

基于小波域 DCT 变换的杂波抑制方法*

周 宁, 李晓峰, 李在铭

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 610054)

摘要: 针对复杂背景中微弱运动目标检测困难的问题, 提出了一种基于小波域 DCT 变换的背景杂波抑制方法。该方法根据背景杂波和运动目标的不同频率特性, 采用低频小波子带频域滤波的方法得到有效抑制背景杂波的残差图像, 从而达到抑制背景杂波的目的。该方法首先对原始图像进行小波变换, 接着对低频小波子带进行二维 DCT 变换, 再用高斯低通滤波器对 DCT 变换结果进行滤波, 然后对滤波结果进行 IDCT 变换, 最后对滤波前后的低频小波子带作差分处理, 对差分结果进行小波逆变换。实验结果表明, 该方法处理后得到的残差图像呈现出很好的高斯性和独立性, 并且目标邻域信杂比 (SCNR) 的平均增益比图像直接频域滤波的目标邻域信杂比平均增益提高 2 dB 以上, 算法性能明显优于传统的图像频域滤波算法。

关键词: 背景杂波抑制; 微弱运动目标; 小波域离散余弦变换; 目标邻域信杂比

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)01-0374-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.01.112

Clutter suppression method based on DCT in wavelet domain

ZHOU Ning, LI Xiao-feng, LI Zai-ming

(School of Communication & Information Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Aiming to detect dim moving targets in complex background, the low wavelet belt was frequency filtered to suppress background clutter and get the residual image according to the different frequency characteristics of background clutter and moving targets. Firstly, performed the wavelet transform, and operated DCT of two dimension to the low wavelet belt (LL), filtered the lower frequency components of LL by Gaussian lower pass filter, and then did the IDCT to the filtering results. Operated the difference process between the pre- and after filtering LL. Finally, carried out the inverse wavelet transform. The experiment results show that the residual image obtained by this method has very good Gaussian normality and independence, and the average gain of the target's neighbor SCNR (signal-to-clutter-noise ratio) is improved above 2dB, compared with the image frequency filtering algorithms. So the method has better performance than conventional image frequency filtering method.

Key words: background clutter suppression; dim moving target; discrete cosine transform in wavelet domain; signal-to-clutter-noise ratio

强杂波背景中的微弱运动目标检测一直是十分活跃的研究热点, 在军事与民用方面均有着极其重要的意义。目标本身的微弱特性 (尺寸小于 3×3 像素, 信噪比低于 3 dB), 加之淹没在复杂背景中, 使得直接对它进行检测与跟踪十分困难。因此, 目标检测前对原始图像序列进行背景杂波抑制便成为极其重要的一步。希望背景杂波抑制后得到的残差图像序列模型成为目标加白高斯噪声模型, 且残差图像中目标邻域信杂比得到最大限度的提高, 从而有利于提高目标的检测性能。

目前, 图像序列中背景杂波的抑制多采用空时滤波方法。有代表性的杂波估计算法有空域自适应滤波^[1]、非参数估计^[2]、小波变换^[3]、序统计滤波器^[4]以及形态学滤波器^[5]等。文献[6]是基于空域梯度相关性的图像杂波预测算法。文献[7]是将图像背景划分为静杂波和动杂波两类, 对这两类杂波分别采用非参数时域滤波和空时 LS 滤波, 从而达到去除背景杂波的目的。时域滤波由于利用了背景杂波的短时平稳假设, 使得它难以应用于背景杂波快速变化的场合。所以空域滤波方法越来越受到广泛关注。

本文提出了一种基于小波域 DCT 变换的背景杂波抑制方法。其框图如图 1 所示。



图 1 基于小波域 DCT 的杂波抑制框图

1 图像数据的基本数学模型

本文图像序列模型为

$$f(x, y, k) = f_B(x, y, k) + f_T(x, y, k) + n(x, y, k) \quad (1)$$

其中: $f(x, y, k)$ 代表坐标位置 (x, y) 处的图像灰度值, $f_B(x, y, k)$ 代表背景杂波分量, $n(x, y, k)$ 为零均值高斯白噪声, $f_T(x, y, k)$ 表示目标灰度值。目标能量相对于背景的强弱用目标邻域信杂比 (SCNR) 来表示, 其定义如式 (2)。

$$\text{SCNR}(x_i, y_i) = 10 \log_{10} [f(x_i, y_i, k) - m_\Omega]^2 / \sigma_\Omega^2 \text{ (dB)} \quad (x_i, y_i) \in \Omega \quad (2)$$

其中: (x_i, y_i) 为目标在图像中的位置, Ω 为目标邻域窗, $m_\Omega, \sigma_\Omega^2$ 分别为 Ω 中的像素灰度均值和方差。

收稿日期: 2009-05-06; 修回日期: 2009-06-28 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60873263); 国家“863”计划资助项目 (2009A01Z215)

作者简介: 周宁 (1966-), 女, 江苏高淳人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理及信号检测与估计 (zhouning@uestc.edu.cn); 李晓峰 (1963-), 男, 教授, 博士研究生, 主要研究方向为多媒体通信与信息处理; 李在铭 (1939-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为多媒体信息处理。

2 基于小波域 DCT 变换的杂波抑制方法

2.1 小波变换

虽然本文采用的图像序列是空时非平稳信号,但本文提出的算法是对序列图像中的各单帧图像分别进行处理,因此,只需考虑空域非平稳特性。而空域非平稳特性是由自然图像的背景复杂多变引起,这种非平稳信号的频率变化分为慢变化和快变化两部分。背景杂波是大面积缓变信号,属于低频部分,弱小运动目标是高频分量,而白高斯噪声遍及低频和高频部分。对弱小目标而言,背景属杂波干扰。本文杂波抑制算法的任务是尽可能地去除背景杂波和高斯噪声,最大程度地提高目标邻域信杂比。小波变换在时频平面不同位置具有不同的分辨率,是一种多分辨率分析方法,非常适用于分析非平稳信号。因此,本文首先对空域非平稳原始图像 $f(x, y, k)$ 进行二维离散小波变换,即

$$W_{\varphi}(j_0, m, n, k) = (1/\sqrt{MN}) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y, k) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \quad (3)$$

$$W_{\psi}^i(j_0, m, n, k) = (1/\sqrt{MN}) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y, k) \psi_{j_0, m, n}^i(x, y) \quad (4)$$

$i = \{H, V, D\}$

其中: $M \times N$ 为图像尺寸, j_0 表示尺度因子, $W_{\varphi}(j_0, m, n, k)$ 为第 k 帧图像在尺度 j_0 下的低频小波系数, $W_{\psi}^H(j_0, m, n, k)$ 和 $W_{\psi}^V(j_0, m, n, k)$ 分别定义了水平方向 H 和垂直方向 V 的次高频小波系数, 而 $W_{\psi}^D(j_0, m, n, k)$ 是对角线方向 D 的高频小波系数, 且 $\varphi_{j_0, m, n}(x, y)$ 和 $\psi_{j_0, m, n}^i(x, y)$, $i = \{H, V, D\}$ 分别表示在尺度因子 j_0 和二维位移 (m, n) 时的尺度函数和小波函数。原始图像经小波变换后被分解为一个低频子带 LL 、两个次高频子带 HL 和 LH 及一个高频子带 HH 。 LL 主要代表原始图像的背景杂波分量, 而次高频 HL 、 LH 和 高频子带 HH 分别代表水平、垂直方向和对角线方向的图像细节高频信息。图像背景杂波能量主要集中在小波低频子带 LL 中, 因此, 为了抑制背景杂波, 需对小波低频子带 LL 进行低通滤波。

2.2 小波域中的 DCT 变换及其背景抑制

大小为 $M \times N$ 的图像小波变换后, 得到大小为 $(M/2) \times (N/2)$ 的低频子带 LL , 对其进行二维 DCT 变换, 如下:

$$F(j_0, u, v, k) = \frac{8}{M \times N} C(u) C(v) \sum_{m=0}^{M/2-1} \sum_{n=0}^{N/2-1} W_{\varphi}(j_0, m, n, k) \times \cos\{\pi/M[u(2m+1)]\} \cos\{\pi/N[v(2n+1)]\} \quad (5)$$

其中: $C(0) = (2)^{-1/2}$, 在 $u, v \neq 0$ 时, $C(u) = 1$, $C(v) = 1$ 。 $F(j_0, u, v, k)$ 为第 k 帧图像在尺度 j_0 下, 低频子带 LL 的 DCT 系数。虽然图像背景杂波复杂多变, 但大部分背景杂波在空域上的变化是缓变的, 属于低频部分, 因此, 可用各种低通滤波器将其滤除。本文用高斯低通滤波器 $G(u, v)$ 对小波低频子带 (LL) 进行频域低通滤波, 得到滤波后的 DCT 系数 $F'(j_0, u, v, k)$, 如下:

$$F'(j_0, u, v, k) = F(j_0, u, v, k) \times G(u, v) \quad (6)$$

$F'(j_0, u, v, k)$ 反映低频子带 LL 中的背景成分, 因此, 将滤波前后的小波子带 DCT 系数进行差分运算, 得到只包含目标和残留噪声的 DCT 系数 $F''(j_0, u, v, k)$, 即

$$F''(j_0, u, v, k) = F'(j_0, u, v, k) - F(j_0, u, v, k) \quad (7)$$

最后对 $F''(j_0, u, v, k)$ 进行 IDCT 变换, 得到滤波后的低频子带 LL 系数, 如下:

$$\tilde{W}_{\varphi}(j_0, m, n, k) = 2 \sum_{u=0}^{M/2-1} \sum_{v=0}^{N/2-1} C(u) C(v) F''(j_0, u, v, k) \times$$

$$\cos\{\pi/M[u(2m+1)]\} \cos\{\pi/N[v(2n+1)]\} \quad (8)$$

2.3 小波逆变换

对小波系数 $\tilde{W}_{\varphi}(j_0, m, n, k)$ 、 $\tilde{W}_{\psi}^i(j_0, m, n, k)$ 进行式(9)所示的二维离散小波逆变换得到滤掉了背景杂波和大部分噪声的残差图像。

$$\hat{f}(x, y, k) = (1/\sqrt{MN}) \sum_m \sum_n \tilde{W}_{\varphi}(j_0, m, n, k) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) + (1/\sqrt{MN}) \sum_{i=H, V, D} \sum_m \sum_n \tilde{W}_{\psi}^i(j_0, m, n, k) \psi_{j_0, m, n}^i(x, y) \quad (9)$$

考虑到要准确重构原信号, 这里选择具有线性相位的双正交 Bior1.1 小波基。

3 性能检验与仿真实验

选取一序列图像, 各帧图像大小为 176×144 , 在第 k 帧图像上随机加入 12 个大小为 3×3 像素的目标, 并加入均值为 0, 标准差 σ 为 8.063 8 的白高斯噪声构成原始图像, 如图 2 所示。对原图进行小波变换, 图 3 为小波分解结果, 为显示清楚, 图 3 中的次高频子带、高频子带数据放大了四倍显示。对低频子带 LL 作 DCT 变换, 图 4 为 LL 变换后的 DCT 系数, 从图 4 中可以看出在 $(0, 0)$ 处有一个很大的类似冲击的 DCT 系数, 它就是图像的直流成分。用高斯低通滤波器对小波低频子带进行滤波, 滤波结果进行 IDCT 变换, 滤波前后的 LL 子带再作差分处理, 图 5 为差分后低频子带 LL 的 DCT 系数, 可见, 直流分量和部分低频成分已被滤除。最后进行小波逆变换, 得到杂波抑制后的残差图像(图 6)。图中图像灰度值放大了四倍显示。



图 2 原始图像



图 3 小波分解(x4)结果

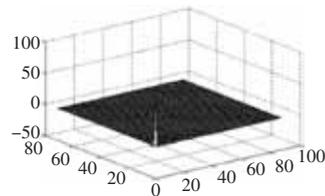


图 4 滤波前 LL 的 DCT 系数

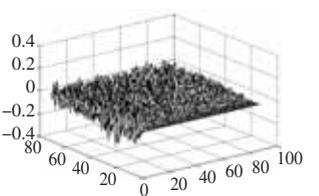


图 5 差分后 LL 的 DCT 系数

3.1 SCNR 增益检验

在图 2 中, 选取 15×15 像素的目标邻域, 计算各目标处的输入邻域信杂比 $SCNR(x_i, y_j)_{in}$ 记录于表 1 中。从表 1 可见, 所有目标输入邻域信杂比均在 3 dB 以下, 满足弱目标的条件。从图 2 也可看出, 部分小目标肉眼几乎无法分辨。杂波抑制后, 在输出的残差图像上检验各目标处的输出邻域信杂比 $SCNR(x_i, y_j)_{out}$, 再根据式(10)(11) 分别求各目标处的邻域信杂比增益 $SCNR(x_i, y_j)_{gain}$ 和平均邻域信杂比增益 $SCNR_{mgain}$ 。

$$SCNR(x_i, y_j)_{gain} = SCNR(x_i, y_j)_{out} - SCNR(x_i, y_j)_{in} \quad (10)$$

$$SCNR_{mgain} = (1/N) \sum_{(x_i, y_j)} SCNR(x_i, y_j)_{gain} \quad (11)$$

其中 N 为目标个数。

为了比较本文提出的算法性能, 对原始图像直接进行频域滤波, 其结果也列于表 1 中。实验结果表明, 本文提出的基于小波域 DCT 变换的杂波抑制算法在保留目标、抑制背景杂波方面性能优于图像频域滤波算法, 前者的目标邻域信杂比平均增益比后者高出 2 dB 以上。

表 1 SCNR 增益比较

目标位置(x,y)	输入邻域信杂比 SCNR _{in} /dB	图像频域滤波 SCNR _{gain} /dB	本文方法 SCNR _{gain} /dB
(70,90)	1.874 2	3.429 6	7.039
(110,130)	2.446 6	3.626 6	7.129 3
(90,60)	1.956 2	8.743 8	12.071
(70,20)	0.199 64	3.486 2	3.043 7
(80,30)	1.565 6	7.735 5	11.62 8
(70,80)	1.590 9	4.371 4	8.668 7
(20,30)	1.686 8	7.128	10.938
(10,30)	1.552 5	7.425 6	11.196
(90,70)	0.699 51	2.109 4	5.268 8
(80,50)	0.372 28	2.878 1	3.719 4
(50,110)	2.942 6	6.395 9	8.938 7
(60,90)	0.602 41	-0.230 02	1.223
SCNR _{gain}		4.758 3	7.572

3.2 残差图像的高斯性检验

由 Parzen 估计法绘出残差图像的经验概率密度函数曲线,如图 7 所示。图中,点划线表示标准高斯概率密度函数曲线。与标准高斯概率密度曲线比较后,可得残差图像的经验概率密度函数曲线已几乎与标准高斯概率密度曲线重合,说明残差图像已具有相当好的高斯特性。

3.3 残差图像白化程度检验

二维图像信号的自相关函数估计如式(12)所示:

$$R(p,q) = 1/(N \times M) \sum_{k=0}^{N-1-M-p} \sum_{j=0}^{M-1-q} f(k,j) \times f(k-p,j-q) \quad (12)$$

其中:N,M 为二维图像空间坐标,0 ≤ p ≤ N-1,0 ≤ q ≤ M-1。当自相关函数呈现 δ(·) 函数特性时,其功率谱呈现平坦特征,该过程为白噪声随机过程,故图像的白化程度可由其自相关函数给出。背景抑制后的残差图像的自相关函数如图 8 所示,可以看出它已相当接近二维狄拉克函数了。

(上接第 360 页)图 6(i) ~ (j) 为其对应抠图结果。可以看出由于前景物体即背景的运动,使得标记传递出现误差,从而抠图效果降低。

图 7 为视频 Kim 的测试结果。本文对其中第 90 帧进行标记,然后采用本文算法对其后续帧进行自动抠图。其中,图 7(a) ~ (c) 分别为视频中第 90 ~ 92 帧的图像;图 7(f) ~ (g) 为其对应的抠图结果。与 Amira 类似,在邻近帧间,抠图效果维持较好。图 7(d) ~ (e) 分别为视频中第 100 帧与第 101 帧的图像;图 7(i) ~ (j) 为其对应的抠图结果。可以看出,如图中红色箭头所指,由于从第 100 帧开始出现包含新颜色的新物体(树叶),因而前面处理过的帧中的标记无法正确传递至后续帧中,使得抠图结果出现错误。对于这一问题,可以采用文献[4]中提出的双向标记传递予以解决,即标记第 101 帧,并计算其抠图结果,然后通过将第 101 帧中的标记与第 99 帧的标记共同传递至第 100 帧。由于第 101 帧的标记中已经包含了新物体,可以得到第 100 帧的正确标记。

综上所述,测试结果表明,鲁棒视频抠图算法,每标记一帧图像通常可以得到 10 ~ 15 帧较优的连续抠图结果。因而可以大大降低视频抠图中的手工操作。

3 结束语

本文对鲁棒抠图算法进行扩展,提出了一种鲁棒视频抠图算法。新算法采用一种基于少量手工标记的 Strokes 生成 Trimap 的方法,为视频帧半自动生成较为粗糙的 Trimap 划分,同

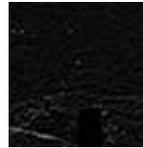


图 6 残差图像(x4)

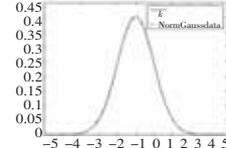


图 7 残留图像经验概率密度函数曲线

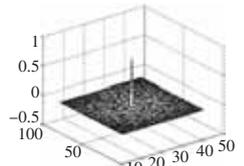


图 8 残留图像自相关函数

4 结束语

本文提出的基于小波域 DCT 变换的杂波抑制算法适用于视频微弱运动目标检测的强杂波背景估计与抑制。其优点是适合各种复杂多变的背景杂波的抑制,且实现简单、实时性好。实验结果充分说明了该算法的有效性,其处理后的残差图像更有利于后续的目标检测与跟踪。

参考文献:

- [1] FAN H, WEN C. Two-dimensional adaptive filtering based on projection algorithm [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 52 (3): 832-838.
- [2] HSIA S C. An edge-oriented spatial interpolation for consecutive block error concealment [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11 (6): 577-580.
- [3] 刘钢. 基于小波变换的航空图像处理及动载体多目标跟踪方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [4] GAO Ying-hui, LI Ji-cheng, SHEN Zhen-kang. Detection of moving small target in IR clutter background containing sea and sky areas [C]//Proc of SPIE Infrared Components and their Applications. Beijing: SPIE Press, 2005: 341-349.
- [5] 余农, 吴常泳, 汤心溢, 等. 红外目标检测的自适应背景感知算法[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 200-204.
- [6] 鲜海滢, 李晓峰, 李在铭. 基于梯度相关性的微弱目标检测[J]. 光电子·激光, 2008, 19(9): 1214-1219.
- [7] 吴宏刚, 李晓峰, 陈跃斌, 等. 空时自适应杂波分类抑制与弱小运动目标检测[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(4): 301-305.

时结合标记传递策略大大减少视频抠图过程中的手工标记操作。由于鲁棒抠图算法在抠图效果和抠图速度上均优于以往静态图像抠图算法,鲁棒视频抠图的抠图质量和处理速度较优。连续抠图测试结果表明,鲁棒视频抠图算法能够以较少的标记获得连续多帧的高质量视频抠图结果。

参考文献:

- [1] MISHIMA Y. Soft edge chroma-key generation based upon hexoctahedral color space: U. S. , 5,355,174[P]. 1993.
- [2] WANG J, COHEN M F. An iterative optimization approach for unified image segmentation and matting[C]//Proc of ICCV. 2005: 936-943.
- [3] CHUANG Y Y, CURLESS B, SALESIN D, et al. A Bayesian approach to digital matting[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2000: 264-271.
- [4] CHUANG Y Y, AGARWALA A, CURLESS B, et al. Video matting of complex scenes[J]. ACM Trans on Graphics, 2002, 21(3): 243-248.
- [5] WANG J, COHEN M F. Optimized color sampling for robust matting [C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2007: 1-8.
- [6] SUN J, JIA J, TANG C K, et al. Poisson matting[J]. ACM Trans on Graphics, 2004, 23(3): 315-321.
- [7] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A closed-form solution to natural image matting[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 228-242.
- [8] GRADY L. Random walks for image segmentation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(11): 1768-1783.
- [9] GRADY L, FUNKA-LEA G. Multi-label image segmentation for medical applications based on graph-theoretic electrical potentials [C]//Proc of ECCV Workshops CVAMIA and MMBIA. 2004: 230-245.