

高光谱目标探测中的空间和光谱尺度效应

石婷婷^{1,2}, 张立福¹, 岑奕¹, 孙雪剑^{1,2}, 高英倩¹, 童庆禧¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 高光谱遥感目标探测主要利用目标和背景的光谱特征差异进行目标识别。一般情况下, 影像的空间和光谱分辨率越高, 探测效果越好。但多数情况下空间和光谱分辨率难以同时满足需求。针对该问题, 本文利用 Field Imaging Spectrometer System (FISS) 地面高光谱成像仪器, 通过在稀疏草地上布设人工绿色目标, 研究了目标和背景光谱相似情况下, 单一均匀背景下小目标探测问题, 提出空间和光谱尺度定量分析方法, 得到目标探测适用的空间和光谱尺度。结果表明: (1) 利用 FISS 高光谱仪器进行人工目标探测, 所需的分辨率约为目标尺寸的 2 倍以内; (2) 当光谱分辨率优于 40 nm 时, 目标和背景的两个主要特征: 反射峰的位置和波段趋势差异均可被描述, 在原始空间分辨率 5 倍 (0.85 cm) 以内, 探测精度可以达到 0.94 以上。由于反射峰间距 20 nm, 当光谱分辨率低于 40 nm 时, 该特征消失, 造成探测精度的下降; (3) 当光谱分辨率低于 40 nm 时, 选取目标、背景光谱特征差异较大的波段可提高探测的有效性, 在舍弃目标背景相似波段后, 探测精度上升, 得到本实验的最佳波段组合为红、绿、蓝、黄及红边波段。

关键词: 高光谱, 目标探测, 空间分辨率, 光谱分辨率, 尺度效应, 合适尺度

中图分类号: TP79 文献标志码: A

引用格式: 石婷婷, 张立福, 岑奕, 孙雪剑, 高英倩, 童庆禧. 2015. 高光谱目标探测中的空间和光谱尺度效应. 遥感学报, 19(6): 954-963

Shi T T, Zhang L F, Cen Y, Sun X J and Gao Y Q. 2015. Effects of spatial and spectral scale on hyperspectral target detection. Journal of Remote Sensing, 19(6): 954-963 [DOI: 10.11834/jrs.20155012]

1 引言

高光谱目标探测主要利用目标与背景在光谱特征上存在的差异进行检测识别(童庆禧等, 2006), 因此, 光谱分辨率是高光谱目标探测中的重要指标。但由于遥感成像系统的设计限制, 当信噪比一定时, 光谱分辨率和空间分辨率难以同时达到较高水平(Winter等, 2007), 为追求高的光谱分辨率, 空间分辨率必然受到限制, 使得待探测目标成为亚像元, 如果待探测目标占整个像元的比例不高, 目标丰度过小, 使目标光谱特征不明显, 造成探测精度下降(童庆禧等, 2006)。尤其是受到背景光谱的影响, 不同空间尺度下目标的光谱特征会产生变化(Manolakis等, 2001), 空间分辨率也是目标探

测中的重要指标。针对目标探测, 一般情况下, 空间和光谱分辨率越高, 探测精度越好。但这两个指标不可能也没必要追求最高水平, 因此, 研究空间尺度和光谱尺度对探测精度的影响, 合理设计最佳的探测仪器的空间和光谱尺度, 无论是对于载荷研制部门还是数据应用部门, 都尤为重要。

尺度效应是遥感领域中的一大基本问题(李小文和王祎婷, 2013; 刘良云, 2014; Ding和Kerekes, 2013), 研究高光谱目标探测的尺度效应, 对提高实际问题中目标探测的精度具有重大意义。虽然很多学者对改进算法提高探测精度进行了详尽研究(Manolakis等, 2014; Nasrabadi, 2014), 但关于空间和光谱尺度与目标探测精度关系的研究却相对匮乏。在空间分辨率不足的情况下, Qian和Chen

收稿日期: 2015-01-13; 修订日期: 2015-07-01; 优先数字出版日期: 2015-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41371359, 41371362, 41272364)

第一作者简介: 石婷婷(1990—)女, 硕士研究生, 主要研究方向为高光谱遥感目标探测。E-mail: shitt@radi.ac.cn

通信作者简介: 张立福(1967—)男, 研究员, 博导, 主要研究方向为高光谱遥感机理及典型应用。E-mail: zhanglf@radi.ac.cn

(2012) 通过添加空间辅助信息,一定程度上提高了探测精度,但 Villa 等人(2013) 提出,当选择的高光谱数据源空间分辨率不足时,探测精度必会受到很大制约。张兵和高连如(2011) 研究了不同空间分辨率下木板和铝板光谱特征的变化,得出空间分辨率降低到一定程度时,目标特征逐渐消失,将不能区分这两种板材; Matheson 和 Dennison(2012) 等通过空间采样得到 5—60 m 分辨率的 AVIRIS 高光谱数据,评估了空间分辨率在高光谱火灾探测和温度反演上的影响,得出空间分辨率的下降时,探测得到的火灾面积增加,反演得到的温度降低。此外, Borowski 等人(1998) 指出光谱采样间隔、波段组合、目标背景特征差异都会影响探测精度。Adeline 等人(2013) 使用一系列高空间分辨率多光谱数据探测阴影,得出光谱波段变化时,选用 RGB 和近红波段的组合精度较高。然而这些研究只是针对空间分辨率和光谱分辨率单一指标进行定性分析,没

有对两个指标的综合影响及尺度变化对探测精度的影响进行定量研究。

本文基于自主研制的 Field Imaging Spectrometer System(FISS) 地面高光谱成像仪,通过设计高光谱目标探测试验,获得高空间和高光谱分辨率的试验数据,定量评价目标探测所需的空间和光谱尺度。

2 数据与方法

2.1 实验数据

本文使用的影像数据是由地面成像光谱辐射测量系统 FISS 采集,仪器光谱范围为 379—870 nm,光谱分辨率 4—7 nm,采样间隔约 1.4 nm,FISS 主要参数和性能指标详见参考文献(童庆禧等,2010)。本文的研究目标是绿色布,背景为稀疏草地,绿色布与稀疏草地颜色相近。采集到的数据如图 1 所示。

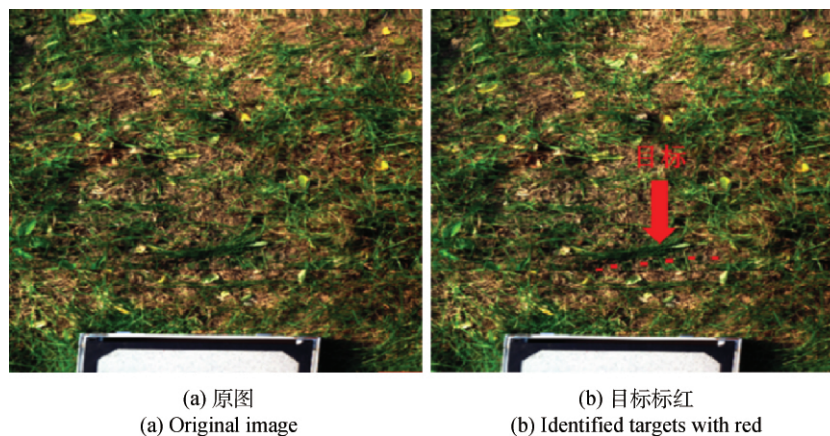


图 1 实验数据(真彩色显示)

Fig. 1 Test images (displayed as true color)

本实验中将绿色布裁剪成 6 个 1 cm × 1 cm 的小块放在稀疏草地上,肉眼很难看出绿色布的具体区域,如图 1(a) 所示,目标在图 1(b) 中用红色标出。每块绿色布大约占像元 35 个,图像的空间分辨率约为 0.17 cm,图像大小为 475 × 464 个像元,目标约占图像的 0.1%。经过辐射校正和基于标准版的反射率计算,去除无标准版反射系数和低信噪比的波段,保留了波谱范围从 400—800 nm 之间的 221 个波段。

图像中的主要地物为草地和裸土,背景光谱主要由这两种光谱混合而成,目标与背景光谱较为相似,在降空间分辨率的过程中,随着目标与背景光谱的混合,目标特征将逐渐减弱,存在空间分辨率

降到某种程度时,目标与背景混为一体,无法探测出来。同理,光谱分辨率下降到一定程度时,目标和背景特征区分消失,探测精度下降。

2.2 研究方法

本文的目的是对高光谱目标探测所需的空间尺度和光谱尺度进行定量评价,首先需要模拟不同空间和光谱尺度下的高光谱图像,并选择合适的目标探测算法以及精度评价方法进行实验与分析,具体研究方法包括以下几个步骤。

(1) 数据处理。通过对该高空间、高光谱分辨率数据进行空间降采样和光谱降采样的方式获得不同空间和光谱分辨率的图像数据。空间降采样

方法选用与线性混合模型 (Sabot 等, 1992) 原理一致的像元聚合 (Pixel Aggregate) 算法, 模拟目标与背景的混合。光谱降采样的方法是选用高斯函数来模拟波谱响应曲线;

(2) 目标探测空间尺度分析。选择适用于未知背景条件下的 Constrained Energy Minimization (CEM) 目标探测算法, 利用已知的目标光谱, 由高到低对每个空间尺度下的高光谱图像进行目标探测实验, 并使用 Receiver Operation Characteristic (ROC) 曲线与 X 轴围成的面积来评价探测的精度。在探测精度出现较大变化之前的尺度, 即为该目标探测的有效空间尺度;

(3) 目标探测光谱尺度分析。同样选择 CEM 探测算法和 ROC 评价方法, 在目标无混合和有混合两种情况下, 对不同光谱尺度的影像进行探测实验, 得到目标探测的合适光谱尺度。当达不到合适光谱尺度时, 通过组合现有多光谱传感器的波段, 得到最佳波段的设置。

2.2.1 CEM 目标探测算法

约束能量最小化方法 CEM (Harsanyi, 1993) 是在仅知道感兴趣目标的光谱, 对背景一无所知的条件下对目标进行探测和提取的算法, 适用于目标占图像总方差比例很小的情况。

CEM 算子为:

$$\omega^* = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}}{\mathbf{d}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}} \quad (1)$$

式中 \mathbf{R} 为影像的自相关矩阵, \mathbf{d} 为目标光谱。将 CEM 算子作用于图像中的每个像元, 将得到目标在图像中的分布情况, 实现对目标的探测, 如式 (2) 所示:

$$y = D_{\text{CEM}}(\mathbf{x}) = \omega^{*T}\mathbf{x} = \left(\frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}}{\mathbf{d}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}}\right)^T \mathbf{x} = \frac{\mathbf{x}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}}{\mathbf{d}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}} \quad (2)$$

这一过程被重复应用于影像中所有像元, 就可以得到探测统计量影像。目标和背景的决策统计量差异越大, 可分性越强, 探测效果越好。

2.2.2 精度评价方法

衡量不同条件下高光谱遥感影像目标探测方法效果的最重要指标是目标探测率和虚警率, 并且通常以不同阈值下对应的一系列目标探测率和虚警率绘制 ROC 曲线来直观地衡量探测方法的优劣 (Nasrabadi 等, 2014), 如图 2 所示。

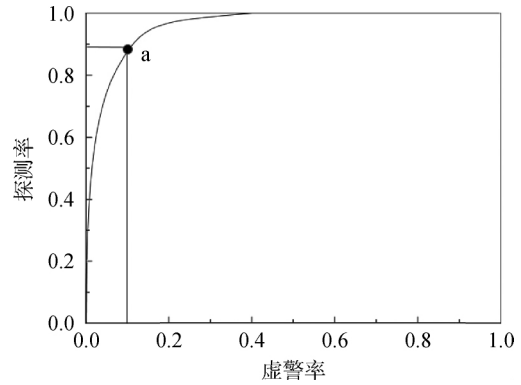


图 2 ROC 曲线

Fig. 2 ROC curve

ROC 曲线是从统计决策理论中发展起来的一种通过衡量在不同虚警率条件下探测率变化, 以靠近左上角的曲线为更优的二分性问题的分析方法, 该方法已经成为衡量目标探测算法的重要指标。探测率和虚警率的定义分别为:

$$P_d = \frac{N_d}{N_t} \quad (3)$$

$$P_f = \frac{N_{\text{miss}}}{N_{\text{tot}}} \quad (4)$$

式中 P_d 为探测率, P_f 为虚警率, N_d 为分割阈值下正确判断为目标个数, N_t 为目标总数, N_{miss} 为错误判断为目标的个数, N_{tot} 为像元总数。探测率和虚警率都是范围从 0 到 1 的一组值, 将虚警率作为 X 轴, 探测率作为 Y 轴, 得到的就是向左上角弯曲的曲线, 曲线的形状可以作为评价特征检测性能的标准。图 2 中的 a 点即是虚警率为 0.1 时探测率为 0.9。为了更具体化探测的精度, 本文将 ROC 探测曲线与 X 轴包围的面积作为定量的指标, 称为探测精度。如果面积等于 1, 曲线成为一条折线, 说明能完全识别目标, 如果面积等于 0.5, 曲线成为一条直线, 说明完全没有识别目标的能力。

3 结果与分析

3.1 目标探测的空间尺度

原始影像的空间分辨率约为 0.17 cm, 按照原始影像空间分辨率的 5—15 倍采样, 采样后的空间分辨率分别为 0.85—2.55 cm, 采样尺度与空间分辨率的对应关系如表 1 所示。

空间尺度变化对探测精度的影响如图 3 所示。空间分辨率与探测精度关系曲线如图 4 所示。精度出大幅变化的分辨率探测统计量 3 维图如图 5 所示。

表 1 采样尺度与空间分辨率的对应关系

Table 1 Correspondence between sampling scale and spatial resolution

采样尺度	1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
空间分辨率/cm	0.17	0.85	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	1.87	2.04	2.21	2.38	2.55

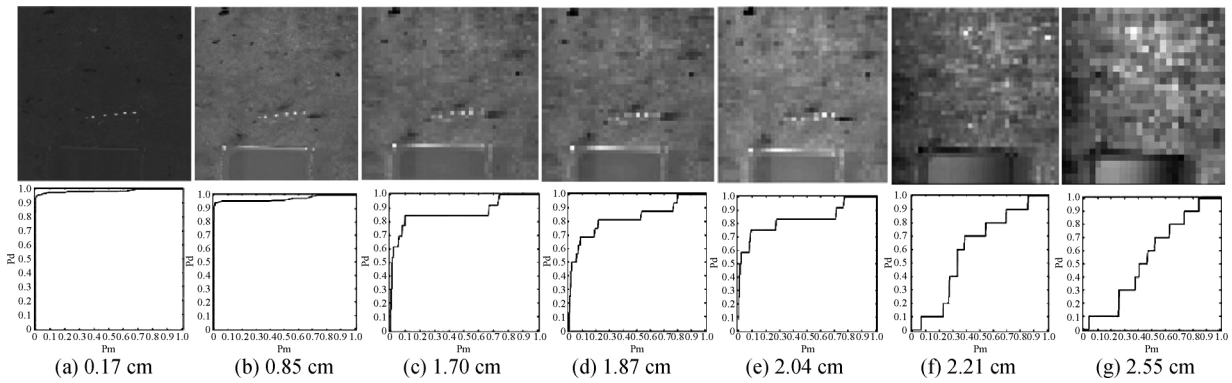


图 3 空间尺度变化对探测精度的影响

Fig. 3 Impact of spatial scale on the detection accuracy

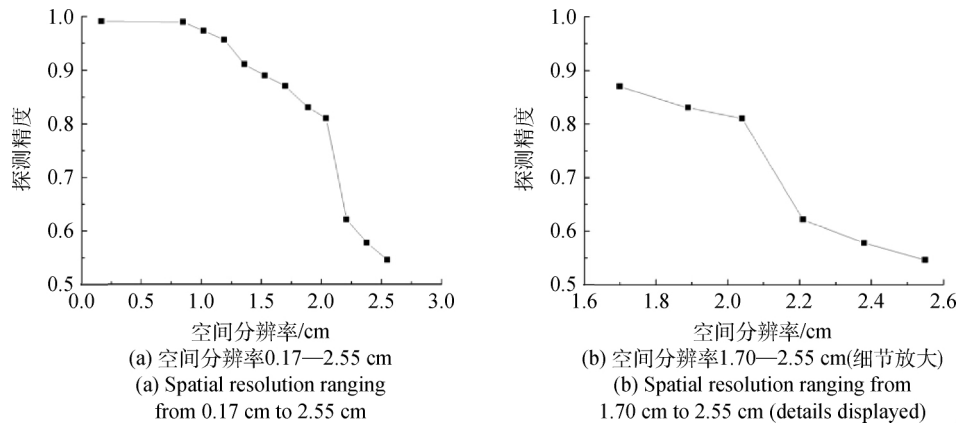


图 4 空间分辨率与探测精度关系曲线

Fig. 4 Curve between the spatial resolution and detection accuracy

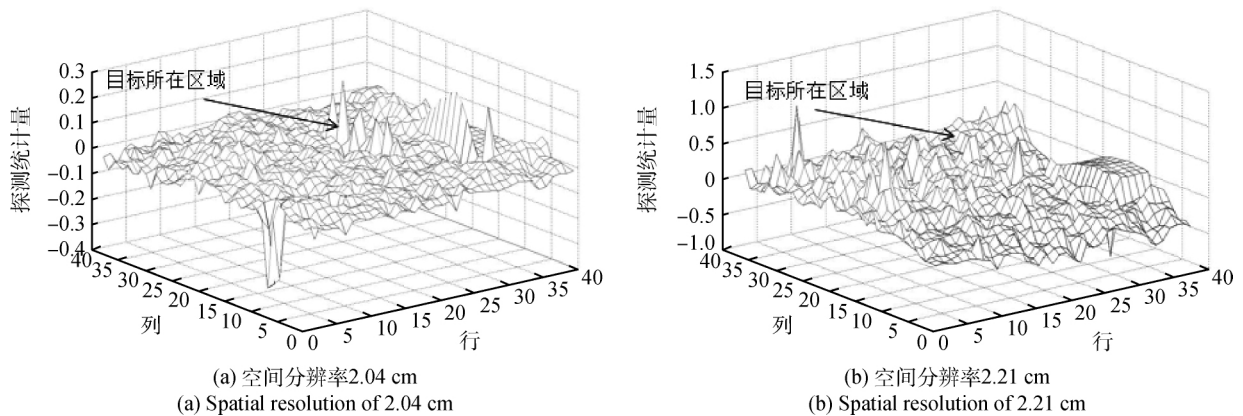


图 5 精度出现大幅变化的空间分辨率探测统计量 3 维图

Fig. 5 Detection statistic three dimensional image at the spatial resolution where accuracy changed significantly

图3 是不同采样尺度下探测精度的比较,图4 将两者关系量化为曲线关系。可以看出,空间分辨率为0.17 cm 时,目标清晰可见,探测精度最好,高达0.99;分辨率降到0.85 cm 时,变化不大,探测精度为0.98,虽然此时目标为亚像元状态,但目标所占丰度较高;分辨率降到1.70 cm 时,目标丰度下降,一些背景被误判成了目标,虚警率增加,探测精度为0.87。从ROC 曲线上可以看出,随着分辨率的不断降低,探测精度也不断下降,直到分辨率降到2.04 cm 时,探测精度为0.81,精度仍在可接受的范围内,但是降到2.21 cm 的时候,大面积的背景被误判成了目标,探测精度出现大幅度下降,为0.61;空间分辨率再下降时,探测精度会继续下降,但是幅度减小,在分辨率为2.55 cm 时,探测精度为0.55。探测精度接近0.5 时,证明已不具备探测能力。

在图3 和图4 中,当空间分辨率从2.04 cm 降到2.21 cm 时,探测精度出现了大幅下降,图5 为这两个空间分辨率下的探测统计量图。可以看出,在空间分辨率为2.04 cm 时,目标所在区域仍比较清晰,只有少数背景出现了较高的虚警值,多数背景被压制的较好。但是在空间分辨率降到2.21 cm 时,目标所在区域不再清晰,背景杂乱无章,目标和背景的探测统计量值区别不大,因而探测精度出现了大幅下降。图4 表明,随着空间分辨率的下降,探测精度的下降大致分为3 个阶段:缓慢下降、急速下降、缓慢下降。在探测精度急速下降之前即可判断

为目标探测合适的探测尺度。在本文中,对于1 cm × 1 cm 的绿色目标,在稀疏草地的背景下,用2.04 cm 的空间分辨率即可探测,即所需的分辨率约为目标尺寸的2 倍以内。

实验中,目标绿色布的光谱与背景稀疏草地的光谱相似,因而当空间分辨率下降时,目标从像元状态转变成亚像元状态,目标与背景的混合必然会导致目标特征的弱化。在探测过程中,为探测到目标而降低阈值,则更多的背景被误判成目标。本实验中的目标是1 cm × 1 cm 的方块,理想状态下,当空间分辨率为2.04 cm 时,目标丰度为25%,当空间分辨率为2.21 cm 时,目标丰度为20%。但是目标一般不可能完整的在一个像元中,而是分散到周围像元中,因而目标在像元的比例是要低于理想状态的。当空间分辨率为2.04 cm 时,目标丰度主要为15%—20%,当空间分辨率为2.21 cm 时,目标丰度在15% 以下。因此根据前文中的分析得出,目标丰度在15%—20% 左右会出现探测精度的大幅下降。

为了进一步分析验证目标丰度与精度下降的关系,本文在原始影像上截取纯背景影像(无目标)得到纯背景影像的平均光谱。背景为稀疏草地,主要由草地和裸土组成,将纯背景影像的平均光谱作为背景光谱,再将目标与背景光谱按照目标的5%、10%、15%、…、100% 混合,地物光谱及混合光谱如图6 所示。

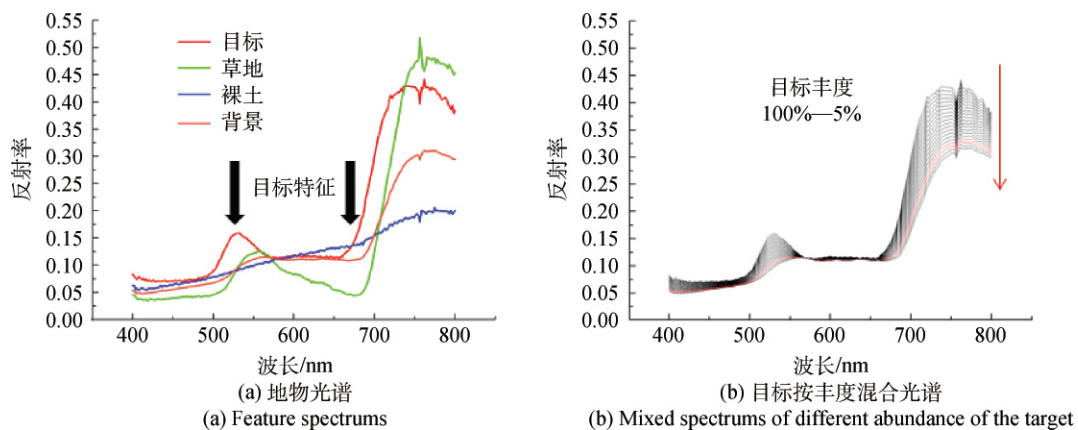


图6 地物光谱和混合光谱

Fig. 6 Feature spectra and mixed spectra

图6(a) 为地物光谱,包括目标、草地、裸土和背景。可以看出,背景光谱是草地和裸土的叠加,由于草地在690 nm 处有明显的吸收谷,因而背景光谱在690 nm 处也有小幅下降,而目标在560—670 nm

基本无起伏,在680 nm 处反而有上升趋势,另外,目标在530 nm 左右有一个小的峰值。图6(b) 为目标按丰度与背景的混合光谱,其中标红的曲线为目标丰度15%和20%。当目标比例低于15% 时,目标

的两个特征都不再明显。

将目标占比为 5%—100% 的 20 个混合目标像元加入到纯背景影像中进行目标探测, 得到不同混合程度目标的探测统计值(表 2)。

如表 2 所示, 目标丰度越小, 探测统计值越小,

为探测到该混合目标, 需要下降阈值, 这样直接导致将更多的背景误判为目标。将不同目标丰度的探测统计值作为阈值, 得到该阈值下将纯背景影像判定为目标的结果图, 白色部分即为探测的虚警率。如图 7 所示。

表 2 混合目标探测值
Table 2 Detection values of the mixed target

目标丰度 / %	5	10	15	20	25	30	40	50	60
探测统计值	0.050477	0.100452	0.150427	0.200402	0.250377	0.300352	0.400312	0.500251	0.600201

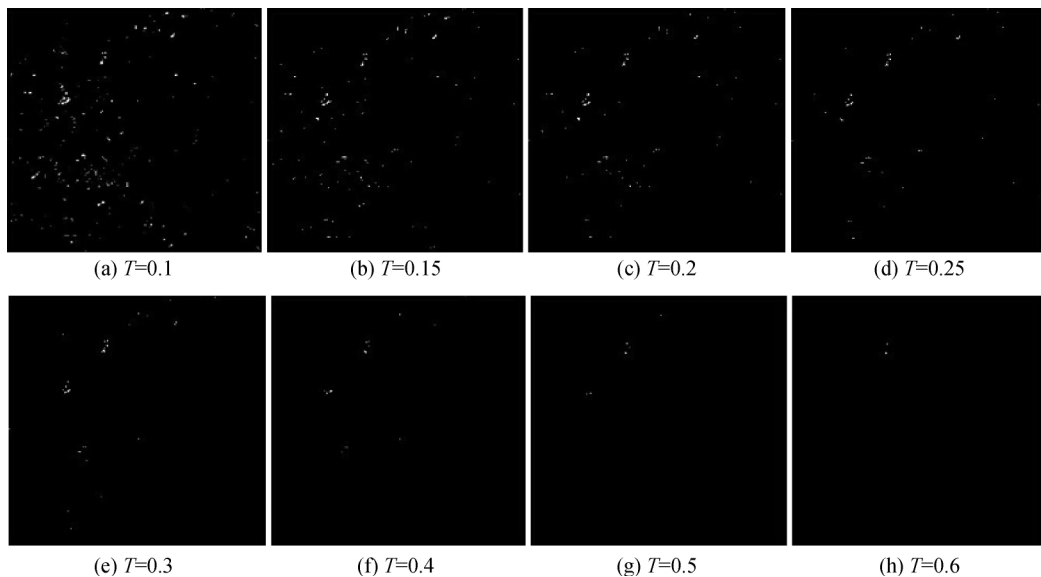


图 7 不同阈值下的虚警率(白色为虚警)

Fig. 7 False alarm of different thresholds (white for false alarm)

为了探测不同丰度的目标设定了不同阈值, 从图 7 可以看出, 当阈值为 0.6, 即目标丰度 60% 时, 虚警率极低。当阈值不断下降时, 虚警率逐渐增加, 阈值从 0.2 降到 0.15 时, 虚警率小幅增加, 降到 0.1 时, 很多背景被误判成了目标, 虚警率大幅增加。可以看到, 目标丰度 15% 以上时, 探测虚警率较低。由上文分析得出目标丰度与探测精度之间的关系和空间分辨率与探测精度之间关系的具有一致性。

3.2 目标探测的光谱尺度

在目标探测空间尺度分析中, 使用 FISS 影像探测绿色布, 空间分辨率需达到目标大小约 2 倍以内。现实情况中, 光谱分辨率不一定能达到地面成像仪 (FISS) 的水平, 光谱尺度会影响探测精度。另外, 考虑背景光谱的影响, 本文研究纯像元和亚像元两种情况下, 光谱尺度对探测精度的影响。

当光谱分辨率较高时, 波段数较多, 光谱波段连续响应, 对于目标探测的影响主要在于该光谱分辨率能否更细致地反映出目标和背景的差异。当光谱分辨率不足时, 波段数减少, 对于目标探测的影响主要在于波段的设置。因而本文将光谱分辨率分为较高和较低两部分分别研究。

(1) 较高光谱分辨率(10—50 nm)

表 3 为光谱分辨率 10—50 nm 时, 探测精度随光谱分辨率的变化结果。图 8 为不同光谱分辨率下地物光谱的变化。

表 3 不同光谱分辨率下的探测精度

Table 3 Detection accuracy of different spectral resolution

空间分辨率 / cm	光谱分辨率 / nm				
	10	20	30	40	50
0.17	0.991	0.983	0.981	0.981	0.975
0.85	0.984	0.978	0.953	0.944	0.866

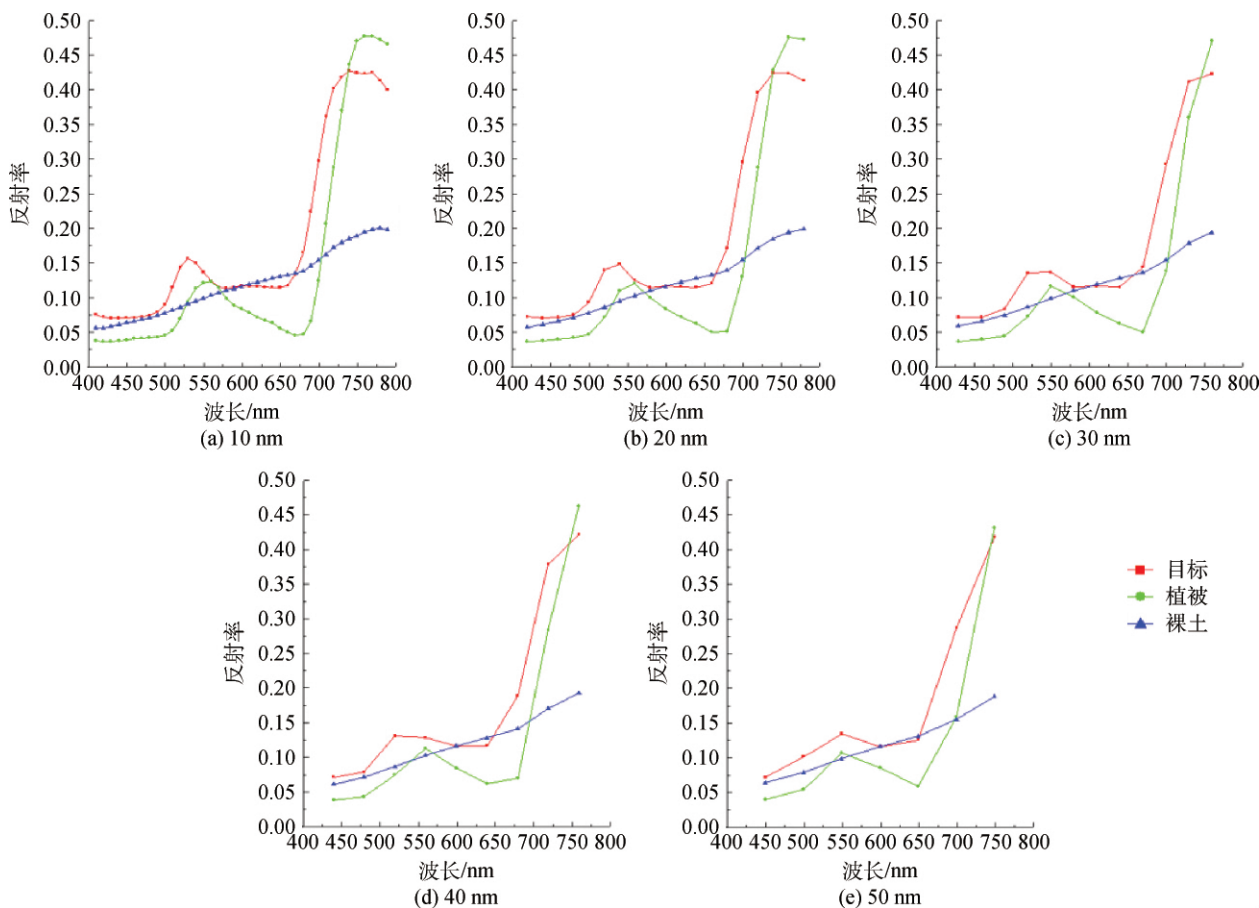


图8 不同光谱分辨率下的地物光谱

Fig. 8 Feature spectrums of different spectral resolution

表3中分别以10 nm、20 nm、30 nm、40 nm、50 nm的光谱分辨率在影像波段内连续重采样,波段数分别为39、19、12、9、7,波段数较为充足。原始影像空间分辨率为0.17 cm,目标基本为纯像元,空间分辨率为0.85 cm时,目标为亚像元状态。对比不同光谱分辨率下探测精度可以看出,纯像元时,探测精度虽然在50 nm处有略微的下降,但各个光谱分辨率基本均能取得理想的探测结果。但是,亚像元时,探测精度在40—50 nm光谱分辨率处出现了较大的下降,可见在40—50 nm处,目标和背景并不能进行很好的分离,一旦出现混合,就会造成探测精度的下降。

参照图6中的地物光谱,目标和植被的光谱具有一定的相似性,它们的区别主要有两点,第一是目标在530 nm处有一个反射峰值,而植被是在550 nm处有一个反射峰值;第二是目标在560—670 nm处基本无起伏,之后立刻上升,而植被在560—690 nm处一直下降,之后立刻上升。从图8中可以看出,由于第二个特征响应的波段较宽,

因而在10—50 nm分辨率时,都能基本表现出目标先平缓再上升和植被先下降再上升的趋势。但是由于第一个特征响应的波段较窄,两个特征峰值之间的距离在20 nm左右,因而当光谱分辨率低于40 nm时,无法显现出目标和植被反射峰值的区别,不能有效地识别目标与背景的第二个特征,只能利用第二个特征进行探测,造成一定误差。所以,对于绿色布在稀疏草地上的探测,要想取得较为理想的探测效果,光谱分辨率需优于40 nm,即目标和背景特征反射峰间隔的2倍以内。

(2) 较低光谱分辨率(50—80 nm)

当光谱分辨率低于40 nm时,参照现有多光谱传感器的设置,最基本的为红、绿、蓝波段,中心波长分别为480 nm、550 nm、660 nm。另外World-view-2上多光谱传感器在400—800 nm内增加了海岸波段400—450 nm、黄色波段585—625 nm、红边波段705—745 nm,对应的中心波长分别为430 nm、610 nm、725 nm。按照现有传感器中心波长的设置,

将红绿蓝作为 3 个基础波段,组合加入另外 3 个波段,得到波段数为 3、4、5、6,半波宽 50—80 nm 时的

探测精度,如表 4 所示。与表 4 中对应不同波段组合的地物光谱如图 9 中所示。

表 4 不同波段组合/半波宽的探测精度

Table 4 Detection accuracy of different band combinations/full width half maximum

波段数	半波宽 FWHM				各波段对应的中心波长/nm
	50 nm	60 nm	70 nm	80 nm	
6	0.933/0.875	0.944/0.820	0.950/0.823	0.913/0.821	430、480、550、610、660、725
5	0.971/0.594	0.972/0.689	0.976/0.731	0.975/0.642	430、480、550、610、660 —
5	0.888/0.756	0.894/0.754	0.895/0.754	0.878/0.756	430、480、550、660、725 —
5	0.923/0.863	0.928/0.877	0.931/0.888	0.933/0.892	480、550、610、660、725 —
4	0.681/0.575	0.681/0.628	0.716/0.677	0.761/0.718	430、480、550、660 — —
4	0.961/0.511	0.965/0.586	0.966/0.624	0.966/0.648	480、550、610、660 — —
4	0.887/0.793	0.889/0.791	0.893/0.809	0.887/0.810	480、550、660、725 — —
3	0.667/0.517	0.680/0.626	0.703/0.657	0.727/0.681	480、550、660 — — —

注 “/”前后分别为空间分辨率 0.17 cm 和 0.85 cm 下的探测精度。

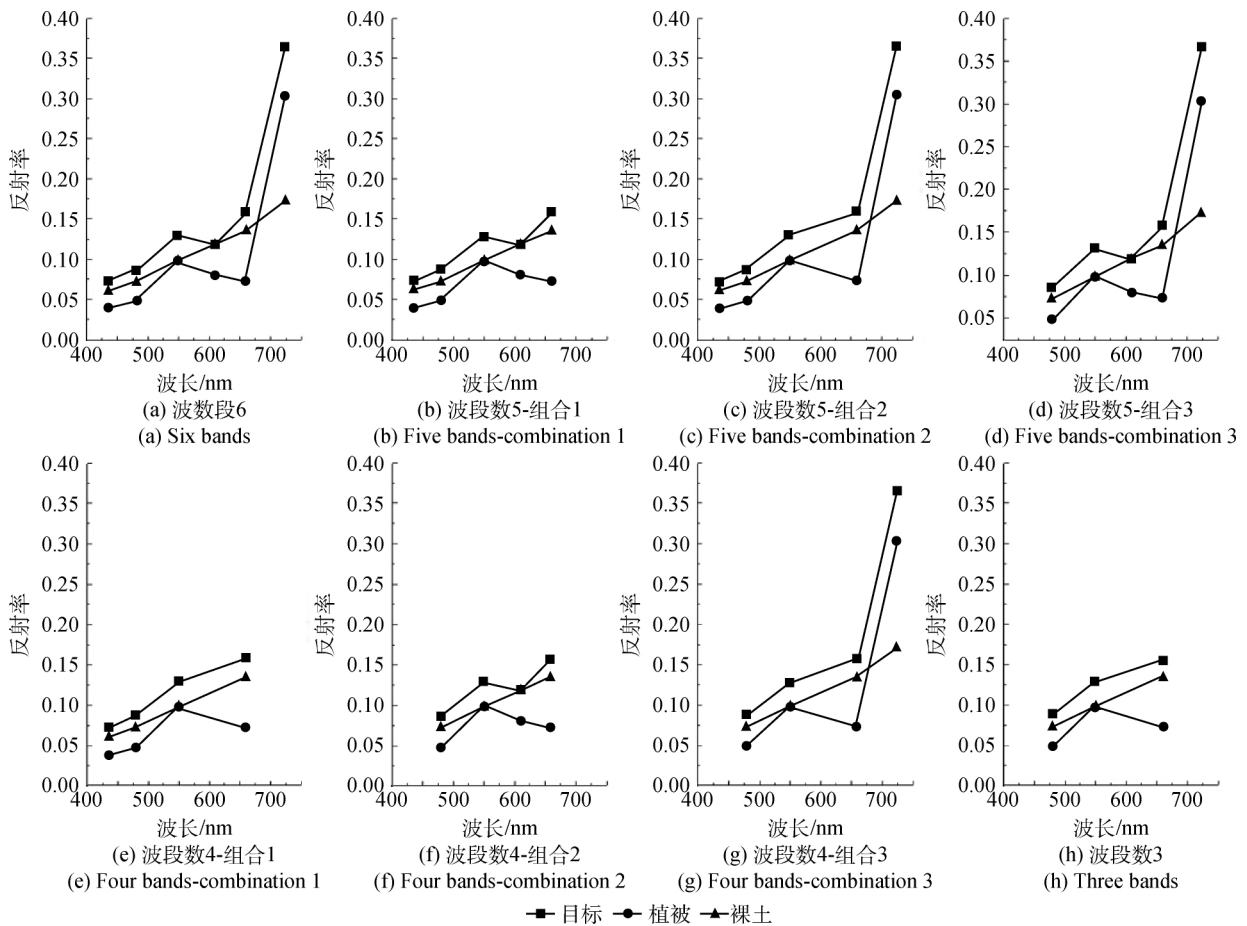


图 9 不同波段组合的地物光谱(以半波宽 70 nm 为例)

Fig. 9 Feature spectrums of different band combinations (take 70 nm FWHM for example)

结合在光谱分辨率较高情况下的分析,分辨率优于 40 nm 时,才能区分出目标与植被在 530 nm 和 550 nm 处的特征,当光谱分辨率低于 40 nm 时,只

能通过描述目标和背景 560 nm 以后的变化趋势来加以区分。目标反射率从 560—725 nm 先平再急剧上升,植被反射率先下降再急剧上升,裸土反射率

一直缓慢上升,特征范围较宽。因而如表4中所示,半波宽从50—80 nm时,同一波段组合下探测精度变化不大。

波段数和中心波长设置对探测精度均有明显的影响。如表4所示,3个波段探测精度明显不足,从图9(h)中可以看出目标和裸土基本无法区分。如图9(g)所示,4个波段时,组合3,即红绿蓝加上红边波段(725 nm)效果最好,3种地物区别明显。如图9(d)所示,5个波段时,组合3,即红绿蓝加上黄色波段(610 nm)和红边波段效果最好,3种地物同样区分明显。

整体上看,有效波段的增加有利于提高精度,但是如果加入的波段并不能有效突出目标,反而会降低探测精度。如表4中所示,6个波段的探测精度略低于5个波段组合3的精度,5个波段组合2的探测精度略低于4个波段组合3的精度。如图9(a)、(d)和图9(c)、(g)所示,因为海岸波段(430 nm)并不能很好的区分3种地物,加上该波段会减低特征波段的权重,造成精度的下降。同时,也反映出5个波段组合3为最优波段组合。

另外,在纯像元和亚像元状态下,5个波段组合1和4个波段组合2表现出极大的差异,如图9(b)、(f)所示,纯像元时能很好的区分这3种地物,但是一旦目标和背景的光谱出现混合,就和裸土的光谱极易混淆,造成探测精度的急剧下降。

4 结 论

本文利用FISS地面高光谱成像仪,通过在稀疏草地上布设绿色目标,研究了目标和背景光谱相似情况下,单一均匀背景下小目标探测问题,定量探讨了目标探测所需的空间和光谱尺度,得到以下结论:

(1) 当图像空间分辨率下降时,待探测目标从纯像元变为亚像元,探测精度逐步呈缓慢下降、急速下降、缓慢下降的趋势,目标尺寸和空间分辨率之比与探测精度正相关,与Hamada(2007)得出的结论一致。在本文地面实验中,将探测精度急速下降之前的空间尺度作为最低探测空间尺度,探测所需的最佳空间分辨率约为目标尺寸的2倍。

(2) 目标光谱尺度的选择与目标、背景之间的光谱差异(明显的反射峰距离)相关,本实验中目标和背景反射峰相距20 nm,在光谱分辨率低于40 nm时,该光谱特征消失,探测精度下降;选取目标、背

景光谱特征差异较大的波段可提高探测的有效性,在舍弃目标背景相似波段后,探测精度上升,与Karlholm和Renhorn(2002)的研究结论一致,本文3.2节给出了针对本实验的最佳探测波段组合。

本文对特定目标背景下目标探测的尺度问题进行了全面实验和分析,提出的研究方法对目标探测中的空间、光谱尺度量化研究具有重要意义,对类似目标探测数据源的选择具有指导性,为其他目标背景组合下的研究提供了参考依据。本研究实验设计仅考虑了目标单一背景条件下的探测联合尺度效应问题,没有考虑复杂情况下的空间和光谱联合尺度问题,下一步研究将设计多种实验环境,研究目标探测的空间和光谱联合效应问题。

参考文献(References)

- Adeline K R M, Chen M, Briottet X, Pang S K and Paparoditis N. 2013. Shadow detection in very high spatial resolution aerial images: a comparative study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80: 21 - 38 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.02.003]
- Borowski B, Augustin S, Miller B, Robinson I and Hibbelu B. 1998. The effects of limiting spectral resolution and the number of bands on HSI target detection algorithm performance//1998 IEEE Aerospace Conference. Snowmass at Aspen, CO: IEEE, 5: 115 - 121 [DOI: 10.1109/AERO.1998.685801]
- Ding B and Kerekes J P. 2013. Extended hyperspectral imaging system modeling and implementation for subpixel target detection//Proc. SPIE 8870, *Imaging Spectrometry XVIII*, 88700P. San Diego, California, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.2022688]
- Hamada Y, Stow D A, Coulter L L, Jafolla J C and Hendricks L W. 2007. Detecting Tamarisk species (*Tamarix* spp.) in riparian habitats of Southern California using high spatial resolution hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109 (2): 237 - 248 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.01.003]
- Harsanyi J C. 1993. *Detection and Classification of Subpixel Spectral Signatures in Hyperspectral Image Sequences*. Baltimore: University of Maryland Baltimore County.
- Karlholm J and Renhorn I. 2002. Wavelength band selection method for multispectral target detection. *Applied Optics*, 41 (32): 6786 - 6795 [DOI: 10.1364/AO.41.006786]
- Li X W and Wang W T. 2013. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1163 - 1169 (李小文, 王祎婷. 2013. 定量遥感尺度效应刍议. *地理学报*, 68(9): 1163 - 1169) [DOI: 10.11821/dlxb201309001]
- Liu L Y. 2014. Simulation and correction of spatial scaling effects for leaf area index. *Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1158 - 1168 (刘良云. 2014. 叶面积指数遥感尺度效应与尺度纠正. *遥感学报*, 18(6): 1158 - 1168) [DOI: 10.11834/jrs.20144103]
- Manolakis D, Siracusa C and Shaw G. 2001. Hyperspectral subpixel target detection using the linear mixing model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7): 1392 - 1409 [DOI: 10.

- 1109/36.934072]
- Manolakis D, Truslow E, Pieper M, Cooley T and Brueggeman M. 2014. Detection algorithms in hyperspectral imaging systems: an overview of practical algorithms. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(1): 24–33 [DOI: 10.1109/MSP.2013.2278915]
- Matheson D S and Dennison P E. 2012. Evaluating the effects of spatial resolution on hyperspectral fire detection and temperature retrieval. *Remote Sensing of Environment*, 124: 780–792 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.026]
- Nasrabadi N M. 2014. Hyperspectral target detection: an overview of current and future challenges. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(1): 34–44 [DOI: 10.1109/MSP.2013.2278992]
- Qian S E and Chen G Y. 2012. Enhancing spatial resolution of hyperspectral imagery using sensor's intrinsic keystone distortion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 5033–5048 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2195666]
- Sabol D E, Adams J B and Smith M O. 1992. Quantitative subpixel spectral detection of targets in multispectral images. *Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012)*, 97: 2659–2672 [DOI: 10.1029/91JE03117]
- Tong Q X, Zhang B and Zheng L F. 2006. *Hyperspectral Remote Sensing—Principle, Technology and Application*. Beijing: Higher Education Press (童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 2006. 高光谱遥感—原理、技术与应用. 北京: 高等教育出版社)
- Tong Q X, Xue Y Q, Wang J N, Zhang L F, Fang J Y, Yang Y D, Liu X, Qi H X, Zheng L F and Huang C P. 2010. Development and application of the field imaging spectrometer system. *Journal of Remote Sensing*, 14(3): 409–422 (童庆禧, 薛永祺, 王晋年, 张立福, 方俊永, 杨一德, 刘学, 亓洪兴, 郑兰芬, 黄长平. 2010. 地面成像光谱辐射测量系统及其应用. 遥感学报, 14(3): 409–422) [DOI: 10.11834/jrs.20100301]
- Villa A, Chanussot J, Benediktsson J A, Jutten C and Dambreville R. 2013. Unsupervised methods for the classification of hyperspectral images with low spatial resolution. *Pattern Recognition*, 46(6): 1556–1568 [DOI: 10.1016/j.patcog.2012.10.030]
- Winter M E, Winter E M, Beaven S G and Ratkowski A J. 2007. Hyperspectral image sharpening using multispectral data // 2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE. 1–9 [DOI: 10.1109/AERO.2007.353060]
- Zhang B and Gao L R. 2011. *Hyperspectral Image Classification and Target Detection*. Beijing: Science Press (张兵, 高连如. 2011. 高光谱图像分类与目标探测. 北京: 科学出版社)

Effects of spatial and spectral scale on hyperspectral target detection

SHI Tingting^{1,2}, ZHANG Lifu¹, CEN Yi¹, SUN Xuejian^{1,2}, GAO Yingqian¹, TONG Qingxi¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Hyperspectral target detection is based on the spectral characteristic difference between the target and the background. Generally, the finer the resolution is, the higher the accuracy will be. Yet the spatial and spectral resolution can barely meet the need simultaneously, for technical obstacles. A tradeoff between the two factors is needed for effective target detection and the choice of appropriate remote sensing data for target detection has always been concentrated nowadays. Most previous studies focused on the precision assessment of the target detection in a particular case using current image spectrometer data, but failed to provide a quantified criterion for either the spatial or the spectral resolution appropriate for the data in that case. This study focused on the quantification of the scale impact of spectral and spatial resolution on target detection precision, with respect to situations where the target is small and has a similar spectrum to the homogeneously distributed background.

Here we proposed a technical method for spectral and spatial resolution assessment for target detection, setting green context and sparse grass as the target and background, respectively. Through the down sampling processing of the high spatial hyperspectral image from Field Imaging Spectrometer System (FISS) together with Constrained Energy Minimization (CEM) detection algorithm and Receiver Operation Characteristic (ROC) evaluation method, this study analyzed the relationship between the spatial and spectral resolution and the detection accuracy. And then it proposed the optimal spatial and spectral scale for target detection.

Results revealed that: (1) With the decline of spatial resolution, the detection accuracy experienced three stages of descending rates: gently-dramatically-gently. The corresponding spatial resolution before the second stage is the effective scale for detection. Using FISS data (4–7 nm spectral resolution and 1.4 nm sampling interval), the required spatial resolution for target detection was about within twice the size of the target; (2) When the spectral resolution was finer than 40 nm, two main features: the reflection peaks and basic trend differences, associated with the target and the background, could be identified. The detection accuracy would reach 0.94 or above within the spatial resolution of 0.85 cm. When the spectral resolution was coarser than 40 nm, the differences of reflection peaks disappeared since they were 20 nm apart and the detection accuracy decreased; (3) Given spectral resolution insufficiency (>40 nm), the basic R, G, B bands added the yellow and red edge bands appeared the optimal combination for target detection with respect to current multispectral remote sensors.

It was concluded that the quantitative analysis method and results of spatial and spectral scales for target detection would be of great significance for both data source selection and studies on other target-background combinations under similar conditions.

Key words: hyperspectral, target detection, spatial resolution, spectral resolution, scale effect, suitable scale

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41371359, 41371362, 41272364)