



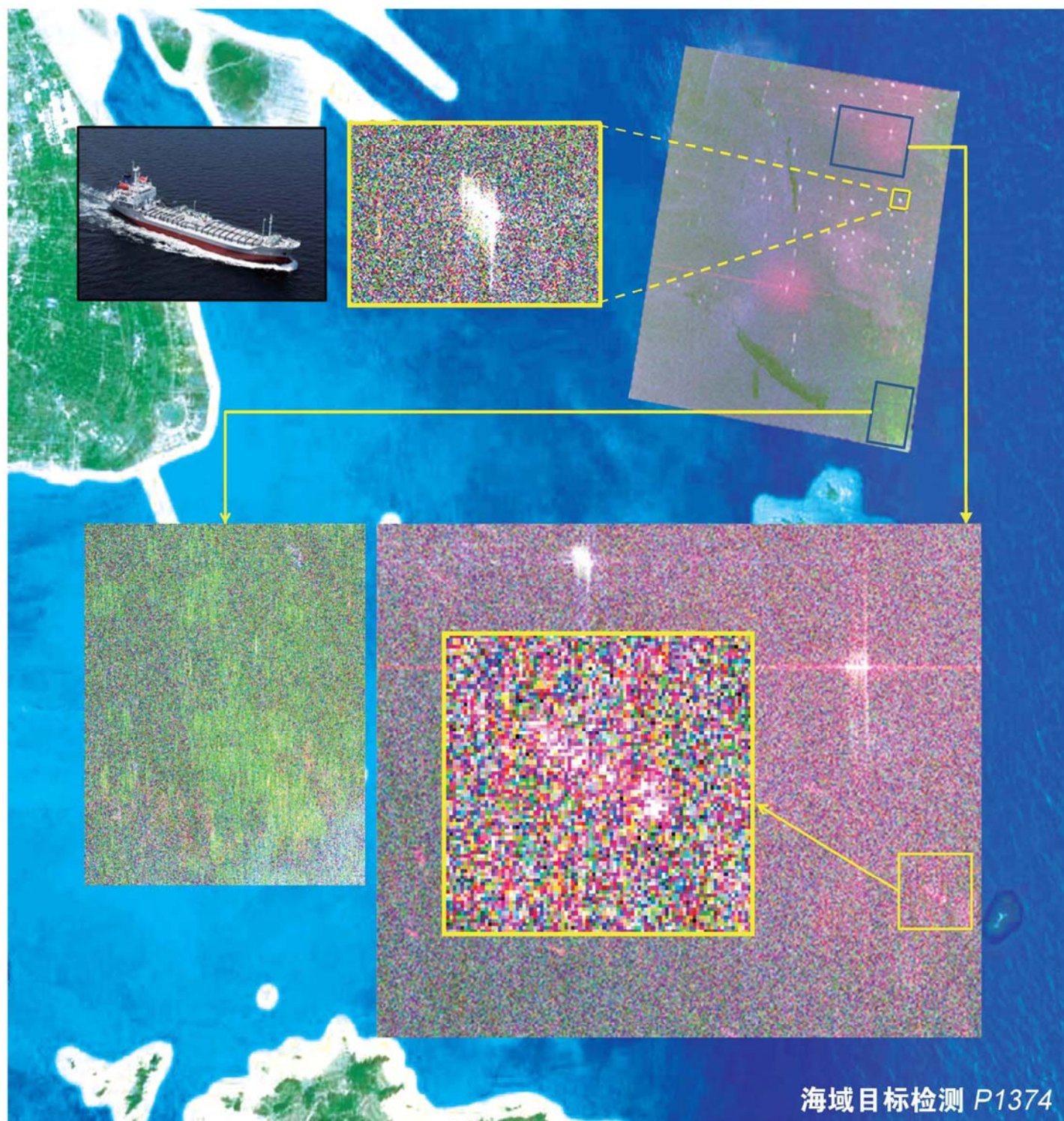
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

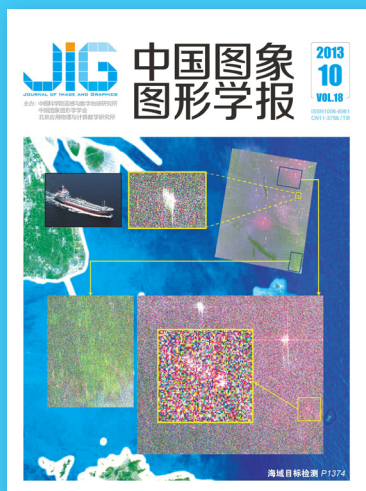
中国图象图形学报

2013
10
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



海域目标检测 P1374



第18卷第10期（总第210期）

2013年10月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

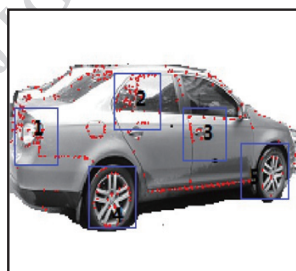
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

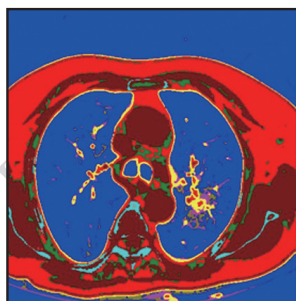
国内定价 50.00元



结合几何划分技术和最大期望值/最大边缘概率算法的彩色图像分割(第1270页)



联合生成与判别模型的目标检测与跟踪(第1293页)



聚类核值相似区特征点的医学影像分类(第1322页)

综述

手掌静脉图像识别技术综述

吴微, 苑玮琦 1215

视频检测烟雾的研究现状

罗胜, Jiang Yuzheng 1225

图像处理和编码

自适应分数阶微分的复合双边滤波算法

胡伏原, 姒绍辉, 张艳宁, 孙瑾秋 1237

曲波域高斯混合尺度模型的图像压缩重构

纪建, 李晓, 许双星 1247

结合图像信号显著性的自适应分块压缩采样

王瑞, 余宗鑫, 杜林峰, 万旺根 1255

四阶各向异性扩散方程在图像放大中的应用

李鹏, 邹杨, 姚正安 1261

图像分析和识别

结合几何划分技术和最大期望值/最大边缘概率算法的彩色图像分割

赵泉华, 李玉, 何晓军 1270

自适应加权完全局部二值模式的表情识别

胡敏, 许艳侠, 王晓华, 黄忠, 朱弘 1279

面向局部光照突变的时间和空间中心对称局部二值模式算子

卞紫涵, 房胜, 徐田帅 1285

联合生成与判别模型的目标检测与跟踪

刘倩, 侯建华, 牟海军, 赵巍, 笪邦友 1293

目标不同视角下观察信息的迁移和再利用

张索非, 吴海洋, 吴镇扬 1302

图像理解和计算机视觉

张量分析在视差图生成中的应用

赵戈, 蔺兰, 唐延东, 王耀南 1307

采用旋转匹配的二进制局部描述子

卢鸿波, 孙愿, 张志敏 1315

医学图像处理

聚类核值相似区特征点的医学影像分类

李博, 曹鹏, 栗伟, 赵大哲 1322

异常宫颈细胞核的自适应局部分割

张灵, 李静立, 陈思平, 汪天富, 江少锋, 刘少雄 1329

地理信息技术

Hilbert填充曲线与空间分布模式探测的点数据集空间划分方法

吴明光 1336

采用案例归纳推理进行道路网智能选取

郭敏, 钱海忠, 黄智深, 刘海龙, 王骁 1343

遥感图像处理

红外目标抗干扰跟踪算法

褚桐, 马惠敏 1354

MSTAR图像的矩特征分析与多阈值分割

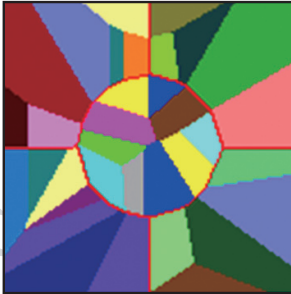
倪维平, 严卫东, 吴俊政, 郑刚, 芦颖 1364

改进Notch滤波的全极化SAR数据船舶检测方法

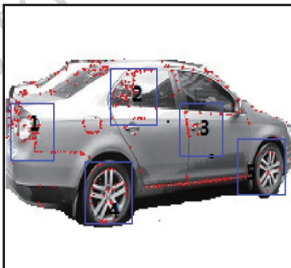
孙渊, 王超, 张红, 张波, 吴樊 1374

CONTENTS

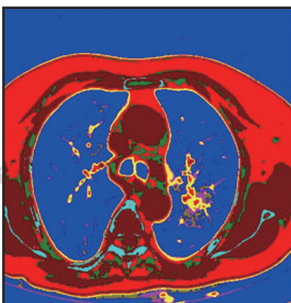
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Color image segmentation using geometry tessellation technique and EM/MPM algorithm(P1270)



Object detection and tracking combining generative and discriminative model(P1293)



Medical image classification based on cluster univalue segment assimilating nucleus feature point(P1322)

Review

- A survey of palm-vein image recognition
Wu Wei, Yuan Weiqi 1215
- State-of-art of video based smoke detection algorithms
Luo Sheng, Jiang Yuzheng 1225

Image Processing and Coding

- Multi-bilateral filtering algorithm based on adaptive fractional order differentiation
Hu Fuyuan, Si Shaohui, Zhang Yanning, Sun Jinqiu 1237
- Image reconstruction algorithm based on the curvelet gaussian scale mixture model
Ji Jian, Li Xiao, Xu Shuangxing 1247
- Saliency-based adaptive block compressive sampling for image signals
Wang Rui, Yu Zongxin, Du Linfeng, Wan Wanggen 1255
- Fourth-order anisotropic diffusion equations for image zooming
Li Peng, Zou Yang, Yao Zheng'an 1261

Image Analysis and Recognition

- Color image segmentation using geometry tessellation technique and EM/MPM algorithm
Zhao Quanhua, Li Yu, He Xiaojun 1270
- Facial expression recognition based on AWCLBP
Hu Min, Xu Yanxia, Wang Xiaohua, Huang Zhong, Zhu Hong 1279
- TSCS-LBP operator oriented to the local illumination mutation
Bian Zihan, Fang Sheng, Xu Tianshuai 1285
- Object detection and tracking combining generative and discriminative model
Liu Qian, Hou Jianhua, Mou Haijun, Zhao Wei, Da Bangyou 1293
- Transfer and reusing of object view information
Zhang Suofei, Wu Haiyang, Wu Zhenyang 1302

Image Understanding and Computer Vision

- Disparity map generation with tensor analysis
Zhao Ge, Lin Lan, Tang Yandong, Wang Yaonan 1307
- Binary local descriptor based on rotative matching
Lu Hongbo, Sun Yuan, Zhang Zhimin 1315

Medical Image Processing

- Medical image classification based on cluster univalue segment assimilating nucleus feature points
Li Bo, Cao Peng, Li Wei, Zhao Dazhe 1322
- Segmentation of abnormal cervical nuclei using an adaptive and local approach
Zhang Ling, Li Jingli, Chen Siping, Wang Tianfu, Jiang Shaofeng, Liu Shaoxiong 1329

Geoinformatics

- Hilbert space-filling curve and spatial pattern detection-based spatial partitioning approach to point geospatial data
Wu Mingguang 1336
- Intelligent road network selection method based on cases inductive reasoning
Guo Min, Qian Haizhong, Huang Zhishen, Liu Hailong, Wang Xiao 1343

Remote Sensing Image Processing

- Study of infrared anti-jamming tracking algorithm
Chu Tong, Ma Huimin 1354
- Moment feature analysis of MSTAR image and multiple thresholds based segmentation
Ni Weiping, Yan Weidong, Wu Junzheng, Zheng Gang, Lu Ying 1364
- Polarimetric SAR ship detection using improved notch filter
Sun Yuan, Wang Chao, Zhang hong, Zhang bo, Wu Fan 1374

中图分类号: TN976 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)10-1354-10

论文引用格式: 褚桐, 马惠敏. 红外目标抗干扰跟踪算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(10): 1354-1363. [DOI: 10.11834/jig.20131018]

红外目标抗干扰跟踪算法

褚桐, 马惠敏

清华大学电子工程系, 北京 100084

摘要: 红外跟踪是一种极为重要的跟踪体制。针对十字型红外点源探测过程进行仿真建模, 设计空间映射、信号采样及信号表示模块, 实现了由目标空间特性到有效信号表示的完整信号生成流程的仿真。提出了幅值变化率与自适应波门两个新特征用于描述目标信号, 结合传统的幅值与时延特征, 设计状态转换关系进行信号分析及抗干扰跟踪。建立了完整的3维仿真系统平台, 对仿真模型与跟踪算法进行了功能验证, 证明了模型与算法的有效性。

关键词: 红外点源; 幅值变化率; 自适应波门; 状态转换

Study of infrared anti-jamming tracking algorithm

Chu Tong, Ma Huimin

Department of Electronical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The Infrared target tracking system is a very important tracking system. In this paper, the detection process of the cross-shaped infrared point source tracking system is modeled through space mapping, signal sampling, and signal representation. With these models, this paper describes the simulation of the whole signal generation process. Two new features, the amplitude change rate and adaptive gate, are proposed for signal description. Combined with traditional characteristics of amplitude and time delay, this paper provides a status transfer framework for signal analysis and anti-jamming tracking. Furthermore, a complete 3D simulation platform is built to test the simulation model as well as the tracking algorithm and the result proves the validity of them.

Key words: infrared point source; amplitude change rate; adaptive tracking gate; status transform

0 引言

红外探测跟踪不受光照条件影响, 在监控、自动导航等领域有着重要的应用。红外跟踪依据处理信号生成方式可以划分为红外点源跟踪和红外成像跟踪两大类。点源跟踪利用目标信号的采样特征跟踪目标, 如基于调幅调制盘系统和基于调频圆锥扫描系统^[1], 具有机动灵活, 费效比高等优点^[1], 在导航领域具有极大的研究价值。

十字型探测系统是当前较为常用的红外点源目标探测系统, “采用圆锥扫描方式, 在探测器平面形

成像点的扫描圆, 进而由扫描圆与探测器上的十字型探测臂阵列相交产生对应的信号”^[2]。

信号生成仿真是跟踪算法研究的前提, 信号生成过程的模拟仿真需要保证可靠性、完整性和鲁棒性。可靠性指仿真数学建模符合探测器真实工作过程, 生成信号的特征与真实信号特征一致; 完整性指仿真包含由数据源(目标的实际信息)到数据输出(硬件的采样数据)转换的全部过程; 鲁棒性指在不同交会条件下仿真过程均能准确表现信号生成过程。张文华和石虎山等人对十字型探测器的采样过程进行了数学建模^[3-4], 但均缺乏探测完整流程的建模描述。李凡等人对点源探测器的作用距离进行了

收稿日期: 2012-12-03; 修回日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(60502013); 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2006AA01Z115)

第一作者简介: 褚桐(1987—), 男, 清华大学电子工程系硕士研究生, 主要研究方向为3维建模仿真。E-mail: chut1987@gmail.com

研究,对红外信号幅值的计算有一定的意义^[5],但缺乏对目标空间位置表述的建模。谢邦荣等人对探测器的工作原理进行了较详细的说明^[6],但缺乏数学上的描述。

红外点源跟踪相比成像跟踪能够利用的目标信息更少,仅仅依靠当前时刻的目标特征无法对目标和干扰进行有效区分,因此抗干扰跟踪算法必须结合具体应用环境和交会过程选择恰当的特征,并充分利用历史信息进行目标判决。在这一方面,郭新军等人提出如时间相关选择等7种点源跟踪技术准则^[7],但没有给出各种方法的应用条件。于松书等人对视场收缩技术进行了说明^[8],但是缺乏应用框架的描述。

同时,红外干扰是点源跟踪中必须考虑的因素。干扰模拟目标的辐射特征,通过等效能量中心诱偏目标^[9-10],因而利用单一目标特征无法有效区分目标与干扰。针对复杂交会条件,有限状态机通过状态定义可有效简化跟踪模型^[11]。

针对以上问题,首先对十字型红外点源信号探测过程实现完整的建模描述,模拟由空中目标特征到探测器采样信号的转换过程;然后提出幅值变化率和自适应波门两种新特征用于目标描述,并设计基于状态转换的抗干扰跟踪框架;最后采用 OpenGL 和 C++ 构建仿真系统,对跟踪算法进行测试。

1 十字型红外探测器点源探测过程建模

十字型红外点源探测系统包括光学成像系统与硬件信号处理电路两部分。由于空中目标和硬件输出信号无法关联,因此试图直接建立二者间变化关系的数学模型十分困难。针对这一问题,采用模型分解的方法简化仿真建模过程。模型分解需要从模型功能性和信号连贯性两方面给予考虑。功能性指分解的子模块具有相对独立的功能,彼此间不产生影响;连贯性指子模块间按照信号流的流动方向可进行串联,系统整体的输出是信号通过每一子模块后的最终输出结果。依据以上原则,将点源探测系统划分为3个独立子模块分别进行建模,其中空间映射模块仿真探测器光学成像过程,信号采样模块仿真硬件信号发生过程,信号表示模块仿真有效信号存储表达过程。

通过数学上的映射概念可以更清晰地表明各个模块的功能与相互联系。定义目标特征向量 $X = (J, x, y, z)$, 其中 J 表示目标的辐射特性, (x, y, z) 表示目标的空间位置特性。最终探测器的四路有效输出信号表示 $Y = (s_1, s_2, s_3, s_4)$, 其中 s_i 表示第 i 路有效信号的描述特征。定义映射 F 表示整体信号转换的映射, 即

$$F: X \rightarrow Y$$

定义空间映射模块 G_1 、信号采样模块 G_2 和信号表示模块 G_3 三部分, 映射关系转换为

$$Y = F(X) = G_1(G_2(G_3(X)))$$

1) 空间映射模块: 目标特征向量 $X = (J, x, y, z)$ 向探测器平面特征向量 $Z_1 = (v, \theta, \varphi)$ 的映射, 即

$$G_1: X \rightarrow Z_1$$

2) 信号采样模块: 设定轴向角为 φ , 周向角为 θ , 幅值为 v , 探测器平面特征向量 $Z_1 = (v, \theta, \varphi)$ 向采样信号组 $Z_2 = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in})$ 的映射, s_{ij} 表示第 i 路信号的第 j 个采样值。即

$$G_2: Z_1 \rightarrow Z_2$$

3) 信号表示模块: 采样信号组 $Z_2 = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in})$ 向有效采样输出信号 $Y = (s_1, s_2, s_3, s_4)$ 的映射, 即

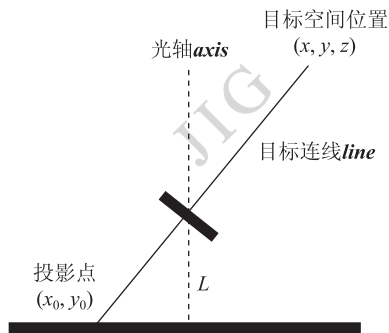
$$G_3: Z_2 \rightarrow Y$$

1.1 空间映射模块

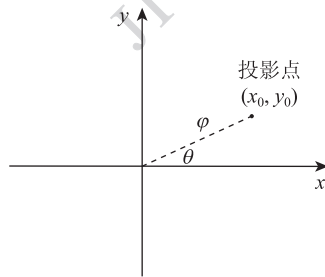
空间信号经过光学系统投影在探测器平面上呈现为一点, 受光学镜片旋转作用形成扫描圆, 与探测臂相交产生硬件脉冲信号。针对上述过程进行仿真建模。定义光轴 *axis* 表示探测器朝向, 光轴方向垂直于探测器平面。目标信号经光学镜片进入探测器, 光学镜片旋转的主轴是光轴, 它相对探测器平面的高度定义为 L 。由于目标信号是通过镜片而非直接投影到探测器平面, 因此目标空间位置与镜片位置连线 *line* 表示目标空间方向。*line* 经过镜片延长得到目标平面投影位置, 投影点坐标 (x_0, y_0) , 上述过程如图 1(a)。直角坐标不容易与空间位置 (x, y, z) 产生数学上的对应关系, 而极坐标下长度即是空间目标的投影长度, 因此采用平面极坐标 (φ, θ) 刻画目标, 如图 1(b), 满足

$$\begin{aligned} x_0 &= \varphi \cos \theta \\ y_0 &= \varphi \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

轴向角 φ 表示目标在探测器上投影点与原点间的距离, 由目标连线 *line* 与光轴方向 *axis* 的夹角与镜片相对于探测器平面的高度 L 计算得到, 即



(a) 目标平面投影



(b) 坐标系转换

图1 空间映射

Fig. 1 Space projection

$$\varphi = L \cdot \tan\left(\arccos\left(\frac{\text{axis} \cdot \text{line}}{|\text{axis}| |\text{line}|}\right)\right) \quad (2)$$

周向角 θ 表示目标投影点与原点连线和探测器 x 轴正向夹角。

定义光轴方向 $(x_{\text{axis}}, y_{\text{axis}}, z_{\text{axis}})$, 目标位置 $(x_{\text{target}}, y_{\text{target}}, z_{\text{target}})$, 探测器位置 $(x_{\text{missile}}, y_{\text{missile}}, z_{\text{missile}})$, 目标在探测器上的投影 (x, y, z) 满足

$$x_{\text{axis}}(x - x_{\text{missile}}) + y_{\text{axis}}(y - y_{\text{missile}}) + z_{\text{axis}}(z - z_{\text{missile}}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{x - x_{\text{target}}}{x_{\text{axis}}} = \frac{y - y_{\text{target}}}{y_{\text{axis}}} = \frac{z - z_{\text{target}}}{z_{\text{axis}}} \quad (4)$$

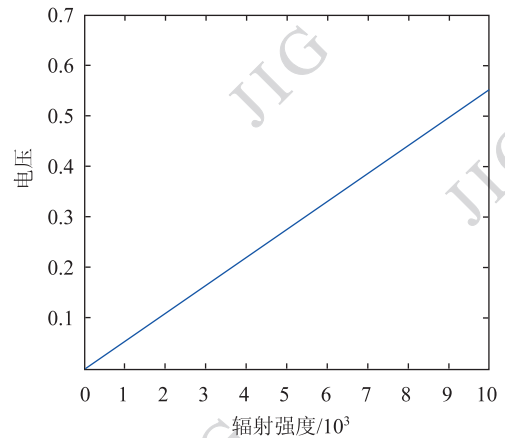
周向角 θ 是投影点与原点的连线 $\mathbf{x} = (x - x_{\text{missile}}, y - y_{\text{missile}}, z - z_{\text{missile}})$ 和探测臂平面坐标系下 x 方向 $\mathbf{A}_x$ 的夹角, 即

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{A}_x \cdot \mathbf{x}}{|\mathbf{A}_x| |\mathbf{x}|}\right) \quad (5)$$

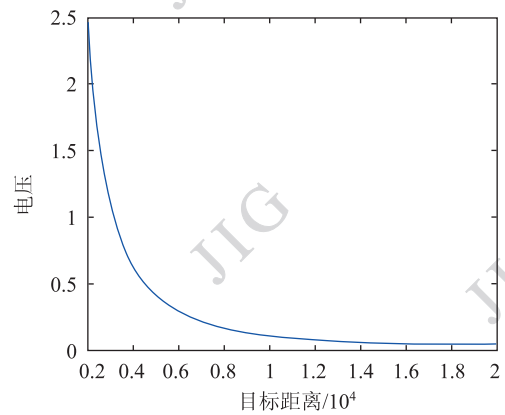
空间目标的红外辐射通过光敏电阻反映于探测器电压值, 电压值 V_s 与大气透过率 τ_0 、目标辐射强度 J 成正比, 与探测器目标距离 R 成反比, 满足

$$V_s = A \cdot \tau_0 \cdot J \cdot R^{-2} \quad (6)$$

辐射强度 J 与电压 V_s 以及距离 R 与电压 V_s 的关系如图 2(a) 和图 2(b) 所示。



(a) 辐射强度与电压关系



(b) 距离与电压关系

图2 幅值电压转换

Fig. 2 Transfer between radiation and voltage

根据目标的投影位置计算目标信号扫描圆, 如图 3 所示。

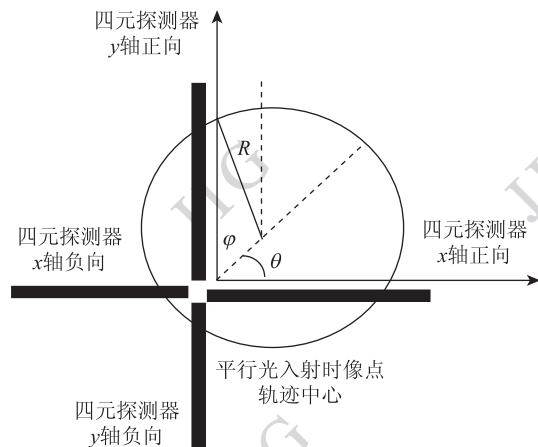


图3 轴向角和周向角转换模型

Fig. 3 Transfer model of axis angle and circumferential angle

1.2 信号采样模块

扫描圆采样过程即信号对应弥散圆 c_k 与探测臂 L_i 相交过程的计算。时刻 k 的采样信号 s_{ik} 由对应时刻弥散圆 c_k 与探测臂 L_i 的相交面积 S_{ik} 确定。由于探测臂由光敏电阻组成, S_{ik} 影响光敏电阻的阻值, 进而影响采样信号 s_{ik} 电压值。其计算效果示意如图4所示。

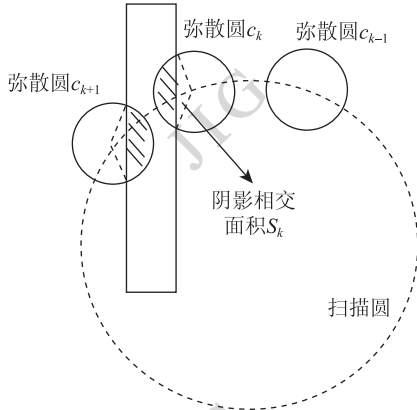


图4 探测臂采样过程

Fig. 4 Sampling process of detector arm

文献[4,6]对该模块的数学模型有较详细的描述, 采样电压值与弥散圆和探测臂相交面积(图4阴影面积)正相关, 输出四路采样信号。

1.3 信号表示模块

输出采样信号中包括真实目标信号、虚假目标信号(干扰)和背景信号。背景信号对目标识别不产生影响, 因此应该通过滤波模型去除。同时, 为有效描述信号本身, 需要将同一目标产生的采样信号作为整体处理, 通过整体特征进行描述。

因此, 信号表示模块包括采样信号组 Z_2 向采样输出信号 Y 转换的过程, 分为信号组滤波和信号表示转换两个模块, Z_2_filter 为滤波过程的输出结果满足 $C_3: Z_2 \rightarrow Y \Leftrightarrow Z_2 \rightarrow Z_2_filter \rightarrow Y$

1.3.1 信号组滤波

对于输入信号组, 滤波过程的目标是设计判决分类器对目标信号(包括真实目标和人为干扰的假目标)与背景信号进行区分, 去除背景信号。判决特征是信号的幅值 v , 判决结果为二元容器 $C = \{C_{target}, C_{background}\}$, C 表示该信号属于目标 C_{target} 或背景 $C_{background}$, 对第 i 个采样信号, 满足

$$C_i = \begin{cases} C_{target} & v_i > v_{thres} \\ C_{background} & v_i \leq v_{thres} \end{cases} \quad (7)$$

判决阈值 v_{thres} 的计算方式直接影响滤波效果。由于目标与探测器接近的过程中, 目标的幅值不断增加, 因此判决门限必须采用相对阈值计算。背景信号在探测采样信号中占有较大的比例, 且具有相似的幅值特性, 因此采用 K-means 算法对采样信号进行聚类计算 v_{thres} , 计算算法如下:

1) 对采样数据按幅值大小排序(采用 map 排序操作), 即 $map\{v_i\}_{i=1, \dots, K} \rightarrow \{v_{(i)}\}_{i=1, \dots, K}$, 其中 $v_{(1)} > v_{(2)} > \dots > v_{(K)}$;

2) 选择 K-means 聚类的初值: 初始背景幅值 $v_{init_C_{background}} = v_{(K)}$ 和初始目标幅值 $v_{init_C_{target}} = v_{(1)}$;

3) 根据 K-means 计算流程确定 v_{thres} 。

1.3.2 有效信号表示

同一目标在探测臂上产生多个采样信号, 单独的采样信号无法表示目标特征, 因此必须将这些相邻连续的采样信号作为整体处理才能有效描述目标特征。定义描述单元 $unit = \{r_{sum}, w, n_{start}, n_{count}\}$, 其中 n_{start} 表示信号的起始位置, 即第一次出现 $v_i > v_{thres}$ 的位置; w 表示有效信号的长度, 即满足 $v_i > v_{thres}$ 的连续长度, n_{count} 表示信号中极值点的个数, 刻画信号的转折特性; $r_{sum} = \sum_{i=n_{start}}^{n_{start}+w} v_i$, 表示信号的整体幅值。

目标特征表示如图5。

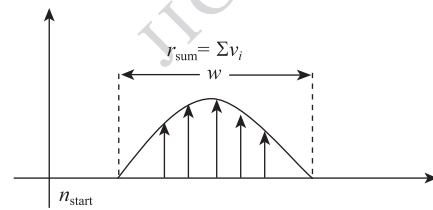


图5 采样信号特征

Fig. 5 Feature of sampling signals

s_i 表示第 i 路探测臂有效信号的描述特征。由于在空间中可能存在多个信号源(真实目标及干扰), 因此第 i 路可能存在由多个信号源产生的采样信号。按照上述规则对各个连续采样信号组织得到描述单元 $unit_s$ 。目标与干扰的采样信号分离时得到多个 $unit_s$, 而重叠时得到一个 $unit_s$, s_i 描述了探测臂第 i 路上的所有有效信号, 即 $s_i = \{unit_{s_1}, \dots, unit_{s_n}\}$ 。跟踪算法对 s_i 判断获取属于真实目标或真实目标所在的 $unit_{s_j}$ 。

$Y = (s_1, s_2, s_3, s_4)$ 表示四路有效信号描述特征

的汇总。采样输出信号 Y 作为跟踪算法的输入源供其使用。

1.4 仿真建模框图

生成建模仿真框图如图 6 所示,其中由左到右表示模型的细化,由上到下表示信号流的流动过程。仿真建模生成效果如图 7 所示。

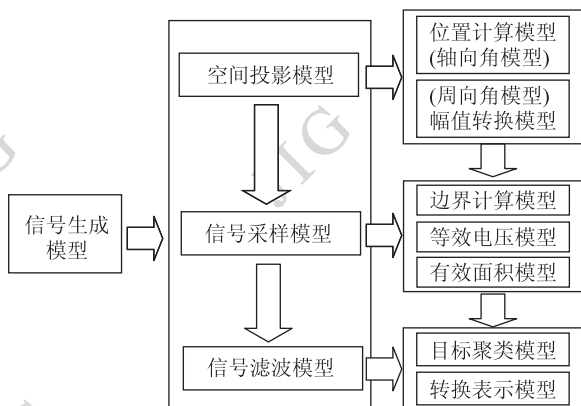


图 6 仿真框图

Fig. 6 Simulation framework

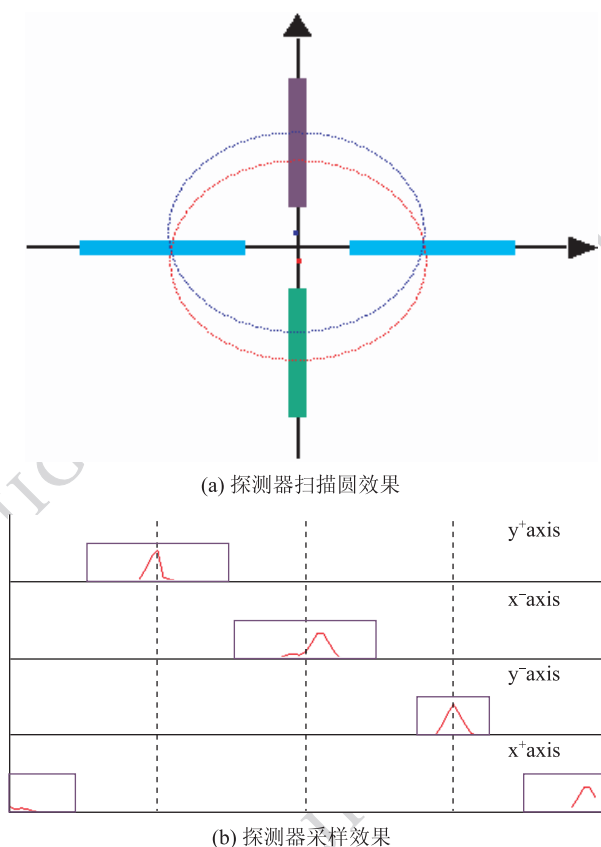


图 7 仿真建模生成效果

Fig. 7 Results of simulation

2 抗干扰跟踪算法设计

2.1 问题描述

在实际问题研究中,干扰通过模拟红外信号源使探测器对目标的跟踪产生偏差,达到诱骗跟踪的目的。在跟踪过程中,干扰的数量 n ,抛出间隔 ΔT 不定,每枚干扰都具有自身的速度 vel 和投射方向 α ,在不同交会条件下,产生的目标和干扰在探测器上对应的信号组合会形成多种复杂形态,如图 8 所示。

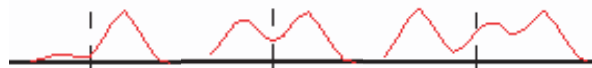


图 8 不同交会条件下探测器采样信号

Fig. 8 Sampling signals of different situations

相比成像跟踪,点源跟踪可以利用的信息更少。因此必须寻找更多的特征进行目标判定。同时,由于干扰释放方式复杂,因此引入状态建模方式简化问题研究。

2.2 特征描述

自适应抗干扰跟踪算法需要对输入信号类别进行判定,因此必须选择合理的特征对信号进行描述。选取的特征需要满足足够的稳定性和良好的区分性,即在目标跟踪中能够稳定的存在,同时在干扰和目标间存在较为明显的区分。通过特征描述,将有效采样信号转换为特征信号表示。

2.2.1 幅值变化率特征

常用的目标信号识别特征包括幅值特征和时延特征^[7]。二者分别计算待判定信号幅值和时延与标准信号之间的差距,取最小者为目标信号。

传统的幅值和时延方法尽管对单个干扰处理有效,但对多干扰无法处理。如图 9(a),由于目标信号与干扰信号重叠,二者叠加生成的整体信号幅值大于单独的干扰信号幅值,因此根据幅值最近原则算法将选择错误信号(干扰信号),长方形区域表示选择的目标。

针对以上问题,提出了幅值变化率用于目标和干扰的区分。

幅值变化率 $\Delta v_{i,t} = (v_{i,t} - v_{i,t-1}) / v_{i,t-1}$,其中 $v_{i,t}$ 表示第 i 路信号在 t 时刻的幅值,描述信号幅值的变化速度。在仿真交会过程中,目标的辐射强度较为

稳定, 干扰的辐射强度变化较为剧烈, 因此, 尽管干扰在短时间内对目标的辐射强度可以近似模拟, 但是很难同时模拟目标辐射强度变化的规律。利用这一特征与时延幅值特征相结合, 可以更好地改善目标识别结果。

定义 $|v_1 - v_{std}|$ 表示目标幅值与标准信号的差值, $\Delta v_1 - \Delta v_{std}$ 表示幅值变化率与标准信号的差值, f 表示二者以 w_1 比例融合计算的结果, 即

$$f = f(v, \Delta v) = w_1 \times |v_1 - v_{std}| + (1 - w_1) \times |\Delta v_1 - \Delta v_{std}| \quad (8)$$

真实目标 m 满足

$$f_m = \min(f_1, \dots, f_i, \dots, f_n) \quad (9)$$

如图9(b), 尽管干扰幅值更接近标准信号, 但是目标与干扰混合信号的幅值变化率更接近标准信号, 整体判决后算法将选择正确的区域, 待目标与干扰混合信号分离后选择正确的目标信号。

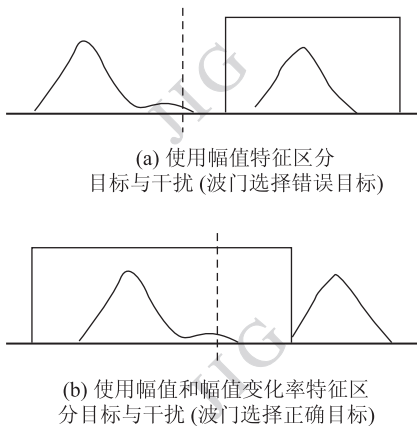


图9 幅值变化率区分效果示例
Fig. 9 Examples of signal judgement using change rate of amplitude

2.2.2 自适应波门特征

波门即探测器跟踪窗, 限制了探测器的观测范围。跟踪算法仅会对波门内的信号进行处理, 对波门外的信号忽略, 如图10, 其中长方形区域表示波门。通常研究中采用固定波门, 即跟踪过程中波门宽度采用固定值。然而, 当抛出干扰数量较多时, 固定波门条件下目标和干扰可能仍未能达到分离的状态, 此时波门需要自适应的增加, 以包含所有信号, 避免目标的误检。同时, 波门内只有目标信号存在时, 应该尽量减小波门宽度使得其加紧目标, 避免外界因素的影响。因此针对不同的条件, 自适应选用不同宽度的波门, 使得波门内信号有效且稳定。

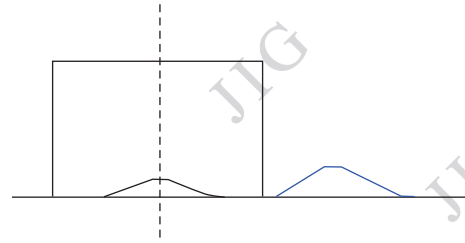


图10 波门信号表示(目标信号应存在于波门内)
Fig. 10 Gate of signals (target signal should be in the gate)

自适应波门特征的使用需要结合跟踪算法的状态建模。当算法处于跟踪状态时, 采用较窄的波门框住目标; 当算法处于等待分离状态时, 使用较宽的波门; 当算法处于判断状态时, 根据可能的目标区域对波门边界进行修正。

图11(a)~(d)给出自适应波门条件下的信号分离过程中的波门变化情况。

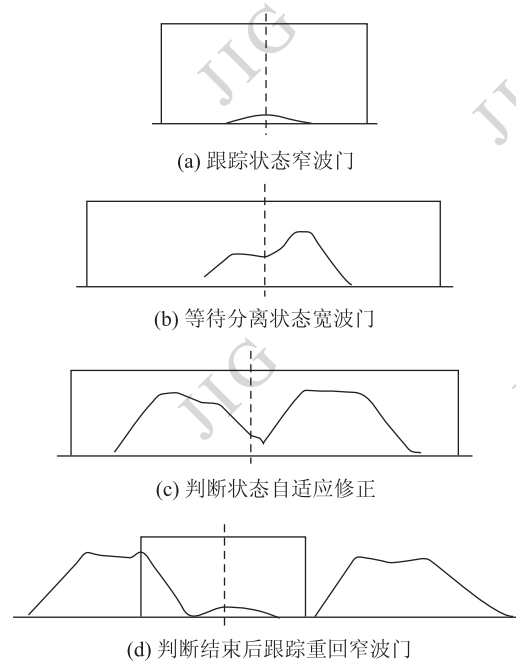


图11 采用自适应波门跟踪目标
Fig. 11 Track object using adaptive gate

2.3 信号分析

相比成像跟踪, 红外点源跟踪中目标不具有形状特征, 不能跟踪单帧信息判定目标, 因此必须将当前帧输入信息与历史信息充分结合。同时, 考虑交会过程的复杂性, 不同交会条件下必须应用不同特征跟踪目标, 因此引入抗干扰跟踪系统状态的概念。定义4类抗干扰跟踪系统状态:

1) 搜索状态 探测器缺乏稳定的历史信息, 目

标尚未稳定存在于探测器视场中,此时探测器搜索视场内稳定的红外目标信号作为跟踪对象。

2)跟踪状态 目标稳定存在于探测器视场中,且不存在干扰,此时探测器采用窄波门跟踪并记录目标特征作为标准信号特征。

3)等待分离状态 目标与干扰共存于探测器视场中,但二者以整体信号形式存在,此时探测器采用宽波门进行跟踪。

4)判断状态 对于分离的多个信号,根据幅值变化率特征判断真实目标。

除状态本身外,跟踪算法同时定义了状态间的跳转条件。由于不同状态下跟踪算法具有不同的行为,因此跳转条件的设定需要符合状态定义的要求。状态转换关系整体框图如图12所示。

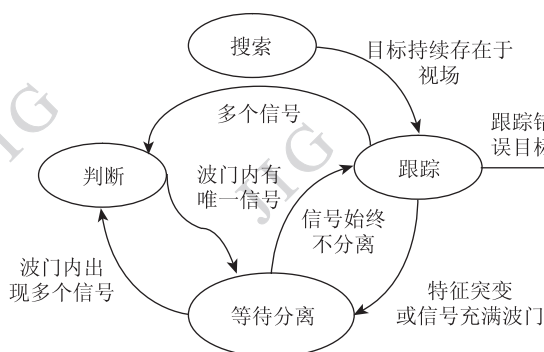


图12 跟踪状态转换关系

Fig. 12 Status transfer of tracking

当系统处于跟踪状态时,探测器可以准确捕获真实目标。此时系统记录目标信号特征作为标准特征,用做判断状态下的目标判决依据。当系统处于等待分离状态时,探测器根据标准信号在跟踪状态下的累积结果进行预测更新。

2.4 抗干扰跟踪算法整体处理流程

对于仿真建模生成的有效信号,描述其幅值、时延、幅值变化率和波门特征,将信号转换为特征信号。结合当前系统状态完成系统状态跳转与信号更新,形成新的系统状态同时获取目标信号。抗干扰跟踪算法流程如图13所示。

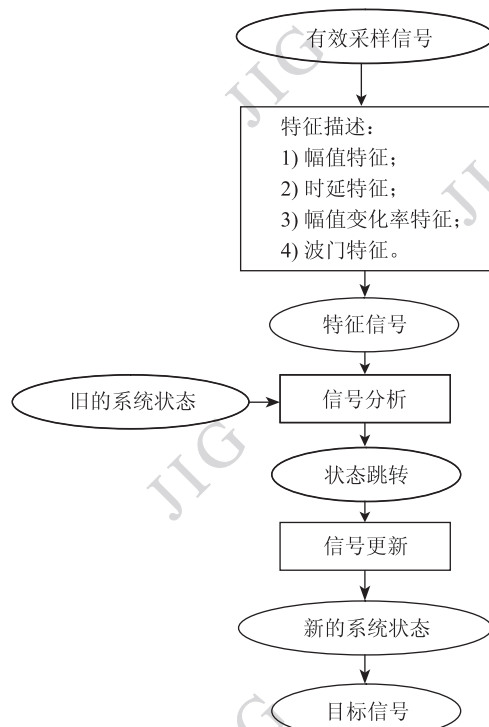


图13 跟踪算法流程

Fig. 13 Process of track algorithm

模型包括以下部分:

1)目标模块建模 模拟目标的运动特性和辐射特性。目标运动特性包括对飞机直飞、转弯、起降和加速的模拟,辐射特性包括目标蒙皮辐射、尾焰辐射和尾喷管辐射^[12]。

2)干扰模块建模 模拟干扰的运动特性和辐射特性。

(1)干扰运动特性模拟 干扰相对飞机以一定速度抛出,初始速度由飞机速度与相对飞机速度合成。运动过程中受到重力和空气阻力的影响,空气阻力与速度平方成正比。将其运动方程做水平垂直方向分解,即

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{\rho v^2}{\omega} \cdot \frac{v_c}{v} - g \quad (10)$$

$$\frac{dv_s}{dt} = -\frac{\rho v^2}{\omega} \cdot \frac{v_s}{v} \quad (11)$$

式中, t 为燃烧时间, ρ 为阻力系数, v 是干扰速度, ω 为干扰重量,随时间增加线性减少。 v_c 和 v_s 分别为干扰弹在竖直和水平方向的速度。

(2)干扰辐射特性模拟 干扰辐射分为起燃阶段($0 < t < t_a$),持续燃烧阶段($t_a < t < t_b$)和衰退阶段($t_b < t < t_c$),当 $t = t_a$ 时干扰辐射强度达到峰值, $t = t_b$ 时辐射强度下降为峰值的50%, $t = t_c$ 时辐射强度

3 仿真系统

3.1 仿真系统建模及平台搭建

为对目标抗干扰跟踪算法进行分析和验证,建立完整的仿真系统,对真实跟踪环境进行建模,系统

下降为0。

3) 环境模块建模 根据 MODTRAN 软件模拟环境中的红外透过率和背景的等效辐射强度,能够针对不同的天气条件与仿真高度进行修改。

4) 探测器模块建模 模拟本文所描述的信号产生、处理、分析全过程。

仿真系统的构建符合构件复用和面向对象原则,得到不同机动条件、不同环境、不同干扰特性条件下的仿真系统,给定初始仿真文件,经过系统运算得到结果输出,系统结构如图14所示。

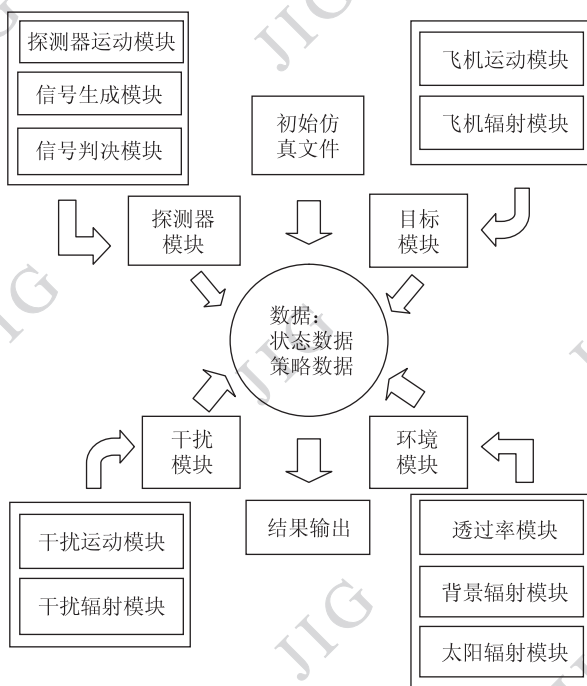


图14 仿真系统建模框架
Fig. 14 Framework of simulation system

3.2 仿真平台搭建

为方便对探测跟踪过程的研究,基于 OpenGL 和 C++ 搭建了用户交互仿真平台,平台包含用户交互部分和动画显示部分,其中用户交互部分允许仿真条件的设置与运行过程中数据的观测,动画显示部分用于目标环境的3维建模以及探测器产生信号的实时观察。仿真平台界面效果如图15。

3.3 数据验证

3.3.1 仿真过程描述

设定仿真初始条件:飞机位置(0,200,0),速度大小200 m/s,方向(0,0,0),探测器位置(-3000,3210,0),速度大小1200 m/s,方向(0°, -45°,

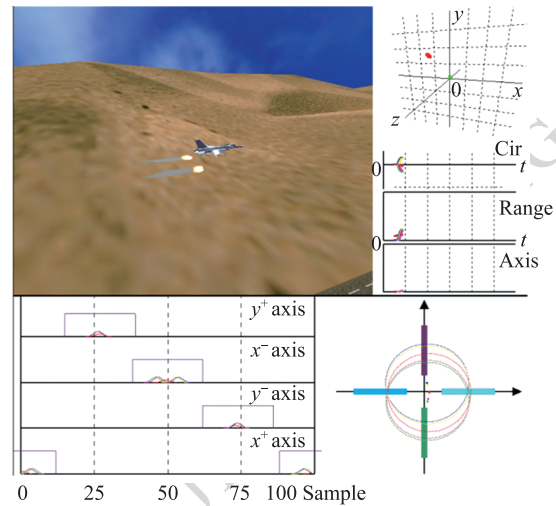


图15 仿真平台
Fig. 15 Simulation platform

0°);干扰条件:仿真开始后140 ms起向飞机一侧以30 ms间隔连续抛出4个干扰,每个干扰相对于飞机速度为30 m/s,水平方向(90°,0°,0°),干扰自身运动辐射属性如“干扰模块建模”所述。

跟踪过程中探测器效果如图16,其中左图表示十字型探测器的4路探测臂信号输出,依次为 y^+ , x^- , y^- , x^+ 轴,方形框表示跟踪窗,右图表示探测器信号扫描圆的生成过程,图16(a)~(f)表示依时间顺序的抗干扰跟踪过程,最终结果跟踪成功。

3.3.2 算法对比

由于传统方法通常以特征而非跟踪框架形式被描述,因此使用传统方法特征的跟踪实例与本文算法对比。为方便读者观察,将目标和干扰产生的信号用区分,红色表示目标,其他颜色表示不同的干扰,跟踪算法实际处理信号是它们的叠加,如图10和图11所示。

对比使用幅值变化率特征和只使用幅值特征跟踪结果。仿真初始条件同3.3.1节。干扰条件:仿真开始后间隔100 ms相对飞机运动方向左右对称水平抛出2个干扰,探测臂信号如图17所示。

T 为仿真对抗运行时间在 $T=400$ ms时目标与两个干扰混合为整体信号, $T=600$ ms时目标与第一个干扰分离,若使用传统的幅值特征,由于目标与第二个干扰混合整体幅值较大,会导致错误判断(图17(b)中选择蓝色干扰)。若使用幅值变化率特征,首先选择目标与干扰混合整体(图17(a)选择红色目标和绿色干扰), $T=760$ ms待干扰与目标再次分离时获取目标(图17(a)选择红色目标)。

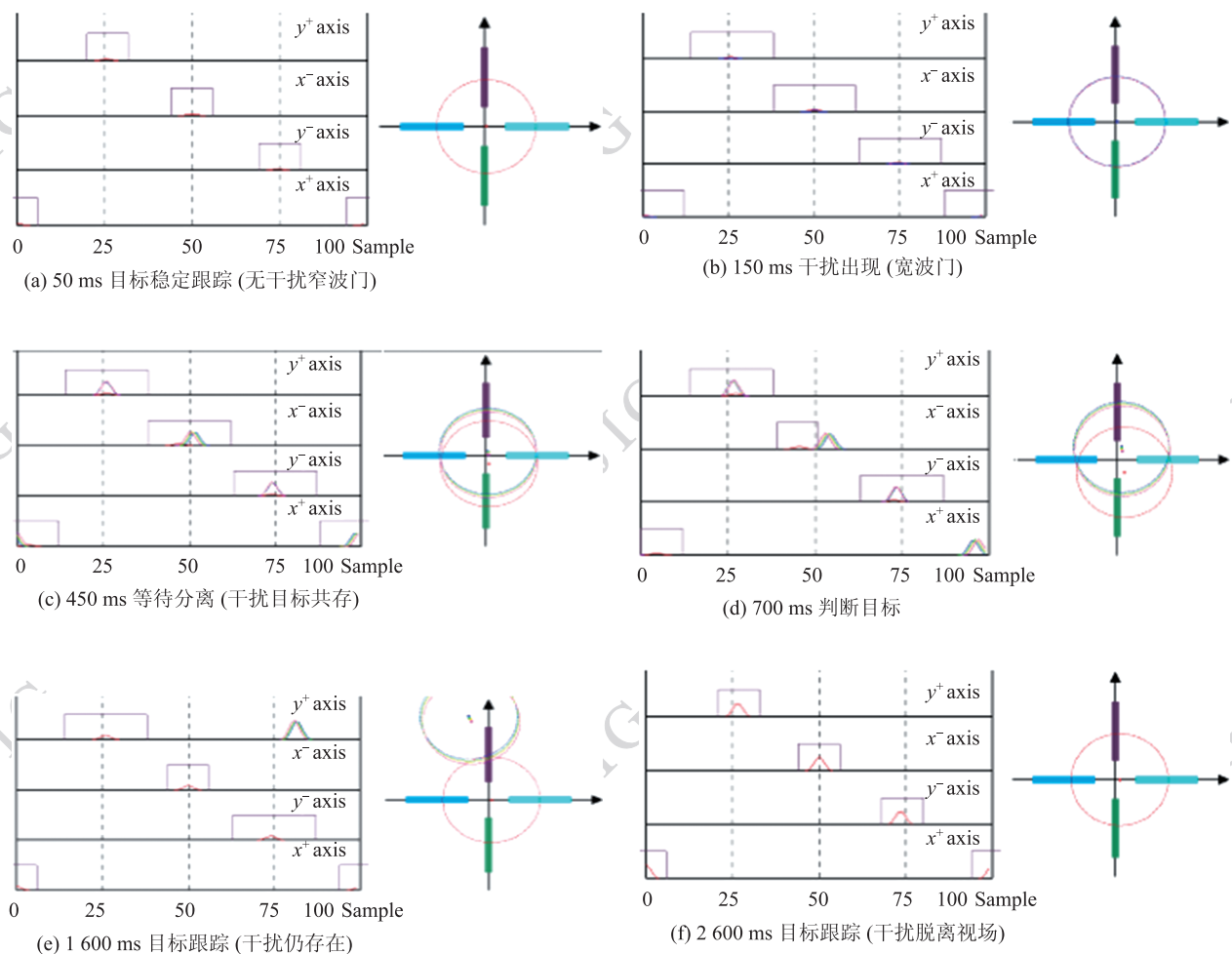


图 16 跟踪过程中探测器效果
Fig. 16 Result of tracking process

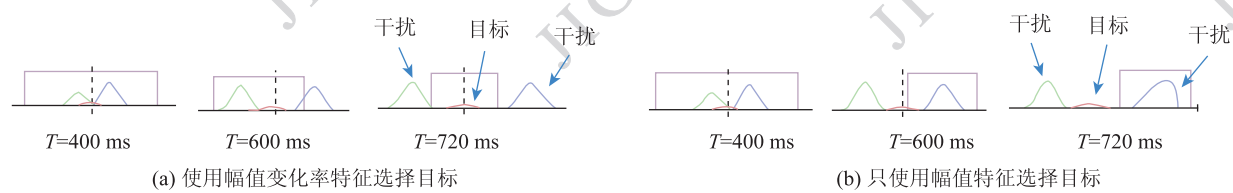


图 17 不同特征的目标选择效果对比
Fig. 17 Comparison of target selection
result with different characteristics

3.3.3 跟踪成功率分析

实际过程中干扰的投放数量和投放间隔均是随机可变的。选定典型条件下的干扰投放数量(1,2,4,8)和投放间隔(30 ms,60 ms,100 ms)作为一次实验的干扰策略,随机干扰投放方向,计算不同交会条件下跟踪算法的成功率,如表1。

当干扰数量较多,干扰投放间隔较长的条件下,跟踪算法的失败可能性更高,而干扰数量作用更明显。

表 1 不同干扰数量与间隔下的跟踪成功率

Table 1 Success rate in different number and interval of decoys					/%
间隔/ms	1 枚干扰	2 枚干扰	4 枚干扰	8 枚干扰	
30	88.2	78.8	56.3	34.6	
60	88.2	75.0	53.6	27.0	
100	88.2	71.9	55.1	20.8	

选定探测器与目标的典型交会条件(尾追,迎头,尾后 45°),干扰投放随机,成功率结果如表 2。由实验结果分析,由目标后部追击目标时,可以利用目标尾焰辐射能量,跟踪成功率较高。

表 2 不同交会条件下的跟踪成功率
Table 2 Success rate in different space relation

交会条件	1 枚干扰	2 枚干扰	4 枚干扰	8 枚干扰
尾追	100.0	83.3	66.7	37.5
迎头	25.0	33.3	25.0	16.7
尾后 45°	100.0	87.5	66.7	45.8

4 结 论

对十字型红外点源探测器的信号生成过程进行仿真,将信号生成过程分解为目标特征向探测器特征映射建模,探测器采样过程建模以及有效信号表示建模 3 个部分,仿真由目标特性到采样生成信号表示的完整过程。基于合理完整的生成信号,提出幅值变化率与自适应波门特征用于目标与干扰的区分。定义系统状态用于信号分析,给出状态转换条件以及不同状态条件下的特征使用准则,并提出了完整的抗干扰跟踪算法流程框架。最后,简介了仿真系统建模过程和仿真平台搭建效果,并对抗干扰跟踪算法进行了数据验证。

参考文献(References)

- [1] Wang T, Fan X. Infrared point-source guided interference signal analysis [J]. Aerospace Electronic Warfare, 1999, (3):24-29. [汪涛,樊祥. 红外点源制导干扰的信号分析[J]. 航天电子对抗, 1999, (3):24-29.]
- [2] Liu Z N, Jin W Q, Chou G F, et al. Simulated signal source for four-element infrared detection system-simulation of the target detection signal. [J]. Optical Technique, 2000, 26(3):214-216. [刘真南,金伟其,仇谷峰,等. 基于四元红外探测系统的仿真信号源——目标探测信号的模拟[J]. 光学技术, 2000, 26(3):214-216.]
- [3] Zhang W H, Wang X, Ye G Q. Modelling and simulation of infrared cross-detector by Time domain[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(19):4375-4377. [张文华,王星,叶广强. 红外正交四元探测器的时域建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(19):4375-4377.]
- [4] Shi H S. Mathematic simulation of infrared cross-detector[J]. Computer Simulation, 2004, 21(8):42-43. [石虎山. 红外十字交叉探测器的数学建模[J]. 计算机仿真, 2004, 21(8):42-43.]
- [5] Li F, Liu S Q, Zhang F. Operating distance estimate ofIRST for infrared point target[J]. Infrared Technology, 2008, 30(9):502-503. [李凡,刘上乾,张峰. 点源目标的红外搜索与跟踪系统的作用距离估算[J]. 红外技术, 2008, 30(9):502-503.]
- [6] Xie B R, Yin J. Simulation and Analysis of 4-unit Infrared Guiding-head's Anti-jamming Principle[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(1):61-65. [谢邦荣,尹健. 四元红外导引头抗干扰原理分析与仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1):61-65.]
- [7] Guo X J, Jin W Q, Wang J. Antijamming method of counter-infrared-inference-missile by using cross-shaped detector array[J]. Applied Optics. 2004, 25(4):33-36. [郭新军,金伟其,王霁. 四元正交探测器抗红外干扰弹干扰方法综述[J]. 应用光学, 2004, 25(4):33-36.]
- [8] Yu S S, Li W R. Research of antijamming method of four unit infrared detector[J]. Infrared Technology, 2002, 24(2):53-56. [于松书,李伟仁. 四元红外探测器抗红外干扰方法的研究[J]. 红外技术, 2002, 24(2):53-56.]
- [9] Liu J C, Liu Z C, Zhang H X. The simulation research of IR decoy countermeasure to the IR missile Track[J]. Infrared Technology, 2007, 29(3):132-134. [刘加丛,刘占辰,张恒喜. 红外诱饵对红外导弹轨迹干扰仿真研究[J]. 红外技术, 2007, 29(3):132-134.]
- [10] Li W H, Wang Q L, Yang C Z. Study of airborne infrared bait and countermeasures to Air-to-Air missile simulation[J]. Control & Automation, 2007, 23(10):196-197. [李蔚恒,王庆林,杨承志. 红外诱饵及其对抗空空红外导弹仿真研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(10):196-197.]
- [11] Liu X L, Huang K D. The application of finite state machine in the CGF's behavior modeling[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(5):663-665. [刘秀罗,黄柯棣. 有限状态机在 CGF 行为建模中的应用[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(5):663-665.]
- [12] Li Y Z, Sun B. Building model of aeroplane infrared radiant and simulation[J]. Infrared Technology, 2008, 30(5):252-253. [李彦志,孙波. 飞机红外辐射建模与仿真[J]. 红外技术, 2008, 30(5):252-253.]