

基于 CFAR 的 SAR 目标检测

魏中平

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要 CFAR 检测是由事先定好恒定虚警概率进行目标检测的一种算法, 其前提是目标相对于背景具有较强的对比度。CFAR 算法通过单个像素灰度和某一门限的比较达到检测目标像素的目的。文中研究了恒虚警概率检测算法, 推导了不同拟合分布的具体形式, 给出了几种代表性检测器, 如 CA-CFAR 检测器, 通过仿真结果证明, 在均匀杂波区域中, 3 种检测器的结果相当, 都能检测出目标。但从整体看, CA-CFAR 的检测性能更好。

关键词 目标检测; 杂波统计模型; 恒虚警概率; 检测器

中图分类号 TN958 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2013)03-026-04

Detection of SAR Target Based on CFAR

WEI Zongping

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Target detection on the basis of the CFAR is an algorithm that requires a given detection ratio and a strong contrast between target and background. The CFAR algorithm is realized by the comparison of the single pixel grayscale and threshold. The CFAR target detection algorithm is studied in the paper, and the concrete forms for fitted distributions are deduced particularly. Several typical CFAR detectors are given, such as the CA-CFAR detector. Simulation results show that in homogenous clutter area, all three detectors can detect targets, but the CA-CFAR has better detection performance.

Keywords target detection; clutter statistical model; CFAR; detector

在现代军事应用中, 雷达成像是一重要部分, 而对于如何从雷达成像中检测和识别雷达目标如坦克、炮车、飞机、军用卡车等, 是雷达成像的重要应用。由于通常雷达识别的目标多为金属制成, 其雷达反射回波相对较强, 在 SAR 图像上则表现为具有较大的对比度, 因而 SAR 在机动目标的检测识别方面具有先天优势。

1 基于模型的 CFAR 检测

CFAR 检测^[1]是目前较实用的一类目标检测算法。首先它是由事先设定好的虚警概率, 通过基于某种分布的杂波统计特性求得检测门限, 从而进行检测的一种方法。

如图 1 所示, p_{fa} 为给定的虚警概率; 杂波的概率密度函数为 $p(x)$; 目标的概率密度函数为 $q(x)$; 则由统计信号和概率论知识可知

$$p_{fa} = \int_T^{\infty} p(x) dx \quad (1)$$

其中, T 是检测门限; p_{fa} 对应阴影部分的面积, 即虚警

概率。当 p_{fa} 和 $p(x)$ 已知时, 通过对式(1)求逆, 就可求得检测门限 T 。

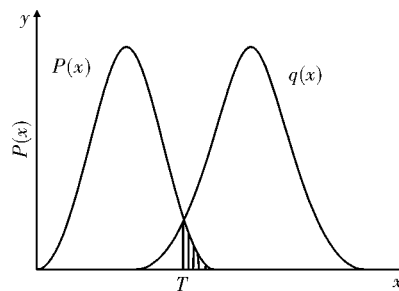


图 1 求取门限的示意图

由上可知, 在进行 CFAR 目标检测时, 需要确定 3 个输入因素: 虚警概率 p_{fa} 、CFAR 检测器、杂波统计分布模型。杂波背景分布模型是所有 CFAR 算法的前提, 其统计特性需要通过图像数据进行直方图拟合来获得, 如瑞利分布、Gamma 分布、对数正态分布、K 分布等。CFAR 检测器被用来指导进入杂波统计分布参数估计的滑窗内杂波像素序列。

图 2 给出了 CFAR 目标检测算法的一般流程。对输入图像, 首先进行图像处理, 然后根据直方图拟合确定图像的分布与分布参数, 设置虚警概率, 根据图像的分布得到检测门限, 最后得出检测结果。

收稿日期: 2012-09-06

作者简介: 魏中平(1986—), 男, 硕士研究生。研究方向: SAR 成像及干扰。E-mail: China_zhongping@163.com

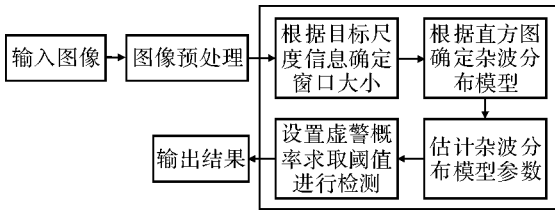


图2 CFAR 检测算法流程图

2 各种分布模型的 CFAR 检测

2.1 基于瑞利分布的 CFAR 检测

瑞利分布的概率密度函数为^[1-3]

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), x \geq 0 \quad (2)$$

其中, σ 是杂波的标准差, 其分布函数为

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(t) dt = \int_0^x \frac{t}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (3)$$

令 $z = \frac{t}{\sigma}$, 则式(3)可变形为

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\frac{x}{\sigma}} t \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

设检测阈值为 T , 给定虚警概率为 p_{fa} , 则

$$p_{fa} = \int_T^{\infty} p(x) dx = 1 - F(T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

则可以求出检测阈值 T 的表达式为

$$T = \sigma_1 \sqrt{-2 \ln(p_{fa})} \quad (6)$$

综上所述, 当杂波模型为瑞利分布时, 根据式(6), 就可以求取检测门限。

2.2 基于 Gamma 分布的 CFAR 检测

Gamma 分布的概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{\sigma}\right)^L x^{L-1} \exp\left(-\frac{Lx}{\sigma}\right), x \geq 0 \quad (7)$$

其中, $L > 0$ 是形状参数; $(L/\sigma) > 0$ 是尺度参数。其分布函数的表达式为

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(t) dt = \int_0^x \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{\sigma}\right)^L t^{L-1} \exp\left(-\frac{Lt}{\sigma}\right) dt \quad (8)$$

由式(8)可得

$$p_{fa} = \int_T^{\infty} p(x) dx = 1 - F(T) = 1 - \int_0^T \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{\sigma}\right)^L t^{L-1} \exp\left(-\frac{Lt}{\sigma}\right) dt \quad (9)$$

当杂波模型为伽玛分布时, 通过式(9)求取检测门限的近似解实现 CFAR 检测。

2.3 基于对数正态分布的 CFAR 检测

对数正态分布的概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0 \quad (10)$$

其中, μ, σ 分别是 $\ln(x)$ 的均值和标准差。

令 $y = \ln(x)$, 有 $x = e^y$, 随机变量 y 的概率密度函数为

$$p_y(y) = p(e^y) \left| \frac{de^y}{dy} \right| = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (11)$$

式(11)为高斯分布的概率密度函数, 则根据式(11), 可以得出检测阈值的表达式为

$$T = \sigma \times \Phi^{-1}(1 - p_{fa}) + \mu \quad (12)$$

当杂波模型为对数正态分布时, 通过式(12)可按照图2的流程实现 CFAR 检测。

2.4 基于韦布分布的 CFAR 检测

韦布尔分布的概率密度函数为

$$p(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right], x \geq 0 \quad (13)$$

其中, b 是尺度参数; c 是形状参数。

令 $y = \ln(x)$, 有 $x = e^y$, 则随机变量 y 的概率密度分布函数为

$$p_y(y) = p(e^y) \left| \frac{de^y}{dy} \right| = \frac{n}{b} e^{cy} \exp\left(-\frac{e^{cy}}{b}\right) \quad (14)$$

此时有

$$E(y) = \int_{-\infty}^{\infty} yp(y) dy = \frac{[\ln(b) - \gamma]}{n} V_{ar}(y) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} [y - E(y)]^2 P_y(y) dy = \frac{1}{c^2} \frac{\pi^2}{6} \quad (15)$$

其中, $\gamma = 0.5764$ 为欧拉常数。

再令 $z = \frac{y - E(y)}{\sqrt{V_{ar}(y)}}$, 有

$$p_z(z) = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \exp\left(\frac{\pi}{\sqrt{6}}z - \gamma\right) \exp\left(-e^{\frac{\pi}{\sqrt{6}}z - \gamma}\right) \quad (16)$$

当杂波模型服从韦布尔分布时, 首先对图像数据做变换

$$z = \frac{\ln(x) - E[\ln(x)]}{\sqrt{V_{ar}[\ln(x)]}} \quad (17)$$

设检测阈值为 T ; 给定虚警概率为 p_{fa} , 求得变换后图像数据的检测阈值

$$p_{fa} = \int_T^{\infty} p(x) dx = 1 - F_z(T) = \exp\left(-e^{\frac{\pi}{\sqrt{6}}T - \gamma}\right) \quad (18)$$

由式(18)进一步得到

$$T = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \{ \ln[-\ln(p_{fa})] + \gamma \} \quad (19)$$

由式(17)和式(19), 按照图2的流程即可实现 CFAR 检测。

2.5 基于 K 分布的 CFAR 检测

K 分布的概率密度方程为

$$p(x) = \frac{2}{x\Gamma(v)\Gamma(n)} \left(\frac{nvx}{\mu}\right)^{\frac{n+v}{2}} K_{v-n} \left(2\sqrt{\frac{nvx}{\mu}}\right), x > 0 \quad (20)$$

其中, μ 是尺度参数; v 是形状参数; n 是统计视数; $K_{v-n}(\cdot)$ 是 $v-n$ 阶的第二类修正的贝赛尔函数。

令 $y = \sqrt{x}$, 有 $x = y^2$, 则有

$$p_Y(y) = p(y^2) \left| \frac{d(y^2)}{dy} \right| = \frac{4}{\Gamma(v)} \left(\frac{v}{\mu}\right)^{\frac{v+1}{2}} y^v K_{v-1} \left(2\sqrt{\frac{v}{\mu}}y\right) \quad (21)$$

对式(21)积分, 可得随机变量 y 的分布函数为

$$F(y) = \int_{-\infty}^y p_Y(t) dt = \int_{-\infty}^y \frac{4}{\Gamma(v)} \left(\frac{v}{\mu}\right)^{\frac{v+1}{2}} t^v K_{v-1} \left(2\sqrt{\frac{v}{\mu}}t\right) dt = 1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{v}{\mu}\right)^{\frac{v}{2}} y^v K_v \left(2\sqrt{\frac{v}{\mu}}y\right) \quad (22)$$

当杂波模型为 K 分布时, 首先对图像数据做变换 $y = \sqrt{x}$, 然后根据式(22)可得

$$p_{fa} = \int_T^{\infty} p(y) dy = 1 - F(t) = \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{v}{\mu}\right)^{\frac{v}{2}} T^v K_v \left(2\sqrt{\frac{v}{\mu}}T\right) \quad (23)$$

由式(23)可以求出检测阈值实现 CFAR 检测。

2.6 基于 Beta - Prime 分布的 CFAR 检测

Beta - Prime 分布的概率密度方

$$p(x) = \frac{-\alpha\gamma^{-\alpha}}{(\gamma + \alpha)^{1-\alpha}}, -\alpha, \gamma, x > 0 \quad (24)$$

其中, 参数 α 是尺度参数; γ 是偏差参数。

令 $y = \frac{\gamma}{\gamma + x}$, 则有

$$p_Y(y) = p\left(\frac{\gamma}{y} - \gamma\right) \left| \frac{d\left(\frac{\gamma}{y} - \gamma\right)}{dy} \right| = -\alpha\gamma^{-\alpha-1} \quad (25)$$

由式(25)可以得到

$$p_{fa} = \int_T^{\infty} p(x) dx = \int_0^{\frac{\gamma}{\gamma+T}} -\alpha\gamma^{-\alpha-1} dy \quad (26)$$

由式(26)可以求出检测门限为

$$T = \frac{\gamma}{-\sqrt{\alpha} p_{fa}} = -\gamma \quad (27)$$

根据式(27)求得的检测门限实现 CFAR 检测。

3 基本 CFAR 检测器

大多数 CFAR 算法都是在检测前先验确定图像的杂波背景统计分布。由于实际面临各种各样的地物覆盖类型, 这就对描述杂波统计特性的统计分布模型提出了较高的要求。为适应不同的杂波场景, 同时简化性能分析, 可将杂波背景分为 3 种典型的场景的进行目标检测^[1-2,4]: (1) 均匀杂波背景。(2) 杂波边缘。

(3) 多目标。

3.1 CA - CFAR 检测器

CA - CFAR 是面对均匀杂波区域提出的, 它用滑窗内杂波区域中的所有像素估计相应的杂波统计模型的参数。CA - CFAR 检测器的一维结构如图 3 所示。其中, D 是检测单元采样, $x_i, i = 1, 2, 3, \dots, 2n$ 是参考单元采样, $2n$ 是参考单元数。 T' 是依赖于虚警概率 p_{fa} 的标化因子。

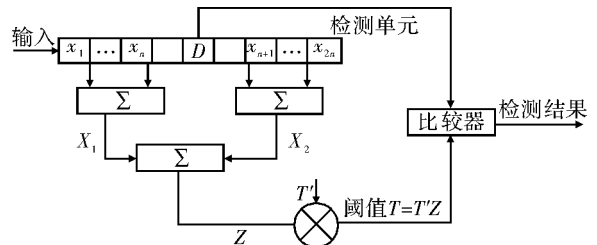


图 3 CA - CFAR 检测器方框图

对于均匀区域, CA - CFAR 是最优的, 然而对于多目标和杂波边缘等环境, CA - CFAR 检测器的性能将严重衰退。

3.2 GO - CFAR 和 SO - CFAR 检测器

GO - CFAR 检测器主要是为对抗杂波边缘而设计, 取两个局部估计较大者作为总的杂波功率水平估计。如图 4 所示。

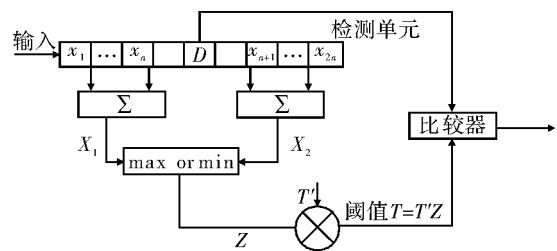


图 4 GO - CFAR 和 SO - CFAR 检测器方框图

$$Z = \max(X_1, X_2) \quad (28)$$

其中, $X_1 = \sum_{i=1}^n x_i, X_2 = \sum_{i=n+1}^{2n} x_i$ 是独立的随机变量。

SO - CFAR 检测器缓解了参考滑窗中出现多个空间邻近干扰目标引起的 CA - CFAR 检测器检测性能下降的问题^[5]。当雷达探测特定距离单元的目标时, 需要降低邻近干扰目标的影响。SO - CFAR 检测器采用 X_1 和 X_2 中较小的作为总的杂波功率水平估计, 即有

$$Z = \min(X_1, X_2) \quad (29)$$

4 实验结果分析

仿真实验的雷达系统参数设置为: 载频为 $10e9$, 脉冲重复频率 PRF 为 500, 脉宽 T_p 为 $3e-6$, 信号带宽

B 为 $200e6$, 方位向分辨率 1 m , 距离向分辨率为 0.75 m , 载机运行速度 $1\ 000\text{ m/s}$, 飞行高度 $20\ 000\text{ m}$, 波束俯视角为 70° , 对草地上几辆汽车成像仿真。

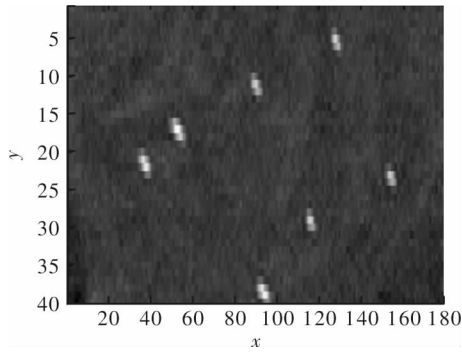


图 5 对草地区域成像

首先对场景图像进行各种分布的拟合, 图 6 为拟合曲线。

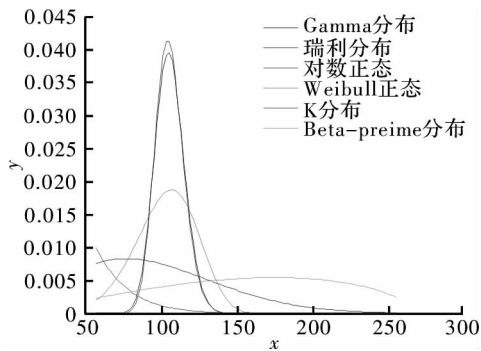


图 6 各种分布拟合曲线

通过计算各种分布与图像数据之间的 CDF 误差平方和, PDF 误差平方和来评定各种分布拟合效果的好坏。所得数据如表 1 所示。

表 1 两个准则下各种分布的拟合结果

分布函数	CDF 误差平方和	PDF 误差平方和
Gamma 分布	0.229 8	0.774 5
Raleigh 分布	0.447 0	7.970 6
Log - norm 分布	0.220 0	0.706 8
Weibull 分布	0.281 2	2.684 9
K 分布	0.994 5	7.774 8
Beta 分布	0.695 0	13.202 6

从表 1 可以看出, Gamma 分布、Log - norm 分布对图像数据的拟合程序较好, K 分布、Beta 分布拟合效果较差。

图 7 和图 8 分布为 CA - CFAR、SO - CFAR 检测结果图。

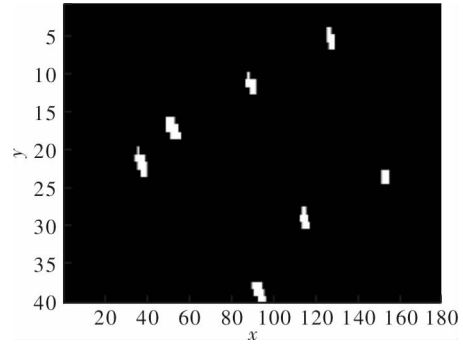


图 7 CA - CFAR 检测结果图

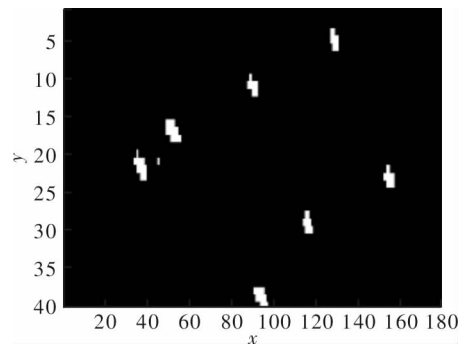


图 8 SO - CFAR 检测结果图

如图 7, 图 8 所示, 在均匀杂波区域中, 3 种检测器的结果相当, 都可检测出目标, 但从整体上看, CA - CFAR 检测性能更好。在实际应用中, 可以根据后续处理的不同需求, 选择不同的 CFAR 检测器进行检测, 进而得到最优的检测结果。

5 结束语

介绍了基于各种分布的 CFAR 检测, 并对几种常用的检测器进行了说明, 最后给出了仿真。基于 CFAR 的 SAR 目标检测以算法简单, 实现速度快等优点得到了广泛应用, 但其同时也存在一些不足, 为了使这种算法更适合于雷达成像算法, 还需要不断地研究与探索, 以适应不断面对各种场景不同的挑战。

参考文献

- [1] 匡纲要, 高贵, 蒋咏梅. 合成孔径雷达目标检测理论、算法及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.
- [2] 张琦. 基于统计模型的高分辨 SAR 图像车辆目标检测方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [3] 方学立. UWB SAR 图像中的目标检测与鉴别[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [4] 张翠. 高分辨 SAR 图像自动目标识别方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [5] 张军, 高贵, 周蝶飞, 等. SAR 图像机动目标检测的两种 CFAR 算法对比研究[J]. 信号处理, 2008(1): 78 - 82.