

文章编号: 0258-7025(2004)09-1081-05

由统计特性分析激光主动成像系统 图像的噪声性质

李自勤, 李 琦, 王 骥

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

摘要 激光主动成像系统具有分辨率高、抗干扰能力强、能成三维像等一系列优点,因而应用越来越广泛,但它的图像同时受到散斑噪声和其他一些高斯噪声的影响。散斑噪声为一种乘性噪声,高斯噪声则为一种加性噪声,这两种噪声哪种占据主要地位对于图像噪声抑制噪声模型的建立具有重要的意义,分析了受到散斑噪声和高斯噪声污染图像的概率曲线及灰度均值方差比等统计特性,找出在两种噪声分别作用下的不同统计特性,以此为判别标准,对激光主动成像系统图像进行分析,得出了此图像所受噪声的主要成分为散斑噪声的结论。同时,算出了此图像的散斑噪声方差。

关键词 图像处理;激光主动成像系统;统计特性;噪声性质

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Noise Characteristic in Active Laser Imaging System by Statistic Analysis

LI Zi-qin, LI Qi, WANG Qi

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

Abstract Active laser imaging system, which can be of high resolution, anti-interference and three-dimensional (3-D) imaging, has been used widely. But its imagery can be disturbed by speckle and some other Gaussian noises. Speckle noise is a kind of multiplicative noise and the Gaussian noise is additive noise, and which noise on the dominating status is very important for building the model of noise suppression. So, in the paper, the statistic characteristics such as probability curve and gray mean variance ratio etc. in the imagery disturbed by speckle and some other Gaussian noises are analyzed firstly, then the different statistic characteristics effected by the two kinds of noises respectively are found. Based on these characteristics, the images of active laser imaging system are discussed, then the results show that the most imagery noise is speckle. At the same time, the speckle noise variance in this imagery is calculated.

Key words image processing; active laser imaging system; statistic characteristic; noise characteristic

1 引 言

激光成像系统因其具有分辨率高、抗干扰能力强、能成三维像等特点,成为近年来以至今后一段时间内的一个强劲研究方向^[1~7]。激光主动成像系统采用激光作为照射光源,同时采用光学相干探测接收,因此,其所成图像一方面会受到散斑噪声(Speckle noise)污染,另一方面还会受到本振散粒

噪声影响,此外,大气湍流、电子线路干扰等都会对所成图像构成影响。在这些影响下,其所成图像的噪声是以散斑噪声为主还是以高斯噪声为主,成为一个需要研究的问题。分析清楚图像所受的噪声的主要成分,对于图像噪声的抑制是非常有用和必要的。

通常习惯于从激光所具有的相干性和目标表面

收稿日期:2003-05-15;收到修改稿日期:2003-08-11

作者简介:李自勤(1974—),男,重庆人,哈尔滨工业大学光电子技术研究所博士研究生,主要从事图像去噪及边缘检测研究。E-mail:cqlzqiqin@0451.com

的粗糙度来分析激光成像的散斑噪声^[7,8],从这个角度很容易解释清楚散斑的形成机理、散斑噪声为乘性噪声等问题,但很难说清成像系统图像所受的噪声中散斑噪声是否占主要成分。因此,本文从另一个角度出发,研究散斑噪声和高斯噪声对图像灰度的不同影响,通过分析激光成像雷达图像灰度所具有的统计特性,得出了其所受噪声主要成分为散斑噪声的结论。

2 激光主动成像系统

激光成像系统中散斑噪声产生的原因可用图 1 说明:具有相干性的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,所以其像面上一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)^[8]。

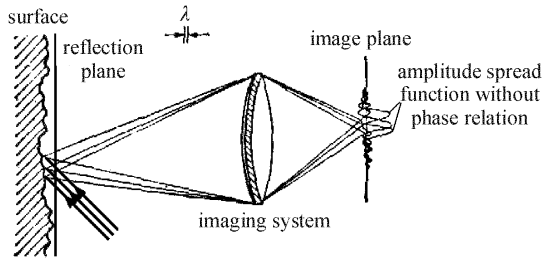


图 1 成像系统中散斑的物理起因

Fig. 1 Physics reason of speckle in imaging system

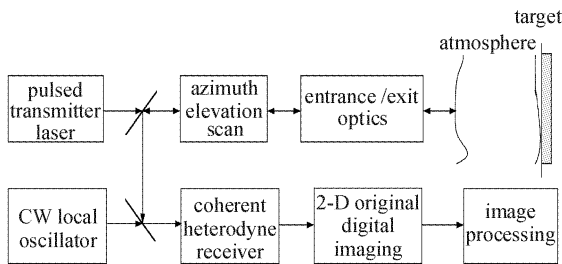


图 2 激光主动成像系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of an active laser imaging system

激光主动成像系统框图如图 2 所示。主振脉冲激光器发出的激光脉冲经过二维扫描振镜扫描,由收发光学系统发射出去,通过大气传输,照射到目标表面。反射光经过收发光学系统与扫描振镜后与连续本振光相干,经相干外差接收形成二维图像。本成像系统所成图像为强度像,强度像与振幅像之间

存在一个平方的关系,以下分析均基于强度像进行。

3 图像的统计特性

3.1 散斑噪声污染图像

散斑噪声可近似为一种乘性噪声,具有负指数分布的统计特性^[8,9],表示如下

$$I = I_0 \cdot I_{sn} \tag{1}$$

$$p_{I_{sn}}(I_{sn}) = \frac{1}{\langle I_{sn} \rangle} \exp\left(-\frac{I_{sn}}{\langle I_{sn} \rangle}\right) \tag{2}$$

式中, I 为接收到的信号强度,由图像的像素灰度直接体现出来; I_0 为无噪信号强度,反映的是目标的真实反射强度; I_{sn} 为散斑噪声作用系数, $\langle \cdot \rangle$ 表示求平均值。

为了便于研究,假设所照射的目标为一均质目标,即无噪信号强度 I_0 为一常数,设为 a ,由此可得到接收信号的概率密度

$$p_I(I) = p_I(aI_{sn}) = p_{I_{sn}}\left(\frac{I}{a}\right) \cdot \frac{1}{|a|} = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad I \geq 0 \tag{3}$$

在实际应用中,感兴趣的是强度超过阈值 I 的概率 $P(I)$

$$P(I) = \int_I^\infty p_I(\tau) d\tau = \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \tag{4}$$

其曲线如图 3 所示。

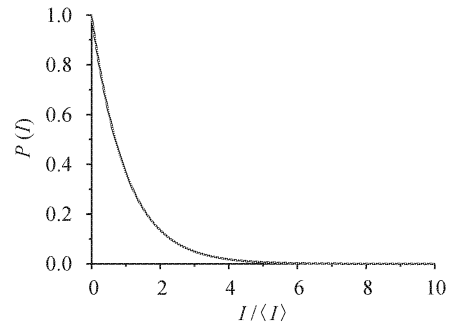


图 3 散斑噪声图像灰度的概率曲线

Fig. 3 Probability curve of speckled image gray

由(1)式可得到接收信号的方差为

$$\begin{aligned} \text{Var}(I) &= \text{Var}(I_0 \cdot I_{sn}) = \\ &= \langle (I_0 \cdot I_{sn})^2 \rangle - \langle (I_0 \cdot I_{sn}) \rangle^2 = \\ &= \langle I_0^2 \rangle \langle I_{sn}^2 \rangle - \langle I_0 \rangle^2 \langle I_{sn} \rangle^2 \end{aligned} \tag{5}$$

在前述均质目标的假设下,有 $\text{Var}(I_0) = 0$,即有 $\langle I_0^2 \rangle = \langle I_0 \rangle^2$,同时由散斑的均值为 1,即 $\langle I_{sn} \rangle = 1$ ^[10],得到散斑噪声方差的表达式

$$\text{Var}(I_{\text{sn}}) = \frac{\text{Var}(I)}{\langle I \rangle^2} \quad (6)$$

对于同一幅图像中同一目标的各个像素点,可以认为其散斑噪声的方差是相同的,因此,此时这些像素点的灰度方差与灰度均值平方间存在线性关系。

3.2 高斯噪声污染图像

本振的散粒噪声、大气传输的影响、电子线路干扰等可用均值为 0 的高斯噪声模型来近似。一幅图像受高斯噪声污染,可用下式来表示

$$I = I_0 + I_{\text{gn}} \quad (7)$$

式中 I_{gn} 代表高斯噪声作用系数,其方差为 σ^2 的概率分布为

$$p_{I_{\text{gn}}}(I_{\text{gn}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{I_{\text{gn}}^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

由(7),(8)两式可得出,当图像为均质时,此时含有高斯噪声的图像概率密度函数为

$$p_I(I) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad I \geq 0 \quad (9)$$

式中 α 为归一化常数,其值为

$$\alpha = \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma^2}\right] dI$$

此时强度超过阈值 I 的概率 $P(I)$

$$P(I) = \int_I^\infty p_I(\tau) d\tau = \frac{1}{\alpha} \int_I^\infty \exp\left[-\frac{(\tau - I_0)^2}{2\sigma^2}\right] d\tau \quad (10)$$

其曲线如图 4 所示。

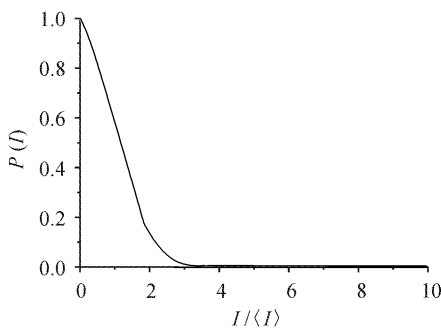


图 4 高斯噪声图像灰度的概率曲线

Fig. 4 Probability curve of image gray interfered by Gaussian noise

在均质目标假设下,有 $\text{Var}(I_0) = 0$,此时

$$\text{Var}(I) = \text{Var}(I_0) + \text{Var}(I_{\text{gn}}) = \text{Var}(I_{\text{gn}}) = \sigma^2 \quad (11)$$

依然认定同一幅图像中同一目标的各个像素点的噪声的方差相同,此时这些像素点的灰度方差近

似为一常数。

4 激光主动成像系统图像噪声分析

通过对散斑噪声和高斯噪声污染图像统计特性的分析,可以看出,被这两种噪声污染的图像的统计特性是不同的。因此,可通过分析激光主动成像系统图像的统计特性来确定其所受的主要噪声类型。

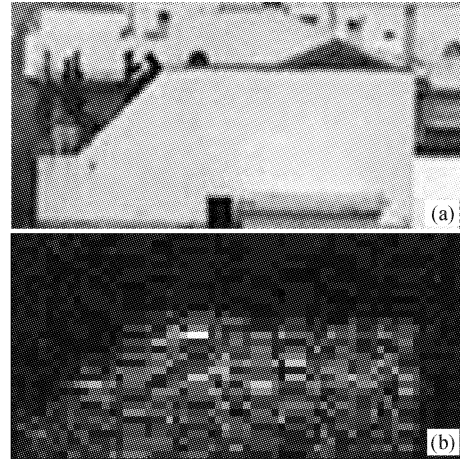


图 5 (a) 目标建筑物照片;
(b) 激光主动成像系统所成图像

Fig. 5 (a) Building photograph;
(b) Image given by active laser imaging system

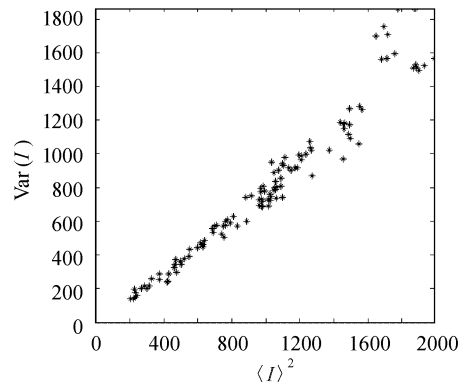


图 6 目标像素灰度均值与方差的线性关系

Fig. 6 Gray mean and variance velenon of target pixel

图 5(a),(b)是激光主动成像系统所成的一幅图像,其中图 5(a)是目标建筑物照片。此目标建筑物距激光成像系统约 1000 m,所成图像大小为 32×64 像素,256 级灰度。图 6 给出了这幅图像中目标的灰度均值方差线性关系,图 7 是目标像素灰度概率曲线,图 8(a)是对图 7 的概率曲线的指数曲线拟合,同时为了对比,在图 8 中还给出了高斯噪声图像的概率曲线。由图 6 可以看出,目标像素的灰度均

值与方差之间确实存在一线性关系。同时,从图 8 (a),(b)可以看出,目标像素灰度的概率曲线与散斑噪声图像所拥有的指数分布概率曲线很好地重合,而与高斯噪声图像所拥有的概率曲线则相差很大。

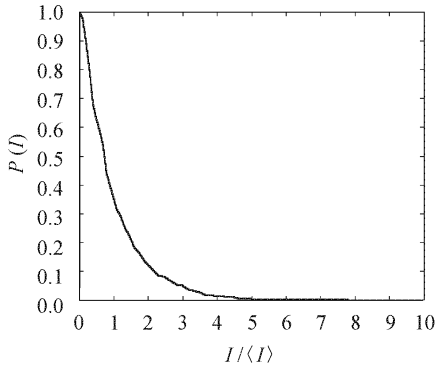


图 7 目标像素灰度的概率曲线

Fig. 7 Probability curve of target pixel gray

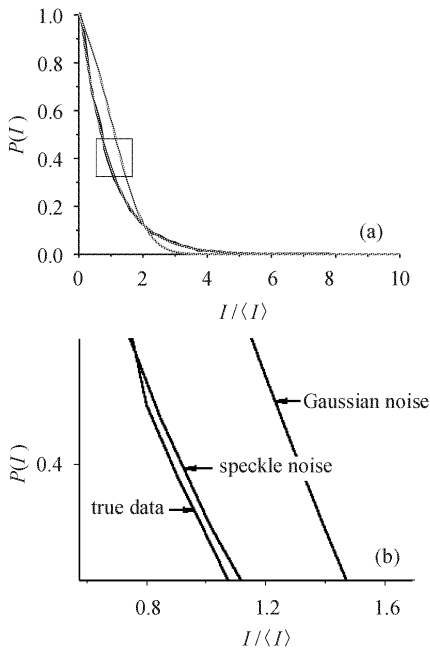


图 8 (a) 对概率曲线的指数曲线拟合及与高斯噪声图像概率曲线的对比;(b) 对图(a)方框部分的放大

Fig. 8 (a) Exponential fitting to probability curve and comparing with Gaussian noise; (b) Enlargement to (a) pane

由此认为,激光主动成像系统所成的图像主要受散斑噪声污染。可以求出这个散斑噪声的噪声方差 $\text{Var}(I_{\text{sn}}) = 0.7777$ 。

为了更加有力地支持这个结论,对另外两幅激光主动成像系统图像进行了同样的分析,其结果如图 9(A),(B)所示。

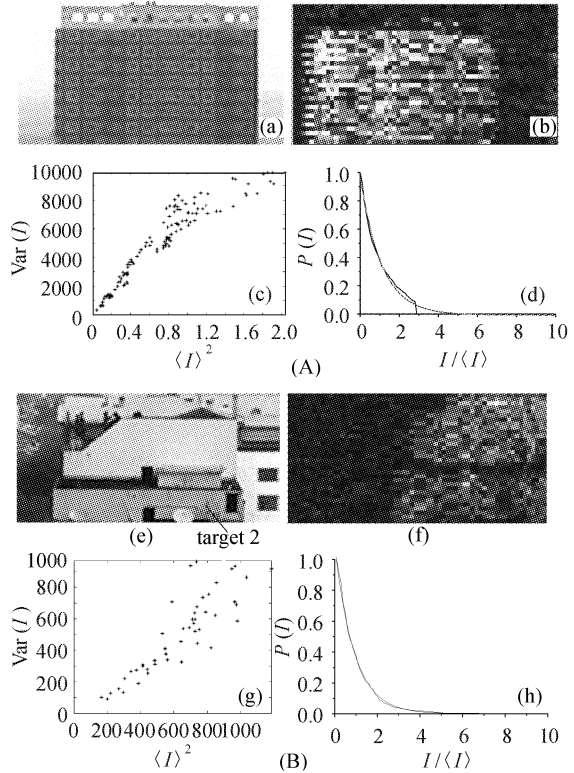


图 9 激光主动成像系统图像统计特性分析

(a),(e) 目标照片;(b),(f) 所成图像;(c),(g) 灰度均值与方差;(d),(h) 概率曲线与拟合指数曲线

Fig. 9 Statistic analysis about image

(a), (e) building photograph; (b), (f) image given by active laser imaging system; (c), (g) gray mean and variance of target pixel; (d), (h) exponential fitting to probability curve

图 9(A)的拟合曲线和真实数据曲线也得到了较好的重合,只是在 $I = 3\langle I \rangle$ 附近真实数据曲线是直接跃变到 0,与拟合曲线有一点差异。分析原因可能是目标建筑物并非是严格的均质目标,上面有许多窗户,虽然受成像系统分辨率影响不能分辨出这些窗户的信息,但它可能也对激光回波产生了影响,使得高亮像素点减少,造成了这个跃变。由这幅图像算得的散斑噪声方差为 $\text{Var}(I_{\text{sn}}) = 0.7305$ 。

图 9(B)选择的是位于下方的目标 2 进行分析。对这个目标的分析得到了同前两幅图像分析完全相同的结果。由这幅图像算得的散斑噪声方差 $\text{Var}(I_{\text{sn}}) = 0.7808$ 。

由以上分析可以看出,在激光主动成像系统图像中,所受的主要噪声为散斑噪声。同时,算得的散斑噪声方差约为 0.75 左右,与合成孔径雷达中的 $\text{Var}(I_{\text{sn}}) = 1/N, N$ 为视数^[11],有所区别。

5 结 论

通过对激光主动成像系统图像灰度统计特性的分析,得出了此图像所受噪声的主要成分为散斑噪声的结论,同时得出散斑噪声的方差为 0.75 左右。这些研究对后继的图像噪声抑制研究非常有用。

参 考 文 献

- Gregory R. Osche, Donald S. Young. Imaging laser radar in the near and far infrared [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2):103~125
- Andreas Biernat, Gunter Komp. A laser radar for precise 2D- and 3D-object imaging [C]. *Microwave Conference and Exhibition*, 27th European, 8~12 Sep 1997. 601~604
- Wang Qi, Jiang Lihui, Li Ning *et al.*. Based on combining homomorphic and adaptive fuzzy multilevel median filtering for restoration of images degrade by speckle noise [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7):655~657
王 骐,蒋立辉,李 宁等. 基于同态滤波与自适应模糊多级中值滤波级联算法的散斑噪声污染图像恢复[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7):655~657
- Qi Wang, Ziqin Li, Qi Li *et al.*. An edge detection algorithm for imaging lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(5):272~274
- Ziqin Li, Qi Li, Zhaoshuo Tian *et al.*. Processing for laser radar range images [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4):210~212
- Li Ziqin, Wang Qi, Li Qi *et al.*. Multiplication model of speckle image and speckle suppression in imaging lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):717~720
李自勤,王 骐,李 琦等. 激光成像雷达系统中散斑像的乘法模型及其滤除[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):717~720
- 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*, 2000, **20**(12):1623~1628
蒋立辉,王春辉,王 骐等. 脉冲相干激光雷达的散斑成像模型及其散斑噪声压缩[J]. *光学学报*, 2000, **20**(12):1623~1628
- J. C. Dainty ed., translated by Huang Letian, Wang Tianji, Lin Shiyong. *Laser Speckle and Related Phenomena* [M]. Beijing: Science Press, 1981. 9~19
J. C. 丹蒂 编,黄乐天,王天及,林仕英 译. 激光斑纹及有关现象[M]. 北京:科学出版社, 1981. 9~19
- C. J. Oliver. Information from SAR images [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1991, **24**(9):1493~1514
- Jong-Sen Lee. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images [J]. *Opt. Eng.*, 1986, **25**(5):636~643
- P. Dewaele, P. Wambacq, A. Oosterlinck *et al.*. Comparison of some speckle reduction techniques for SAR images [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1990. IGARSS'90. Remote Sensing Science for the Nineties. 10th Annual International, 1990. 2417~2422