

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

光谱成像伪装干扰效果的相关函数分析

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:为了探索利用宽波段伪装对光谱成像设备实现干扰的有效性,研究了定量评估光谱成像干扰效果的方法。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,并利用相关函数对光谱成像伪装干扰效果进行了定量分析。结果表明,在试验条件下,实施伪装前后光谱图像之间的相关函数 C 值因伪装前的目标特性、伪装网层数以及波段的不同,可在 0.68 到 0.98 之间变化,可以较灵敏、精确地反映伪装对光谱图像的影响程度,即干扰效果,并可便捷、直观地展示出干扰效果随光谱波段的变化情况。得到的评估结果符合通过目视谱图的直观判别结果,因此可以用于定量、客观地评估光谱成像干扰效果。

关键词:光谱成像;光电对抗;伪装干扰;干扰效果评估;相关函数

中图分类号:TP75;TN97 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Analysis of camouflage jamming effect on spectral imaging by using correlation function

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

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

* Corresponding author, E-mail:13661268027@163.com

Abstract: To investigate the effectiveness of wider wave band camouflage jamming on spectral imagers, a method to evaluate quantitatively the jamming effect on spectral imaging was proposed and camouflage jamming tests were carried out with a kind of broad-band camouflage net and a hyperspectral imager. Then, the camouflage jamming effect on the hyperspectral imager was analyzed quantitatively by using a correlation function. The results show that, under the test condition, the correlation function between the spectral images before and after camouflaging varies between 0.68 and 0.98 with the changed target characteristics, camouflage net layers and the spectral band, which reflects the camouflage jamming effect on spectral images sensitively and accurately, and demonstrates the change of jamming effect with spectral bands conveniently. The evaluation results of jamming effect also accord with that obtained by observing spectral images. So the correlation function could be used to evaluate the jamming effect on spectral imaging quantitatively and impersonally.

Key words: spectral imaging; electro-optical countermeasure; camouflage jamming; evaluation of jamming effect; correlation function

收稿日期:2015-05-14;修订日期:2015-06-01.

基金项目:试验技术研究重点项目(No. BZ-000-1-1102)

1 引 言

作为新一代的光电探测技术,光谱成像技术在地物目标的探测和精细识别方面相对于传统光学遥感技术具有十分显著的优势,并已在测绘、地质调查、矿产勘探、农业遥感、环境监测、军事侦察等领域得到了广泛应用^[1-2]。随着光谱成像技术在军事领域的日益普及,国土安全受到了威胁^[3-5],针对光谱成像设备特别是来自空间的光谱成像探测的电子防护和对抗变得日益迫切,相关的电子对抗技术也越来越受到重视。与传统的光电成像设备只能获取地物个别光谱波段的图像不同,光谱成像设备可以同时获取少则几十、多则几百个光谱波段的图像,因此光谱成像设备的干扰防护方法、干扰机理、干扰效果及其评估方法也不同于传统的光电成像设备。据了解,目前相关研究基本上还处于空白状态。随着针对光谱成像设备的电子对抗技术及装备的发展和应用,对这些技术及装备效能的评估显得日益迫切。定量、客观、准确评估它们对光谱成像设备的干扰效果,是推动相关技术及装备快速发展的重要环节。为此有必要尽快开展光谱成像干扰效果评估问题的研究。

由于光谱成像设备通常工作在比较宽的波段范围内并拥有大量光谱波段,宽波段的伪装材料和伪装网^[6-8]是比较廉价高效的对抗手段和措施。为了探索利用宽波段伪装对光谱成像设备实现干扰的有效性,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,并利用相关函数对光谱成像伪装干扰效果进行了定量分析,对光谱成像干扰效果的评估方法进行了初步探讨。

2 伪装干扰试验

光谱成像伪装干扰试验的合作目标分别采用了白色、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。伪装网采用了一种宽波段迷彩伪装网,使用时覆盖在

合作目标外部以伪装目标,如图 1 所示。如图 2 所示,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 $1\ 024 \times 1\ 024$ 的面阵探测器,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物方场景水平方向的扫描。分光系统采用基于凸面光栅的修正 Offner 分光成像系统,将入射的 $400 \sim 780\ \text{nm}$ 可见光波段辐射分为 $1\ 024$ 个光谱波段,依次编号为 $1 \sim 1\ 024$ 。



图 1 利用伪装网对合作目标进行伪装

Fig. 1 Cooperative target covered with camouflage net

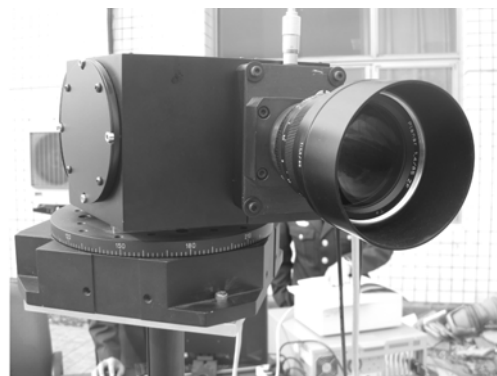


图 2 超光谱成像仪

Fig. 2 Hyperspectral imager

试验时,超光谱成像仪布设在距离合作目标约 $100\ \text{m}$ 处,将其视场中心瞄准目标。首先,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,获得相应的光

谱图像数据。然后,将伪装网罩在目标上,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。在秋季的不同时间,对同样背景下白、银灰两种颜色的目标,采用单层、双层伪装网,分别进行了伪装干扰试验。

典型的试验结果如图3~图5所示。其中,图3和图4分别为同一天超光谱成像仪对白色目标和银灰色目标的试验结果,图5为另一天对白色目标的试验结果。光谱仪为480谱段,对应的中心波长为578 nm。为便于说明,将与图3、图4、图5对应的试验分别称为试验I, II, III。

通过目视光谱图像可以定性判别伪装效果。从图3所示试验I的测量结果看,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,伪装在480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。其他各谱段的伪装效果与480谱段的情况相似。

根据图4所示试验II对银灰色目标的测量结果,无伪装时银灰色目标与背景之间的灰度对比度要比白色目标低得多;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;在对目标实施双层伪装后,通过目视已不能鉴别目标与背景之间的灰度对比度相比单层伪装情形的变化。

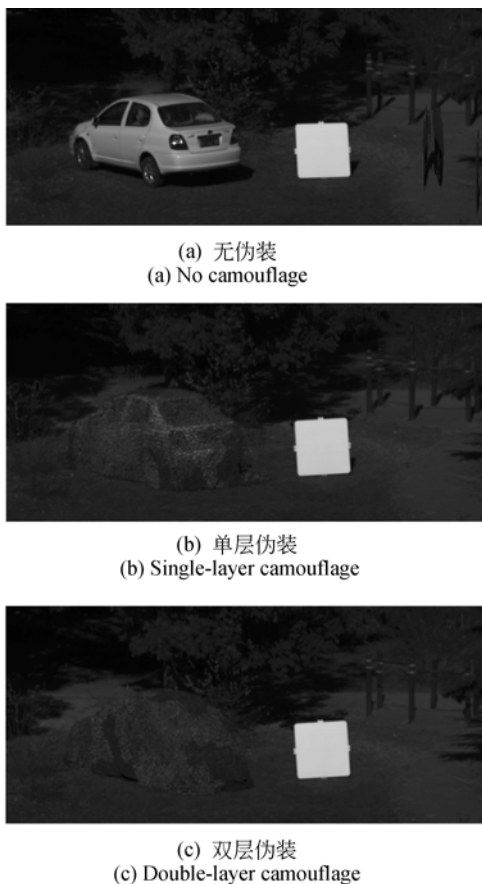


图3 试验I白色目标的测量结果

Fig. 3 Measuring results of white target for Test I

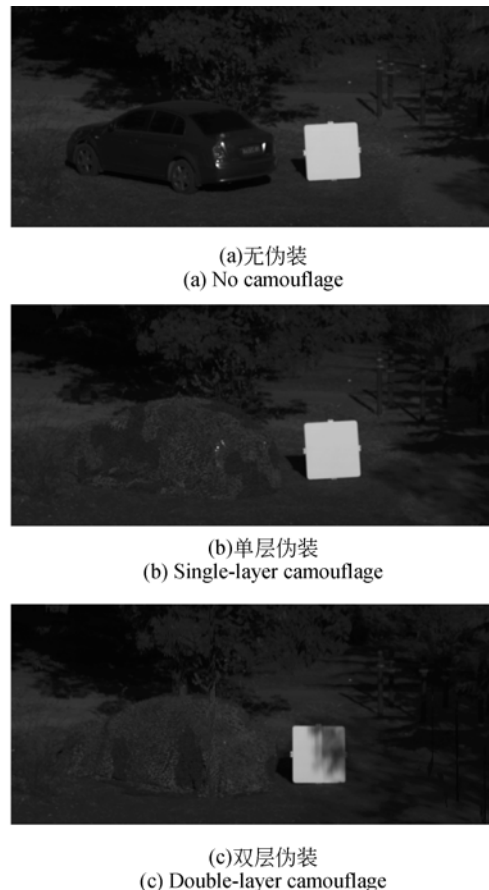


图4 试验II银色目标的测量结果

Fig. 4 Measuring results of silver target for Test II

如图5所示,在试验III中,由于超光谱成像仪的增益相比试验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



(a) 无伪装
(a) No camouflage



(b) 单层伪装
(b) Single-layer camouflage



(c) 双层伪装
(c) Double-layer camouflage

图 5 试验 III 白色汽车的测量结果

Fig. 5 Measure results of white car for Test III

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;在实施双层伪装后,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,相比单层伪装有明显地改进。

3 相关函数准则

为了进一步定量、客观分析评估上述光谱成像伪装的干扰效果,需要确定相应的干扰效果评估准则^[9]。干扰效果评估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。

对光谱成像设备实施干扰的目的是阻止设备准确获取地物目标的光谱图像数据,进而不能准确鉴别地物目标特性或使其鉴别能力下降。因此,在评估光谱成像的干扰效果时,需要重点关注干扰对光谱成像设备准确获取地物目标光谱图像数据的影响,具体来讲,就是通过对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。

这里对光谱图像数据进行单纯的图像特性变化分析与传统的光电成像设备是类似的,不同的是还需要考虑图像特性变化与光谱波段的关系,即不同谱段图像特性变化的差别。传统上,可以利用目标鉴别等级准则、目标鉴别概率准则、作用距离准则或相似度准则定量评估对光电成像设备的干扰效果^[10]。但是对于光谱成像设备,由于成像谱段多,不同谱段的干扰效果一般也不同,要通过少则几十、多则几百的成像谱段一一进行目标鉴别等级、目标鉴别概率、作用距离的分析以评估各谱段的干扰效果,显然是费时费力不可行的。而相似度准则依据干扰前后图像之间信息的相似程度定量评估干扰效果,操作简便,则可以考虑推广应用于光谱成像干扰效果的定量评估。这里考虑利用相关函数指标 (Correlation Function, CF)^[11-12]来评估光谱成像的干扰效果,相应的评估准则为相关函数准则。

设 f_{ij} 和 g_{ij} 分别为干扰前后同一图像中第 i 行、第 j 列像元的灰度值 ($i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$, m 和 n 分别为图像像元的行数和列数), 则干扰前后图像之间的归一化相关函数 C 为:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \cdot g_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{ij}^2 \right)}} \quad (1)$$

容易证明, $0 \leq C \leq 1$ 。当没有干扰因素对光电成像设备图像造成任何影响时,按式(1)有 $C=1$ 为最大值。当对光电成像设备实施干扰时,必然导致图像产生变化,使得干扰前后图像之间的 C 值小于 1。干扰效果越显著,干扰前后图像之间的信息差别越大,相似性或相关性越低,则反映图像之间信息相似程度的 C 值就越小。当 $C=0$ 时,干扰前后图像之间信息的相似性最低,或称完

全不相关。可见,相关函数 C 值的大小可以反映干扰前后光电成像设备输出图像信息的变化幅度,进而定量表征干扰对图像的影响即干扰效果。

4 伪装干扰效果的相关函数分析

根据伪装干扰试验结果,在超光谱成像仪的各成像谱段处,分别计算了无伪装/单层伪装光谱图像之间的相关函数 C ,无伪装/双层伪装光谱图像之间的 C 。

与伪装干扰试验 I 相应的白色目标的计算结果如图 6 所示。由图 6 可见,对目标进行伪装明显改变了图像中的信息,因此在可见光波段范围内所有谱段处的 C 值都小于 1。同时 C 值随谱段而变化,在中波部分较小,对于单层伪装最小达到 0.9,双层伪装最小达到 0.87(800 谱段附近);短波和长波部分则较大,对于单层伪装最大约为 0.95,双层伪装最大接近 0.94(1 和 1 024 谱段附近)。从 C 值表征图像之间信息的相似程度的角度看,对于不同谱段,伪装前后图像之间的信息相似度是不同的,相应地,伪装干扰效果也不同。其中,中波谱段伪装前后图像之间的信息相似度较小,表明伪装干扰效果较显著,而在短波和长波谱段,伪装前后图像之间的信息相似度较大,表明伪装干扰效果较弱。与单层伪装相比,实施双层伪装后,在各谱段处 C 值均有所减小,减小幅度因谱段不同可从 0.01 到 0.03,伪装干扰效果进一步得到改进,与前述通过目视谱图的直观判断结果一致。

图 7 中比较了利用单层伪装网分别伪装白色目标(实线)和银灰色目标(点划线)时得到的 C

值。由图可见,相比白色目标,银灰色目标伪装前后各谱段处的 C 值均明显增大,其中增大最显著的谱段在中波部分,幅度最大为 0.08(800 谱段附近)。这与前述通过目视谱图判断得到的银灰色目标伪装干扰效果明显弱于白色目标的结论一致。

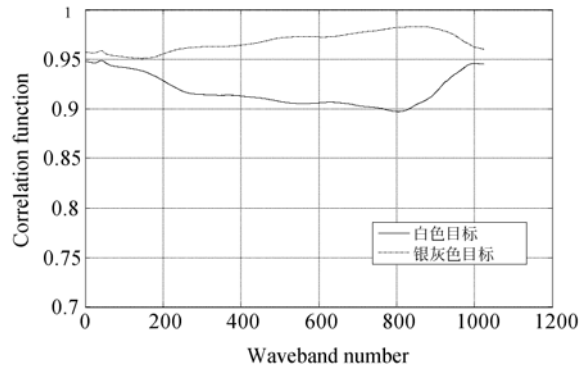


图 7 试验 I、II 相关函数 C 值对比
Fig. 7 Comparison of C between Test I and II

图 8 给出伪装干扰试验 III 中白色目标 C 值的计算结果。与图 6 所示伪装干扰试验 I 的计算结果相比, C 值整体上减小,特别是在中长波谱段减小幅度很大,在 800 谱段附近单层伪装达到 0.13,双层伪装达到 0.18,这与此时目标及背景亮度整体上的提高相关。相比单层伪装,实施双层伪装前后各谱段处 C 值也有比较明显的减小,减小幅度因谱段不同可从 0.02 到 0.08,这也与前述通过目视谱图得到的双层伪装效果明显优于单层伪装的结果一致。

需要补充说明的是,在计算相关函数 C 值时,选取的图像场景范围对计算结果有很大影响。

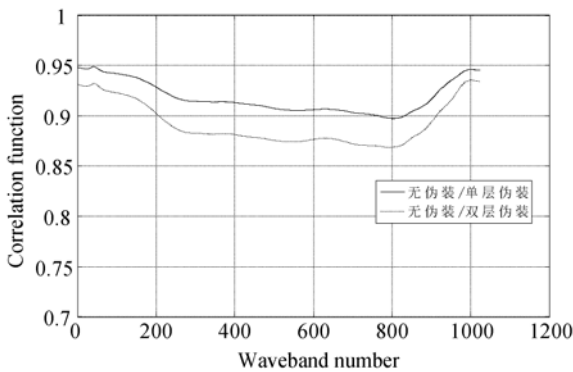


图 6 试验 I 相关函数 C 值的计算结果
Fig. 6 Correlation function C for Test I

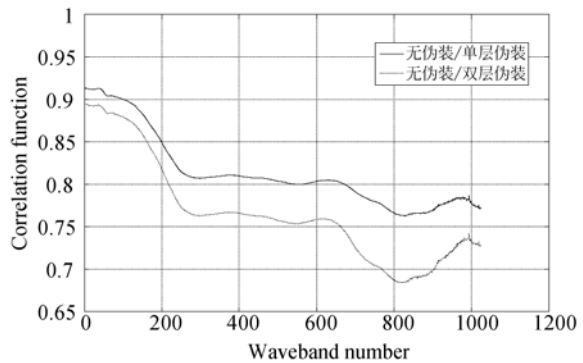


图 8 试验 III 相关函数 C 值计算结果
Fig. 8 Correlation function C for Test III

图9给出了分别从全图场景和部分场景计算得到的 C 值的比较。如图10所示,所选部分场景范围约为全景范围的一半时,目标占所选范围的 $1/3 \sim 1/4$ 。由图9可见,部分场景的 C 值计算结果显著小于全图,在800谱段处两者约相差0.1。鉴于此,在利用相关函数准则评估干扰效果时,需要明确一定的场景范围,在同样的或相近的场景范围内分析比较不同的干扰效果。

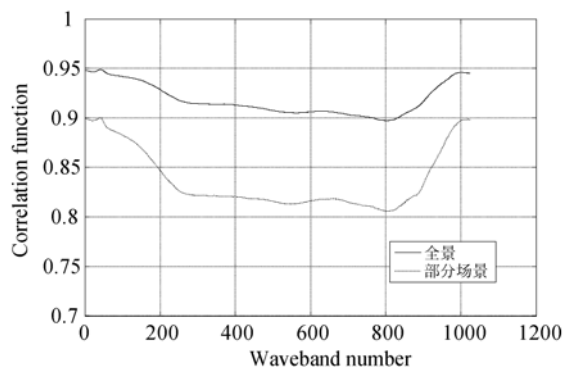


图9 试验I全景和部分场景 C 值计算结果对比

Fig. 9 Comparison of C between whole and partial scene in Test I



图10 试验I部分场景范围选择示意图

Fig. 10 Selection of partial scene in Test I

5 结论

在试验条件下,因伪装前的目标特性、伪装层数以及谱段的不同,实施伪装前后光谱图像之间的相关函数 C 值为 $0.68 \sim 0.98$,可以比较灵敏、精确地反映伪装对光谱图像的影响程度即干扰效果,并便捷、直观地展示出干扰效果随光谱波段的变化情况。同时,利用相关函数准则对光谱成像伪装干扰效果的评估结果符合通过目视谱图的直观判别结果,因此也是可信的,可以用于定量、客观评估光谱成像的干扰效果。

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.
ZHANG L P, ZHANG L F. *High-Spectral Remote Sensing* [M]. Beijing: Mapping Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 张若岚, 陈洁. 从单波段到超光谱——面向多维信息感知的红外光谱成像技术[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 257-264.
ZHANG R L, CHEN J. From single-band to ultraspectral——infrared spectral imaging technology oriented to multi-dimension information awareness [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 257-264. (in Chinese)
- [3] 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.
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. (in Chinese)
- [4] LAGUEUX P, PUCKRIN E, TURCOTTE C S, et al. Airborne infrared hyperspectral imager for intelligence, surveillance and reconnaissance applications [J]. *SPIE*, 2012, 8542: 854226.
- [5] WEATHERBEE O, JANASKIE J, HYVÄRINEN T. Advanced hyperspectral imaging solutions for near real-time target detection [J]. *SPIE*, 2012, 8542: 854223.
- [6] 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.
GAO Y F, SHI J M, ZHAO D P, 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. (in Chinese)
- [7] MILEWSKI S, DULSKI R, KASTEK M, et al. Coatings masking in near, medium, and far infrared used for ship camouflage [J]. *SPIE*, 2011, 8185: 81850V.
- [8] ALBERTONI A. Long wave infrared metamaterials and

- nano-materials design, simulation, and laboratory test for target camouflage in the defence application [J]. *SPIE*, 2011, 8185: 818509.
- [9] 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.
GAO W, HUANG H M, LI J. *Evaluation Methods for Electro-Optical Jamming Effectiveness* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 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(增): 270-273.
GAO W, HE W. Evaluation rules of smokescreen jamming effectiveness on electro-optical observation and aiming devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(Supp.): 270-273. (in Chinese)
- [11] 张长江. 数字图像处理及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
ZHANG CH J. *Digital Image Processing and Its Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [12] 王青松, 瞿继双, 黄海风, 等. 联合实、复相关函数的干涉 SAR 图像配准方法 [J]. *测绘学报*, 2012, 41(4): 563-569.
WANG Q S, QU J SH, HUANG H F, *et al.*. A method based on integrating real and complex correlation function for InSAR image coregistration [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(4): 563-569. (in Chinese)

作者简介:



高 卫(1970 -), 男, 陕西榆林人, 博士, 研究员, 1998 年于中科院陕西天文台获得博士学位, 1998-2000 年于中科院上海光学精密机械研究所做博士后, 主要从事光学工程、光电对抗试验评估技术的研究。E-mail: 13661268027@163.com