

# 距离选通主被动像融合的实验研究

陆 威 王 岩 李思宁 郑 磊 王泽皓

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 距离选通激光成像雷达能够同时获得目标的主动像和被动像,通过主被动像的数据融合可以获得更为丰富的目标信息,提高目标识别及抗干扰的能力。提出了适合距离选通激光雷达的图像融合方案和改进的基于小波的融合算法,将激光强度像与被动像融合成为复合强度像,在保留被动像丰富信息的基础上,滤除被动像中目标以外的背景,再将复合强度像与主动距离像融合,合成出三维距离像。实验结果表明,该方案能够在保留距离信息的同时,有效地提高距离像的清晰度,丰富图像信息。

**关键词** 成像系统;距离选通;激光主动成像;信息融合;小波变换

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s209001

## Experimental Research of Range-Gated Active-Passive Image Fusion

Lu Wei Wang Yan Li Sining Zheng Lei Wang Zehao

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optoelectronic, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Range-gated imaging laser radars provide laser active image and passive image simultaneously. Data fusion of laser radar image and passive optical image is an implementation of complementary information, which can improve capability of target recognition and anti-interference. Laser radar image is fused with passive optical image at pixel-level. The fusion strategy for the range-gated imaging radar and three-dimensional reconstruction are given. Data fusion of laser active intensity image and passive image retains rich information of passive optical image, and removes the background outside of the target. The data synthesis of the fusion image and range image provides a three-dimensional image. The experimental results show that the resolution of image fusion has been improved effectively while the range information of active image is retained with the methods above.

**Key words** imaging system; range-gated; laser imaging; data fusion; wavelet transform

**OCIS codes** 040.5160; 010.4450; 140.3410

## 1 引 言

距离选通激光成像<sup>[1,2]</sup>是通过精确控制探测器的接收时间来获得目标的激光距离像和强度像,使用同一个探测器还可以获取目标的被动光学图像,即可以同时获得目标的 3 种图像,这 3 种图像反映的是目标不同方面的信息,且存在信息的关联和互补,将其融合能够获得更丰富的目标信息,对目标的自动识别很有价值。

1990 年 Hannon 等<sup>[3]</sup>依据 Neyman-Pearson 准则进行了目标激光雷达距离像和强度像融合研究,指出对目标识别而言多维信息融合比仅用一维信息

效果要好。2000 年,美国的研究人员研究结果表明,激光雷达强度像和距离像融合的图像中,不仅具有物体的强度信息,而且还具有物体表面的结构信息,图像融合使信息更加丰富<sup>[4]</sup>。国内对于激光雷达所成图像融合的研究主要还处于理论研究和仿真的初步阶段,针对激光成像系统主被动像融合方面的实验研究未见报道。

距离选通激光成像雷达所成的主动像和被动像分别具有各自的特点,主动像中的强度像反映目标对激光的反射率信息,距离像反映目标距离信息,由于激光功率有限,通常激光成像中目标的边缘信息

收稿日期: 2012-05-29; 收到修改稿日期: 2012-07-01

作者简介: 陆 威(1967—),男,博士,副教授,主要从事激光雷达技术、雷达信号处理和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: hit\_luwei@yahoo.com.cn

较差,同时由于激光的相干性还会存在散斑噪声;对于被动像,由于太阳发光的功率很高,另外,成像时间相对较长,因此目标成像边缘较清晰,目标强度信息较完整,但是没有距离信息,因而,在复杂背景下,目标淹没在背景中很难分割。本文利用激光主动像与被动像的信息互补,对激光强度像和被动像进行阈值滤波,将激光强度像与被动像进行融合,改善激光强度图像的边缘和细节像质,最后把改善的激光强度图像与距离像融合,获得目标信息更加丰富的距离像。

## 2 距离选通激光主被动像融合方案及融合效果评价

### 2.1 激光主被动像融合方案

距离选通激光主动成像通过精确地控制距离

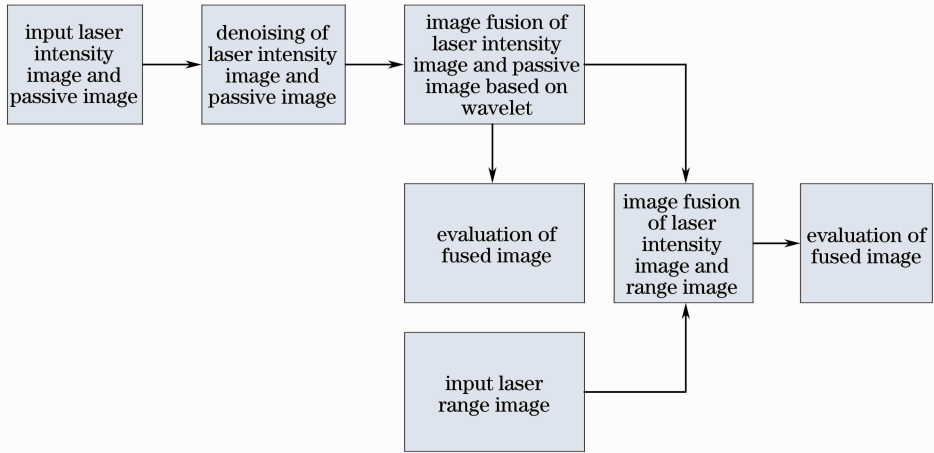


图 1 激光主被动像融合方案

Fig. 1 Fusion strategy of lidar active and passive images

具体的步骤为:1) 将主动像的强度像和被动像进行预处理,降低主动像和被动像中噪声对融合的干扰,通常预处理包括配准、去噪和被动图像的目标分割,由于主被动像已经精确配准,所以只对主动像的强度像和被动像进行去噪,采用的方式为阈值滤波;2) 对主动像与被动像的灰度图像进行融合,采用的融合方式为改进的基于小波的融合方式,得到融合图像;3) 将融合图像与主动距离像融合,改善

距离像的边缘和细节,补充距离像的缺损,加入距离信息,得到融合后的目标三维图像<sup>[5]</sup>。

图像融合的目的是保留主动像的距离信息的同时,利用被动像曝光时间长目标信息完整的优势,对主动像补偿,而不引入被动像中的目标以外的背景。采用的融合方案如图 1 所示。

距离像的边缘和细节,补充距离像的缺损,加入距离信息,得到融合后的目标三维图像<sup>[5]</sup>。

### 2.2 小波变化融合算法

采用基于塔形分解的小波变换(如图 2 所示)的方法对激光主动像和被动像进行融合。该方法是一种非冗余的多方向的分解,它在提取图像低频信息的同时,还可获得水平、垂直以及对角 3 个方向的高频细节信息,能够对低频和高频分别处理,而且小波

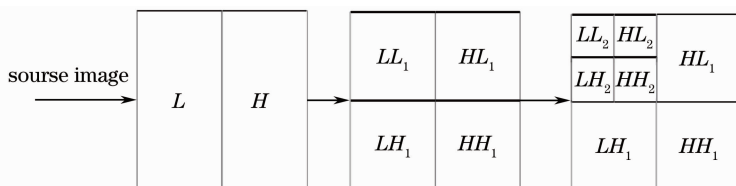


图 2 基于多尺度分解的小波变换

Fig. 2 Decompose of wavelet transform

变换在不同尺度上有更高独立性,可以在压缩噪声同时更有效提取纹理、边缘等细节信息。

基于塔形分解的小波变换的多源图像融合,大致分为 3 个步骤:

1) 对输入图像  $A$  和  $B$  分别进行小波分解,采用 Mallat<sup>[6]</sup> 提出的正交小波变换快速算法:

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_jH^* \\ D_{j+1}^h = GC_jH^* \\ D_{j+1}^v = HC_jG^* \\ D_{j+1}^d = GC_jG^* \end{cases}, \quad j = 0, 1, \dots, J-1 \quad (1)$$

式中  $C_j$  为图像在  $2^j$  分辨率上的尺度系数,代表图像的近似部分; $D^h, D^v, D^d$  为图像在  $2^j$  分辨率上的尺度系数,分别表示水平、垂直和对角方向的分量; $H$  为低通滤波算子, $G$  为高通滤波算子; $H^*$  和  $G^*$  分别为  $H$  和  $G$  的共轭转置矩阵; $J$  为小波分解层数。对两幅图像分别进行小波分解得到两组分解系数

$$\{C_A^{(j)}\} = f_{\text{MRA}}(A); \quad \{C_B^{(j)}\} = f_{\text{MRA}}(B). \quad (2)$$

2) 对两组分解系数按融合规则  $\theta$  进行合并,选取的融合规则为低频部分加权平均,高频部分取极大值,得到融合后的小波系数为

$$\{C_F^{(j)}\} = \theta(\{C_A^{(j)}\}, \{C_B^{(j)}\}), \quad (3)$$

3) 对融合后的分解系数进行相应形式的多尺度重构,图像重构实际是对融合后的小波系数进行相应的小波逆变换,重构算法为

$$C_{j-1} = H^* C_j H + G^* D_j^h H + H^* D_j^v G + G^* D_j^d G, \quad (4)$$

经过重构后得到融合图像  $F$

$$F = f_{\text{MRA}}^{-1}(\{C_F^{(j)}\}), \quad (5)$$

多源图像融合流程如图 3 所示。

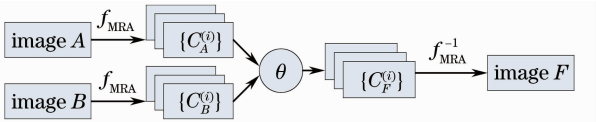


图 3 基于小波的图像融合流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-scale image fusion based on wavelet transformation

## 2.3 融合规则及评价标准

### 2.3.1 改进的基于小波变换的融合规则

根据激光主被动像的特点和融合目的,提出了适合主被动像融合要求的融合方法:对于低频部分,采用改进的加权融合算法,将低频系数加权相加,对主动像进行信息的补偿,减去系数差异。系数的差异主要表现为背景部分的差异,相减时能够将背景去掉。

图像低频系数均值为

$$V_k = \sum_{(m,n) \in (M,N)} \frac{c_k(m,n)}{MN}, \quad (6)$$

式中  $k=A, B$ , 定义两幅图像的均值比为

$$R_{\text{at}} = \frac{V_A}{V_B}. \quad (7)$$

将均值比作为权值进行两幅图像加权平均,然后减去两幅图像的差异,得到融合后的低频系数为

$$c_F(m,n) = \lambda [c_A(m,n) + R_{\text{at}} c_B(m,n) - |c_A(m,n) - R_{\text{at}} c_B(m,n)|], \quad (8)$$

式中  $\lambda$  为归一化系数

$$\lambda(1 + R_{\text{at}} - |1 - R_{\text{at}}|) = 1. \quad (9)$$

高频部分选取绝对值极大的融合算法,能够保留两幅图像中快变的部分,即边缘和细节。

### 2.3.2 对比融合效果使用的融合规则

常用的融合规则有均值法、系数绝对值取大法、加权平均法等,本文中使用的均值法和系数绝对值法与改进的融合算法比较。均值法将两幅图像都考虑进了融合算法,图像利用充分;系数绝对值取大法基于系数绝对值越大,表明该处亮度变换越剧烈,带有更多信息的原理。

均值法<sup>[7]</sup>是将源图像的对应分解系数取平均,得到融合后系数

$$c_F(m,n) = [c_A(m,n) + c_B(m,n)]/2, \quad (10)$$

式中  $c_A(m,n), c_B(m,n), c_F(m,n)$  分别表示源图像  $A, B$  和融合图像  $F$  在点  $(m,n)$  的小波系数。

系数绝对值取大融合算法描述为

$$c_F(m,n) = \begin{cases} c_A(m,n), & \text{if } |c_A(m,n)| > |c_B(m,n)| \\ c_B(m,n), & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (11)$$

### 2.3.3 融合评价标准

客观评价法利用数字模型来定量的评价融合图像质量,也就是将图像的物理特性用数学方法来度量,具有计算速度快、易于量化比较研究、结果客观等特点。常用的评价标准有信息熵、平均梯度、图像均值、标准差等。本文采用的评价标准为表征图像信息丰富程度<sup>[8]</sup>的信息熵,表征图像清晰程度和图像细节及纹理的变化特征的平均梯度。图像的信息熵<sup>[9]</sup>为

$$E = - \sum_{i=0}^G p(i) \text{lb}\{p(i)\}, \quad (12)$$

式中  $G$  为图像直方图中的灰度阶数,  $p(i)$  为图像的灰度直方图,即归一化后灰度值  $i$  出现的频率。平均梯度的定义为

$$\bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{\left[\frac{\partial f(m,n)}{\partial m}\right]^2 + \left[\frac{\partial f(m,n)}{\partial n}\right]^2}{2}}, \quad (13)$$

式中  $\frac{\partial f(m,n)}{\partial m}$  和  $\frac{\partial f(m,n)}{\partial n}$  分别为图像  $f(m,n)$  在  $m,n$  方向的差分。

### 3 成像实验及结果分析

利用实验室已有的距离选通激光成像设备,进行了室外静态距离选通激光实验,给出了距成像装置 700 m 和 440 m 的两处楼房得到的主被动像融合结果。



图 4 (a) 700 m 和(b) 440 m 远的成像目标

Fig. 4 Imaging target from (a) 700 m and (b) 440 m away

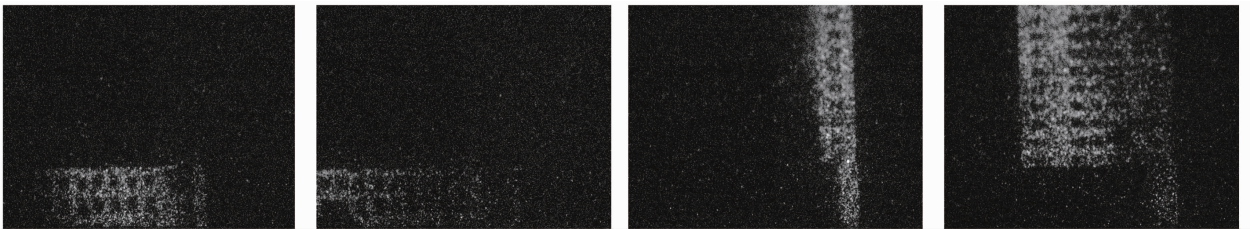


图 5 700 m 处目标激光序列图像

Fig. 5 Slice images of target 700 m away

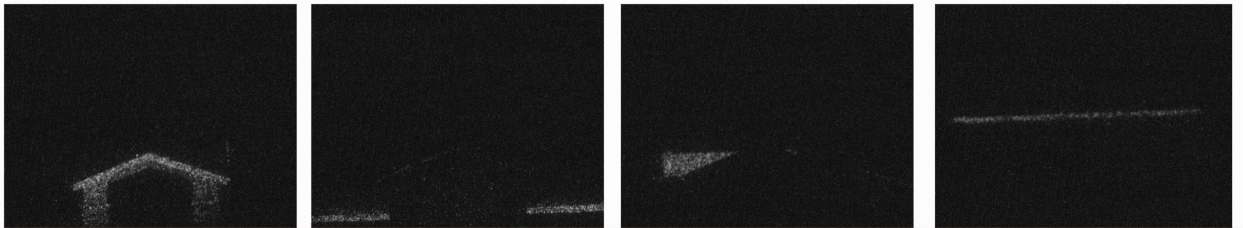


图 6 440 m 处目标激光序列图像

Fig. 6 Slice images of target 440 m away

将不同距离的图像进行叠合并阈值滤波,阈值为图像均值,得到激光强度像,即主动像;不发射激光,将微通道板(MCP)开门时间设置很大(曝光时间  $25 \mu\text{s}$ ),便得到了监视帧,即被动像。图 7 和图 8 分别给出了两处目标直接叠加后的激光主动像和光学被动像。从图中可以看出主动像没有目标以外的

### 3.1 激光强度像与被动像融合

图 4(a)为 700 m 处目标,成像视角与目标正对,前面为 1 栋矮楼,后面为 1 栋较高的楼房,宽度较前楼窄,外部结构特征是两侧部分凸出,中间部分凹进,前后两栋楼都具有多窗的结构特征。图 4(b)为距离成像装置 440 m 处的楼房,视角为一定角度的俯视,该目标景深较大,目标前部分有三角形屋顶,屋檐部有突出,纵向结构特征比较丰富但细节和纹理较少,两目标周围背景较复杂。

图 5 为 700 m 处目标的部分激光序列图像,景深 30 m,距离分辨力为 1.5 m;图 6 为 440 m 处目标的部分激光序列图像,景深 80 m,距离分辨力为 1 m。

背景,但目标信息不完整,被动像由于曝光时间长,目标的特征明显,边缘和细节能够很好地呈现,在复杂背景下,目标和背景融为一体,背景建筑等的反射光成为噪声。两种图像具有各自的优势,通过融合充分利用自身的优势有利于目标的识别。

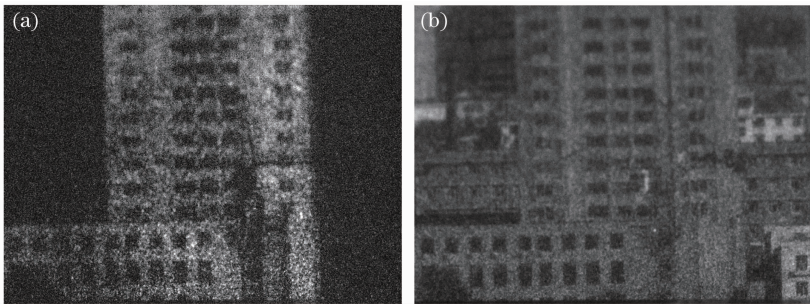


图 7 700 m 处目标的(a)激光强度像和(b)光学被动像

Fig. 7 (a) Laser intensity image and (b) passive optical image of target 700 m away

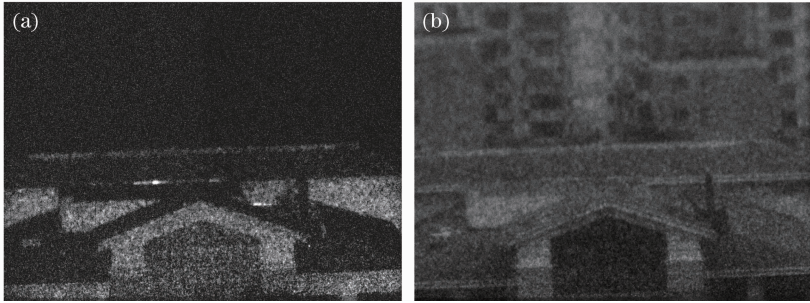


图 8 440 m 处目标的(a)激光强度像和(b)光学被动像

Fig. 8 (a) Laser intensity image and (b) passive optical image of target 440 m away

对激光强度像和被动像进行小波分解,采用 Bior 小波基。图 9 和图 10 分别为两处目标的 2 层小波分解后图像,左上角为图像的低频成分,其余为高频成分。可以看出,多分辨率分解后低频部分与

原图像近似,保持了图像的整体信息,高频部分可以看出图像不同方向的边缘、纹理等细节信息,分为水平、垂直和对角 3 个方向。

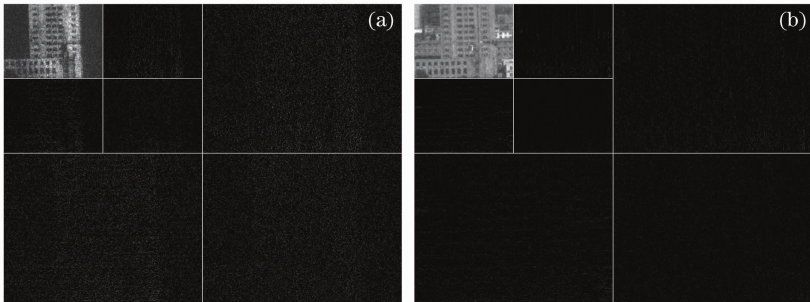


图 9 700 m 处目标小波分解。(a)主动像分解;(b)被动像分解

Fig. 9 Wavelet transform of target 700 m away. (a) Active image; (b) passive image

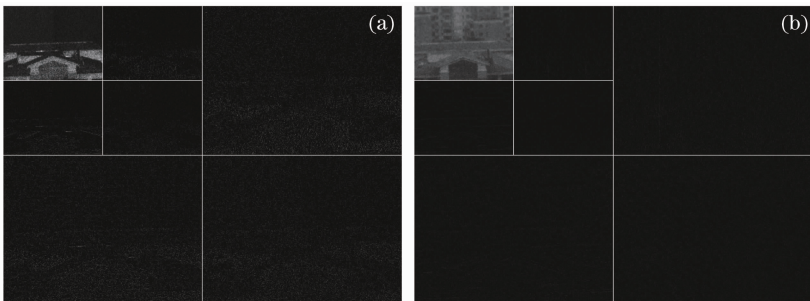


图 10 440 m 处目标小波分解。(a)主动像分解;(b)被动像分解

Fig. 10 Wavelet transform of target 440 m away. (a) Active image; (b) passive image

被动像的高频信息较少,而主动像的较多。这是由于被动像曝光时间长,噪声累加后变得比较强且均匀分布在图像中,对图像有一定的平滑作用,而主动像曝光时间短,噪声较少,信噪比较高,目标相对于其他区域明暗变化比较强烈,高频成分丰富。

图 11 为两处目标融合结果,700 m 处目标的融合结果与主动强度像相比,楼体信息更加丰富,目标的结构特征更加明显,表现为窗口形状更加规则、完

整,较暗的竖线代表了目标表面的变化,这与目标自身中间部分下凹的特征吻合;与被动像相比,去掉了目标以外的背景。440 m 处目标融合结果与主动强度像相比,三角形房屋及两侧屋檐的层次更加明显,可以看出屋檐与墙面相比有突出,在激光主动像中这一特点没有显现;与被动像相比,去掉了目标以外的背景,更利于目标的识别和提取,可见融合图像将两幅源图像的优势进行了整合,实现了融合目的。

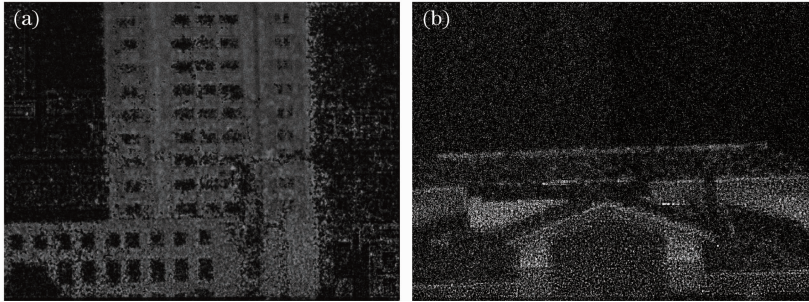


图 11 主被动像融合结果。(a) 700 m 目标;(b) 440 m 目标

Fig. 11 Image fusion of laser intensity image and passive image of target from (a) 700 m and (b) 440 m away

客观评价参数也能够比较准确地评价融合前后图像的变化情况,表 1 和表 2 给出了两幅源图像与融合图像评价指标的比较情况。从表中可以看出,700 m 和 440 m 两处目标图像的融合结果一致,融合后的图像信息熵比激光强度像高,表示得到了信息更丰富的图像,信息熵小于被动像则是由于被动像中的背景被去掉,使得熵值降低,与主观观察一致;平均梯度表征图像的清晰程度,是由像素点间灰度的变化决定的,融合后平均梯度比被动像高,这是由于被动像虽细节较多,但图像平滑,灰度变化不剧烈,而主动像目标区域与非目标区域跳变比较大,而且孤立噪声点较多,所以平均梯度较高。

与其他融合方法进行比较,在低频选用均值法、系数绝对值最大法进行比较;在高频部分的融合方式均选取绝对值取大法比较,融合结果如图 12 和

图 13 所示。

表 1 700 m 处目标图像融合前后评价指标比较

Table 1 Comparison of fusion image and unfusion image of target 700 m away

	Laser intensity image	Passive optical image	Fused image
Entropy	4.1423	6.4066	6.0866
Average grads	0.0582	0.0327	0.0493

表 2 440 m 处目标图像融合前后评价指标比较

Table 2 Comparison of fusion image and unfusion image of target 440 m away

	Laser intensity image	Passive optical image	Fused image
Entropy	3.8358	5.9704	5.3441
Average grads	0.0584	0.0384	0.0619

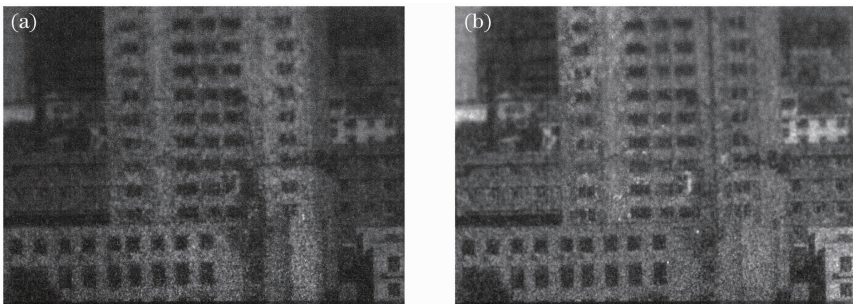


图 12 700 m 目标常用融合算法的融合结果。(a)均值法;(b)系数绝对值取大法

Fig. 12 Fusion results of target 700 m away with fusion algorithm commonly used.

(a) Average; (b) coefficient absolute value

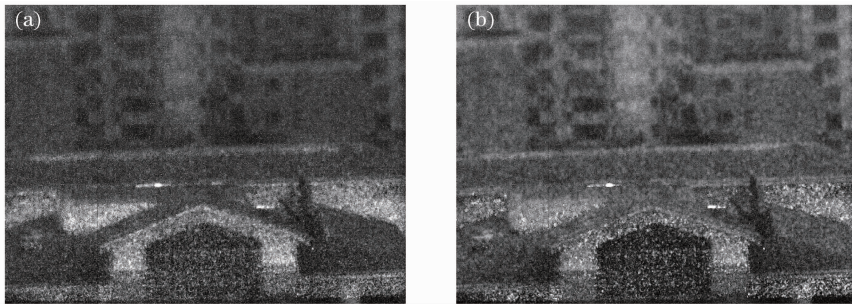


图 13 440 m 目标常用融合算法的融合结果。(a)均值法；(b)系数绝对值取大法  
 Fig. 13 Fusion results of target 440 m away with fusion algorithm commonly used. (a) Average;  
 (b) coefficient absolute value

均值法和系数绝对值取大法均不能将背景有效去除,不能满足主被动像的融合要求,验证了提出的融合算法的优越性。

### 3.2 复合强度像与距离像的融合

距离选通激光成像雷达得到的激光主动像不仅带有强度信息,同时还携带距离信息。将距离信息融入融合后的强度图像中,完成整个融合过程。采用的方法是先对激光序列进行图像分割,将该切片的目标区域分割出来,然后再用分割出来的目标与融合后的强度像匹配,这样将强度像按距离区分出来,即加入了距离信息,最后将融合后的序列图像整合,得到目标的三维图像。分别选取两处目标的激

光序列像中的一帧为例说明融合过程。

将目标距离信息融入的过程如图 14 和图 15 所示。图 14(a)和图 15(a)为激光序列图像中的 1 个切片像,图 14(b)和图 15(b)为经过边缘检测、膨胀、边缘跟踪后得到的图像轮廓,将得到的分割图像与强度融合图像进行匹配,融合图像与分割图像都存在点保留,否则去除,得到的融合后序列图像如图 14(c)和图 15(c)所示。比较图 14(a)和图 14(c)以及图 15(a)和图 15(c)可见,激光序列图像的信息有缺失,而融合后得到的序列图像清晰,能够看出目标的纹理和细节。

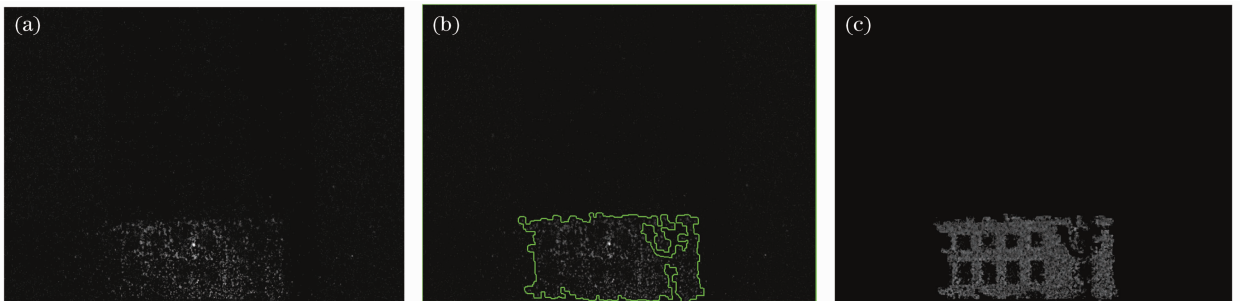


图 14 700 m 目标距离像与复合强度像融合过程。(a)激光切片图像；(b)目标分割；(c)融合后序列图像  
 Fig. 14 Fusion process of fusion image and range image of target 700 m away. (a) Slice laser image;  
 (b) object segmentation; (c) slice fusion image

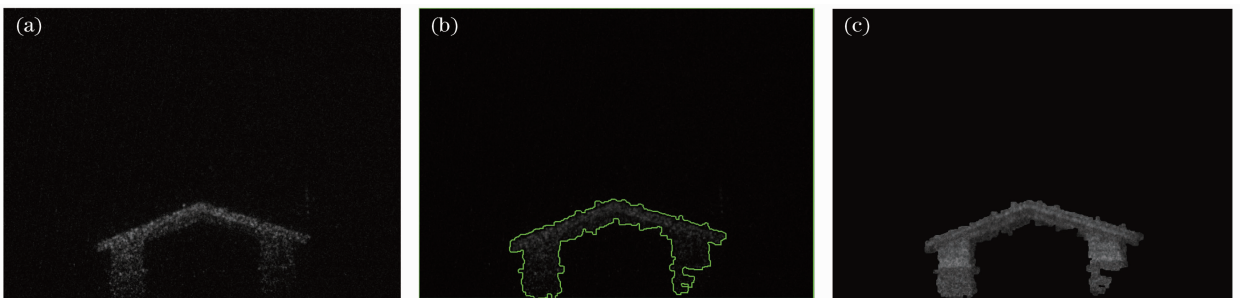


图 15 440 m 目标距离像与复合强度像融合过程。(a)激光切片图像；(b)目标分割；(c)融合后序列图像  
 Fig. 15 Fusion process of fusion image and range image of target 440 m away. (a) Slice laser image;  
 (b) object segmentation; (c) slice fusion image

将得到的融合后序列图像叠加在一起就得到了融合后的三维图像,图 16 和图 17 分别为两目标融合前后三维伪彩色距离图像。通过比较可以看出,对于 700 m 处目标,未经过融合的目标三维图像信息有缺失,图像的窗口形状不规则,失真较大,经过融合的三维图像不仅融入了图像的距离信息,而且层次更加清晰,图像中噪声很低,楼体表面圆滑,边

缘锐利,具有表征目标特征的纹理。比如窗户的形状,楼体表面凸凹处竖线等,达到了图像融合的目的;对于 440 m 处目标,由于成像距离较近,图像边缘损失少,只在纹理细节处有损失,在合成距离像时,同一切片被赋以表征距离的同一值,所以将微小的灰度变化忽略,使得在距离像中,融合效果不很显著。

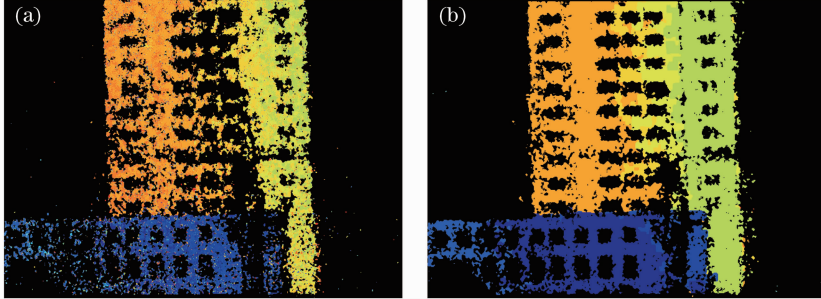


图 16 700 m 处融合前后三维距离图像。(a)融合前距离像;(b)融合后距离像

Fig. 16 Three-dimensional distance image of target 700 m away. (a) Range image; (b) fusion range image

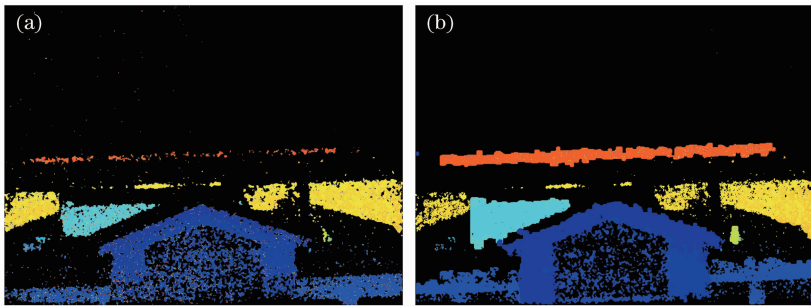


图 17 440 m 处融合前后三维距离图像。(a)融合前距离像;(b)融合后距离像

Fig. 17 Three-dimensional distance image of target 440 m away. (a) Range image; (b) fusion range image

## 4 结 论

将激光主动像与被动像进行融合,在保留主动像目标突出背景被抑制优势的同时,由于被动像的融入克服了主动像成像目标边缘信息不完整的缺点,获得清晰完整的目标图像。将融合后的强度图像与激光距离像融合,加入了目标的距离信息,使图像目标的信息完整,得到了比较好的融合结果,便于特征提取和自动目标识别。

### 参 考 文 献

- 1 Li Li, Qiu Su, Jin Weiqi *et al.*. Operating distance model of near-infrared range-gated imaging system based on minimum resolvable contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3481~3486  
李力, 裘溯, 金伟其等. 基于最小可分辨对比度的近红外距离选通成像系统作用距离模型[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3481~3486
- 2 Wu Long, Zhao Yuan, Jin Chenfei *et al.*. Effects of changing threshold on detection probability of scannerless range-gated lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3117~3123  
吴龙, 赵远, 靳辰飞等. 变阈值检测对无扫描距离选通激光

- 雷达探测概率的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3117~3123
- 3 S. M. Hannon, J. H. Shapiro. Active-passive detection of multipixel targets[C]. *SPIE*, 1990, **1222**: 2~23
- 4 B. J. Yen, J. H. Shapiro. Asymptotic target recognition performance for FLIR and lidar systems [C]. *SPIE*, 2001, **4379**: 1~14
- 5 Li Hailan, Wang Xia, Jin Weiqi *et al.*. 3-dimensional reconstruction based on underwater range gated images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3464~3470  
李海兰, 王霞, 金伟其等. 基于多帧水下距离选通图像的三维重构方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3464~3470
- 6 S. G. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing*[M]. San Diego, California: Academic Press, 1998
- 7 H. Li, B. S. Manjunath, S. K. Mitra. Multisensor image fusion using the wavelet transform[J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1995, **27**(3): 235~244
- 8 A. Renyi. On measures of entropy and information[J]. *Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1961, **1**: 547~561
- 9 Wu Chengmao. Image thresholding based on weighting Shannon entropy[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, **44**(18): 177~180  
吴成茂. 基于加权香农熵的图像阈值法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, **44**(18): 177~180

栏目编辑:李文洁