

文章编号: 0253-2239(2009)05-1270-05

# 一种提高非扫描激光雷达距离分辨率的方法

张 勇 赵 远 刘丽萍 张 宇 孙秀冬

(哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 现有非扫描激光雷达阵列探测器的信噪比较低,影响到系统的距离分辨率,详细分析了阵列探测器的噪声特性,得出了噪声满足各态历经性的重要结论,并指出在输入信号相同的条件下,可以通过空域积累代替时域积累的方法提高距离探测器的信噪比。并根据前述结论针对非扫描激光雷达/电视复合成像系统,提出一种采用改进邻域平均的图像处理方法提高非扫描激光雷达系统距离分辨率的图像处理方法,并应用于实际系统,结果表明该方法能够有效提高非扫描激光雷达系统距离分辨率。

**关键词** 成像系统; 非扫描激光雷达; 图像处理; 距离分辨率; 邻域平均

**中图分类号** TN958. 98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1270

## Range Resolution Improvement of Scannerless Laser Radar

Zhang Yong Zhao Yuan Liu Liping Zhang Yu Sun Xiudong

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The signal-to-noise-ratio (SNR) of the existing scannerless laser radar detector array is relatively low, which affects the range resolution of the system. The noise characteristics of the detector arrays were analyzed. It is pointed out that, the noise is ergodic and the SNR of range detector can be increased by using spatial domain accumulation in place of time-domain accumulation. According to this conclusion, an image processing method using the neighborhood averaging image processing method is proposed, which can improve range resolution of scannerless radar system, specially for the scannerless laser radar/TV composite imaging system. The practical application in real system shows this method can effectively increase the range resolution of scannerless radar system.

**Key words** imaging system; scannerless laser radar; image processing; range resolution; neighborhood averaging

## 1 引 言

非扫描激光雷达阵列成像器件信噪比较低,是非扫描激光雷达遇到的普遍问题<sup>[1~4]</sup>。探测器的信噪比低成为制约非扫描激光雷达距离分辨率的瓶颈之一。由于工艺水平的限制,国内外短期内阵列探测器信噪比无法有突破性进展,因此需要研究现有器件水平下,提高非扫描激光雷达距离分辨率的方法。

目前提高激光雷达距离分辨率的图像方法研究主要集中在针对某一种噪声的研究方面<sup>[5,6]</sup>以及将距离像作为普通强度图像进行处理方面,其中包括距离像时域积累、中值滤波、均值滤波等方法。然而

时域积累的方法对系统帧频降低较多;中值滤波、均值滤波等滤波方法对于图像的各像元不加区别,虽然可以提高图像的距离分辨率但会造成距离像边缘模糊,目标边缘处距离误差增加。对于这些缺点,人们又提出基于人工智能、基于支持向量机等方法<sup>[5,6]</sup>和很多具有一定自适应能力的改进算法<sup>[7~9]</sup>,例如梯度倒数加权平滑、局部统计滤波、总变分滤波等。但是这些改进算法容易对噪声比较敏感,将噪声当成边缘,从而使得去噪后的图像产生虚假边缘。针对目前这些处理方法存在的问题和非扫描激光雷达/电视复合成像的优势,本文提出一种提高非扫描激光雷达距离分辨率的方法。该方法在无需增加额外帧的情况下,既能够提高距离像信噪比,又能够尽

收稿日期: 2008-10-13; 收到修改稿日期: 2008-11-24

基金项目: 武器预研基金(9140A01040307HT0125)资助项目。

作者简介: 张 勇(1979—),男,博士研究生,主要从事光电探测、激光成像方面的研究。E-mail: zzyyyy@hit.edu.cn

导师简介: 孙秀冬(1963—),女,博士,教授,主要从事军用光电技术方面的研究。E-mail: xdsun@hit.edu.cn (通信联系人)

量保护距离像的边缘信息。

## 2 非扫描激光雷达/电视复合成像系统

非扫描激光雷达/电视复合成像系统可以通过非扫描激光雷达得到目标的距离像,还可以通过电视成像得到目标的强度像。目标的距离像和强度像是目标不同特征的两种表现形式,二者在形状和轮廓特征上具有很高的相关性。此外,电视成像系统的 CCD 探测器具有高信噪比的特性,其信噪比可达 40~60 dB。因此,可以利用距离像与强度像的相关性和电视成像的高信噪比,通过图像处理提高距离像的信噪比,从而提高非扫描激光雷达的距离分辨率。非扫描激光雷达/电视复合成像系统结构系统的结构如图 1 所示。

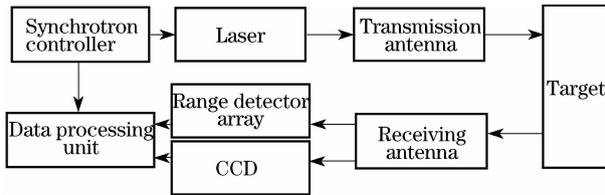


图 1 非扫描激光雷达/电视复合成像系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the scannerless lidar/TV image system

非扫描激光雷达/电视复合成像系统由同步控制系统单元、激光器、发射天线、接收天线、距离阵列探测器、CCD 相机和数据处理单元组成。同步控制单元控制系统的工作时序关系。激光器对目标进行照明,距离阵列探测器(由于目前非扫描激光雷达探测器种类较多,因此在这里统称为距离阵列探测器)进行距离成像、CCD 相机进行强度成像,数据处理单元对距离像和强度像进行图像处理。由于 CCD 获得的电视图像与距离探测器的距离图像需要进行图像处理,为了避免图像配准过程,减少图像处理的运算量,因此距离阵列探测器与 CCD 相机通过半反透镜进行分光,将接收天线接收的回波信号分为相同的两部分送入 CCD 相机和距离探测器。

## 3 图像处理提高距离像信噪比的原理

目前的非扫描激光雷达距离探测器噪声主要包括热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声以及  $1/f$  噪声等噪声。其中热噪声、 $1/f$  噪声与信号强度无关,而散粒噪声、产生-复合噪声强度与信号成正比。

在实际应用中可以近似认为,任何时间对探测

器的噪声统计规律进行测量得到的结果是一致的,与时间无关。也就是在其噪声的概率密度函数满足时间平移不变性,因此距离探测器的噪声可以看作平稳随机过程。

阵列距离探测器每个像素具有各自的敏感元和信号处理器,因此,彼此之间可以认为是统计无关的。

根据随机理论,平稳随机信号如果满足时间  $t \rightarrow \infty$  时自相关函数  $K(t) \rightarrow 0$ ,则该平稳随机过程具有各态历经性<sup>[10]</sup>。具有各态历经性的系统可以采用系综平均代替时间平均,如果距离成像的噪声具有各态历经性过程,则可以采用空间上具有相同输入条件的像素代替同一像素不同时刻的结果进行累加,实现积累提高信噪比的目的。

距离探测器的散粒噪声功率谱为

$$S_1(\omega) = 2eI, \quad (1)$$

其中  $S_1(\omega)$  为散粒噪声的功率谱,  $e$  为电子电荷,  $I$  为输入信号的平均电流强度。

因为散粒噪声可以看作平稳随机过程,根据维纳-辛钦公式可知平稳随机过程的谱密度函数与其自相关函数互为傅里叶变换,因此其自相关函数  $K(t)$  为

$$K_1(t) = \frac{1}{2eI} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin at}{t}, \quad (2)$$

其中  $a$  为探测器的带宽,当  $t \rightarrow \infty$  时自相关函数  $K_1(t) \rightarrow 0$ ,因此散粒噪声可以被认为具有各态历经性的。

距离探测器的产生-复合噪声功率谱为

$$S_2(\omega) = \frac{4eI\tau_0/\tau_d}{1 + \omega^2\tau_0^2}, \quad (3)$$

其中  $S_2(\omega)$  为产生-复合噪声的功率谱,  $I$  为平均电流,  $\tau_0$  为载流子寿命,  $\tau_d$  为载流子通过探测器的时间。

由维纳-辛钦公式可知产生-复合噪声的谱密度函数为

$$K_2(t) = \frac{2\sqrt{2\pi eI}}{\tau_d} e^{-\frac{t}{\tau_0}}. \quad (4)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时  $K_2(t) \rightarrow 0$ ,因此产生-复合噪声可以被认为具有各态历经性的。同理,热噪声和  $1/f$  噪声也具有各态历经性。

热噪声和  $1/f$  噪声强度与输入信号大小无关。根据噪声各态历经性,对于距离探测器所有的像素都可累加。而散粒噪声、产生-复合噪声与输入信号幅度有关,只有像素输入信号幅值相同,才具有相同噪声规律,才可根各态历经性进行累加提高信噪比。

如果探测器  $n$  个像元输入信号强度相同,则这  $n$  个像元的输出信号,即可等效成一个像元的  $n$  次探测的结果。从而可以将这  $n$  个像元的信号进行累积,积累前与积累后信噪比关系为

$$S'_{po} = nS'_{pt}, \quad (5)$$

其中  $S'_{po}$  为积累后的信噪比,  $S'_{pt}$  为积累前的信噪比,  $n$  为积累的像元数。

根据上述原理可知减小噪声、提高探测器成像信噪比主要是找到输入信号相同的像元并对其进行积累,其中如何判别像元输入信号是否相同成为了该方法的关键。

某些非扫描激光雷达不能获得目标的强取像,即便是可以获得目标的强度像由于距离探测器的信噪比很低的问题,导致强度像作为判断依据会带来很大的偏差。非扫描激光雷达/电视复合成像系统中的电视相机 CCD 输出的强度像信噪比相对于距离探测器的信噪比要高两个量级以上,并且 CCD 信号大小代表着回波的强弱,因此可以作为判断像元能否进行积累的准确依据。

基于这一思想本文提出一种改进邻域平均算法,对高信噪比的电视图像进行边缘提取,获得回波信号相同、相近区域的边缘,利用提取到的边缘将图像按照强度划分成不同的区域,对每一区域内的像元采用邻域平均方法进行累加来提高成像信噪比,从而提高非扫描激光雷达的距离分辨率。

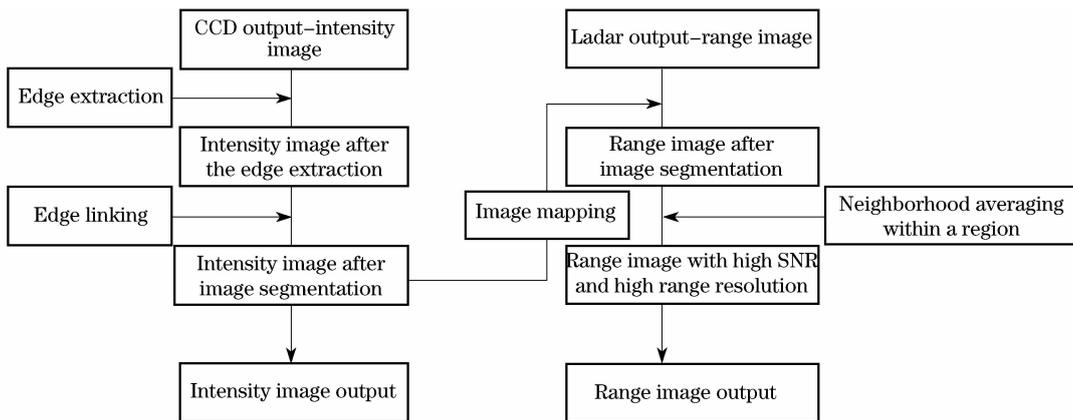


图 3 改进邻域平均算法流程

Fig. 3 Flow chart of the improved neighborhood averaging algorithm

## 5 图像处理

为了验证所提出的提高距离分辨率方法的有效性,以本课题组搭建的增益调制非扫描激光雷达/电视复合成像系统某次外场实验获得的图像为对象进行处理。图 4 为电视成像获得的强度像,该相机的

## 4 图像处理算法

$I(p, q)$  为 CCD 输出的  $n \times m$  像素的强度像,  $E$  ( $*$ ) 为边缘提取算符,则有

$$E[I(p, q)] = \sum_{i=1,2,3 \dots} e_i(p, q), \quad (6)$$

其中  $e_i(p, q)$  为提取到的边缘,  $i=1, 2, 3 \dots$ 。根据  $e_i(p, q)$  就可以将图像分割为若干区域  $s_i(p, q)$ , 在  $s_i(p, q)$  内可以对图像进行累积。积累采用如图 2 所示的  $3 \times 3$  模版进行,得到的值除以系数 5。由于积累的过程与图像处理的邻域平均算法相同<sup>[11]</sup>。但积累并不是在整个图像中进行,而是仅在分割的小区域中进行,因此本文称之为改进邻域平均算法。

0	1	0
1	1	1
0	1	0

图 2 积累算法采用的模版

Fig. 2 Template of the accumulation algorithm

算法的具体流程如图 3 所示。

由于某些噪声会导致  $e_i(p, q)$  中包含一些不闭合的线段,从而影响到后面的区域分割,因此在边缘提取后还要进行边缘闭合的工作,利用图像边缘间断处的方向相同和梯度值相近的特点,对图像边缘进行处理,获得闭合的图像边缘。

信噪比为 60 dB。图 5 为增益调制非扫描激光雷达获得的距离像,成像器件的信噪比为 13 dB,由于激光光斑大小的限制,因此距离像的成像区仅为视场中的圆形区域。

图 6 为对电视相机进行边缘提取后获得目标



图 4 电视相机获得的强度像

Fig. 4 Intensity image obtained from TV camera

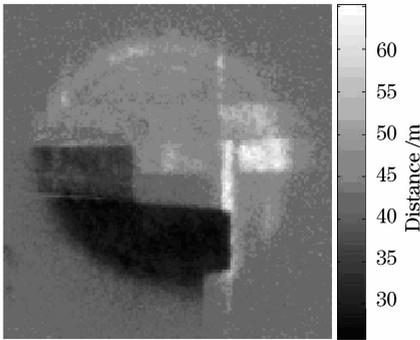


图 5 非扫描激光雷达的距离像

Fig. 5 Range image obtained from scannerless lidar

的边缘,需要利用边界方向和梯度的连续性对该图像进行边缘连接。边缘闭合后利用本文提出的改进邻域平均算法处理过的距离像如图 7 所示。由于通过实地测量可以得到目标各点的真实距离,因此该图像处理方法的评价属于全参考评价,本文选用全参考评价体系中的距离均方差作为评价标准<sup>[12]</sup>。未处理、中值滤波处理、均值滤波处理、本文方法处理后的距离图像的整体距离均方差和图像边缘距离均方差数据如表 1 所示。



图 6 电视相机强度像提取得到的边缘

Fig. 6 Edge of the intensity image of TV camera

从表 1 中可以看出,中值滤波、均值滤波和本文方法在图像整体的距离均方差基本一致。但是在图像边缘处,本文的处理结果比其他两种方法更小、更

为接近真实距离。这也是本文处理方法的优势。根据表 1 的结果,本文的处理方法使距离图像的整体距离均方差从 0.84 m 提高到了 0.35 m,边缘处距离均方差从 0.86 m 提高到了 0.41 m,图像各处的距离均方差降低了一半,也就意味着系统的距离分辨率提高 2 倍。由于在处理过程中利用了强度像准确的边缘信息作为依据对距离像进行处理,而不是不加区分的对图像整体进行处理,因此,图像宝贵的边缘信息在处理过程中得到了充分的保护,同时又有效的消除了噪声,提高了距离分辨率。

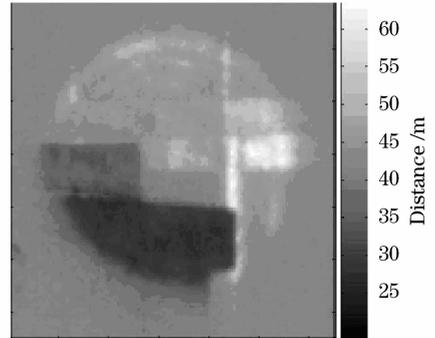


图 7 本文方法处理的图像

Fig. 7 Image result processed by the proposed method

表 1 不同方法处理前后的距离均方差

Table 1 Range root mean square error for different approaches

	Original image	Median filter	Mean filter	The proposed algorithm
Range RMS of the whole image /m	0.84	0.37	0.35	0.35
Range RMS of the edge of the image /m	0.86	0.52	0.62	0.41

### 6 结 论

对于非扫描激光雷达距离探测器的主要噪声特性的分析,得出噪声的影响是彼此独立无关、具有各态历经性的平稳随机过程,进一步证明了对于非扫描激光雷达的距离像可以采用空域积累的方法提高成像信噪比。提出了一种基于边缘提取的改进邻域平均图像处理方法,并对非扫描激光雷达/电视复合成像系统的图像进行了实际处理,处理结果表明,该方法能够将非扫描激光雷达距离像的距离分辨率提高 2 倍以上,同时又能够保护和增强距离像的图像边缘,对于提高非扫描激光雷达距离分辨率和成像质量具有重要意义。

### 参 考 文 献

1 J. Christophoer Dries, A 32 × 32 pixel flash laser radar system

- incorporating InGaAs PIN and APD detectors[C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 250~256
- 2 Sackos, J. T. A low-cost, high-resolution, video-rate imaging optical radar[C]. *SPIE*, 1998, **3380**: 327~342
- 3 Boehmke, Scott K. High accuracy 3D laser radar[C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 257~263
- 4 Wei Jingsong, Cheng Yuanli, Xu Qiang. Imaging by single-slit streak tube laser lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):496~500
- 魏靖松,程元丽,徐 强. 单狭缝条纹管激光雷达的成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):496~500
- 5 Jianfeng Sun, Qi Li, Wei Lu. Correlation recognition for range image of laser radar[C]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2):118~120
- 6 Jianfeng Sun, Qi Li, Wei Lu. Image recognition of laser radar using linear SVM correlation filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9):549~551
- 7 L. I. Rudin, S. Osher, E. Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithm [J]. *Physica D*, 1992, **60**(2): 259~268
- 8 Wang Hongliang, Cao Suming, Liu Guoping. Application of image smoothing method based on modified grade inverse weight [J]. *Infrared Technology*, 2003, **25**(4):17~19  
王洪亮,曹苏明,刘国平. 改进的梯度倒数加权算法在图像平滑中的应用[J]. *红外技术*, 2003, **25**(4):17~19
- 9 S. W. Perry, L. Guan. Weight assignment for adaptive image restoration by neural network [J]. *IEEE Trans. Neural Networks*, 2000, **11**(1): 156~170
- 10 Liang Jinwen, Chen Lincai. *Theory of Errors and Data Processing* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2001:142~145  
梁晋文,陈林才. *误差理论与数据处理(修订版)*[M]. 北京:中国计量出版社. 2001:142~145
- 11 Weszka J S, Ronsenfeld A. Histogram modification for threshold selection[J]. *IEEE-SMC*, **8**:622~629
- 12 John O. Limb. Distortion criteria of the human viewer [J]. *IEEE Transactions on Systems Man. and Cybernetics*, 1979, **SMC29**(12):778~793

## 《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊(EI核心收录)上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

### 征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧蚀与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

### 特邀组稿专家:

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期: 2009年9月30日

### 投稿方式以及格式:

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱: zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿),或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjc.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话:021-69918427。