

文章编号: 1007-4619(2006)02-0272-07

2L-IHP 目标检测算法及其在 A IRSAR 数据中的应用

钟雪莲¹, 王长林¹, 周平², 张新征²

(1 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息国家重点实验室, 北京 100101;

2 北京环境特性研究所 目标与环境电磁散射辐射国家科技重点实验室, 北京 100854)

摘 要: 简要介绍了 2L-IHP (Two-Looks Internal Hermitian Product) 算法, 并针对实际情况对其作了相应的调整和
改进。主要是突破算法对数据源的限制, 使得它可以应用到幅度图像中。对于极化 SAR 图像, 使用 PWF
(Polarimetric Whitening Filter) 方法将 3 个通道的图像合成为一幅检测图, 再进行目标检测。利用 ADTS (Advanced
Detection Technology Sensor) 数据, 对以上各种算法的检测效果进行了分析比较。应用 C、L、P 波段的 A IRSAR 极化
数据进行试验, 发现 3 个波段中, L 和 C 波段的检测效果最好; 4 种极化方式中, HH 极化取得最佳的检测效果; 并且
得出全极化数据的检测结果优于单极化数据的结论。但以上结论还有待进一步验证。

关键词: 2L-IHP; 目标检测; SAR 图像**中图分类号:** TP722.6/TP751.1 **文献标识码:** A

2L-IHP Algorithm for Target Detection and Its Applications in A IRSAR Data

ZHONG Xue-lian¹, WANG Chang-lin¹, ZHOU Ping², ZHANG Xin-zheng²

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Institute of Remote Sensing Applications

Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China;

2. National Key Laboratory of Target and Environment Electromagnetic Scattering and Radiation Beijing Institute of

Environmental Characteristics Beijing 100854, China)

Abstract 2L-IHP algorithm for man-made target detection is discussed briefly first. In order to apply it
widely, it is modified to circumvent the constraint of the data. For polarimetric SAR images, PWF is used to
generate an image for target detection. According to ADTS dataset, these algorithms are analyzed and evaluated
respectively. C-, L- and P-band A IRSAR data are also processed, and we derive some conclusions. Considering
the penetrating ability of the microwave, C- and L-band SAR data obtain the best detecting accuracy among the
three bands. HH polarization performs better than VV and HV polarization for man-made target detection.
Moreover, because more information is contained in polarimetric SAR data, they should get better detecting
results theoretically. It is concluded from the experiments that polarimetric SAR data have advantages over
single channel SAR data when they are applied for man-made target detection, which is consistent to the
theoretical analysis. But all these conclusions need further validation.

Key words 2L-IHP; target detection; SAR images

收稿日期: 2005-03-16; 修订日期: 2005-06-06

基金项目: 国家科技重点实验室基金项目“目标与环境电磁散射辐射”(51477050103zk2301)。

作者简介: 钟雪莲(1980—), 女, 2002年毕业于浙江大学地球科学系, 获学士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所硕士研究生。主要

研究方向为微波雷达遥感, SAR 图像中人造目标的检测和辨别。E-mail: xuelianzhong@hotmail.com。

1 引言

随着遥感技术的快速发展和图像分辨率的不断提高,近几年来,目标的检测和识别备受关注,特别是受到军方的重视。一般的目标识别系统分为 3 个步骤:检测、辨别和识别。目标检测是其中的第一步,也是很重要的一步,算法的好坏直接决定了整个目标识别系统的计算量。此处主要讨论 SAR 图像中目标的检测问题。传统的目标检测主要利用目标的幅度信息,典型的是恒虚警率 (Constant False Alarm Rate CFAR)方法,包括它的各种改进方法。但是,CFAR 方法一个最大的缺点是虚警率高,处理费时。SAR 图像不仅记录了地物的幅度信息,还记录了它们的相位信息,因此,也可以利用相位信息进行目标检测^[1-4],而 2L-IHP 方法是其中检测效果最好的一种方法。文献 [5]专门讨论了 ML-CFAR (Maximum Likelihood CFAR)和 2L-IHP 方法的优缺点,并用林肯实验室 ADTS^[6]数据集进行了检验。本文主要探讨 2L-IHP 算法的适应性问题,以及它在不同波段、不同极化条件下的表现情况。其间由于数据源的限制,本文对算法作了相应的调整,并得到一些结论。

2 算法概述

2.1 2L-IHP 算法

2L-IHP 方法是从子孔径相干的基础上发展起来的,而子孔径相干方法的思想来源于干涉 SAR。由人造目标和自然地物的散射特性可知,目标在很大的角度失配范围内都具有强相干性,而自然地物需要亚像元级的配准才能形成强相干。因此,可以用相干的方法区分目标和杂波。这种方法所需要的图像对可以通过 SAR 子孔径处理得到。子孔径图像可以在成像前得到,也可以在成像后得到,即从单视复图像 (Single Look Complex SLC)中分解出来的。由于一般用户难以得到成像前的原始数据,这里主要讨论成像后的子孔径处理。为了减小点目标脉冲响应旁瓣的影响,SAR 数据一般都经过卷积过程,使用权重函数或非均匀分布的天线图进行卷积。子孔径处理时,需要消除天线加权的影响。SLC 图像通过方位向 Fourier 变换得到距离-Doppler 频谱,去除权重后将频谱分成两部分,分别加权后进行方位向 Fourier 反变换,就得到了两幅子孔径图像。而 2L-IHP 在方位向和距离向都进行了子孔径处理

和运算:首先,对 SLC 图像在方位向进行一维 Fourier 变换,分割频谱,反变换得到方位向上的两幅子孔径图像,这两幅子孔径图像进行相干计算得到一幅相干图;其次,对原始的 SLC 图像进行距离向 Fourier 变换,频谱分割,反变换得到距离向上的两幅子孔径图像,同样进行相干计算得到另一幅相干图;最后,两幅相干图非相干叠加得到总的相干图。对这幅相干图设定阈值,大于阈值的就认为是目标。有多种方法计算图像 s_1 、 s_2 的相干性,但是考虑到幅度和相位信息在目标检测中都非常重要,Souyris^[2]等人利用内厄密积 (Internal Hermitian Product)

$$\rho_{\text{hem}} = \langle s_1 \cdot s_2^* \rangle \quad (1)$$

来表示相干系数,它很好地捕捉了这两部分的信息。 $\langle \cdot \rangle$ 表示空间邻域平均。为了消除边界的影响,本文也考虑了 Weydahl 推荐的方向边界掩模 (Directional Edge Mask)^[8]方法来估计相干系数,但是试验结果令人很不满意。

经过权重消除后,2L-IHP 方法的检测性能大大改善,如图 1 所示。该图是 ADTS 数据中 M60 坦克,大小为 100 像素 \times 100 像素。可以看出,在天线权重消除前后,相干值相差约一倍,而高的相干值使得目标更突出,从而更易检测。

2.2 2L-IHP 算法的调整与改进

2L-IHP 算法要求原始数据必须是 SLC 数据。但在很多情况下,SLC 数据很难得到,容易获得的是幅度或强度 SAR 数据。为了使 2L-IHP 算法能够适应于不同的数据,需要对算法作相应的调整。

2.2.1 幅度 2L-IHP

对于单极化数据来说,易于获得的是幅度图像,因此在 2L-IHP 处理中用幅度图像替换 SLC 图像。这样,对 SLC 图像进行子孔径处理时消除天线权重影响的步骤就不适用了,直接对幅度图像进行方位向和距离向的子孔径处理(这里和子孔径的概念有些偏离了,只是借用这个方法而已),其他过程与 2L-IHP 同。图 2 是 ADTS 数据集中 M113 装甲人员运输车、100 \times 100 大小的图像,分别经过 2L-IHP (这里是指没有经过天线权重处理的 2L-IHP 方法,后文中没有特别说明,都与此同)和幅度 2L-IHP 处理所获得的相干系数的三维显示图。可以看到,后者比前者的相干系数略小,但目标与背景间的对比度足以用于目标检测。为了进一步比较两者的检测效果,应用 ADTS 数据集中 7 幅含有人造目标的图像作试验。这 7 幅图像中共含有 52 个人造目标,包括

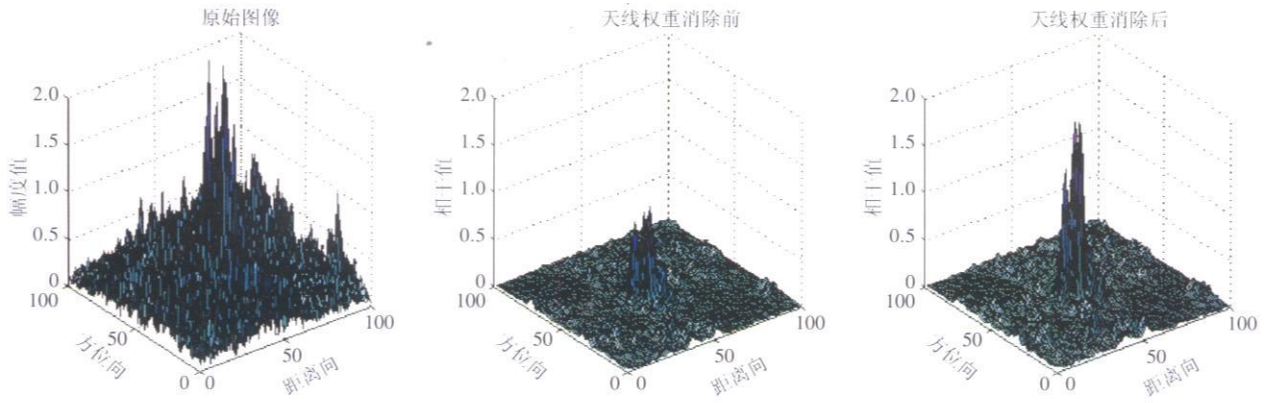


图1 M60坦克原始图像及其天线权重消除前后的相干图

Fig.1 SAR image of tank M60 and its coherence images before and after removing the weight of antenna diagram pattern

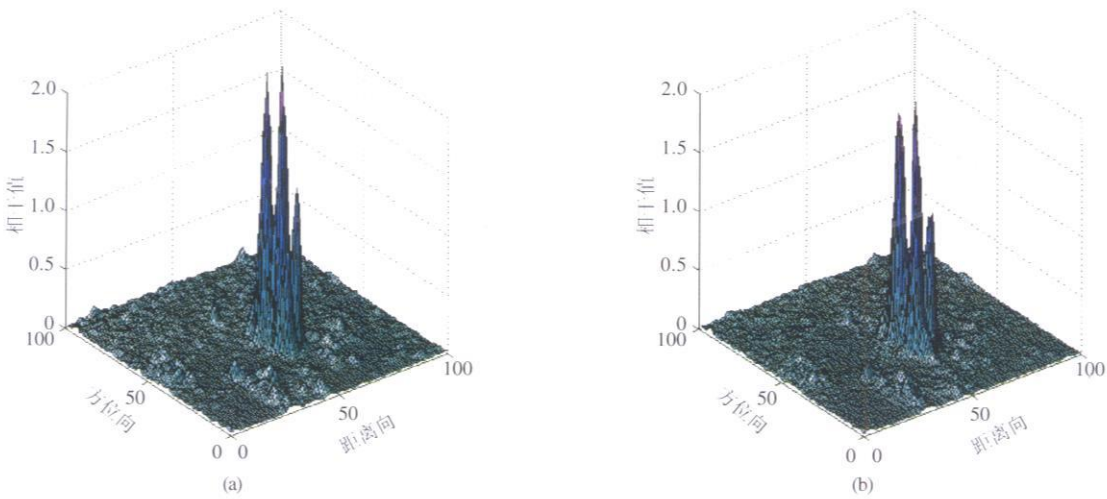


图2 2L-IHP(a)和幅度2L-IHP(b)相干系数的比较

Fig.2 Coherence of 2L-IHP(a) and amplitude 2L-IHP algorithm(b)

军事目标和角反射器。分别对它们进行 2L-IHP 和幅度 2L-IHP 运算,表 1 给出了两者的检测目标数和虚警数。很明显,它们的虚警在相同的水平上,但幅度 2L-IHP 遗漏了一个目标,而此被遗漏的目标在 2L-IHP 算法中的信息同样非常微弱。只有经过天线权重处理后,该目标的信息才大大增强。

表 1 ADTS数据集在 2L-IHP和幅度 2L-IHP算法下的检测结果

Table 1 Detecting results of 2L-IHP and amplitude 2L-IHP algorithm for ADTS dataset 单位:个

算法	总的目标数	检测到的总目标数	虚警数	遗漏目标数
2L-IHP	52	52	11	0
幅度 2L-IHP	52	51	10	1

2.2.2 极化 2L-IHP

单极化数据毕竟只能反映目标的一部分信息,

在能够得到全极化数据的情况下,使用全极化数据作检测能够得到更多的信息,因而也就更容易检测到目标。文献[2]中也介绍了一种使用全极化数据作目标检测的算法——Po2L-IHP,但它同样需要 SLC 数据。在不能得到极化 SLC 图像的情况下,本文利用 PWF 方法获得全极化检测图像。

将各个不同的极化通道组合得到全极化图像,有很多方法。其中,极化白化滤波(Polarimetric Whitening Filter PWF)方法得到了广泛应用。假设用极化散射矩阵三个复数元素 HH、HV 和 VV 来表示雷达回波 X,则

$$X = \begin{bmatrix} HH_i + jHH_q \\ HV_i + jHV_q \\ VV_i + jVV_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} HH \\ HV \\ VV \end{bmatrix} \quad (2)$$

PWF 方法寻找到矩阵 Σ 使得全极化图像 $y = X \Sigma^{-1} X^\dagger$ 的噪声最小, Σ 为背景图像的极化协方差矩阵, X^\dagger

表示 X 的共轭转置。在这里, 背景的极化协方差采用以下形式来估计^[9, 10]:

$$\Sigma = \sigma_{HH} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \rho\sqrt{\gamma} \\ 0 & \epsilon & 0 \\ \rho\sqrt{\gamma} & 0 & \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

这里,

$$\epsilon = \frac{E\{|HV|^2\}}{E\{|HH|^2\}} \quad \gamma = \frac{E\{|VV|^2\}}{E\{|HH|^2\}}$$

$$\rho = \frac{E\{HH \cdot VV^*\}}{\sqrt{E\{|HH|^2\}E\{|VV|^2\}}} \quad \sigma_{HH} = E(|HH|^2)$$

数学期望 E 可以用背景样本估计出来。利用 Stokes 矩阵计算时, 可作下面的公式推导:

$$y = X^\dagger \Sigma^{-1} X = a |HH|^2 + c |HV|^2 + d |VV|^2 + 2\text{Real}(bHH^* VV) \quad (4)$$

式中, $a = \frac{1}{\sigma_{HH}}$, $b = \frac{-\rho}{\sigma_{HH}\sqrt{\gamma}(1-|\rho|^2)}$, $c = \frac{1}{\epsilon\sigma_{HH}}$, $d = \frac{1}{\gamma\sigma_{HH}(1-|\rho|^2)}$, Real 代表取实部。应用 PWF 方法, 可以从 Stokes 矩阵获得全极化图像, 然后再按照幅度 2L-IHP 方法处理。

2.3 地物相干系数分析

为了比较不同地物在 2L-IHP 及其调整算法下的相干系数的关系, 利用 ADTS 数据作分析提取草地、树林灌木、军事目标 (坦克、榴弹炮、装甲车) 这些地物的信息。对于一般的 2L-IHP 经过天线权重处理的 2L-IHP 以及幅度 2L-IHP 算法, 分别作图表示相干系数和 SAR 幅度值 (dB) 之间的关系 (图 3、图 4 和图 5)。由于 SAR 后向散射值的变化范围大, 因此用它的对数形式来表示幅度。从三幅图中可以看出: 军事目标比自然地物 (草地、树林) 的相干值高, 两者之间有明显的区分, 而树林又明显比草地的相干值高。因为树干和树冠在特定的角度可以产生近似二面角的强后向散射, 类似于人造目标的散射特征, 草地可以近似为朗伯体散射, 因此树林总的相干系数要比草地高。即使是在同一个幅度值水平上, 军事目标的相干值也仍然高于树林灌木。图中, 在经过天线权重处理的 2L-IHP 算法下, 军事目标和自然地物的相干值差异最大, 意味着最易区分。而一般的 2L-IHP 次之, 幅度 2L-IHP 再次之。虽然如此, 但由于幅度 2L-IHP 对军事目标和自然地物仍然具有明显的区分, 对最后的检测结果也没有太大的影响, 重要的是对数据的要求并没有前两者高, 因此更适合于应用。

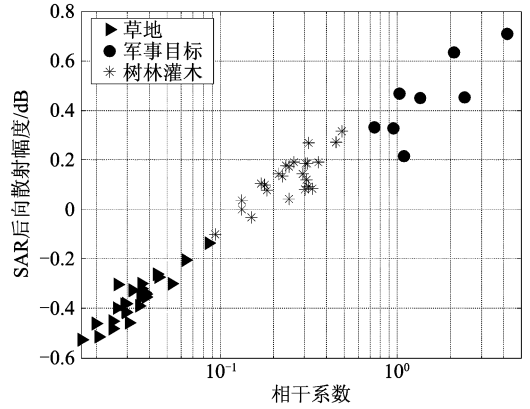


图 3 2L-IHP 算法所得相干系数和 SAR 幅度值之间的关系
Fig 3 Relationship between amplitude and coherence from 2L-IHP

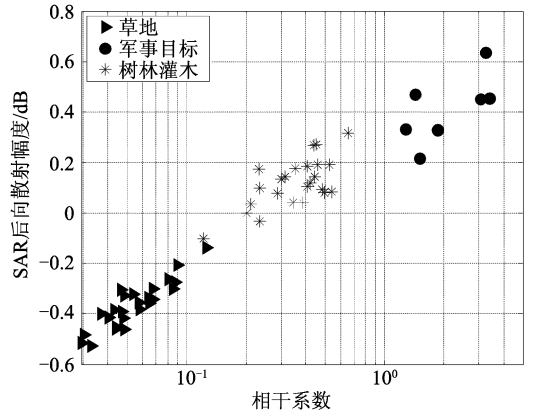


图 4 经天线权重处理后的 2L-IHP 算法所得相干系数和 SAR 幅度值之间的关系
Fig 4 Relationship between amplitude and coherence from 2L-IHP with removing the antenna weight

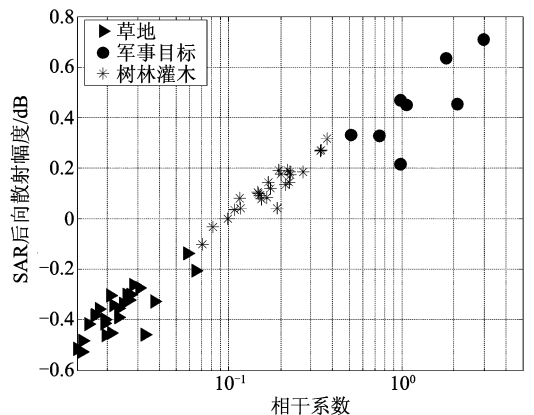


图 5 幅度 2L-IHP 算法所得相干系数和 SAR 幅度值之间的关系
Fig 5 Relationship between SAR amplitude and coherence from amplitude 2L-IHP

3 不同极化不同波段对目标检测的影响

为了得到最佳的检测效果,需要对成像波段和极化进行选择,以期达到最优的组合。对于全极化图像,需要考虑不同极化对检测结果的影响,找到最优的极化通道。对于多波段 SAR 成像系统,需要找到最优的成像波段。基于此目的,对于幅度 2L-IHP 算法,本文使用 AIRSAR 的 C、L、P 波段全极化数据作试验。

3.1 数据源

所用的 AIRSAR 数据是 NASA/JPL 于 1996 年 11 月 30 日在北纬 24°、东经 121°的地区成像得到的。成像时间约为早晨 6 点钟,工作带宽为 40MHz,距离分辨率约 6m,方位分辨率约 9m。选择了一 500 像素 × 600 像素、包含人造目标的试验区,如图 6 所示。分析的重点主要集中在图中右上角整齐排列的 14 个目标上。这些目标相互间距很小,若采用传统的 CFAR 方法,由于邻近目标对被检测目标背景均值与方差的干扰,很难检测和区分出这些目标。因此,传统的检测方法在此不可行。

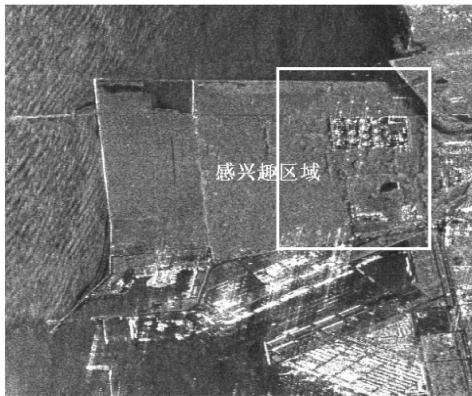


图 6 AIRSAR 试验区 (C-HH)

Fig 6 AIRSAR image(C-HH)

3.2 单极化图像的处理和分析

使用幅度 2L-IHP 算法对 AIRSAR 不同波段不同极化下的图像分别进行处理,检测结果见表 2。由于 HV 图像的检测结果明显很差,因此在表中和后面的图中都没有考虑 HV 的情况。从表中可以看到: C-HH、L-HH、L-VV 处于同等的检测水平上,优于 C-VV、P-HH、P-VV。那么, C-HH、L-HH、L-VV 的

表 2 全极化和单极化图像在试验区中的目标检测结果

Table 2 Detecting results of SAR images from different bands and polarization 单位:个

波段	目标检测数	目标遗漏数
C-HH	14	0
C-VV	11	3
C全极化	14	0
L-HH	14	0
L-VV	14	0
L全极化	14	0
P-HH	12	2
P-VV	11	3
P全极化	12	2

检测结果又如何排序呢? 解决这个问题,需要有量化的指标。由于检测效果与相干系数直接相关,考虑使用目标区域内的最大相干系数来判断检测的优劣。相干系数高,则检测效果好。图 7 是 C、L、P 波段 HH、VV 极化条件下,试验区中的 14 个人造目标最大相干系数的比较。从图中可以看出: C-HH 与 L-HH 相差不大, L-VV 次之;对于各个波段来说,都有 HH 极化优于 VV 极化。

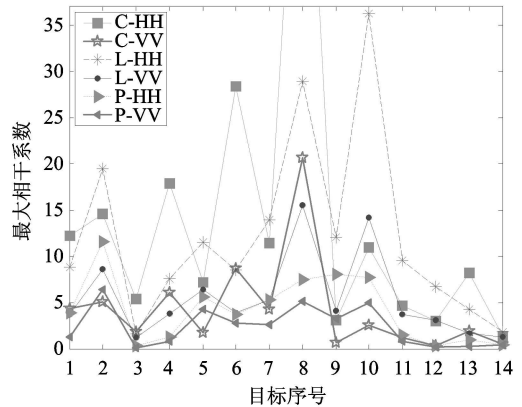


图 7 C、L、P 波段 HH、VV 极化条件下 14 个人造目标最大相干系数的比较

Fig 7 Coherence of 14 man made targets in HH、VV SAR images

综合以上的结论,关于单极化图像,可以得到:
(1)对于同波段图像,检测效果: HH > VV > HV;
(2)对于同极化图像,检测效果: L > C > P (C-HH 与 L-HH 难以判断优劣,若考虑穿透性,则 L 波段更为有利);
(3)总体上看,检测效果: L-HH > C-HH > L-VV。

3.3 全极化数据的处理及分析

由上述算法部分可以看到,在进行全极化数据处理时,需要估计背景的极化协方差矩阵。在试验区的背景区域中选择 100×100 像素大小的样本来估计协方差矩阵中各变量的值。利用矩阵 Σ 就可以得到 PWF 处理后的图像。对此图像进行幅度 2L-IHP 处理,得到不同波段下的相干图。为了比较不同波段下全极化图像检测的优劣,同样寻找目标的最大相干值。图 8 是试验区中 14 个目标的最大相干系数的比

较。从中可以看出,同单极化的情况一样,全极化条件下, L、C 波段的检测结果优于 P 波段,在不考虑其他因素时,它们之间的优劣一时难以得出。

3.4 单极化与全极化处理的比较

A RSAR 全极化图像相对于单极化图像来说,相干系数的绝对值较大,这一点可以从图 9 中看出, C 波段时两者的最大相干系数相差约 1.8 倍。L、P 波段与 C 波段情况相似,但 P 波段中两者的绝对值都低于正常阈值,因此在目标检测时很可能会被遗漏。

在 2L-IHP 方法中,相干系数是一个很重要的评价指标,其数值大意味着目标容易检测。从这个角度考虑,全极化图像优于单极化图像。也可以从最终的目标检测数来比较单极化和全极化图像。在不同波段的单极化和全极化图像中,检测试验区中的 14 个目标,结果见表 2。从表中可看出:同波段的全极化图像总是会得到最好的检测率,但在目标检测率上,全极化图像并没有比检测效果最好的单极化图像有所提高。这一点对于 P 波段图像尤其明显。虽然全极化较单极化图像检测占优势,但这并不意味着单极化图像检测不出来的目标,全极化图像就定能检测出。而且由于此处的目标数量很少,很难作统计意义上的说明。但是,此处所得的结果与理论分析并没有矛盾。

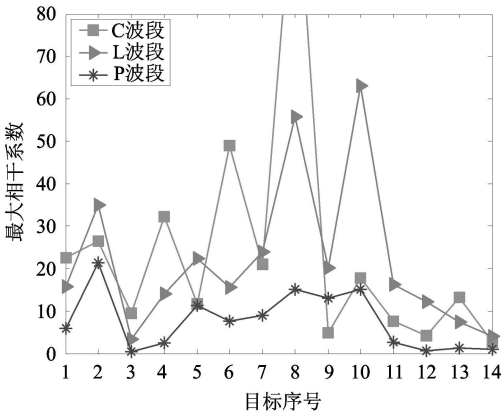


图 8 全极化条件下, 14 个人造目标最大相干系数的比较
Fig 8 Coherence of 14 man made targets in the polarimetric SAR images

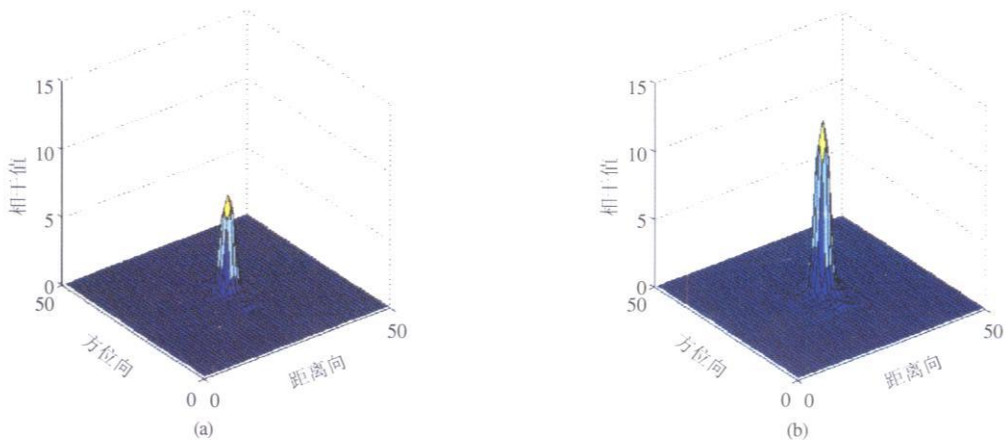


图 9 C 波段 HH 极化 (a) 和全极化 (b) 图像相干系数的比较
Fig 9 Coherence of C-band HH (a) and polarimetric (b) SAR images

4 结 论

本文简单介绍了 2L-IHP 目标检测算法,并针对实际情况对其做了调整,得到幅度 2L-IHP 和极化

2L-IHP。与一般的 2L-IHP 算法相比,幅度 2L-IHP 的检测效果略有下降,主要体现在相干系数值有所降低,但是由于幅度 2L-IHP 方法能够明显区分人造目标和自然地物,仍然能够满足人造目标检测的要求。在数据无法满足的情况下,该方法非常有效。

应用幅度 2L-HP 算法, 本文对 C、L、P 波段不同极化条件下的 A IRSAR 图像作处理, 得到如下结论:

(1) 对于同波段、单极化图像, 从检测效果上看, $HH > VV > HV$ 。(2) 对于同极化、不同波段图像, $L > C > P$ 。C-HH 与 L-HH 一时难以比较, 但考虑到波长越长, 穿透性能越好时, 检测时用 L 波段较用 C 波段更为有利。(3) 单极化条件下, 最好的检测波段为 C-HH 和 L-HH。(4) 从相干系数的角度考虑, 全极化检测优于单极化检测。

以上结论都是从该试验中得出的, 难免失之偏颇。由于本文针对的人造目标只有有限的几种, 而各目标对不同极化、不同波段电磁波的散射特性不同, 能否将该文中的算法和结论推而广之, 则还需要更多的数据支持和检验。

参 考 文 献 (References)

- [1] Meth R. Synthetic Aperture Radar Vehicle Detection via Subaperture Coherence [DB/OL]. <http://www.asc2002.com/manuscripts/J/Jo-02>. PDF. 2002.
- [2] Souyris J.C., Henry C., Adragna F. On the Use of Complex SAR Image Spectral Analysis for Target Detection: Assessment of Polarimetry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, **41**(12): 2725-2734.
- [3] Henry C., Souyris J.C., Marthon P. Target Detection and Analysis Based on Spectral Analysis of a SAR Image: a Simulation Approach [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Toulouse, France, 2003.
- [4] Amau A. Ship Detection by SAR Interferometry [A]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Hamburg, Germany, 1999.
- [5] Zhong X.L., Wang C.L. Comparison of Two Target Detection Methods in SAR Imagery [J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2004, **26**(Suppl): 336-342. [钟雪莲, 王长林. 两种 SAR 图像自动目标检测方法比较 [J]. 电子与信息学报, 2004, **26**(Suppl): 336-342.]
- [6] https://www.sdms.afri.af.mil/datasets/adts/sample_images.htm. 2005.
- [7] Fan L.F., Reigber A., Pottier E., et al. Scene Characterization Using Sub-Aperture Polarimetric SAR Data Analysis [A]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Toronto, Canada, 2002.
- [8] Weydahl D.J. Analysis of ERS SAR Coherence Images Acquired over Vegetated Areas and Urban Features [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, **22**(14): 2811-2830.
- [9] Novak L.M., Burl M.C. Optimal Polarimetric Processing for Enhanced Target Detection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1993, **29**(1): 234-244.
- [10] Novak L.M., Burl M.C. Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR Imagery [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1990, **26**(2): 293-305.