

SAR 目标检测中的一种稳健变化检测算法

杨志国 黄晓涛 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 在合成孔径雷达(SAR)目标检测中,目前采用的变化检测算法主要包括构造似然比法和最小二乘图像相减法,这两种算法在实际变化检测中分别存在如下问题:构造似然比法需要目标、杂波及噪声充分的先验知识,而最小二乘图像相减法则存在稳健性差的问题,鉴于上述问题,该文提出一种稳健可行的变化检测算法,该算法在最小二乘图像相减法的基础上引入了误差影响因子,通过迭代的方法求取待定参数,大大提高了变化检测的稳健性,文章最后基于不同算法进行了变化检测试验,试验结果进一步证明了该文提出算法的稳健性。

关键词: SAR 目标检测; 变化检测; 最小二乘; 误差影响因子; 迭代; 信杂比

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2094-05

A Robust Change Detection Algorithm in SAR Target Detection

Yang Zhi-guo Huang Xiao-tao Zhou Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The main change detection algorithms include forming likelihood ratio algorithm and Least Mean Square (LMS) image subtraction algorithm in Synthetic Aperture Radar (SAR) target detection. There are respective problems for two change detection algorithms: Forming likelihood ratio algorithm needs enough prior knowledge of target, clutter and noise, and LMS image subtraction algorithm is not robust enough. Considering above problems, this paper presents a robust change detection algorithm. The proposed algorithm introduces the influence factor of error on the basis of LMS image subtraction algorithm and calculates the parameters through iteration technique, which improves the robustness of change detection. Finally the results of change detection experiments based on different change detection algorithms are given to prove the robustness of the proposed algorithm in this paper.

Key words: SAR target detection; Change detection; LMS; Influence factor of error; Iteration; Signal-clutter ratio

1 引言

SAR 由于其主动性和全天候的特点而被广泛应用于军事和民用的各个方面,在军事应用方面, SAR 常用于检测敌方车辆、坦克等战术目标^[1,2],以提高我方战略部署的针对性。在 SAR 目标检测中,可以利用多种方法实现目标检测^[1,3,4],变化检测是其中一种重要的目标检测方法。变化检测是一种利用两幅在不同时间得到的 SAR 图像之间的差异来实现目标检测的方法,一般情况下,没有目标的一幅图像为参考图像,而存在目标的一幅图像为检测图像,利用变化检测可以在保留目标的前提下有效消除噪声,提高待检测 SAR 图像信杂比(SCR),进而提高目标检测性能。

目前采用的变化检测算法主要包括构造似然比法^[5]和最小二乘图像相减法^[6,7],其中构造似然比法基于 Neyman-Pearson 准则,利用一个与两幅图像对应的二维信号向量构造似然比函数,由目标、杂波、噪声的先验知识及两幅图像的像素值计算得出对应的似然比矩阵。因此,构造似然比法

的检测性能将直接取决于对目标、杂波、噪声先验知识的掌握程度,好的检测性能需要充分的先验知识,而这在实际 SAR 目标检测中非常困难,因此构造似然比法在变化检测中只能得到有限使用。变化检测的另一种实现算法是最小二乘图像相减法,该算法是为了克服直接图像相减法对 SAR 图像失配的敏感性而提出的,该算法在实际变化检测中不需要有关 SAR 图像的先验知识,具有可实现性强的优点。但另一方面,在进行实际变化检测时,为了适应复杂多变的检测背景,更好地消除杂波,经常将一幅大的检测图像进行分块变化检测^[7],而最小二乘图像相减法的检测性能受分块影响较大,稳健性差。鉴于上述问题,本文提出了一种稳健可行的变化检测算法,该算法在最小二乘图像相减法的基础上引入了误差影响因子,有效降低了变化区域对待定参数求解的不良影响,通过迭代的方法计算待定参数,使待定参数快速收敛于一确定值,从而大大提高了该算法对不同检测环境的适应性,增强了该算法实现变化检测的稳健性。文章最后给出了基于不同变化检测算法的试验结果,进一步验证了本文提出算法的稳健性。

本文组织结构如下:第2节介绍了两种主要的变化检测

算法并对其适用条件和检测性能进行了分析;第3节提出了一种稳健的变化检测算法;第4节基于最小二乘图像相减法和本文提出算法进行了变化检测试验并对试验结果进行了分析;第5节为结束语。

2 常用变化检测算法及其性能分析

2.1 构造似然比法

首先构造一组与参考图像和检测图像对应的二维向量,其中目标、杂波和噪声分别表示为

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中下标分别表示参考图像和检测图像。为了判断两幅 SAR 图像中是否有变化,构造如下假设检验

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{z} = \mathbf{c} + \mathbf{n}, \text{ 无变化} \\ H_1: \mathbf{z} = \mathbf{s} + \mathbf{n}, \text{ 有变化} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 \mathbf{z} 表示由参考图像和检测图像构成的二维变量。在上述假设检验条件下,由 Neyman-Pearson 准则设计如下似然比检测器

$$\Lambda(\mathbf{z}) = \frac{P(\mathbf{z}|H_1)}{P(\mathbf{z}|H_0)} \begin{cases} > \psi, \text{ 有变化} \\ < \psi, \text{ 无变化} \end{cases} \quad (3)$$

其中 P 分别表示在 H_0 和 H_1 情况下的条件概率函数, ψ 为设定的变化检测门限。

由式(3)可以看出,似然比矩阵的准确计算需要建立目标、杂波、噪声准确的统计分布模型,这要求在采用构造似然比法实现变化检测时必须充分掌握目标、杂波、噪声的先验知识,而在实际 SAR 目标检测中,很难对被检测地区的一些情况进行事先了解和判断,因此似然比变化检测算法所要求的检测条件在多数情况下难以满足,该算法只能在有限的情况下进行使用。

2.2 最小二乘图像相减法

实现变化检测最直接的方法就是将参考图像和检测图像进行配准相减,从而消除固定杂波,提高检测图像信杂比,但该方法对图像失配非常敏感,因此必须对其进行改进,最小二乘图像相减法就是为了克服图像直接相减法存在上述缺陷而被提出的,下面对该算法进行简单介绍。设参考图像为 z_1 , 检测图像为 z_2 , 对两幅图像进行配准后由参考图像对检测图像进行预测,表示为

$$\hat{z}_2(i, j) = \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l h_{mn} z_1(i-m, j-n) \quad (4)$$

其中 h_{mn} 为预测权系数,对该系数采用最小二乘算法进行求解,即

$$h_{mn} : \min \sum_i \sum_j [z_2(i, j) - \hat{z}_2(i, j)]^2 \quad (5)$$

根据得到的 h_{mn} , 将检测图像与预测检测图像进行配准相减,即得到需要的差值图像

$$\begin{aligned} D(i, j) &= |z_2(i, j) - \hat{z}_2(i, j)| \\ &= \left| z_2(i, j) - \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l h_{mn} z_1(i-m, j-n) \right| \end{aligned} \quad (6)$$

由上述计算过程可以看出,最小二乘图像相减法的核心问题是采用最小二乘算法对权系数 h_{mn} 进行求解,即权系数 h_{mn} 是在检测图像和参考图像变化最小的约束下得出,因此,该约束条件适用于两幅图像存在较小变化的情况,在该情况下,变化区域对权系数求解的影响可以忽略不计,采用最小二乘图像相减法将能得到好的变化检测性能;但是反之,当两幅图像存在较大变化时,变化区域将会严重影响权系数的正确求解,最小二乘图像相减法求解权系数采用的约束条件不再适用,采用该约束条件下求取的权系数 h_{mn} 进行变化检测,其性能将会大大下降。

在实际变化检测中,由于检测背景复杂多变,为了提高权系数对检测背景的适应性,更有效地消除噪声,常对一幅大的检测图像进行分块处理,即将一幅大的检测图像分成若干块小的图像,然后对每一块小的图像分别进行变化检测。由上述分块变化检测过程及前面对最小二乘图像相减法的分析可以得出,对检测图像进行分块提高了变化检测的适应性,但同时也增大了目标占有比(目标与所在检测图像块的面积比),即分块后,变化区域在小图像中所占的比重明显增加,从而对系数求解的不良影响也会增大,导致采用最小二乘图像相减法进行变化检测的性能大大降低。综合上述分析可以看出,最小二乘图像相减法在实际应用中对检测环境的依赖性较强,稳健性差。

3 一种稳健的变化检测算法

由上面对两种变化检测算法的介绍及其性能分析可以看出,构造似然比法在实际使用中存在较大困难,而最小二乘图像相减法则存在稳健性差的问题,为解决上述问题,本文提出了一种稳健可行的变化检测算法。

本文提出的变化检测算法将基于最小二乘算法,通过引入误差影响因子将参考图像和检测图像对应的变化区域和不变区域区别开来,且每个像素点对应的误差影响因子取决于该点像素值的变化程度,本文提出的变化检测算法将采用迭代计算的方法,权系数将以较快的速度收敛于一个较为理想的稳定值,具体检测步骤如下。

(1)对参考图像和检测图像进行配准;

(2)类似最小二乘图像相减法的计算过程,采用最小二乘算法求取权系数 h_{mn} , 并得到对应的差值图像 $D(i, j)$;

(3)由得到的 $D(i, j)$ 计算误差影响因子,计算公式定义如下

$$w(i, j) = 1 - \frac{D(i, j)}{\max[D(i, j)]} \quad (7)$$

(4)根据得到的误差影响因子按照新的计算公式重新计算权系数 h_{mn} 并得到相应的差值图像 $D(i, j)$, 权系数计算公

式如下

$$h_{mm} : \min \sum_i \sum_j w(i, j) [z_2(i, j) - \hat{z}_2(i, j)]^2 \quad (8)$$

(5)重复(3)、(4), 直至权系数 h_{mm} 收敛于一稳定值, 由最终得到的 h_{mm} 值计算得出差值图像, 并根据设定的门限 ϕ 进行变化检测判决, 即

$$D(i, j) \begin{cases} > \phi, \text{有变化} \\ < \phi, \text{无变化} \end{cases} \quad (9)$$

上述即为本文提出稳健方法的步骤, 由式(7)可以看出, 像素点 (i, j) 处的误差影响因子大小取决于该点差值图像值, 两幅图像差别越大的区域, 对应的误差影响因子越小, 从而对权系数的影响也就越小, 本文提出方法正是基于此原理来尽可能减小变化区域对系数求解的不良影响。

4 试验及其结果分析

为了说明本文提出的变化检测算法的稳健性, 本部分将基于不同算法进行变化检测试验, 考虑构造似然比法对先验知识的较高要求, 本部分将仅针对最小二乘图像相减法和本文提出的算法进行变化检测试验。检测试验分两部分: 第1部分将基于模拟产生的参考图像和检测图像进行变化检测, 目的是为了全面、准确地比较两种变化检测算法的性能, 证明本文提出算法的稳健性; 第2部分将基于实际 SAR 图像进行变化检测, 目的是为了进一步验证本文提出算法在实际应用中的稳健性。

4.1 基于模拟产生图像的变化检测试验

本部分采用的参考图像和检测图像分别如图 1(a)、图 1(b)所示, 其中图 1(b)中间矩形部分为目标区域。为了全面地说明本文提出的变化检测算法的性能, 本部分将针对不同目标占有比和不同信杂比的检测图像进行变化检测试验, 通过不同试验条件下由不同变化检测算法得到的检测图像信杂比来说明本文所提出变化检测算法的稳健性。

固定检测图像信杂比 $SCR = 10\text{dB}$, 不同目标占有比条件下, 两种变化检测算法对应的检测图像信杂比(检测后)如

表 1 所示; 固定目标占有比 $AR = 9/100$, 不同信杂比条件下, 两种变化检测算法对应的检测图像信杂比(检测后)如表 2 所示; 对信杂比 $SCR = 10\text{dB}$ 、目标占有比 $AR = 9/100$ 情况下由最小二乘图像相减法和本文提出算法最终得到的差值图像进行图示, 分别如图 1(c)、图 1(d)所示。

由表 1 可以看出, 当目标占有比较小时, 本文提出的算法与最小二乘图像相减法对检测图像信杂比的改善基本相同; 而当目标占有比较大时, 本文提出的算法对检测图像信杂比的改善效果明显优于最小二乘图像相减法, 且占有比越大, 本文提出的算法相对最小二乘图像相减法对检测图像信杂比的改善效果越明显。

由表 2 可以看出, 当检测图像信杂比低于一定值 (16.1702dB)时, 最小二乘图像相减法与本文提出的算法均能

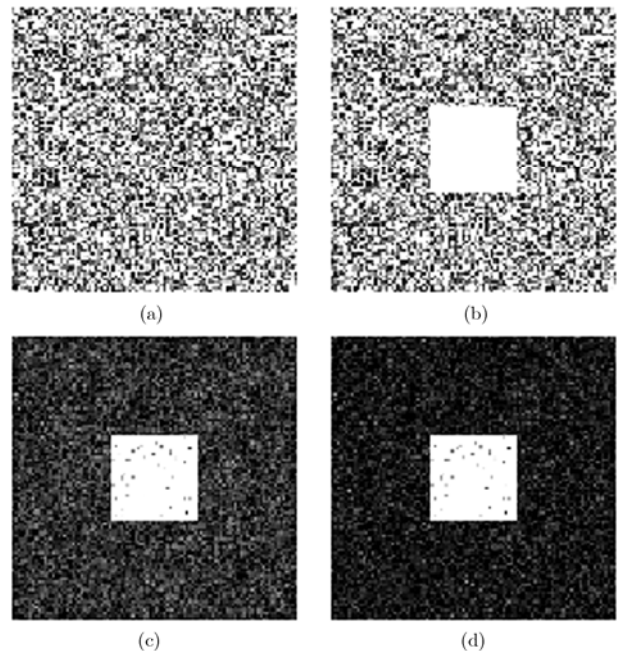


图 1 基于两种算法的变化检测结果

表 1 固定信杂比 ($SCR = 10\text{dB}$)、不同目标占有比对应的检测图像信杂比(dB)

目标占有比	最小二乘图像相减法	本文提出算法 (迭代次数)						
		1	2	3	4	5	6	7
1:2500	28.8268	28.8480	28.8489	28.8489	28.8489	28.8489	28.8489	28.8489
1:625	28.6853	28.7148	28.7159	28.7159	28.7159	28.7159	28.7159	28.7159
1:100	26.7247	26.9169	26.9222	26.9224	26.9224	26.9224	26.9224	26.9224
1:25	22.4007	23.4203	23.4446	23.4454	23.4455	23.4455	23.4455	23.4455
9:100	16.8741	19.1309	19.2077	19.2117	19.2118	19.2119	19.2118	19.2118

改善检测图像信杂比,且信杂比越高,本文提出的算法相对最小二乘图像相减法对检测图像信杂比的改善效果越明显;而当检测图像信杂比高于一定值(16.1702dB)时,最小二乘图像相减法不再正常工作,而本文提出算法仍然可以有效地改善检测图像信杂比。

由表 1,表 2 均可看出,采用本文提出的算法进行变化检测时,不同试验条件下对应的检测图像信杂比随迭代次数增加在经历一定的细微波动后趋于一稳定值,具有快速收敛性,一般情况下建议迭代 3 次即可。

4.2 基于实际 SAR 图像的变化检测试验

本部分基于的 3 幅参考图像及对应的检测图像分别如图 2 所示。其中,图 2(b)与图 2(d)为对应同一目标、不同目标占有比的两幅图像,其中图 2(b)对应目标占有比为 $AR = 1/58$,图 2(d)对应目标占有比为 $AR = 1/13$,图 2(d)与图 2(f)为对应相同目标占有比、不同目标的两幅图像,且图 2(d)对应信杂比高于图 2(f)。对上述图像进行类似 1 中的变化检测试验,得到的试验结果如表 3 所示。

比较表 3 中图 2(b)和图 2(d)对应的试验结果可以看出,对于同一目标、不同目标占有比的情况,目标占有比越大,

本文提出的算法相对最小二乘图像相减法对检测图像信杂比的改善效果越好;同样地,比较图 2(d)和图 2(f)对应的试验结果可以看出,对于相同目标占有比、不同目标的情况,检测图像信杂比越高,本文提出的算法相对最小二乘图像相减法对检测图像信杂比的改善效果越好;由 3 幅检测图像对应的试验结果均可看出,本文提出的变化检测算法具有快速收敛性。

综合上面两部分中的试验分析结论可以得出,本文提出的变化检测算法在不同目标占有比、不同检测图像信杂比情况下都能有效地改善检测图像信杂比,且迭代计算过程具有快速收敛性,基于模拟和实际图像的试验结果均有效证明了本文提出的变化检测算法的稳健性。

5 结束语

本文介绍了两种常用的变化检测算法并分析了它们在实际变化检测中存在的问题,针对问题,本文提出了一种稳健可行的变化检测算法,该算法通过引入误差影响因子和迭代计算方法,大大降低了变化区域对最小二乘图像相减法中权系数求解的不良影响,提高了变化检测的适应性和稳健性,文章最后基于本文提出的算法和最小二乘图像相减法进

表 2 固定目标占有比 ($AR = 9/100$)、不同信杂比对应的检测图像信杂比(dB)

检测图像 信杂比(dB)	最小二乘 图像相减法	本文提出算法(迭代次数)						
		1	2	3	4	5	6	7
2.1221	11.8436	12.3081	12.3295	12.3305	12.3306	12.3306	12.3306	12.3306
6.4090	14.6766	15.9980	16.0801	16.0870	16.0875	16.0875	16.0875	16.0875
10.0957	16.7503	19.0864	19.1572	19.1608	19.1610	19.1610	19.1610	19.1610
13.0723	17.1391	20.6940	20.7624	20.7591	20.7585	20.7584	20.7584	20.7584
16.1702	17.3973	22.0179	22.1441	22.1492	22.1494	22.1495	22.1495	22.1495
18.2549	17.2795	22.6558	22.7591	22.7598	22.7597	22.7597	22.7597	22.7597
19.4310	17.0997	22.9562	23.1071	23.1086	23.1084	23.1084	23.1084	23.1084

表 3 图 2 所示 SAR 图像对应的变化检测试验结果(dB)

检测 图像	最小二乘 图像相减法	本文提出算法(迭代次数)						
		1	2	3	4	5	6	7
图 2(b)	19.5185	24.1459	24.3660	24.3717	24.3718	24.3718	24.3718	24.3718
图 2(d)	19.0944	20.7179	22.3359	22.3943	22.3965	22.3966	22.3966	22.3966
图 2(f)	13.0308	14.7533	15.5557	15.6038	15.6072	15.6074	15.6075	15.6075

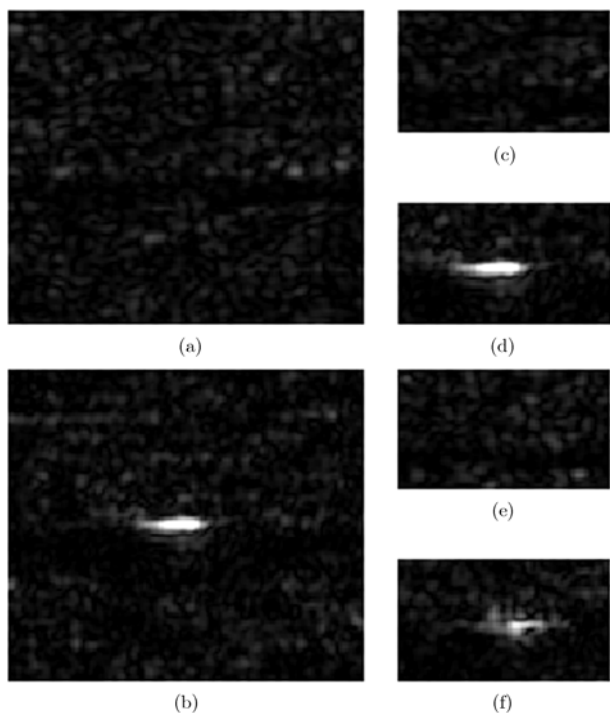


图2 用于变化检测试验的 SAR 图像

行了变化检测试验，试验结果进一步验证了本文提出算法的稳健性。

参考文献

- [1] Novak L M, Halversen S D, Owirka G J, and Hiatt M. Effect of polarization and resolution on SAR ATR[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(1): 102-115.
- [2] Kapoor R, Banerjee A, Tsihrintzis G A, and Nandhakumar N. UWB radar detection of targets in foliage using alpha-stable

clutter models[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 819-834.

- [3] Allen M R, Jauregui J M, and Hoff L E. FOPEN-SAR detection by direct use of simple scattering physics[A]. In: Proceedings of the IEEE International Radar Conference[C], Atlanta Georgia, USA, 1995: 152-157.
- [4] Subotic N S, Collins L M, Gorman J D, and Thelen B J. Multiresolution target detection in SAR imagery[A]. In: Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Detroit MI, USA, 1995, 4: 2157-2160.
- [5] Ulander L M H, Lundberg M, Pierson W, and Gustavsson A. Change detection for low-frequency SAR ground surveillance [J]. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2005, 152(6): 413-420.
- [6] Halversen S D, Nanis J G, Owirka G J, and Novak L M. Comparison of ultrawideband SAR target detection algorithms[A]. In: Proceedings of SPIE on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery[C], New York, USA, 1994, 2230: 230-243.
- [7] Ranney K I and Soumekh M. Signal subspace change detection in averaged multilook SAR imagery[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(1): 201-213.

杨志国：男，1979年生，博士生，从事 SAR 目标检测等领域的研究工作。

黄晓涛：男，1972年生，博士生导师，主要从事 SAR 信号处理、阵列信号处理、谱分析等信号与信息系统领域的研究工作。

周智敏：男，1957年生，教授，博士生导师，主要从事 SAR 系统设计、高速实时信号处理等领域的研究工作。