

文章编号:1001-9014(2004)01-0067-05

基于相关的多重分形奇异性分析的红外弱目标检测

彭复员, 周麟, 阎旭光

(华中科技大学电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对红外图像中的目标对比度低、背景复杂及受噪声严重干扰等特点,利用像素之间的相关性,提出了一种基于相关多重分形奇异性分析的弱目标检测方法.实验结果表明该算法对海洋和天空复杂背景及随机噪声影响都具有较好的抑制作用.

关键词:三重相关;多重分形;奇异性分析;目标检测

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

INFRARED WEAK TARGET DETECTION BASED ON CORRELATION ANALYSIS OF MULTI-FRACTAL SINGULARITY SPECTRAL

PENG Fu-Yuan, ZHOU Lin, YAN Xu-Guang

(Dept. of Electronic & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the characteristic of the infrared image, which is low contrast, complex background and seriously noise interfered in target, a kind of detection method was proposed by using the correlation among the pixel. The method is based on the correlation analysis for the multifractal singularity spectral. Experimental results show that this method is available for suppression of the random noises and the influences from the complex background of ocean and sky.

Key words: triple correlation; multi-fractal; local singularity analysis; target detection

引言

多重分形是定义在分形上的由多个标度指数的奇异测度所组成的集合.它刻划的是分形测度在支集上的分布情况,即用一个谱函数来描述分形不同层次的特征.分形维数直观上与物体表面的粗糙度相吻合,Pentland已经证明了自然界中的大多数自然物体在一定的尺度范围内是满足各向同性的分形表面,并且电磁波与具有分形特征的表面相互作用后的回波信号所映射成的灰度图像表面也具有各向同性的分形.因此,多重分形奇异谱函数被大量用于纹理分析和分类^[1,2].

人造物体可看成是复杂背景中的局部纹理结构的变化,表现为奇异性.因此,可以用分形谱的奇异性特征分析方法检测自然场景中的人造物体.而实

际获得的红外图像大多受噪声污染,可以理解为物体表面映射到灰度空间时发生了畸变,以一般灰度定义的分形奇异谱就不具有抗噪性.为此,我们构造一种基于相关的多重分形奇异谱,充分利用了多重相关运算抑制噪声的能力和多重分形奇异性能够描述分形不同层次特征的能力,解决实际应用中目标特性分析和检测问题.

1 图像的相关函数空间

函数 $I(t)$ 的三重相关函数定义为^[3]

$$I^{(3)}(t_1, t_2) = (1/T) \int_0^T I(t)I(t+t_1)I(t+t_2) dt. \quad (1)$$

设含噪声的信号 $J(t)$ 为

$$J(t) = I(t) + N(t). \quad (2)$$

收稿日期:2003-01-27,修回日期:2003-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60272099)

作者简介:彭复员(1945—),女,湖北武汉人,华中科技大学电子与信息工程系教授,博士生导师,主要从事图像处理、目标检测与识别研究.

Received Date: 2003-01-27, revised Date: 2003-08-06

其中 $N(t)$ 为独立于信号的加性平稳随机过程. 对 $J(t)$ 进行三重相关操作, 并求其集平均, 可得到

$$\begin{aligned} \langle J^{(3)}(t_1, t_2) \rangle &= I^{(3)}(t_1 + t_2) + \langle N^{(3)}(t_1 + t_2) \rangle \\ &+ \langle N(t) \rangle [I^{(2)}(t_1) + I^{(2)}(t_2) + I^{(2)}(t_2 - t_1)] \\ &+ \langle I(t) \rangle [\langle N^{(2)}(t_1) \rangle + \langle N^{(2)}(t_2) \rangle \\ &+ \langle N^{(2)}(t_2 - t_1) \rangle]. \end{aligned} \quad (3)$$

由于噪声与信号不相关, 噪声也无自相关, 因此式(3)中三重相关集平均使白噪声几乎完全被抑制, 而对宽带有色噪声, 其自相关函数 $N^{(2)}(t)$ 随着 t 的增大而迅速下降, 使噪声中的信号得以突出, 因此利用三重相关集平均运算使得噪声明显被抑制.

众所周知, 图像像素间有较大的相关性, 文献[4]中我们曾构造了一种图像空间局部邻域多重相关函数:

$$\begin{aligned} I_k^{(5)} &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(f(x+i, y+j) - E_k)(f(x+i+1, y+j) \\ &- E_k)(f(x+i-1, y+j) - E_k)(f(x+i, y+j+1) \\ &- E_k)(f(x+i, y+j-1) - E_k)]. \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中, m, n 为窗口大小, 窗口大小的选择依赖像素的相关长度; E_k 为第 k 个局部窗口内像素的灰度均值. 该函数用局部窗口内四邻域像素的纹理集平均构造图像空间局部邻域多重相关函数, 建立起一种广义空间相关模型, 通过局部相关特性来描述背景的纹理特征. 因此, $I_k^{(5)}$ 不仅极大地抑制了图像中的噪声, 而且保持和加强了图像的局部纹理特性, 突出了图像中弱小目标的空间邻域信息.

2 测度的多重分形分析^[5]

多重分形概念是由门德尔布罗德(B. B. Mandelbrot)在1972年研究湍流时首先提出的, 以后逐渐建立起它的数学形式, 并在各方面得到应用. 多重分形研究物理量或其它量在几何支撑上的分布, 其分布常常显示出奇异性, 因此可以说, 多重分形是为研究物理量或其它量的奇异性分布而引入的基本概念. 这里的几何支撑, 通常指分形, 但也包括非分形(如平面、球面、体积等). 所谓多重分形(也称作多标度分形), 是定义在分形结构上的由多个标度指数的分形测度组成的无限集合.

设每个盒子的线度为一个远远小于研究对象线度的测量单位 ε , 第 i 个盒子的密度分布为 P_i , 则有:

$$P_i(\varepsilon) \sim \varepsilon^\alpha. \quad (5)$$

上式对于完全均匀的分布, 显然有 $\alpha = d$ (d 是研究对象所占据的拓扑维数). 对于一个简单的分形体,

它给出了一般分形的分布特征, α 为非整数, 称其为奇异指数. 现在把在分形上具有相同 α 值的小盒子的数目记为 $N_\alpha(\varepsilon)$, 它与 ε 大小有关, 并表示为 $N_\alpha(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)}$, 与 $N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D}$ 简单分形公式相比, 可以看出 $f(\alpha)$ 的物理意义是指具有相同 α 值的子集的分形维数.

一个复杂的多分形体, 它的内部可分为一系列不同 α 值(即 P_i 值)所表示的子集, 多重分形就给出了这一系列子集的分形特性. 为了了解这一系列子集分布特性, 借助于统计物理中的矩表示方法. 定义函数 $x_q(\varepsilon)$, 它是对各个小盒子的概率加权求和:

$$x_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^N P_i^q(\varepsilon) = \varepsilon^{\tau(q)} \quad q \in (-\infty, +\infty). \quad (6)$$

它是概率测度的 q 阶矩.

根据分形理论可知广义分形维数 $D(q) = \frac{1}{q-1}$

$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln x_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$, 质量指数 $\tau(q) = (q-1)D(q)$, 则有奇

异性指数 $\alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq}$; 多重分形奇异谱 $f(\alpha(q))$

定义为:

$$f(\alpha(q)) = q \cdot \alpha(q) - \tau(q). \quad (7)$$

对于具有多重分形特性的自然物体, 它的多重分形奇异谱函数 $f(\alpha(q))$ 在归一化概率 P_i 不全相等的条件下当 $q > 0$ 时单调递减^[6].

可见物理空间的多重分形谱不仅能度量所研究对象统计分布, 并能刻划奇异性 and 相似性, 是对测度集合标度特征的描述, 同时这种描述是依赖于所选分形测度的.

3 基于多重相关的分形奇异谱算法

· 设 $f(x, y)$ 为一幅 $M \times M$ 的灰度图像. 考虑在给定的尺度 ε 下, 用 $\varepsilon \times \varepsilon$ 大小的盒子对图像进行覆盖, 记尺度 ε 下盒子所覆盖的各个局部区域的多重相关值为 $I_i(\varepsilon)$, 为了描述图像相关集的分布特性, 定义相应的归一化概率为:

$$P_i(\varepsilon) = \frac{I_i(\varepsilon)}{N(\varepsilon)}, \quad (8)$$

其中, $N(\varepsilon) = \sum_i I_i(\varepsilon)$.

若有 2 个小区域 m 和 j 的概率分别是 P_m 和 P_j , 且 $P_m \gg P_j$, 当 $q \gg 1$ 时, 式(6) $\sum P_i^q$ 中显然是 P_m^q 起主要作用, 这时的 $x_q(\varepsilon)$ 反映的是概率高(或稠密的)区域的性质. 如果在 $q \rightarrow \infty$ 极限条件下, 可以只

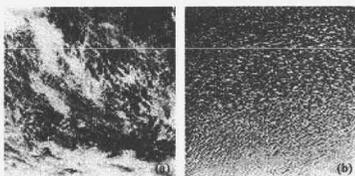


图1 Brodatz 标准纹理图像
Fig.1 Brodatz texture image

考虑 P_m 而忽略其它小的概率,这样还可大大简化计算.

算法步骤如下:(1)根据式(4)计算尺度 ε 下盒子所覆盖的每个区域 $\varepsilon \times \varepsilon$ 大小图像的多重相关 $I_i(\varepsilon)$,盒子的尺度可根据研究对象的相关长度选择, i 为每个小区域编号;(2)在已构成的相关函数空间上由式(8)计算其分布特性 $P_i(\varepsilon)$;(3)改变盒子的尺度重复步骤(1)、(2);(4)根据广义分形维数 $D(q)$ 的定义可以计算出不同 q 对应的分形维数,实验中 $q \in [0, 5]$,每隔 0.05 计算一次 $D(q)$;(5)根据式(7)计算多重分形奇异谱曲线 $q \sim f(\alpha(q))$,即相关分形奇异谱.

以上基于相关函数空间的多重分形方法,是把一个相关函数空间分成许多具有不同奇异程度的区域来研究.由于多重相关运算考虑了空间的相关性和变化性,建立在其基础上的多重分形算法不仅充分利用到了邻域空间分布的结构信息,分层次地刻画了图像相关空间内部的精细结构,而且更突出了异常局部变化特征.因此相关空间的多重分形谱曲线 $q \sim f(\alpha(q))$ 的变化特征反映了相关强度分布复杂性的物理本质.

4 实验结果及分析

实验图像选择了两幅不同的纹理图像(图1)和复杂背景的弱目标红外图像(图6).图1和图2分

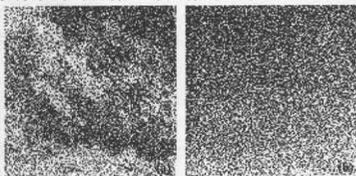


图2 加高斯噪声纹理图像
Fig.2 Brodatz texture image with added gaussian noise

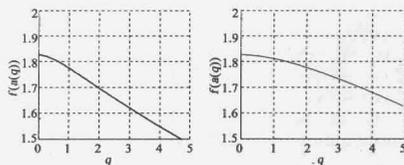


图3 原始图像的分形奇异谱(a)图1(a)的分形奇异谱 $q \sim f(\alpha(q))$ (b)图1(b)的分形奇异谱 $q \sim f(\alpha(q))$
Fig.3 The original image singularity spectra of multifractal (a) singularity spectra of multifractal: $q \sim f(\alpha(q))$ of Fig.1 (a) (b) singularity spectra of multifractal: $q \sim f(\alpha(q))$ of Fig.1 (b)

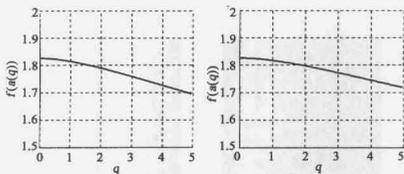


图4 加噪图像的分形奇异谱(a)图2(a)的分形奇异谱 $q \sim f(\alpha(q))$ (b)图2(b)的分形奇异谱 $q \sim f(\alpha(q))$ 曲线
Fig.4 The noisy image singularity spectra of multifractal (a) singularity spectra of multifractal: $q \sim f(\alpha(q))$ of Fig.2 (a) (b) singularity spectra of multifractal: $q \sim f(\alpha(q))$ of Fig.2 (b)

别为2幅 Brodatz 标准纹理图像和加噪(均值为0,方差为0.08的高斯噪声)图像,图3(a)、(b)分别为对应原始图像的分形奇异谱.图4(a)、(b)分别为对应加噪图像的相关分形奇异谱.

从图3可见2类不同纹理图像的分形奇异谱具有明显的差异,分别代表了2种纹理的结构特征;与图4加噪图像的分形奇异谱比较,可见图像加噪前后的分形奇异谱发生了变化(图3(a)和图4(a),图3(b)和图4(b)),且图4中2幅不同纹理加噪图像的分形奇异谱几乎没有太大差异,或不具有可分性.通过对不同纹理图像的分形奇异谱实验比较,说明不同纹理图像的分形奇异谱有明显的差异,具有可分性,但以一般灰度定义的分形奇异谱不具有抗噪性.

图5为图1(b)原始图像与其加噪图像(图2(b))的相关分形奇异谱比较,可见2种谱特性曲线形状基本一致,说明基于相关函数空间的多重分形算法具有很好的抗噪性.

为进一步验证算法的有效性,对实际和加不同

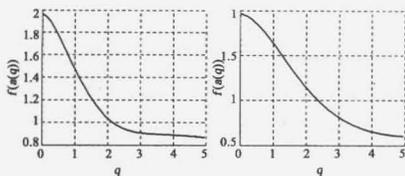


图5 原始图像与加噪图像的相关分形奇异谱比较(a)图1(b)的相关分形奇异谱 $q \sim f(\alpha(q))$ (b)图2(b)的相关分形奇异谱 $q \sim f(\alpha(q))$ 曲线)

Fig. 5 Comparison of singularity spectra of multifractal between original and noisy image (a) singularity spectra of multifractal; $q \sim f(\alpha(q))$ of Fig. 1 (b), (b) singularity spectra of multifractal; $q \sim f(\alpha(q))$ of Fig. 2 (b)

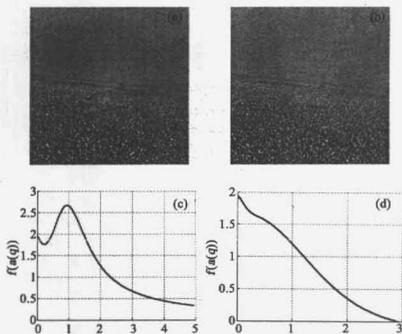


图6 红外图像及相关分形奇异谱(a)有目标红外图像(b)无目标红外图像(c)有目标红外图像的 $q \sim f(\alpha(q))$ (d)无目标红外图像的 $q \sim f(\alpha(q))$ 曲线)

Fig. 6 Infrared image and Correlation singularity spectra of multifractal (a) infrared image with object (b) infrared image without object (c) infrared image with target; $q \sim f(\alpha(q))$ (d) infrared image without target; $q \sim f(\alpha(q))$

噪声时的红外图像进行了实验比较。图6为有海洋和天空背景的红外图像及相关分形奇异谱。(a)为有目标图像,(b)为无目标图像,(c)、(d)分别为对应的分形奇异谱。图7为加高斯噪声(均值为0,方差为0.08)红外图像及其相关分形奇异谱。图8为加椒盐噪声红外图像(图像信噪比14.0403db)及其相关分形奇异谱。

从图6可以看出:有目标的红外图像相关分形奇异谱曲线与无目标的比较在衰减的过程中出现了一个峰(图6(c)),表明图像的相关特性出现了奇异性特征,即有目标的图像和无目标图像的相关分形奇异谱存在明显的差异,依此可判断是否存在目

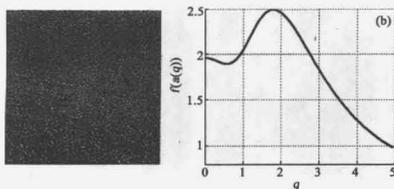


图7 加高斯噪声红外图像及相关分形奇异谱(a)加高斯噪声红外图像(b)加噪红外图像的 $q \sim f(\alpha(q))$ 曲线

Fig. 7 Infrared image with added noise and Correlation singularity spectra of multifractal (a) Infrared image with added gaussian noise (b) Correlation singularity spectra of multifractal

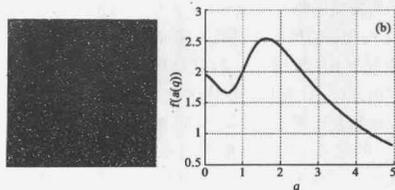


图8 加椒盐噪声红外图像及相关分形奇异谱(a)加椒盐噪声红外图像(b)加噪红外图像的 $q \sim f(\alpha(q))$ 曲线

Fig. 8 Infrared image with added salt & pepper noise (a) Infrared image with added salt & pepper noise (b) Correlation singularity spectra of multifractal

标。

以上对比结果表明:加噪前、后图像的相关分形奇异谱具有较好的一致性(图6(c)与图7(b)、图8(b)),目标特性仍包含其中,通过局部窗口运算即可检测出。

采用本文提出的基于相关函数空间的多重分形方法,不仅对噪声影响具有很好的抑制作用,其重要意义还在于有效地度量了局部奇异性,或是更精细地描述了相关分形集的局部尺度特性。因此相关分形奇异谱可成为定量描述复杂现象和形态的一个重要指标,为目标特性分析和识别提供更精细的描述。

5 结论

本文从图像的局部纹理特性描述出发,提出了一种复杂背景下的红外弱目标检测方法——基于相关函数空间的多重分形方法。通过利用图像空间局部邻域多重相关纹理特征对噪声的抑制能力和多重

分形对分形集的局部奇异性刻画能力,在噪声干扰情况下,目标和背景的一般分形特征差异不明显时,利用相关分形奇异谱仍可判断目标的存在与否,实验验证了该方法的有效性.

REFERENCES

- [1] Du Gan, Yeo Tat-Soon. A multifractal approach for auto-segmentation of SAR images[J]. *IEEE*, 2001, 5: 2301—2303
- [2] Anh V, Maeda J, Tieng Q, et al. Multifractal texture analysis and classification[J]. *IEEE*. 1999, 4: 445—449
- [3] Lohmann A W, Wirtitzer B. Triple correlation[J]. *IEEE*, 1984, 72(7): 889—901
- [4] PENG Fu-Yuan, ZHOU Xin-Jie, A multiple-correlation-analysis-based high-speed detection research for infrared weak target[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(彭复员,周鑫杰. 基于多重相关分析的红外弱小目标快速检测. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(6): 454—456
- [5] CHEN Yong, CHEN Ling, ed. *Fractal Geometry* [M]. Beijing: Earthquake Press(陈颀,陈凌,编著. 分形几何学,北京:地震出版社),1998, 127—128
- [6] ZHOU Wei-Xing, WU Tao. Geometrical characteristics of singularity spectra of multifractals[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*(周炜星,吴韬. 多重分形奇异谱的几何特性: II. 配分函数法. *华东理工大学学报*), 2000, 26(4): 390—395