

# 一种小波域平滑滤波的杂波抑制方法

周 宁,李在铭

(电子科技大学通信与信息工程学院,四川成都 610054)

**摘 要:** 本文提出了一种小波域平滑滤波的杂波抑制方法,该方法将原始图像变换到小波域后,分别对各小波子带先作平滑、后作差分处理以最大限度地滤除背景杂波和噪声,然后再对图像进行小波逆变换,达到有效抑制背景的目的.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,并且目标邻域信号杂波比(SCNR)的平均增益比图像直接平滑滤波的邻域信号杂波比(SCNR)的平均增益提高 2dB 左右,算法性能明显优于图像域平滑滤波的传统方法.

**关键词:** 微弱运动目标;背景杂波抑制;小波域平滑滤波;邻域信号杂波比增益

**中图分类号:** TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1641-05

## A Clutter Suppression Method Using Smooth Filter in Wavelet Domain

ZHOU Ning, Li Zai-ming

(School of Communication and Information Engineering of UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** An image background clutter suppression method using smooth filter in the wavelet domain is proposed in this thesis. Firstly, the WT(Wavelet Transform) of the observed image data is performed. Then, the smooth filter and difference process is operated respectively to the wavelet coefficients of every wavelet belt to suppress background clutter and noise of the image. Finally, the IWT(Inverse Wavelet Transform) of the processed image is carried out. 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 about 2dB, compared with the other traditional image smooth-filtering algorithms. So the method in this paper has better performance than the other traditional image smooth methods.

**Key words:** dim moving target; background clutter suppression; wavelet smooth filter; signal-to-clutter-noise ratio

### 1 引言

无论是红外还是可见光图像中的运动小目标,由于目标本身的微弱特性(目标尺寸小于  $3 \times 3$  像素,信噪比小于 3dB),再加上强背景杂波的干扰,使得直接对它进行检测与跟踪十分困难.因此,在目标检测前对原始图像序列进行背景杂波抑制便成为关键性的一步.背景杂波抑制的主要任务为:(1)背景杂波抑制后将原始的复杂、未知分布的图像数据转化为目标加高斯白噪声模型的数据;(2)最大限度地提高目标邻域信杂比增益,因为目标检测性能随着其邻域信杂比的提高而提高.

通常图像背景非常复杂,从整幅图像看它表现出空域非平稳特性,但是背景的变化在空间和时间上仍具有一定的相关性.所以,目前的视频杂波抑制技术多采用空时滤波的方法来消除背景干扰.如空时自适应杂波分类抑制<sup>[1]</sup>,非参数估计<sup>[2]</sup>,空域自适应滤波<sup>[3]</sup>,小波变

换<sup>[4]</sup>,以及序统计滤波器<sup>[5]</sup>,形态学滤波器<sup>[6]</sup>等杂波估计算法.文献[7]是基于邻域梯度差平方累积函数最小原则的背景杂波自适应预测方法,也属空域背景估计.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多的受到广泛关注.

本文提出了一种小波域平滑滤波的杂波抑制方法,该方法将原始图像变换到小波域后,对小波系数进行分析,根据低频和高频小波系数的不同特性,对低频系数用平均窗函数进行平滑滤波,对各高频系数用高斯窗函数进行平滑滤波,然后对滤波前后的各小波子带分别作差分处理,最后进行小波逆变换,得到有效抑制背景杂波的残差图像.该方法将小波变换与平滑滤波结合起来,完全在单帧图像上进行处理,克服了时域滤波的缺陷,适合复杂背景杂波快速变化的场合.

## 2 图像数据的基本数学模型

本文假设采集到的包含运动小目标的序列图像模型为:

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

式中 $(x, y)$ 为图像的二维空间坐标, $f(x, y, k)$ 代表时刻 $k$ ,位置 $(x, y)$ 处的图像灰度值, $f_B(x, y, k)$ 代表背景杂波分量,而 $n(x, y, k)$ 为零均值的高斯白噪声, $f_T(x, y, k)$ 表示目标灰度值.这里,我们首先定义目标邻域信杂比 SCNR (Signal Clutter and Noise Ratio) 来表示目标相对于背景的强弱,如式(2)示.目标邻域信杂比是指目标的能量与其邻域范围内的杂波和噪声的能量之比.

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

$(x_i, y_i) \in \Omega$

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

## 3 小波域平滑滤波杂波抑制

### 3.1 小波变换

本文研究的序列图像是空时非平稳信号,其中时域非平稳通常是由于摄像机运动产生的图像背景全域运动和背景本身的变化或波动引起的.因此在进行目标检测前,需要先通过运动位移估计对背景的运动和变化进行补偿和校正,使时域非平稳信号转化为时域平稳信号.而空域非平稳特性是由自然背景图像复杂多变引起.对单帧图像只需考虑空域非平稳特性.这种空域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,弱小目标是高频分量,而高斯白噪声遍及低频和高频部分.小波变换在时频平面不同位置具有不同的分辨率,是一种多分辨分析方法,非常适用于非平稳信号的分析.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

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

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

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 $j_0$ 下的低频分量小波系数,而 $W_\psi^i(j_0, m, n, k)$ 定义了第 $k$ 帧图像在尺度 $j_0$ 下水平方向

$H$ 、垂直方向 $V$ 和对角线方向 $D$ 的高频小波系数.且

$$\varphi_{j_0, m, n}(x, y) = 2^{\frac{j_0}{2}} \varphi(2^{j_0}x - m, 2^{j_0}y - n) \quad (5)$$

$$\psi_{j_0, m, n}^i(x, y) = 2^{\frac{j_0}{2}} \psi^i(2^{j_0}x - m, 2^{j_0}y - n), \quad i = \{H, V, D\} \quad (6)$$

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、LH 和一个高频子带 HH 分量.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 分别代表水平方向、垂直方向和对角线方向的图像细节高频信息,因此,高频小波系数 $W_\psi^i(j_0, m, n, k), i = \{H, V, D\}$ 中仍包含了许多背景杂波的细节部分.所以,为了最大程度地抑制背景杂波,提取微弱小目标信息,需要对各小波子带分别进行下面的平滑滤波和差分运算.

### 3.2 小波域中的平滑滤波背景抑制算法

由于图像背景相对于目标来说在空间上具有一定的相关性.因此,可以用某像素点邻域像素的灰度值来估计该点的灰度值,这就是空域杂波估计的基本思想.空域杂波估计分为基于参数的背景估计和基于非参数的背景估计两大类.由于非参数的背景杂波估计实现简单,计算量小且实时性好,所以本文采用使用加权窗函数滤波的非参数背景估计法.由于平滑滤波的目的是估计背景杂波,因此,使用的加权窗函数应与估计的背景杂波空间灰度分布匹配.我们是在经过小波变换后得到的各子带系数中消除感兴趣的目标,估计背景杂波,因此,先应对低频(LL)、次高频(HL、LH)和高频(HH)系数的相关特性进行分析,从图1、图2、图3可以看出,低频系数的空域相关性相对于高频系数强得多,而次高频、高频系数的空域相关函数已较接近二维狄拉克函数,相关性较弱.同时,反映背景杂波主要能量的低频系数在空间上变化平缓,而表征背景细节的次高频、高频系数在空间上相对独立,其分布近似背景中高斯噪声的分布.因此,对低频小波系数,我们用离散的二维均匀加权窗核函数 $K_u$ 作平滑处理,得到处理后的小波系数 $\hat{W}_\varphi(j_0, m, n, k)$ ,而对次高频、高频小波系数用二维离散高斯加权窗核函数 $K_g$ 进行平滑滤波,得到滤波后的高频系数 $\hat{W}_\psi^i(j_0, m, n, k)$ ,即

$$\hat{W}_\varphi(j_0, m, n, k) = W_\varphi(j_0, m, n, k) * K_u(x, y) \quad (7)$$

$$\hat{W}_\psi^i(j_0, m, n, k) = W_\psi^i(j_0, m, n, k) * K_g(x, y) \quad (8)$$

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

其中 $*$ 表示卷积运算.实际中,可以选择各种大小的离散二维加权窗函数模板,考虑到本文研究的目标的微弱特性,目标相对于背景而言,其作用可忽略.同时,随着加权窗函数的增大,平滑运算的数据量急剧增多,因

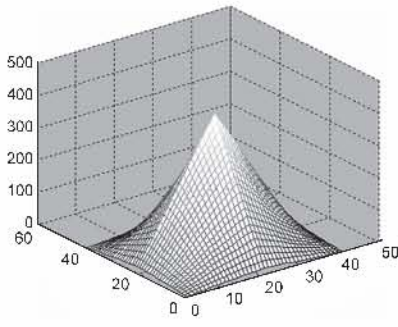


图1 低频系数自相关

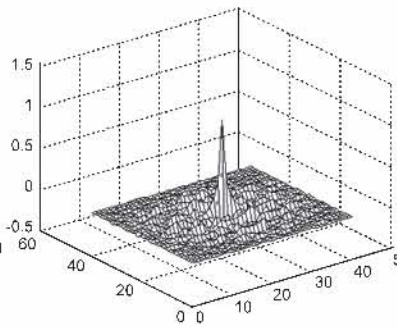


图2 次高频系数自相关

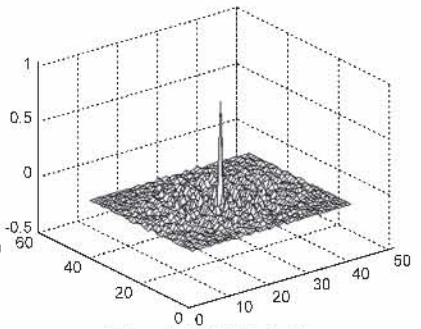


图3 高频系数自相关

此本文选择比目标最大尺寸  $3 \times 3$  大的最小尺寸的高斯二维加权窗函数,即选择  $5 \times 5$  均匀核函数模板和  $5 \times 5$  方差为 1 的高斯核函数模板,如式(9)所示:

$$K_u = \frac{1}{25} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_s = \begin{bmatrix} 0.0232 & 0.0338 & 0.0383 & 0.0338 & 0.0232 \\ 0.0338 & 0.0492 & 0.0558 & 0.0492 & 0.0338 \\ 0.0383 & 0.0558 & 0.0632 & 0.0558 & 0.0383 \\ 0.0338 & 0.0492 & 0.0558 & 0.0492 & 0.0338 \\ 0.0232 & 0.0338 & 0.0383 & 0.0338 & 0.0232 \end{bmatrix} \quad (9)$$

小波系数  $\tilde{W}_\varphi(j_0, m, n, k)$  和  $\tilde{W}_\psi^i(j_0, m, n, k)$  反映各子带中的背景成分,因此,将平滑前后的小波系数进行差分运算,得到的小波系数  $\tilde{W}_\varphi(j_0, m, n, k)$  和  $\tilde{W}_\psi^i(j_0, m, n, k)$  将只包含目标和残留噪声.背景杂波抑制后的小波系数  $\tilde{W}_\varphi(j_0, m, n, k)$  和  $\tilde{W}_\psi^i(j_0, m, n, k)$ ,由式(10)、(11)得到:

$$\tilde{W}_\varphi(j_0, m, n, k) = W_\varphi(j_0, m, n, k) - \tilde{W}_\varphi(j_0, m, n, k) \quad (10)$$

$$\tilde{W}_\psi^i(j_0, m, n, k) = W_\psi^i(j_0, m, n, k) - \tilde{W}_\psi^i(j_0, m, n, k) \quad (11)$$

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

### 3.3 小波逆变换

对平滑滤波后的小波系数  $\tilde{W}_\varphi(j_0, m, n, k)$ 、 $\tilde{W}_\psi^i(j_0, m, n, k)$  进行式(12)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灰度图像.

$$\tilde{f}(x, y, k) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_m \sum_n \tilde{W}_\varphi(j_0, m, n, k) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) + \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{i=H, V, D} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_m \sum_n \tilde{W}_\psi^i(j_0, m, n, k) \psi_{j, m, n}^i(x, y) \quad (12)$$

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 bicr1.1 小波基.

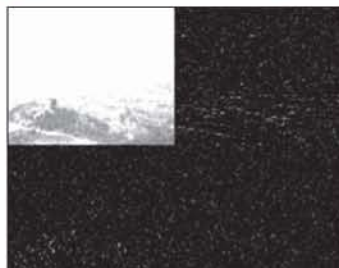
## 4 性能检验与仿真实验

### 4.1 SCNR 增益检验

截取一段视频图像制作成序列图像,从中选取一幅作为背景图像,大小为  $176 \times 144$ ,在其上不同位置处加入 12 个大小为  $3 \times 3$  像素的目标,并加入均值为 0,标准差  $\sigma$  为 8.0638 的高斯白噪声构成原始图像,如图 4 所示.选取  $5 \times 5$  像素的目标邻域,记录各目标的输入邻域信杂比  $SCNR(x_i, y_j)_{in}$ .从表 1 可见,所有目标的输入邻域信杂比均在 3dB 以下,满足弱目标的条件.从图 4 也可看出,部分小目标肉眼几乎无法分辨.用本文方法进行杂波抑制处理,图 5,图 6 分别为小波分解结果和杂波抑制结果.为显示清楚,图 5 中的次高频子带、高频子带乘以了 4,图 6 的灰度值乘以了 2.在输出的小波逆变换图像上检验各目标处的输出邻域信杂比  $SCNR(x_i, y_j)_{out}$ ,并分别计算各处的邻域信杂比增益  $SCNR(x_i, y_j)_{gain}$ ,如式(13),根据式(14)求平均邻域信杂比增益  $SCNR_{mgain}$ .为了比较本文提出的算法性能,分别用  $5 \times 5$  均匀核函数模板和  $5 \times 5$  高斯核函数模板直接对原始图像进行背景估计和抑制,表 1 实验结果表明,本文提出



图4 原始图像

图5 小波分解( $\times 4$ )结果图6 杂波抑制结果( $\times 2$ )

的小波域平滑滤波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域平滑滤波的两种算法,其平均信杂比增益比图像域平滑滤波的两种算法均高出2dB左右。

$$SCNR(x_i, y_j)_{\text{gain}} = SCNR(x_i, y_j)_{\text{out}} - SCNR(x_i, y_j)_{\text{in}} \quad (13)$$

$$SCNR_{\text{ingain}} = \frac{1}{N} \sum_{(x_i, y_j)} SCNR(x_i, y_j)_{\text{gain}} \quad (14)$$

式中  $N$  为目标个数。

表1 SCNR增益比较(邻域  $\Omega = (5 \times 5)$ )

目标位置 ( $x, y$ )	输入邻域 信杂比 SCNRin(dB)	图像平均核 滤波 SCNR 增益(dB)	图像高斯核滤 波 SCNR 增益(dB)	本文方法 SCNR 增益(dB)
(130, 120)	2.1483	6.2011	5.9476	6.0569
(110, 130)	2.4414	6.2651	5.9087	8.6881
(90, 60)	1.9496	8.4062	7.8603	12.873
(70, 20)	0.17974	-0.83953	-0.63404	-3.8717
(80, 30)	1.4709	7.9967	7.6038	11.469
(70, 80)	1.3275	5.3995	5.0271	7.8913
(30, 20)	1.6627	9.0605	8.6765	13.785
(10, 30)	1.9347	7.9435	7.48	11.815
(90, 70)	0.80693	4.9722	4.6221	7.1749
(80, 50)	0.4533	2.2263	2.3169	1.8927
(50, 110)	2.9744	7.4018	6.9727	10.1
(60, 90)	0.70811	1.6826	1.6607	1.6577
平均值		5.5597	5.2869	7.4609

## 4.2 残差图像高斯性检验

由 Parzen 估计法绘出残差图像(杂波抑制结果)的经验概率密度函数曲线(图7),并与标准的高斯概率密度曲线进行比较.点划线表示标准高斯概率密度曲线.图7表明残差数据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,说明残差数据具有相当好的高斯特性.因为实验图像由背景图像加高斯白噪声和小目标构成,杂波抑制算法对实验图像进行杂波抑制,当杂波抑制得越干净,残差图像便越接近高斯白噪声加目标,其经验概率密度函数曲线就越接近标准高斯概率密度曲线.因此,可用残差图像的经验概率密

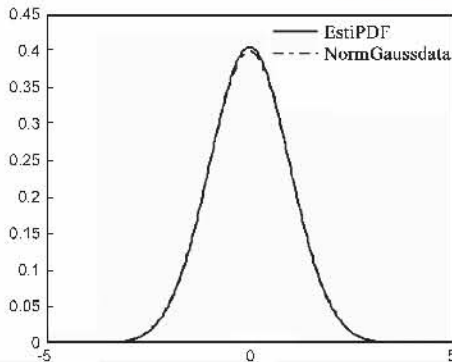


图7 残差图像经验概率密度函数曲线

度函数曲线与标准高斯概率密度曲线的拟合程度来判断杂波抑制算法的性能好坏。

## 4.3 残差图像白化程度检验

图像的白化程度可由其自相关函数给出,当自相关函数呈现  $\delta(\cdot)$  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.对二维图像信号,其自相关函数估计如式(15)所示。

$$R(p, q) = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f(k, j) \cdot f(k-p, j-q) \quad (15)$$

其中,  $N, M$  为二维图像空间坐标,  $0 \leq p \leq N-1, 0 \leq q \leq M-1$ .背景抑制后的残差图像,估计其自相关函数如图8,可以看出它同二维狄拉克函数已经相当接近了。

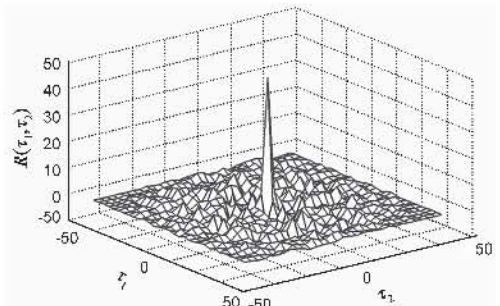


图8 残留图像二维自相关函数估计曲线

## 5 结论

本文给出了一种适用于视频微弱运动目标检测的强杂波背景抑制方法,其优点是适合各种复杂多变的背景图像,且实现简单,实时性好.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白化性,并且输出目标邻域信号杂波比 SCNR 的平均增益比图像域平滑滤波 SCNR 的平均增益高 2dB 左右,性能优于传统的图像域平滑滤波抑制杂波算法,有利于后续的目标检测与跟踪。

## 参考文献:

- [1] 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.  
Wu Hong-gang, Li Xiao-feng, Chen Yue-bin. Spatial temporal adaptive clutter classification, suppression and dim small moving targets detection[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(4): 301-305. (in Chinese)
- [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] Fan H, Wen C. Two-dimensional adaptive filtering based on projection algorithm[J]. IEEE Trans. On Signal Processing,

2004, 52(3): 832 - 838.

- [4] 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]. 吉林长春: 中国科学院(长春光学精密机械与物理研究所), 2005.

Liu Gang. Aero-image processing and multi-target tracking on moving carrier base on wavelet transform[D]. Changchun, Jilin: Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

- [5] Gao Ying-hui, Li Ji-cheng, Shen Zhen-kang. Detection of moving small target in IR clutter background containing sea and sky areas[A]. Proc. SPIE Infrared Components and their Applica-

tions[C]. Beijing: SPIE, 2005, vol. 5640, 341 - 349.

- [6] 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

Yu Nong, Wu Chang-Yong, Tang Xin-yi. Adaptive background perception algorithm for infrared target detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2): 200 - 204. (in Chinese)

- [7] Xian Hai-ying, Li Xiao-feng, Li Zai-ming. Detection of small targets based on background clutter adaptive prediction[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 12 - 16.

#### 作者简介:



周 宁 女, 1966 年生于四川成都. 1990 年毕业于电子科技大学, 获硕士学位. 现为电子科技大学副教授、在职博士生, 研究方向为图像处理及信号检测与估计等.

E-mail: zhouning@uestc.edu.cn



李在铭 男, 1939 年生于重庆, 电子科技大学教授, 博导. 1960 年毕业于原成都电讯工程学院无线电系雷达专业. 1981 至 83 年赴英国利兹大学作高级访问学者, 研修通信系统与数字图像处理技术. 中国高等教育电子类专业指导委员. 主要研究领域: 多媒体信息处理、通信与网络综合服务及随机信号处理等.