

基于直觉模糊决策的高光谱伪装效果综合评估方法

方浩*, 李艾华, 王涛, 常红伟

火箭军工程大学作战保障学院, 陕西 西安 710025

摘要 利用高光谱遥感图像对国防工程进行伪装效果评估, 提出了一种基于直觉模糊决策的高光谱伪装效果综合评估方法, 以及包括光谱泛相似测度、亮度对比度、视觉相似性测度和结构相似性测度等在内的高光谱伪装效果综合评价指标体系; 建立了面向高光谱伪装效果评估的直觉模糊多属性决策模型; 采用逼近理想解的排序算法进行模型决策, 并提出了基于直觉模糊集 Hamming 距离的灰关联测度以提高方案之间的区分度。研究结果表明, 利用所提方法得到的评估结果与专家评估结果一致, 验证了其合理性和可行性。

关键词 图像处理; 伪装效果评估; 高光谱; 空谱特征; 直觉模糊集; 逼近理想解的排序算法; 灰关联

中图分类号 E951.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051003

Synthetic Evaluation Method of Hyperspectral Camouflage Effect Based on Intuitionistic Fuzzy Decision

Fang Hao*, Li Aihua, Wang Tao, Chang Hongwei

Institute of War Support, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract In order to evaluate the camouflage effect of national defense engineering using hyperspectral remote sensing images, a comprehensive evaluation method for hyperspectral camouflage effect based on intuitionistic fuzzy decision is proposed. A comprehensive evaluation index system for hyperspectral camouflage effect is established, which including spectral pan-similarity measure, brightness contrast, visual similarity measure and structural similarity measure. A multi-attribute decision-making model based on intuitionist fuzzy sets is established for hyperspectral camouflage effect evaluation as well. The algorithm for order preference by similarity to an ideal solution is adopted for model decision, and a grey correlation measure based on Hamming distance is further proposed to improve the distinguishing ability between different alternatives. The research results show that the evaluation results obtained by the proposed method are consistent with those from expert evaluation, and thus its feasibility and rationality are verified.

Key words image processing; camouflage effect evaluation; hyperspectral; spatial and spectral features; intuitionistic fuzzy sets; algorithm for order preference by similarity to an ideal solution; grey correlation

OCIS codes 100.3008; 100.4145; 110.4234

1 引言

高光谱遥感影像能够获取目标连续的精细化光谱, 能够通过光谱曲线对目标特性进行分析, 因而具有很强的目标识别能力^[1]。作为一种重要的侦察手段, 高光谱遥感对国防工程的伪装构成了严重的威胁^[2-3]。高光谱伪装效果评估的目的是评估国防工

程在高光谱检测手段下的伪装效果, 对于全面分析工程的高光谱暴露征候、评估工程的伪装效果、提高工程对抗高光谱侦察的能力等具有重要意义^[4]。

目前, 高光谱伪装效果评估的研究主要集中在指导伪装器材设计、伪装目标检测等领域^[5-6], 对国防工程等军事目标的高光谱伪装效果评估问题研究较少。高光谱伪装效果评估主要包括评价指标和评

估方法两个方面^[7]。对于评价指标而言,目前主要包括:1) 仅采用光谱信息建立评价指标。如刘恂等^[8]采用伪装目标和背景的光谱特征及光谱导数特征的综合相似度为评价指标,用于面向高光谱探测的伪装效果评估;颜文俊等^[9]采用特征光谱的离散采样值建立训练样本,基于样本的特征矢量作为评价指标。2) 结合光谱和影像特征建立评价指标。如郭彤等^[10]结合光谱曲线形状相似度、光谱欧氏距离以及纹理欧氏距离作为伪装效果综合评价指标;华文深等^[11]采用光谱特征距离与小波纹理特征距离作为测度。对于评估方法而言,目前主要采用简单的匹配测度进行评判,如马氏距离测度、欧氏距离测度、光谱夹角匹配等^[10-11]。这类评估方法原理简单,过于依靠主观经验,虽然能够用于比较不同目标的高光谱伪装效果,但是无法衡量伪装效果的好坏程度,同时无法为国防工程的伪装提供量化的评估结果。

针对绿色植被背景下国防工程的高光谱伪装效果评估问题,本文提出了一种基于直觉模糊决策的综合评估方法。直觉模糊集能够有效地刻画由于知识缺乏和主观判断导致的不确定属性信息,且比模糊集在处理模糊性和不确定性等方面更具灵活性和实用性^[12]。为降低评估过程对专家主观经验的依赖,将直觉模糊集用于高光谱伪装效果评价问题,结合伪装目标与背景的光谱维和空间维差异构建了评价指标体系,基于直觉模糊集理论建立了高光谱伪装效果评估多属性决策模型,并针对传统逼近理想解的排序(TOPSIS)决策算法中欧氏距离区分度不高的问题,提出了一种基于直觉模糊集 Hamming 距离的灰关联测度来表征方案之间的逼近程度,有效提高了方案之间的区分度。

2 融合空谱特征的高光谱伪装效果评价指标体系

由于高光谱影像能同步提取光谱信息和空间影像,因此利用伪装目标和背景的空间维和光谱维特征建立评价指标体系,主要包括光谱泛相似测度、亮度对比度、视觉相似性测度以及结构相似性测度等 4 种指标。光谱泛相似测度用于衡量目标光谱与背景光谱的相似性,后 3 个指标用于衡量目标与背景的空间维相似性。由于目标背景面积一般比较大,并不需要都参与计算,因此根据相关标准选择目标周围 9 倍面积作为背景区域计算空间维特征。如图 1 所示,背景区域由目标和周围与其面积相等的 8 个区域块组成。此外,本文主要对绿色植被背景下的高光谱伪装效果进行研究,因此在分析绿色植被共同光谱特征、对比伪装目标和植被光谱特征的基础上,确定了 509~590、675~775、775~864、950~1107、1107~1300、1304~1344 和 1550~1698 nm 等 7 个特征波段用于伪装效果评价^[13]。在每个特征波段内分别计算 4 种评价指标,可以得到高光谱伪装效果评价指标体系,如图 2 所示。



图 1 伪装目标与 9 倍面积背景间的位置关系

Fig. 1 Positional relationship between camouflage target and 9-fold area background

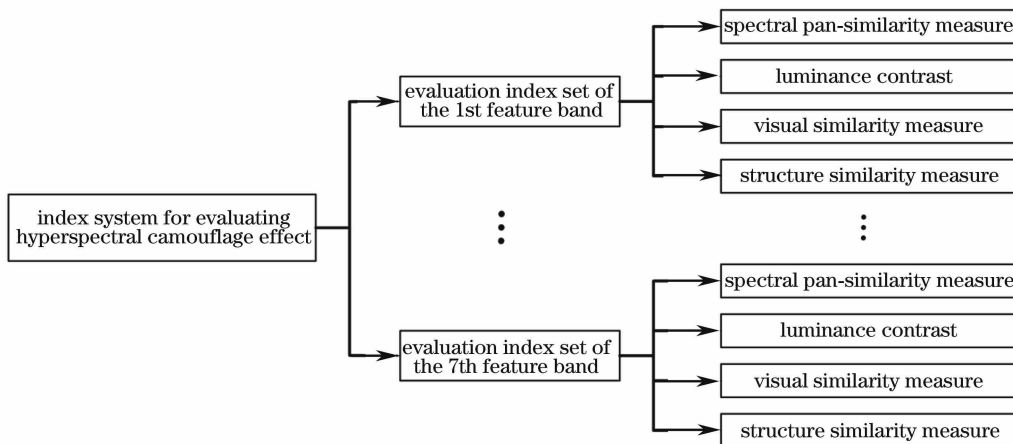


图 2 高光谱伪装效果评价指标体系

Fig. 2 Index system for hyperspectral camouflage effect evaluation

2.1 光谱泛相似测度

由于地物光谱的可变性,采用单一光谱特征无法全面反应光谱间的相似性,因此采用了一种新型光谱相似性测度,即光谱泛相似测度(SPM)^[14]。该测度兼顾了地物光谱矢量大小、光谱曲线形状和光谱信息量,并被证明具有更强的光谱判别能力和更小的光谱识别不确定性。对于任意两个归一化的光谱矢量 $\mathbf{r}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN})^T$ 和 $\mathbf{r}_j = (r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jN})^T$, N 为波段数,SPM 的公式为

$$T_{\text{SBD}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (r_{ik} - r_{jk})^2}, \quad (1)$$

$$T_{\text{SSD}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \left[\frac{1 - T_{\text{SCM}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)}{2} \right]^2, \quad (2)$$

$$T_{\text{SID}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \sum_{d=1}^N P_{id} [I(r_{jd}) - I(r_{id})] + \sum_{d=1}^N P_{jd} [I(r_{id}) - I(r_{jd})], \quad (3)$$

$$T_{\text{SPM}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = T_{\text{SID}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \times \sin \left[\sqrt{T_{\text{SBD}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)^2 + T_{\text{SSD}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)^2} \right], \quad (4)$$

式中: T_{SBD} 为两个光谱矢量之间的欧氏距离; T_{SSD} 为两个光谱曲线形状之间的差异, T_{SCM} 为光谱矢量间的皮尔森相关系数; T_{SID} 为两个光谱信息量的差异; $I(r_{id}) = -\log_e P_{id}$ 为 r_i 的第 d 个波段的自信息; $P_{id} = r_{id} / \sum_{n=1}^N r_{in}$ 为 r_i 的第 d 个波段的概率; T_{SPM} 指标由 T_{SBD} 、 T_{SSD} 、 T_{SID} 组成,且 T_{SPM} 值越小,两个光谱越相似。对于第 i 个特征波段内伪装目标和周围背景光谱的 SPM 指标,本文采用目标区域的平均特征光谱和 8 个背景区域内的平均特征光谱计算为

$$T_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 T_{\text{SPM}}(\mathbf{s}_{i,0}, \mathbf{s}_{i,j}), \quad (1 \leq i \leq 7), \quad (5)$$

式中: $\mathbf{s}_{i,0}$ 为第 i 个特征波段内伪装目标的平均特征光谱; $\mathbf{s}_{i,j}$ 为第 i 个特征波段内第 j 个背景区域块的平均特征光谱; $T_{\text{SPM}}(\mathbf{s}_{i,0}, \mathbf{s}_{i,j})$ 为第 i 个特征波段内目标区域与第 j 个背景区域块的 SPM 指标。 T_i 值越小,说明第 i 个特征波段内伪装目标与背景光谱越相似。

2.2 亮度对比度

亮度对比度是目标与周围背景融合程度的客观体现。对于第 i 个特征波段的亮度对比度,采用该特征波段内所有单波段影像的亮度对比度平均值进行计算为

$$B_{i,j} = \frac{|\bar{t}_{i,j} - \bar{b}_{i,j}|}{\bar{b}_{i,j}}, \quad 1 \leq i \leq 7, 1 \leq j \leq m_i, \quad (6)$$

$$B_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} B_{i,j}, \quad (7)$$

式中: $\bar{t}_{i,j}$ 、 $\bar{b}_{i,j}$ 分别为第 i 个特征波段内第 j 个波段影像中目标区域的平均亮度、背景区域的平均亮度; $B_{i,j}$ 为第 i 个特征波段内第 j 个波段的亮度对比度; m_i 为第 i 个特征波段内的波段数。 B_i 越小,说明第 i 个特征波段内目标与周围背景亮度差异越小。

2.3 视觉相似性测度

伪装目标与背景的差异越小,引起的人眼视觉差异就越小。因此,在伪装效果评价过程中引入了视觉相似性指标。目标结构相似性测度(TSSIM)是表征人眼对图像进行判读时视觉注意特性的一种有效模型^[15]。该模型基于亮度、对比度和结构信息,能够量化目标与背景的相似性^[16]。一般选取目标 $\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 和周围同等大小的第 j 个区域块 $\mathbf{B}_j = (B_{j,1}, \dots, B_{j,n})$, 计算 TSSIM 为

$$M(\mathbf{T}, \mathbf{B}_j) = \frac{4\mu_T \mu_{B_j} \sigma_{TB_j} + C}{(\mu_T^2 + \mu_{B_j}^2)(\sigma_T^2 + \sigma_{B_j}^2) + C}, \quad (8)$$

式中: μ_T 、 σ_T 、 μ_{B_j} 、 σ_{B_j} 、 σ_{TB_j} 分别为目标 \mathbf{T} 的均值和标准差、区域块 \mathbf{B}_j 的均值和标准差以及二者之间的协方差; C 为常数,用于平衡公式。由于背景面积为目标的 9 倍,因此在背景中可选取的区域块数量 $N=8$, 此处采用方均根来衡量目标与背景的整体视觉相似性为

$$M_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N M(\mathbf{T}, \mathbf{B}_j)^2}. \quad (9)$$

对于第 i 个特征波段的视觉相似性,可以采用该特征波段内所用单波段影像视觉相似性测度的平均值进行表征为

$$T_{M_i} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} M_{i,j}, \quad (10)$$

式中 $M_{i,j}$ 为第 i 个特征波段内第 j 个波段影像的视觉相似性,采用(9)式进行计算。

2.4 结构相似性测度

结构差异是伪装目标与背景产生差异的重要原因之一,因此定义了结构相似性测度以强化目标与背景结构差异带来的影响。边缘方向直方图是对目标中边缘点方向的统计,可以用来描述目标物体的结构信息。采用边缘方向直方图之间的 Bhattacharyya 系数表征目标与背景的结构差异。对于图像 x_1 和 x_2 , 图像结构相似性测度计算为

$$S(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \sum_{\theta} \sqrt{h(\mathbf{x}_1)h(\mathbf{x}_2)}, \quad (11)$$

式中: $h(\mathbf{x}_1)$ 和 $h(\mathbf{x}_2)$ 分别表示图像 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 归一化

的边缘方向直方图; Ω 为直方图 bin 值的集合。对于第 i 个特征波段的结构相似性, 采用该特征波段内所用单波段影像结构相似性测度的平均值进行表征为

$$S_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} S_{i,j}, \quad (12)$$

式中 $S_{i,j}$ 为第 i 个特征波段内第 j 个波段影像的结构相似性测度, 采用(11)式进行计算。

3 基于直觉模糊集的伪装效果评估过程

3.1 问题分析与建模

目前, 国防工程的伪装效果评估是通过评估等级的形式给出的。本文借鉴这种形式, 通过评估等级给出高光谱伪装效果评价的结果。根据相关标准, 定义 4 种评估等级为 I、II、III 和 IV 级, 其中 I 级为伪装效果最好的等级, 而 IV 级为伪装效果最差的等级。对于任一伪装目标, 基于直觉模糊集推理得到每个特征波段的伪装评估等级。基于各个特征波段的评估结果进行加权计算, 得到伪装目标最终的评估等级。假设 $s_{i,l}$ 表示第 i 个特征波段内第 l 个评价指标 (l 为 1、2、3、4 分别表示光谱泛相似测度、亮度对比度、视觉相似性测度和结构相似性测度), L_i 表示第 i 个特征波段的伪装评估等级, w_i 表示第 i 个特征波段的权重, 则伪装目标的评估等级 S 为

$$L_i = F(s_{i,1}, s_{i,2}, s_{i,3}, s_{i,4}), \quad (13)$$

$$S = \text{round}\left(\sum_{i=1}^7 w_i \cdot L_i\right), \quad (14)$$

式中: $F(\cdot)$ 为每个特征波段采用直觉模糊集进行推理得到的伪装评估等级; $\text{round}(\cdot)$ 函数为对各特征波段加权并进行四舍五入得到最终的评估等级。

3.2 基于直觉模糊集的伪装等级多属性决策模型

通过各个特征波段的指标集计算对应的评估等级实际上是一个多属性决策问题。采用直觉模糊集来建立多属性决策模型, 核心在于建立直觉模糊决策矩阵。1) 根据评估等级定义决策方案集 $\mathbf{A} = \{\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4\}$, 其中 \mathbf{A}_p ($p = 1, 2, 3, 4$) 表示评估等级为 p 级; 2) 根据评价指标建立属性集 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, 其中 x_1, x_2, x_3 和 x_4 分别为光谱泛相似测度、亮度对比度、视觉相似性测度以及结构相似性测度等 4 种指标。直觉模糊决策矩阵主要由不同方案与不同属性之间对应的直觉模糊集组成。假设 \mathbf{F}_{pq} 表示方案 \mathbf{A}_p 与属性 x_q 之间的直觉模糊集, 则有

$$\mathbf{F}_{pq} = \{\langle \mu_{pq}, \nu_{pq} \rangle \mid x_q \in \mathbf{X}\}, \quad (15)$$

式中: $\mu_{pq} \in [0, 1]$ 为属性 x_q 对于方案 \mathbf{A}_p 的隶属程度; $\nu_{pq} \in [0, 1]$ 表示属性 x_q 对于方案 \mathbf{A}_p 的非隶属程度; $\pi_{pq} \in [0, 1]$ 为属性 x_q 对于方案 \mathbf{A}_p 的犹豫度。因此决策模型的直觉模糊决策矩阵可以表示为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \langle \mu_{11}, \nu_{11} \rangle & \langle \mu_{12}, \nu_{12} \rangle & \langle \mu_{13}, \nu_{13} \rangle & \langle \mu_{14}, \nu_{14} \rangle \\ \langle \mu_{21}, \nu_{21} \rangle & \langle \mu_{22}, \nu_{22} \rangle & \langle \mu_{23}, \nu_{23} \rangle & \langle \mu_{24}, \nu_{24} \rangle \\ \langle \mu_{31}, \nu_{31} \rangle & \langle \mu_{32}, \nu_{32} \rangle & \langle \mu_{33}, \nu_{33} \rangle & \langle \mu_{34}, \nu_{34} \rangle \\ \langle \mu_{41}, \nu_{41} \rangle & \langle \mu_{42}, \nu_{42} \rangle & \langle \mu_{43}, \nu_{43} \rangle & \langle \mu_{44}, \nu_{44} \rangle \end{bmatrix}, \quad (16)$$

同时, 考虑不同指标的权重差异, 在专家决策的基础上定义属性集 \mathbf{X} 对应的权重向量 $\mathbf{w}' = (w'_1, w'_2, w'_3, w'_4)$ 。

3.3 基于灰关联 TOPSIS 的评估等级决策过程

采用 TOPSIS 算法对上述多属性决策模型进行求解。TOPSIS^[17] 是多属性决策问题中的一种常用方法, 核心思想是建立正、负理想方案, 然后计算不同方案与二者之间的欧氏距离, 并按照相对接近度进行降序排列, 将排列最前面的方案作为最终的决策方案。但是传统 TOPSIS 方法采用的欧氏距离产生的方案可能与正理想方案相近, 也可能与负理想方案相近。为此, 提出基于直觉模糊集 Hamming 距离的灰关联测度定义方案之间的距离, 以提高方案的可区分度。基于灰关联 TOPSIS 的决策过程如下:

1) 分别按照“最大隶属度、最小非隶属度”和“最小隶属度、最大非隶属度”的原则建立正、负理想方案为

$$\mathbf{A}^+ = (\langle \mu_1^+, \nu_1^+ \rangle, \dots, \langle \mu_4^+, \nu_4^+ \rangle), \quad (17)$$

$$\mathbf{A}^- = (\langle \mu_1^-, \nu_1^- \rangle, \dots, \langle \mu_4^-, \nu_4^- \rangle), \quad (18)$$

式中: μ_q^+ 为 $\max_{1 \leq p \leq 4} \{\mu_{pq}\}$; ν_q^+ 为 $\min_{1 \leq p \leq 4} \{\nu_{pq}\}$; μ_q^- 为 $\min_{1 \leq p \leq 4} \{\mu_{pq}\}$; ν_q^- 为 $\max_{1 \leq p \leq 4} \{\nu_{pq}\}$ 。

2) 计算各方案 \mathbf{A}_p ($1 \leq p \leq 4$) 与 \mathbf{A}^+ 、 \mathbf{A}^- 之间的距离。由于计算各方案与 \mathbf{A}^+ 和 \mathbf{A}^- 距离的过程类似, 因此以计算 \mathbf{A}_p 与 \mathbf{A}^+ 的距离为例进行说明。

① 结合各属性的权重, 采用直觉模糊集之间的加权 Hamming 距离表征 \mathbf{A}_p 与 \mathbf{A}^+ 中第 k 个属性的接近程度为

$$h[\mathbf{A}^+(k), \mathbf{A}_p(k)] = w'_k \cdot (|\mu_k^+ - \mu_{pk}| + |\nu_k^+ - \nu_{pk}| + |\pi_k^+ - \pi_{pk}|). \quad (19)$$

② 计算 \mathbf{A}_p 与 \mathbf{A}^+ 中第 k 个属性的灰关联系数为

$$\gamma[A^+(k), A_p(k)] = \frac{\min_p \min_k h[A^+(k), A_p(k)] + \xi \max_p \max_k h[A^+(k), A_p(k)]}{h[A^+(k), A_p(k)] + \xi \max_p \max_k h[A^+(k), A_p(k)]}, \quad (20)$$

式中 ξ 为权重, 一般取 0.5。

③ 计算 A_p 与 A^+ 的加权灰关联系数为

$$\gamma(A^+, A_p) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \gamma[A^+(k), A_p(k)]. \quad (21)$$

3) 建立相对接近度准则。由于灰关联系数越大, 方案之间的接近程度越高, 因此可以建立相对接近度公式为

$$\lambda_p = \frac{\gamma(A^+, A_p)}{\gamma(A^+, A_p) + \gamma(A^-, A_p)}. \quad (22)$$

4) 基于 λ_p 降序排列所有待选方案。排名最靠前的方案为最终的评估等级。

4 实验结果与分析

4.1 实验一

为了获取高光谱伪装效果检测数据, 通过直升机搭载高光谱成像仪进行低空伪装效果检测实验。实验用的高光谱成像仪包含可见光和近红外两个子相机, 其中可见光相机的光谱范围为 400 ~ 1000 nm, 波段数为 171 个; 近红外相机的光谱范围为 900 ~ 1700 nm, 波段数为 256 个。直升机的飞行

高度为 800 m, 采集的高光谱影像的空间分辨率为 0.624 m, 光谱分辨率优于 5 nm。选取 A、B 和 C 伪装目标开展高光谱伪装效果评估实验, 提取的伪装目标及其周围背景区域的单波段高光谱影像如图 3 所示。

分别从 3 个伪装目标的高光谱伪装效果检测数据中提取对应的 7 个特征波段的影像, 并计算各个特征波段影像的 4 种评价指标, 进而可以得到 3 个目标的评价体系指标值。然后采用专家群决策方式建立各个指标值与 4 种待选方案之间的直觉模糊集, 进而得到 3 个目标各个特征波段的直觉模糊决策矩阵, 为后续评估决策过程奠定基础。同时, 为了得到更加客观公正的权重值, 邀请多位专家采取层次分析法(AHP)给出特征波段的权重和属性集的权重, 并计算各权重的平均值, 从而得到特征波段的权重向量 w 和属性集的权重向量 w' 为

$$w = [0.4424, 0.2840, 0.1135, 0.0530, 0.0530, 0.0270, 0.0270], \quad (23)$$

$$w' = [0.3509, 0.3509, 0.1891, 0.1091]. \quad (24)$$

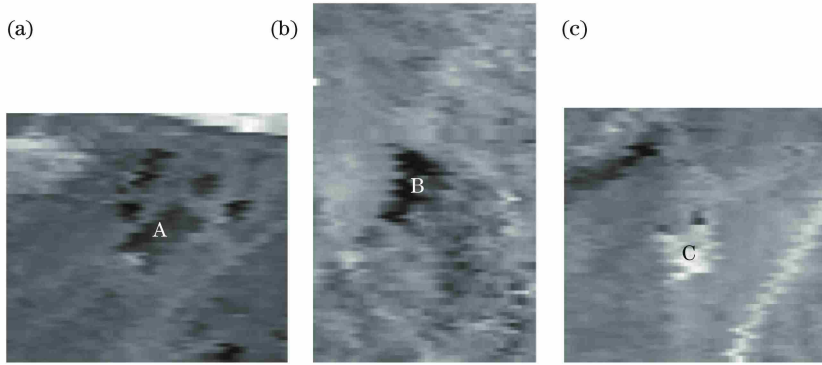


图 3 高光谱伪装效果检测图像。(a) 目标 A; (b) 目标 B; (c) 目标 C

Fig. 3 Detection images of hyperspectral camouflage effect. (a) Target A; (b) target B; (c) target C

基于伪装目标各特征波段的直觉模糊决策矩阵和属性集的权重向量 w' , 采用上述灰关联 TOPSIS 算法进行决策, 得到 3 个伪装目标各特征波段不同待选方案的相对接近度如表 1 所示, 通过降序排列得到各特征波段的评估等级如表 2 所示。在此基础

上, 结合各特征波段的权重向量 w , 通过加权计算得到 3 个伪装目标最终的高光谱伪装效果等级如表 3 所示。算法得到的评估结果与专家决策评估等级完全一致, 验证了算法的合理性和可行性。但由于实验采集的样本数量有限, 还无法说明算法的有效性。

表 1 伪装目标各特征波段的相对接近度

Table 1 Relative proximity of each feature band of camouflage targets

Camouflage target	1st feature band	2nd feature band	3rd feature band	4th feature band	5th feature band	6th feature band	7th feature band	
A	A ₁	0.5948	0.5020	0.4584	0.4389	0.5222	0.4671	0.5160
	A ₂	0.5471	0.5561	0.5309	0.4435	0.4173	0.4395	0.5037
	A ₃	0.4052	0.4868	0.4112	0.5146	0.4944	0.5764	0.4653
	A ₄	0.4829	0.5337	0.4114	0.4237	0.4258	0.5553	0.4204
B	A ₁	0.5052	0.4414	0.5028	0.4941	0.4758	0.46487	0.5069
	A ₂	0.5773	0.5245	0.4788	0.4992	0.4890	0.5335	0.5236
	A ₃	0.4284	0.5035	0.4250	0.4535	0.5211	0.4477	0.4662
	A ₄	0.4654	0.4900	0.4703	0.5057	0.5193	0.4332	0.4566
C	A ₁	0.4581	0.5088	0.4577	0.5132	0.5198	0.4453	0.4129
	A ₂	0.4682	0.5234	0.5640	0.4586	0.4568	0.5118	0.4910
	A ₃	0.4106	0.4577	0.4608	0.4346	0.4809	0.4576	0.4762
	A ₄	0.4614	0.5285	0.4951	0.4585	0.4406	0.4762	0.4964

表 2 方案集在伪装目标各特征波段的降序排列

Table 2 Descending order of scheme sets in each feature band of camouflage targets

Camouflage target	1st feature band	2nd feature band	3rd feature band	4th feature band	5th feature band	6th feature band	7th feature band
A	1	2	2	3	1	3	1
B	2	2	1	4	3	2	2
C	2	4	2	1	1	2	4

表 3 不同目标的高光谱伪装效果评估等级

Table 3 Hyperspectral camouflage effect evaluation levels for different targets

Different result	A	B	C
Result for weighted sum	1.5576	2.0456	2.5159
Evaluation level	Level II	Level II	Level III

表 4 不同算法评估结果的对比

Table 4 Comparison of evaluation results by different algorithms

Evaluation result	A	B	C
Proposed method	Level II	Level II	Level III
TOPSIS	Level I	Level II	Level II
Expert result	Level II	Level II	Level III

4.2 实验二

为验证改进的决策方法的有效性,将传统 TOPSIS 决策算法、灰关联 TOPSIS 决策方法的评估结果分别与专家评估结果进行比对,如表 4 所示。可以看到,采用传统 TOPSIS 方法得到目标 A 和 C 的评估等级与专家评估结果不一致,而灰关联 TOPSIS 决策方法得到的结果与专家评估结果完全一致。这说明本文提出的灰关联 TOPSIS 决策方法比传统 TOPSIS 方法对上述目标的评价更加有效。主要原因是提出的基于直觉模糊集 Hamming 距离的灰关联测度比传统欧氏距离的区分度更好,能够更加准确地表征各待选方案与正、负理想方案之间的距离。

5 结 论

为了对国防工程等军事目标的高光谱伪装效果进行评估,从伪装目标与背景地物的光谱曲线差异、融合程度、视觉相似以及空间结构相似等方面建立了评价指标体系,并提出了基于直觉模糊决策的高光谱伪装效果评估方法。实验结果表明,所提方法能够得到与专家评估完全一致的结果,说明了方法的合理性和可行性。但由于实际样本数量较少,因而需要进一步扩大样本空间以验证算法的有效性。该研究为高光谱伪装效果评估提供了新的思路,而且对实际的高光谱伪装效果评估具有借鉴意义。同时,改进的灰关联测度比传统的欧氏距离在表征方案之间距离时更加准确有效。

参 考 文 献

- [1] Wang Q, Yang G, Zhang J F, *et al.* Band selection based on local joint skewness and kurtosis for hyperspectral image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111004.
王琪, 杨桃, 张俭峰, 等. 基于局部联合偏度-峰度的高光谱图像波段选择方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111004.
- [2] Shen H, Cao G H, Ning Q, *et al.* Analysis of challenges and opportunities for camouflage in national defense engineering by remote sensing technologies [J]. *Geological Survey of China*, 2017, 4(3): 70-73.
沈泓, 曹国侯, 宁强, 等. 浅析遥感技术给国防工程伪装带来的挑战与机遇 [J]. *中国地质调查*, 2017, 4(3): 70-73.
- [3] Ma Y P, Zhang W, Liu D X. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets [J]. *Aerospace Shanghai*, 2012, 29(1): 37-40, 59.
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, 59.
- [4] Wang X L, Wang F, Liu X, *et al.* Hyperspectral polarization characteristics of typical camouflage target under desert background [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051101.
王小龙, 王峰, 刘晓, 等. 荒漠背景下典型伪装目标的高光谱偏振特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051101.
- [5] Yang J, Hua W S, Liu X, *et al.* Analysis on the hyperspectral characteristics of pattern painting camouflage [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(5): 27-31.
杨佳, 华文深, 刘恂, 等. 迷彩伪装的高光谱特性分析 [J]. *光学仪器*, 2013, 35(5): 27-31.
- [6] Liu Z G, Lu Y L, Wei Y W. Supervised method for hyperspectral image camouflage target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3076-3081.
刘志刚, 卢云龙, 魏一苇. 有监督的高光谱图像伪装目标检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3076-3081.
- [7] Fang H, Li A H, Pan Y L, *et al.* The effect evaluation of infrared camouflage simulation system based on visual similarity [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(2): 351-357.
方浩, 李艾华, 潘玉龙, 等. 面向视觉相似的红外伪装仿真效果评估 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(2): 351-357.
- [8] Liu X, Hua W S, Yang J. Camouflage effect evaluation based on hyperspectral detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3228-3232.
刘恂, 华文深, 杨佳. 面向高光谱探测的伪装效果评价方法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3228-3232.
- [9] Yan W J, Wang T Z. Research on testing method for camouflage of ground target in high spectral imaging [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2007, 24(1): 4-6.
颜文俊, 王同招. 高光谱遥感影像地面伪装目标检测方法的研究 [J]. *机电工程*, 2007, 24(1): 4-6.
- [10] Guo T, Hua W S, Liu X, *et al.* A comprehensive evaluation method for the optical camouflage effect based on hyperspectra [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101002.
郭彤, 华文深, 刘恂, 等. 一种基于高光谱的光学伪装效果综合评价方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101002.
- [11] Hua W S, Yang J, Liu X, *et al.* Camouflage assessment based on hyperspectral characteristics [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 964-967.
华文深, 杨佳, 刘恂, 等. 基于高光谱特征的迷彩伪装评价 [J]. *应用光学*, 2013, 34(6): 964-967.
- [12] Zhang Y J, Ma P J, Su X H, *et al.* Multi-attribute decision making with uncertain attribute weight information in the framework of interval-valued intuitionistic fuzzy set [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 220-228.
张英俊, 马培军, 苏小红, 等. 属性权重不确定条件下的区间直觉模糊多属性决策 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(2): 220-228.
- [13] Liu Z M, Hu B R, Wu W J, *et al.* Spectral imaging of green coating camouflage under hyperspectral detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 885-890.
刘志明, 胡碧茹, 吴文健, 等. 高光谱探测绿色涂料伪装的光谱成像研究 [J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 885-890.
- [14] Kong X B, Shu N, Tao J B, *et al.* A new spectral similarity measure based on multiple features integration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(8): 2166-2170.
孔祥兵, 舒宁, 陶建斌, 等. 一种基于多特征融合的

- 新型光谱相似性测度[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2166-2170.
- [15] Toet A. Structural similarity determines search time and detection probability [J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53(6): 464-468.
- [16] Chang H H, Zhang J Q. Detection probability and detection time using clutter metrics [J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 51(2): 83-90.
- [17] Gu H, Song B F. Study on effectiveness evaluation of weapon systems based on grey relational analysis and TOPSIS[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(1): 106-111.