

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105724

改进的压缩感知红外图像去噪算法*

许佳薇¹ 韩军¹ 丁良华²

(1. 西安工业大学 兵器科学与技术学院 西安 710021; 2. 内蒙古北方重工业集团有限公司技术中心产品研究院 包头 014033)

摘要: 红外成像系统因其在信号的传输和信号转换环节中会受到外界环境中的各种干扰,使红外成像系统生成的红外图像中产生多种噪声,导致红外图像的信噪比降低。针对红外图像受到多类噪声影响的问题,基于压缩感知理论的迭代加权最小二乘算法设计了新的加权系数,并结合中值滤波算法设计了新的重构算法。首先利用中值滤波对信号进行红外图像的粗去噪,然后通过压缩感知的稀疏变换和观测矩阵进行细去噪,使观测值保留原信号的重要信息,最后通过重构算法得到去噪后的图像。在 MATLAB 中对算法进行仿真实验,验证算法的有效性。实验表明,该算法得到的图像的视觉效果接近原图像,在实际场景中有较好的去噪性能,峰值信噪比高于原 SP 算法高 3~8 dB,高于迭代加权最小二乘算法 5~13 dB。

关键词: 压缩感知;图像去噪; l_p 范数;重构算法

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Improved compressed sensing infrared image denoising algorithm

Xu Jiawei¹ Han Jun¹ Ding Lianghua²

(1. School of Ordnance Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Research Institute of Product, Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd., Baotou 014033, China)

Abstract: Because the infrared imaging system will be disturbed by various kinds of external environment in the signal transmission and signal conversion, the infrared imaging system will produce many kinds of noise in the infrared image generated, which will lead to the decrease of the signal-to-noise ratio of the infrared image. In view of the problem that infrared images are affected by multiple types of noise, to make a new weighted coefficient based on the iteratively reweighted least squares algorithm of compressed sensing theory and combined the principle of median filtering to construction a new reconstruction algorithm. Firstly, the median filter is used to do rough denoising of infrared image. Then fine denoising by compressing the sensing sparse transformation and observation matrix to keeping the observations important information about the original signal. Finally, the denoised by reconstruction algorithm. The algorithm is simulated in MATLAB to verify the effectiveness of the algorithm. Experiments show that the visual effect of the image obtained by this algorithm is close to the original image, and it has better denoising performance in the actual scene. The peak signal-to-noise ratio is 3~8 dB higher than the original SP algorithm and 5~13 dB higher than the iterative weighted least square algorithm.

Keywords: compressed sensing; image denoising; l_p norm; reconstruction algorithm

0 引言

红外成像系统可以将接收到的红外辐射信号转换成图像信息,这种成像系统具有优秀的环境适应性和良好的隐蔽性,广泛的应用于医疗卫生^[1]、公共安全领域^[2]和日常生活^[3]中。传统的红外成像系统需要将接收到的不同物体的区域温度差异或者红外辐射差异的信号经过处理后,才能

显示出可视的图像,这个图像的质量与探测器的质量息息相关,但是由于生产工艺及材料的限制,成像的质量会遇到瓶颈而难以提升。由此, Mahalanobis 等^[4]提出了红外压缩感知计算成像系统,结合计算成像技术与压缩感知原理,以较小的焦平面阵列从低分辨率的测量值中复原为高分辨率的红外图像。然而,在这一过程中,系统常会受到外界环境和系统本身的噪声影响,使诸多噪声加到生成的红外图像

收稿日期:2021-01-21

* 基金项目:十三五装备预研项目(30102220102)资助

上,使图像的信噪比降低,图像质量下降,对图像后续的追踪、分析和处理产生不良影响,因此,需要对红外图像进行去噪处理,减少噪声影响,提升图像质量。

压缩感知(compressed sensing,CS)理论^[5]是一种利用信号的稀疏性,它仅需使用少量的观测信号,就可以实现原信号复原的理论。此理论突破了传统采样理论的采样频率限制,受到了国内外研究人员的关注,并进行了大量的研究^[6-7]。由于常见的图像信号本身或者在某个变换域中的信号通常而言具有稀疏性,因此压缩感知理论可以通过少量的重要图像信号,以非线性优化等手段重构出原信号。Thomas 等^[8]验证了压缩感知成像理论在红外波段的成像优势,肯定了压缩感知对红外图像的重构优势。

本文针对红外压缩感知计算成像系统中存在的高斯噪声和椒盐噪声的混合噪声,提出了将改进加权系数的迭代加权最小二乘算法(iteratively reweighted least squares,IRLS)与中值滤波算法相结合,通过仿真实验和实际实验验证改进算法相较于传统算法的降噪性更好,成像更清晰。

1 压缩感知基本原理

压缩感知理论的基本原理如图 1 所示,利用图像信号的稀疏性,将原信号进行稀疏变换获得稀疏信号,然后构造观测矩阵,使稀疏信号在压缩的过程中保留原信号的主要信息,获得观测信号,最后选用合适的算法重构原信号。

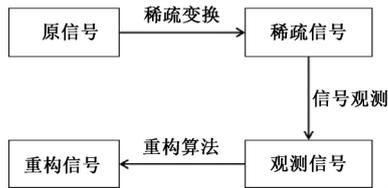


图 1 压缩感知理论基本原理

压缩感知理论主要包括信号的稀疏表示、观测矩阵的选取、重构算法的设计 3 个重要部分。

信号的稀疏表示是压缩感知理论的前提条件。设采样信号 s 为 n 维,稀疏基 $\Psi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是正交矩阵,则信号 s 的稀疏变换可以表示为:

$$s = \Psi x \tag{1}$$

其中, x 的非零元素的数量为 $k(k \ll n)$,则称信号 x 是 k 稀疏的。

然后,选择观测矩阵 $\Phi \in \mathbb{R}^{m \times n}$,将之前稀疏得到的信号 x 经过观测矩阵 Φ 执行低维观测,得到观测值 y ,即:

$$y = \Phi s = \Phi \Psi x = Ax \tag{2}$$

其中, $A = \Phi \Psi$ 是大小为 $m \times n$ 阶感知矩阵,且满足约束等距性质(restricted isometry property, RIP)^[9],即:

$$(1 - \delta_k) \|x\|_2^2 \leq \|Ax\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|x\|_2^2 \tag{3}$$

其中, $0 < \delta_k < 1$ 。

若观测矩阵和稀疏基满足 RIP 条件,则可以通过求解最小 l_0 范数优化问题,从观测值 y 中重建原信号,即:

$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_0 \quad \text{s. t. } y = Ax \tag{4}$$

其中, x 的 l_0 范数为:

$$\|x\|_0 = \sum_{i=1}^n |x_i|^0 \tag{5}$$

表示向量 x 中非零元素的个数。显然,式(4)是一种 l_0 范数的优化求解问题,但是 l_0 范数是一个 NP-hard 的问题,无法直接求出。

对 l_0 范数优化问题的求解方式有使用贪婪迭代的方式求解、凸优化求解方式、平滑函数逼近方式和 l_p 范数逼近方式。其中贪婪类算法是通过在观测矩阵中逐步选择与压缩信号 y 最匹配的原子,进而逼近 y ,从而逐步的确定信号的索引集,得到稀疏解,最后重构原信号,例如匹配追踪算法(orthogonal matching pursuit,OMP)^[10]和子空间追踪算法(subspace pursuit,SP)^[11]等;凸优化类算法是将非凸问题转化为凸问题,以解决重构问题,例如基追踪(basis pursuit,BP)^[12]算法等,另一种是通过把不连续的函数极值问题(最小化 l_0 范数问题)转变为连续函数极值问题,实现信号的重构,例如平滑 l_0 范数最小化算法(smoothed l_0 norm,SL0)^[13]和使用 l_p 范数逼近 l_0 范数再求解的迭代加权最小二乘算法(IRLS)^[14]等。

2 改进的压缩感知去噪算法

噪声是常见的图像退化的方式,传统的去噪方式是将采集到的图像信号分频,将有用的信号和噪声分离,实现图像的去噪声。基于压缩感知理论的图像去噪方法是利用压缩感知的稀疏变换将图像的重要信息保存下来,减少噪声对信息的影响,实现对图像的去噪^[15]。

IRLS 算法将求解最小 l_0 范数的优化问题,转化为求解最小 l_p 范数的优化问题,其转化后的模型如下:

$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_p \quad \text{s. t. } y = Ax \tag{6}$$

其中, x 的 l_p 范数为:

$$\|x\|_p = \sum_{i=1}^n |x_i|^p \tag{7}$$

科研人员对 $p < 1$ 的情况进行了研究^[16-17],其具体方法是用加权 l_2 范数替换式(6)中的目标函数,换句话说,也就是用加权 l_2 范数近似逼近 $l_p(0 \leq p \leq 1)$ 范数。于是,新的优化目标函数变成:

$$\min \sum \omega_i x_i^2 \quad \text{s. t. } y = \Phi s = \Phi \Psi x \tag{8}$$

其中 ω_i 是 l_2 范数的加权系数,其计算方式为:

$$\omega_k = |x_k^{(n-1)}|^{p-2} \tag{9}$$

对式(9)两边同乘 x_i^2 并求和得:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i x_i^2 = \sum_{i=1}^N |x_i^{(n-1)}|^{p-2} x_i^2 = \sum_{i=1}^N |x_i|^p \tag{10}$$

对式(8)迭代求解,得到公式:

$$x^n = W_n A^T (A W_n A^T)^{-1} y \tag{11}$$

其中, W_n 是对角矩阵,其具体形式为:

$$W_n = \text{diag}[1/\omega_1 \quad 1/\omega_2 \quad \cdots \quad 1/\omega_N] \tag{12}$$

其对角元素为:

$$u_i = 1/w_i = |x_i^{n-1}|^{2-p} \quad (13)$$

此时的 $p-2 < 0$, 则当 $x_i^{n-1} = 0$ 时, 其权重无法表示。为了回避权重无法表示的问题, 为其加权系数公式中加上一个正则化参数 $\epsilon > 0$ 。Chartrand 等^[14] 建议使用如下的加权系数:

$$w_i = ((x_i^{n-1})^2 + \epsilon)^{p/2-1} \quad (14)$$

即:

$$w_i = (|x_i^{n-1}| + \epsilon)^{p-2} \quad (15)$$

本文中提出一种改进的加权系数:

$$w_i = (|x_i^{n-1}| + \epsilon)^{p/2-1} \quad (16)$$

则改进后的算法流程如下:

输入: 传感矩阵 A , 测量向量 y 和数据长度 M

1) 初始化: $\epsilon = 1, \epsilon_{\min} = 10^{-8}$, 最大迭代次数 $M/4, t = 0$;

2) 计算 $x = A'y$;

3) 计算加权系数:

$$w_i = (|x_i^{n-1}| + \epsilon)^{p/2-1}$$

4) 构造加权矩阵, 即:

$$W_n = \text{diag}[1/w_1, 1/w_2, \dots, 1/w_n];$$

5) 计算 $x = W_n A^T (A W_n A^T)^{-1} y$;

6) 更新 $\epsilon, \epsilon = \epsilon/10$;

7) $x = x$;

8) 更新迭代次数 $t = t + 1$;

9) 若 $\epsilon > \epsilon_{\min}$ 且 $t < M/4$ 则跳转步骤 3), 否则, 停止循环;

10) 利用公式 $s = \Psi x$, 重构出原始信号 s 。

改进的算法在添加噪声时的图像的重构中, 处理高斯噪声效果更显著, 处理椒盐噪声的效果较差。由于中值滤波对椒盐噪声的处理效果更佳, 因此对本文算法添加中值滤波的去噪步骤, 即在信号观测之前, 先对原信号进行去噪处理, 以减少信号中的噪声, 再对信号进行重构。

3 图像复原算法结果及仿真分析

为了验证本文算法的重构效果, 本章将在 CPU 频率为 2.9 GHz, 内存为 16 GB, 操作系统为 Windows 10, 测试软件为 MATLAB 2018b 的环境下进行试验。重构使用的原图片为 256×256 的 3 张标准图片 lena, boats 和 airfield, 与红外成像系统拍摄的 256×256 的图片。观测矩阵为高斯随机矩阵, 稀疏基采用离散余弦变换, 然后通过逆变换获得重建结果。

实验 1: 分别对 lena, boats 和 airfield 图像施加方差为 0.03 的高斯噪声, 然后使用采样率为 0.9 的 IRLS 算法, SP 算法和改进的 IRLS 算法进行重构。仿真结果对比如图 2 所示, 重构图像的峰值信噪比 (Peak signal-to-noise ratio, PSNR) 如表 1 所示。

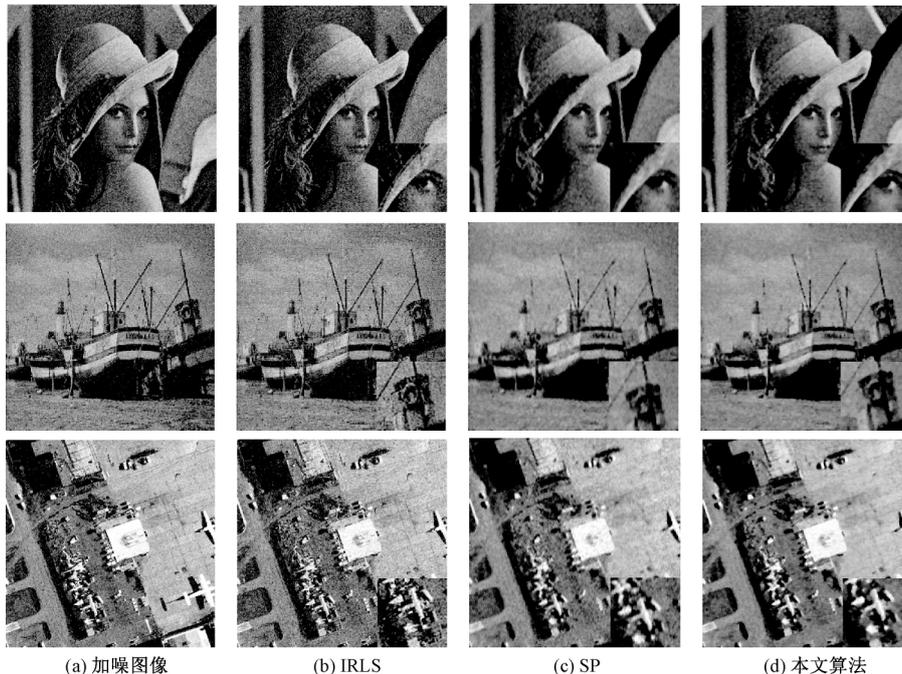


图 2 不同算法对添加高斯噪声的 lena、boats 和 airfield 图像的去噪效果

从对添加高斯噪声的 3 张图像的重构图中可以看出, 3 种重构算法都有较好的重构结果。由表 1 可以看出本文算法的峰值信噪比是最高的, 其均值为 34.55 dB, 比 SP 算法的峰值信噪比高 3~6 dB, 比原 IRLS 算法的峰值信噪比高 6~9 dB。

由图 2 的对比图可以直观的看出, 3 种算法都可以重构出图像中物体和建筑物的轮廓。从右下角的局部放大图中可以看出, IRLS 算法对图像中的小物体, 例如 lena 图中帽子轮廓旁边的羽毛等重构效果较差; SP 算法在重构复杂图像时重构效果下降较大, 在重构图像目标较少时, 重

表 1 不同算法实验结果的峰值信噪比 PSNR dB

不同算法	lena	boats	airfield
IRLS 算法	27.71	27.02	25.06
SP 算法	30.08	29.22	25.83
本文算法	35.96	35.10	32.58

构质量较好;本文算法对 3 个图像的重构效果都较好,在环境

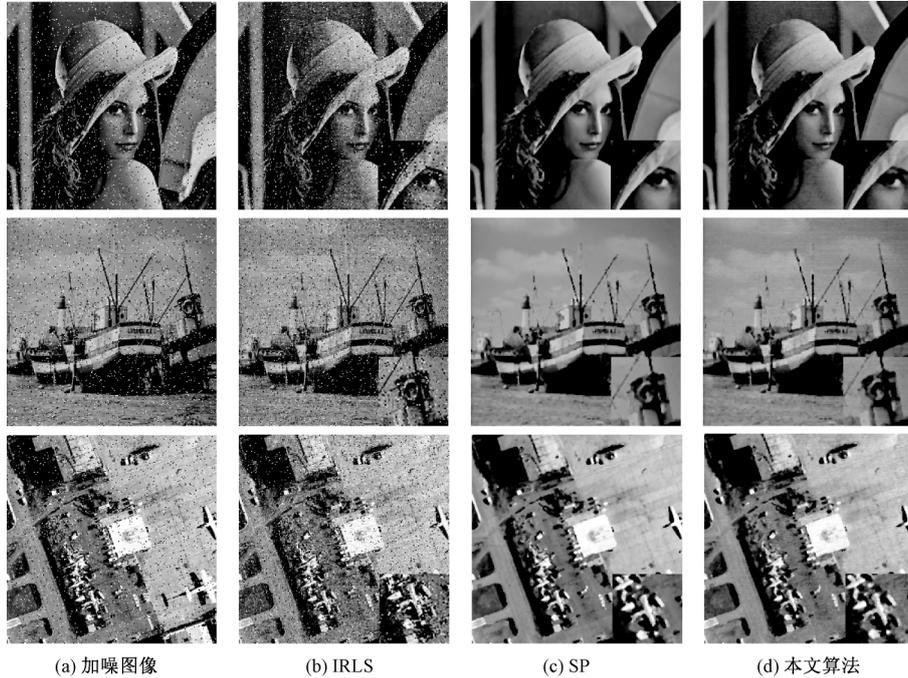


图 3 不同算法对添加椒盐噪声的 lena、boats 和 airfield 图像的去噪效果

表 2 不同算法实验结果的峰值信噪比 PSNR dB

不同算法	lena	boats	airfield
IRLS 算法	28.12	27.92	26.11
SP 算法	32.04	30.25	25.88
本文算法	38.60	36.36	32.45

由表 1 可以看出 IRLS 算法重构效果较差,SP 算法在人物重构中重构效果较好,本文算法的重构效果较好,峰值信噪比是最高,其均值为 35.80 dB,比 SP 算法的峰值信噪比高 5~8 dB,比原 IRLS 算法的峰值信噪比高 5~13 dB。

由图 3 的对比图可以看出 IRLS 算法和 SP 算法不能有效地减少椒盐噪声的影响,虽然可以重构出图像的背景和主要信息,但是受噪声影响,图像成像质量不佳。本文算法可以有效地去除椒盐噪声,重构图像的直观观感较好。

实验 3:对 256×256 红外成像系统拍摄到的图像使用不同算法进行重构。然后使用采样率为 0.9 的 IRLS 算法,SP 算法和改进的 IRLS 算法进行重构。仿真结果对比

复杂的图像中,例如在 airfield 图像的重构图像中,可以将图像中的重要信息重构出来,从右下角的放大图中可以看出,本文算法的物体边缘更平滑,受噪声影响小,成像质量更好。

实验 2:分别对 lena、boats 和 airfield 图像施加方差为 0.05 的椒盐噪声,然后使用采样率为 0.9 的 IRLS 算法,SP 算法和改进的 IRLS 算法进行重构。仿真结果对比如图 3 所示,重构图像的峰值信噪比如表 2 所示。

如图 4 所示。

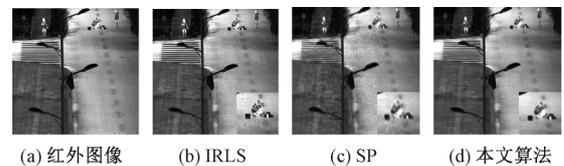


图 4 不同算法对红外图像的去噪效果

由图 4 的对比图可以看出 IRLS 算法在受椒盐噪声影响大的红外图像中,受噪声影响大,重构图像依然受椒盐噪声影响,质量不佳;SP 算法重构图像质量较 IRLS 算法好,但依然受噪声的影响,重构图像存在边缘模糊的情况;本文算法可以有效地去除红外图像中的噪声,重构后的图像成像质量较好。

4 结 论

在研究分析红外图像的压缩感知重构算法实际应用的情况后,发现环境中的混合噪声对图像质量有较大的影响,且这类影响无法避免。本文针对噪声对图片的影响,

提出了一种改进的压缩感知去噪算法。该算法在压缩感知迭代加权最小二乘算法的基础上,结合中值滤波算法的优点,提出改进的IRLS算法。实验表明,本文算法对添加高斯噪声和椒盐噪声的图像有较好的去噪效果;在图像的主观观察中,本文算法的重构图像依然有较好的表现。在对拍摄到的红外图像的重构实验中,验证了本文算法的实用性。本次实验减少了红外图像的噪声影响,但是图像边缘仍存在模糊现象,后续仍需继续研究。

参考文献

- [1] 王娟,刘嘉润,李瑞瑞.基于深度学习的红外相机视力检测算法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(11):36-43.
- [2] 王洪亮,赵雨梦,刘志坚,等.一种无人机搭载的红外成像高压架空线路探伤系统[J].电子测量技术,2020,43(15):29-35.
- [3] 周大立,王晓东,郝贤鹏.无线通信技术在红外成像系统中的应用[J].电子测量技术,2018,41(5):111-115.
- [4] MAHALANOBIS A, SHILLING R, MURPHY R, et al. Recent results of medium wave infrared compressive sensing[J]. Applied Optics, 2014, 53(34): 8060-8070.
- [5] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [6] 祝勇俊,刘文波,郑祥爱,等.基于FOCUSS改进算法的图像稀疏重构[J].电子测量技术,2020,43(4):126-131.
- [7] 沈跃,丁灵卫,吴翊轩,等.回溯自适应匹配追踪电能质量信号重构方法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(5):731-738.
- [8] THOMAS G, LUM D J, VARUN V, et al. Short-wave infrared compressive imaging of single photons[J]. Optics Express, 2018, 26(12):15519-15527.
- [9] CANDÈS E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. Comptes Rendus Mathématique, 2008, 346(9-10):589-592.
- [10] TROOP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 57(12): 4655-4666.
- [11] DAI W, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(5): 2230-2249.
- [12] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic decomposition by basis pursuit [J]. SIAM Review, 2001, 43(1):129-159.
- [13] MOHIMANI H, BABAIE-ZABAIE M, JUTTEN C. A fast approach for overcomplete sparse decomposition based on smoothed L-0 norm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(1):289-301.
- [14] CHARTRAND R, YIN W. Iteratively reweighted algorithms for compressive sensing [C]. Proceedings of 2008 IEEE, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (IC-ASSP), Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2008:3869-3872.
- [15] 王钢,周若飞,邹映琨.基于压缩感知理论的图像优化技术[J].电子与信息学报,2020,42(1):222-233.
- [16] 杨海蓉,金辉.改进的迭代重加权最小二乘非凸压缩感知算法[J].计算机工程与应用,2018,54(24):46-51.
- [17] 蒋沅,苗生伟,罗华柱,等. L_p 范数压缩感知图像重建优化算法[J].中国图象图形学报,2017,22(4):435-442.

作者简介

许佳薇,硕士研究生,主要研究方向为基于压缩感知理论的图像处理。

E-mail: 754818968@qq.com

韩军,教授,博士,主要研究方向为信息光电系统评估评测及检校、先进成像探测技术、光电信息处理技术等。

E-mail: hanjun513@126.com