = F^i X_{k-1}^i + \omega_{k-1}^i \quad (11)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, r$ 表示不同的运动模型,各模型间的转换由马尔可夫过程描述:

$$p_{ij} = p\{M_j(k+1)/M_i(k)\} \quad (12)$$

式中, p_{ij} 为目标运动模型由模型 i 到模型 j 的转移概率,其取值是由先验知识决定的。

通过目标位置解算方程(1)将角度观测信息 $(\phi_1, \epsilon_1, \phi_2, \epsilon_2)^T$ 转换成目标位置信息 $(x, y, z)^T$,从而使观测方程线性化,所以观测方程为

$$Z_k = H \cdot X_k + v_k \quad (13)$$

CM_IMMPDF 算法的步骤包括以下 6 步:

(1)权值的计算

$$u_{ij}(k-1) = P_{ij} u_i(k-1) / C_j(k-1) \quad (14)$$

$$C_j(k-1) = \sum_{i=1}^r P_{ij} u_i(k-1) \quad (15)$$

式中, $u_i(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻目标处于模型 i 的概率, $C_j(k-1)$ 为模型交互后目标处于模型 j 的概率。

(2)滤波器输入值的计算

$$X_j^0(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r u_{ij}(k-1) \hat{X}_i(k-1|k-1) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_j^0(k-1|k-1) &= \sum_{i=1}^r u_{ij}(k-1) \\ &[P_i(k-1|k-1) + \\ &DX_{ij}(k-1) \cdot DX_{ij}^T(k-1)] \quad (17) \end{aligned}$$

其中:

$$DX_{ij}(k-1) = \hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_j^0(k-1|k-1)$$

(3)相关波门的计算

各子滤波器采用相同的判别波门录取回波。波门的中心由各滤波器的量测预测值经加权后得到,其表示式为

$$\hat{Z}(k) = \sum_{j=1}^r \hat{Z}_j(k) \cdot u_j(k) \quad (18)$$

波门的体积:比较各滤波器的新息协方差阵的行列式值,取其中行列式值最大的协方差来计算波门体积。

$$V_G = C_M \cdot \sqrt{|S(k)|} \cdot G^{\frac{M}{2}} \quad (19)$$

式中, $S(k) = S_j(k), |S_j(k)| \geq |S_i(k)| (\forall i \in r, i \neq j)$ 。

$$S_i(k) = H_i P_i(k|k-1) H_i^T + R_{ik} \quad (20)$$

式中, C_M 为与量测矢量维数 M 有关的常数, G 为波

门的大小。

(4) 概率数据互联滤波(PDAF)

所有落入波门内的有效回波都将送入各子滤波器分别进行概率数据互联滤波(PDAF),滤波后输出 $\hat{X}_j(k|k)$ 和 $P_j(k|k)$ 。

(5) 模型概率的更新

$$u_i(k) = \Delta_i(k) C_i(k-1) / C$$

(21)

$$\Delta_i(k) = (1 - P_D P_C) \beta + \sum_{n=1}^N \frac{\exp[-d_{in}^2(k)/2]}{\sqrt{(2\pi)^M \cdot |S_i(k)|}}$$

(22)

式中, P_D 为检测概率, P_C 为目标的回波落入波门的概率, β 为杂波密度。

$$d_{in}^2(k) = (Z_{nk} - h_i(X_k))^T \cdot S_i^{-1}(k) \cdot (Z_{nk} - h_i(X_k))$$

(23)

$$C = \sum_{j=1}^r \Delta_j(k) C_j(k-1)$$

(24)

(6) 组合各滤波器的输出

$$\hat{X}(k|k) = \sum_{j=1}^r \hat{X}_j(k|k) u_j(k)$$

(25)

$$\hat{P}(k|k) = \sum_{j=1}^r u_j(k) (\hat{P}_j(k|k) + [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)] \cdot [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)]^T)$$

(26)

对于 CM_IMMPDF 算法来说,并不是所选取的目标运动模型越多越好,目标模型选得过多反而会增加计算量,降低跟踪性能。通常最好选取 2~3 种尽可能准确地描述目标运动规律的目标运动模型。

4 仿真结果

仿真条件:两观测站的位置坐标分别为: $(-20\text{ km}, 0, 0)$, $(20\text{ km}, 0, 0)$;采样时间间隔为 1 s;方位角和俯仰角的观测误差均为 5 mrad。目标的初始位置为: $(-100\text{ km}, 50\text{ km}, 10\text{ km})$ 。

运动轨迹分以下 3 个阶段:

运动阶段 1:匀速直线运动,各方向分速度为: $V_x = 0.2\text{ km/s}$, $V_y = 0\text{ km/s}$, $V_z = 0$;运行时间为 150 s;

运动阶段 2:匀速圆周运动,角速度为 0.157 rad/s ,向心加速度为 74 m/s^2 ,线速度为 471 m/s ,圆半径为 3 km,运行时间为 20 s;

运动阶段 3:匀速直线运动,各方向分速度为: $V_x = -0.2\text{ km/s}$, $V_y = 0\text{ km/s}$, $V_z = 0$;运行时间为 130 s。

检测概率 P_D 为 0.9,观测落入相关门的概率

P_C 为 0.98,相关门 $G = 16$,杂波密度 β 分别取 0.006 25/mr^2 和 0.016 /mr^2 。

在相同的仿真条件下,对基于 CV-CA、CV-Singer、CV-CS(当前统计模型)以及 CV-HT(水平转动模型)4 种混合模型的 CM_IMMPDF 算法进行 1 000 次蒙特卡罗实验,对它们的失跟率进行比较,表 1 给出了仿真结果。

表 1 不同杂波密度下各模型算法所对应的失跟率

Table 1 Percentage of tracks lost in different clutter densities

模型	杂波密度/ $(\text{mr}^2)^{-1}$	失跟率/(%)
CV-CA	0.006 25	6
CV-Singer		8
CV-CS		6
CV-HT		5
CV-CA	0.016	47
CV-Singer		69
CV-CS		65
CV-HT		39

从表中的结果可见,在杂波密度较低的情况下,各混合模型所对应的失跟率相当;在杂波密度较高的情况下,CV-HT 模型对应的失跟率最低,因为该混合模型能较准确地描述目标的运动规律。图 1 给出了基于 CV-HT 混合模型的 CM_IMMPDF 算法得到的目标位置的均方根误差(RMS)曲线图。

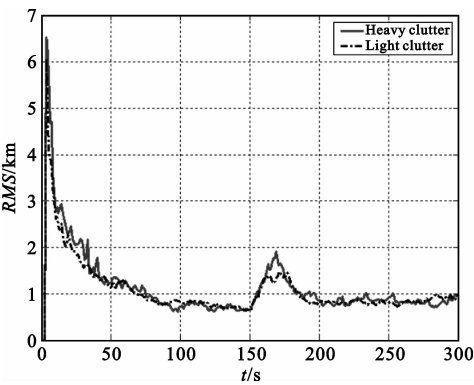


图 1 CV-HT 模型对应的目标位置的 RMS 曲线图
Fig.1 RMS position error for CV-HT model

从仿真结果不难看出,CM_IMMPDF 算法在选择合适的目标运动模型的前提下,对杂波环境下机动目标的跟踪效果还是比较理想的,目标位置的 RMS 基本在 1 km 以下,只有在目标做转弯动作时 RMS 的值略大,并且失跟率也较低。

5 结束语

本文提出的 CM_IMMPDF 算法是针对多站测向

无源定位系统对目标进行观测所获得的观测方程是非线性的特点提出的。由于该系统的这一特点,传统的跟踪算法中通常选用扩展卡尔曼滤波,但这一算法的缺点是不稳定、易发散。而本文提出的算法则有效地克服了这一缺点,利用转换测量的卡尔曼滤波可将非线性的观测方程线性化,提高算法的鲁棒性;另外,由于有机结合了 IMM 和 PDA 算法,使目标运动模型更加合理化,并可将目标从杂波中分离出来,有效地解决了多站测向无源定位系统中机动目标的跟踪问题,为现代多站无源定位系统实施对敌目标跟踪提供了可靠的理论依据。但该算法存在的问题是,当杂波密度较高时,失跟率也会增大,这将是我们要进一步研究解决的问题。另外,该算法如与联合概率数据关联算法(JPDA)结合,则还可以完成多机动目标的跟踪,具体内容可见文献[7]。

参考文献:

- [1] 蔡庆宇,薛毅,张伯彦.相控阵雷达数据处理及其仿真技术[M].北京:国防工业出版社,1997.
CAI Qing - yu, XUE Yi, ZHANG Bo - yan. Phased array radar data processing and the simulation techniques[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [2] Blackman S, Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking System[M]. Boston: Artech House, 1999.
- [3] Mazor E, Averbuch A, Bar - Shalom Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking: a survey[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34 (1): 103 - 123.
- [4] Dufour F, Mariton M. Tracking a 3D maneuvering target with

passive sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(4): 725 - 739.

- [5] Houles A, Bar - Shalom Y. Multisensor tracking of a maneuvering target in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2): 176 - 189.
- [6] WANG Xuezh, Challa S, Evans R. Gating techniques for maneuvering target tracking in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 1087 - 1097.
- [7] 陈玲. 无源定位与跟踪技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
CHEN Ling. Study of passive location and tracking technique [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)

作者简介:

陈 玲(1972 -),女,江西南昌人,1994 年于郑州大学获学士学位,2005 年于北京航空航天大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为无源雷达的目标跟踪及数据互联等;

CHEN Ling was born in Nanchang, Jiangxi Province, in 1972. She received the B. S. degree from Zhengzhou University and the Ph. D. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1994 and 2005, respectively. She is now a lecturer of The First Aeronautical Institute of Air Force. Her research interests include multitarget tracking and data association of passive radar.

Email: jingle_cl@sina.com

陈德煌(1957 -),男,福建莆田人,1987 年获北京航空航天大学博士学位,现为教授,主要研究方向为通信导航装备发展与维护。

CHEN De-huang was born in Futian, Fujian Province, in 1957. He received the Ph. D. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1987. He is now a professor of the First Aeronautical Institute of Air Force. His research concerns communication and navigation.

关于征集本刊论文获奖证书、证明的通知

《电讯技术》从 1958 年创刊起,至今已经走过了半个多世纪的历程,她的每一个成长脚步都离不开您们长期以来的关注、关心、支持与厚爱,在此向您们表示衷心的感谢!

为了进一步完善本刊已发表论文的后期质量跟踪与监测体系,加强与作者的沟通和联系,及时了解与客观评价本刊已发表论文的学术影响力以及产生的社会效应和间接经济效益,本刊编辑部现向广大作者征集各种获奖证书或获奖证明。如果您在本刊发表论文后:获国家级或省部级成果奖;被有关机构采纳(包括被新闻媒体报道);产生间接经济效益等,请提供有效获奖证书及产生相关经济效益的证书/证明复印件。凡提供者今后向本刊投稿时将优先处理,通过评审后优先安排发表,免收一切费用,从优支付稿酬,并及时刊登作者信息和获奖奖项,以示褒奖。

获奖证书/证明可以通过邮局寄送,也可扫描成电子版通过电子邮件发送。邮局寄送地址:四川省成都市营康西路 85 号《电讯技术》编辑部,邮编:610036;电子邮件:dxjs@swiet.com.cn 或 dianxunjishu@china.com。更多信息请关注本刊网站:www. teleonline. cn。

对于您的合作与支持表示感谢!

《电讯技术》编辑部