

脉冲相干激光雷达的散斑成像模型 及其散斑噪声压缩

蒋立辉 王春晖 王 骥 尚铁良

(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, 哈尔滨 150001)

摘 要 推导了脉冲相干激光雷达的散斑成像模型, 证明了脉冲相干激光雷达图像中散斑噪声的乘法性质。根据其统计规律, 提出一种新的用于散斑噪声压缩的并行加权均值多方向形态滤波算法。模拟结果表明此算法既有效地压缩了散斑噪声又保持了图像的几何结构, 并且通过比较, 证明其优于 Safa 的多方向形态滤波算法。

关键词 脉冲相干激光雷达, 散斑噪声, 形态滤波, 并行处理, 加权平均。

1 引 言

在激光雷达、合成孔径雷达等相干成像装置中都是通过接收散射回波信号并在探测器表面相干获得图像的, 因此其图像对散斑噪声高度敏感^[1]。而散斑噪声的存在使图像像素强度(灰度)剧烈变化, 即在一片均匀的目标表面上, 有的分辨率单元呈亮点, 有的呈暗点, 降低了图像的灰阶和空间分辨率, 隐藏图像的精微结构, 使图像的解释性变差, 降低了图像质量和雷达的探测能力, 因而限制了相干图像(如激光雷达、合成孔径雷达)的应用。由于散斑噪声统计特性较差因而成了在相干成像装置中最难解决的问题之一。尽管如此, 人们还是提出了一些抑制散斑噪声的方法。这些方法大体上可分为两类: 一类是不相干和部分相干的多视图图像处理^[2]; 另一类是图像域滤波等的图像后处理。多视图图像处理和图像域滤波的本质都是压缩了散斑噪声但又牺牲了图像的一些细节。

在第二类技术中有如下几种主要方法: 一是基于局部统计滤波的 Lee 方法^[3], 在此基础上, 又发展了一系列改进的自适应算法和条件概率的滤波算法, 如 Kuan、Frost、Lopes、Gamma Map 滤波器^[4], 此种算法不仅抑制了噪声, 同时也极大地增宽了图像的特征结构, 使图像的目标特征模糊; 二是基于同态映射的同态滤波, 这种滤波算法把散斑噪声的非线性简化为线性, 只要找出一种相应的线性滤波算法即可, 但它使图像的灰度降低, 边缘受损^[5]; 三是小波软阈值算法, 它对散斑噪声有较好的抑制效果, 而且还能尽可能多地保留原图像的目标特征, 特别是它还能保留强目标附近的弱目标, 但是其运算量过大, 难于实时处理^[6,7]; 四是基于数学形态学的多方向形态滤波方法, 此种方法的优点在于它能把灰度图像转化为二值图像处理, 较易实现硬件逻辑结构和超大规模集成电路的技术, 从而实现适时处理和较好地保持了图像边缘, 缺

点是噪声压缩能力较差^[8,9]。

本文提出的并行加权均值多方向形态滤波算法能很好地弥补了上述形态滤波压缩散斑噪声存在的弱点。仿真结果表明它既有效地压缩了散斑噪声又保持了图像的几何结构。

2 脉冲相干激光雷达的散斑成像模型

2.1 CO₂ 脉冲相干激光雷达

如图 1 所示,连续 CO₂ 激光器发出未经调制的激光光波,经分束器分成两束,一束作为本振光、频率为 f_0 ,另一束作为信号光,经移频器后产生宽脉冲线性调频信号,中心频率也为 f_0 ,经光学天线发射至目标,从目标上反射回来的信号光再经光学天线反射进入混频器 (HgCdTe 探测器),与本振光混频后,经前置放大器放大进入信号处理器处理,最后形成图像。

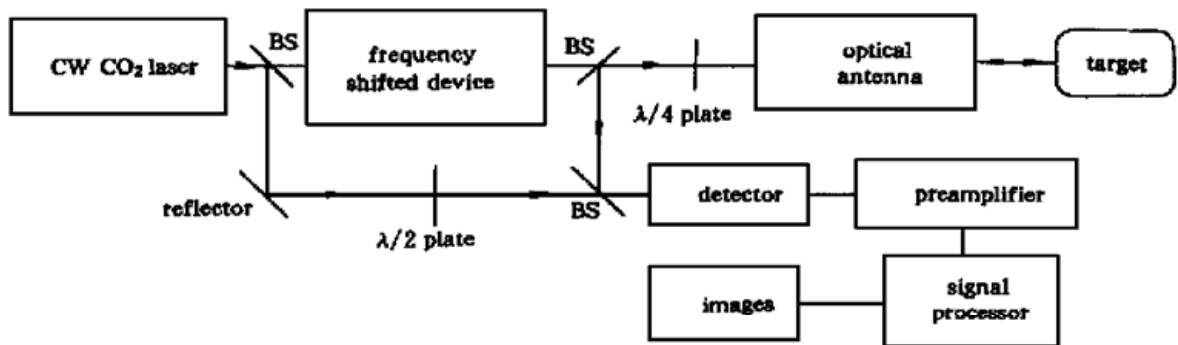


Fig. 1 Schematic diagram of CO₂ impulse coherent laser radar

2.2 散斑成像模型

连续 CO₂ 激光器所发出的光波可表示为

$$\Psi_L(t) = a(t) \exp(j2\pi f_0 t), \quad (1)$$

式中 $a(t)$ 为信号的复振幅。此光波经移频器后变换为

$$\Psi_S(t) = a(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2)], \quad (2)$$

式中, k 为调制斜率。那么信号光经目标散射的回波信号为

$$\Psi_R(x, y, z; t) = A(x, y, z) \exp\{j[2\pi(f_0 + f_D)t + \pi k t^2]\}, \quad (3)$$

式中 f_D 为多普勒频移。然后信号回波 $\Psi_R(x, y, z; t)$ 与本征光在探测器表面作相干混频,则探测器输出信号为

$$I(x, y, z; t) = |\Psi_L(t) + \Psi_R(x, y, z; t - t_r)|^2, \quad (4)$$

t_r 表示回波信号的延迟时间。由于探测器的平方律性质,信号的直流分量和高频部分被滤掉,响应的只是差频部分,因此中频信号为

$$i_{IF} = |a(t)A(x, y, z)| \cos(2\pi f_D t - \pi k t^2 + 2\pi f_0 t_r). \quad (5)$$

根据(5)式,可以看出中频信号 i_{IF} 的统计性质是由相位振幅决定的。如果激光雷达的有效作用距离为 5 km,光束发散角为 0.26 mrad,那么目标处激光光斑的直径约为 1.3 m。目标表面相对于 CO₂ 激光波长(10.6 μm)来说是粗糙的,因此可以认为光斑照射的目标表面包含 N 个随机分布的散射单元。从散射单元反射的子波间既可能产生相长干涉,又可能发生相消干涉,这种强度的剧烈变化便构成散斑。

令

$$A_i = a_i \exp(j\varphi_i), \quad (6)$$

它表示第 i 个散射单元在像面上的振幅^[10]。式中 a_i 、 φ 为第 i 个散射单元的振幅与相位角。从一个单元射向下一个单元, a_i 和 φ 是随机变化的, 因此构成了一个统计系综。那么在这里采取下面的假定是合理的:

- 1) φ 在 $0 \sim 2\pi$ 区间是随机变化的;
- 2) a_i 、 φ 、 $a_{i'}$ 和 φ 和是统计独立的, $i \neq i'$ 。

以

$$A = \sum_i a_i \exp(j\varphi) \quad (7)$$

表示在所考虑的像点上的总振幅, 应用中心极限理论^[11], 回波信号强度的概率分布函数为

$$P_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left[-\frac{I}{2\sigma^2}\right] & I \geq 0, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|a_k|^2}{2}$, $\bar{}$ 表示系综平均, I 表示光强, 具有此类强度的概率分布函数的信号则可表示为

$$|A(x, y, z)| = \sqrt{I(x, y, z)} = r(x, y, z) \cdot n(x, y, z)^{[12, 13]}, \quad (9)$$

式中 $r(x, y, z)$ 是希望获得的图像信号, $n(x, y, z)$ 是一个随机变量。把(9)式代入(5)式, 有

$$i_{iF} = |a(t)| \cdot r(x, y, z) \cdot n(x, y, z) \cos(2\pi f \cdot t - \pi k t^2 + 2\pi f \cdot o t_r) = n(x, y, z) \cdot i'_{iF}, \quad (10)$$

式中 $i'_{iF} = r(x, y, z) \cdot |a(t)| \cos(2\pi f \cdot t - \pi k t^2 + 2\pi f \cdot o t_r)$ 。所以脉冲相干激光雷达的散斑成像模型为

$$I(x, y, z) = [i'_{iF} \cdot n(x, y, z)] \odot h(x, y, z), \quad (11)$$

式中 \odot 表示卷积, $h(x, y, z)$ 是系统脉冲响应函数。(11)式证明了脉冲相干激光雷达的散斑噪声的乘法性质。

3 并行加权均值多方向形态滤波算法

3.1 形态滤波简介^[14]

形态滤波方法是从数学形态学中发展起来的一种新型非线性滤波方法, 它在图像恢复和增强、噪声抑制、边缘提取和模式识别等方面获得了较好的应用, 并且具有一套完整的理论、方法和算法体系。它用一套独特的变换或运算来描述图像的基本特征或基本结构, 亦即图像中各像素或各部分之间的几何关系。

形态滤波的基本运算定义为: 设 $f(n)$ 为定义在二维离散空间 $Z^{(2)}$ 上的离散函数, 结构元素 B 为 $Z^{(2)}$ 上的有限子集, 则 $f(n)$ 关于 B 的腐蚀和膨胀分别定义为

$$(f \ominus B)(n) = \min\{f(n+m)/m \in B\}, \quad (12)$$

$$(f \oplus B)(n) = \max\{f(n-m)/m \in B\}. \quad (13)$$

$f(n)$ 关于 B 的形态开和闭分别定义为

$$(f \circ B)(n) = [(f \ominus B) \oplus B](n), \quad (14)$$

$$(f \bullet B)(n) = [(f \oplus B) \ominus B](n). \quad (15)$$

通常形态开、闭运算用于形态滤波, 它们以不同的方式平滑信号。形态开可以抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声, 而形态闭可以抑制信号中的低谷(负脉冲)噪声。为了同时去掉信号中的正负脉冲噪声, 一般采用形态开、闭的级联形式。

3.2 并行加权均值多方向形态滤波算法

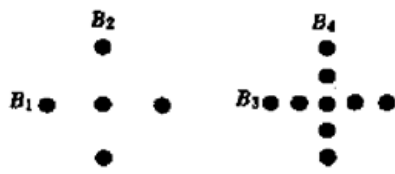


Fig. 2 Linear structuring elements

3.2.1 结构元素

结构元素的选择应根据噪声的统计性质。根据(11)式可知这里的散斑噪声是乘性的,它造成图像灰阶剧烈变化,因此即使取最小的方型 3×3 结构元素,也可能包含一个或几个受散斑噪声污染的而变得尖锐的极大、极小的像素灰度值。所以,为了尽可能地压缩散斑噪声,本工作选用了线性结构元素(如图 2 所示)。

3.2.2 算法描述

令 $f(n)$ 为输入信号, $Y(n)$ 为输出信号, $a_1(n)$ 、 $a_2(n)$ 、 $b_1(n)$ 、 $b_2(n)$ 、 $c_1(n)$ 、 $c_2(n)$ 、 $d_1(n)$ 、 $d_2(n)$ 为权重因子,则权重组合平均级联形态滤波算法如图 3 所示。

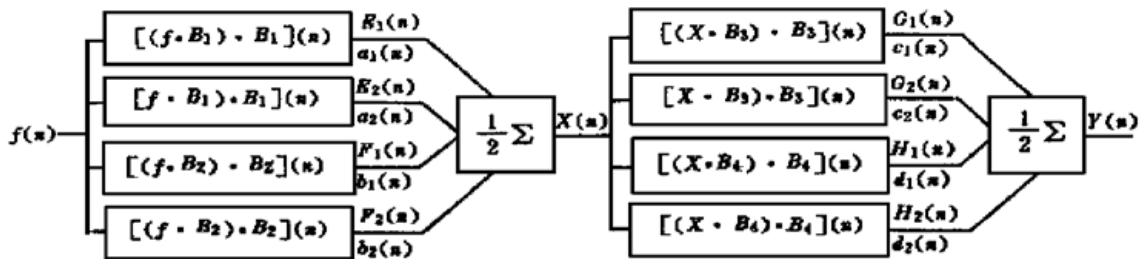


Fig. 3 Parallel weighted-average multidirectional morphological filtering algorithm

在这里,根据散斑噪声的统计性质和权重的约束条件确定权重因子,即

$$a_1(n) = 1 - P_1(I), \quad \sum_{i=1}^N a_i(n) = 1, \quad (16)$$

式中, $P_1(I)$ 的含义见(8)式,并假定 $\sigma^2 = (\frac{1}{2}) \sum_{i=1}^2 Y_i(n)$,其它权重因子以此类推。

由阈值叠加原则^[15],上述算法经相应的二值形态变换实现并行处理,其解析表达式为

$$Y(n) = \frac{1}{2} \left[c_1(n) \sum_{a=1}^M X_a(n) \cdot B_3 \circ B_3 + c_2(n) \sum_{a=1}^M X_a(n) \circ B_3 \cdot B_3 + d_1(n) \sum_{a=1}^M X_a(n) \cdot B_4 \circ B_4 + d_2(n) \sum_{a=1}^M X_a(n) \circ B_4 \cdot B_4 \right], \quad (17)$$

$$x(n) = \frac{1}{2} \left[a_1(n) \sum_{a=1}^M f_a(n) \cdot B_1 \circ B_1 + a_2(n) \sum_{a=1}^M f_a(n) \circ B_1 \cdot B_1 + b_1(n) \sum_{a=1}^M f_a(n) \cdot B_2 \circ B_2 + b_2(n) \sum_{a=1}^M f_a(n) \circ B_2 \cdot B_2 \right]. \quad (18)$$

式中, M 为图像像素的最大灰度值。

4 计算机仿真

为了验证所提出的滤波算法的有效性,本节对散斑噪声污染的图像信号进行处理。图 4 为 $256 \times 256 \times 8$ (bits) 原始图像,图 5 为散斑噪声污染的图像(均值为 1,方差为 0.1)。

从仿真结果可以看出本文所提出的算法既有效地抑制了图像中的散斑噪声,又较好地保持了图像的几何结构。从图 6、图 7 比较可以看出本文算法优于 F. Safa 的多方向形态滤波算法,并且通过计算图像中的九个灰度分割区(如图 8 所示)的均值和标准差(如表 1)也可证明这一点。

Table 1 Local mean and standard deviation in the zones.

zones	original image	noisy image	Safa's algorithm	algorithm in this paper
	grayscale mean (standard deviation)			
1	83(0)	83(26)	91(10)	85(6)
2	135(0)	134(44)	145(23)	138(11)
3	135(0)	135(43)	141(30)	136(10)
4	90(0)	88(28)	97(10)	91(6)
5	128(0)	127(40)	137(19)	128(11)
6	100(0)	99(33)	107(13)	102(8)
7	120(0)	119(38)	125(19)	120(9)
8	75(0)	75(23)	83(6)	77(5)
9	115(0)	114(36)	128(10)	117(7)

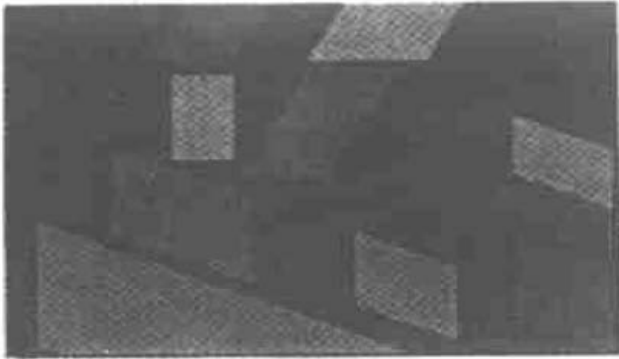


Fig. 4 Original image.



Fig. 5 Noisy image. (Variance: 0, mean: 1)

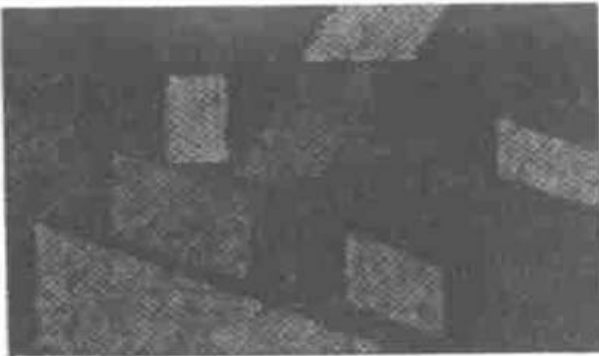


Fig. 6 Result by F. Safa's multidirectional filtering algorithm.



Fig. 7 Result by algorithm presented in this paper.

结 论 在导出脉冲相干激光雷达散斑成像模型的基础上提出了并行加权均值多方向形态滤波算法。这种算法不仅在选取结构元素中考虑了散斑噪声对图像污染严重的特点,而且在加权中使用了散斑噪声的统计规律。

计算机仿真实验证明它在保持图像的几何结构、灰度差别及图像均匀区的均匀度方面都优于 Safa 算法。

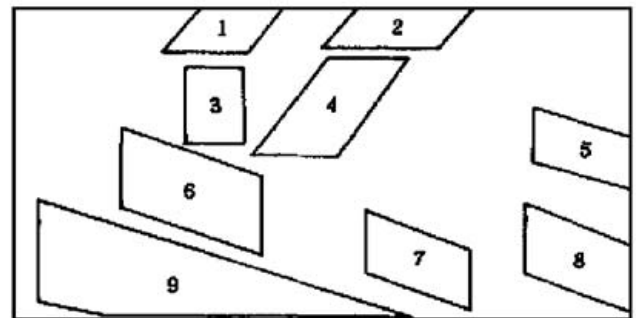


Fig. 8 Grayscale zones of the image.

参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11): 1145~ 1150
- [2] Porcello L J, Massey N G, Innes R B *et al.*. Speckle reduction synthetic aperture radar. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11): 1305~ 1310
- [3] Lee J S. Speckle suppression and analysis for SAR images. *Opt. Eng.*, 1986, **25**: 636~ 643
- [4] Crimmins T R. Geometric filter for speckle reduction. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(10): 1438~ 1443
- [5] Runtao Ding, Venetsanopoulos A N. Generalized homomorphic and adaptive order statistic filters for the removal of impulsive and signal-dependent noise. *IEEE Trans. On Circuits*, 1987, **34**(3): 948~ 955
- [6] 唐 健, 王贞松. 利用小波分析来抑制合成孔径雷达图像的相干斑噪声. 电子科学学刊, 1997, **19**(4): 451~ 457
- [7] Sattar F, Floreby L, Salomonsson G *et al.*. Image enhancement based on a nonlinear multiscale method. *IEEE Trans. On Image Processing*, 1997, **6**(6): 888~ 895
- [8] Safa F, Fiouzar G. Speckle removal based on mathematical morphology. *Signal Processing*, 1989, **16**(4): 320~ 333
- [9] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究. 博士论文, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998
- [10] Goodman J W. *Statistical Properties of Laser Speckle Patterns*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 9~ 46
- [11] 曹 彬, 许永德. 概率论与数理统计. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997: 161~ 172
- [12] Meyer D P, Maer H A. *Radar target detection*. New York: Academic, 1973. 18~ 37
- [13] Frost V S. *Development of statistical models for radar image analysis and simulation*. M. S. Thesis. Lawrence: Univ. of Kansas, Lawrence, U. S. A., 1978
- [14] 陈金都, 鹿凯宁, 丁润涛. 工程图纸噪声滤出的数学形态方法. 电子测量与仪器学报, 1996, **10**(1): 23 ~ 27
- [15] 龚 炜, 石青云, 程民德. 数字空间中的数学形态学-理论及应用. 北京: 科学出版社, 1997. 15~ 18

A Speckle Imaging Model for Impulse Coherent Laser Radar and Suppressing Its Speckle Noise

Jiang Lihui Wang Chunhui Wang Qi Shang Tieliang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 21 May 1999; revised 22 September 1999)

Abstract A speckle-imaging model for impulse coherent laser radar (ICLR) is derived, which proves the presence of multiplicative noise in images of ICLR. According to its statistical property, a parallel weighted-average multidirectional morphological filtering algorithm is presented. Simulation result shows the algorithm can not only effectively suppress speckle noise in images but also preserve the geometrical features of images. Through comparison, it is proved that the algorithm is superior to F. Safa algorithm.

Key words impulse coherent laser radar, speckle noise, morphological filter, parallel processing, weighted-average