

文章编号: 0258-7025(2005)03-0356-05

相干激光雷达距离像噪声机理及 距离反常抑制

李自勤^{1,2}, 王 骥¹, 李 琦¹, 孙剑峰¹

(¹ 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)

² 杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018

摘要 分析了距离像的噪声作用机理: 距离反常时测量值表现为统计上的平均分布, 而距离正常时测量值为一高斯分布。据此提出了一种基于局部直方图的激光雷达距离像距离反常的抑制算法: 利用局部直方图判断当前像素是否为反常像素, 将反常像素用最可几距离值代替, 达到抑制距离反常的目的。对仿真图像处理结果表明此算法能较好地抑制距离反常。将其应用于真实获得的雷达距离像处理, 对两个相距 77 m 目标的激光雷达距离像处理后, 两个目标都获得了均匀的距离灰度值, 图像灰度显示两目标相距 75 m, 与实际距离吻合很好。

关键词 图像处理; 相干激光雷达; 噪声机理; 局部直方图; 距离像; 距离反常抑制

中图分类号 TN 958.98

文献标识码 A

Noises Mechanism of Range Image in Coherent Laser Radar and the Range Anomalies Suppression

LI Zi-qin^{1,2}, WANG Qi¹, LI Qi¹, SUN Jian-feng¹

¹ National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronic,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Helongjiang 150001, China

² Electronic Information College, Hangzhou University of Electronic Science, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract The noises mechanism of range image is analyzed in this paper; range anomalies result in average distribution while range normalies result in Gaussian distribution. To this end, a laser radar range image suppression algorithm based on local histogram is put forward; Apply the local histogram to judge pixel anomalies and remove by optimum distance so as to achieve range anomalies suppression. Apply it to the process of actual laser radar range image and get satisfying results. The range information from the processed laser range image shows that the distance between the two objects is 75 m, reflects the actual objects' interval (77 m) exactly. Both the targets obtain mean range grayscale value.

Key words image processing; coherent laser radar; noises mechanism; local histogram; range image; range anomalies suppression

1 引 言

激光主动成像雷达有别于被动红外等成像方式的一个显著优势是既能成强度像也能成距离像, 强度像信息和距离像信息构成目标完整的三维信息, 从而可完成准确的目标辨识, 精确的目标定位。关于激光

雷达强度像的处理研究已有很多^[1~5], 而关于其距离像的处理却少见报道。为了充分发挥激光主动成像雷达的优势, 必须开展对距离像的处理研究。

距离像最主要的噪声污染是距离反常, 距离反常是一种非线性噪声。非线性噪声的滤除是一件非常困难的事, 非线性噪声由于其形成的原因各不相

收稿日期: 2003-12-31; 收到修改稿日期: 2004-03-17

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, 主要从事图像去噪及边缘检测的研究。

E-mail: lziqin@sina.com

同,因此表现出的性质也不一样,目前没有哪一种滤波方法对非线性噪声是普适的。J. G. Verly 等^[6]用形态学方法,T. J. Green, Jr 等^[7]用 EM 算法(Expectation-maximization algorithm)对距离异常进行了处理,而沈严等^[8]则提出了一种分层滤波方法。

用极大似然估计 EM 算法对距离像进行噪声抑制,充分利用了距离像噪声的统计模型,在实际应用中显示出较好的效果,但是 EM 算法的典型特点是反复迭代,直到达到似然最大的稳定解。这种方法带来的一个非常严重的问题是耗时较长,实时处理困难。Verly 等^[6]应用形态学方法的目的是为了得到距离等高线图像,强调的是边缘信息,对于像素点较多的图像处理效果较好,而对于像素点较少的图像,则处理效果不理想。文献[8]中提到的方法依靠距离像的灰度直方图进行距离像的分层,然后对每层图像进行均值滤波,最后进行图像合成得到滤波后的距离像。用这种方法的前提是距离像拥有较

多的像素点,这样能得到较为准确的灰度直方图;此外,还要求直方图拥有较为明显的多峰结构,这除了要求目标要有好的距离层次外,还要求成像系统具有较高的距离分辨率,采用较多的灰度等级采样。这样才能比较好地完成距离像的分层,达到好的滤波效果。而现实中,通常的距离像并不一定能很好地满足这些要求,其次是它采用的是 8 级灰度采样,这就造成其整幅图像的灰度直方图不可能形成较好的多峰结构。

可以看出,现有的距离像噪声抑制算法均不适合实时处理系统、距离图像像素点不太多、采样灰度等级不高的情形,因此,本文提出了一种基于局部直方图的激光雷达距离像距离反常的抑制算法,并在获得的真实雷达图像处理中取得了满意的效果。

2 距离像的噪声模型

激光主动成像雷达系统组成如图 1 所示。

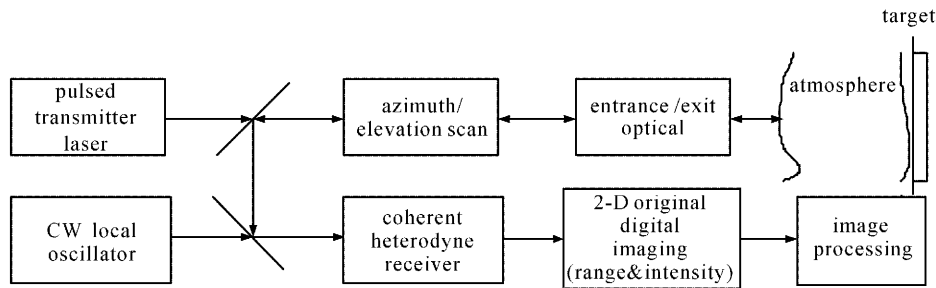


图 1 激光主动成像系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of an active laser imaging system

脉冲主振激光器发射一系列激光脉冲,这些脉冲经过扫描装置和收发合置光学系统后,照射到目标上。经目标反射,这些脉冲穿过光学系统与连续本振光发生相干,通过光电探测器和峰值检测,其脉冲峰值被探测。对这些峰值强度进行量化编码就得到原始的数字强度像,对这个峰值所对应的时间延迟(即从其发射到接收所用的时间)进行量化编码就得到相应的原始距离像。

激光雷达距离图像主要受到两类噪声干扰,即失落信息和逸出值^[6]。失落信息的产生:首先,发射脉冲无回波的情况,比如发射脉冲的通道上无反射表面(天空);其次,回波时间超出了接收窗口(激光主动成像雷达中存在两种采样方式,即全程采样和距离选通采样,对于后一种方式,接收器只在感兴趣的时间段工作,以达到只接收空间某距离段范围内

的目标回波的目的,这个时间段称为接收窗口)。而如果测得的距离值并不反映真实距离值,则对应的像素就是逸出值。因为逸出值表现出来的是一种距离的反常,因此许多文献将其称为距离反常^[7,9,10]。可以看出,失落信息存在于无目标处,而距离反常存在于有目标处。

由于目标表面相对于激光波长相当的粗糙,且激光具有相干性,因此当激光照射目标表面时,其回波会产生散斑现象,散斑对激光雷达强度图像影响严重,它造成强度图像灰度的急剧起伏^[11,12]。同时,雷达采用外差接收,必然会受到本振散粒噪声的影响。这两种噪声作用在距离像上则形成距离反常。T. J. Green, Jr.^[7]和 J. H. Shapiro^[9]等指出了距离反常形成的原因,如图 2 所示。

图中 R 表示测量距离值, R' 表示真实距离值。

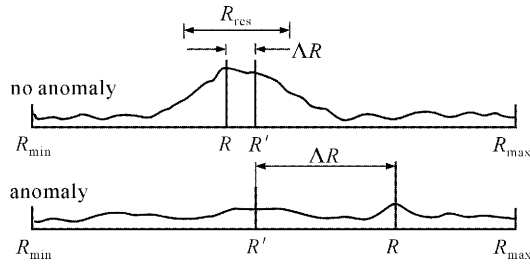


图2 峰值测量距离时的正常与反常情况

Fig. 2 Range normal and anomalous by peak detection

一个严重的散斑降低同时伴随着一个强的噪声峰值引导测量距离值远离真实值,从而形成反常距离。以变量 r 表示测量距离值,变量 r' 表示真实距离值, T. J. Green, Jr 等^[7]给出了将 r 作为一连续随机变量,在 $r = R$ 时有 $r' = R'$ 成立的概率密度函数

$$P_{r|r'}(R | R') = [1 - P_r(A)] \times \frac{\exp[-(R - R')^2 / (2\delta R^2)]}{(2\pi\delta R^2)^{1/2}} + \frac{P_r(A)}{\Delta R}, \quad (1)$$

$$R_{\min} \leq R, R' \leq R_{\max},$$

式中 $P_r(A)$ 为反常概率,也就是距离反常出现的概率, δR 为局部距离精度, $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$ 为距离测量范围。

(1)式右边第一项表示在正常距离情况下,距离测量值的精度仅受局部距离精度 δR 的影响,形成一个以真值 R' 为均值, δR 为方差的正态分布;第二项表示由于受到散斑噪声和散粒噪声的联合作用,距离测量值出现了反常,而由于噪声的随机性,它表现为在距离测量范围内的一个平均分布。

对于脉宽为 T 的激光雷达,其距离分辨率

$$R_{\text{res}} = cT/2, \quad (2)$$

式中 c 为光速,由它可以得到距离分辨单元数

$$N = \Delta R/R_{\text{res}}. \quad (3)$$

对于一个雷达系统,其载噪比(CNR)是一个重要的参数^[10]

$$\text{CNR} = \bar{P}_r / \bar{P}_{\text{shn}}, \quad (4)$$

式中 \bar{P}_r 表示雷达的平均返回功率, \bar{P}_{shn} 表示本振散粒噪声平均功率。对于收发合置外差接收光学雷达,有^[10]

$$\text{CNR} = \frac{P_T}{h\nu B} \frac{D^2}{4L^2} \epsilon \eta \rho \exp(-2\alpha L), \quad (5)$$

式中 P_T 为发射脉冲峰值功率, B 为中频接收带宽, D 为入瞳直径, L 为目标距离, ϵ 为光学和外差效率之积, η 为光电探测器量子效率, ρ 为目标反射率, α

为大气消光系数。

通过(5)式,可以求出(1)式中的反常概率^[10]

$$P_r(A) \approx \frac{1}{\text{CNR}} \left[\ln(N) - \frac{1}{N} + 0.577 \right]. \quad (6)$$

根据本系统的设计参数和工作条件,有 $\delta R = 15 \text{ m}$, $\Delta R = 120 \text{ m}$,并可算出理想情况下 $P_r(A) = 0.06$,但由于激光成像实验系统并不处于最佳工作状态,而且光学系统的光路稍有偏差就将造成整个系统信噪比的大幅下降,因此 $P_r(A)$ 的取值应比计算值大 1 ~ 2 倍。较小的值虽然能获得较好的仿真处理效果,但不利于算法参数的优化调节,最终导致实际应用结果欠佳,所以在此将 $P_r(A)$ 取 0.2 考虑。

根据上面的参数和前述的距离像噪声模型,以图 3(a)这一实际建筑物为参考,产生仿真雷达距离图像如图 3 所示。图 3(b)为无噪仿真距离像,图 3(c)为加入噪声后的距离像。

图 4 给出的是激光雷达所成的真实强度像和距离像。图 4(a)是目标建筑物照片。作为目标的是两栋彼此相隔 77 m 的建筑物,其他建筑物则在实验中作了屏蔽。图像大小为 32×64 ,其中强度像采用 256 级灰度采样,而距离像则采用 8 级灰度采样。需要说明的是,距离像上位于目标区的灰度起伏是距离反常造成的,而位于背景区的灰度杂乱无章则是失落信息所致。图 4(d)给出了经过背景抑制之后的距离像(关于距离图像的背景抑制详见文献[13])。

对比图 3(c)和图 4(d)可以看出,这两个图在目标区非常相似,从而证明了此距离反常数学模型的有效性。需要说明的是在采用这个数学模型时, $P_r(A)$ 应该取比计算出来的值大一些,这主要是由于实际工作系统很难处于最佳参数状态,同时也便于优化算法参数。

3 距离像距离反常的抑制

分析(1)式所描述的距离像噪声模型,容易知道,当距离反常时,其距离测量值均匀地分布于整个距离测量范围内,形成一种非线性噪声。由图 3 可以看出,距离反常导致距离测量值远离真实距离值,因此,距离反常严重污染了距离像,对距离像的去噪重点是对距离反常的抑制。

分析距离反常出现的特点,其出现的概率为 $P_r(A)$,且反常距离值均匀分布于整个距离测量间

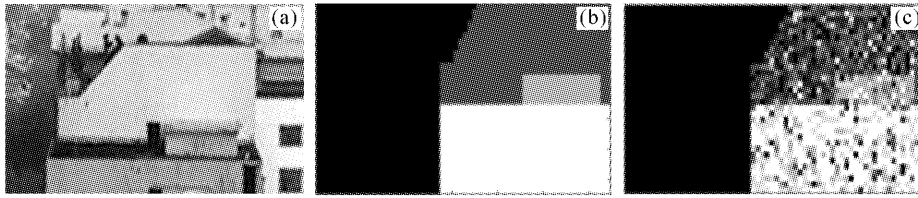


图 3 仿真雷达图像

(a) 作为参考物的真实建筑物照片;(b) 无噪仿真距离像;(c) 含噪仿真距离像

Fig. 3 Simulation radar image

(a) the picture of actual buildings as referenced target;

(b) simulation range image without noise; (c) simulation range image with noise

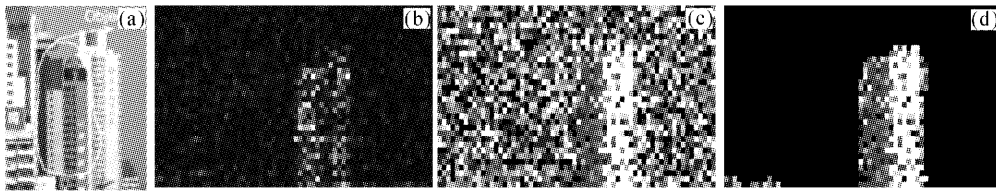


图 4 真实雷达图像

(a) 目标建筑物照片;(b) 真实雷达强度像;(c) 真实雷达原始距离像;(d) 背景抑制之后的距离像

Fig. 4 Raw radar image

(a) photo of the objects; (b) raw intensity image;

(c) raw range images; (d) range image background suppression

隔范围,因此当一个像素为反常距离时,其灰度值在一定大小的邻域内再现的频率很低。而当此像素为正常距离时,因为正常距离出现的概率较高(为 $1 - P_r(A)$),通常会有好几个像素点的真实距离值相同,因此此灰度值在其邻域内再现的频率较高。

从上面的分析很容易想到图像的直方图。图像的直方图 $h(z)$ 给出图像中灰度值 z 出现的频率,一幅有 L 个灰阶的图像的直方图由具有 L 个元素的一维数组表示。如果对当前像素的一个邻域求其局部直方图,如果当前像素的局部直方图值较大,则它是一个正常像素,如果当前像素的局部直方图值很小,则可以认为它是一个反常像素。

取像素 $z_0(i, j)$ 为中心的邻域求其局部直方图 $h_L(z)$, 则

$$h_L(z_0) \begin{cases} \geq T & z_0 \in \text{normal} \\ < T & z_0 \in \text{anomalous} \end{cases}, \quad (7)$$

式中的 T 为设定的阈值。

对于正常像素,保留原像素值不变,对于反常像素,在其 4 连接邻域内挑选一直方图值最大的像素替换它

$$z_0 = \begin{cases} z_0 & z_0 \in \text{normal} \\ z_1 & z_0 \in \text{anomalous} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 z_1 为

$$\{z_1 \mid h_L(z_1) = \max_{z \in M} h_L(z), z_1 \in M; \\ M = \{z(i-1, j), z(i+1, j), \\ z(i, j-1), z(i, j+1)\}\}. \quad (9)$$

阈值 T 的选取与所选用的邻域形状和大小有关。而邻域形状和大小的选择对于滤波结果有显著的影响,大的邻域有利于有效抑制反常,但是容易造成目标边缘的变形,小的邻域不利于反常抑制,但利于保持边缘。对于本成像雷达图像,目标边缘以直线为主,而且像素不多,经反复实验证明选用 5×5 的方形邻域比较合适,此时 $T = 6$ 效果较佳。

由图 5 可以看出,绝大部分的距离反常像素都得到了很好的抑制。

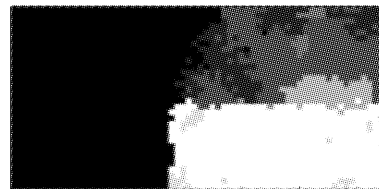


图 5 对图 3(c)的处理结果

Fig. 5 Processing results about Fig. 3(c)

最简单常用的复原图像质量评价方法是 John O. Limb^[14] 于 1979 年提出的均方根误差评价法

(RMSE),其定义为

$$\text{RMSE} = \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_i - \hat{x}_i|^2 \right\}^{1/2}, \quad (10)$$

式中 m 为图像像素数, x 为无噪图像, \hat{x} 为复原图像(或含噪图像)。

Norman B. Nill^[15] 则加入了人类视觉曲线的考虑,随后有许多的考虑人类视觉特性的图像质量评价方法出现,如文献[16]的基于视觉加权处理的图像质量评价方法,文献[17]的基于视觉感知的图像质量评价方法等。这些方法主要是追求与人的主观评价相一致,符合人看图的习惯。而在激光雷达的距离像处理中,其处理结果主要用于目标的识别和定位,这些过程都由各器件完成,不需要人的参与,因此,采用均方根误差评价图像质量是恰当的。

由(10)式可算出图 3(c)的 $\text{RMSE}=1.7642$,而经过处理后,图 5 的 $\text{RMSE}=0.4829$ 。可见此滤波算法确实对激光雷达距离像距离异常起到了较好的抑制作用,改善了距离像的图像质量。

为了验证本算法的实用性,将本算法应用于图 4(d)的距离反常抑制,图 6 给出了处理的结果。

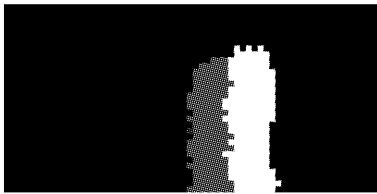


图 6 激光雷达距离像处理结果

Fig. 6 Processing results of laser radar range image

由图 6 可以看出,原来目标上的距离反常得到了有效的抑制,每个目标都获得了比较均匀的距离值。并且处理结果表明两建筑物相距 75 m,正确地反映了两建筑物的真实距离(77 m)。同时,由处理结果可以看出,其真实雷达图像的处理效果要好于仿真图像,这说明取 $P_r(A) = 0.2$ 有点偏高,实际的成像系统反常概率略小于这个值。

4 结 论

分析了距离反常的数学模型和它的特点,提出了基于局部直方图的距离反常抑制算法。将其应用于实际获得的雷达图像处理,取得了满意的效果,对两个相距 77 m 目标的激光雷达距离图像处理,两目标均获得了均匀的距离灰度,图像灰度显示两

目标相距 75 m,与实际距离吻合很好。 $P_r(A)$ 的取值是构建仿真距离像的一个关键参数,如何使取值更接近于实际雷达图像,是后续研究需要考虑的一个问题。

参 考 文 献

- 1 Jong-Sen Lee. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images [J]. *Opt. Eng.*, 1986, **25**(5):636~643
- 2 Qi Wang, Ziqin Li, Qi Li *et al.*. An edge detection algorithm for imaging lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(5):272~274
- 3 Li Ziqin, Li Qi, Wang Qi. Noise characteristic in active laser imaging system by statistic analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1081~1085
李自勤,李琦,王 骐. 由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9):1081~1085
- 4 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
- 5 Jiang Lihui, Zhao Chunhui, Wang Qi. Algorithm about suppressing speckle noise in coherent laser radar imagery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5):541~546
蒋立辉,赵春晖,王 骐. 相干激光雷达图像散斑噪声抑制算法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5):541~546
- 6 Jacques G. Verly, Richard L. Delanoy. Model-based automatic target recognition (ATR) system for forward looking groundbased and airborne imaging laser radars (LADAR) [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, **84**(2):126~163
- 7 T. J. Green, Jr., J. H. Shapiro. Maximum-likelihood laser radar range profiling with the expectation-maximization algorithm [J]. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(11):2343~2354
- 8 Shen Yan, Yang Zhiqing. A hierarchical filtering algorithm for processing distance images [J]. *Journal of Xidian University*, 2003, **30**(1):136~140
沈 严,杨志卿. 距离图像的分层滤波处理算法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2003, **30**(1):136~140
- 9 Jeffrey H. Shapiro, Robert W. Reinhold, Dongwook Park. Performance analyses for peak-detecting laser radars [J]. *SPIE*, 1986, **663**:38~56
- 10 Jeffrey H. Shapiro. Target-reflectivity theory for coherent laser radars [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(18):3398~3407
- 11 J. W. Goodman. Some fundamental properties of speckle [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11):1145~1150
- 12 C. J. Oliver. Information from SAR images [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1991, **24**:1493~1514
- 13 Ziqin Li, Qi Li, Zhaoshuo Tian *et al.*. Processing for laser radar range images [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4):210~212
- 14 John O. Limb. Distortion criteria of the human viewer [J]. *IEEE Transactions on Systems Man. and Cybernetics*, 1979, **SMC-9**(12):778~793
- 15 Norman B. Nill. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1985, **COM-33**(6):551~557
- 16 Li Zhenfeng, Ding Yifang, Zhang Wenjun. An image quality evaluation method base on visual weighted processing [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 1998, **4**(6):645~652
栗振风,丁艺芳,张文俊. 一种基于视觉加权处理的图像质量评价方法[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 1998, **4**(6):645~652
- 17 Wei Zhenggang, Yuan Jiehui, Cai Yuanlong. A picture quality evaluation method based on human perception [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, **27**(4):79~82
魏政刚,袁杰辉,蔡元龙. 一种基于视觉感知的图像质量评价方法[J]. *电子学报*, 1999, **27**(4):79~82