

doi:10.3788/gzxb20154412.1211001

# 基于光谱相似性度量的光谱成像干扰效果定量评估

高卫, 孙奕帆, 孙鹏, 党东妮

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 利用一种宽波段伪装网和超光谱成像仪进行了光谱成像伪装干扰试验, 基于实施干扰前后光谱图像数据光谱特性的变化, 利用光谱相似性度量指标, 提出了一种用于评估光谱成像干扰效果的光谱距离准则, 结合光谱成像伪装干扰试验结果, 对该准则的适用性进行了验证分析. 结果表明, 在试验条件下, 有效伪装区光谱图像像元在伪装前后光谱向量之间的光谱距离可达 0.14~0.5, 具体幅值大小因伪装前的目标特性、伪装网层数、超光谱成像仪增益等因素而异, 而非伪装区和无效伪装区光谱图像像元的光谱距离都在 0.05 以下, 可见在对目标实施有效的伪装干扰前后, 伪装区像元的光谱距离通常会显著大于非伪装区, 而且伪装效果越显著, 光谱距离就越大. 因此, 光谱距离可以定量反映干扰对像元光谱特性的影响, 并能鉴别不同干扰效果之间的细微差别, 所以可用于定量、客观评估光谱成像干扰效果.

**关键词:** 光谱成像; 干扰效果评估; 光谱相似性; 光谱距离; 伪装

中图分类号: TP75; TN97

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1211001-7

## Quantitative Evaluation of Jamming Effect on Spectral Imaging Based on Spectral Similarity Measure

GAO Wei, SUN Yi-fan, SUN Peng, DANG Dong-ni

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Spectral imaging camouflage jamming tests were carried out with a kind of broad-band camouflage net and a hyperspectral imager. Based on the change of spectral characteristics of the spectral image data after being jammed, a spectral-distance criterion for evaluating jamming effect on spectral imaging was proposed by using spectral similarity measure. The applicability of the criterion was verified and analyzed with the data of the camouflage jamming tests. The results show that, under the test conditions, in the areas those are camouflaged effectively, the spectral distance between the spectral vectors of the image units before and after being camouflaged can reach 0.14~0.5. The amplitude value varies with the change of the target characteristics before being camouflaged, camouflage net layers and the gain of the hyperspectral imager. On the other hand, the spectral distance of the image units remains below 0.05 in the non-camouflaged areas or the areas those are camouflaged ineffectively. Thus the spectral distance of the image units in camouflaged areas is usually larger than that of the image units in non-camouflaged areas remarkably when the target is camouflaged effectively. The more remarkable the camouflage effect, the larger the spectral distance. Therefore the spectral distance between the spectral vectors of the image unit before and after being jammed can reflect the jamming effect on the spectral characteristics of the image unit quantitatively, and discriminate small differences in jamming effect on spectral imaging reliably. So the spectral distance could be used as an index for evaluating jamming effect on spectral imaging quantitatively and impersonally.

**Key words:** Spectral imaging; Evaluation of jamming effect; Spectral similarity; Spectral distance; Camouflage

**OCIS Codes:** 110.4234; 100.4145; 300.0300

基金项目: 试验技术研究重点项目(No. BZ-000-1-1102)资助

第一作者: 高卫(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电对抗试验技术、光学工程等. Email: wchengao@sina.com

收稿日期: 2015-07-21; 录用日期: 2015-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

光谱成像技术近年来广泛用于航空航天遥感、资源勘查、军事侦察等领域<sup>[1-2]</sup>。在此情况下,针对光谱成像探测的电子防护和对抗就变得十分迫切,相应的电子对抗技术越来越受到重视。不同于传统光电成像设备,光谱成像设备可以同时获取大量接近连续的光谱波段图像,因此光谱成像设备的干扰防护方法、干扰机理就十分复杂。相应地,针对光谱成像设备的干扰效果评估方法也不同于传统光电成像设备。随着针对光谱成像设备的电子对抗技术及装备的发展和运用,对这些技术及装备效能的定量、客观、准确评估日益迫切。然而,从相关文献检索结果<sup>[3-5]</sup>看,目前国内外的研究只是集中于基于光谱成像技术的侦察威胁方面。

在各种常规的光电对抗手段和措施中,伪装材料和伪装网是比较廉价高效的<sup>[6-7]</sup>。对于光谱成像设备,则需要有宽波段的伪装材料和伪装网,这样才能对其各个工作波段都形成有效干扰。宽波段伪装材料和伪装网技术近年来已经取得较大进展<sup>[8-9]</sup>,文献[8]介绍了一种可兼容中波、长波红外两个波段的光子晶体伪装材料,文献[9]则介绍了一种可覆盖近红外、中红外、远红外三个波段的伪装网,这为光谱成像侦察对抗提供了十分廉价高效的手段,有望在光谱成像侦察对抗技术上取得突破。为了探索研究光谱成像干扰效果的定量评估方法,本文利用一种宽波段伪装网和超光谱成像仪进行了光谱成像伪装干扰试验,获得了光谱成像干扰效果实测数据,然后,基于实施干扰前后光谱图像数据光谱特性的变化,利用光谱相似性度量指标,提出了一种用于定量评估光谱成像干扰效果的光谱距离准则。最后结合伪装干扰试验实测数据,对该准则的适用性进行了验证分析。

## 1 光谱成像伪装干扰试验

为获得光谱成像干扰效果实测数据,首先开展了光谱成像伪装干扰试验。主要试验设备包括作为干扰手段的伪装网、作为被干扰对象的超光谱成像仪、作为超光谱成像仪观测对象以及被伪装防护对象的合作目标。合作目标分别采用白色、银灰色两种颜色的小轿

车,停放在包含有草地、树木、水泥小路等典型地物的背景中。伪装网采用一种宽波段迷彩伪装网,其在可见光波段的光谱反射曲线接近于同色背景地物,使用时覆盖在合作目标外部以伪装目标(如图1),从而干扰通过超光谱成像仪对目标的鉴别。超光谱成像仪由光谱分光成像系统、CCD探测器、扫描转台、控制与处理系统等部分组成,其中,CCD探测器为 $1024 \times 1024$ 面阵探测器,垂直方向为空间维,探测来自物方垂直方向一个条带场景的辐射,水平方向为光谱维,探测经光谱分光系统分光后不同谱段的辐射。该设备在水平方向上的成像方式为推扫式,由控制与处理系统控制扫描转台转动,带动光谱分光成像系统完成对物方场景的水平方向扫描。分光系统采用基于凸面光栅的修正Offner分光成像系统<sup>[10]</sup>,将入射的 $400 \sim 780$  nm可见光辐射分为1024个光谱波段。

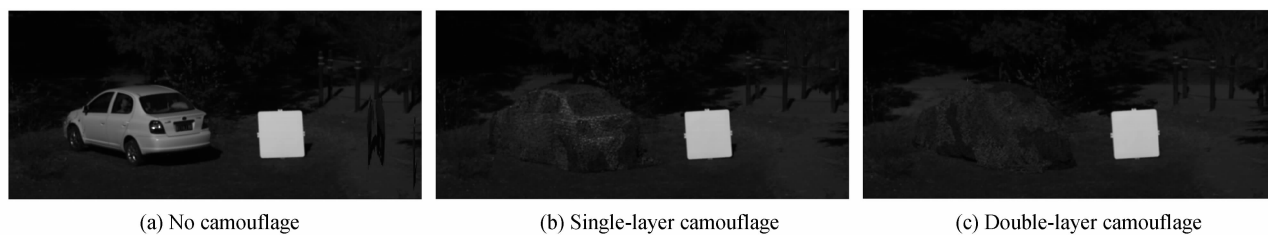


图1 利用伪装网对合作目标进行伪装

Fig. 1 Camouflaging cooperative target with camouflage net

试验时,合作目标布设在距离超光谱成像仪约100 m处,将超光谱成像仪视场中心瞄准目标。首先,合作目标不加伪装,控制超光谱成像仪在水平方向上对包含目标在内的场景进行推扫成像,获得相应光谱图像数据。然后,将伪装网罩在合作目标上,控制超光谱成像仪对同一场景进行推扫成像,获得有伪装时的光谱图像数据。在秋季不同时间,对于同样背景下白、银灰两种颜色的合作目标,采用单层、双层伪装网,分别进行了伪装干扰试验。

光谱成像伪装干扰试验的典型结果见图2~图4。图2和图3分别为同一天对白色目标和银灰色目标的试验结果,图4为另一天对白色目标的试验结果,各图



(a) No camouflage

(b) Single-layer camouflage

(c) Double-layer camouflage

图2 伪装干扰试验I测量结果

Fig. 2 Measure results in camouflage test I

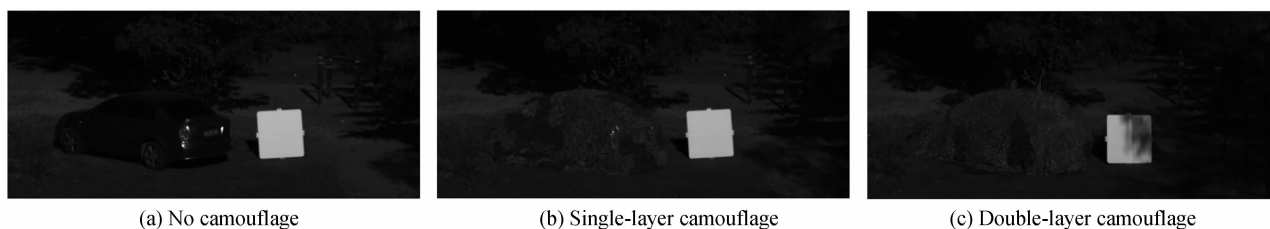


图3 伪装干扰试验II测量结果

Fig. 3 Measure results in camouflage test II

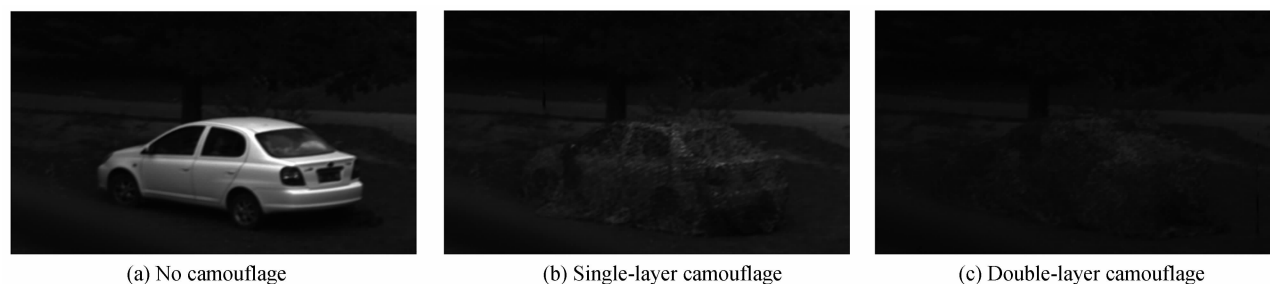


图4 伪装干扰试验III测量结果

Fig. 4 Measure results in camouflage test III

中(a)、(b)、(c)分别为同一目标在无伪装、用单层伪装网伪装、用双层伪装网伪装3种情况下超光谱成像仪对同一场景扫描成像测量结果,图中光谱波段中心波长为578 nm,将与图2、图3、图4对应的试验分别称为伪装干扰试验I、II、III。

由图2可知,对白色目标实施单层伪装后,目标与背景之间的灰度对比度显著减小,目标边缘及纹理已难以鉴别,目标与背景之间的相互融合非常明显,如果没有先验信息(以及目标旁边固定放置的标准漫反射板),对目标的发现和识别已经比较困难,所以伪装在578nm谱段取得显著效果。对白色目标实施双层伪装后,目标纹理则完全不可见,目标已经完全融合在背景之中无法鉴别,与单层伪装相比,伪装效果进一步改进。其他各谱段的情况与578 nm谱段相似。

由图3可知,无伪装时银灰色目标与背景之间的灰度对比度比白色目标情形低得多;在对目标实施单层伪装后,可以看出目标与背景之间的灰度对比度进一步减小,但因为伪装前目标与背景之间的灰度对比度已经很低,伪装后灰度对比度的下降程度就不如白色目标情形那么显著,而目标上除去个别部位如车尾灯由于反射阳光尚可见外,其余部分纹理及边缘已不可见,目标与背景之间的相互融合明显;在对目标实施双层伪装后,目标与背景之间的灰度对比度相比单层伪装情形的变化通过目视已不能鉴别,而目标纹理及边缘则已完全不可见。

如图4所示,在试验III中,由于超光谱成像仪增益相比试验I有所提高,所以目标及背景亮度整体有所提高,相应地,无伪装时目标与背景之间的灰度对比度相比试验I要高一些;实施单层伪装后,目标与背景

之间由于灰度对比度大幅下降而显著融合,但目标纹理尚可辨认;实施双层伪装后,目标纹理及边缘已完全不可见,目标完全融合在背景之中,伪装效果十分显著,相比单层伪装又有明显改进。

## 2 光谱距离准则

通过目视光谱图像只能定性或粗略判断光谱成像伪装干扰效果,仍难以精确鉴别不同干扰效果之间的细微差别。为实现定量评估,需要确定相应的干扰效果评估准则<sup>[11]</sup>。干扰效果评估准则具体解决的问题是如何量化不同程度的干扰效果,其关键是要确定合适的干扰效果评估指标,即用于衡量、表征干扰效果显著程度的指标。

对于光谱成像设备,其基本功能是获取地物目标的光谱图像数据,通过分析数据鉴别地物目标特性。对光谱成像设备实施伪装等光电干扰,会改变设备获取的光谱图像数据,使得不能准确鉴别地物目标特性或使鉴别能力下降。因此,在评估光谱成像干扰效果时,重点需要关注干扰对光谱成像设备获取地物目标光谱图像数据的影响,即通过对比分析实施干扰前后光谱图像数据的变化程度来评估干扰效果。

与传统光电成像设备不同,光谱成像设备获取的谱图数据既包含图像信息,又有光谱信息,其对地物目标的鉴别既有图像特性分析,又有光谱特性分析。因此,在评估光谱成像干扰效果时,既要分析干扰对谱图数据图像特性的影响,又要分析干扰对光谱特性的影响。在分析干扰对图像特性的影响时,可以借用适用于传统光电成像设备的一些准则<sup>[12]</sup>。在分析干扰对光谱特性的影响时,则需要研究适合于定量表征光谱特性

变化程度的指标。

在光谱成像遥感应用领域,常常通过比较分析待测试图像像元的光谱波形与参考光谱波形之间的相似性,来对地物目标进行分类和识别。而图像像元的光谱波形常用一个以该像元各谱段的灰度值或反射率为分量的向量来表示,即将每个像元光谱波形都看作光谱空间中的一个向量。首先对于每一地物类别确定其参考光谱向量,再对每一待测试图像像元,计算其光谱向量与各类别参考光谱向量的相似性,最后取相似性最高的参考光谱类别作为待测试图像像元的最终类别<sup>[13]</sup>。如上所述,对光谱成像设备实施干扰后,图像中部分像元的光谱特性通常会发生变化,为了定量表征这种变化并评估光谱成像干扰效果,受上述基于光谱相似性的分类方法启发,考虑利用光谱相似性度量指标,通过对比分析实施干扰前后同一图像像元光谱特性相似性的大小来判别干扰对谱图数据光谱特性的影响,从而定量评估干扰效果。

目前常用的光谱相似性度量指标包括光谱距离(Spectral Distance, SD)、光谱角度(Spectral Angle, SA)、光谱信息散度(Spectral Information Divergence, SID)等<sup>[14-15]</sup>,本文探讨将光谱距离指标应用于光谱成像干扰效果评估的可行性。光谱距离有绝对值距离、欧氏距离、马氏距离、闵氏距离等多种定义<sup>[1]</sup>,本文考虑最简单的平均绝对值距离。设同一像元在干扰前后的光谱向量分别为  $\mathbf{x}_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0N}]^T$ ,  $\mathbf{x}_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jN}]^T$ ,  $N$  为选定的光谱波段数,  $T$  为求向量转置,则  $\mathbf{x}_0$  和  $\mathbf{x}_j$  之间的平均绝对值距离为

$$SD(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_{0k} - x_{jk}| \quad (1)$$

当没有干扰因素对光谱图像造成影响时,则按式(1),光谱距离等于最小值零。当对光谱成像设备实施光电干扰时,图像中通常会有部分像元的光谱特性发生变化,这些像元干扰前后光谱向量之间的距离就会大于零,通常干扰效果越显著,像元光谱特性的变化也越大,相应的光谱距离也就越大,即光谱距离的幅值与干扰效果显著程度存在正相关。这样,光谱距离可从干扰前后像元光谱特性变化大小的角度反映干扰对光谱图像的影响,从而可用于定量评估光谱成像干扰效果,此即光谱距离准则。

### 3 伪装干扰效果的光谱距离分析

根据式(1),基于超光谱成像仪伪装干扰试验结果,针对超光谱成像仪扫描成像视场内的每个像元,分别计算了实施单层伪装前后光谱向量之间的光谱距离 SD 值,实施双层伪装前后光谱向量之间的光谱距离 SD 值,光谱波段选全部 1024 个谱段。

与伪装干扰试验 I 相应的计算结果如图 5、图 6 所

示,其中图 5 为实施单层伪装前后光谱距离的空间分布,图 6 为实施双层伪装前后光谱距离的空间分布。各图中(a)为光谱距离分布的三维展示图,(b)为  $x$ - $y$  平面展示图,(c)为  $x$  方向上的分布。各图中用不同颜色表示不同幅值大小的光谱距离,深色越深幅值越大,浅色越深幅值越小。

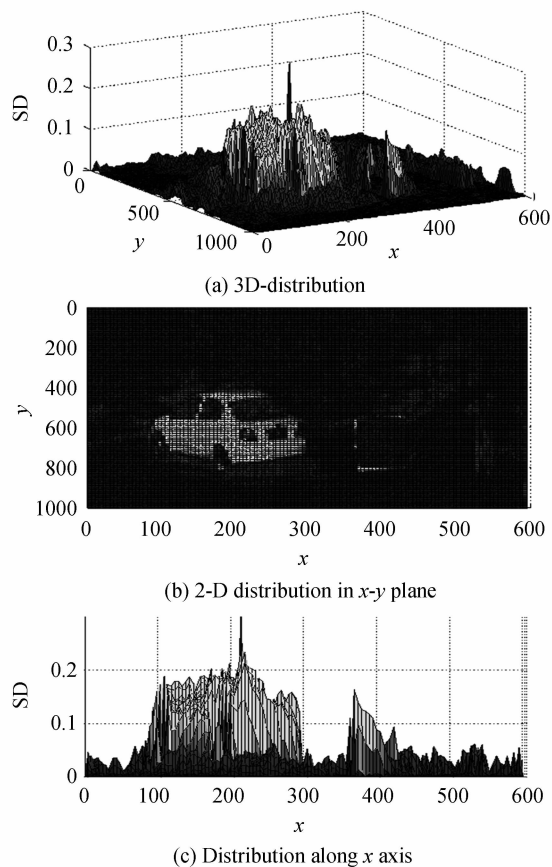


图 5 试验 I 单层伪装前后光谱距离分布

Fig. 5 SD distribution for single-layer camouflage in test I

由图 5 可见,利用单层伪装网对白色目标实施伪装前后,在伪装所在的目标区域内像元的光谱距离 SD 值大部分在 0.14~0.2 范围内,而在背景区域(除标准漫反射板部分边缘)内各像元的光谱距离 SD 值基本都在 0.05 以下,表明伪装前后目标区域内大部分像元的光谱特性发生显著变化,而背景区域大部分像元的光谱特性变化要比目标区域小得多,这显然是因为伪装网改变了目标区域的光谱特性,图像中像元光谱距离幅值的空间分布正好凸显出伪装所在位置及其效果,光谱距离越大的位置,说明伪装前后光谱特性的变化越大,反映出伪装效果越显著,反之亦然。值得注意的是,漫反射板的部分边缘像元伪装前后的光谱距离 SD 值达到 0.15 左右,远大于其他背景区域,显然是不容忽视的。经分析,可能原因在于超光谱成像仪的机械扫描机构导致伪装前后两次扫描的场景略有错位,而漫反射板与背景草坪的光谱特性存在很大差别,所以导致漫反射板部分边缘区域像元的光谱距离较大。另

外,通过仔细观察图 5(b)中  $SD$  值  $x$ - $y$  平面分布图可见,在轿车目标底部,像元的浅色要比周围背景区略浅,说明  $SD$  值要略大,对比图 1 中的试验场景可知,轿车底部仍为伪装网覆盖区,其  $SD$  值略大于周围背景区表明伪装网与其周围的草坪背景在光谱特性上略有差别。

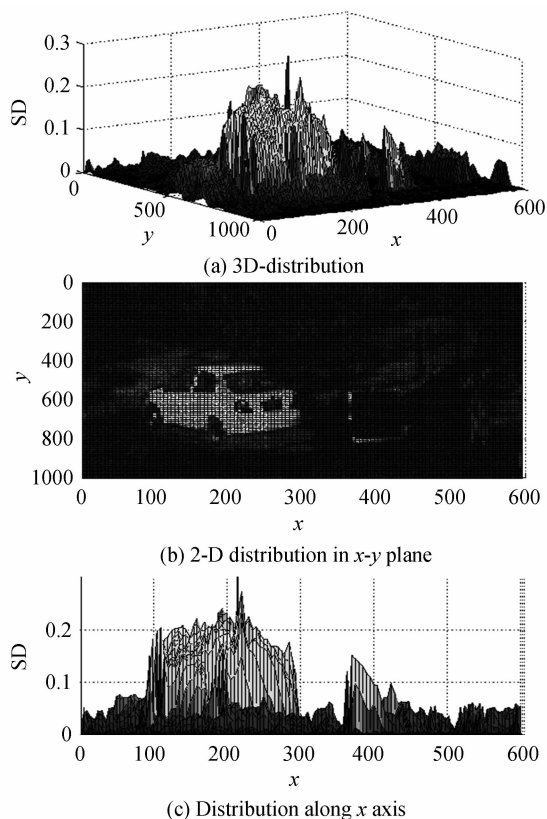


图 6 试验 I 双层伪装前后光谱距离分布

Fig. 6  $SD$  distribution for double-layer camouflage in test I

对比图 5 和图 6 可知,利用双层伪装网对目标实施伪装前后,相比单层伪装试验结果,伪装所在目标区像元的光谱距离  $SD$  值整体上增大,对比两图(c)中  $x$  方向上的分布可见,相同位置处像元  $SD$  值增大幅度在 0.03 左右。从  $SD$  幅值表征伪装干扰效果显著程度的角度看,双层伪装网相比单层伪装网的干扰效果进一步增强,这与前述通过目视谱图得到的双层伪装网的伪装效果相比单层伪装网增强的直观判断是一致的。

与伪装干扰试验 II 相应的银灰色目标实施单层伪装前后光谱距离的空间分布如图 7 所示。由图可见,除了个别像元外,伪装所在的目标区内像元的光谱距离  $SD$  值很小,与背景区域内像元的光谱距离  $SD$  值相比没有明显差别,都在 0.05 以下,从  $SD$  幅值表征伪装干扰效果显著程度的角度看,伪装干扰效果很不明显,这与前述银灰色目标伪装效果不显著的直观判断一致。经检查,个别光谱距离  $SD$  值很大的像元位于车尾灯附近,可能的原因在于车尾灯对光照条件变化十分

敏感,实施伪装前后(间隔时间 10 min 左右)光照条件的变化使得车尾灯附近像元光谱特性有比较大的变化,从而产生比较大的光谱距离。

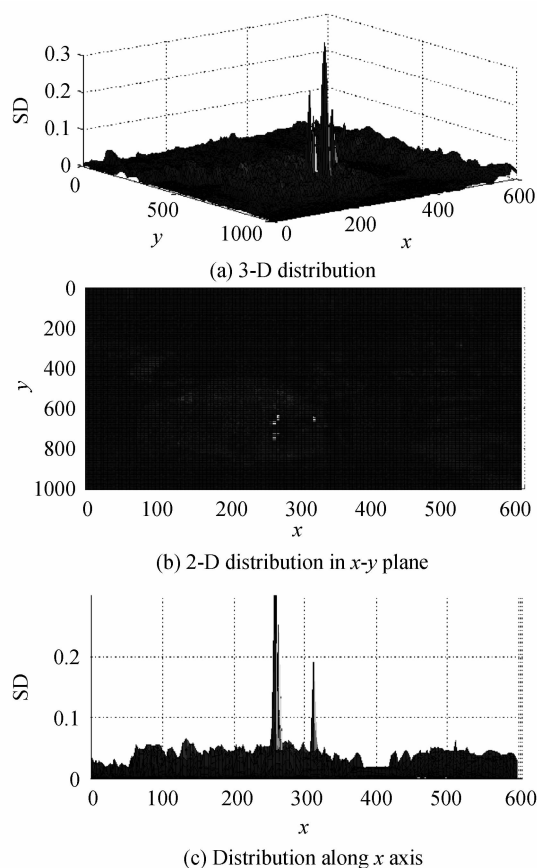
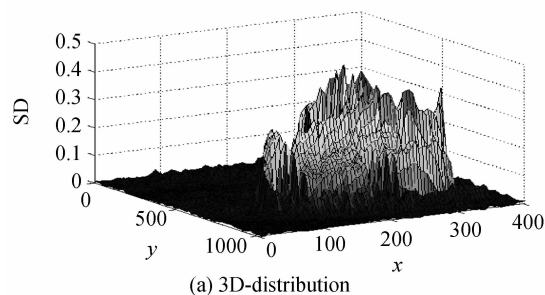


图 7 试验 II 单层伪装前后光谱距离分布

Fig. 7  $SD$  distribution for single-layer camouflage in test II

与伪装干扰试验 III 相应的白色目标的光谱距离计算结果如图 8、图 9 所示,其中图 8 为实施单层伪装前后光谱距离的空间分布,图 9 为实施双层伪装前后光谱距离的空间分布。由图 8 可见,利用单层伪装网对白色目标实施伪装前后,在伪装所在的目标区域内像元的光谱距离幅值大部分在 0.2~0.4 范围内,而背景区域内大部分像元的光谱距离在 0.05 以下,图像中像元光谱距离幅值的空间分布同样地凸显出伪装所在位置及其效果。对比图 9 和图 8 可见,利用双层伪装网对目标实施伪装前后,相比单层伪装试验结果,伪装所在目标区像元的光谱距离  $SD$  值也是整体上明显增大,相



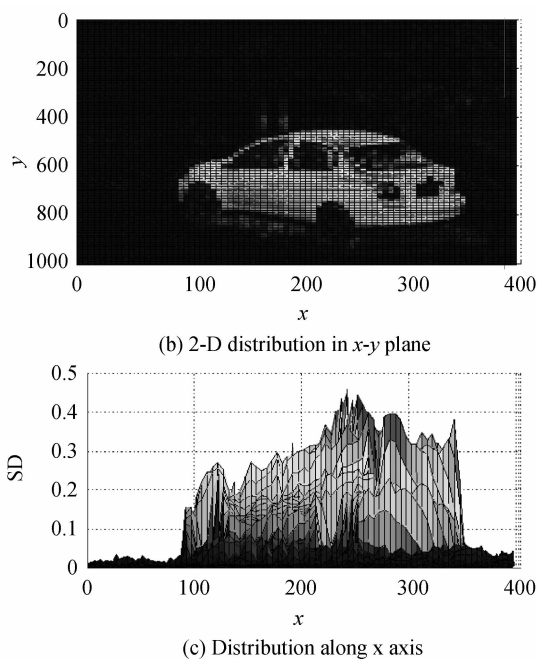


图 8 试验 III 单层伪装前后光谱距离分布  
Fig. 8  $SD$  distribution for single-layer camouflage in test III

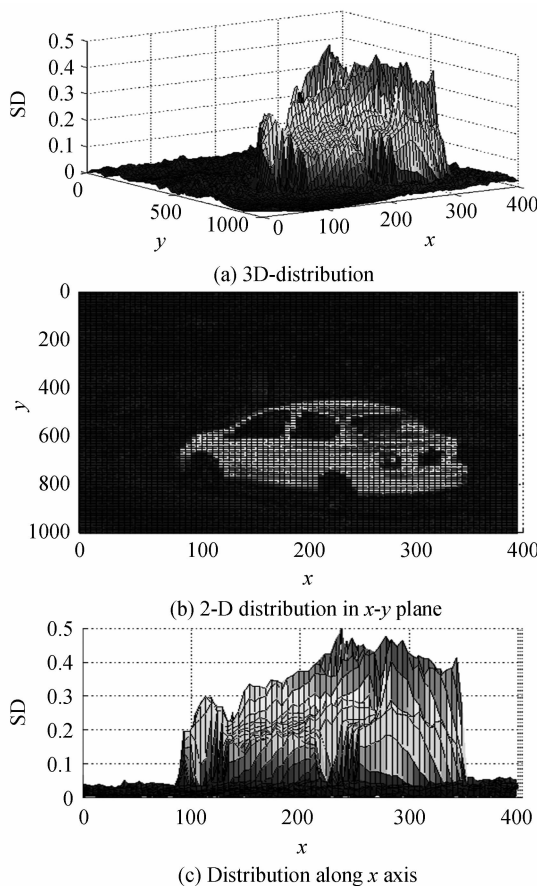


图 9 试验 III 双层伪装前后光谱距离分布  
Fig. 9  $SD$  distribution for double-layer camouflage in test III  
同位置处像元  $SD$  值增大幅度在 0.07 左右。可见,光谱距离  $SD$  值可以定量地反映出单层伪装和双层伪装之间伪装效果的细微差别。试验结果表明:在对目标实施

有效的伪装干扰前后,伪装区像元的光谱距离  $SD$  值通常会显著大于非伪装区,而且在一定的试验条件下,伪装效果越显著, $SD$  值就越大,因此可以利用像元在干扰前后光谱向量之间的光谱距离  $SD$  值定量评估光谱成像伪装干扰效果。

## 4 结论

综上,利用宽波段伪装网对超光谱成像仪实施干扰,因伪装前的目标特性、伪装网层数等因素的不同而有不同的伪装干扰效果;光谱图像像元在干扰前后光谱向量之间的光谱距离可以定量反映干扰前后像元光谱特性的变化幅度或干扰对像元光谱特性的影响,并能可靠地鉴别不同干扰效果之间的细微差别,因此可用于定量、客观评估光谱成像干扰效果。

致谢:特别感谢陈宇恒、周建康二同志以及沈为民教授的热忱帮助。

### 参考文献

- [1] 张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 北京: 测绘出版社, 2011.
- [2] CHEN Wei, ZHENG Yu-quan, XUE Qing-sheng. Optical system design of airborne wide field-of-view hyperspectral imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1022001. 陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2014, **43**(10): 1022001.
- [3] MA Yong-ping, ZHANG Wei, LIU Dong-xu. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets[J]. *Aerospace Shanghai*, 2012, **29**(1): 37-40. 麻永平, 张炜, 刘东旭. 高光谱侦察技术特点及其对地面军事目标威胁分析[J]. 上海航天, 2012, **29**(1): 37-40.
- [4] LAGUEUX P, PUCKRIN E, TURCOTTE C S, *et al.* Airborne infrared hyperspectral imager for intelligence, surveillance and reconnaissance applications[C]. SPIE, 2012, **8542**: 854226.
- [5] WEATHERBEE O, JANASKIE J, HYVÄRINEN T. Advanced hyperspectral imaging solutions for near real-time target detection[C]. SPIE, 2012, **8542**: 854223.
- [6] ALBERTONI A. Long wave infrared metamaterials and nano-materials design, simulation, and laboratory test for target camouflage in the defence application[C]. SPIE, 2011, **8185**: 818509.
- [7] HE Zi-jian, SHI Jia-ming, WANG Jia-chun, *et al.* Seasonal Requirement of the Infrared Camouflage Paint's Emissivity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0304002. 何梓健, 时家明, 汪家春, 等. 红外伪装涂料发射率的季节性要求[J]. 光子学报, 2015, **44**(3): 0304002.
- [8] GAO Yong-fang, SHI Jia-ming, ZHAO Da-peng, *et al.* A kind of dual band of middle and far infrared compatible camouflage material based on photonic crystals[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 970-974. 高永芳, 时家明, 赵大鹏, 等. 一种基于光子晶体的中远红外双波段兼容伪装材料[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(4): 970-974.
- [9] MILEWSKI S, DULSKI R, KASTEK M, *et al.* Coatings masking in near, medium, and far infrared used for ship camouflage[C]. SPIE, 2011, **8185**: 81850V.
- [10] 王建宇, 舒嵘, 刘银年, 等. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] 高卫, 黄惠明, 李军. 光电干扰效果评估方法[M]. 北京: 国

- 防工业出版社, 2006.
- [12] GAO Wei, HE Wei. Evaluation rules of smokescreen jamming effectiveness on electro-optical observation and aiming devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(s): 270-273.  
高卫, 贺伟. 烟幕对光电观瞄设备干扰效果的评估准则[J]. *光子学报*, 2007, **36**(s): 270-273.
- [13] 杜培军, 谭琨, 夏俊士. 高光谱遥感影像分类与支持向量机应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] CHANG C I. An information-theoretic approach to spectral variability, similarity, and discrimination for hyperspectral image analysis [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, **46**(5): 1927 - 1932.
- [15] SU Hong-jun, SHENG Ye-hua. Orthogonal projection divergence-based hyperspectral band selection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(5): 1309-1313.  
苏红军, 盛业华. 基于正交投影散度的高光谱遥感波段选择算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(5): 1309-1313.