

# 基于灰度空间相关性的双谱 微光图像融合方法\*

张 闯 柏连发 张 毅

(南京理工大学光电学院, 南京 210094)

(2006 年 8 月 25 日收到, 2006 年 12 月 27 日收到修改稿)

图像的灰度空间相关性可以反映图像的清晰度, 而图像融合的主要目的之一就是改善图像的清晰度. 根据微光全波图像和微光短波图像的光谱特点, 在分析微光全波图像和微光短波图像的一维灰度直方图及二维灰度空间相关性图的基础上, 提出了一种新型的基于灰度空间相关性的图像融合方法. 该融合方法由基于标准偏差的灰度调制和灰度统计平衡两部分实现. 同灰度调制融合方法及谱域融合法比较, 此方法能够有效地改善图像的清晰度, 同时便于硬件实现. 文中详细阐述了该融合方法的理论公式, 并分析了其在不同场景时的实验结果.

关键词: 图像融合, 微光全波图像, 微光短波图像, 灰度空间相关性

PACC: 4230, 4230V, 4240F, 0650

## 1. 引 言

图像融合技术能够有效利用同一场景来自不同成像机理的多幅图像, 得到一幅综合所有图像特点的融合图像, 例如微光图像与紫外图像的融合<sup>[1]</sup>, 可见光图像与红外图像的融合<sup>[2]</sup>, 以及多传感器图像融合<sup>[3]</sup>等. 与单一成像系统的图像相比, 融合图像具有信息量大、目标细节丰富等特点. 在军事领域, 图像融合技术主要用于提高目标识别概率, 以达到确认军事目标的需求. 微光成像系统利用夜天光的自然辐射和物体的反射在像增强器的作用下得到图像, 微光图像的对比度和分辨率都较低, 但是在微光成像系统光电阴极的整个光谱响应范围内, 可以利用滤光技术来分割成像光谱, 得到具有不同特性的微光全波图像和微光短波图像. 采用灰度调制、谱域融合等方法对双谱微光图像进行融合, 能够提高系统的目标识别概率以及图像的清晰度, 但是上述方法都没有充分利用双谱微光图像之间的相关性. 分析微光全波图像和短波图像的特征, 特别是二维灰度空间相关性图的特点, 提出一种新的图像融合方法, 即根据其灰度空间相关性对双谱微光图像进行融合. 该方法可以充分利用双谱微光图像的像素

空间特性, 在提高夜视系统的目标识别概率和成像清晰度的同时, 得到增强微光图像的效果.

## 2. 双谱微光图像的特征分析

微光成像系统是对如图 1 所示的光谱进行成像的, 图 1 所示的光谱包括夜间自然辐射、目标和背景自身的辐射以及反射. 当以 650 nm 作为光谱分割点, 对图 1 所示的光谱进行分割时, 在 650 nm 左侧, 混凝土的反射率明显高于植被、绿草、泥土以及绿漆的反射率, 该光谱范围在微光系统中成像后得到微光短波图像, 将能够有效的突出常常作为军事目标的混凝土建筑物. 在 650 nm 的右侧为微光长波图像, 由于在 650 nm 右侧的光谱内, 夜天光的辐射能量大大高于左侧的能量, 而且夜天光的辐射在此段光谱范围内也有剧烈的变化, 因而不能简单的根据各种物体的反射率得到其经过微光系统成像后的图像特点. 此时, 需要参考微光成像系统的成像特性, 图 1 所示的反射辐射能经过微光成像系统后, 得到的成像信号近似表示为

$$B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \alpha(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

其中,  $B$  表示成像信号大小;  $I(\lambda)$  表示夜晚天空的

\* 国家自然科学基金(批准号: 60572107)资助的课题.

辐射特性； $\rho(\lambda)$ 表示目标的光谱反射系数； $\tau(\lambda)$ 表示光学系统透过率； $\eta(\lambda)$ 表示成像器件的量子效率； $\lambda_1, \lambda_2$ 分别为光电阴极敏感范围上、下限波长。

图2为将B用光电流表示时的成像光谱范围内的信号图。观察图2中波长650nm的左右两侧，左侧能够将“粗糙混凝土物”明显区别于“绿色草木”和“暗绿色漆”，而650nm右侧能将“暗绿色漆”明显区别于“绿色草木”和“粗糙混凝土物”。而此时在整个光谱范围内也能够将“暗绿色漆”明显区别于“绿色草木”和“粗糙混凝土物”。通过上述对夜视系统中的典型目标的分析，在实验时，为了减少系统配准的复杂性，方便实验进行，用微光全波图像代替微光长波图像来和微光短波图像进行融合，可以得到同微光长波图像和微光短波图像融合相近的突出目标的效果。

在夜天光下得到的图像，微光短波图像(图4)是在微光成像系统的光学系统里加入滤光片后得到的图像，也就是说微光全波图像包含了所有微光短波图像的内容。如上所述，由于在整个微光成像光谱的不同范围内，相同的物体具有不同的成像特性，所以短波图像具备一些区别于全波图像的特点。

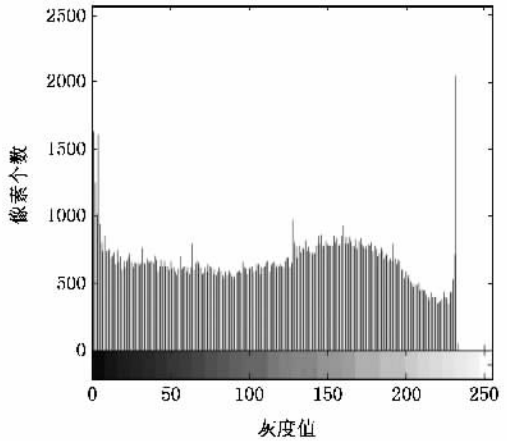


图3 微光全波图像

在微光全波图像中不能根据灰度分辨草木、树木、石头以及目标人，在微光短波图像中，却能够根据灰度明确的区分出石头和土地；虽然微光短波图像的亮度比较低，但是灰度层次相对于微光全波图像还是比较丰富的。观察微光全波图像的灰度直方图和微光短波图像的直方图，它们具有相同的灰度级数，同时，全波图像分部于低灰度值的像素数明显低于短波图像，并且在整个灰度范围内，全波图像的灰度分布是比较均匀的，灰度层次不分明，而短波图像的灰度分布虽然主要集中于低灰度值的部分，高灰度值部分的像素不多，却正好在图像中提供了明

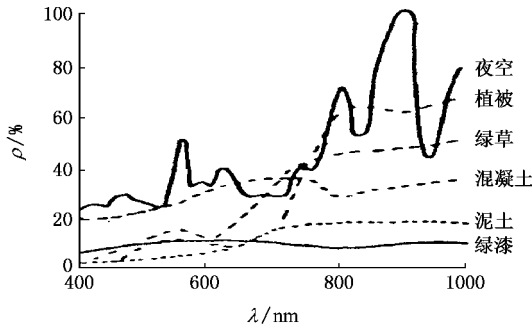


图1 夜天光分布及几种典型材料的光谱反射特性

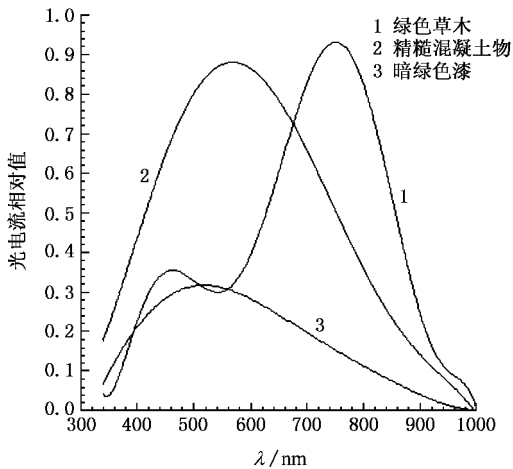


图2 光电流相对值

2.1. 微光图像的灰度直方图分析

微光全波图像(图3)是直接利用微光成像系统

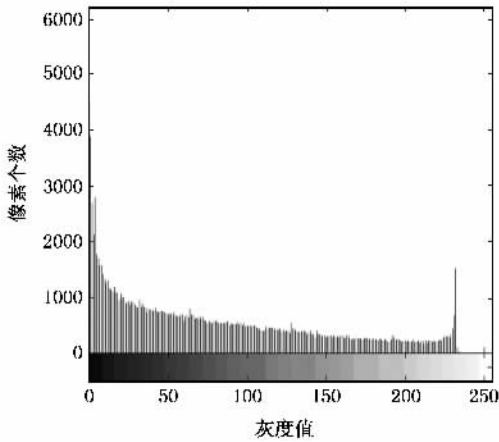


图 4 微光短波图像

显的景物灰度分界<sup>[4]</sup>. 根据两幅图像在灰度分布上的不同, 可以利用相应的融合方法对双谱微光图像进行融合, 得到增加灰度层次的融合图像.

### 2.2. 微光图像的灰度空间相关性分析

对间距确定的一对相邻像素 $(m, n)$ 与 $(m, n + l)$ 构成的像素偶, 在整幅图像上统计它们在灰度数组 $[G_1, G_2]$ 上的出现频度, 构成由灰度共生矩阵表征的灰度空间相关性图<sup>[5]</sup>. 该图可以清楚地定量表征图像中相邻像素间灰度级的相关程度. 而相邻像素灰度空间相关度, 恰好是图像清晰度的一种统计表征. 清晰度高, 相关性弱; 清晰度高, 相关性弱; 清晰度高, 相关性弱.

由灰度共生矩阵表征的灰度空间相关性图表达式为

$$H_{2D} = f(G_1, G_2). \quad (2)$$

一般说来, 由灰度共生矩阵表征的图像灰度空间相关性图的形象外貌大致是沿着 $(G_1, G_2)$ 平面的

45°斜线分布. 灰度层次分明的图像, 散布范围宽; 灰度层次连续的图像散布范围窄.

图 5 和图 6 分别描述了微光全波图像和微光短波图像的灰度空间相关性. 从灰度的分布范围来看, 微光全波图像的灰度分布比较集中, 散布的范围比较窄, 而微光短波图像的灰度分布比较分散, 散布的范围宽. 图 5 和图 6 正好反映出微光全波图像的灰度空间相关性比较强, 而微光短波图像的灰度空间相关性则比较弱. 结合图 3、4 中的灰度直方图, 微光全波图像和微光短波图像虽然包含了相同数目的灰度级, 但是由于灰度分布及灰度空间相关性的差别, 反映的景物特征是不同的, 而该景物特征的不同可以从灰度空间相关性图的不同来区分.

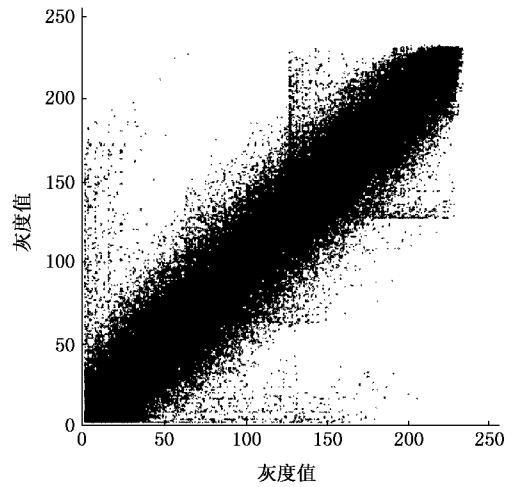


图 5 微光全波图像的灰度空间相关性

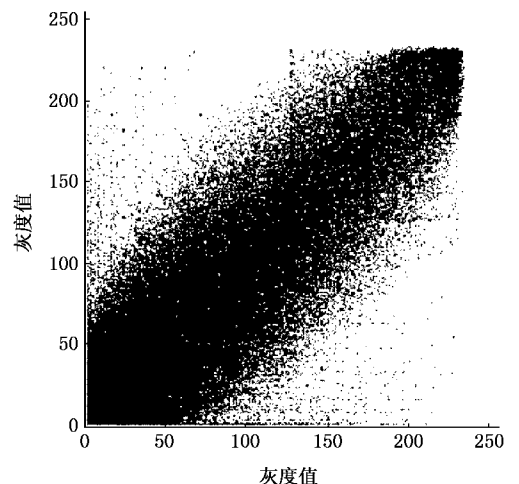


图 6 微光短波图像的灰度空间相关性

灰度空间相关性图中的灰度散布范围可以通过

标准偏差值来定量确定. 对不同的  $l(l = 1, l = 2, \dots)$  获得  $H_{2D}$  后, 求得灰度空间相关性图在灰度数组  $G_1, G_2$  中, 任一灰度级  $G_1$  确定的情况下, 另一灰度级  $G_2$  散布的标准偏差

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{G_2} (G_2 - G_1) f(G_1, G_2) |_{G_1}}{\sum_{G_2} f(G_1, G_2) |_{G_1}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中

$$G_2 = \frac{\sum_{G_2} G_2 f(G_1, G_2) |_{G_1}}{\sum_{G_2} f(G_1, G_2) |_{G_1}}. \quad (4)$$

图 7 所示为微光全波图像和微光短波图像的标准偏差比较值, 其结果同图 5、6 的观察结果是一致的. 短波图像的灰度散布范围宽于全波图像的散布范围, 表征了短波图像的灰度空间相关性差, 且灰度分布层次比较多.

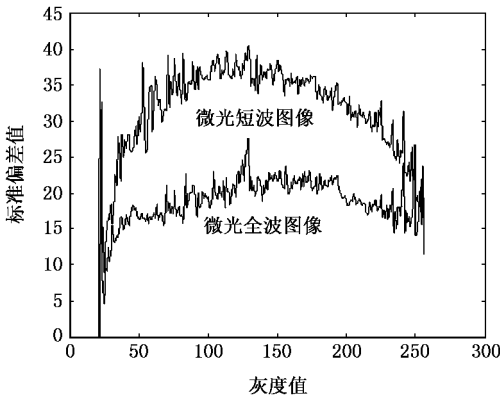


图 7 灰度空间相关性的标准偏差比较

据此, 对双谱微光图像进行融合时, 可以依据灰度空间相关性图的标准偏差作为融合依据, 同时结合微光全波图像和微光短波图像的灰度特点对融合图像进行增强, 尽量使得融合图像在灰度空间相关性图中具有较宽的灰度分布范围, 达到融合图像改善图像清晰度和提高目标识别概率的目的.

### 3. 基于灰度空间相关性的融合方法

根据对微光全波图像和微光短波图像的特征分析, 特别是对其二维灰度空间相关性图的分析, 为了达到有效提高融合图像的清晰度的目的, 提出一种新型的基于灰度空间相关性的图像融合方法. 该方法包括基于标准偏差的灰度调制和基于灰度相关性

的灰度统计平衡. 基于标准偏差的灰度调制融合根据标准偏差取大来融合图像, 能够在融合图像中选择微光全波图像和微光短波图像中的较大的标准偏差, 而基于灰度相关性的灰度统计平衡过程是为了进一步增大融合图像的标准偏差而引入的, 引入该部分可以减弱融合图像的灰度空间相关性, 达到增加融合图像清晰度的目的<sup>[6]</sup>.

#### 3.1. 基于标准偏差的灰度调制融合

由微光图像的二维灰度空间相关性图分析, 在对微光全波图像和微光短波图像进行融合时, 提出一种新的基于标准偏差的灰度调制法. 该方法对  $3 \times 3$  的像素区域采用标准偏差值及像素在微光全波图像和微光短波图像中的灰度来确定融合图像中的灰度值, 其表达式如下:

$$F(i, j) = \begin{cases} \frac{S(i, j) - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \cdot W(i, j) & A > 1 \text{ 且 } B < 1, \\ S(i, j) & A > 1 \text{ 且 } B > 1, \\ \frac{W(i, j) - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \cdot S(i, j) & A < 1 \text{ 且 } B > 1, \\ W(i, j) & A < 1 \text{ 且 } B < 1, \\ W(i, j) & \text{其他,} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $F(i, j)$  为融合图像;  $S(i, j)$  为微光短波图像;  $S_{\min}$  为微光短波图像中区域内灰度最小值;  $S_{\max}$  为微光短波图像中区域内灰度最大值;  $W(i, j)$  为微光全波图像;  $W_{\min}$  为微光全波图像中区域内灰度最小值;  $W_{\max}$  为微光全波图像中区域内灰度最大值;  $A = \frac{\sum \sigma}{\sum S(i, j)}$ ;  $B = \frac{\sum W(i, j)}{\sum W(i, j)}$ .

#### 3.2. 基于灰度空间相关性的灰度统计平衡

(5) 式所示的融合方法, 在融合的过程中, 保证融合图像具有较大的标准偏差, 同时 (5) 式结合了微光全波图像和微光短波图像的灰度特征. 根据标准偏差取大来融合图像, 能够在融合图像中选择微光全波图像和微光短波图像中的较大的标准偏差. 为了进一步增大融合图像的标准偏差, 即减弱融合图像的灰度空间相关性, 来达到增加融合图像清晰度的目的, 采用 (6) — (8) 式所示的倒 S 形传递函数<sup>[7]</sup>对融合图像进行灰度统计平衡.

$$F'(i, j) = F(i, j) [f(v_{\max}) - f(v_{\min}) + f(v_{\min})], \quad (6)$$

式中  $f(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}}$ .

$$F''(i, j) = \frac{1}{a} \ln \left[ \frac{1}{F'(i, j)} - b \right], \quad (7)$$

$$F_{\text{end}}(i, j) = 1 - \frac{F''(i, j) - \nu_{\min}}{\nu_{\max} - \nu_{\min}}, \quad (8)$$

式中,  $a, b, \nu_{\min}, \nu_{\max}$  的具体取值由实验决定。

分析(3)式中的标准偏差,其大小是由和同一个灰度值  $G_1$  够成组合的不同灰度值  $G_2$  与  $G_2$  的质心值之间的差值决定的,即不同  $G_2$  之间的差值越大则得到的标准偏差值越大.由(6)–(8)式可以得出变化之前和变化之后的灰度值的关系如下:

$$e^{a[F_{\text{end}}(i, j)(\nu_{\max} - \nu_{\min}) + \nu_{\min}]} = \frac{1}{F(i, j) [f(\nu_{\max}) - f(\nu_{\min})] + f(\nu_{\min})} - b \quad (9)$$

当式中的  $a, b, \nu_{\min}, \nu_{\max}$  为常数时,随着  $F(i, j)$  的变化,  $F_{\text{end}}(i, j)$  得到不同程度的变化,调整  $a, b, \nu_{\min}, \nu_{\max}$  的取值,可以得到不同的灰度变化函数,从而改变  $G_2$  的质心值,以及不同灰度值  $G_2$  与  $G_2$  的质心值之间的差值来满足改变标准偏差的需要。

### 3.3. 融合算法设计

为了硬件实时实现 3.1 和 3.2 节中所述的算法,设计算法流程图如图 8 所示.而且特别为  $H_{2D}$  的求取设计了快速算法,避免了求取过渡矩阵的时间损耗,有效提高了计算效率.即在计算  $H_{2D}$  时,直接利用  $H_{2D}$  的像素位置  $(i, j)$  来表征相邻像素  $(m, n)$  与  $(m, n + l)$  构成的像素偶在整幅图像的灰度数组  $[G_1, G_2]$ ,由此,统计在整幅图像上灰度数组  $[G_1, G_2]$  的频率统计值就成为了  $(i, j)$  位置的取值.也就是说,  $H_{2D}$  中  $(i, j)$  位置的取值,就表示相邻像素  $(m, n)$  与  $(m, n + l)$  构成的像素偶在整幅图像中灰度组合为  $[i, j]$  的统计数值.同时,标准偏差的计算结果也只存贮在一维数组中,提高了系统存贮空间的利用率。

## 4. 实验与结果分析

图 9, 10 所示为利用本文方法对双谱微光图像进行融合和统计平衡的结果.图中依次显示了融合源图(微光全波图像和微光短波图像)、融合中间结果图以及统计平衡后的结果输出图,为了便于对各幅图像进行比较,特别在每幅图的下方提供了其二维灰度空间相关性图。

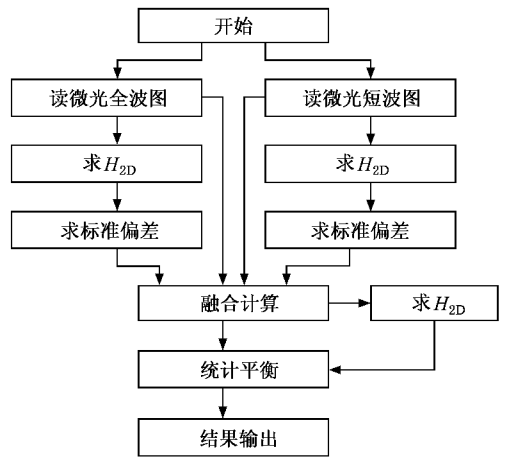


图 8 算法流程图

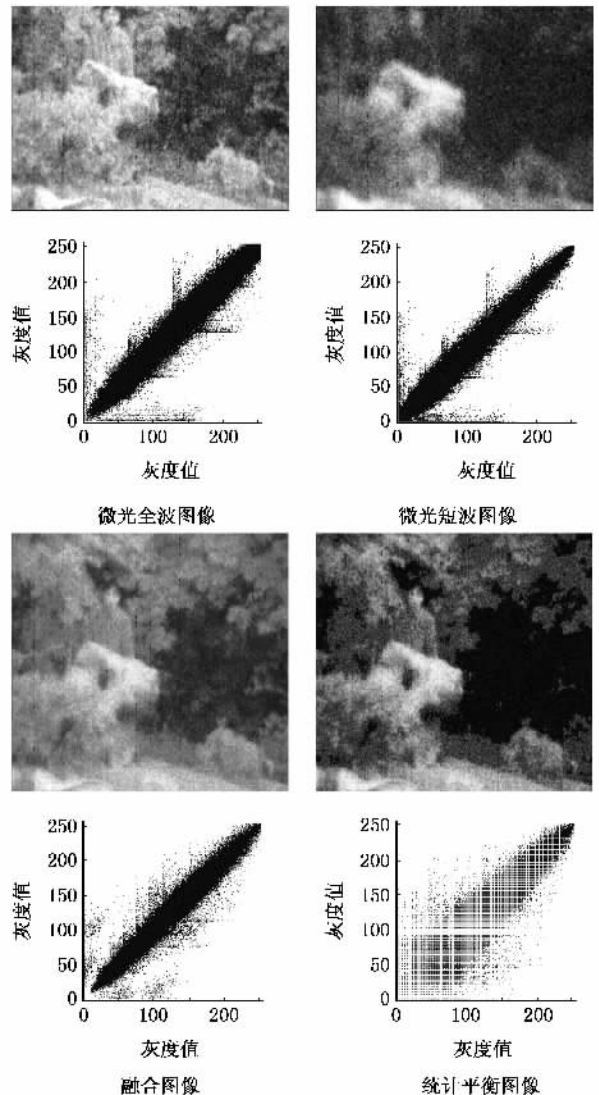


图 9 实验结果 1

出,融合图像已经能够改善原微光全波图像和微光

短波图像的清晰度,而统计平衡图像则对融合图像进行了进一步的增强,更加清晰.观察它们对应的二维灰度空间相关性图,融合图像的二维灰度空间相关性图在形状以及分布范围上都与微光短波图像的二维灰度空间相关性图相似,说明融合图像完成了标准偏差取大的工作;同时统计平衡图像的二维灰度空间相关性图得到的结果说明灰度平衡统计有效地扩大了灰度空间相关性图的分布范围,达到了降低灰度空间相关性的目的.

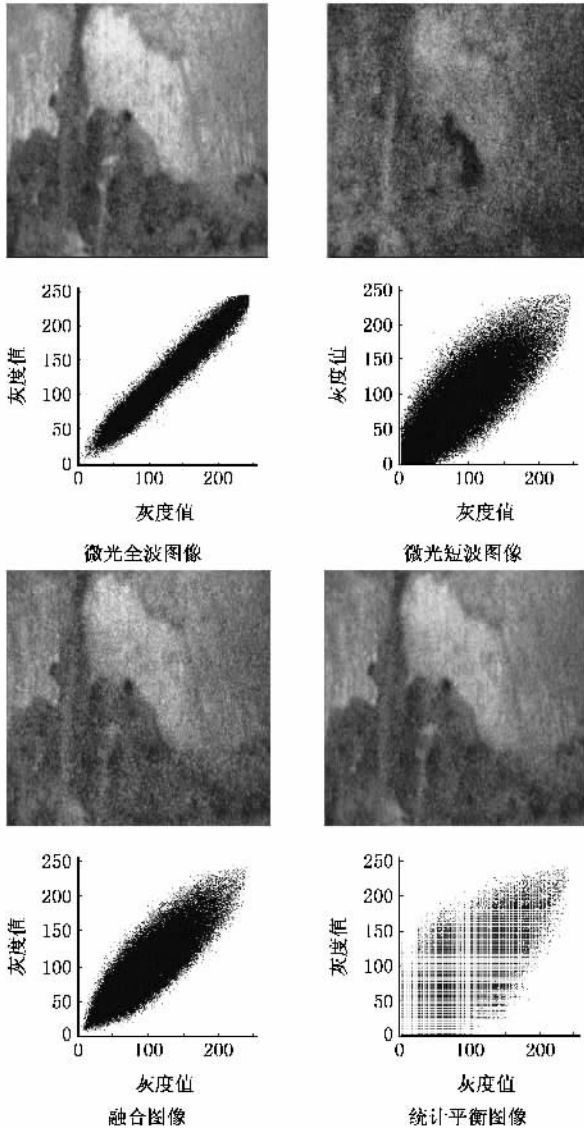


图 10 实验结果 2

综合观察图 9, 10 所示融合图像和统计平衡图像以及各自对应的灰度相关性图,同微光全波图像和微光短波图像的灰度相关性图比较,可以看出,融合图像和统计平衡图像的二维灰度空间相关性图都

有效地扩大了分布范围,即扩大了灰度的分布层次,从而达到了第二部分中所述的,从成像光谱角度分析融合图像需要达到的增加融合图像灰度层次的目的,使得融合图像中的目标和背景在灰度上更加分明.

## 5. 融合结果质量评价

为了比较本文所述融合方法和灰度调制<sup>[8]</sup>融合方法以及谱域融合<sup>[9]</sup>方法,对上述方法分别得到的融合图像的质量进行了定量评价.即对图 9 所示微光全波图像和微光短波图像分别采用本文方法、灰度调制方法以及谱域融合方法得到的融合图像,选用信息熵、空间信噪比和标准差均值作为评价标准<sup>[10, 11]</sup>进行定量评价.图像信息熵值的大小表征图像所包含的平均信息量的多少;空间信噪比表示图像信号和噪声之间的比例关系;标准差均值反映了图像的清晰程度,这三个指标都不需要标准图像作为参考.评价结果如表 1 所示.

表 1 融合图像评价结果

融合结果	信息熵	空间信噪比	标准差均值
本文方法	5.3559	16.265	18.882
灰度调制	5.074	15.154	15.739
谱域融合	5.146	15.378	14.208

从表 1 中的结果可以看出,本文所述基于灰度空间相关性的融合方法,在信息熵和空间信噪比以及标准差均值三个指标方面相对于灰度调制融合和谱域融合方法都有一定的改善.虽然在信息熵和空间信噪比上的改善不够显著,但是却在标准差均值上有了很大的改观,即符合本文所述融合方法能够有效的改善图像清晰度的目的.

## 6. 结 论

基于灰度空间相关性的双谱微光图像融合方法,是在分析微光全波图像和微光短波图像的灰度特征的基础上提出的,该方法利用了微光全波图像和微光短波图像的灰度空间相关性作为图像融合的基准,并且针对图像的清晰度在灰度空间相关性方面的表现对融合图像进行了统计平衡,经过实验证明,图像输出结果能够有效的改善图像的清晰度,并且易于硬件实现.

- [ 1 ] Zhang Y , Zhang B M , Bai L F , Qian W X 2003 *Infrared Laser Eng.* **32** 639 ( in Chinese ) [ 张 毅、张保民、柏连发、钱惟贤 2003 红外与激光工程 **32** 639 ]
- [ 2 ] Zhou J W , Fang Z L , Yang S J , Yang Y , Mu G G 2005 *Acta Photon. Sin.* **34** 1889 ( in Chinese ) [ 周巨伟、方志良、杨胜杰、杨 勇、母国光 2005 光子学报 **34** 1889 ]
- [ 3 ] She E Y , Wang R S 2005 *Acta Electron. Sin.* **33** 1008 ( in Chinese ) [ 余二永、王润生 2005 电子学报 **33** 1008 ]
- [ 4 ] Liang Y M , Zhai H C , Chang S J , Zhang S Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2655 ( in Chinese ) [ 梁艳梅、翟宏琛、常胜江、张思远 2003 物理学报 **52** 2655 ]
- [ 5 ] Sun S Y , Wang L P , Zhang B M , Jing Z L 2003 *J. Infrared Millim. Waves* **22** 220 ( in Chinese ) [ 孙韶媛、王利平、张保民、敬忠良 2003 红外与毫米波学报 **22** 220 ]
- [ 6 ] Zong X P , Xu Y , Dong J T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3223 ( in Chinese ) [ 宗晓萍、徐 艳、董江涛 2006 物理学报 **55** 3223 ]
- [ 7 ] Ngo H , Li T , Zhang M , Livingston A , Asari V 2005 *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition ( CVPR '05 )* p1063
- [ 8 ] Liu G X , Chen W J , Liu C H 2005 *J. of Apparatus and Instrument* **26** 628 ( in Chinese ) [ 刘贵喜、陈文锦、刘纯虎 2005 仪器仪表学报 **26** 628 ]
- [ 9 ] Leatham A L , Do L 2000 *Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion ( Cat. No. 00EX438 )* **1** TUD3
- [ 10 ] Toet A , Jan Kees Ijspeert 2001 *SPIE* **4380** 427
- [ 11 ] Krebs W K , Sinai M J 2002 *Human Factors* **44** 257

## Method of fusing dual-spectrum low light Level images based on gray-scale spatial correlation \*

Zhang Chuang Bai Lian-Fa Zhang Yi

( School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology , Nanjing University of Science and Technology , Nanjing 210094 , China )

( Received 25 August 2006 ; revised manuscript received 27 December 2006 )

### Abstract

Gray-scale spatial correlation reflects the definition of images , and the main purpose of fusing images is to improve the definition of images . Based on the spectrum characteristics of low light level ( LLL ) whole-wave image and LLL short-wave image and the analysis of the one-dimension at gray-scale histograms and the two-dimensional gray-scale spatial correlation charts of LLL whole-wave image and LLL short-wave image , the new method of fusing dual-spectrum LLL images based on gray-scale spatial correlation is proposed . The method is realized by gray-scale selection based standard deviation and gray-scale statistics balance , and the method can effectively improve the definition of images and is easy to execute on hardware compared with gray-scale modulation method and spectrum-field method . The theoretical expressions of the fusion method are expatiated particularly , and the experiment results with different scenes are analyzed .

**Keywords :** image fusion , LLL whole-wave image , LLL short-wave image , gray-scale spatial correlation

**PACC :** 4230 , 4230V , 4240F , 0650