

一种基于图像差值的跑道异物检测算法*

赵军香^{1,2} 梁兴东¹ 李焱磊¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 机场跑道异物的存在给机场造成了很大的安全隐患,快速精确地检测跑道异物具有现实意义。当雷达作用距离比较短时,异物反射强度随距离的变化非常剧烈。针对这一问题,基于图像差值提出一种跑道异物检测算法。该方法首先根据异物灰度值的分布特征对异物幅值进行分块校正,然后运用局部阈值的方法对跑道差值图进行分割,最后通过图像分块和目标合并实现对异物的定位。实测雷达数据处理结果验证了该方法的有效性和实时性。

关键词: 机场跑道异物检测;图像差值;阈值选取;幅值校正

中图分类号: TP958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

FOD detection approach based on image difference

Zhao Junxiang^{1,2} Liang Xingdong¹ Li Yanlei¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Foreign object debris(FOD) on airport runways is a major hidden danger to the airports' safety. So, quick and precise detection to FOD has practical significance. When the radar range is comparatively short, FOD reflection intensity changes with distance very severely. To solve this problem, this paper present a method of FOD detection based on image difference. Firstly, the amplitude of FOD is corrected based on the distribution characteristics of FOD gray value. Secondly, the FOD is segmented using local thresholds. Finally, targets are located by image block and target merging. Experimental results of real radar data show that the method is effective and real-time.

Keywords: FOD detection;imagery difference;threshold selection;amplitude correction

1 引言

FOD(foreign object debris)即可能损坏航空器的某些外来的物质或碎屑,常见的 FOD 种类很多,如螺丝钉、塑料制品、石块等。由于飞机的引擎吸力极大,起降速度极快,即使非常小的跑道异物也会导致飞机零部件的损坏,带来严重的安全隐患和巨大的经济损失。目前,在机场异物检测方面,国外已出现一些比较成熟的异物检测系统,比较著名的有以色列的 FOD Detect 系统、英国的 Tarsier 系统、新加坡的 iFerrer 系统以及美国的 FOD-finder 系统^[1]等。国内在这方面的研究虽已起步,但是技术还不够成熟^[2-3]。比如,国内很多跑道异物检测系统是基于光学设备的,容易受天气的影响,少数的雷达系统,通常采用雷达

杂波图 CFAR^[4-5]技术,对多次扫描结果进行迭代,从而实现异物检测,因此,算法复杂度比较高。

图像差值法为像素级变化检测^[6-8]方法中应用最为广泛的一种,它主要是利用两幅图像中对应像素点的灰度差值与门限进行比较,并根据比较结果检测出成像期间场景内发生的变化。

由于机场 FOD 监测雷达的作用距离比较短,目标的后向散射能量随距离变化非常剧烈,从而增加了远距离处异物检测的难度和阈值选取的难度。针对这一问题,提出了一种基于图像差值的机场跑道异物检测算法。该方法根据目标反射强度与雷达作用距离的关系,对目标的幅值进行分块校正,校正后获取的差值图增强了未变化像素和变化像素的对比度,使后期阈值的选择更加简便,但由于

收稿日期:2016-04

* 基金项目:国家 863 计划舰载无人机海洋观测系统(2013AA092105)、测绘地理信息公益性行业科研专项(201412002)项目资助

校正残余的存在以及考虑到不同的异物后向散射能量不同问题,采用局部阈值的方法对其进行自动分割,能够有效地检测出场景中的目标,最后通过图像分块和区域合并的方法快速确定点目标的具体位置,实现对目标的实时定位。

2 FOD 幅值校正

2.1 FOD 灰度值分布特点

机场跑道上的 FOD 一般是静止目标,设单个 FOD 目标与雷达之间的距离为 R ,由雷达方程得到回波信号的瞬时功率^[9]为:

$$P_R(t) = P_T(t - \tau) \frac{\lambda^2 \delta}{(4\pi)^3 R^4} G_T G_r \quad (1)$$

式中: τ 为目标的双程延时时间, λ 为雷达工作波长, G_T 为发射天线增益, G_r 为接收天线增益, δ 为目标 RCS。假设发射信号的复包络信号为 $\mu_T(t)$, 满足 $P_T(t) = |\mu_T(t)|^2$, 则雷达接收信号的复包络信号为:

$$\mu_R(t) = V \mu_T(t - \tau) \quad (2)$$

式中: $V = \left[\frac{\lambda^2 G_T G_r \delta}{(4\pi)^3 R^4} \right]^{1/2}$, 表示的是 FOD 目标的反射强度。

由式(2)可以看出 FOD 目标的反射强度可近似认为

与距离 R 的平方成反比,即在雷达参数固定的情况下,对于同一个 FOD 目标来说,与雷达的距离越远,目标的反射强度越小。为了充分说明跑道上的 FOD 目标反射强度与距离 R 的平方成反比,用实测数据对其进行了验证。将 400 m 的机场跑道按照图 1(a) 的坐标摆放了 8 个同一种 FOD 目标,其中 FOD 目标的种类包括橡胶皮、高尔夫和金属圆柱,进行多次实验,得到不同 FOD 的反射强度随距离变化的衰减曲线,如图 1(b) 所示。在按照图 1(c) 的坐标摆放 41 个金属圆柱,得到金属圆柱随距离的衰减曲线,如图 1(d) 所示。

通过对图 1(b) 和图 1(d) 进行分析,可以看出跑道上 FOD 的灰度值分布特点:同一种 FOD,当距离雷达越远时,FOD 的灰度值越低;最远的 FOD 与最近的 FOD 的灰度值相差 14~16 dB; FOD 目标在近距离处的衰减比较缓慢,比如 70~120 m, 120~170 m 范围内,FOD 目标的衰减比较缓慢,而在 200 m 范围之外衰减速度比近距离处要快;整体来看,FOD 的灰度值随距离的变化趋势与理论上的变化趋势基本一致。

因此,本文根据 FOD 反射强度的分布特点,对不同距离处的 FOD 目标进行幅值校正,使得跑道上 FOD 目标的灰度值分布比较均匀,便于检测阈值的选取。

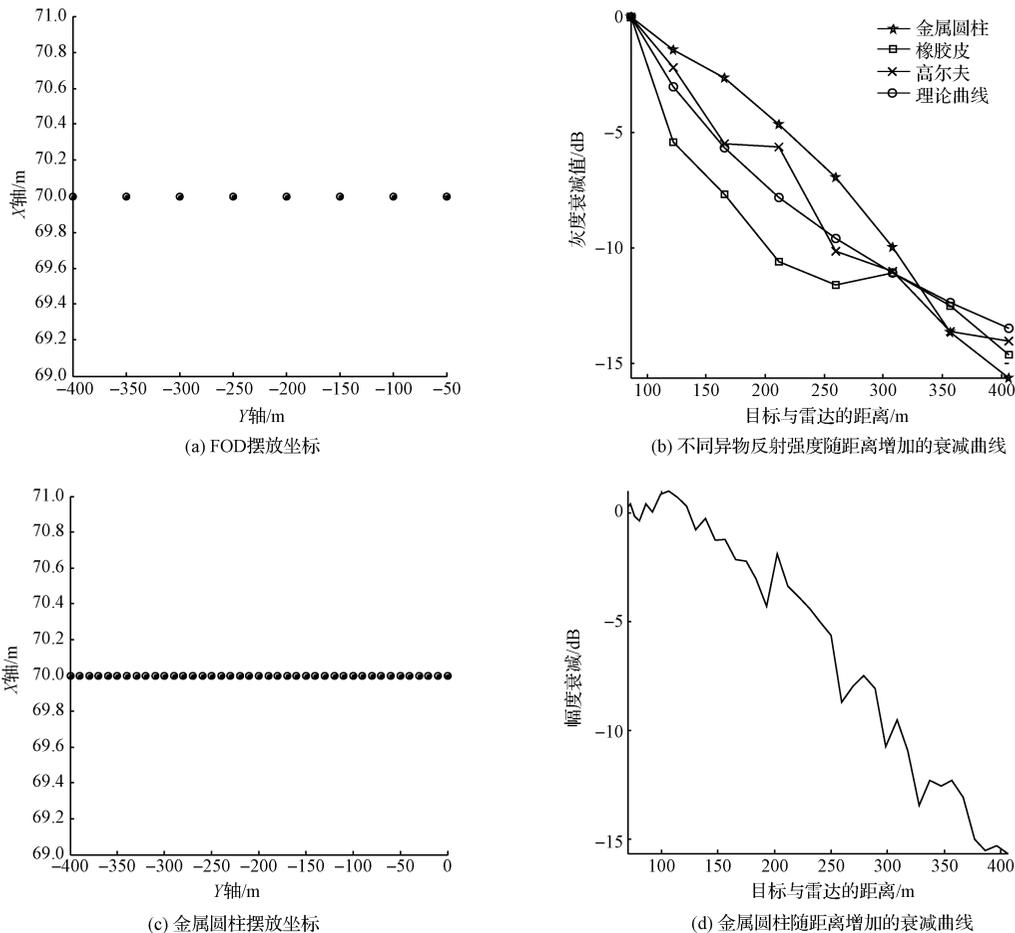


图 1 异物坐标和灰度值

2.2 FOD 幅值校正方法

要想使跑道上 FOD 的灰度值分布比较均匀,并且还不引起噪声的增加,需要考虑以下两个问题:1)对 FOD 的灰度进行校正时应遵循什么规律;2)如果对待检测图像中的所有像素都进行校正,肯定也会增加噪声的能量,因此,必须考虑对待检测图像中的哪些像素单元进行校正,哪些像素单元可以不用校正。

针对第一个问题,根据图 1(b)中的曲线可以得知,对 FOD 灰度的校正曲线可以由公式(2)中 V 的表达式得到。以跑道最近点 R_{near} 为基准点(此点一般为距离雷达最近的点),那么距离雷达 $R_i (R_i > R_{near})$ 处的目标的反射强度为:

$$V_i = \left[\frac{\lambda^2 G_T G_R \delta}{(4\pi)^3 R_i^4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

假设目标的 RCS 基本不变,那么此处目标灰度值的校正增量为:

$$\Delta = 20 \times ((\log(R_i) - \log(R_{near}))) \quad (4)$$

式中:单位为 dB。根据式(4),可以对跑道上的任意点进行校正。但是考虑到跑道上的一块区域内的各点到雷达距离的差异并不是很大,从而引起的幅值差异也不会很大,如果逐像素的计算校正增量,会增加算法的计算量。因此,本文采用分块的方法对跑道 FOD 进行校正。

针对第二个问题,可以根据对 FOD 雷达的检测性能的要求,来设定一个阈值 τ ,待检测单元的像素值 $x_{i,j}$ 与对应的基准单元的像素值 $y_{i,j}$ 进行比较,如果相差大于阈值 τ ,那么此待检测单元进行校正,否则,不进行校正。阈值 τ 根据雷达检测中的最小可检测信噪比决定^[10]。

用瑞利分布对杂波进行建模,杂波幅度的概率密度函数为:

$$p(x; \sigma^2) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中: σ^2 为噪声方差, x 为杂波幅度。设置门限 U_T ,杂波幅度超过门限的概率就是虚警概率 P_{fa} ,它可以由式(6)求出:

$$P_{fa} = P(U_T \leq x < \infty) = \int_{U_T}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = \exp\left(-\frac{U_T^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

用莱斯分布对信号加噪声的幅度 r 进行建模, r 服从的概率密度函数为:

$$p(r; \sigma^2; A) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中: A 为信号的幅度, $I_0(z)$ 是宗量为 z 的零阶修正贝塞尔函数。 r 超过预定门限 U_T 的概率为信号被发现的概率,因此发现概率 P_d 为:

$$P_d = \int_{U_T}^{\infty} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) dr \quad (8)$$

把式(7)以信噪比 $D_0 = S/N$ 为变量,以虚警概率为参变量,可以得到检测概率与虚警概率和所需信噪比的关系^[11-14]。

关系^[11-14]。

根据以上分析,本文提出的幅度校正方法的操作步骤如下:

1)根据雷达的检测性能要求,查非起伏目标单个脉冲线性检波时检测概率和所需信噪比(检测因子)的关系曲线,得到最小可检测信噪比 D_0 ,将 D_0 设为校正时的检测门限 τ ;

2)对跑道图像进行分块,假设第 k 块子图像为 I_k ,并且子图像 I_k 的中心点为 M_k ,将 M_k 与雷达的距离 R_k 作为此子图像的参考距离;

3)假设子图像 I_k 中的待校正单元的强度为 $x_{i,j}$,对应的基准单元的强度为 $y_{i,j}$,比较两个像素值,如果 $x_{i,j} - y_{i,j} > \tau$,那么待校正单元的强度变为 $x_{i,j} + \Delta_k$,否则,强度不变。其中 Δ_k 是根据式(4)得到的子图像 I_k 的校正增量。

对于上述步骤 2)中应该如何对跑道进行分块的问题,可以根据图 1 中 FOD 目标的分布特点进行分块。分块越细,校正越准确,但是分块越细,算法效率越低,所以应该选取一个既可以保证效率又可以保证性能的最优分块方法。

运用本文的幅值校正方法对图 1(d)中的 41 个金属圆柱进行校正,得到金属圆柱的灰度值分布如图 2 所示,与图 1(d)进行比较可以看出,进行校正后,FOD 的幅度曲线变得平缓,分布近似均匀。通过这种校正方法,可以增大背景和异物的对比度,从而使后期阈值的选择更加容易。

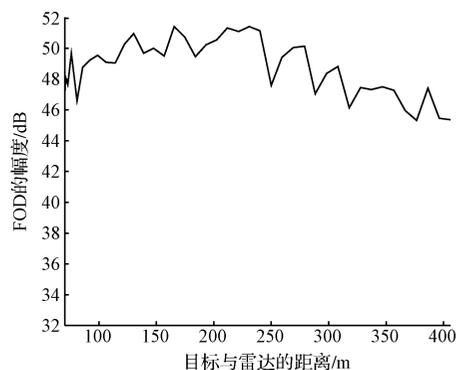


图 2 校正后异物灰度值分布

3 FOD 检测算法

3.1 局部阈值选取方法

当图像中出现如下情况:亮暗不均匀,各处的对比度不同,背景的灰度变化剧烈等,如果只用一个全局阈值对图像进行分割,则可能会由于不能兼顾各处的情况而使分割效果很差,使用局部阈值可以解决这个问题。对于机场跑道差值图像来说,虽然在获取差值图像之前对异物进行了幅值校正,但是由于不同异物后向散射特性不一样,在雷达图像上的灰度值也不一样,如果采用全局阈值^[11-13]的方法,可能会导致漏检或虚警。因此,本文运用局部阈值的方法对跑道差值图像

进行分割,而局部阈值的生成方法采用比较简单的最大类间方差阈值法^[14]。

最大类间方差法是1979年由日本学者大津(Nobuyuki Otsu)提出的,是一种自适应的阈值选取方法,简称为OTSU。因其计算简便、有效、稳定,一直被广泛使用。它按照图像的灰度分布特性,把图像分成目标和背景两部分。目标和背景的类间方差越大,说明目标和背景的差异越大,当部分背景错分为目标或者部分目标错分为背景时,都会导致两部分的差异变化小。所以,使类间方差最大的分割意味着错分概率最小。

假设一幅图像的灰度值为 $0:L-1$ 级,灰度值 i 的像素数有 n_i 个,那么各个灰度级的概率为 $p_i = \frac{n_i}{N}$,其中 N 为总的像素数。

用阈值 T 将其分成两组 $C_0 = \{0 \sim T-1\}$ 和 $C_1 = \{T \sim L-1\}$,计算每个组的概率和均值:

$$w_0 = \sum_{i=0}^{T-1} p_i = w(T) \tag{9}$$

$$w_1 = \sum_{i=T}^{L-1} p_i = 1 - w \tag{10}$$

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} i p_i}{w_0} = \frac{\mu(T)}{w(T)} \tag{11}$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=T}^{L-1} i p_i}{w_1} = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - w(T)} \tag{12}$$

式中: $\mu = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i$ 是整幅图像的灰度平均值; $\mu(T) = \sum_{i=0}^{T-1} i p_i$ 是阈值为 T 时灰度平均值,两组间的方差用下式求出:

$$\delta^2(T) = w_0(\mu_0 - \mu)^2 + w_1(\mu_1 - \mu)^2 \tag{13}$$

从 $0:L-1$ 之间改变 T ,求 $\delta^2(T)$ 值为最大时的 T ,设为 T^* ,就是图像需要的阈值。

这种方法无论图像的直方图有没有明显的双峰,都能得到比较满意的结果,因此,这种方法是阈值自动选择比较好的方法。

3.2 检测算法流程

实时处理中,FOD监测系统应要具备快速检测能力^[15],即成像处理和FOD检测处理需要在一个扫描周期甚至要求在更短的时间内完成。传统的一些检测方法需要遍历一幅图像的所有像素点,对于一幅很大的图像,如果检测方法比较复杂,无法满足实时处理的要求。因此,本文对跑道差值图像进行了分块处理,既不需要遍历图像中所有的像素点,也可以实现异物的初步定位。同时,FOD雷达在成像时没有进行方位的脉压,所以即使是点目标,在雷达图像上也会表现成一条弧线。弧线的长度与天线的方位向波束宽度和目标与雷达的距离有关,距离越远,目标在雷达图像上的弧线越长,且差值检测法是像素级的检测方法。因此,得到的检测结果都是潜在的目标

像素点,需要进行区域合并^[16-17],然后以区域中的某一点作为该目标的位置,实现目标的定位。

由本文方法得到的具体流程如图3所示,并将其简称为AC-BLT。为了验证本文算法的检测效率和检测性能,将本文算法分别与以下3种算法进行比较:1)第一种算法省略图3中的图像分块步骤,将其简称为AC-LT;2)第二种算法将图3中的局部阈值方法改为全局阈值方法,将其简称为AC-BGT;3)第三种算法省略图3中的幅值校正步骤,将其简称为BLT。

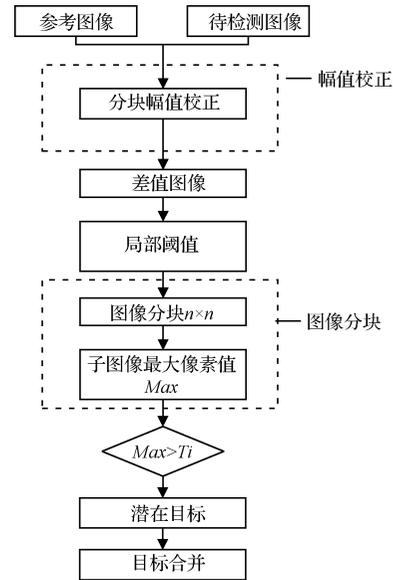
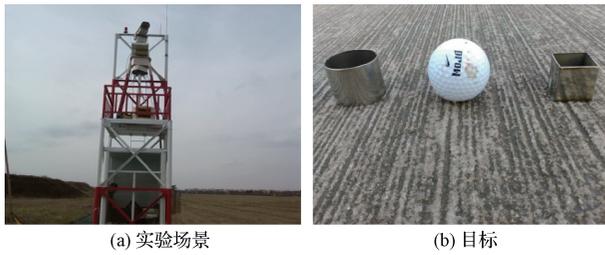


图3 本文FOD检测算法(AC-BLT)流程

对于AC-BLT算法和AC-LT两种算法,可能会影响运算量的步骤主要有两个:1)图像分块中最大值求取与阈值的比较,如果每块子图像的像素个数为 N_b ,那么它们总的比较次数为 N_b ,如果不进行图像分块处理,那么 N_b 个像素与阈值的比较次数也为 N_b ,因此图像分块不会增加运算量;2)如果潜在目标个数为 N ,那么目标合并的运算量至少为 N 。如果图像分块后得到的潜在目标个数为 N_s ,而未进行分块得到的目标个数为 N_L ,实际应用中,往往是 N_L 远远大于 N_s ,因此进行图像分块的算法要比未进行图像分块的算法效率高。对于AC-BLT算法和AC-BGT两种算法,可能会影响运算量的步骤主要是全局阈值和局部阈值,而不管是全局阈值还是局部,总的来看均需要对整幅图像进行直方图统计,运算量差异不大。

4 实测数据结果

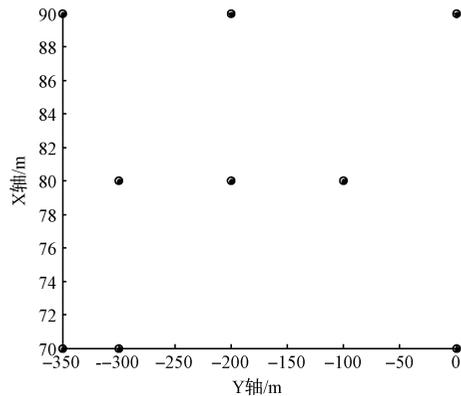
本文提出的方法已应用于安装在机场备用跑道的雷达监测系统中,如图4(a)所示。本文使用的FOD是图4(b)最左边的金属圆柱,FOD按照适当间隔摆放在机场备用跑道上。



(a) 实验场景 (b) 目标

图4 实验场景和异物

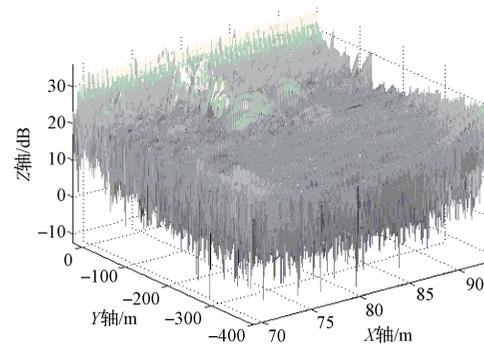
雷达设备获取的是极坐标下的数据,将扫描一周的回波数据按行组成一个矩阵,首先进行距离向的脉冲压缩,再进行坐标转换得到直角坐标系下的跑道图像,图像 x 轴的范围为 $69\text{ m}; 93\text{ m}$, y 轴的范围为 $-400\text{ m}; 20\text{ m}$,



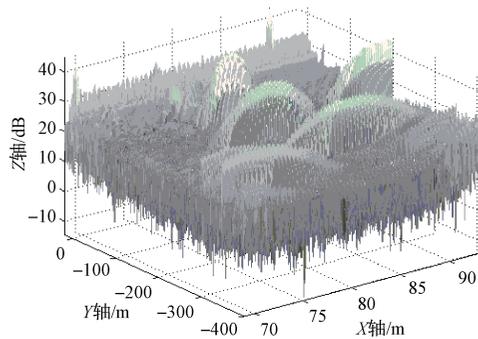
(a) 异物坐标

异物摆放的坐标如图 5(a) 所示,参考图像和待检测图像分别如图 5(b) 和 5(c) 所示,将两幅图像直接进行差值得到的结果如图 5(d) 所示。运用本文方法,对待检测图像进行幅值校正后得到的结果如图 5(e) 所示,再与参考图像进行差值得到的结果如图 5(f) 所示。

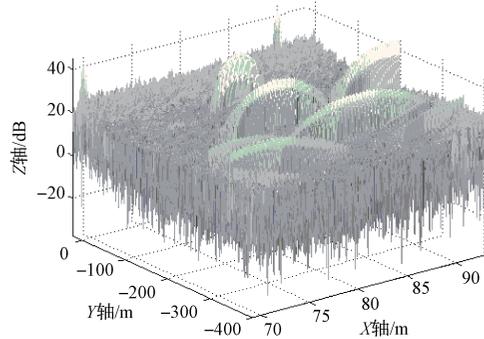
分析图 5(b) 和图 5(c) 可知,背景杂波中除了高斯白噪声外,还存在很多与目标相似的干扰,尤其是在雷达的近端。图像差值之后,很大程度上的削弱了这些干扰,使得杂波的分布比较均匀,同时也增加了目标和背景的对比如。比较图 5(d) 和 5(f) 可知,对 FOD 幅值进行校正后,增加了远距离处的异物灰度值,从而增大了远距离处的目标和背景的对比如。



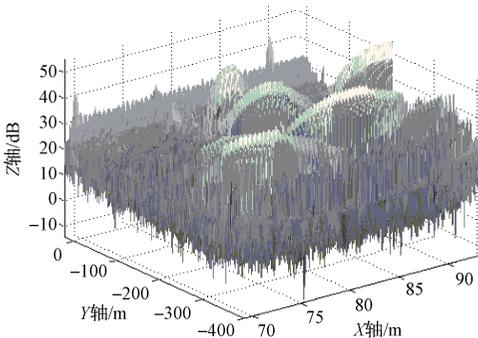
(b) 跑到参考图像



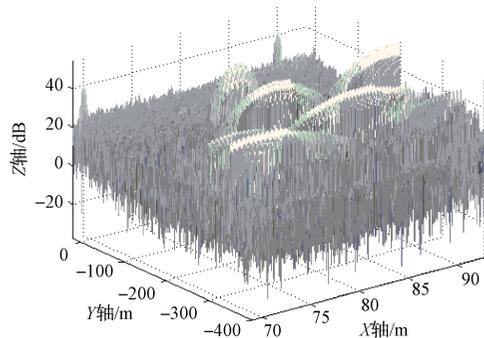
(c) 跑道待检测图像



(d) 跑道未校正的差值图像



(e) 幅值校正后的待检测图像



(f) 幅值校正后的跑道差值图像

图5 异物坐标及跑道差值

分别运用 AC-BLT、AC-LT、AC-BGT 和 BLT 4 种算法对跑道进行检测,得到的结果如图 6 所示。在相同运算条件下,本文方法的运行时间为 0.062 s,而 AC-LT 方法的运行时间为 0.149 9 s,因此本文方法的运算量要低;同样在相同运算条件下,局部阈值的运算时间为 0.028 4,而全局阈值的运算时间为 0.039 2,仅仅相差 0.01 s。并且,通过将图 6(a)与图 6(c)和 6(d)比较可知,本文算法 AC-BLT 可以准确地检测出 9 个异物,而

AC-BGT 方法漏检了 4 个,BLT 方法产生两个虚警。由此说明,本文算法不管是在性能上还是在效率上均可得到满意的结果。

综上,本文算法 AC-BLT 与 AC-LT 比较,本文方法的时间复杂度比 AC-LT 方法低;与 AC-BGT 方法比较,两者时间复杂度相当,但是本文方法的检测性能要好;与 BLT 方法比较,虽然本文算法的时间复杂度高,但是本文算法的检测性能更优越。

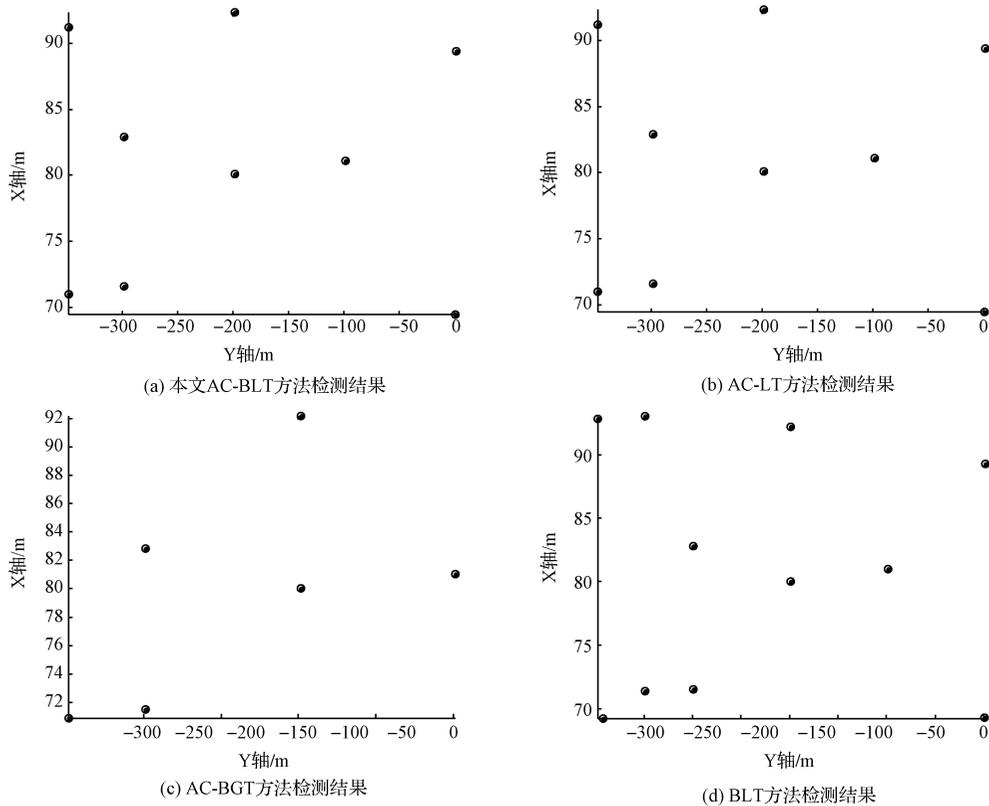


图 6 检测结果

5 结 论

当雷达作用距离比较短时,目标反射强度随距离的变化非常剧烈,如果忽略这个变化,会给远距离处弱小目标的检测带来困难。本文针对这一问题,基于最小可检测信噪比的理论和雷达方程,提出了一种幅值校正方法。此方法在满足基本检测性能的前提下,采用分块技术保证检测效率。虽然对跑道差值图进行了幅值校正,但由于校正残余的存在以及考虑到不同的异物后向散射能量不同,本文采用局部阈值的方法对异物进行分割,而局部阈值的生成采用比较简单的最大类间方差阈值法,最后通过图像分块和目标合并实现了对异物的快速定位。并通过实测数据的对比实验,验证了本文算法的有效性和实时性。

参 考 文 献

- [1] 国家民航总局机场司民航局安全技术中心. FOD 防范手册[R]. 2009.
- [2] 李煜,肖刚. 机场跑道异物检测系统设计与研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 909-915.
- [3] 周扬. 基于视频的机场跑道异物检测算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [4] 吴静,王洪,汪学刚. 机场跑道异物监测雷达的杂波图恒虚警率检测[J]. 计算机应用, 2013, 33(11): 3288-3290.
- [5] 吴静,汪学刚. 非高斯背景下跑道异物监测雷达的杂波图 CFAR 技术[J]. 现代雷达, 2014, 36(1): 35-39.

- [6] 陈丽勇,孙显,王宏琦.一种基于 TSVM-MRF 的变化检测方法[J].国外电子测量技术,2015,34(7):32-36.
- [7] 杨希,刘国祥.基于多时相遥感图像灰度差值法的地表变化检测[J].四川测绘,2008,31(3):99-103.
- [8] 杨祥立,徐德伟,黄平平,等.融合相干/非相干信息的高分辨率 SAR 图像变化检测[J].雷达学报,2015,4(5):582-590.
- [9] 刘迪,曹晓光.机场道面复杂背景下异物特征分析与检测[J].电子设计工程,2013,21(2):12-15.
- [10] 丁璐飞,耿富录.雷达原理[M].第5版.北京:电子工业出版社,2014.
- [11] 郑毅,郑苹.基于模糊熵和模拟退火算法的双阈值图像分割[J].电子测量与仪器学报,2014,28(4):360-367.
- [12] 冯林,孙焘,吴振宇,等.基于分水岭变换和图论的图像分割方法[J].仪器仪表学报,2008,29(3):649-653.
- [13] 谢颖.结合 Mean Shift 和聚类算法的服装图像分割[J].电子测量技术,2013,36(8):53-55.
- [14] 曹甜甜,基于雷达图像的机场跑道异物检测系统搭建及算法研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [15] FAA. AC150/5220-24. Airport Foreign Object Debris (FOD) Detection Equipment. 2009.
- [16] 任新涛,张宏伟,秦少刚,等.某新型战场侦察雷达信号处理系统研究[J].中国测试,2014,40(2):94-97.
- [17] 刘赵强.高分辨 SAR 图像机动目标检测与识别技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.

作者简介

赵军香,1989年出生,女,中国科学院电子学研究所硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。
E-mail:jxzhao_0817@163.com

梁兴东,1973年出生,男,中国科学院电子学研究所研究员,主要研究方向为高分辨率合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达系统、成像处理及应用和实时数字信号处理。

李焱磊,1983年出生,男,中国科学院电子学研究所助理研究员,主要研究方向为机载差分干涉 SAR 信号处理。