

目标跟踪在坦克防撞中的研究与应用

余发山 李月 仝兆景

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 考虑到毫米波雷达在噪声源较多的战场上存在较大的测量误差,为了提高毫米波雷达在坦克防撞系统中采集数据的可靠性,提出了用交互式多模型卡尔曼滤波算法对坦克前方机动车辆进行准确的目标跟踪。该算法运用不同机动模型的卡尔曼滤波器进行并行处理,以模型匹配似然函数为基础更新模型概率,并组合所有滤波器的修正后的状态估计值得到状态估计。仿真结果表明,该算法能够有效的跟踪坦克前方行驶的车辆,获悉其距离、速度等信息,具有跟踪精度高的特点,降低了虚警率。

关键词: 交互多模型;坦克;毫米波雷达;雷达组网;目标跟踪

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research and application on target tracking in tanks anti-collision

Yu Fashan Li Yue Tong Zhaojing

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Considering the millimeter wave radar existing more measurement errors because of noise interference on the battlefield, in order to make the data of millimeter wave radar more reliable in the tank in anti-collision system, and use the Kalman filter algorithm to track the near goal in front of tanks. The algorithm uses different dynamic model of Kalman filter for parallel processing, thus realize the parallel filtering and update probability of the model on the basis of matching likelihood function, and combines with all filter to obtain state estimation. The algorithm can effectively track the chariot in front of the tank, acquire of the distance, speed and other information. It has the characteristics of high precision, and reduce the false alarm rate.

Keywords: interacting multiple model(IMM); tank ; millimeter wave radar; radar netting; target detection

1 引言

坦克密闭性很强,驾驶员只能通过潜望镜获得前方的有限视野,这使得获悉前方路况信息尤为重要。本文进行了目标跟踪在坦克防撞雷达中的研究。目前目标跟踪相关的诸多算法以及改进算法相继被提出,但是很少用在坦克防撞雷达中,而基于目标跟踪的坦克自适应巡航、坦克防撞系统的研究具有一定的实际意义。

文献[1]提出算法能够快速准确的进行目标跟踪,但是基于数字图像处理,在战场上干扰源众多的环境下不能起到显著的效果;文献[2]研究的是舰载雷达目标跟踪技术,不能较好的适合地面战场;文献[3]适合对快速目标的跟踪,不适合地面对机动性较弱的作战车辆目标跟踪。

Kalman 滤波算法在目标跟踪应用中,不必知道目标的运动模型就能实时地修正目标的状态参量(距离、速度等),具有良好的适应性。但是当目标实施突然转弯或加减速

时,仅仅采用基本的卡尔曼滤波算法往往得不

到理想的效果,这时需要采用自适应算法。交互多模型是一种软切换算法,把交互式多模型目标跟踪算法应用到坦克防撞系统中,能够实时的监测到前方车辆的速度距离等信息,给驾驶员驾驶提供极大的便利性。由于战场上装甲车辆相机动性较差,所以用匀速模型和匀加速运动模型两种常用的机动状态就可以近似模拟车辆的运动,加之这两种模型计算量小,比较适合作战车辆目标跟踪。

2 坦克防撞技术分析

坦克防撞系统,由毫米波雷达负责速度、距离信息的采集,将每个毫米波雷达采集的速度、距离信息进行数据融合,由数字信号处理器处理,显示器负责信号的输出,指导驾驶。系统结构框图如图1所示。

2.1 雷达的选取

用于目标跟踪的声纳、光学测距传感器应用领域很多,

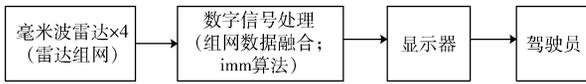


图 1 坦克防撞系统流程

但是在机车轰鸣声以及硝烟弥漫的环境中,不适合使用。毫米波雷达则有很强的环境适应能力,毫米波波长远大于一般粉尘颗粒的 $2\sim 10\ \mu\text{m}$,可以正常衍射通过,一般的雾水颗粒直径在 $20\sim 30\ \mu\text{m}$,对测距亦没有影响。综上所述,毫米波雷达在近距离测速测距功能上有很强抗干扰能力,能够满足强干扰的环境^[4-5]。3种雷达性能的比较如表1所示。

表 1 3种频段的雷达性能比较

雷达性能	微波	毫米波	红外
测速测距能力	有	有	无
恶劣气候适应性	优	良	极差
烟尘环境适应性	优	优	极差
定位精度	差	良	高

从表1中可以看出毫米波雷达较其他几种雷达有明显的优越性。故选用毫米波雷达进行速度、距离信息的采集。

2.2 毫米波雷达组网及数据融合

毫米波雷达为系统提供信号的采集。由于战场上环境复杂,战场地形参差不齐,加之毫米波雷达的波束宽度窄,要使坦克对前方有较宽的探测范围,需要在坦克前方安装4个毫米波雷达。利用雷达组网技术将每一个毫米波雷达检测到目标的移动速度、距离进行数据融合,得到可靠的移动距离数据。

雷达组网要求各个雷达在时间上同步,使发射机与接收机有共同的时间标准,4个雷达传感器既是发射机又是接收机,通过电扫开关控制,其中的1个担当发射机,反射信号被4个接收机接收,得到4组不同的速度距离信息。雷达组网得到的速度和距离都是通过对每个传感器测得目标信息的相互融合而得到的。得到的速度和距离为目标跟踪提供可靠的数据支撑。毫米波雷达组网技术在文献[6-7]中已有解释。雷达组网的优点是比单个雷达测的数据更为精确,探测范围更广。

经过采集的速度、距离和偏转角度的信息,通过数字信号处理器进行处理,通过交互多模型算法进行滤波,得到更为精确的数据,为坦克驾驶员进行决策做准备^[8]。

3 交互式多模型目标跟踪算法

交互式多模型卡尔曼滤波原理采用多个Kalman滤波器并行处理,不同的运动模式用不同的状态空间模型描述。在每一时刻,某个模型混合前一个时刻的所有滤波器状态估计值来获得固定特定模型匹配的初始条件,通过对各个

模型并行实现滤波,最后以模型匹配似然函数为基础更新模型概率,并组合所有滤波器修正后的状态估计值得到状态估计。IMM算法流程图如图2所示。

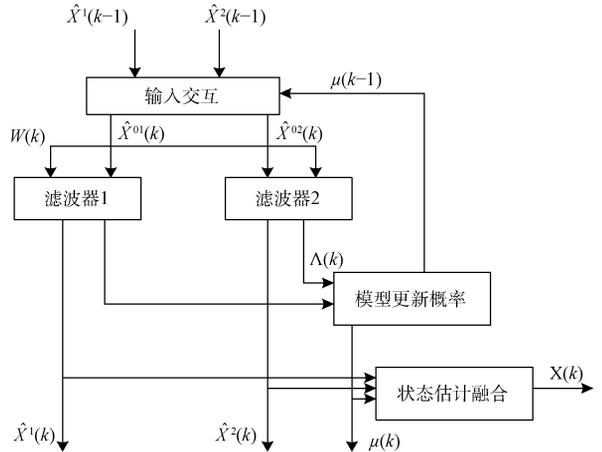


图 2 IMM算法流程

假定目标有 r 种运动状态,对应的有 r 个运动模型,设第 j 个模型表示的目标状态方程为:

$$X_j(k+1) = \Phi_j(k)X_j(k) + G_j(k)W_j(k) \quad (1)$$

量测方程为:

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \quad (2)$$

$$\text{概率转移矩阵 } P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{r1} & \cdots & p_{rr} \end{bmatrix}$$

IMM算法每次递推主要分为输入交互、卡尔曼滤波、模型概率更新和输出交互4个步骤。

1) 输入交互

目标的状态估计 $\hat{X}_{0j}(k-1|k-1)$ 与上一步中每个滤波器的模型概率 $\mu_j(k-1)$ 得到的混合估计 $\hat{X}_{0j}(k-1|k-1)$ 和协方差 $P_{0j}(k-1|k-1)$,将混合估计作为当前循环的初始状态。具体的参数计算如下:

模型 j 的预测概率为:

$$\bar{c}_j = \sum_{i=1}^r p_{ij}\mu_i(k-1) \quad (3)$$

模型 $i \sim j$ 的混合概率:

$$\mu_{ij}(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r p_{ij}\mu_i(k-1) / \bar{c}_j \quad (4)$$

模型 j 的混合状态估计:

$$\hat{X}_{0j}(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r \hat{X}_i(k-1|k-1)\mu_{ij}(k-1|k-1) \quad (5)$$

模型 j 的混合协方差估计:

$$P_{0j}(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r \mu_{ij}(k-1|k-1) \{ P_i(k-1|k-1) + [\hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_{0j}(k-1|k-1)] \cdot [\hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_{0j}(k-1|k-1)]^T \} \quad (6)$$

式中： p_{ij} 模型 $i \sim$ 模型 j 的转移概率； $\mu_j(k-1)$ 为模型 j 在 $k-1$ 时刻的概率。

2) 卡尔曼滤波(模型 j)

以 $\hat{X}_{ij}(k-1|k-1)$ 、 $P_{0j}(k-1|k-1)$ 及 $Z(k)$ 作为输入进行 Kalman 滤波, 来更新预测状态 $\hat{X}(k|k)$ 和滤波协方差 $P_j(k|k)$ 。

预测

$$\hat{X}_j(k|k-1) = \Phi_j(k-1)\hat{X}_{0j}(k-1|k-1) \quad (7)$$

预测误差协方差:

$$P_j(k|k-1) = \Phi_j(k-1)P_{0j}(k-1|k-1)\Phi_j^T + G_j Q_j G_j^T \quad (8)$$

Kalman 增益:

$$K_j(k) = P_j(k|k-1)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}P_j(k|k-1)\mathbf{H}^T + R]^{-1} \quad (9)$$

滤波:

$$\hat{X}_j(k|k) = \hat{X}_j(k|k-1) + K_j(k)[Z(k) - \mathbf{H}(k)\hat{X}_j(k|k-1)] \quad (10)$$

滤波协方差

$$P_j(k|k) = [I - K_j(k)\mathbf{H}(k)]P_j(k|k-1) \quad (11)$$

3) 模型概率更新

采用似然函数来更新模型概率 $\mu_j(k)$, 模型 j 的似然函数为:

$$\Lambda_j(k) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |S_j|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}v_j^T S_j^{-1}(k)v_j\right\} \quad (12)$$

式中: $v_j(k) = Z(k) - \mathbf{H}(k)\hat{X}_j(k|k-1)$

$$S_j(k) = \mathbf{H}(k)P_j(k|k-1)\mathbf{H}(k)^T + R(k)$$

则模型 j 的概率为:

$$\mu_j(k) = \Lambda_j(k) \bar{c}_j / c \quad (13)$$

式中: j 为归一化常数, 且 $c = \sum_{j=1}^r \Lambda_j(k) \bar{c}_j$ 。

4) 输出交互

基于模型概率, 对每个滤波器的估计结果加权合并, 得到总的状态估计 $\hat{X}(k|k)$ 和总的协方差估计 $P(k|k)$ 。

其中的协方差估计:

$$P(k|k) = \sum_{j=1}^r \mu_j(k|k) \{P_j(k|k) + [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)] \cdot [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)]^T\} \quad (14)$$

所以, 滤波器的总输出是多个滤波器估计结果的平均值。权重即为模型概率^[9-10]。

4 建模与仿真

模型建立: 坦克防撞毫米波雷达对前方进行检测, 检测到前方有一敌方车辆同向行驶, 初始距离 120 m, 在 0~16 s 时, 两车相对速度为 -3 m/s, 方位角为 2°。在 16~20 s 时, 敌方车辆向右偏转, 与我方坦克相对角加速度为 1°/s²。坦克加速, 与前车的纵向相对加速度为 $a = -1.8^\circ/s^2$,

系统的噪声为 $\sigma_a = 0.3$ m/s, 量测误差为 $\sigma_1 = 1$ m, $\sigma_2 = 0.5$ m/s, $\sigma_3 = 0.2^\circ/s$ 。用蒙特卡罗法对跟踪器仿真 400 次。

本模型才用的马尔可夫链转移矩阵为 $\mathbf{P} = [0.95, 0.05; 0.05, 0.95]$, 采用的运动模型为匀速运动模型和匀加速运动模型。

状态方程和量测方程如式(15)所示。

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi(k)X(k) + G(k)W(k) \\ Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \end{cases} \quad (15)$$

匀速运动模型的参数:

$$\Phi_1(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_1(k) = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} 0.3^2 & 0 \\ 0 & 0.3^2 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V}_1(k) = \begin{bmatrix} 1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2^2 \end{bmatrix}$$

匀加速运动模型的参数:

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} T^2/4 & 0 \\ T/2 & 0 \\ 0 & T^2/4 \\ 0 & T^2/4 \\ 0 & T/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_2 = \mathbf{H}_1, \mathbf{W}_2 = \mathbf{W}_1, \mathbf{V}_2(k) = \mathbf{V}_1(k)$$

仿真结果如图 3~图 8 所示。

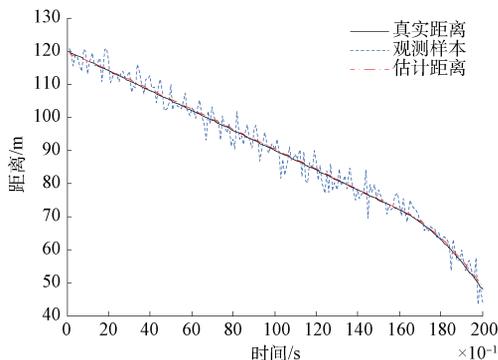


图 3 相对距离曲线

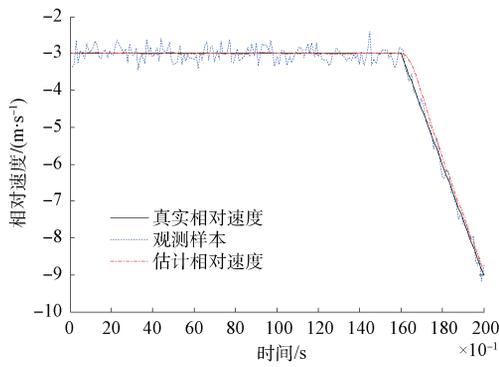


图 4 相对速度曲线

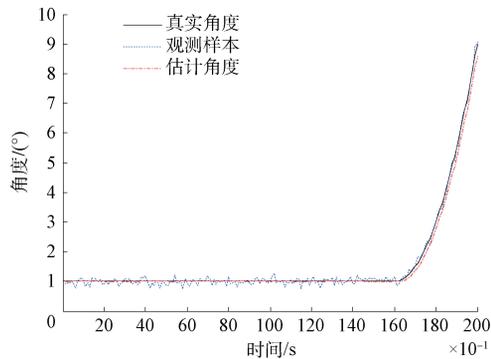


图 5 偏转角度曲线

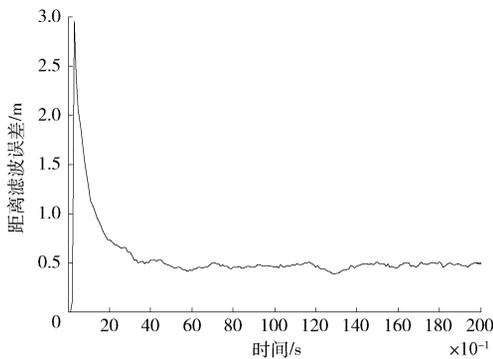


图 6 距离滤波误差曲线

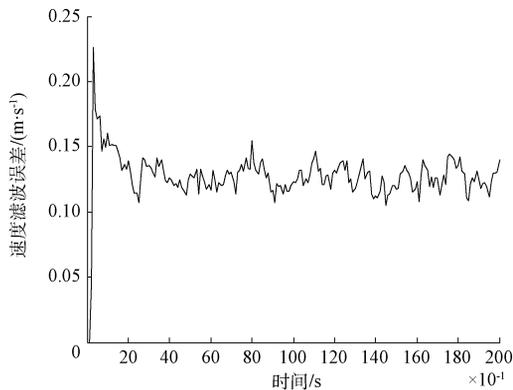


图 7 速度滤波误差曲线

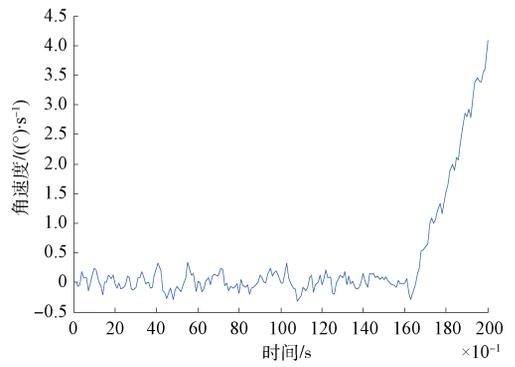


图 8 角度误差曲线

从仿真图形可以看出:采用的 IMM 算法能够将测距误差控制在 0.5 m 左右,系统距离误差为 1 m;速度滤波误差为 0.12 m/s 左右,系统速度噪声为 0.3 m/s;角度滤波误差为 0.06°左右,系统角度系统噪声为 0.2°。能够表明该算法具有计算量小、精度高的特点,能够适应战场的需要。

5 结 论

重点研究了基于交互式卡尔曼滤波器的目标跟踪在毫米波雷达坦克防撞中的应用,并且运用 MATLAB 进行了仿真。仿真结果表明,交互式多模型卡尔曼滤波能够比较准确地测量跟踪目标的距离、速度和角度信息,为坦克提供可靠的前方敌方战车的数据,将会在灵活多变的战场发挥重要的作用。

参考文献

- [1] 李红岩,毛征.一种基于算法融合的运动目标跟踪算法[J].国外电子测量技术,2013,32(12):36-40.
- [2] 刘炬.基于 IMM 舰艇雷达目标跟踪算法的研究[J].土木建筑与环境工程,2013(S2):164-169.
- [3] 王晓东,贾继鹏.一种基于 IMM-PDA-UKF 机动目标跟踪算法[J].电子测量技术,2014,37(10):5-8.
- [4] 李飞,曹峰.汽车防撞雷达报警算法[J].现代雷达,2013,35(12):31-33.
- [5] 唐尧,杜自成,段芳芳,等.机载雷达对地目标跟踪研究[J].火控雷达技术,2012(1):9-14.
- [6] 徐魁,赵修岭.车用毫米波雷达组网传感器组网技术研究[J].微计算机信息,2007,23(8-1):164-166.
- [7] 张鹏,张建业.车载多雷达组网实时航迹误差评估算法研究[J].电光与控制,2007,14(6):71-73.
- [8] 骆钟频,陈晓.用于地铁的 OFDM 测距雷达的 FPGA 实现[J].电子测量技术,2015,38(3):87-91.
- [9] 戴晓强,刘维婷.基于模糊自适应 IMM 算法的机动目标跟踪算法[J].船舶工程,2007,29(3):1-4.
- [10] 张世仓,胡新梅.基于修正无偏转换测量的交互式多模型算法[J].火控雷达技术,2009,38(4):78-82.

作者简介

余发山,1977年毕业于焦作矿业学院电气自动化专

业,教授,博士生导师。主要从事工业过程控制、运动控制及故障诊断等方面的教学和科研工作。

E-mail:yufs@hpu.edu.cn

(上接第31页)

- [9] 黄晓颖,童余德,边少锋.基于Matcom混合编程的ICCP算法仿真实现[J].测绘科学技术学报,2011,28(3):186-189.
- [10] 刘帅.GPS/INS组合导航算法研究与实现[D].郑州:解放军信息工程大学,2012.
- [11] 吉建娇.舰载惯导仿真系统的设计与实现[D].南京:南京理工大学,2013.
- [12] 罗恬颖,徐景硕,汤文超,等.一种新的船用捷联惯导系统数字仿真器的设计[J].计算机测量与控制,2014,22(9):2973-2976.

(上接第36页)

作者简介

屠雨,在读硕士研究生,主要研究方向为汽车电子学、CAN总线等。

E-mail:tuyujiayou@163.com

作者简介

程传奇,1989年出生,博士研究生,主要研究领域为视觉导航、惯性导航与组合导航。

E-mail:legend3q@163.com

程祥,1977年出生,工程师,主要研究领域为水利测量与工程测量。

郝向阳,1966年出生,教授,博士生导师主要研究领域为计算机视觉、可视化导航与位置服务。

赵漫丹,1990年出生,博士研究生,主要研究领域为导航定位与位置服务。

张凤登,教授,主要研究方向为汽车电子学、CAN总线、FlexRay等。

E-mail:FDZhang@usst.edu.cn

单冰华,在读硕士研究生。主要研究方向为汽车电子学,CAN总线等。

E-mail:shanbinghua2014@163.com