

新体制民用雷达与实时信息处理研究

龙腾^{1,2} 丁泽刚^{1,2} 李银川^{1,2} 田卫明^{1,2} 刘海波^{1,2} 姚迪^{1,2} 曾涛^{1,2}

(1. 北京理工大学信息与电子学院雷达技术研究所, 北京, 100081; 2. 嵌入式实时信息处理技术北京市重点实验室, 北京, 100081)

摘要: 随着天线制造技术、超宽带技术、合成孔径技术和信息处理技术的发展, 雷达的体积不断减小, 探测精度和成像分辨率大大提升, 雷达开始在民用领域中活跃起来, 尤其是应用于穿透成像、微波遥感成像、滑坡监测和机场异物检测等领域的民用雷达发展十分迅速。为了让民用雷达在复杂的自然环境中具有更高、更稳定的性能, 雷达信息处理技术一直在不断创新。本文介绍了民用雷达的新趋势和新技术, 以及探墙雷达、微型 SAR、边坡雷达和异物检测 (Foreign object debris, FOD) 雷达实时信息处理的关键问题和解决方案。

关键词: 民用雷达; 探墙雷达; 微型 SAR; 边坡雷达; FOD 雷达

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

New System Civil Radar and Real-Time Information Processing

Long Teng^{1,2}, Ding Zegang^{1,2}, Li Yinchuan^{1,2}, Tian Weiming^{1,2}, Liu Haibo^{1,2}, Yao Di^{1,2}, Zeng Tao^{1,2}

(1. Radar Research Lab, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China; 2. Beijing Key Laboratory of Embedded Real-Time Information Processing Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract: With the development of antenna manufacturing technology, ultra-wideband technology, synthetic aperture technology and signal processing technology, the radar volume is decreasing, and radar detection accuracy and imaging resolution are greatly improved. Furthermore, radar began to be active in the civilian field. New civil radars which are used in penetrating imaging, microwave remote sensing imaging, landslide monitoring and airport foreign object debris detection are developing rapidly. In order to make civil radars with higher and more stable performance in a complex natural environment, radar signal processing technology has been innovating. Here, we introduce the new trends and new technologies of civil radars, as well as the key issues and solutions of signal processing for the wall-penetrating radar, the small SAR, the slope radar and the foreign object debris (FOD) radar.

Key words: civilian radar; wall-penetrating radar; small SAR; slope radar; FOD radar

引言

雷达 (Radio detection and ranging, Radar) 是通过发射电磁波和接收目标反射电磁波来发现目标并测定目标空间位置的设备^[1]。相比光学检测等, 雷达具有全天候、全天时的特点, 并有一定的穿透能力。

因此雷达被广泛应用于探测、制导、预警、导航和遥感等传统军事领域^[2]。近年来,随着天线制造技术、超宽带技术、合成孔径技术和信息处理技术的发展,雷达的体积不断减小,雷达的探测精度和成像分辨率大大提升^[3,4]。雷达开始向穿透成像、微波遥感^[5]、滑坡监测、机场异物检测^[6]、灾情评估、远程搜救、气象预报以及资源探测等民用领域快速发展。很多新体制民用雷达已经走进了人民群众的生活中,如用于建筑物内浅埋导线、钢筋和管道等高分辨检测的探墙雷达(Wall-penetrating radar, WPR)^[7];用于高分辨微波遥感的车载或机载微型合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)^[8,9];用于矿山边坡、尾矿库、排土场监测预警的边坡雷达(Slope radar)和用于检测机场跑道异物检测的异物检测(Foreign object debris, FOD)雷达等^[10-13]。

探墙雷达利用电磁波对墙体内部目标进行探测或者高分辨二维成像,相比传统探测设备其具有成像精度高、可单边成像、设备轻便和对人体无害等优点。无人机载微型合成孔径雷达通过距离向发射大带宽信号进行脉冲压缩,以及方位向进行合成孔径处理获取二维高分辨图像,相对于光电成像技术,合成孔径雷达具有全天时、全天候的技术特点。探墙雷达和微型 SAR 的共同点是都要小型化和具备高分辨成像的能力。此外,边坡雷达利用对边坡表面形变场进行长时间监测,分析边坡的微小形变。FOD 雷达利用毫米波传播稳定性好、穿透能力强和测距测角精度高的特性来探测机场跑道异物。边坡雷达和 FOD 雷达的共同点是要具备高精度和高可靠性检测的能力。可见新一代民用雷达对信息处理的分辨率或精度要求都非常高,传统的雷达信息处理方法已经不能满足新一代民用雷达高精度检测与成像的需求,因此需要研究信息处理新方法来进行进一步提升新体制民用雷达的性能。

针对民用雷达高精度检测与成像实时信息处理难度大的问题,本文将系统地介绍当前主流发展的探墙雷达、微型 SAR、边坡雷达和 FOD 雷达的新趋势和新技术,以及实时信息处理的关键问题和解决方案等,对新体制民用雷达实时信息处理的难点与方法开展详细论述。本文最后对介绍的代表性新体制民用雷达进行了梳理总结,并对雷达的前景进行了展望。

1 探墙雷达

1.1 探墙雷达简介

探墙雷达是利用电磁波对物体的穿透特性,通过向墙体内部发射并接受电磁波信号,来实现对墙体内部目标进行探测或者高分辨二维成像的雷达。因其具有成像精度高、可单边成像、设备轻便和对人体无害等优点,已逐渐成为建筑物内浅埋导线、钢筋和管道等高分辨检测、隐藏危险物探查、反恐救援与环境勘察等领域的重要探测手段。图 1 所示是探墙雷达的工作原理示意图。

表 1 所示是国内外探墙雷达产品参数。现在国内外市场上的探墙雷达产品多是从探地雷达产品衍生过来的,工作频率多在 L, S 频段,甚至更低,其主要使用目的是实现对电线、钢筋和水管等大型长条状物体的探测、准确定位或辅助成像,其对水泥探测的深度多为 40 cm 左右,分辨率多为 4 cm 左右,无法实现对小目标的高分辨成像。

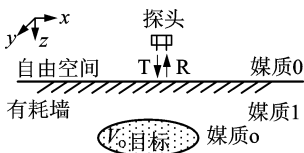


图 1 探墙雷达工作原理示意图
Fig. 1 Working principle schematic diagram of WPR

表 1 探墙雷达产品参数

Tab. 1 Parameters of WPR products

产品名称	频段/GHz	探测深度/m	分辨率/cm
StructureScan	1.0~2.6	0.4~0.6	—
NDR-4700	3.6~4.0	0.2	2
NJJ-105	2.0	0.3	4
ALADDIN	2.0	0.4	—
LTD-80	1.5	0.3	24

1.2 信息处理难点与方法

对浅埋小目标成像的难点有浅表层杂波抑制困难和近场高精度成像困难两方面^[14,15]。杂波抑制困难的原因是成像目标处于介质浅表层,介质表面反射杂波与目标回波混叠,难以分离;同时介质表面反射杂波强度远大于目标回波,导致目标回波被完全淹没。当小目标回波强度弱于杂波非均匀差异,传统杂波抑制方法会把目标回波与杂波一起抑制。

现在探墙雷达较常用的杂波抑制方法有均值对消法、凹陷滤波法、子空间滤波法以及自适应滤波法等。滤波方法的缺点是需要回波比较稳定来保证效果。而探墙雷达为了实现方位向高分辨需要采用阵列天线进行扫描,天线对之间的性能差异会导致回波分布极不均匀,因此滤波算法不太适用。而均值对消算法会对目标产生影响,使成像出现旁瓣。针对探墙雷达的高精度成像需求,需要改进传统杂波抑制算法。

针对这一问题,一种较好的杂波抑制思路是采用时频联合的杂波抑制算法。处理流程如图2所示,通过在时域均值对消处理后,在频域建立非均匀杂波和小目标的模型,对目标进行修复来消除成像旁瓣。通过时频联合滤波处理,实现高精度杂波抑制,有效分离小目标与非均匀杂波。

近场高精度成像困难的原因是浅表层目标在天线近场区成像,远场成像算法不再适用,同时当对复杂墙体成像时,电磁波穿透不同介质时产生折射会造成介质内目标成像散焦的问题。因此必须研究介质参数未知条件下的自聚焦成像。一种较好的解决思路是通过建立近场电磁场半空间递推模型,建立介质参数未知条件下频点与偏移相位的映射模型,通过最小熵搜索最优补偿相位对深度进行补偿,实现介质参数未知的自适应聚焦成像。图3是探墙雷达成像处理流程图。

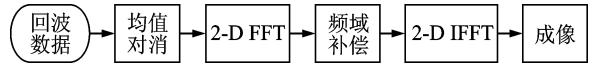


图2 时频联合处理杂波抑制算法流程图
Fig. 2 Flow chart of the joint time-frequency processing clutter removal method

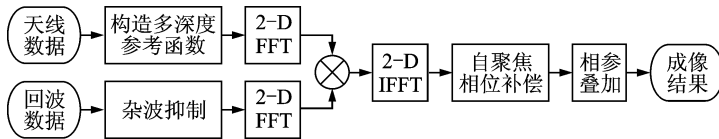


图3 探墙雷达成像处理流程图

Fig. 3 Imaging processing flow chart of WPR

1.3 实例展示

图4展示了一款解决了浅表层杂波抑制和高精度成像难题的探墙雷达系统。此探墙雷达运用时频联合的信息处理方法解决了浅表层杂波抑制困难的问题,运用自聚焦成像的方法解决了近场高分辨成像困难的问题,实现了对浅表层小目标的精确探测。图5(a,b)给出了穿透4 cm水泥板对3 cm×3 cm铁片的试验场景和成像结果。使用时频联合杂波抑制算法能很好地对杂波进行抑制,而且不产生

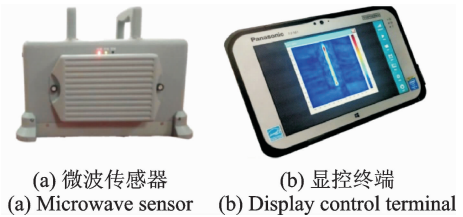


图4 探墙雷达
Fig. 4 Wall penetrating radar

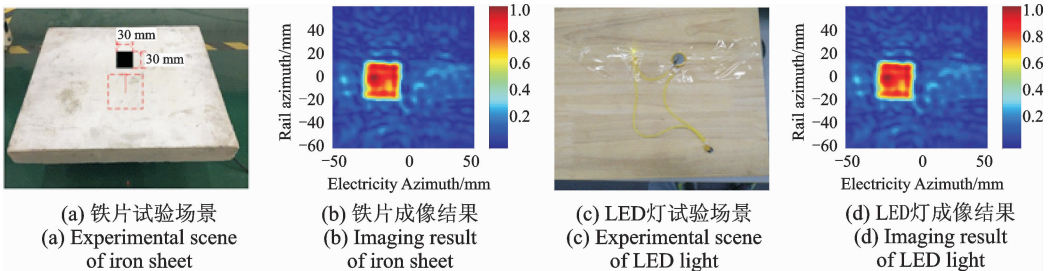


图5 铁片和LED灯成像结果

Fig. 5 The imaging result of iron sheet and LED light

明显旁瓣。图 5(c,d)给出了穿透 2 cm 木板对 LED 灯的试验场景和成像结果。该系统实现了对浅表层小目标的精确探测,可广泛应用于建筑质量评估、无损检测等领域。探墙雷达的性能指标如表 2 所示。

2 无人机载微型合成孔径雷达

2.1 简介

无人机载微型合成孔径雷达通过距离向发射大带宽信号进行脉冲压缩,以及方位向进行合成孔径处理获取二维高分辨图像,相对于光电成像技术,合成孔径雷达具有全天时、全天候的技术特点^[8]。图 6 所示是微型合成孔径雷达工作原理示意图。

近年来无人机技术发展迅速,小型无人机平台具有成本低、使用灵活的优势,适用于小型无人机平台的微型化合成孔径雷达成为热点研究方向。美国 ImSAR 公司研制了质量仅为两磅(0.9 kg)的 NanoSAR 系统,目前该雷达安装在“扫描鹰”无人机平台上,是目前世界上最小的 SAR 系统;美国 Sandia 国家实验室从 20 世纪 90 年代末期开始研制了系列化的无人机载 SAR,最新一代的 MiniSAR 系统分辨率可达 $0.15 \text{ m}^{[16]}$ 。国内外代表性产品的性能参数如表 3 所示。

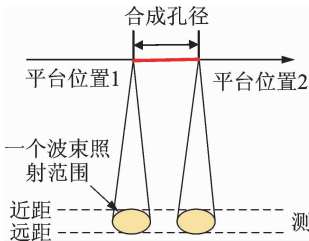


图 6 微型合成孔径雷达工作原理示意图

Fig. 6 Working principle schematic diagram of small SAR

表 3 微型 SAR 产品参数

Tab. 3 Parameters of the small SAR product

产品名称	质量/kg	分辨率/m	功耗/W
美国 Sandia MiniSAR	12.2	0.15×0.15	<60
美国 NanoSAR	0.9	0.50×0.50	<30
中国 SAR-SYM	2.0	$<0.50 \times 0.50$	<20
荷兰 MetaSensing MiniSAR	20.0	1.0×1.0	<250

2.2 信息处理难点与方法

小型无人机平台搭载能力有限,飞行稳定性差,运动误差显著,同时高分辨 SAR 成像对成像处理和运动补偿精度提出了更高的要求,因此微型高分辨 SAR 系统的主要关键技术包括宽带雷达微型化技术、高分辨微型无人机载 SAR 成像处理与运动补偿技术。在宽带雷达微型化技术方面,微型 SAR 系统综合采用了高效率微型化微带阵列天线技术、基于低温共烧陶瓷(Low temperature co-fired ceramic, LTCC)技术、微波电路集成技术和图形处理器

(Graphics processing unit, GPU)实时处理技术实现了宽带雷达天线、射频收发信道和机上实时成像处理器的微型化设计,大幅度降低了系统的体积和重量,实现了雷达载荷的微型化。

在高分辨微型无人机载 SAR 成像处理与运动补偿技术方面,针对小型无人机平台和 SAR 系统成像参数的技术特点,提出了子孔径距离多普勒高分辨 SAR 成像算法,采用浮点/定点混合的 SAR 成像算法降低了成像处理的运算量,提出了基于惯导测量数据和基于回波数据相结合的成像参数估计和运动补偿技术,有效解决了低空慢速平台条件下的高分辨 SAR 成像和运动补偿问题。图 8 是高分辨微型

表 2 探墙雷达性能指标
Tab. 2 Performance index of WPR

指标名称	性能参数
探测深度(水泥)/cm	>7
探测深度(木板)/cm	>8
探测深度(装修层)/cm	>15
探测精度/mm	<1
成像分辨率/mm	<2

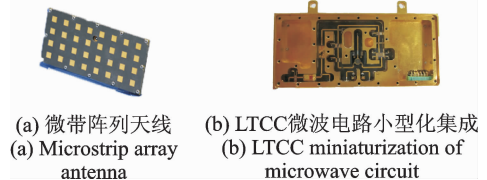


图 7 微带阵列天线和微波电路集成技术
Fig. 7 Microstrip array antenna and microwave circuit integration technology

SAR 成像处理流程图。

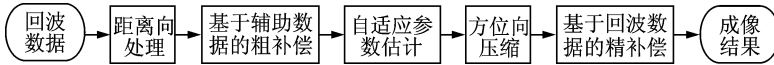


图 8 微型 SAR 成像处理流程图

Fig. 8 Imaging processing flow chart of the small SAR

2.3 实例展示

图 9 展示了一款解决了微型化和运动补偿难题的微型合成孔径雷达系统。该系统主要由机上雷达载荷和地面系统组成,其中机上雷达载荷为微型化、低功耗、高分辨和实时成像能力的合成孔径雷达,完成雷达信号的发射和接收、回波信号的实时成像和图像数据压缩;地面处理系统主要完成 SAR 图像信息的接收和显示,雷达载荷和地面处理系统通过数据链实现双向数据通信。该系统开展了多型无人机飞行成像实验,获取了满意的成像效果,挂飞成像结果如图 10 所示,性能指标参数如表 4 所示。

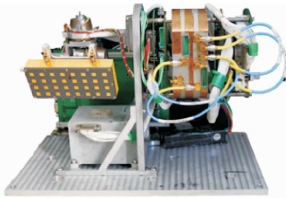


图 9 无人机载 SAR 系统
Fig. 9 Unmanned airborne SAR system

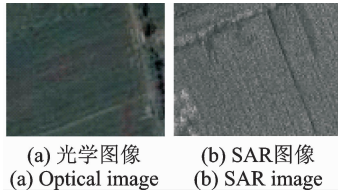


图 10 挂飞成像结果
Fig. 10 Hanging fly imaging results

表 4 微型 SAR 性能指标
Tab. 4 Performance index of the small SAR

指标名称	性能参数
质量/kg	<2
功耗/W	40
作用距离/km	>2
距离向分辨率/m	0.2
方位向分辨率/m	0.2

3 边坡雷达

3.1 边坡雷达简介

对边坡表面形变场进行监测的雷达称为边坡稳定性监测雷达,简称边坡雷达^[10]。其在露天矿边坡、尾矿坝、大型水坝、山体边坡、桥梁和高层建筑的安全监测和灾害预警等领域有着重要作用。边坡雷达结合大带宽信号和合成孔径技术可以实现边坡表面的高分辨二维成像。通过对不同时间获取的多幅雷达图像进行差分干涉处理,从而实现边坡表面径向形变场的高精度监测。该雷达的工作原理如图 11 所示。

边坡雷达根据方位向高分辨原理不同可以分为实孔径体制和合成孔径体制两种类型。表 5 给出了现有实孔径体制和合成孔径体制的边坡雷达主要产品参数^[17-23]。

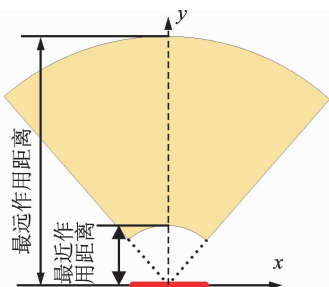


图 11 边坡雷达工作原理示意图

Fig. 11 Working principle schematic diagram of the slope radar

表 5 边坡雷达产品参数
Tab. 5 Parameters of the slope radar products

种类	产品名称	检测精度/ mm	每幅图像 获取时间	距离向分 辨率/m	方位向分辨 率/m@1km
实孔径	瑞士 GPRI	0.02~4.00	30 min	0.75	7.0
	澳大利亚 SSR	0.03~3.50	15 min	0.75	9.0
	南非 MSR	0.90	<30 min	0.50	4.4
	欧盟 LiSAR	0.02~4.00	30 min	0.50	3.0
合成孔径	意大利 IBIS-L/M	0.03~4.00	8 min	0.5/0.75	4.4
	西班牙 RiskSAR	1.60	1 min	1.25	4.0
	荷兰 FastGB SAR	0.10	4 s	0.50	4.5

3.2 信息处理难点与方法

边坡雷达实现边坡表面形变场高精度监测的信息处理难点主要包括大气相位扰动和时间去相干两方面。大气相位扰动是指电磁波在空间中的传播速度会因为大气的影 响而发生变化,因此接收回波的相位与大气相关。在边坡雷达多次观测间隔内大气发生变化会造成干涉结果中存在大气相位误差,严重影响形变反演精度。针对这一问题,一种信息处理解决方法是采用多参数模型法来对大气相位进行补偿,如通过建立一阶斜距模型或斜距-高程模型,选取成像结果中的稳定散射点建立干涉相位方程组,然后通过最小均方法来估算大气相位参数,进而对整个观测场景进行大气相位补偿,消除大气带来的干涉相位误差。时间去相干是指在采用边坡雷达进行长时间形变监测时,目标区域的散射特性会发生改变,尤其是对于自然地形下的植被覆盖区域,如植被的生长或消亡,会导致雷达图像相干性的降低,严重影响形变反演精度。针对这一问题,一种信息处理解决方法是利用动态永久散射体(Permanent scatterer, PS)技术来解决时间去相关的问题,首先基于幅度信息或相位信息选取在长时间范围内保持高相干性的散射点作为 PS 点,通过对 PS 点进行动态更新、差分干涉处理及形变分析,进一步反演得到整个监测场景内的形变信息。图 12 给出了边坡雷达形变反演信息处理流程图。

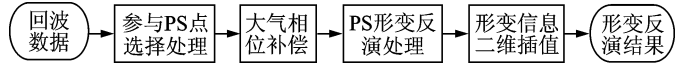


图 12 边坡雷达形变反演处理流程图

Fig. 12 Deformation inversion processing flow chart of the slope radar

3.3 实例展示

图 13 展示了一款解决了大气相位扰动和时间去相干难点的边坡雷达系统,该系统利用大带宽调频连续波信号和合成孔径技术实现二维高分辨成像,结合相位差分干涉技术实现边坡表面径向形变场的高精度监测,在露天矿边坡、尾矿坝、大型水坝、山体边坡、桥梁和高层建筑的安全监测和灾害预警中都取得了较好的效果。该边坡雷达系统的性能指标如表 6 所示。图 14(a)为首钢厂铁矿的一处边坡,图 14(b)为边坡雷达反演出的形变量。

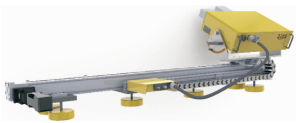


图 13 边坡雷达
Fig. 13 Slope radar

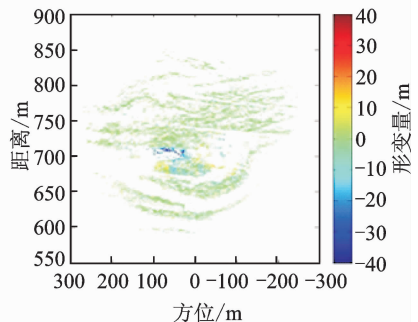
表 6 边坡雷达性能指标

Tab. 6 Performance index of the slope radar

指标名称	性能参数	指标名称	性能参数
监测精度/mm	0.1	距离向分辨率/m	0.3
每幅图像获取时间/min	3~10	方位向分辨率@1 km/m	4
监测距离/m	10~4 000		



(a) 露天矿边坡场景
(a) Slope scene of open pit mine



(b)形变监测结果
(b) Deformation monitoring results

图 14 露天矿边坡形变监测结果

Fig. 14 Deformation monitoring result of open pit mine

4 FOD 雷达

4.1 FOD 雷达简介

FOD 雷达利用毫米波传播时受自然光和热辐射源影响小,穿透雾、烟、灰尘的能力强,测距、测角精度高的特性来探测异物^[11-13]。FOD 雷达通常采用线性调频连续波(Linear frequency modulation continuous wave, LFM CW)体制,利用同源激励同时产生发射信号和接收本振信号零差拍的原理,通过在时间上改变发射信号的频率,并测量接收信号相对于发射信号的频率的方法来测定异物目标相对雷达的距离。图 15 所示是 FOD 雷达工作原理示意图。

采用 FOD 雷达进行机场道面异物检测,有助于减少和杜绝由于机场道面异物入侵导致的安全事故和财产损失。表 7 所示是现阶段世界上已投入商业运营的 4 种 FOD 探测系统。

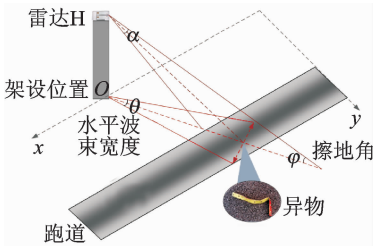


图 15 FOD 雷达工作原理示意图

Fig. 15 Working principle schematic diagram of the FOD radar

表 7 商业运营的 FOD 系统参数

Tab. 7 Parameters of the commercial operation FOD system

技术	产品名称	检测概率/%	检测距离/m	检测精度/m
毫米波雷达	英国 Tarsier	>90	3~2 000	1.0
	以色列 FODetect	—	45	1.6
	美国 FOD Finder	—	70~275	1.5
视频摄像	新加坡 iFerret	>92	<1 000	1.0

采用毫米波雷达技术的 FOD 探测系统不容易受到天气条件(例如阴雨)和光线条件(例如黑夜)的制约,采用单一视频摄像技术的 FOD 探测系统比较容易受到环境影响。虽然中国的 FOD 雷达的研制工作起步较晚,但进展迅速,尤其是在远距离高分辨检测以及低虚警、高检测概率检测等技术难题上取得突破,目前已经出现可以商用化的产品。

4.2 信息处理难点与方法

FOD 雷达对机场道面异物进行检测主要有两个关键问题:(1)小目标的远距离高分辨检测;(2)低虚警和高检测概率检测。为了实现小目标高分辨检测,FOD 雷达选用毫米波段的调频连续波体制。高工作频率更容易实现大带宽、高分辨率检测,且该频段天线具有窄波束低旁瓣的性能,可以实现更高的测角精度。为实现小目标远距离探测,在系统设计上增加天线增益和射频前端发射功率、降低接收机噪声系数,并利用相参积累等信息处理手段提高信噪比,从而增大检测作用距离。

为了达到低虚警和高检测概率检测,首先考虑克服地杂波干扰。雷达工作过程中,受高功率地杂波干扰,目标检测在不同的距离-方位单元杂波变化很剧烈,传统的恒虚警检测算法不适用于该杂波背景,为此采用杂波图对消技术,实现对目标的距离-方位二维低虚警高检测概率检测。另外,雷达在工作过程中机场跑道上飞机、车辆等仍然正常运行,为了使雷达不因飞机和车辆等强目标影响,在射频接收链路增加限幅器防止功率饱和,增大 ADC 采样动态范围,并运用目标检测信息处理方法在距离、方位和速度多个维度识别大型移动目标,从而可将异物类型区分为跑道异物或其他类型异物(人、车和飞机等)。

FOD 雷达信息处理流程如图 16 所示,图中回波预处理包括数字下变频、FIR 滤波、抽取、加窗、回波积累和快速傅里叶变换等,之后通过杂波图检测算法、目标融合算法和大目标识别算法等对目标进行多重检测与识别。

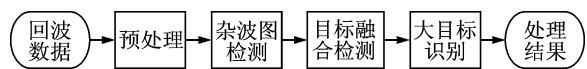


图 16 FOD 雷达信息处理流程图

Fig. 16 The information processing flow chart of the FOD radar

4.3 实例展示

图 17 展示了一款实现了小目标的远距离、高分辨、低虚警和高概率检测的 FOD 雷达系统,该系统通过架设在机场跑道一侧的塔架上,对跑道进行持续不断的往返扫描来探测异物,实现了对异物全天时、全天候的检测与告警。FOD 雷达系统对多种异物的探测结果如图 18 所示。该系统对直径 43 mm 的高尔夫球探测性能如表 8 所示。

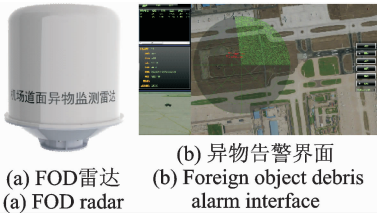


图 17 FOD 雷达
Fig. 17 FOD radar

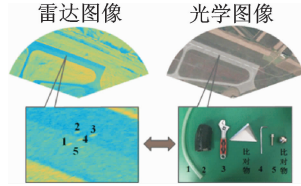


图 18 异物探测结果
Fig. 18 Foreign object debris
detection result

表 8 FOD 雷达性能指标
Tab. 8 Performance index of
the FOD radar

指标名称	性能参数
检测距离/km	>1
检测概率/%	>99
虚警时间/h	8
距离向分辨率/m	<3
方位向分辨率/(°)	<0.5

5 结束语

民用雷达的发展十分迅速,在未来会有更多的雷达走进人民的生活中。为了满足更多的民用需求,雷达的性能需要进一步提升,雷达信息处理的新方法与新技术是当今需要加紧研究的重要课题。本文对代表性民用雷达进行了综述介绍,介绍了新体制探墙雷达、微型 SAR、边坡雷达和 FOD 雷达的新趋势和新技术、信息处理的关键问题和解决方案,并举例展示了具有代表性的系统和试验结果。民用雷达在未来仍会加速发展,其应用前景必将更加光明。

参考文献:

- [1] Skolnik M I. Radar handbook [M]. 2nd Ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [2] 张亚婷. 新体制雷达的发展及应用[J]. 火控雷达技术, 2011, 3: 1-7.
Zhang Yating. Development and application of new system radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2011, 3: 1-7.
- [3] Zheng L, Wu Z, Seok M, et al. High accuracy compressed sensing decoder based on adaptive (l0, l1) complex approximate message passing: Cross-layer design[J]. IEEE Trans Circuits Syst I Regul, Pap, 2016, 63(10): 1726-1736.
- [4] Zheng L, Liu Q, Wang X, et al. LP-based complex approximate message passing with application to sparse stepped frequency radar[J]. Signal Processing, 2017, 134: 249-260.
- [5] 朱岱寅, 杨鸣冬, 宋伟, 等. 高分辨率极化合成孔径雷达成像研究进展[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(4): 640-664
Zhu Daiyin, Yang Mingdong, Song Wei, et al. Advances in high resolution polarimetric synthetic aperture radar imaging[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(4): 640-664.
- [6] 陈建军, 孙俊, 李申, 等. 机场场面监视雷达目标检测新方法[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3): 555-561.
Chen Jianjun, Sun Jun, Li Shen, et al. Novel method for radar target detection of airport surface movement[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(3): 555-561.
- [7] Ding Zegang. An autofocusing imaging algorithm for wall penetrating SAR[C]// 2015 IET International Radar Conference. Hangzhou, China: [s. n.], 2015: 1-5.
- [8] Gao Wenbin, Ding Zegang, Zhu Donglin, et al. Improved spectrum reconstruction technique based on Chirp rate modulation in stepped-frequency SAR[J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(10): 1-11.
- [9] Fan B K, Ding Z G, Gao W B, et al. An improved motion compensation method for high resolution UAV SAR imaging[J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(12): 1-13.
- [10] 林德才, 马海涛, 宋宝宏. 边坡雷达在滑坡应急救援行动中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(S1): 284-289.
Lin Decai, Ma Haitao, Song Baohong. Application of slope radar in emergency rescue of landslide[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(S1): 284-289.
- [11] 王洪, 汪学刚. 机场跑道异物监测雷达关键技术[J]. 电讯技术, 2011, 51(2): 7-10.

Wang Hong, Wang Xuegang. Key technologies of radar for foreign objects debris(FOD) detection on runways[J]. Telecommunication Engineering, 2011,51(2): 7-10.

- [12] 吴静,汪学刚,王洪,等. 机场跑道异物监测雷达回波建模[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2013,11(6): 917-921.
Wu Jing, Wang Xuegang, Wang Hong, et al. Radar echo modeling of foreign objects debris detection on airport runways[J]. Information and Electronic Engineering, 2013,11(6): 917-921.
- [13] Kohmura A, Futatsumori S, Yonemoto N, et al. Optical fiber connected millimeter-wave radar for FOD detection on runway [C]//2013 European Radar Conference. Nuremberg:[s. n.], 2013:41-44.
- [14] Yoon Y S, Amin M G. Spatial filtering for wall-clutter mitigation in through-the-wall radar imaging[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2009,47:3192-3208.
- [15] Li L, Zhang W, Li F. A novel autofocusing approach for real-time through-wall imaging under unknown wall characteristics [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010,48(1):423-431.
- [16] Dale F D, April D S, George R S. Results of the sub-thirty-pound, high resolution 'miniSAR' demonstration[J]. Proc of SPIE, 2006,62: 1-12.
- [17] Strozzi T, Werner C, Wiesmann A, et al. Topography mapping with a portable real-aperture radar interferometer[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(2): 277-281.
- [18] Noon D, Harries N. Slope stability radar for managing rock fall risks in open cut mines[C]// Large Open Pit Mining Conference. Perth:[s. n.],2009:1-8.
- [19] Tarchi D, Casagli N, Moretti S, et al. Monitoring landslide displacements by using ground-based synthetic aperture radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps[J]. Journal of Geophysical Research, 2003,108(B8): 10-14.
- [20] Rödelsperger S, Läufer S, Gerstenecker G, et al. Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L[J]. Journal of Applied Geodesy, 2010,4:41-54.
- [21] Pipia L, Fabregas X, Aguiasca A, et al. Atmospheric artifact compensation in ground-based DInSAR applications[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008,5(1): 88-92.
- [22] Meta A, Trampuz C. Metasensing compact, high resolution interferometric SAR sensor for commercial and scientific applications[C]//The 7th European Radar Conference. Paris:[s. n.], 2010: 21-24.
- [23] Brown S C M, Quegan S, Morrison K, et al. High-resolution measurements of scattering in wheat canopies-implications for crop parameter retrieval[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2003,41(7):1602-1610.

作者简介:



龙腾 (1968-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 实时信号处理、目标探测与识别等, E-mail: longteng@bit.edu.cn.



丁泽刚 (1980-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 新体制雷达系统设计和成像处理算法等, E-mail: Z.ding@bit.edu.cn.



李银川 (1994-), 男, 博士研究生, 研究方向: SAR 成像算法、穿墙与探墙雷达成像等, E-mail: liyinchuan@bit.edu.cn.



田卫明 (1983-), 男, 讲师, 硕士生导师, 研究方向: 双基地和高分辨 SAR 系统与信号处理, E-mail: tianwei6779@163.com.



刘海波 (1980-), 男, 讲师, 硕士生导师, 研究方向: 雷达系统, SAR 系统与信号处理, E-mail: haibolhb@bit.edu.cn.



姚迪 (1978-), 男, 讲师, 硕士生导师, 研究方向: 雷达系统、SAR 信号处理, E-mail: ddyao@bit.edu.cn.



曾涛 (1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 雷达系统、雷达信号处理和新体制雷达, E-mail: zengtao@bit.edu.cn.