

文章编号:1004-4213(2011)01-0112-4

一种用于红外目标信号接收的稳健匹配滤波算法

秦建华^{1,2}, 余重秀¹, 谭永红², 王子民², 苏密勇²

(1 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

(2 桂林电子科技大学 智能系统与工业控制研究室, 广西 桂林 541004)

摘 要:针对远距离红外探测目标信号的不确定性问题,提出一种稳健的红外信号匹配滤波新算法.定性分析了红外探测目标的有用信号谱畸变来源,基于巴什瓦定理建立了目标信号的不确定谱模型,并分析了信号谱畸变的相关因子.利用极大极小方法构建稳健匹配滤波的信噪比输出鞍点解,并基于内层极大和外层极小的二层遗传优化算法求解鞍点解和最不利信号频谱,采用经典匹配滤波设计方法得到稳健匹配滤波传输函数.仿真结果表明,弱背景噪音下稳健匹配滤波器的信噪比对接收信号畸变表现出不敏感特性,谱能量畸变的信噪比最大损失比例最高,谱相关峰畸变次之,谱相关畸变最少.

关键词:红外信号;匹配滤波;鞍点解;遗传算法
中图分类号:TN911.7 **文献标识码:**A

doi:10.3788/gzxb20114001.0112

0 引言

在红外探测系统中,红外系统接收端的能量通常较弱,红外信号强度较小,目标反射回来的有用信号之外还有大量的杂波和噪音.经典匹配滤波是探测系统提高接收信号信噪比(Signal-to-Noise Rate, SNR)常用的方法,针对确定的信号形式和噪音的功率谱密度,以输出最大信噪比,从而使目标可检测性最大^[1-3].但是,由于空间传播特性、红外发送器的信号误差等原因,远距离红外探测目标除存在或多或少的背景和噪音信号外,信号本身还存在某种不确定性.传统最大信噪比输出的匹配滤波方法中信号模型是假定不变的,有时会因为输入的有用信号与原假设之间的微小畸变(即信号不确定性),使滤波输出失真,输出信噪比产生很大的变化,从而不能获得设计所期望的结果.针对这一问题,本文利用稳健统计学的相关知识对红外目标信号的不确定模型及 SNR 鞍点解进行了分析探讨,利用遗传算法求解,就此基础上提出一种改进型红外信号稳健匹配滤波新算法.

1 理论分析

1.1 红外目标信号谱的不确定谱模型

在红外探测系统中,接收到的信号分为目标信

号和背景噪音干扰信号,红外接收端输入总信号为

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 为探测系统目标输入信号, $n(t)$ 为背景和干扰信号.背景噪音干扰信号 $n(t)$ 是缓慢变化的随机信号可视为确定的,可确知干扰信号的功率谱密度 $N_{\xi}(\omega)$ ($N_{\xi}(\omega) = N(\omega)$).而接收目标信号常常是发送端选定信号(理想目标信号)的畸变形式,畸形的因素很多,主要有两点:一是目标信号本身的随机畸变影响;二是发射系统导致的标准输出误差影响.目标畸形在频谱上主要表现在谱能量畸变、谱相关畸变、谱相关峰畸变^[4].以误差平方的积分作为该畸变的度量,由巴什瓦(Parceval)定理,目标信号的不确定性谱模型集合 \mathcal{Q}_s 可写为^[5]

$$\mathcal{Q}_s = \left\{ S(\omega) \mid \int_{-\infty}^{\infty} |s(t) - s_0(t)| dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega) - S_0(\omega)|^2 d\omega \leq r^2 \right\} \quad (2)$$

式中, $S(\omega)$ 、 $S_0(\omega)$ 分别为 $s(t)$ 、 $s_0(t)$ 的频谱, r^2 为信号谱的不确定度.综合考虑对相关输出有影响的几个判据,设定:平均能量因子为 α 、平均相似度为 β 、平均相关高度为 γ ,则合成标准不确定度可表示为

$$r = \sqrt{\sum_{i=1}^p (\alpha R_{S_i} + \beta E_{S_i} + \gamma M_{S_i})^2} \quad (3)$$

E_{S_i} 为平均功率谱密度, R_{S_i} 为平均协方差, M_{S_i} 为平均相关峰高度, p 为独立互不相关接收信号组数.

基金项目:教育部科学技术研究重点项目(No. 107011)资助

第一作者:秦建华(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为信息处理、光信息及生物信号系统模拟. Email: jianhua7@sina.com

导师:余重秀(1946-),女,教授,博导,主要研究方向为全息、光信息处理及光电技术等. Email: cxyu@bupt.edu.cn

收稿日期:2010-07-05;修回日期:2010-18-16

1.2 稳健匹配滤波的 SNR 鞍点解构建及求解

对探测目标信号构成一个任意的滤波器,则它输出的信噪比 SNR 为^[6]

$$SNR(S_R, N_\xi; H) = \frac{1}{2\pi} \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) H(\omega) e^{j\omega t_0} d\omega \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} N_\xi(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

利用许瓦兹不等式定理对式(4)的泛函求极值,得到具有最大输出信噪比的匹配滤波器 $H_M(\omega)$ 。

对于式(4),设计稳健匹配滤波器的关键是寻找 $H(\omega)$ 以保证红外接收信号通过匹配滤波器时在所有目标信号畸变情况下都能获得较好的信噪比输出结果,也就必须满足和解决^[7-8]。

$$\min_{S \in Q} SNR(S, N_\xi; H_R) = SNR(S_R, N_\xi; H_R) = \max_{H \in \psi} SNR(S, N_\xi; H_R) \quad (5)$$

式中, ψ 为供选择滤波器 $H(\omega)$ 的集合. $H_R(\omega)$ 是 $(S_R, N_\xi; H_R)$ 的最佳滤波器,故式(5)的右边等式成立; $(S_R; H_R)$ 在所有的 $(S \in Q_s; H_R)$ 中使式(4)的分子最小,故(5)式得左边等式也成立; $(S_R, N_\xi; H_R)$ 构成匹配滤波问题的 SNR 鞍点解。

信噪比的鞍点解求解实质就是数学上的极大极小值稳健性问题. 由于目标信号谱函数非常复杂,用传统的基于梯度的寻优算法难以解决,而遗传算法与传统的寻优方法相比,其最大的优点在于不需确知目标信号的导数信息,特别适用于导数信息不可获取的较复杂的稳健问题. 因此本文采用遗传算法求解这一稳健问题,采用内层极大求解 $H(\omega)$ 、外层极小求解 $S(\omega)$ 的二层遗传优化算法^[9]. 具体算法的流程图如图 1。

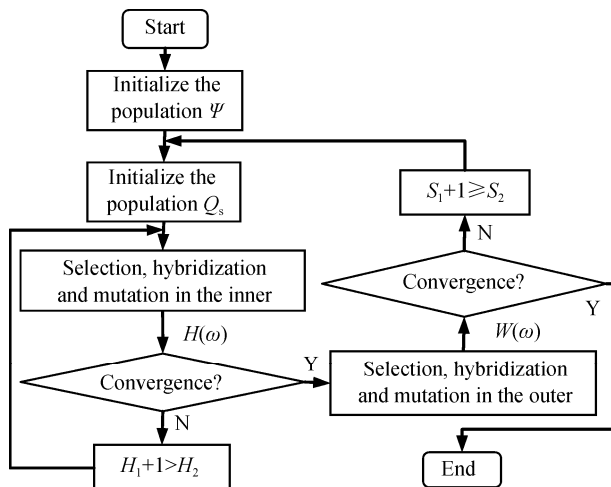


图 1 基于遗传算法的 SNR 鞍点解求解流程
Fig. 1 Flow chart of solving saddle-point based on GA

1.3 基于 Robust Statistics 的稳健匹配滤波器

对于式(2)所示的不确定模型 Q_s , 由式(5)的约束,利用遗传算法得相应的最不利信号频谱 $S_R(\omega)$

$$|S_R(\omega)| = \frac{S_0(\omega) |_{N_\xi(\omega)}}{N_\xi(\omega) + \tau} \quad (6)$$

式中, τ 为与 r^2 有关的非负常量,求解公式为

$$r^2 = \frac{\tau^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S_0(\omega)|^2}{[N_\xi(\omega) + \tau]^2} d\omega \quad (7)$$

红外接收系统中,背景噪音干扰信号功率谱密度确知而目标信号属于 Q_s 类,由最不利特性 $S_R(\omega)$ 以及 $N_\xi(\omega)$ 按经典匹配滤波器的设计方法^[10] 可得到相应不确定模型的匹配滤波器的传输函数

$$H_R(\omega) = \frac{S_R^*(\omega)}{N_\xi(\omega) + \tau} e^{-j\omega t_0} \quad (8)$$

式中, $S_R^*(\omega)$ 为 $S_R(\omega)$ 的共轭。

2 计算机仿真分析

设定红外圆盘形目标信号输入,理想接收目标信号的波形为: $s(t) = \frac{s_p}{2} (1 - \cos \pi t / t_d)$, s_p 为目标信号的峰值,取为 5; t_d 为目标信号的半宽度,取 10; 采样频率为 $10e+3$. 背景为云层背景,噪音功率谱密度为: $N(\omega) = N_0 [1 + (\frac{\omega}{\omega_c})^2]^{-1}$, N_0 为零频处的功率谱密度, ω_c 为背景噪音的截止频率. matlab 的仿真环境下,利用 matlab Begin 的阵列信号处理函数^[11-12] 对红外系统的接收信号仿真,仿真结果如图 2 和图 3。

图 2 为截止频率 ω_c 分别取 $1e+3$ 、 $5e+3$ 、 $10e+3$ 情况下最大匹配滤波器与稳健匹配滤波器的信噪比随 ω 变化图(实线表示最大匹配滤波,虚线表示稳健匹配滤波,取 $\alpha=0.3, \beta=0.25, \gamma=0.5$), 纵坐标为 $10 * \log(SNR)$, 横坐标为 $10 * \log(\omega)$. 由图看出,在三种截止频率下,SNR 都随着 ω 的增大而增大. ω_c 取 $1.0e+3$ 时,当 $10 * \log(\omega) \leq 1.85$, 两种滤波器的 SNR 接近重合,表明在强背景噪音下稳健滤波器 $H_R(\omega)$ 可近似为最大匹配滤波器 $H_M(\omega)$; 当 $10 * \log(\omega) > 1.85$ 时,背景噪音越来越弱, $H_M(\omega)$

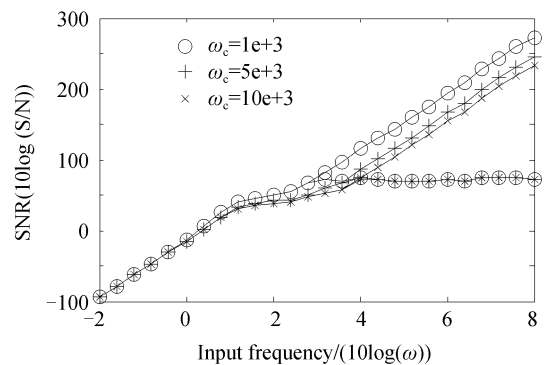


图 2 不同截止频率下两种匹配滤波器的 SNR 比较
Fig. 2 Comparison of SNR on two matched filtering with different cutoff frequencies

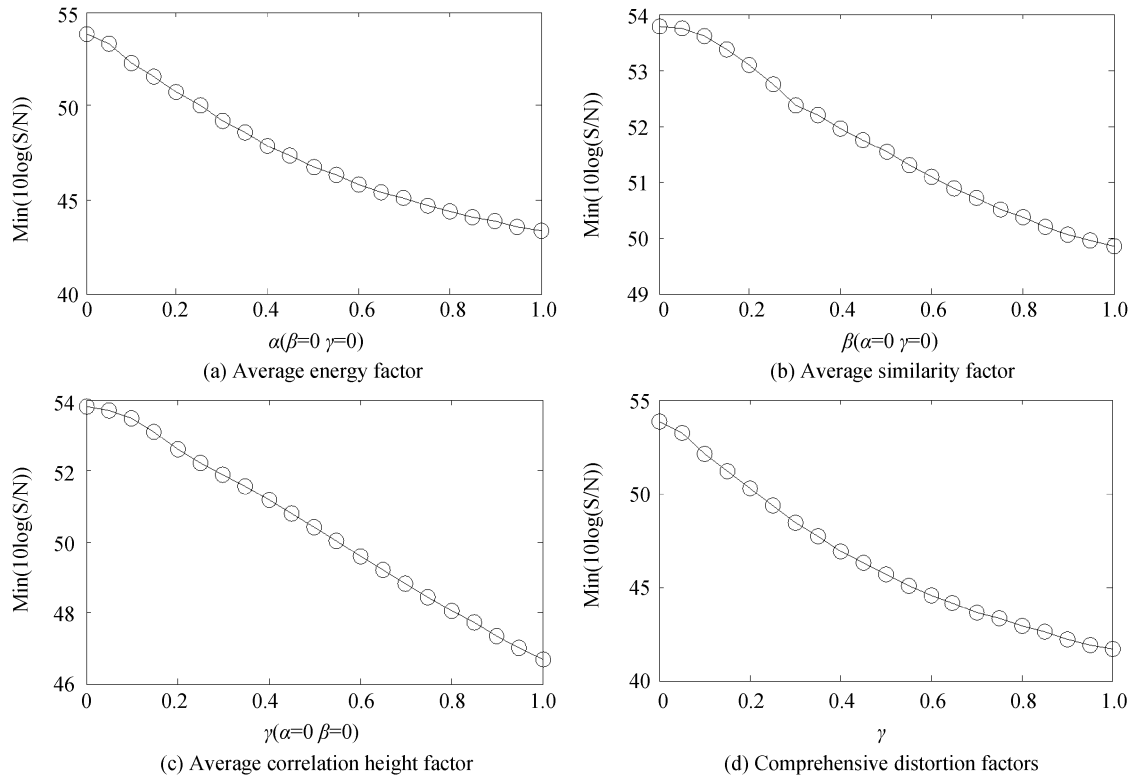


图3 稳健匹配滤波器的 SNR 下限变化图

Fig. 3 Lower limit change for SNR on robust matched filtering with uncertainty signal

的信噪比迅速增大并趋向于 ∞ ,此时对 $H_M(\omega)$ 的滤波结果造成很大差异,而稳健匹配滤波器 $H_R(\omega)$ 的信噪比近似于43.85 dB,此时SNR即为 $H_R(\omega)$ 的性能下限.当截止频率 ω_c 取 $5e+3$ 、 $10e+3$ 时,两种滤波器的SNR曲线趋势取得同样的结果, $H_R(\omega)$ 的性能下限都近似于43.85 dB,结果表明弱背景噪音下稳健匹配滤波器对目标畸变表现出不敏感特性,具有一定的鲁棒性.

图3仿真分析了匹配滤波器 $H_M(\omega)$ 的随平均能量因子 α 、平均相似度 β 、平均相关高度 γ 及综合畸变因子的性能下限(SNR)变化(截止频率 ω_c 取 $1.0e+3$).从图3(a)、(b)和(c)中看出,当目标信号谱的畸变变化为0(即畸变因子 $\alpha=0, \beta=0, \gamma=0$)时,滤波器信噪比下限都为53.85 dB,稳健匹配滤波器即为最大信噪比输出的匹配滤波器.随着信号的平均能量因子、平均相似度和平均相关高度的增大,即目标信号谱的畸变程度越高,滤波器的性能下限(SNR)下降从而使补偿畸变谱能量变化所造成的信噪比越大.三种谱畸变因子产生的信噪比最大损失比例 $\Delta\text{SNR}/\text{SNR}$ 分别为0.194 4($\alpha=1, \beta=0, \gamma=0$),0.073 5($\alpha=0, \beta=1, \gamma=0$),0.132 5($\alpha=0, \beta=0, \gamma=1$),结果表明平均能量因子的信噪比补偿最高,平均相关高度次之,平均相似度最少.从图3(d)看出,三种畸变变化共同作用下稳健匹配滤波器的SNR下限变化曲线比较陡峭,此时信噪比最大损

失比例($\alpha=1, \beta=1, \gamma=1$)为0.291 5,结果表明目标信号谱存在多种畸形变化时所导致的SNR损失比单一因子的大.

3 结论

在匹配滤波器的设计中,接收信号常常是发送端选定信号的畸变形式,传统的最大信噪比输出的匹配滤波器在滤波处理过程中常常采用确定的目标信号来建立匹配滤波器,而忽略了目标信号畸形所引起的信噪比特性变化.当背景噪音的谱能量较大时,信噪比特性变化较小,当背景噪音非常弱小时,信号不确定度的影响比重变大,信噪比对信号的不确定度反应非常敏感.本文提出的稳健匹配滤波算法,将忽略掉的目标谱畸变引起的不确定误差表示出来,通过适当的信噪比补偿,能有效地克服目标信号的畸形影响,对微弱红外信号的随机误差具有一定的稳健性,同时稳健匹配滤波器对红外输入目标信号的不确定性表现出不敏感的特性.

参考文献

- [1] YANG De-gui, ZHUANG Zhao-wen, LI Xiang. Research of small IR target detection under a complex background[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, **25**(5): 563-564. 杨德贵,庄钊文,黎湘.复杂背景下红外小目标检测技术研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, **25**(5): 563-564.
- [2] LI Zhe, SU Xiu-qin, YANG Xiao-jun, et al. Small moving infrared target detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 924-927. 李哲,苏秀琴,杨小君,等.红外运动小目标的检测[J]. *光子学*

- 报, 2006, **35**(6):924-927.
- [3] MOYA A, ESTEVE T J J, GARCIA J, *et al.* Shift-and scale-invariant recognition of contour objects with logarithmic radial harmonic filters[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(29): 5347-5352.
- [4] ZHANG Yun-qiu, ZHANG Ning-chuan, HU Jin-peng. Numerical simulation and mechanism analysis of freak waves [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **26**(5): 116-124.
- [5] JIN Yi, PAN Mao, YAO Ling-qing, *et al.* On a robust variogram estimator [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, **45**(6): 1033-1038.
金毅, 潘懋, 姚凌青, 等. 一种稳健变差函数计算方法[J]. 北京大学学报, 2009, **45**(6):1033-1038.
- [6] WANG Xian, WANG De-jun. Discrete signal filtering[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
王欣, 王德隽. 离散信号的滤波[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [7] VERDU S, POOR H V. On minimax robustness: a general approach and applications [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1984, **30**(2): 328-340.
- [8] 奥特 R L, 朗格内克 M. 统计学方法与数据分析引论[M]. 张忠占, 王建稳, 王强, 等, 译. 5 版. 北京: 科学出版社, 2003.
- [9] WU Yi-quan, WU Wen-yi, LUO Zi-juan. A method of small target detection in infrared image sequences based on the least absolute deviation and chaos-genetic algorithms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 736-740.
吴一全, 吴文怡, 罗子娟. 基于最小一乘和混沌遗传算法检测红外小目标[J]. 光子学报, 2009, **38**(3):736-740.
- [10] OUTERBRIDGE J, GREGORY D A. Optical correlation techniques applied to spacecraft docking [C]. *SPIE*, 2006, **6245**(62450H): 1-9.
- [11] MA J, PARHI K K, DEPRETTERE E F. Annihilation-reordering look-ahead pipelined CORDIC-based RLS adaptive filters and their application to adaptive beamforming [J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2000, **48**(8): 2414-2431.
- [12] LIU Ling, LIU Xiao-ming, ZENG Hao. Array signal processing simulation based on matlab [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, **20**(13): 3548-3552.
刘玲, 刘晓明, 曾浩. 基于 MATLAB 的阵列信号处理仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2008, **20**(13): 3548-3552.

Robust Matched Filter Algorithm for Infrared Signal Inception

QIN Jian-hua^{1,2}, YU Chong-xiu¹, TAN Yong-hong², WANG Zi-min², SU Mi-yong²

(1 School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(2 Lab of Intelligent Systems and Control Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: For infrared detection target signal uncertainty problem, a robust matched filter algorithm was presented. Based on Parseval theorem, the uncertain spectral model of infrared target signal was established by qualitative analyzing the target signal spectrum distortion source, and signal spectrum distortion associated factors were analyzed. The saddle-point solution for Signal-to-Noise of robust matched filtering was constructed using the minimax method, and the most negative signal spectrum was obtained with Genetic Algorithm of minimax bilevel optimization. Then transfer function of the robust matched filter was designed based on the classical matched filter. The simulation results show that Signal-to-Noise of robust matched filtering under low background noise can significantly eliminate the Signal-to-Noise over-sensitivity to the abnormal change of infrared input signal spectrum, and spectral Signal-to-Noise compensation in signal spectral is the highest to energy distortion, followed by correlation peak distortion, spectral related distortion to at least.

Key words: Infrared signal; Matched filtering; Saddle-point solution; Genetic Algorithm(GA)