

文章编号:1001-9014(2011)06-0556-05

一种基于自适应双向扩散过程的 无源毫米波图像去噪与增强

熊金涛, 孙乾松, 李良超, 杨建宇
(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 研究和设计了一种新型自适应双向扩散过程, 对无源毫米波图像进行降噪和增强处理. 根据图像的局部特征进行自适应扩散处理, 在图像的同质区域进行各向同性扩散降低噪声, 在图像的边缘处沿着图像边缘的切向方向进行正向扩散降低噪声, 沿着图像边缘的法向方向进行反向扩散锐化边缘. 通过对仿真图像和实测的 91.5 GHz 无源毫米波图像的实验表明, 该算法对无源毫米波图像有显著的降噪与增强效果.

关键词: 无源毫米波成像; 偏微分方程; 自适应双向扩散; 图像增强

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

An adaptive bidirectional diffusion process for passive millimeter-wave image denoising and enhancement

XIONG Jin-Tao, SUN Qian-Song, LI Liang-Chao, YANG Jian-Yu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A new adaptive bidirectional diffusion process that denoises and enhances passive millimeter wave images is designed and analyzed, which can diffuse adaptively according to the local characteristics of the image. In the flat areas of the image, it executes an isotropic diffusion to denoise. On the edges of the image, it executes a forward diffusion along the tangent direction to the isophote lines to denoise, and a backward diffusion along the normal directions to sharpen edges. Experimental results, completed with simulated image as well as actual passive millimeter-wave image at 91.5 GHz, demonstrated that it can substantially denoise and enhance passive millimeter wave images.

Key words: PMMW imaging, partial differential equations, adaptive bidirectional diffusion, image enhancement

PACS: 07.05.Pj

引言

无源毫米波成像系统利用毫米波辐射计探测物体自身电磁辐射差异来进行成像. 由于毫米波段波长介于红外与微波之间, 具有穿透衣物、尘埃、云雾等特点, 非常适用于战场侦查和重要场所安检^[1-2]. 但是由于波长相对可见光和红外较长, 成像模糊^[3-4], 加上噪声的影响使得图像退化严重, 不利于目标检测和后期处理. 因此, 为了满足实际应用, 急需一种对噪声鲁棒的图像增强算法对毫米波图像进行去噪和增强.

近年来, 基于偏微分方程的图像处理技术得到了极大的发展, 成为国内外学者的研究热点^[5-6]. 根

据尺度空间理论, 正向扩散有利于降噪, 如热扩散方程, 但是热扩散方程不加区分的对图像同质区域和边缘部分进行各向同性扩散必然导致在降噪的同时模糊了边缘. Perona 和 Malik 首先发现了这一问题, 并提出了一种各向异性扩散过程 (P-M 过程) 来代替各向同性扩散过程^[7]. P-M 过程具有保护边缘和去噪能力, 但是不具有锐化边缘和图像增强的作用. Osher 和 Rudin 提出了一种冲击滤波器, 用来锐化边缘增强图像, 但是这种滤波器对噪声敏感, 不适合对毫米波图像进行增强处理.

为此, 设计了一种自适应双向扩散过程同时对毫米波图像进行去噪和增强. 该过程可以根据图像的特征进行自适应地扩散, 在图像的同质区域进行

收稿日期: 2010-06-02, 修回日期: 2010-11-09

Received date: 2010-06-02, revised date: 2010-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(60776823); 国家自然科学基金重点项目(60632020)

作者简介: 熊金涛(1966-), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要从事信号处理、探测成像方面的研究工作, E-mail: jtxiong@uestc.edu.cn.

各向同性扩散充分去噪,在图像的边缘附近进行双向扩散,即沿着等照度线的切向进行正向扩散去除噪声,沿着等照度线的法向方向进行反向扩散锐化边缘,实验结果表明,该算法对退化的毫米波图像具有显著的去噪和边缘增强效果。

1 热扩散方程和 P-M 过程

正向扩散过程可用于去除图像中的噪声,常用的去噪过程包括各向同性扩散过程和各向异性扩散过程。

1.1 各向同性扩散过程

典型的各向同性扩散方程为热扩散方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u = u_{xx} + u_{yy} \quad (1)$$

根据拉普拉斯算子的旋转不变性,式(1)可以分解成沿等照度线切向和法向的扩散

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u = u_{TT} + u_{NN} \quad (2)$$

其中, T 表示等照度线的切线方向, N 表示等照度线的法向方向。可见热扩散方程沿着等照度线切向和法向的扩散速率相同。沿着等照度线法向的正向扩散会导致边缘模糊,因此热扩散方程在去噪的同时也模糊了边缘,其去噪效果类似于高斯低通滤波器。

1.2 各向异性扩散过程

为了在去噪的同时保护边缘,Perona 和 Malik 提出一种各向异性扩散过程(P-M 过程)

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(g(|\nabla u|) \nabla u) \\ u(0) = u_0 \\ \frac{\partial u}{\partial N} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$g(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{K}\right)^2} \quad (4)$$

其中 $g(s)$ 是一个边缘停止函数, K 是一个梯度阈值,当 $s > 0$ 的时候 $g(s)$ 是一个单调递减函数,在边缘附近梯度增大, $g(s)$ 减小,从而减弱扩散,保护边缘。

P-M 过程的扩散行为可以总结为:

(1) 在图像同质区域,图像灰度梯度值较小,边缘停止函数趋近 1,方程的扩散行为类似于各向同性扩散,可以充分降噪。

(2) 在图像的边缘附近,图像灰度梯度值增大,边缘停止函数趋近 0,扩散停止,在保护边缘的同时也降低了去噪能力。

(3) 由于 P-M 过程在边缘附近不能反向扩散,因此不能锐化边缘,增强图像。

2 反向扩散和冲击滤波器

反向扩散的作用类似于高通滤波,有锐化图像的作用。很多反向扩散过程由于在模糊图像边缘附近产生了一个冲击,形成锐利的边缘,也称为冲击滤波器。典型的冲击滤波器是由 Osher 和 Rudin 提出的^[8],其表达式可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -F(\Delta u) |\nabla u| \\ u(0) = u_0 \\ \frac{\partial u}{\partial N} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, F 是一个连续的 lipschitz 函数,一种合适的选择是

$$F(s) = \text{sign}(s) \quad (6)$$

由于反向扩散的不稳定性,对噪声比较敏感,在噪声较大的情况下,会产生错误的冲击,反而增强了噪声。

3 自适应双向扩散

毫米波图像的退化过程可用数学模型表述为

$$g = f * h + n \quad (7)$$

其中, g 表示退化图像, f 为原始场景, h 为系统点扩展函数, n 表示系统噪声。由于系统点扩展函数的低通特性,造成图像模糊。因此对毫米波图像的处理,不仅应该降低噪声,还需要锐化边缘。

3.1 自适应双向扩散方程

正向的扩散稳定,去噪效果明显,反向扩散虽然可以锐化边缘,但对噪声敏感。因此在进行反向扩散的同时必须兼顾对噪声的控制,防止噪声的增强。付树军在文献^[9]中提出一种耦合冲击扩散方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a(-c_N u_{NN}) + b(c_T u_{TT}) \quad (8)$$

其中, a, b 分别是反向和正向扩散控制系数, C_N 和 C_T 分别是法向和切向扩散系数。将式(8)进行简化,分别使反向和正向扩散控制系数 $a = 1, b = 1$,得到式(9)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_N u_{NN} + c_T u_{TT} \quad (9)$$

为了使式(9)根据图像的特征进行自适应的扩散,对扩散系数进行如下赋值

$$c_N = \begin{cases} \alpha & |\nabla u| \leq TH \\ -\beta & |\nabla u| > TH \end{cases}, \quad c_T = \alpha \quad (10)$$

其中, $\alpha > 0$, 正比于噪声功率, 用来控制正向扩散的速率; $-\beta < 0$, 反比于噪声功率, 用来控制反向扩散速率; $|\nabla u|$ 为图像梯度, TH 为梯度阈值. 进行这样改写的目的是在图像的同质区域 $|\nabla u| \leq TH$, 式(9)分别沿切向和法向进行正向扩散降低噪声, 其过程等效于热扩散方程; 在图像的边缘附近 $|\nabla u| > TH$, 使式(9)进行双向扩散, 即沿着等照度线切向进行正向扩散降低噪声, 沿着等照度线法向进行反向扩散, 锐化边缘. 根据拉普拉斯算子的旋转不变性, 可以将式(9)、式(10)改写为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \begin{cases} \alpha \Delta u & |\nabla u| \leq TH \\ -\beta \Delta u + (\alpha + \beta) u_{TT} & |\nabla u| > TH \end{cases} \quad (11)$$

式(11)的数值实现采用以下策略^[10]: 对正向扩散项采用中心差分形式

$$\Delta u = u_{xx} + u_{yy} \quad , \quad (12)$$

$$u_{TT} = \frac{u_{xx}u_y^2 - 2u_{xy}u_xu_y + u_{yy}u_x^2}{u_x^2 + u_y^2} \quad , \quad (13)$$

式中的 $u_x, u_y, u_{xx}, u_{yy}, u_{xy}$ 都采用中心差分格式进行计算;

$$u_x = (u_{i+1,j} - u_{i-1,j})/2 \quad , \quad (14)$$

$$u_y = (u_{i,j+1} - u_{i,j-1})/2 \quad , \quad (15)$$

$$u_{xx} = u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j} \quad , \quad (16)$$

$$u_{yy} = u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1} \quad , \quad (17)$$

$$u_{xy} = (u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j-1} - u_{i+1,j-1} - u_{i-1,j+1})/4 \quad . \quad (18)$$

对于反向扩散项采用通量限制技术限制过冲^[10]

$$-\Delta u = -\text{sign}(\Delta u)(|u_{xx}| + |u_{yy}|) \quad , \quad (19)$$

其中,

$$|u_{tt}| = \begin{cases} 2\min(|\delta_t^+ u|, |\delta_t^- u|) & t = x, y \\ 0 & \end{cases} \quad (20)$$

这里 $\delta_t^+ u, \delta_t^- u$ 分别表示沿 t 方向的前向差分和后向差分;

$$\delta_x^+ u = u_{i,+1j} - u_{i,j} \quad , \quad (21)$$

$$\delta_x^- u = u_{i,j} - u_{i-1,j} \quad , \quad (22)$$

$$\delta_y^+ u = u_{i,j+1} - u_{i,j} \quad , \quad (23)$$

$$\delta_y^- u = u_{i,j} - u_{i,j-1} \quad . \quad (24)$$

为了增加对噪声的鲁棒性, 一般先要预滤波, 通常用一个标准差为 σ 的高斯低通滤波器对原始图像进行预滤波初步降噪; 然后对预滤波图像求梯度, 并根据式(10)与阈值比较设置扩散系数 C_T, C_N , 再按式(11)执行扩散, 直到迭代结束, 完成图像增强, 其流程图可以描述如下

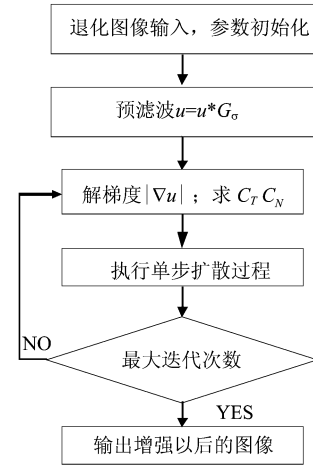


图1 自适应双向扩散过程流程图

Fig. 1 Flow-chart for implementation of adaptive bidirectional diffusion

3.2 自适应双向扩散过程仿真实验与结果

采用计算机使用 MATLAB 建立仿真环境, 分别使用了仿真毫米波图像和自研系统实测的 91.5 GHz 无源毫米波图像进行仿真实验, 验证算法有性能, 并且与 P-M 扩散和冲击滤波器的仿真结果比较.

使用的仿真图像为字母 F 的模糊加噪图像, 图像视场像素大小为 256×256 , 灰度 256 级, 其中目标灰度 200, 背景灰度 20; 采用截止半径为 15 的理想低通滤波器进行图像模糊, 加入噪声方差为 25 的高斯白噪声, 形成一幅信噪比为 11.6 dB 的模糊带噪图像; 各实验均迭代 200 次, 并对自适应双向扩散的参数初始化为阈值 $TH = 2$, 预滤波器方差 $\sigma = 2.24, \alpha = 2, \beta = 0.5$.

将图 2(f) 与图 2(e), 图 3(d) 与图 3(c) 进行对比, 实验发现, 自适应双向扩散过程的处理效果优于冲击滤波器.

为了客观地评价图像质量的改善, 根据图像增强的常用评价准则, 采用峰值信噪比 (PSNR), 均方根误差 (RMSE) 和清晰度 (Definition)^[11] 来衡量图像质量.

$$\text{PSNR} = 10 \log \frac{M \cdot N | \max(x(i,j)) |^2}{\sum_i \sum_j (x(i,j) - x_o(i,j))^2} \quad , \quad (25)$$

$$\text{RMSE} = \left(\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x(i,j) - x_i(i,j))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad , \quad (26)$$

$$\text{Definition} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{(x(i,j) - x(i-1,j))^2 + (x(i,j) - x(i,j-1))^2} \quad , \quad (27)$$

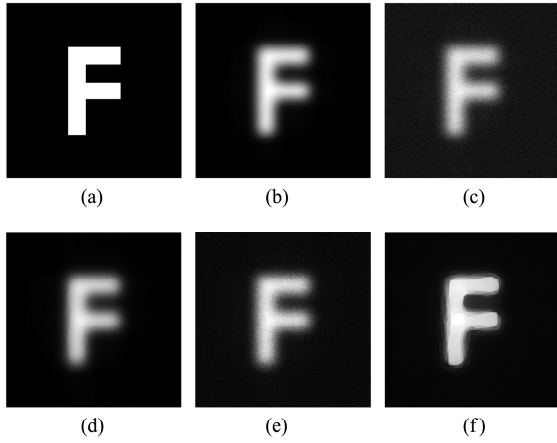


图2 各扩散过程实验结果 (a)原始图像 (b)模糊图像 (c)模糊带噪图像 (d)P-M过程处理结果 (e)冲击滤波结果 (f)双向扩散结果

Fig.2 Experimental results of all diffusion processes (a) original image (b)blurred image (c)blurred and noised image (d)result of P-M process (e)result of shock filter (f)result of bidirectional diffusion

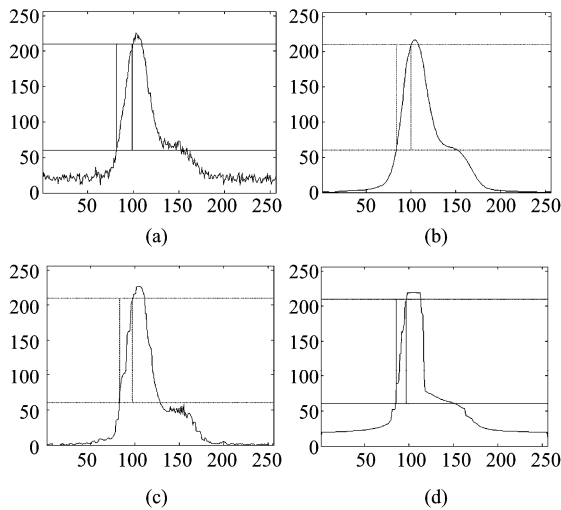


图3 各扩散过程处理结果的切片比较 (a)模糊带噪图像切片 (b)P-M扩散切片 (c)冲击滤波器切片 (d)自适应双向扩散切片

Fig.3 Slices of results of all the diffusion process (a) slices of blurred and noised image (b) slices of P-M process (c) slices of Shock filter (d) slices of bidirectional diffusion

其中, x_0, x_i, x 分别表示原始图像, 输入图像和输出图像. PSNR 可以反映处理以后图像的噪声水平; RMSE 值越大, 待增强的图像与增强后的图像的的差异就越大, 一定程度上可以表明图像被增强的程度越大. Definition 可以反映出图像中的微小细节反差和纹理变化特征. Definition 越大, 图像越清晰.

表1 各实验结果的 PSNR, RMSE 和 Definition

Table 1 The results of PSNR, RMSE, Definition

	带噪模糊图像	P-M 扩散结果	冲击滤波结果	自适应双向扩散
PSNR/dB	16.1126	17.4885	17.0312	17.4125
RMSE	0	6.7921	4.5873	9.8323
Definition	8.2278	1.4851	5.7019	1.9323

由表1 得出, PSNR 对于噪声的抑制作用, P-M 扩散和自适应双向扩散效果最好; RMSE 采用自适应双向扩散可以得到最大的均方根误差, 说明该方法的增强效果最好; 原始模糊带噪图像和冲击滤波器处理以后的图像因噪声较大使 Definition 较大, 说明冲击滤波器的去噪能力不足, 而在兼顾去噪的情况下, 自适应双向扩散过程的 Definition 大于 P-M 扩散, 表明在兼顾去噪的情况下, 自适应双向扩散对图像的增强效果最佳.

第二个实验采用自适应双向扩散过程对实测 91.5 GHz 无源毫米波图像进行增强. 在室温为 35°C 开阔无遮挡的环境下对距离 3.5 m 的金属手枪采用逐点扫描进行成像, 使用的接收天线为卡赛洛伦天线, 实验示意图如图4 所示:

实测毫米波图像数据是一系列浮点型数据, 选择包含目标的数据插值到像素 256×256 , 并将数据进行归一化, 使得像素分布在 0 ~ 1 之间, 对数据进行滤波和阈值分割, 降低噪声, 得到图像如图5 (c)

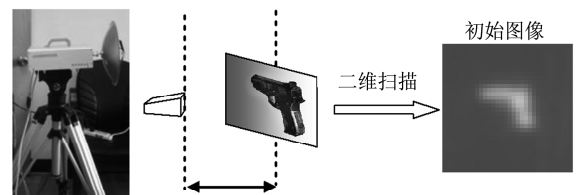


图4 单通道辐射计及其成像实验示意

Fig.4 Single-channel radiometer and it's imaging experiment

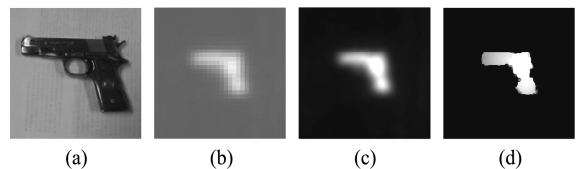


图5 91.5 GHz 无源毫米波图像增强结果 (a) 光学图像 (b) 毫米波图像 (c) 插值滤波 (d) 增强结果

Fig.5 Experimental results of 91.5 GHz PMMW image enhancement using adaptive bidirectional diffusion (a) Optical image (b) PMMW image (c) interpolation and filter (d) enhancement

所示. 对预处理以后的数据图, 5(c) 采用自适应双向扩散进行增强, 参数初始化为迭代次数 200 次, 阈值 $TH=0.05$, 预滤波器方差 $\sigma=1.5$, $\alpha=1$, $\beta=0.5$; 其增强结果如图 5(d) 所示.

为了验证自适应双向扩散过程中图像及其边缘的渐变情况, 分别取出迭代 1 次、10 次、40 次、100 次的中间结果, 并将迭代结果的图像及其梯度边缘显示如图 6 所示, 可以看出, 随着迭代次数的增加, 图像变得越来越清晰, 边缘变得越来越锐利.

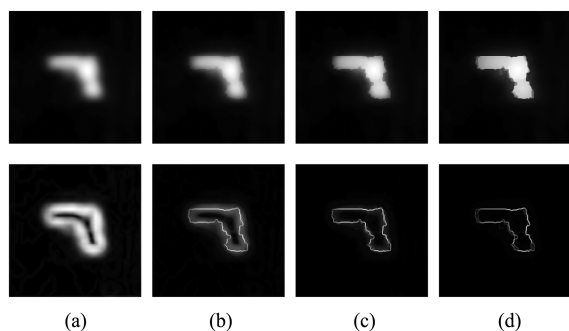


图 6 采用自适应双向扩散的图像和边缘渐变过程 (a) 初始图像 (b) 迭代 10 次 (c) 迭代 40 次 (d) 迭代 100 次
Fig.6 Gradual changes of image and edge based on adaptive bidirectional diffusion (a) original image (b) iteration = 10 (c) iteration = 40 (d) iteration = 100

实验表明, 采用自适应双向扩散对毫米波图像进行增强处理不仅可以降低噪声, 提高图像的信噪比, 还可以锐化模糊的边缘, 增强目标分辨率; 为后续检测、识别等工作提供边缘清晰, 轮廓分明的图像.

4 总结

研究设计了一种自适应双向扩散过程对无源毫米波图像进行降噪与增强. 将正向扩散过程和反向扩散过程进行结合, 使新的扩散过程根据图像特征进行自适应双向扩散. 采用合适的数值解方案对建立的偏微分方程进行求解, 得到了稳定收敛的结果. 实验表明, 该算法对无源毫米波图像具有明显的降噪与增强效果.

REFERENCES

- [1] Corredoura P, Baharav Z, Taber B, *et al.* Millimeter-wave imaging system for personnel screening: scanning 10^7 points a second and using no moving parts [J]. *Proc. of SPIE*, 2006, **6211**:62110B.
- [2] Dill S, Peichl M, Sub H. Study of passive MMW personnel imaging with respect to suspicious and common concealed objects for security applications [J]. *Proc. of SPIE*, 2008, **7117**:71170C.
- [3] Zheng X, Yang J Y. Adaptive projected landweber super-resolution algorithm for passive millimeter wave imaging [J]. *Proc. SPIE*, 2007, **6787**:67871K.
- [4] ZHENG Xin, YANG Jian-Yu. Research on super-resolution algorithm for passive millimeter wave image [D]. *University of Electronic Science and Technology of China. Doctoral Dissertation* (郑鑫, 杨建宇. 无源毫米波图像超分辨算法研究. 电子科技大学博士学位论文), 2008.
- [5] Aubert G, Kornprobst P. *Mathematical problems in image processing: partial differential equations and the calculus of variations. applied mathematical sciences* 147 [M]. Springer-Verlag, 2001.
- [6] Zhang H. Analysis of infrared images based on grey system and neural network [J]. *Kybernetes*, 2010, **39** (8): 1366 - 1375.
- [7] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*, 1990, **12** (7): 629 - 639.
- [8] Osher S, Rudin L. Feature-oriented image enhancement using shock filters [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1990, **27** (4): 919 - 940.
- [9] Fu S J, Ruan Q Q, Wang W Q. Feature-oriented coupled bidirectional flow equation for image denoising and edge sharpening [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14** (2): 315 - 319.
- [10] FU Shu-Jun, RUAN Qiu-Qi. Study on geometry-driven variation calculus and partial differential equations in image processing [D]. *BeiJing JiaoTong University Doctoral Dissertation* (付树军, 阮秋琦. 图像处理中几何驱动的变分 and 偏微分方程方法研究. 北京交通大学博士学位论文), 2008.
- [11] LIANG Dong, YIN Bing, YU Mei, *et al.* Image enhancement based on the nonsubsampling contourlet transform and adaptive threshold [J]. *ACTA ELECTRONICA SINICA*. (梁栋, 殷兵, 于梅, 等. 基于非抽样 Contourlet 变换的自适应阈值图像增强算法. *电子学报*), 2008, **36** (3): 527 - 530.