

文章编号: 0253-2239(2010)07-2116-07

基于方差最小的高光谱目标探测算法研究

李山山¹ 张 兵¹ 高连如¹ 彭 嫚²

(¹ 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100101; ² 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 目标探测技术是遥感理论与应用中的重要领域之一, 由于高光谱遥感图像能够同时提供地物目标的辐射、几何和光谱信息, 与其他多光谱遥感图像相比, 能更好地进行目标识别。从信息论中的自信息概念出发, 针对探测结果影像中目标突出且信息确定性强的特征, 提出了基于方差最小(BVM)的目标检测算子。利用不同空间分辨率和光谱分辨率的高光谱影像数据进行实验, 并与约束能量最小化(CEM)算子的应用效果进行了比较分析。实验结果表明, 基于方差最小的算子具有更稳健的探测性能。

关键词 遥感; 目标探测; 高光谱; 基于方差最小(BVM)

中图分类号 TP751.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2116

Research of Hyperspectral Target Detection Algorithms Based on Variance Minimum

Li Shanshan¹ Zhang Bing¹ Gao Lianru¹ Peng Man²

(¹ Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)
(² Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Target detection is one of the most important aspects in remote sensing theory and application. Hyperspectral image can provide radiation, geometrical and spectral information of targets simultaneously, making target detection much better than other methods. A target detection algorithm based on variance minimum (BVM) which makes use of highlighting information of detection results is presented. And two experiments on different spatial resolution and spectral resolution are conducted to compare BVM method and constrained energy minimization (CEM). Results show the more robust performance of BVM method.

Key words remote sensing; target detection; hyperspectral; based on variance minimum(BVM)

1 引 言

遥感图像处理中, 目标探测可以通过空间的、光谱的或者两者相结合的方式来进行。传统的多光谱在以像元为单位的分类中获得了成功, 但是由于其光谱分辨率不高(一般为 100 nm), 限制了其对亚像元级目标探测的能力。高光谱遥感获取的图像数据具有几十个甚至上百个波段, 如空中可见光/红外成像分光仪(AVIRIS)具有 244 个波段, 这为更多、更精细的目标提取提供了可能。

针对高光谱影像小目标特征, 发展了许多目标探

测算法。例如线性光谱解混^[1,2]被广泛的应用于多光谱和高光谱目标探测和分类中。这类方法需要有关目标影像所有的信息作为先验知识^[3,4], 但是在实际应用中, 这种先验知识无法从图像上直接进行获取, Chein-I Chang 等^[5]提出了三种非监督分类方法能够从图像上获取背景信息。但是这些算法的明显缺陷是必须获取相关背景信息作为先验知识。针对这种问题, Harsanyi 等^[6]提出了著名的约束能量最小化算法(CEM)。其在已知目标的先验知识情况下, 利用特定的约束条件设计一个有限脉冲响应滤波器, 抑制未

收稿日期: 2009-07-02; 收到修改稿日期: 2009-09-22

基金项目: 国家 973 计划(2009CB723902), 国家 863 计划(2008AA12Z113)和国家自然科学基金(40901225)资助课题。

作者简介: 李山山(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事高光谱目标探测、分类等方面的研究。E-mail: ssl@irsa.ac.cn

导师简介: 张 兵(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高光谱遥感等方面的研究。E-mail: zb@ceode.ac.cn(通信联系人)

本文彩色效果详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)相关文章

知信号和噪声,仅通过感兴趣的目标,这种算法不需要任何关于背景的先验知识。CEM 所使用的基础,就是矩阵运算中的最小化变异数无杂讯响应(MVDR),使用滤波器将输出功率做最小化处理,但这种意义下的最小化未顾及检测结果信息的随机性。鉴于此,从信息论的角度提出了基于方差最小(BVM)的目标探测算子。该算法结合自信息的相关定义,设计了方差自信息模型来表示图像的自信息,使用协方差矩阵得到相关算子进行目标探测,实验结果证明,BVM 算子对于小目标探测可以得到较好的效果。

2 方差-自信息模型

2.1 离散信源的自信息

信息论中,对于实际输出为单个符号的离散信源可用一维随机变量 X 来描述信源的输出事件^[7], $P(X)$ 为事件发生的概率,信源的数学模型统一抽象为

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1, & a_2, & \dots, & a_q \\ P(a_1), & P(a_2), & \dots, & P(a_q) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\sum_{i=1}^q P(a_i) = 1$ 。如果知道事件 a_i 已发生,则该事件所含有的信息量称为自信息^[8],定义为

$$I(a_i) = -\lg P(a_i). \quad (2)$$

2.2 方差-自信息模型

将同一地区获得的高光谱图像的 n 个波段整体视为离散信源,每个波段视为一个随机事件^[9]。设每个波段的方差为 σ_i^2 ($i=1,2,\dots,n$),定义归一化的方差系数 ρ_i 为

$$\rho_i = \left[1 - \frac{\sigma_i^2}{\sum_{j=1}^n \sigma_j^2} \right] / (n-1), \quad (i,j = 1,2,\dots,n) \quad (3)$$

由概率统计理论知,一个随机变量的方差表示了其随机性的强度,因此 ρ_i 表示不同波段在同一地区的信息的确定性分布, ρ_i 越大,说明波段中的地物目标越集中。由于 $\{\rho_i\}$ 具有概率的数值特点,可定义每幅图像的方差-自信息公式为

$$I_i = -\lg \rho_i. \quad (4)$$

3 BVM 目标探测算子

经过目标探测算子得到的结果图像,应能够显著区分背景和 target 信息。即目标或异常情况出现的

概率大,使图像信息趋于确定性高, target 信息突出易辨别。根据香农信息的定义,信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述,故图像自信息反映信息的不确定性,因此自信息 I_i 较小,说明结果图像不确定小,即检测得到的 target 突出,其余背景都得到了抑制。

使用 L 个算子对高光谱图像的 n 个波段进行目标检测,得到 L 幅目标检测图像,可假设总方差是常数,计算每幅图像的归一化方差系数。(4)式为 σ_i^2 的单调递增函数,即方差 σ_i^2 最小时, ρ_i 最大, I_i 最小。因此可基于检测结果图像的方差最小进行目标探测。

若 $\{r_1, r_2, \dots, r_N\}$ 是遥感图像中的像元矢量, N 是图像中总的像元数,每个像元 $r_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iL}]^T$ 为 L 维列向量,其中 L 是波段数, $1 \leq i \leq N$ 。假设已知先验信息 d 是待检测的 target 光谱信号,经过目标探测算子的向量 w 对应输入像元 r_i 的输出为 y_i ,即

$$y_i = \sum_{l=1}^L \omega_l r_{il} = w^T r_i = r_i^T w. \quad (5)$$

原图像的协方差矩阵表示为 Σ ,则结果图像的方差为

$$v(w^T \cdot r_i) = w^T \Sigma w, \quad (6)$$

因此 BVM 算子的滤波器向量 w 需满足下列条件:

$$\begin{cases} \min(w^T \Sigma w) \\ d^T w = 1 \end{cases}. \quad (7)$$

构造辅助函数 $\varphi(w)$ 为 (λ 称为拉格朗日乘数)

$$\varphi(w) = w^T \Sigma w + \lambda(d^T w - 1), \quad (8)$$

使用拉格朗日乘数法,令其对 w 求偏导后为零:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(w)}{\partial w} &= \frac{\partial w^T \Sigma w}{\partial w} + \lambda d = \\ (\Sigma + \Sigma^T)w + \lambda d &= 2\Sigma w + \lambda d = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

式中协方差矩阵 Σ 为对称矩阵,求解(9)式得

$$w = -\frac{1}{2} \lambda \Sigma^{-1} d, \quad (10)$$

代入(7)式得

$$\lambda = -\frac{2}{d^T \Sigma^{-1} d},$$

解得最优解为

$$w_{\text{BVM}} = \frac{\Sigma^{-1} d}{d^T \Sigma^{-1} d}. \quad (11)$$

如表 1 所示,由于 CEM 与 BVM 算子均约束算子与已知光谱的特征向量积为 1,因此两者形式相似。但由于前提不同,分别是基于能量最小和基于方差最小,所以 CEM 算子应用自相关矩阵 R 进行

处理,而 BVM 应用协方差矩阵 Σ 进行数据处理后,小目标与背景更易分离开。易知,当影像元向量的均值为 0 时,两类算子相同。因此,CEM 算子可看作 BVM 算子的特例,BVM 算子则为通常情况下的处理。

表 1 CEM 算子与 BVM 算子

Table 1 CEM and BVM operator

Detector	CEM	BVM
w	$\frac{R^{-1}d}{d^T R^{-1}d}$	$\frac{\Sigma^{-1}d}{d^T \Sigma^{-1}d}$

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

高光谱遥感数据的获取采用由轻便机载光谱成像仪(CASD)发展起来的第二代成像光谱仪,其工作在可见光及近红外光谱范围内,覆盖的光谱范围为 410~2330 nm。设计了两组实验,比较 CEM 与 BVM 算子的探测性能,每组实验均使用三幅影像进行比较。

实验一使用相同空间分辨率,不同光谱分辨率图像,高光谱图像信息如表 2 所示。

表 2 实验一的高光谱影像信息

Table 2 Hyperspectral image information of the first experiment

Image	a	b	c
Bands	42	81	165
Spectral resolution /nm	40	20	10
Spatial resolution /m	8	8	8

图 1 分别为光谱分辨率为 40,20 和 10 nm 时光谱仪实测目标的光谱反射率特征曲线,并剔除了水吸收波段。图 2 所示分别为影像 a,b 和 c 的三波段合成真彩色影像,图中红色框标注的为待检测目标。

第一组 CEM 与 BVM 算子对影像 a,b 和 c 的探测结果分别如图 3 和图 4 所示。实验结果如表 3 所示(探测失败定义为 \times ,探测成功为 \checkmark):

表 3 实验一目标探测结果比较

Table 3 Comparison of target detection results in the first experiment

Spatial resolution/spectral resolution of group one	CEM	BVM
8 m /40 nm	\checkmark	\checkmark
8 m /20 nm	\times	\checkmark
8 m /10 nm	\times	\checkmark

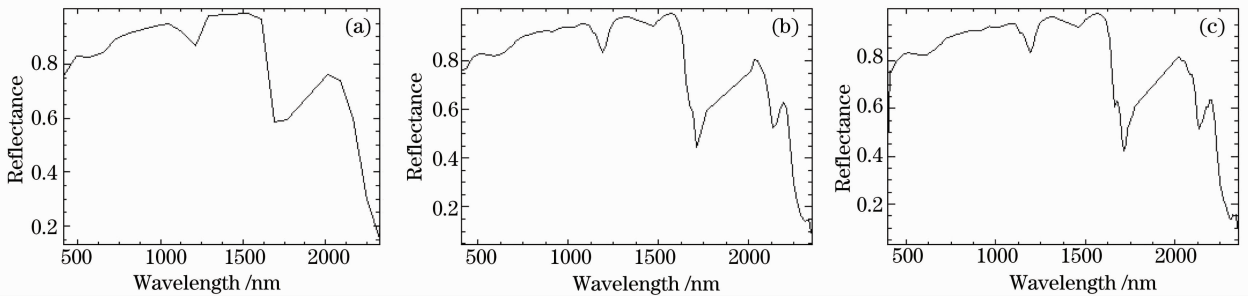


图 1 不同光谱分辨率的目标光谱特征曲线。(a) 40 nm; (b) 20 nm; (c) 10 nm

Fig. 1 Target spectral curve of different spectral resolution. (a) 40 nm; (b) 20 nm; (c) 10 nm



图 2 真彩色合成影像,空间分辨率/光谱分辨率分别为(a)8 m /40 nm; (b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm

Fig. 2 True color synthesized images, spatial resolution/spectral resolution are (a)8 m /40 nm;

(b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm

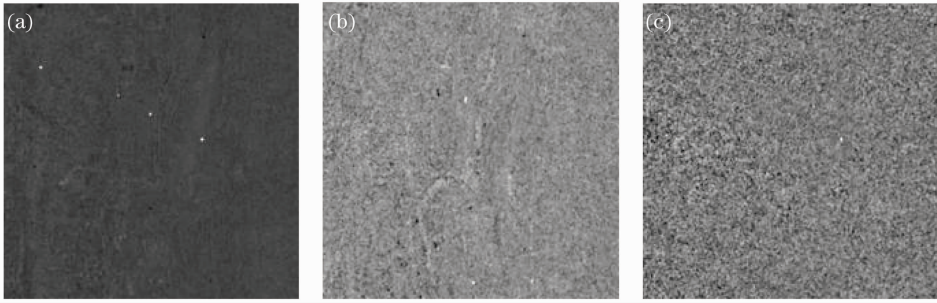


图 3 CEM 探测结果,空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 8 m /40 nm; (b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm
 Fig. 3 CEM detection results, spatial resolution/spectral resolution are (a) 8 m /40 nm;
 (b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm

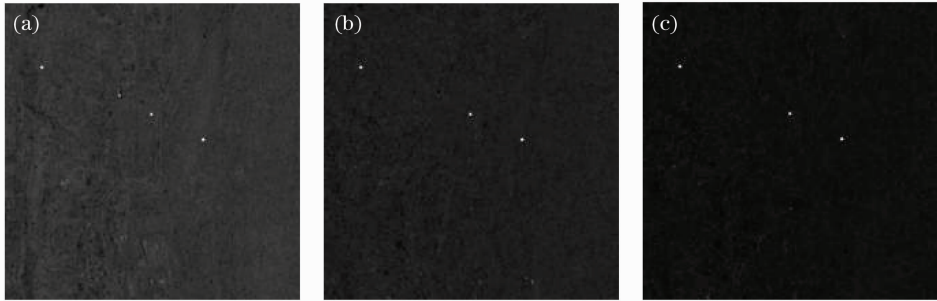


图 4 BVM 探测结果,空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 8 m /40 nm; (b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm
 Fig. 4 BVM detection results, spatial resolution/spectral resolution are (a) 8 m /40 nm;
 (b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm

实验二使用相同光谱分辨率,不同空间分辨率图像,数据信息如表 4 所示。图 5 分别为影像 a, b 和 c 的波段合成真彩色影像。图中红框标注为待探测目标。

第二组 CEM 与 BVM 算子对影像 a, b 和 c 的探测结果分别如图 6 和图 7 所示,实验结果如表 5 所示。

表 4 实验二的高光谱图像信息

Table 4 Hyperspectral image information of the second experiment

Image	a	b	c
Bands	81	81	81
Spectral resolution /nm	20	20	20
Spatial resolution /m	40	20	8

表 5 实验二的目标探测结果比较

Table5 Comparison of target detection results in the secong experiment

Spatial resolution/spectral resolution of group two	CEM	BVM
40 m /20 nm	✓	✓
20 m /20 nm	×	✓
8 m /20 nm	×	✓

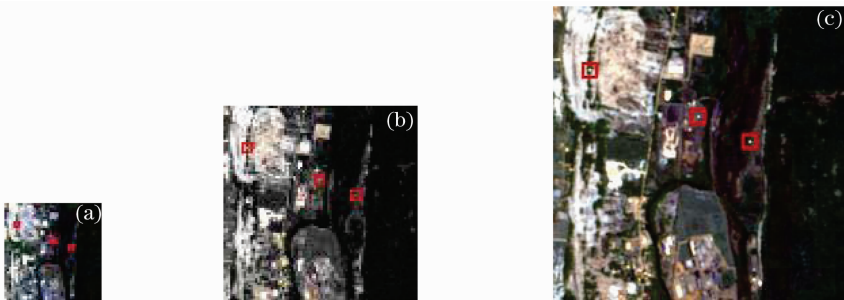


图 5 真彩色合成影像,空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 40 m /20 nm; (b) 20 m /20 nm; (c) 8 m /20 nm
 Fig. 5 True color synthesized images, spatial resolution/spectral resolution are (a) 40 m /20 nm;
 (b) 20 m /20 nm; (c) 8 m /20 nm

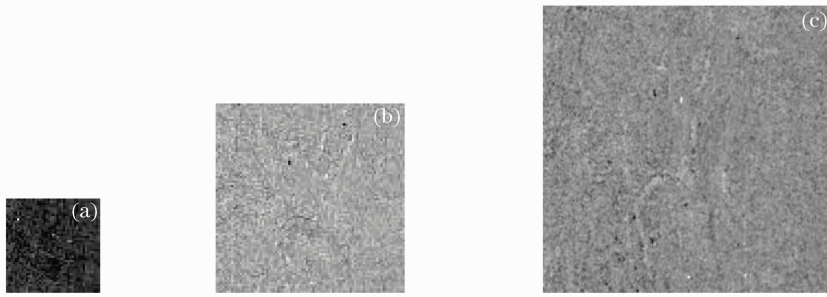


图 6 CEM 探测结果,空间分辨率/光谱分辨率分别为(a)40 m /20 nm; (b) 20 m /20 nm; (c) 8 m /20 nm

Fig. 6 CEM detection results, spatial resolution/spectral resolution are (a)40 m /20 nm;
(b) 20 m /20 nm; (c) 8 m /20 nm

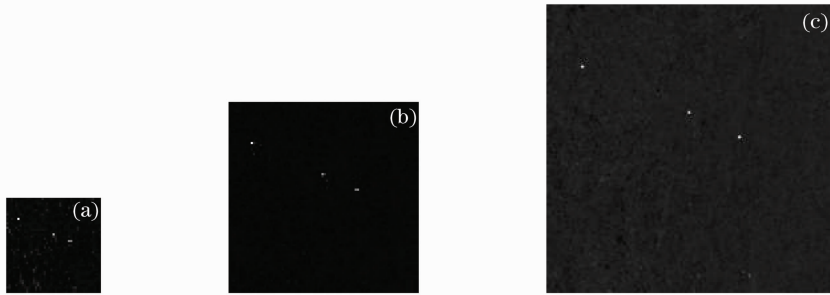


图 7 BVM 探测结果,空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 40 m /20 nm; (b) 20 m /20 nm; (c) 8 m /20 nm

Fig. 7 BVM detection results, spatial resolution/spectral resolution are (a) 40 m /20 nm;
(b) 20 m /20 nm; (c) 8 m /20 nm

4.2 结果分析

由表 3 可知,第一组实验中随着影像的光谱分辨率提高,CEM 算子探测能力减弱,表明 CEM 算子受高光谱目标探测中因波段信息增加而产生的 Hughes 效应^[10]影响,探测能力下降;BVM 算子均探测成功,表明 BVM 克服了该效应的影响。表 5 所示的第二组实验中随着影像空间分辨率提高,目标几何信息与背景几何信息量同时增加,CEM 算子探测能力减弱,BVM 算子均探测成功,证明了 BVM 对空间分辨率变化的稳健性。

图 8,图 9 分别表示实验一中 CEM 和 BVM 探测结果对应的直方图。图 10 和图 11 表示实验二中 CEM 和 BVM 探测结果对应的直方图。

直方图表现了结果图像的背景信息与目标信息分布。大部分背景信息显示较暗,灰度值较小,表现为直方图的波峰两肩之间部分,占图像总像素数 99% 以上的比例。而检测的小目标灰度值较大,但数量比背景少很多,直方图中其余 1% 的较平坦灰度区域内包含了感兴趣目标及部分噪声信息。根据两组直方图得到表 6 及图 12 的方差结果。

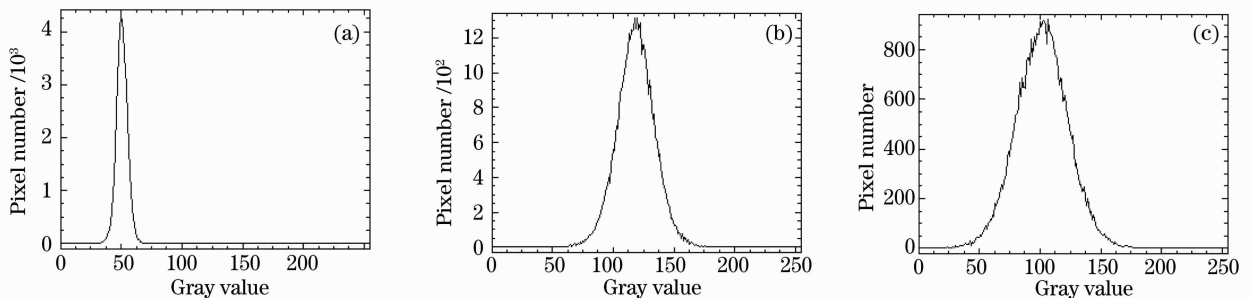


图 8 实验一 CEM 探测结果直方图,空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 8 m /40 nm; (b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm

Fig. 8 CEM detection result histogram of the first experiment, spatial resolution/spectral resolution are (a) 8 m /40 nm;
(b) 8 m /20 nm; (c) 8 m /10 nm

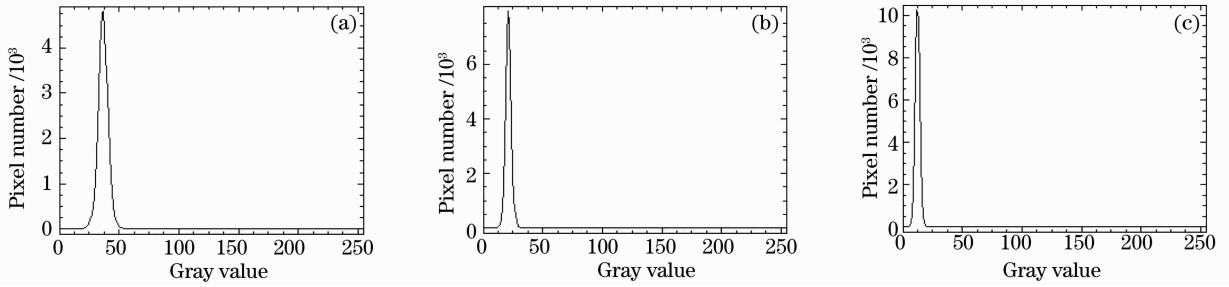


图 9 实验一 BVM 探测结果直方图, 空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 8 m / 40 nm; (b) 8 m / 20 nm; (c) 8 m / 10 nm
Fig. 9 BVM detection result histogram of the first experiment, spatial resolution/spectral resolution are (a) 8 m / 40 nm;
(b) 8 m / 20 nm; (c) 8 m / 10 nm

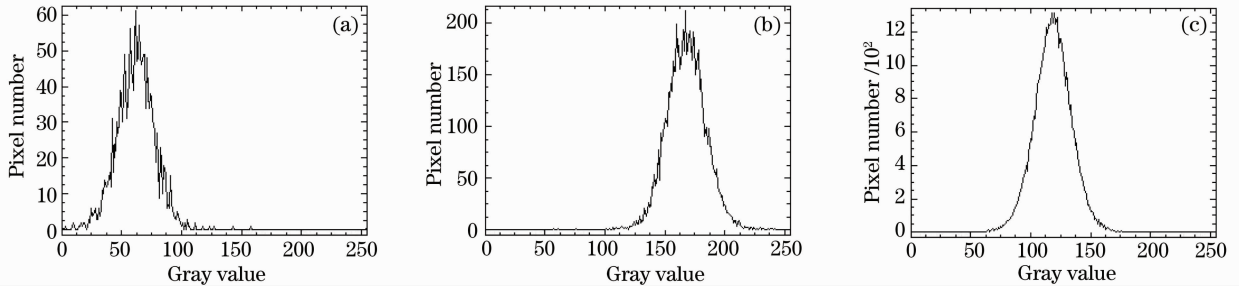


图 10 实验二 CEM 探测结果直方图, 空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 40 m / 20 nm; (b) 20 m / 20 nm; (c) 8 m / 20 nm
Fig. 10 CEM detection result histogram of the second experiment, spatial resolution-spectral resolution are
(a) 40 m / 20 nm; (b) 20 m / 20 nm; (c) 8 m / 20 nm

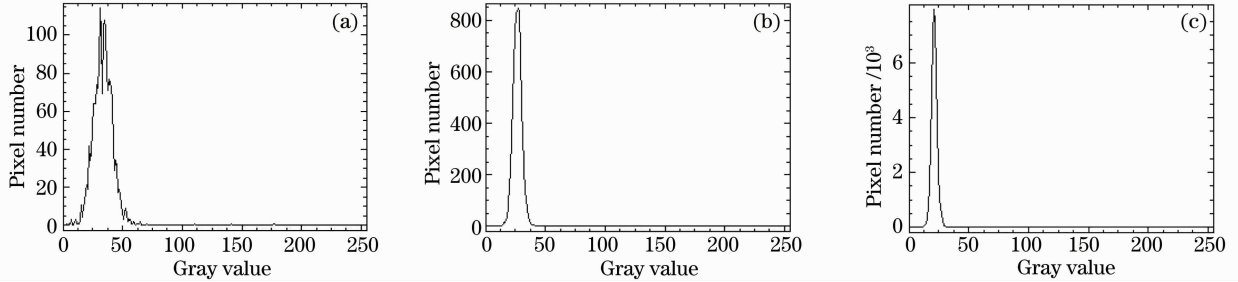


图 11 实验二 BVM 探测结果直方图, 空间分辨率/光谱分辨率分别为(a) 40 m / 20 nm; (b) 20 m / 20 nm; (c) 8 m / 20 nm
Fig. 11 BVM detection result histogram of the second experiment, spatial resolution/spectral resolution are
(a) 40 m / 20 nm; (b) 20 m / 20 nm; (c) 8 m / 20 nm

表 6 CEM 与 BVM 算子探测结果方差比较

Table 6 Comparison of variance between CEM and BVM detection results

Spatial resolution/spectral resolution of group one	Detector	Variance	Spatial resolution/spectral resolution of group tow	Detector	Variance
8 m / 40 nm	CEM	5.204	40 m / 20 nm	CEM	16.589
	BVM	4.933		BVM	10.574
8 m / 20 nm	CEM	15.788	20 m / 20 nm	CEM	16.593
	BVM	3.605		BVM	5.208
8 m / 10 nm	CEM	21.430	8 m / 20 nm	CEM	15.788
	BVM	3.296		BVM	3.605

由于检测图像中, 目标在整幅影像上的数量较少, 因此整幅图像的背景部分提供绝大部分信息。而图像方差表示信息的离散度, 同一影像方差越小, 则离散度越小, 目标越集中。两组实验中, 如表 6 和

图 12 所示, 实验一中, 当光谱分辨率增大后, CEM 结果方差急剧上升, 而 BVM 结果方差则保持平稳减少的趋势; 实验二中, 当空间分辨率减小后, CEM 结果方差保持较大值, 而 BVM 结果方差则急剧下

降。综上所述,在保持感兴趣目标信息不变的情况下,较CEM算子而言,BVM算子能够将同一影像中的背景信息压制到更小范围内,使感兴趣目标与

背景间距进一步拉大,从而大大提高了感兴趣目标探测能力。

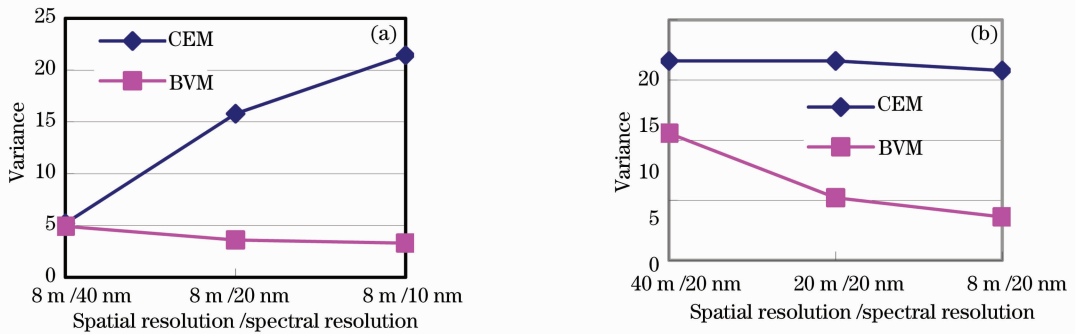


图 12 CEM 与 BVM 结果方差折线图。(a) 实验 1; (b) 实验 2

Fig. 12 CEM and BVM detection result variance line graph. (a) the first experiment; (b) the second experiment

5 结 论

从信息论中的自信息概念出发,设计了方差自信息模型,提出了基于方差最小的目标探测算法,并利用 BVM 算子与 CEM 算子进行了对比实验。在空间分辨率变化或光谱分辨率变化情况下,BVM 均可实现检测相关目标的目的,且结果正确。在抑制背景信息方面,BVM 算法较 CEM 算法具有更强的能力,因此该算法具有比 CEM 算法更稳健的探测性能。由于高光谱影像的自相关矩阵与协方差矩阵具有相同的数量级,所以本算法的效率较高,具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Y. E. Shimabukuro, J. A. Smith. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote sensing*, 1991, **29**(1): 16~20
- 2 J. J. Settle, N. A. Drake. Linear mixing and estimation of ground cover proportions [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, **14**(6): 1159~1177
- 3 E. A. Aston, A. Schaum. Algorithm for the detection of sub-pixel targets in multispectral imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, **64**(7): 723~731
- 4 D. Heinz, C. -I. Chang. Fully constrained least squares linear mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(3): 529~545
- 5 C. -I. Chang, Qian Du, S. -S. Chiang *et al.*. Unsuperovised target subpixel detection in hyperspectral imagery [C]. *SPIE*, 2001, **4381**: 370~379
- 6 J. C. Harsanyi, C. -I. Chang. Hyperspectral image classification

and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(4): 779~785

- 7 Sun Jixiang. *Modern Pattern Recognition* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2001. 213~227
- 孙即详. *现代模式识别* [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001. 213~227
- 8 Tai Sucai, Sun Wenyu, He Juanjuan. *Applied Mathematical Statistics* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. 105~132
- 邵淑彩, 孙韞玉, 何娟娟. *应用数理统计* [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005. 105~132
- 9 Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chenyi. *Probability Theory and Mathematical Statistics (the 3rd Edition)* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001. 150~198
- 盛 骤, 谢式干, 潘承毅等. *概率论与数理统计(第三版)* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001. 150~198
- 10 G. F. Hughes. On the mean accuracy of statistical pattern recognizers [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1968, **IT-14**(1): 55~58
- 11 Xun Lina, Fang Yonghua, Li Xin. A mall target detection approach based on endmember extraction in hyperspectral image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1178~1182
- 寻丽娜, 方勇华, 李 新. 高光谱图像中基于端元提取的小目标检测算法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1178~1182
- 12 Li Na, Zhao Huijie, Jia Gruorui *et al.*. Anomaly detection based on extended mathematical morphology for hyperpectral imagery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1480~1484
- 李 娜, 赵慧洁, 贾国瑞等. 基于扩展数学形态学的高光谱图像异常检测 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1480~1484
- 13 He Lin, Pan Quan, Di Wei *et al.*. A mall-target detector based on single likelihood test for hyperspectral imagery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2155~2162
- 贺 霖, 潘 泉, 邸 韡等. 一种基于单似然检测的高光谱图像小目标检测器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2155~2162