

基于时频分析的人体红外热信号检测算法*

陆兴华 陈锐俊 池坤丹

(广东工业大学华立学院 广州 511325)

摘要:救援机器人通过对人体红外热信号进行有效检测,实现对遇险人员的远程识别与救援,传统的人体红外热信号检测采用声谱图检测方法,在信噪比较低的环境下检测效果不好。提出一种基于时频分析的人体红外热信号检测算法,构建强干扰下的人体红外释热信号参量模型,采用多普勒频率模糊数搜索的方法完成多方向相位的人体红外释热信号动态平滑处理,对非平稳时变信号进行时频分析,剔除负频部分,实现抗干扰滤波,通过后置的高阶累积量切片算子进行 Hough 变换处理,使得信号在时频面的聚焦累积量增大,而噪声被抑制,实现信号检测。仿真结果表明,采用该算法进行人体红外热信号检测的准确检测概率较高,抗干扰能力较强,提高了救援机器人的搜索识别能力。

关键词:时频分析;救援机器人;信号检测

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文献标识码:** 510.4010

Infrared thermal signal detection algorithm based on time frequency analysis

Lu Xinghua Chen Ruijun Chi Kundan

(Huali College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, China)

Abstract: The rescue robot can detect the human body's infrared thermal signal effectively, and realize the remote recognition and rescue of distress personnel. The traditional method used spectrogram detection method, but the detection effect was not good in low SNR environment. A new method of infrared thermal signal detection is proposed based on time frequency analysis. A parametric model of the human body infrared heat release signal is constructed, and the dynamic smoothing process of the human body infrared heat release signal is processed by the Doppler frequency fuzzy number search method. The time-frequency analysis of non-stationary time varying signal is carried out, and the negative frequency part is eliminated. Anti-interference filter is realized. The Hough transform is implemented by the postpositive high order accumulated amount of the signal, the focus of signal in the time frequency plane is increased. The signal is suppressed and the noise is suppressed. The simulation results show that this algorithm has higher accuracy and better anti-interference ability, and the search and recognition ability of the rescue robot is improved.

Keywords: time frequency analysis; rescue robot; signal detection

1 引言

人体红外释热探测救援机器人作为机器人应用的一个重要方向,在远海救援和野外搜救等领域中具有较好的应用价值,救援机器人通过发射红外探测信号,采集人体辐射的人脸等机能信息实现抢险搜救,救援机器人将在地震救灾和战场救护等领域中都有重要的应用前景^[1]。随着现代信号处理技术的发展,把现代信息与信号处理技术

应用在人体红外释热探测救援机器人中,提高对遇险人员的救援识别能力。

人体辐射的红外热信号表现为一组非平稳信号,对人体辐射的红外热信号的研究工作最早是从 20 世纪 90 年代开始,通过研究人体辐射的红外热信号的检测算法,在低信噪比下实现对辐射的红外热信号的检测,并通过图谱分析,实现目标识别^[2]。传统方法中,对人体红外热信号检测主要采用的是瞬时频率分析方法和声谱图方法等,而

收稿日期: 2015-10

* 基金项目:2012 广东省质量工程人才培养实验区(粤教高函[2012]204 号)项目、2015 年广东省大学生科技创新培育(pdjh2015b0942)项目、2012 广东省质量工程项目“机电综合技能实训中心”(粤教高函[2012]204 号)

采用时频分析方法进行红外热信号处理越加受到人们的重视,时频分析的基本思想是设计时间和频率的联合函数,通过核函数选择、交叉项抑制实现对信号的检测^[3-6],本文提出了一种基于时频分析的人体红外热信号检测算法,首先分析了人体红外热信号的参数模型,并进行信号抗干扰滤波处理,在此基础上采用时频重排理论结合Hough变换,实现对人体红外热信号的准确检测,最后通过仿真实验进行了性能测试,展示了本文算法在实现人体红外释热信号检测、提高救援机器人识别能力方面的优越性。

2 人体红外释热信号参量模型与问题描述

2.1 强干扰环境设定与人体红外释热信号特征参量模型

救援机器人在进行野外作业探测中,受到的环境干扰较多,需要对强干扰多载波环境下的人体红外释热信号进行信号重构和参量分析,在干扰背景下进行信号检测。在野外救援作业中,存在着地震、海水等杂波干扰,人体红外释热信号幅值下降,随着救援目标距离的增加,宽带人体红外释热信号也随之延长,信号由单峰逐渐出现双峰。本文构建强干扰环境,为了描述人体红外释热信号的宽度和深度,上述分析因素应被考虑,通过反复实验分析^[7],塑造如下3个特征量。

1) 人体红外释热信号的带宽长度

由于人体红外释热信号的长度对信号的幅值有干扰,所以需将其作为一个特征量。首先求出人体红外释热信号的最佳传感器 n_b 两峰谷之间的长度 fl ,再通过 fl 线性回归人体红外释热信号长度:

$$fl = x(\min_{x=m_1}^{m_2} z_{x n_b}) - x(\min_{x=m_1}^{m_2} z_{x n_b}) \quad (1)$$

$$l = a \cdot fl + b \quad (2)$$

式中: a 、 b 表示系数。对于给定的宽带高分辨人体红外释热信号 $x(n)$ 和尺度 d ,设置 $x(n)$ 的全部 d 尺度功率的平均值用 $\bar{E}(n_i, d)$ 表示、最大值用 $\max\{E(n_i, d)\}$ 表示,融入了 λ 水平特征量聚点的概念,用于提高人体红外释热信号的描述信号的分辨率和灵敏度。

2) 幅值,也就是人体红外释热信号的最大波峰和波谷差值:

$$z_{\max} = \max_{y=n_1}^{n_2} \{ \max_{x=m_1}^{m_2} \{ z_{xy} \} - \min_{x=m_1}^{m_2} \{ z_{xy} \} \} \quad (3)$$

人体红外释热信号深度直接影响信号幅值,是深度特征,并且和人体红外释热信号长度与宽度有关。

3) 人体红外释热信号的特征量:

$$E = \sum_{x=n_1}^{n_2} \sum_{y=m_1}^{m_2} z_{xy}^2 \quad (4)$$

设宽带高分辨人体红外释热信号为 $x(t)$,对其进行加窗操作,可获取其局部特征量的变化情况。对 $x(t)$ 进行抽样后能够获取离散信号 $x(n)$,矩形窗函数 $h(t)$ 的宽度为 $T = (2d + 1)T_s$, $F_s = 1/T_s$ 。假设在整个观测时间内,满足局部平稳高斯噪声混响模型AR模型的阶数为

m , $m(t)$ 在区间 $[m_0 - \Delta m / 2, m_0 + \Delta m / 2]$ 上服从均匀分布, $\theta(t)$ 在区间 $[\theta_0 - \Delta \theta / 2, \theta_0 + \Delta \theta / 2]$ 上服从均匀分布。通过上述对人体红外释热信号的特征参量模型构建,为进行信号检测提供模型基础。

2.2 抗干扰滤波预处理

在上述进行信号特征参量模型构建的基础上,进行抗干扰抑制处理,把人体红外释热目标看为一个亮点模型,救援机器人相对系统平台的点目标进行匀速运动,径向速度为 v ,采用多普勒频率模糊数搜索的方法完成多方向相位的人体红外释热信号动态平滑处理^[8],得到频域信号估计值为:

$$\hat{\beta}_k = \hat{\beta} - \hat{\beta} (1 - 1/k)^q + n_i \quad (5)$$

式中: n_i ($1 \leq i \leq L$)为加性噪声项,由此得到了人体红外释热信号的频率散布:

$$B^2 = \frac{4\pi}{E_x} \int_{-\infty}^{+\infty} (v - v_m)^2 |X(v)|^2 dv \quad (6)$$

式中: E_x 是人体红外释热的信号能量,若 $w(n)$ 为高斯噪声,则:

$$\hat{c}_{4x}(n, \tau) = \hat{c}_{4s}(n, \tau) + \hat{c}_{4w}(n, \tau) = \hat{c}_{4s}(n, \tau) \quad (7)$$

若 $w(n)$ 为非高斯噪声,由此得到人体红外释热信号的噪声为:

$$\begin{cases} y(t) = x(t - t_0) \Rightarrow W_y(t, v) = W_x(t - t_0, v) \\ y(t) = x(t) e^{j2\pi v t} \Rightarrow W_y(t, v) = W_x(t, v - v_0) \end{cases} \quad (8)$$

通过时频变换进行的联合分布滤波,得到人体辐射的热信号的时频伸缩结果:

$$y(t) = \sqrt{k} x(kt), k > 0 \quad (9)$$

$$W_y(t, v) = W_x(kt, v/k) \quad (10)$$

对人体红外释热的非平稳时变信号进行时频分析,剔除负频部分,用统计量来表示干扰信息,取卷积得:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-s)x(s)ds \quad (11)$$

$$W_y(t, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_h(t-s, v)W_x(s, v)ds \quad (12)$$

若 $\{x(t_1), \dots, x(t_n)\}$ 的联合分布函数与 $\{x(t_1 + \tau), \dots, x(t_n + \tau)\}$,定义人体红外释热信号参数相位补偿频繁项为任意数据项 x ,如果满足 $\sup(x) > \min\text{Support} \cdot K$,其中 $\min\text{Support}$ 为信号滤波阈值,通过求解相位模糊数搜索结合解,采用FIR滤波^[9],得到人体红外释热信号的滤波函数补偿频繁项为:

$$X_1(k) = \text{FFT} [x_1(k), x_1(k+1), \dots, x_1(k+N-1)]^T \quad (13)$$

由此得到基于时频分析的人体红外热信号滤波结果模型如图1所示。

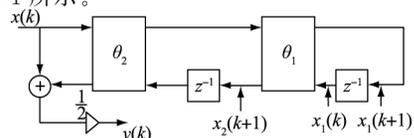


图1 人体红外释热信号抗干扰滤波处理系统结构

通过上述滤波处理,通常保留了热体红外热信号的正频部分,滤除了干扰噪声,结合分数阶 Fourier 变换,实现对人体红外释热信号的幅度检测,在此基础上进行信号检测。

3 检测算法改进实现

在进行了上述信号特征参量分析和滤波抗干扰处理的基础上,进行人体红外热信号检测算法改进设计,传统的人体红外热信号检测采用声谱图检测方法,在信噪比较低的环境下检测效果不好。为了克服传统方法的弊端,本文提出了一种基于时频分析的人体红外热信号检测算法,假设人体红外释热信号目标距离长度的不同,人体红外释热信号宽带长度受到瞬时相位的作用使得释热信号频谱正频部分的频谱峰值较小,对应的频率点会偏离真实频率值^[10],采用直线的极坐标方程:

$$\rho = x \cos\theta + y \sin\theta = \sqrt{x^2 + y^2} \sin\left(\theta + \arctan \frac{x}{y}\right) \quad (14)$$

信号的时频分析参数空间可写成 $q = -\rho x_i + y_i$ 和 $q = -\rho x_j + y_j$,通过离散化操作后,可获取 $h(n) = 1$ ($n = -d, \dots, -1, 0, 1, \dots, d$),则 $x(n)h(n-n_i)$ 的功率 $\frac{1}{2d+1} \sum_{n=n_i-d}^{n_i+d} x^2(n)$,人体红外释热信号 $x(n)$ 在点 $n_i T_s$ 处的 d 尺度功率为 $E(n_i, d)$ 。对不同的 α 值, $P_\alpha(\mu)$ 的函数值是变化的,进一步,在救援机器人探测过程中,需要对目标回波的尺度和时延进行估计,对于人体红外释热信号,得到两个阵列输出数据的相位差可以表示为如下幅调制形式:

$$l(t) = A_i \cos(2\pi f_0 t + \alpha_i) \quad (15)$$

用 \mathfrak{R} 表示变换算子,得到二维平面 (t, ω) 内人体红外释热信号的投影变换几何关系为:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}[f(t, \omega)] &= P_f(\mu, \alpha) = \\ &\int_{PQ} f(\mu \cos\alpha - \nu \sin\alpha, \mu \sin\alpha + \nu \cos\alpha) d\nu = \\ &\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mu' \cos\alpha - \nu' \sin\alpha, \mu' \sin\alpha + \nu' \cos\alpha) \delta(\mu' - \mu) d\mu' d\nu' \end{aligned} \quad (16)$$

根据人体红外释热信号特征量聚点塑造特征量模型运算人体红外释热信号的特征量聚点后获取“高特征量聚集区域”,采用本文提出的改进算法,结合 Hough 变换,通过后置的高阶累积量切片算子进行 Hough 变换处理,使得信号的累积量增大,而噪声被抑制,改进过程如图 2 所示。



图 2 算法改进流程

通过估计出来的机器人探测到的红外热信号的回波信息,集合调频斜率 k 的值与发射的声信号进行相位调

制,通过上述处理,实现了人体红外释热多径信号的时间压缩估计,采用 Hough 变换又获得了聚焦增益,沿射线方向上该体元位于重建表面之前,负则位于重建表面之后,而正负相交处则为重建物体真正的表面,假设 $y(k)$ 为多维参量混合估计后得到的近似统计平均, Hough 变换下的信号自相关变量 X 可通过时频分解得到 $S_i, i = 1, 2, \dots, N$,这些随机分离变量的方差和均值服从于高斯分布,通过上述算法改进,考虑到时间尺度与多普勒压缩因子联合估计过程的自相关性,可以认为上述参数的估计是渐进无偏和渐进有效的,当 $N \rightarrow 1$ 时,其估计误差十分接近其 Cramer-Rao 下限,由此实现信号检测优化。

4 仿真实验与结果分析

为了测试本文算法在实现人体红外热信号检测中的性能,进行仿真实验,仿真实验的硬件环境为: Intel(R) 2.3 GHz CPU, 2 GB 内存, 32 位 Windows 7 系统的 PC 机。在 MyEclipse 8.5 环境下,基于 MATLAB 2010 编程平台,进行数学编程,信号检测的归一化初始频率 $f_1 = 0.3$,归一化终止频率 $f_2 = 0.05$,救援机器人在进行探测脉冲发射的持续时间 50 ms,调频范围 20~30 KHz。接收的红外信号 $y(t)$ 为目标回波 $s(t)$ 和背景噪声 $n(t)$ 的叠加之和,人体红外释热信号幅度 A 根据不同的信噪比进行取值,在信噪比分别为 SNR = -5 dB 和 SNR = -8 dB 条件下,进行人体红外热信号的时频分析和检测,得到人体红外热信号的时域波形和视频分析过程如图 3 所示。

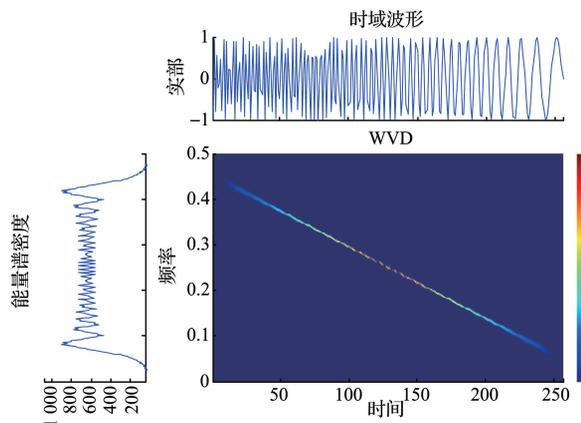


图 3 人体红外释热信号的时域波形及时频分析结果

从图 3 可见,采用本文方法对人体红外释热信号进行时频特征提取,能量谱密度能有效反应热信号的特征,在时频平面上具有较好的聚焦性能,时频聚集性高,以此为基础,实现信号检测,为了对比算法性能,采用本文算法和传统方法,根据 10 000 次蒙特卡洛实验仿真结果,得到热信号检测的 ROC 图如图 4 所示。从图 4 可见,采用本文算法进行热体红外热信号检测,具有较高的检测性能,对救援对象的准确检测概率较高,提高了救援机器人搜救的准确度。

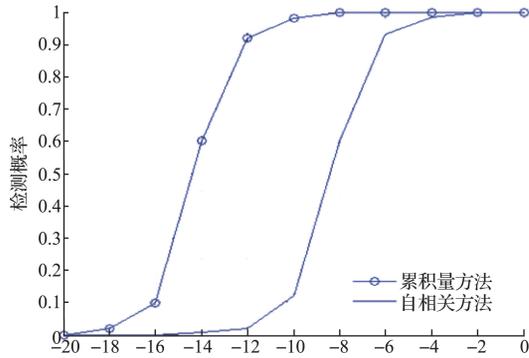


图 4 信号检测性能对比

5 结 论

把现代信息与信号处理技术应用在人体红外释热探测救援机器人中,提高对遇险人员的救援识别能力,人体辐射的红外热信号表现为一组非平稳信号,在低信噪比下对人体辐射的热信号进行检测,进行救援目标识别和搜救。本文提出了一种基于时频分析的人体红外热信号检测算法,分析了人体红外热信号的参数模型,并进行信号抗干扰滤波处理,采用时频分析方法结合 Hough 变换,实现对人体红外热信号的准确检测。研究表明,采用本文算法进行信号检测的准确检测概率较高,抗干扰能力较强,提高了目标识别能力。

参 考 文 献

- [1] 程艳合,杨文革. 压缩域直扩测控通信信号伪码跟踪方法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 2028-2032.
- [2] 梁华东,韩江洪. 采用双谱多类小波包特征的雷达信号聚类分选[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 152-159.

- [3] 吕建勇,唐振民. 一种基于图的流形排序的显著性目标检测改进方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2555-2563.
- [4] 张志文,袁久兴. 基于 FPGA 和 AVR 单片机的惯组电源板信号检测[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 78-83.
- [5] 吕富勇,周瑞卿,阮世阳,等. 高频磁场检测中采样保持器的设计及其性能分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 13-16.
- [6] 张宇,王晓燕. 基于混合灰度差指标的低空目标图像检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1196-1202.
- [7] 郭静波,谭博,蔡雄,等. 基于反相双峰指数模型的微弱瞬态极低频信号的估计与检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1682-1691.
- [8] 徐威,唐振民. 利用层次先验估计的显著性目标检测[J]. 自动化学报, 2015, 41(4): 799-812.
- [9] 王瑞,马艳. 基于分数阶傅里叶变换的线性调频脉冲信号波达方向估计[J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 421-427.
- [10] 衣晓蕾,彭思龙,栾世超,等. 基于算子和局部正交约束的信号自适应分解方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2613-2620.

作 者 简 介

陆兴华, 1981 年出生,男,辽宁辽阳人,硕士,讲师,主要研究方向为计算机控制算法、人工智能。

陈锐俊, 1994 年出生,男,广东台山人,本科在读,主要研究方向为人工智能。

池坤丹, 1993 年出生,男,广东揭阳人,本科在读,主要研究方向为计算机应用技术。