

机场跑道异物监测雷达的杂波图恒虚警率检测

吴静*, 王洪, 汪学刚

(电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731)

(*通信作者电子邮箱 wujing1821@126.com)

摘要:随天线扫描平稳变化的强地杂波是实现机场跑道异物(FOD)检测的主要干扰,传统的空域恒虚警率(CFAR)处理不能有效地检测到目标,针对上述问题,提出了一种单元平均杂波图恒虚警率检测算法。首先基于系统特性和跑道环境建立了回波信号模型;然后通过杂波图划分、单元平均、递归滤波等处理技术,实现了距离-方位二维恒虚警率检测;最后进一步分析影响检测性能的主要参数。仿真结果表明,所提算法在低信杂比背景下能有效检测到弱目标,并获得较高的检测概率。

关键词:机场跑道异物检测;调频连续波;单元平均杂波图;递归滤波

中图分类号: TP391.413 **文献标志码:** A

Clutter-map constant false alarm rate detection for foreign object debris on runways

WU Jing*, WANG Hong, WANG Xuegang

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Heavy land clutter with antenna scan is the main interference for Foreign Object Debris (FOD) detection. However, traditional Constant False Alarm Rate (CFAR) in space-domain is ineffective to detect targets on runways. To solve this problem, a cell-average clutter-map CFAR was proposed. First of all, an echo model based on the characteristics of FOD surveillance radar system was built. Then, the range-bearing two-dimensional CFAR detection could be realized by using clutter-map cells dividing, cell averaging and recursive filtering. Further analysis of the main factors that affected the detection performance of this method was studied in the end. The simulation results show that, the proposed algorithm can effectively detect the weak target and obtain high detection probability with a low signal-to-clutter ratio.

Key words: Foreign Object Debris (FOD) detection on runways; frequency modulate continuous wave; cell-average clutter-map; recursive filtering

0 引言

机场跑道异物(Foreign Object Debris, FOD)指原本不属于跑道但却出现在跑道上的外来物,常见的有小石块、金属条、螺丝钉等^[1]。跑道异物会造成飞机零部件的破坏,严重危及飞机和乘客的生命安全。目前国外已有成功研制并投入运用的系统,但国内机场对FOD的检测仍靠人工定时巡视、人眼近距离搜索,大大降低了跑道利用率,造成巨大的经济损失。FOD自动检测系统主要采用雷达探测技术和视频图像识别技术。文献[2]提出,FOD监测雷达系统主要采用毫米波波段调频连续波(Frequency Modulate Continuous Wave, FMCW)雷达体制,充分利用了FMCW的高距离分辨率和高距离检测精度等优点。

跑道上两架飞机之间的停飞时间间隔一般只有几十秒左右^[1-2],因此要求FOD监测雷达具有很强的自动检测能力,能够在很短时间内自动检测到跑道异物。自动检测的一项关键技术是实现恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测,能随着杂波和噪声的变化自适应调整检测门限,保持虚警概率不变。FOD检测雷达系统中,不同的距离-方位单元杂波变化很剧烈,传统的单元平均类恒虚警率(Cell-Average

CFAR, CA-CFAR)检测^[3-4]和排序类恒虚警率(Order-Statistics CFAR, OS-CFAR)检测^[5-7]算法不适用于随距离变化比较剧烈的杂波背景。本文采用的单元平均杂波图恒虚警率(Cell-Average Clutter-Map CFAR, CA-CM-CFAR)检测算法^[8-10]能在空域变化比较剧烈的均匀杂波背景下实现对目标的距离-方位二维恒虚警率检测。

1 FOD监测雷达接收信号模型

美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)发布的FOD检测系统的测试报告指出,FOD监测雷达可以采用FMCW雷达体制,其工作频段主要集中在Ka波段和毫米波波段。图1给出了FOD监测雷达的基本工作原理。其中:LNA(Low Noise Amplifier)表示低噪声放大器;FFT(Fast Fourier Transform)表示快速傅里叶变换。

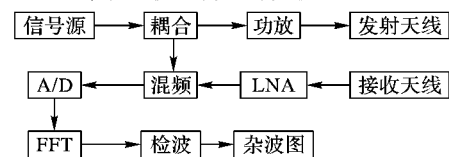


图1 FOD监测雷达的基本原理

设发射信号为:

收稿日期:2013-05-09;修回日期:2013-07-11。 基金项目:国家自然科学基金重点项目(61139003);国家自然科学基金面上项目(61079006);中央高校基本科研业务费资助项目(ZYCX2012J027)。

作者简介:吴静(1988-),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向:FOD检测雷达信号处理;王洪(1974-),男,四川仁寿人,副教授,博士,主要研究方向:FOD监测雷达、MIMO雷达、多点定位、数字接收机、高速实时信号处理;汪学刚(1962-),男,湖南常德人,教授,博士生导师,主要研究方向:雷达信号处理、毫米波雷达系统。

$$S_T(t) = A_0 \cos [(2\pi f_0 t + \mu t^2/2) + \varphi_0]; \quad 0 < t < T_0 \quad (1)$$

其中: f_0 为中心频率, B 是信号带宽, T_0 为扫描周期, $\mu = B/T$ 为调频斜率。一般, 跑道 FOD 是静止目标, 可设目标距离为 R , 则发射信号与接收信号间的时延为 $\tau = 2R/c$, 目标回波信号为:

$$S_R(t) = KA_0 \cos \{2\pi[f_0(t - \tau) + \mu(t - \tau)^2/2] + \varphi_0\} \quad (2)$$

经混频、滤波后得到差拍信号为:

$$S_B(t) = \frac{1}{2}KA_0 \cos \{2\pi[f_0 t + \mu t^2 - \mu\tau^2/2] + \Delta\varphi\} \quad (3)$$

跑道 FOD 监测雷达系统中的干扰信号主要是地杂波和噪声。因此, 接收信号为:

$$S_E(t) = S_R(t) + c(t) + n(t) \quad (4)$$

其中: $c(t)$ 表示杂波, $n(t)$ 表示接收机噪声, 一般指的是高斯白噪声。

机场跑道环境比较均匀, 与其他地物相比具有很强的目标特征。跑道杂波主要来自于大量小的散射体的回波^[11], 因此可认为杂波 $c(t)$ 是幅度服从瑞利分布的高斯杂波。

2 单元平均杂波图 CFAR 算法

来自跑道的强地杂波在不同距离单元变化非常剧烈, 空域 CFAR 算法检测效率很低。但是同一距离单元的杂波强度在不同扫描周期变化比较平稳, 可以在时间上对不同扫描周期的测量值作迭代处理实现恒虚警率检测。本文提出的 CA-CM-CFAR 算法是一种时域上的自适应 CFAR 处理算法, 能实时记录雷达周围环境的杂波分布和强度变化, 利用检测单元以往多次扫描测量值形成杂波平均功率水平估计, 适用于随空域变化比较剧烈、随时域变化比较平稳的杂波环境。图 2 所示为 CA-CM-CFAR 的基本原理。

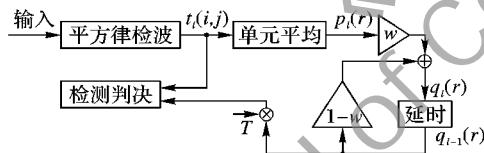


图 2 CA-CM-CFAR 的基本原理

1) 平方律检波。

瑞利分布杂波的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}; \quad x > 0 \quad (5)$$

设经过平方律检波后杂波图输入值为 $t_l(i, j)$, 表示在第 l 次扫描时第 i 个方位单元、第 j 个距离单元的采样信号值。瑞利杂波经平方律检波后服从指数分布^[12], 故有:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \exp(-t/\lambda), & H_0 \\ \frac{1}{\lambda(1+S)} \exp\left[-\frac{t}{\lambda(1+S)}\right], & H_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中: S 为信杂比 (Signal-to-Clutter Ratio, SCR), λ 是杂波功率, H_0 表示无目标时杂波图输入数据的概率密度函数, H_1 则表示有目标时杂波图输入数据的概率密度函数。

2) 单元平均处理。

CA-CM-CFAR 采用单元平均算法: 选择一个矩形滑动参考窗, 以多个连续的分辨单元的平均值作为被检测单元的杂波功率估计。如图 3 所示, 中间深色阴影单元即为被检测单元, 不参与杂波功率估计; 白色所示单元是背景参考单元, 用

于估计被检测单元的杂波功率; 浅色阴影单元是保护单元, 为防止能量的泄漏, 也不参与杂波功率的计算。

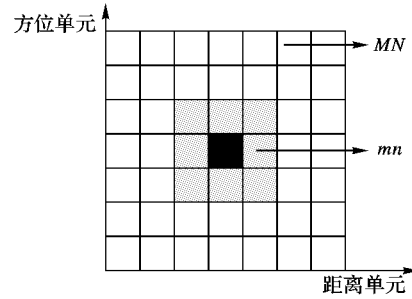


图 3 参考滑窗的划分

设 $p_l(r)$ 是对第 r 个参考滑窗的杂波图单元作单元平均后的输出值; 取参与计算的参考单元个数为 $K = MN - mn$, 则有:

$$p_l(r) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K t_l^k(i, j) \quad (7)$$

由指数函数和伽马函数之间的转换关系可得到 $t_l(i, j) \sim \Gamma(1, \lambda)$, 故 $p_l(r)$ 的矩母函数^[12] 为:

$$M_{p_l}(u) = \left(1 + \frac{\lambda}{K}u\right)^{-K} \quad (8)$$

3) 递归滤波。

由于不同扫描周期的回波采样值会随时间缓慢变化, 采用一阶递归滤波处理, 可以克服杂波时变性, 得到较平稳的检测门限。如图 2 所示, 递归滤波器的输入是对第 l 次扫描测量值按上述处理过程得到的单元平均输出值 $p_l(r)$; w 是迭代因子, 且 $0 < w < 1$; 输出 $q_l(r)$ 为此次扫描后杂波图的实际存储值, 作为下次判决时的检测门限。迭代公式为:

$$q_l(r) = wp_l(r) + (1-w)q_{l-1}(r) \quad (9)$$

展开有:

$$q_l(r) = wp_l(r) + w(1-w)p_{l-1}(r) + w(1-w)^2p_{l-2}(r) + \dots = \sum_{n=0}^{l-1} w(1-w)^n p_{l-n}(r) \quad (10)$$

故 $q_l(r)$ 的矩母函数为:

$$M_{q_l}(u) = \prod_{n=0}^{l-1} \left[1 + \frac{\lambda}{K}w(1-w)^n u\right]^{-K} \quad (11)$$

4) 检测判决。

以平方律检波后的扫描测量值 $t_l(i, j)$ 作为检测统计量, 设 T 为检测门限系数, 判决准则为:

$$\begin{cases} t_l(i, j) \geq Tq_{l-1}(r), & H_1 \\ t_l(i, j) < Tq_{l-1}(r), & H_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中: H_1 表示检测到目标, H_0 表示未检测到目标。检测概率公式为:

$$P_d = \int_0^{+\infty} \int_{Tq_{l-1}}^{+\infty} \frac{1}{\lambda(1+S)} \exp\left[-\frac{t}{\lambda(1+S)}\right] dt_l f(q_{l-1}) dq_{l-1} = \int_0^{+\infty} \exp\left[-\frac{Tq_{l-1}}{\lambda(1+S)}\right] f(q_{l-1}) dq_{l-1} = M_{q_{l-1}}(u) \Big|_{u=\frac{T}{\lambda(1+S)}} = \prod_{n=0}^{l-1} \left[1 + \frac{T w (1-w)^n}{K(1+S)}\right]^{-K} \quad (13)$$

令 $S = 0$, 则得到虚警概率公式为:

$$P_f = \prod_{n=0}^{l-1} \left[1 + \frac{T}{K} w (1-w)^n\right]^{-K} \quad (14)$$

平均检测门限 (Average Detection Threshold, ADT):

$$ADT = \frac{E\{Tq_{l-1}(r)\}}{\lambda} = -\frac{T}{\lambda} \cdot \frac{dM_{q_l}(u)}{du} \Big|_{u=0} =$$

$$T \sum_{n=0}^l w(1-w)^n \quad (15)$$

设天线共扫描50次,选择7×7的矩形窗,参考单元个数 $K = 7 \times 7 - 3 \times 3$ 。通过数值分析计算得到不同虚警概率时门限系数 T 随迭代因子的变化,如表1所示。

表1 不同虚警概率时 T 随 w 的变化

P_f	w			
	0.0625	0.1250	0.2500	0.5000
10^{-4}	9.6045	9.2916	9.3624	9.5677
10^{-5}	12.0176	11.6367	11.7508	12.0728
10^{-6}	14.4356	13.9908	14.1583	14.6240

3 仿真结果分析

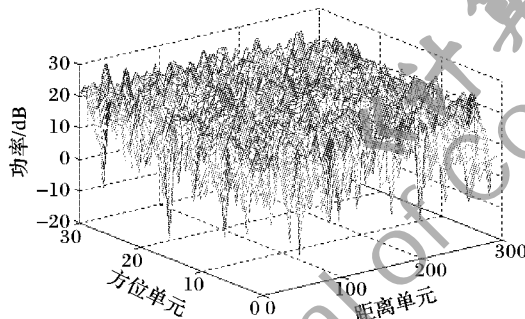
3.1 目标检测

FOD 监测雷达系统的相关参数如表2所示。

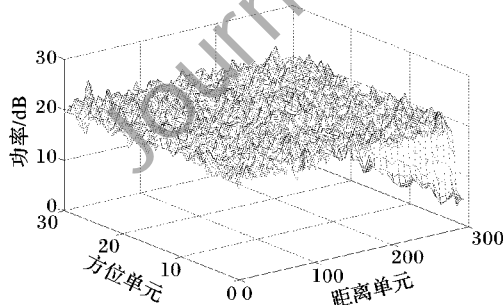
表2 相关参数设置

参数	值	参数	值
发射信号中心频率 f_0	10 GHz	天线扫描角度 θ	$0^\circ \sim 30^\circ$
发射信号带宽 B	500 MHz	采样频率 f_s	4 MHz
FOD 目标距离 R_0	150 m	信杂比 SCR	15 dB
调频周期 T	0.5 ms		

设扫描周期 $L = 50$,虚警概率 $P_f = 10^{-5}$,参考单元个数 $K = 7 \times 7 - 3 \times 3$,杂波功率 $P_c = 20$ dB,单 FOD 目标功率 $P_s = 35$ dB。图4(a)所示为跑道环境下的杂波波形;图4(b)所示为经过20次 CA-CM-CFAR 处理后的杂波图输出值。



(a) 杂波波形



(b) 迭代20次后的波形

图4 检测前后波形比较

从图4能明显看出,经过多次迭代平均后,杂波图存储值越来越平稳,杂波变化幅度越来越小,这能很好地降低虚警率。

设目标信号位于第15个方位单元、第150个距离单元处,在第49次扫描时加入目标信号,则第50次时可以检测到目标。如图5所示为回波信号与检测门限的比较,下方细线部分曲线表示含目标的回波波形,上方粗线部分曲线是根

据 CA-CM-CFAR 算法得到的检测门限。可以看出经过 CA-CM-CFAR 处理后很好地检测到目标。

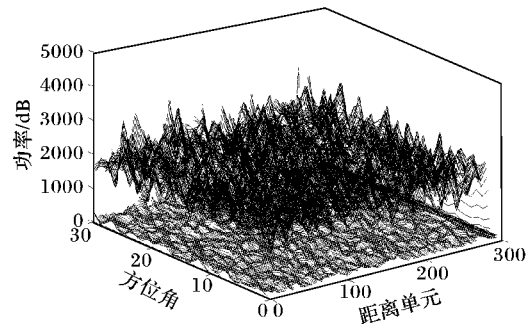
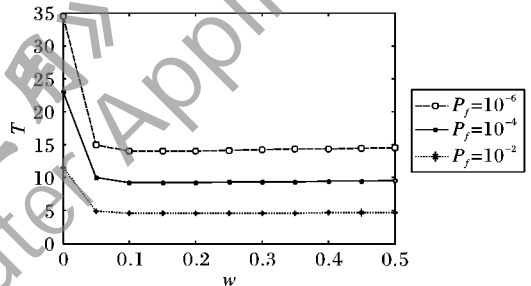


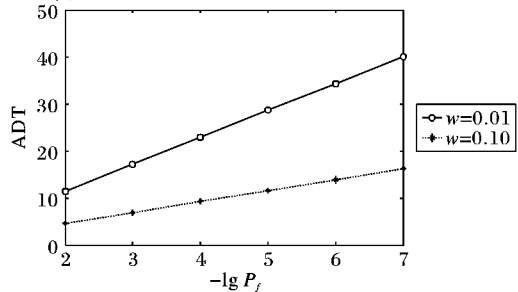
图5 回波信号与检测门限的比较

3.2 性能分析

图6给出在不同参数条件下,CA-CM-CFAR 检测器的检测性能曲线。从仿真结果可以看出,当虚警概率一定时,门限系数对迭代因子 w 的变化不是很敏感,且当 $w > 0.1$ 时,门限系数基本不变;虚警要求越高时,门限系数越大,平均检测门限也越大。



(a) 不同虚警概率时门限系数随 w 的变化



(b) 不同 w 时ADT随虚警概率的变化

图6 CA-CM-CFAR 算法的检测性能分析

4 结语

本文讨论了在 FOD 监测雷达实际应用背景和工作方式下的回波信号模型,根据回波信号特点提出了单元平均杂波图 CFAR 算法以实现恒虚警率检测,结合 CA-CM-CFAR 算法的检测性能公式,仿真得到检测概率曲线和平均检测时间的变化关系曲线。分析仿真结果可知,在 FOD 监测雷达系统中,采用 CA-CM-CFAR 处理可以在低虚警控制下得到稳定的、高的检测性能。

参考文献:

- [1] 姚红宇,唐海军. FOD 防范手册[R]. 北京: 国家民航总局机场司民航安全技术中心,2009.
- [2] 王洪,汪学刚. 机场跑道异物监测雷达关键技术[J]. 电讯技术,2010,51(2):7-10.
- [3] 何友,关键. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社,2011:222-236.

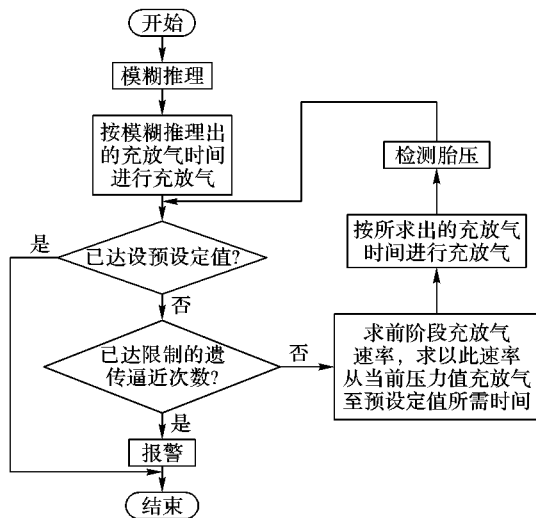


图 8 充放气控制子程序流程

表 2 基于模糊与遗传逼近策略的自动充放气系统部分测试结果

所充 轮胎 只数	预设 定气压 值/bar	充气前 气压 值/bar	气源 压力 值/bar	充气 所达 精度/bar	充气时间/s	
					本文 方法	自主 学习方法
1	2.5	0	8	± 0.04	96	49
2	2.5	0	8	± 0.04	210	×
1	2.5	0	5	± 0.04	121	×
2	2.5	0	5	± 0.04	227	×
1	13.5	0	15	± 0.04	478	×
2	13.5	0	15	± 0.04	1073	×
1	16.0	0	18	± 0.04	631	×
2	16.0	0	18	± 0.04	1178	×

实验结果表明,采用自主学习方法的充放气系统在某一充放气条件下如果进行了学习,在该条件下进行充放气操作效率较高,但是在充放气条件发生改变时如果不进行学习其充放气效率显著下降甚至无法完成充放气操作,这就要求采用该方法的充放气系统在不同的充放气条件下都要进行学习。基于模糊与遗传逼近策略的充放气系统在不同的充放气条件下均能较高精度地达到充放气要求,虽然在某一充放气条件下充放气效率低于在该条件下已学习过的自主学习的充放气系统,但是如果加上自主学习的时间,基于模糊与遗传逼近策略的充放气系统的效率就明显高得多,如表中第一种条件下自主学习充放气系统自主学习的时间 367 s 加上充气时间 49 s 是 416 s,要比基于模糊与遗传逼近策略的充放气系统充气时间 96 s 长得多,而且基于模糊与遗传逼近策略的充放气系统不需要自主学习这个过程从使用角度来看更加简便,有更强的通用性和实用性。

6 结语

本文分析了基于模糊与遗传逼近策略的轮胎预设值充放气控制的新方法,该方法不必考虑各种轮胎的具体特性和不定的充放气条件,先模糊处理预充放气,然后遗传逼近至预设值。实验结果证明这种方法具有较高的充放气效率,可以实现很高的压力控制精度,相比自主学习等方法使用简便、效率更高,对各种轮胎充放气设备具有很强的实用性。当然该方法还有提升的空间,可以进一步优化模糊函数,改进遗传策略,提高充放气效率。

参考文献:

- [1] 臧怀泉,田超,赵保军. 嵌入式汽车轮胎气压监测系统[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(10): 870-874.
- [2] XU L N, XUE J F, SUN J H. The tire burst of automotive early-warning system design [C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 802-804.
- [3] de VRIES R P. IC innovation in automotive [C]// Proceedings of the 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, Piscataway: IEEE Press, 2008: 5-6.
- [4] 黄珊珊. 汽车电子与智能化技术的应用发展趋势[J]. 农业装备与车辆工程, 2008, 46(5): 36-37.
- [5] 张艳红,张兆华,刘理天. TPMS 的研究和设计[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(21): 441-442.
- [6] 张靖. 基于嵌入式技术的无线监测自控调压系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [7] 孔刚柱. 车辆轮胎监测及自控调压系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [8] 刘豫川. 基于胎压监测和自控降压的越野车辆通过性研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [9] 蒋兴明. 基于 ARM 的汽车轮胎无线监测充放气控制系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [10] 刘健. 一种智能过充气机控制器的设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [11] 谈宏华,涂坦,杨志方. 新型轮胎中央充放气系统设计[J]. 机床与液压, 2006, 34(8): 175-177.
- [12] 彭永胜,赵玉璠,刘洪泉,等. 轮胎中央充放气系统的充放气规律研究[C]// 2009 中国汽车学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2009: 546-548.
- [13] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [14] 陈卫东,朱奇光. 基于模糊算法的机器人路径规划[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 971-974.
- [15] 徐兵,程旭德,王宏利,等. 基于 Matlab 的 Mamdani 与 Sugeno 型模糊推理研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 223-224.

(上接第 3290 页)

- [4] 吴顺君,梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 148-185.
- [5] KULEMIN G P, TARNAVSKY E V, GOROSHKO E A. Land back-scattering for millimeter wave radar [C]// Proceedings of the 2004 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science. Piscataway: IEEE Press, 2004: 138-141.
- [6] 沈福民,刘峥. 杂波图 CFAR 平面检测技术[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(7): 9-14.
- [7] NITZBERG R. Clutter map CFAR analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(4): 419-421.
- [8] 张敬卓,袁修久,赵学军. 复杂环境下雷达三维探测范围[J]. 计算机应用, 2011, 31(10): 2738-2741.
- [9] 梅珍,林伟,王瑞霞. 变换域 SAR 图像边缘检测[J]. 计算机应用, 2011, 31(9): 2402-2405.
- [10] MENG X W, QU F Y. Adaptive clutter map detector in non-homogeneous environment [C]// Proceeding of the 2010 IEEE International Conference on Signal Processing, Piscataway: IEEE Press, 2010: 2234-2238.
- [11] PATEL J K, KAPADIA C H, OWEN D B. Handbook of statistical distributions [M]. New York: Marcel Dekker, 1976: 92-132.
- [12] 杨万海. 雷达系统建模和仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 50-222.