

一种基于二维 Gamma 分布的 SAR 图像 变化检测方法

张耀天, 胡 睿, 孙进平, 毛士艺

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 对于隐藏在强杂波环境中的人造目标, 传统的恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)目标检测算法受到较大程度的制约。为了改善检测性能, 提出了一种基于二维 Gamma 分布的变化检测算法, 并给出了参数估计、变化分析、CFAR 归一化、目标聚类等相关步骤的实现方法。该算法在拟合精度较高的二维 Gamma 分布的基础上, 充分利用图像间的相关性抑制强杂波。对实际数据的处理表明, 该算法具有较好的检测性能, 能在低虚警率的基础上实现较高的检测率。

关键词: 合成孔径雷达; 变化检测; 二维 Gamma 分布

中图分类号: TN 958.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.05.011

Change detection for SAR images based on bivariate Gamma models

ZHANG Yao-tian, HU Rui, SUN Jin-ping, MAO Shi-yi

(School of Electronic Information Engineering, Beihang Univ., Beijing 100191, China)

Abstract: The traditional CFAR target detection algorithm is strongly restrained for the manmade targets immersed in the environment with strong scattered clutter. In order to improve the detection performance, this paper proposes a novel algorithm based on the bivariate Gamma distributions. In addition, some key steps such as parameter estimation, change analysis, CFAR normalization, and targets clustering are also discussed. This algorithm, based on high approximation accuracy of bivariate Gamma distributions, fully uses the correlation of images to suppress the strong scattered clutter. The results on actual data indicate this algorithm has a quite good detection performance and can realize a relatively high detection rate under the condition of a low false alarm rate.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR); change detection; bivariate Gamma distribution

0 引言

作为一种利用微波感知的主动式传感器, 合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)可对感兴趣目标进行全天候、全天时的侦察; 同时, 其穿透探测能力也使得 SAR 在目标探测方面具有巨大的应用潜力。但是在一些杂波较强的环境中, 针对单幅图像的目标检测算法, 如恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)检测算法^[1]的性能受到了较大的影响和制约。随着高分辨、短周期重复观测等技术走向成熟, 变化检测技术得到了快速的发展^[2]。因此, 如何充分利用不同时相同一场景的 SAR 图像之间的相关性来提高目标检测的性能也成为了重要的研究方向。

近年来, SAR 变化检测技术发展迅速, 各种变化检测

算法层出不穷。总的来说, 不同的变化检测算法根据其分析层次不同可分为: 像元级、特征级和决策级; 根据是否要先进行分类又可分为: 分类后比较法和直接比较法^[3]。为了在大场景中检测出人造目标, 像元级的直接比较检测法是比较可行且可靠的一类方法, 即直接比较同一位置上不同相的像元特征值来检测变化, 通常先通过数学变换的方式产生差异图像, 再对差异图像进行阈值化处理, 从中提取变化区域。

在这类变化检测方法中, 较常用的基于一维分布模型的图像差值法或比值法^[4]虽然简单易行, 但是无法充分利用不同时相图像数据的相关性; 而在利用二维分布模型的检测方法中, 基于二维高斯分布的杂波抑制变化检测法^[5]虽然利用图像相关性进行杂波抑制, 但是一般情况下 SAR

图像并不简单地服从高斯分布,因此这种方法存在着分布模型的拟合精度问题;而基于二维 Gamma 分布的相关系数变化检测法^[6],虽然利用了拟合精度较高的分布模型,但是仅利用相关系数作为判决依据,难以设定合理的检测阈值。

在此基础上,本文提出了一种基于二维 Gamma 分布的变化检测方法:首先用矩估计法估计二维 Gamma 分布参数;再根据 Neyman-Pearson 准则构造似然比统计量抑制杂波;对抑制杂波的结果进行 CFAR 归一化,设定全局阈值;最后用形态学方法进一步剔除虚警,得到最终的检测结果。对实际数据的处理表明:基于二维 Gamma 分布的变化检测算法具有较低的虚警率和较高的检测率,达到了较好的检测性能。

1 二维 Gamma 分布

1.1 定义

目前,对于多维 Gamma 分布的定义还存在着一些争论,一种比较通用的观点是:对于多维向量 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$,若任意 x_i 的边缘分布都服从一维 Gamma 分布,则认为向量 \mathbf{x} 服从多维 Gamma 分布。但是服从这一条件的分布族是非常庞大的,因此需要作进一步的限制。在此,本文采用 Barlev 和 Bernardoff^[7] 通过矩母函数和拉普拉斯变换的方式对多维 Gamma 分布的定义:

假设 $P(\mathbf{z})$ 为关于多维向量 $\mathbf{Z} = (z_1, \dots, z_d)$ 的多项式,若对于任意的 $z_i \mapsto P(\mathbf{z})$ 都可表示为 $Az_i + B$,其中 A 和 B 为关于其他 $z_i (i \neq j)$ 的多项式,则多项式 $P(\mathbf{z})$ 被称为是仿射的。若随机向量 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$ 的矩母函数(也称为拉普拉斯变换)定义如式(1),则称该随机向量服从形状参数为 q 、尺度参数为 \mathbf{P} 的多维 Gamma 分布,记为 $\mathbf{x} \sim G(q, \mathbf{P})$ 。

$$\psi_{G(q, \mathbf{P})}(\mathbf{z}) = E\left(e^{-\sum_{i=1}^d z_i \varepsilon_i}\right) = [P(\mathbf{z})]^{-q} \quad (1)$$

式中, $q \geq 0, \mathbf{P}$ 为仿射多项式。当 $d=2$ 时,对应的是二维的情况,此时相应的矩母函数为

$$\psi(z_1, z_2) = (1 + p_1 z_1 + p_2 z_2 + p_{12} z_1 z_2)^{-q} \quad (2)$$

式中, $p_1 > 0, p_2 > 0, p_{12} > 0, p_1 p_2 - p_{12} \geq 0$ 。由此可得二维 Gamma 分布的概率密度函数表达式为

$$f_{2D}(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{p_2 x_1 + p_1 x_2}{p_{12}}\right) \frac{x_1^{q-1} x_2^{q-1}}{p_{12}^q \Gamma(q)} \times f_q\left(\frac{p_1 p_2 - p_{12}}{p_{12}^2} \cdot x_1 x_2\right) \quad (3)$$

式中,函数 $f_q(z)$ 与合流超几何函数相关,定义如下

$$f_q(z) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^k}{k! \Gamma(q+k)} \quad (4)$$

1.2 参数估计

本文采用矩估计法对二维 Gamma 分布进行参数估计。首先,对式(2)的矩母函数进行泰勒级数展开,有

$$\psi(z_1, z_2) = \sum_{k,l \geq 0} \frac{(-1)^{k+l}}{k! l!} E[x_1^k x_2^l] z_1^k z_2^l \quad (5)$$

再对式(5)作微分,则可得到二维 Gamma 分布的各阶矩。构造 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_1^2, x_2^2, x_1 x_2)$,可得统计量 \mathbf{x} 的矩为

$$E(\mathbf{x}) =$$

$[m_1, m_2, m_1^2(1+q^{-1}), m_2^2(1+q^{-1}), m_1 m_2(1+r q^{-1})]$ (6) 式中, m_1, m_2 分别表示 x_1, x_2 的数学期望; r 表示 x_1 和 x_2 的相关系数。用 $(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5)$ 表示 $E(\mathbf{x})$,则可得到如下的关系式

$$m_1 = f_1, m_2 = f_2, r = \frac{f_5 - f_1 f_2}{\sqrt{(f_3 - f_1^2)(f_4 - f_2^2)}} \quad (7)$$

由此,可进一步推出参数 p_1, p_2 和 p_{12} 的估计式

$$\begin{cases} \hat{p}_1 = E(x_1) \\ \hat{p}_2 = E(x_2) \\ \hat{p}_{12} = E(x_1)E(x_2) \cdot \left(1 - \frac{\text{cov}(x_1, x_2)}{\sqrt{\text{var}(x_1)} \sqrt{\text{var}(x_2)}}\right) \end{cases} \quad (8)$$

假设在不同时刻对同一场景获得的两幅 SAR 图像强度数据为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^T$,根据乘性噪声模型^[8]可知,在 SAR 场景具有恒定 RCS 背景的理想情况下,任意的 x_i 边缘分布都服从一维 Gamma 分布。由于同一场景不同时相的 SAR 图像数据之间存在着相关性,因此根据文中对多维 Gamma 分布的定义,可以选择二维 Gamma 分布作为 SAR 待测图像和参考图像数据的联合分布模型^[6],在此基础上进行变化检测方法的研究。

2 基于二维 Gamma 分布的变化检测

在二维 Gamma 分布的基础上,本文根据 N-P 准则构造似然比统计量,利用参考图像对待测图像进行杂波抑制,从而实现变化检测的目的。基于二维 Gamma 分布的杂波抑制变化检测法主要可以分三个步骤进行:变化分析、CFAR 归一化、目标检测及聚类。

2.1 变化分析

对于不同时刻获得的 SAR 图像数据,假定目标、杂波和噪声模型表示如下

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}, \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,下标分别对应着两个不同时刻获得的回波信号。同时,对于有无变化发生作如下假设

$$\begin{aligned} H_0: \mathbf{z} &= \mathbf{q} \text{ (无变化)} \\ H_1: \mathbf{z} &= \mathbf{s} + \mathbf{q} \text{ (有变化)} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, \mathbf{z} 表示 SAR 图像数据; $\mathbf{q} = \mathbf{c} + \mathbf{n}$ 表示背景杂波和噪声。即只有背景杂波和噪声,而没有目标时,表示没有变化发生;当有目标存在时,表示有变化发生。为了在固定的虚警率下达到最大的检测概率,根据 N-P 准则,采用似然比检验的方法,构造统计量如下

$$\Lambda(\mathbf{z}) = \frac{P(\mathbf{z} | H_1)}{P(\mathbf{z} | H_0)} \quad (11)$$

式中, P 表示图像数据 \mathbf{z} 分别在 H_0 和 H_1 下的条件概率。此时,根据二维 Gamma 分布,可得不同假设条件下相应的概率密度函数表达式为

$$P(\mathbf{z} | H_0) = \exp\left(-\frac{p_2 z_1 + p_1 z_2}{p_{12}}\right) \frac{z_1^{q-1} z_2^{q-1}}{p_{12}^q \Gamma(q)} f_q(c z_1 z_2) \quad (12)$$

$$P(\mathbf{z} | H_1) = \exp \left[-\frac{p_2(z_1 - s_1) + p_1(z_2 - s_2)}{p_{12}} \right] \times \frac{(z_1 - s_1)^{q-1} (z_2 - s_2)^{q-1}}{p_{12}^q \Gamma(q)} \times f_q[c(z_1 - s_1)(z_2 - s_2)] \quad (13)$$

式中

$$f_q(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k! \Gamma(q+k)}, \quad c = \frac{p_1 p_2 - p_{12}}{p_{12}^2} \quad (14)$$

而 p_1, p_2 和 p_{12} 是待估计的二维 Gamma 分布的参数, q 则为已知的 SAR 图像视数。

去除一些与变量 \mathbf{z} 无关的项, 式(11)可进一步等效为

$$\left[\frac{(z_1 - s_1)(z_2 - s_2)}{z_1 z_2} \right]^{q-1} \cdot \frac{f_q(c(z_1 - s_1)(z_2 - s_2))}{f_q(c z_1 z_2)} = \begin{cases} > \lambda \rightarrow H_1 \\ < \lambda \rightarrow H_0 \end{cases} \quad (15)$$

此时, 虽然目标信号 \mathbf{s} 是未知的, 但是对于目标与场景的关系来说, 不外乎两种情况: 目标存在与目标不存在。因此可以简单地假设目标信号模型为

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 或 } \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

为了便于说明, 不妨假设目标只出现在待测图像中而非参考图像中, 取式(16)中的前者, 即 $\mathbf{s} = [1 \ 0]^T$ 。但由于图像数据 \mathbf{z} 与目标信号 \mathbf{s} 直接进行加减处理, 考虑到数量级可能的差异, 可将目标信号模型乘以一个相应的系数

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \zeta \\ 0 \end{bmatrix} = \eta (E\{z_1\} + E\{z_2\}) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, η 为比例系数, 可适当调节。将目标信号代入式(15)中, 可简化为

$$\left(1 - \frac{\zeta}{z_1} \right)^{q-1} \cdot \frac{f_q(c z_1 z_2 - c \zeta z_2)}{f_q(c z_1 z_2)} = \begin{cases} > \lambda \rightarrow H_1 \\ < \lambda \rightarrow H_0 \end{cases} \quad (18)$$

根据式(18)等号左端的处理方式, 利用参考图像对待测图像进行杂波抑制, 可得到新的变化分析图像, 从而突出了变化区域与无变化区域的差异。

2.2 CFAR 归一化

为了进一步确定全局阈值 λ , 本文采用空心滑窗对变化分析后的图像进行 CFAR 归一化, 从而达到恒虚警的目的。以每一个待检测的像素为中心, 统计外围空心滑窗区域中的样本数据的均值 E 的标准差 σ , 按照式(19)进行归一化

$$y = \frac{x - E}{\sigma} \quad (19)$$

从而生成 CFAR 归一化后的图像。

2.3 目标检测及聚类

对于 CFAR 归一化后的图像, 设定一个全局阈值 λ , 对其进行二值化, 从而得到一个初步的检测结果。由于在高分辨的 SAR 图像中, 目标呈分布式, 一个目标往往占有多个分布单元。而由于目标本身散射特性的起伏, 对应于同一目标的像素点往往不能形成连通区域, 因此需要通过一

些形态学的方法对检测结果进行后处理。对于初步检测得到的二值化图像, 首先进行腐蚀膨胀操作, 消除一些孤立的点目标; 接着根据目标尺寸大小与 SAR 图像的分辨率, 进行计数滤波, 进一步消除虚警; 最后再进行目标聚类, 从而得到最终的检测结果。

3 实验结果及分析

实验采用的数据来自于瑞典国防研究署设计的第二代超宽带机载雷达 CARABAS-II^[9]。该系统发射 HH 极化的无线电波, 工作频率为 20~90 MHz; 图像分辨率为 1 m×1 m, 图像尺寸为 3 000×2 000, 目标包括 TGB11、TGB30 和 TGB40 三类军用车辆, 分别隐藏在两块森林中。实验选择 CARABAS-II 数据集中编号为 v02_2_1_1 的场景作为待测图像, 编号为 v02_4_1_1 的场景为参考图像, 分别如图 1(a)和图 1(b)所示。其中方框内为目标区, 每个场景都包含了 25 个目标车辆。

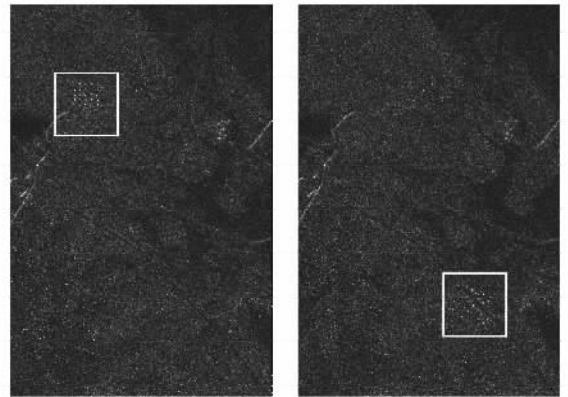


图 1 CARABAS-II 待测图像和参考图像

分别采用针对单幅图像的双参数 CFAR 检测方法^[10]、基于二维 Gaussian 分布的变化检测方法^[5]以及本文的基于二维 Gamma 分布的变化检测方法对图像进行检测, 设置 CFAR 归一化时背景窗口大小为 31×31, 保护窗口大小为 19×19, 通过形态学处理、计数滤波和目标聚类得到最后的检测结果分别如图 2(a)~图 2(c)所示(只截取了结果中目标点附近的区域)。

从图 2(a)可以看出, 双参数 CFAR 检测方法性能不尽如人意, 不仅有 3 个漏警, 而且出现了 6 个虚警目标, 虚警像素数较多; 而图 2(b)基于二维 Gaussian 分布的变化检测效果有了一定的改善, 检测出了全部的目标, 而且只出现了一个虚警, 虚警像素只有 42(见表 1); 图 2(c)中基于二维 Gamma 分布的变化检测方法效果最佳, 检测出全部目标, 并且没出现虚警目标(见表 2)。这是因为双参数 CFAR 检测方法针对的主要是单幅图像, 并没有利用待测图像和参考图像间的相关性, 因此在一些杂波较强的环境中, 其检测性能受到较大程度的制约; 基于二维 Gaussian 分布的变化检测法利用了图像间的相关性进行杂波抑制, 在一定程度上提高了检测性能, 但 SAR 图像并非简单地

服从高斯分布,因此分布模型的准确程度影响了该方法的检测性能;相反,基于二维 Gamma 分布的变化检测法既充分利用了图像间的相关性,同时又利用了拟合精度较高的

二维 Gamma 分布,使得在原图中一些强散射背景区域得到了一定程度的抑制,而且目标区域又得到了完整的保留,大大提高了目标检测的精度。

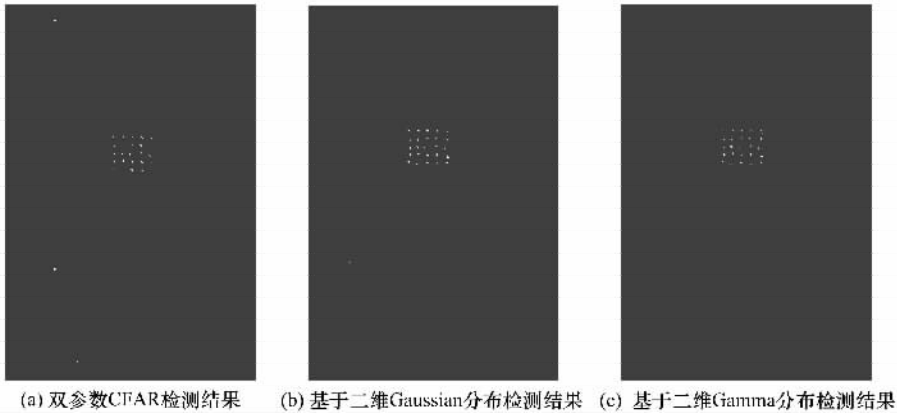


图 2 不同检测方法对 CARABAS-II 图像的检测结果

为了进一步验证算法的优越性,我们对 CARABAS-II 数据中的其他场景数据也进行了试验,分别得到表 1 中基于二维 Gaussian 分布和表 2 中基于二维 Gamma 分布的变化检测结果。

表 1 基于二维 Gaussian 分布变化检测结果

待测场景号	参考场景号	实际目标数	检测目标数	漏警目标数	虚警目标数	虚警像素数
v02_2_1_1	v02_4_1_1	25	26	0	1	42
v02_2_2_1	v02_4_2_1	25	30	0	5	115
v02_2_5_1	v02_4_5_1	25	25	0	0	0
v02_3_1_1	v02_4_1_1	25	27	1	3	147
v02_3_2_1	v02_4_2_1	25	27	0	2	46
v02_3_5_1	v02_4_5_1	25	25	0	0	0

表 2 基于二维 Gamma 分布变化检测结果

待测场景号	参考场景号	实际目标数	检测目标数	漏警目标数	虚警目标数	虚警像素数
v02_2_1_1	v02_4_1_1	25	25	0	0	0
v02_2_2_1	v02_4_2_1	25	25	0	0	0
v02_2_5_1	v02_4_5_1	25	25	0	0	0
v02_3_1_1	v02_4_1_1	25	25	1	1	46
v02_3_2_1	v02_4_2_1	25	25	0	0	0
v02_3_5_1	v02_4_5_1	25	25	0	0	0

实验结果表明,与基于二维 Gaussian 分布的变化检测算法相比,基于二维 Gamma 分布的变化检测算法能够达到更高的检测率和较低的虚警率,具有良好的应用前景。

4 结 论

本文研究了一种基于二维 Gamma 分布的变化检测方法:首先利用矩估计法估计二维 Gamma 分布的参数;再根据 Neyman-Pearson 准则构造似然比统计量,在二维 Gamma 分布的基础上利用图像相关性进行杂波抑制;接着对杂波抑制后的图像进行 CFAR 归一化;最后设定全局阈值将图

像二值化,并进行形态学处理、计数滤波及目标聚类,进一步消除孤立虚警点,得到最终的检测结果。对 CARABAS-II 数据的处理验证了该算法的有效性;对于隐藏在强杂波环境中的人造目标,基于二维 Gamma 分布的变化检测算法能够在低虚警率的基础上达到较高的检测率。

参考文献:

- [1] Li J, Zelnio E G. Target detection with synthetic aperture radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997,32(2): 613-627.
- [2] Ohkura H. Application of SAR data to monitoring earth surface changes and displacement[J]. *Advance Space Research*, 1998, 21(3):485-492.
- [3] Vilasenor J D, Fatland D R, Hinzman I D. Change detection on Alaska's north slope using repeat-pass ERS-1 SAR images[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1993,31(1):227-236.
- [4] Rignot E J M. Change detection techniques for ERSI-SAR Data[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1993,31(4):896-906.
- [5] Ulander L M H, Lundberg M, Pierson W, et al. Change detection for low-frequency SAR ground surveillance[J]. *IEE Proc. of Radar Sonar Navigation*, 2005,152(6):413-420.
- [6] Chatelain F. Bivariate Gamma distributions for image registration and change detection[J]. *IEEE Trans. on IP*, 2007, 16(7): 1796-1806.
- [7] Bernardoff P. Which multivariate Gamma distributions are infinitely divisible? [J]. *Bernoulli*, 2006(12):169-189.
- [8] Oliver C J, Quegan S. *Understanding synthetic aperture radar images*[M]. Artech House: Boston, 1998.
- [9] Ulander Lars M H, William P, Mikael L. Performance of VHF-band SAR change detection for wide-area surveillance of concealed ground targets[J]. *Proc. of the SPIE*, 2004,54(27): 259-270.
- [10] Novak L M. Performance of a high-resolution polarimetric SAR automatic target recognition system[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1993,6(1):11-24.