

文章编号: 0258-7025(2003)08-0717-04

激光成像雷达系统中散斑像的乘法模型 及其滤除

李自勤, 王 骥, 李 琦, 李 霖

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 分析了激光成像雷达系统中所成的散斑像的乘法模型, 并在此基础上利用一基于小波的同态滤波器对被散斑污染的图像进行了消噪处理。计算机仿真结果表明此方法能有效地抑制散斑噪声并较好地保留图像的边缘信息, 证明了乘法模型能对散斑像起到较好的近似作用。

关键词 图像处理; 乘法模型; 小波; 散斑; 同态变换; 消噪

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Multiplication Model of Speckle Image and Speckle Suppression in Imaging Lidar

LI Zi-qin, WANG Qi, LI Qi, LI Lin

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of
Opto-electronic Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In this paper, multiplication model of speckle image in imaging lidar is analyzed, and then suppression processing for the speckle image is finished by homomorphic wavelet filter. The experimental results show that this filter can suppress effectively the speckle noise and keep the image edge. Meanwhile, the experiment results prove that multiplication model is useful for speckle image.

Key words image processing; multiplication model; wavelet transform; speckle; homomorphic transformation; noise filtering

1 引 言

激光成像雷达系统具有分辨率高、抗干扰能力强、能成三维像等特点, 所以它的应用范围越来越广。然而由于激光成像系统使用的是相干光照射, 成的像存在着严重的散斑噪声, 使图像的分辨率明显变差, 所以分析散斑噪声的统计特性及其作用于图像的数学模型, 有效地抑制散斑噪声成了研究的热点^[1~3]。

2 散斑像的乘法模型

激光成像系统中散斑噪声产生的原因可用图 1

说明^[4]。激光照射物体表面时, 由于物体表面像对于激光波长的尺度来说是相当粗糙的, 所以其像面上—给定点处的强度是由来自许多独立的表面面积的组元相干叠加而成, 这些不同的子波走过的距离通常会相差几个或许多个波长, 去掉相位关系但仍相干的子波干涉, 就产生了散斑图样(如图 1 所示)。

设物体表面上点 (x_0, y_0) (简记为 r_0) 的漫反射反射率为 $R(r_0)$, 成像系统的振幅点扩散函数为 $h(r - r_0)$, 那么很容易得到像面上点 (x, y) (简记为 r) 的散斑复振幅 $A_s(r)$ 和散斑像的复振幅 $A_{si}(r)$

$$A_s(r) = \int_{-\infty}^{\infty} A_0(r_0)h(r - r_0)dr_0 \quad (1)$$

$$A_{si}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} R(r_0)A_0(r_0)h(r - r_0)dr_0 \quad (2)$$

收稿日期: 2002-04-09; 收到修改稿日期: 2002-05-27

作者简介: 李自勤(1974—), 男, 重庆人, 哈尔滨工业大学物理电子学博士生, 主要从事小波变换、图像处理研究。E-mail: cqlzqin@0451.com

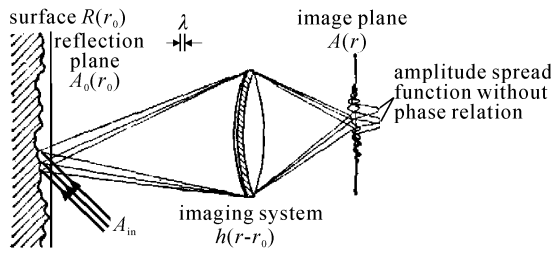


图 1 成像系统中散斑的物理起因

Fig. 1 Physics reason of speckle in imaging system

式中 $A_0(r_0)$ 表示 $R(r_0) = 1$ 时反射面的复振幅。文献[5]分析了散斑、散斑像各个量的统计特性,得出了在用相干光照射时,像面上物体所成的散斑像光强 $I_{si}(r)$ 的均值恰好等于具有原相干光源光谱特性的空间非相干光源照明时通过光学系统形成像的光强 $I_{inc}(r)$,即

$$\langle I_{si}(r) \rangle = I_{inc}(r) \quad (3)$$

基于散斑像光强的一级统计性质,人们建立了散斑像光强的乘法模型

$$I_{si}(r) = I_{inc}(r) \frac{I_s(r)}{\langle I_s(r) \rangle} \quad (4)$$

式中 $I_s(r)$ 是与散斑像光强 $I_{si}(r)$ 对应的散斑光强。

这一模型的物理意义在于把像面散斑看作是光强意义下的相乘噪声,从而为散斑的滤除提供了数学模型。

乘法模型建立的基础是式(3),应用这个关系式不难证明式(4)两端的均值相等,而且也不难得出两端分别对应的两个随机过程各自的一阶概率密度都具有负指数分布的形式(光强呈负指数分布是散斑和散斑像的一级统计特性),也就是说这两个随机过程具有相同的一级统计性质。这正是乘法模型根据所在。

然而两个随机过程仅仅有相同的一级统计性质远远不能说明这两个随机过程是相同的。实际上, $I_{si}(r)$ 和它的乘法模型这两个随机过程一般具有不同的自相关函数,也就是说至少它们的二级统计性质一般并不相同。

由式(1)和(2)可以写出

$$I_{si}(r) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} R(r_0) A_0(r_0) h(r-r_0) dr_0 \right|^2 \quad (5)$$

$$I_s(r) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} A_0(r_0) h(r-r_0) dr_0 \right|^2 \quad (6)$$

$$\langle I_s(r) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} |h(r-r_0)|^2 dr_0 \quad (7)$$

$$I_{inc}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} |R(r_0)|^2 \cdot |h(r-r_0)|^2 dr_0 \quad (8)$$

由以上诸式可以看出,如果 $R(r_0)$ 变化足够缓

慢,以至在点扩散函数有效范围内可近似看作常数,则式(5)可近似写成

$$I_{si}(r) = |R(r_0)|^2 \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} A_0(r_0) h(r-r_0) dr_0 \right|^2 = |R(r_0)|^2 \cdot I_s(r) \quad (9)$$

同时,式(8)可写成

$$I_{inc}(r) = |R(r_0)|^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |h(r-r_0)|^2 dr_0 = |R(r_0)|^2 \cdot \langle I_s(r) \rangle \quad (10)$$

此时有

$$I_{si}(r) = I_{inc}(r) \frac{I_s(r)}{\langle I_s(r) \rangle} \quad (11)$$

这表明当 $R(r_0)$ 变化足够缓慢,以至在点扩散函数有效范围内可近似看作常量时,散斑像光强 $I_{si}(r)$ 的乘法模型近似成立。实际上,由于激光束具有很好的准直性,经过光学系统投射到目标表面上的照射范围并不大,在此范围内目标表面漫反射率改变很小,因此这个条件能得到较好的满足,所以散斑像光强的乘法模型通常都能很好地近似成立。

3 基于小波的同态滤波器滤除散斑噪声

3.1 算法介绍

由于散斑像可以用乘法模型来近似,所以在抑制散斑像中的散斑噪声时很容易想到同态滤波器。经过同态变换,乘性的散斑噪声转换为加性白噪声,从而可以用滤除加性噪声的滤波器对其进行噪声抑制。

近几年来小波变换取得了飞速的发展,特别是 Mallat 提出多分辨分析后^[6,7],小波变换被广泛地用于图像处理中。与傅里叶变换相比,小波变换同时具有时域(空域)和频域局部化能力,具有多分辨率分析的特性,从而使小波变换能广泛地用于信号的奇异性检测、图像增强和边缘检测中。

利用小波进行图像噪声消除大多采用直接小波变换对图像进行处理^[8~11],本文则将同态变换和小波变换结合起来,计算机仿真结果表明能得到较好的效果。

通过对小波分解系数进行阈值处理来去除噪声的基本思想源于 Donoho 理论^[12]。小波函数在时频域都具有较好的局部性,同时其变尺度特性使小波变换对信号有一种集中的能力。通常信号的能量在小波变换域中集中于少数项上,而噪声则相反,它的能量均匀分布于整个尺度空间,这使得含有信号的小波系数远远大于只含有噪声的小波系数。同时,散斑

噪声虽然是全频带的,但它对图像的高频成分的影响要比对低频成分的影响严重^[8],从而可以忽略散斑噪声对小波分解低频系数的影响,而仅对高频系数进行阈值消噪。设 X 为图像的小波变换系数, T 为设定的阈值,则对系数的阈值处理可以表示为

$$Y = \begin{cases} \text{sign}(X) \cdot (|X| - T) & |X| \geq T \\ 0 & |X| < T \end{cases} \quad (12)$$

即当小波分解系数的绝对值大于这个阈值时,可认为是含有信号的分解系数,返回该点值与阈值的差值;而当分解系数小于这个阈值时,则认为完全是由噪声组成的,对其进行置零处理,从而达到消除噪声影响的目的。

对于阈值的选取,Donoho 等从理论上给出并证明了在均方误差最小前提下的选取方法^[10]: $T =$

$\sigma \sqrt{2 \log(n)/n}$,其中 σ^2 为噪声方差, n 为序列长度。

利用基于小波的同态滤波器滤除散斑噪声的算法流程如图 2 所示。

图中,HT(homomorphic transform)为同态变换,Dwt2(Discrete 2-D wavelet transform)为离散二维小波变换,TP(threshold processing)为阈值处理,IDwt2(Inverse discrete 2-D wavelet transform)为二维小波重构,IHT(inverse homomorphic transform)为同态逆变换。

输入的含有散斑噪声的图像经同态变换,变成含有加性噪声的图像,经二维小波变换,将图像分解为低频系数和高频系数,对高频系数采用阈值消噪,将消噪处理后的小波系数重构,经同态反变换后得到消噪后的输出图像。

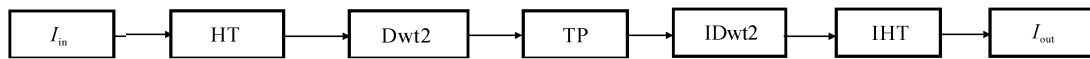


图 2 基于小波的同态滤波器算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart of homomorphic wavelet filter

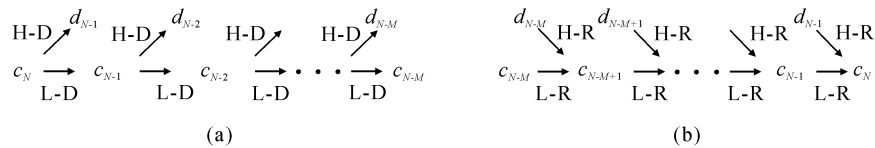


图 3 信号的分解与重构过程示意图

(a) 分解过程;(b) 重构过程

Fig. 3 Schematic diagram of signal decomposition and reconstruction

(a) decomposition; (b) reconstruction

3.2 仿真结果

对于一信号 (c_N), 其用小波进行分解与重构的过程如图 3 所示。图中, c_N 为低频系数, d_N 为高频系数; L-D 为分解低通滤波器, H-D 为分解高通滤波器, L-R 为重构低通滤波器, H-R 为重构高通滤波器。

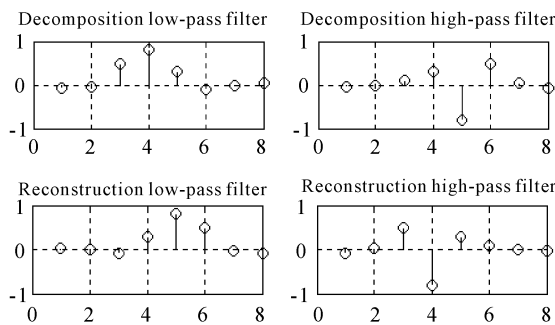


图 4 sym4 小波的分解与重构滤波器

Fig. 4 Decomposition and reconstruction filter based sym4 wavelet

波器。仿真实验中采用 sym4 小波对散斑污染图像进行 2 层分解阈值处理。sym4 小波是 Daubechies 提出的一近似对称的正交小波函数^[13],其分解与重构滤波器系数如图 4 所示。

仿真实验采用图 5 所示的原始无噪声污染图像,它表示实际实验中采用非相干光照射时物体所成的像。图 6 是噪声污染图像(此处仅考虑散斑噪声影响,忽略别的噪声。所加散斑噪声均值为 1,方

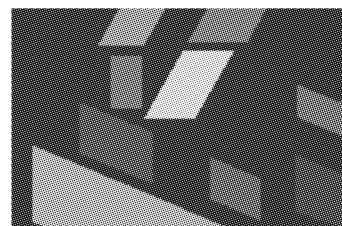


图 5 原始图像

Fig. 5 Original image

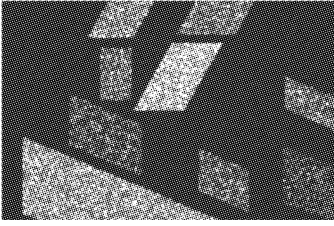


图 6 散斑噪声污染图像

Fig. 6 Image with speckle noise

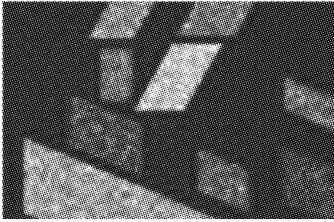


图 7 基于小波的同态滤波器处理结果

Fig. 7 Processed results by homomorphic wavelet filter

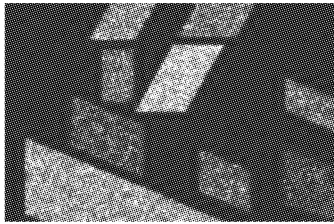


图 8 直接小波阈值去噪的处理结果

Fig. 8 Processed results by wavelet filter

差为 0.2), 它表示激光成像系统所成的像。图 7 为采用基于小波的同态滤波器处理结果, 同时为了对比, 图 8 给出了直接采用小波阈值去噪的处理结果。由图可以看出, 采用基于小波的同态滤波器的处理结果在噪声抑制能力上, 优于直接小波阈值去噪的处理结果, 同时它较好地保持了图像的边缘。

对于散斑噪声污染图像, 通常可用散斑指数来评价图像被污染程度, 其定义为^[14]

$$\text{Speckle-index} = \frac{1}{mn} \sum_i \sum_j \frac{\sigma_{ij}}{\bar{x}_{ij}} \quad (13)$$

式中 m, n 表示图像维数, σ_{ij} 为滤波窗中元素的标准差, \bar{x}_{ij} 为滤波窗中元素的均值。由于采用基于小波的同态滤波器滤除散斑噪声没有用到滤波窗的概念, 所以在计算散斑指数时将滤波窗取为常用的 7×7 , 计算出的散斑指数如表 1 所示。

由表 1 也可看出, 采用基于小波的同态滤波器在有效抑制散斑噪声上要优于直接小波阈值去噪, 这也证明了乘法模型对散斑像能够起到很好的近似。

表 1 含噪图像和处理后的消噪图像的散斑指数

Table 1 Speckle index of original and filtered imageries

	Imagery with noise	Homomorphic wavelet filter	Wavelet filter
Speckle-index	0.2254	0.1206	0.1656

参 考 文 献

- Jiang Lihui, Wang Chunhui, Wang Qi *et al.*. Speckle noise suppressing based on a generalized parallel weighted-average multidirectional morphological filtering algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(2):182~186
- Jiang Lihui, Wang Chunhui, Wang Qi *et al.*. A speckle imaging model for impulse coherent laser radar and suppressing its speckle noise [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(12):1623~1628 (in Chinese)
- Jiang Lihui, Li Ning, Cheng Xiangyang *et al.*. Speckle suppressing based on a new homomorphic filtering algorithm [J]. *Laser and Infrared* (激光与红外), 2000, **30**(1):11~14 (in Chinese)
- J. C. Dainty ed., translated by Huang Letian, Wang Tianji, Lin Shiyong. *Laser Speckle and Related Phenomena* [M]. Beijing: Science Press, 1981. 9~19 (in Chinese)
- Liu Peishen. *Foundation in Speckle Statistical Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1987. 60~68
- Stephane G. Mallat. Multifrequency channel decompositions of image and wavelet models [J]. *IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, **37**(12):2091~2110
- Stephane G. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7):674~693
- Tang Jian, Wang Zhensong. Suppressing the coherent speckle of SAR images with wavelet analysis [J]. *Journal of Electronics* (电子科学学刊), 1997, **19**(4):451~458 (in Chinese)
- Peng Yuhua. Image smoothing method based on discrete orthogonal wavelet transform [J]. *Journal of Image and Graphics* (中国图像图形学报), 1999, **A4**(8):677~679 (in Chinese)
- Zhang Xinming, Shen Lansun. Adaptive image enhancement using wavelets and statistics [J]. *Signal Processing* (信号处理), 2001, **17**(3):227~231 (in Chinese)
- Deng Wei, Zhao Rongchun. The study on coherent speckle reduction in SAR image using wavelet [J]. *Signal Processing* (信号处理), 2001, **17**(1):71,86~90 (in Chinese)
- David L. Donoho. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1995, **41**(3):613~627
- Hu CHanghua, Zhang Junbo, Xia Jun *et al.*. Based Matlab System Analysis and Design-wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xidian Press, 2000. 6~12 (in Chinese)
- P. Dewaele, P. Wambacq, A. Oosterlinck *et al.*. Comparison of Some Speckle Reduction Techniques for SAR Images [C]. IGRASS'90, Maryland USA: the University of Maryland College Park, 2417~2422