

文章编号:1674-8190(2021)04-155-08

基于圆弧合成孔径体制的跑道异物监测 雷达成像研究

章林¹, 龙超², 童建文²

(1. 空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 南京 210007)

(2. 中国电子科技集团公司 第28研究所, 南京 210007)

摘要: 跑道异物(FOD)是对影响机场航班起降的外来物质的总称,目前全球绝大多数机场的FOD监测仍然是靠人工完成。为了满足FOD监视手段的迫切需要,本文采用圆弧合成孔径雷达实现机场跑道异物探测;通过比较实孔径扫描和圆弧合成孔径雷达的优缺点,开展信号模型仿真,并与实测数据进行对比验证。结果表明:针对同样目标,圆弧合成孔径雷达的探测距离提高2~3倍,并能有效抑制雨雪等“闪烁”杂波。

关键词: 圆弧合成孔径;跑道异物;雷达成像

中图分类号: V351.3; TP391.41; TN957.52

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.04.18

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



FOD Monitoring Radar Imaging Research Using Arc Synthetic Aperture System

ZHANG Lin¹, LONG Chao², TONG Jianwen²

(1. State Key Lab of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing 210007, China)

(2. The 28th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: Foreign object debris (FOD) generally refers to a certain type of foreign substances, which can influence the taking off and landing of airport flights. Currently, FOD monitoring in the vast majority of airports across the world is operated manually. In order to meet the urgent need for FOD monitoring measures, the imaging technology based on arc synthetic aperture (ArcSAR) is used to detect the airport FOD. The signal model simulation of ArcSAR is conducted by comparing the relative merits between real aperture scanning and ArcSAR, and the simulation data is compared with measured data for verification. The results show that, for the same object, the detection range of ArcSAR can be increased by 2~3 times, and ArcSAR can effectively inhibit “flickering” clutters such as rain and snow.

Key words: ArcSAR; FOD; radar imaging

收稿日期: 2020-09-27; 修回日期: 2021-05-03

通信作者: 章林, 13952007584@139.com

引用格式: 章林, 龙超, 童建文. 基于圆弧合成孔径体制的跑道异物监测雷达成像研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 155-162.

ZHANG Lin, LONG Chao, TONG Jianwen. FOD monitoring radar imaging research using arc synthetic aperture system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 155-162. (in Chinese)

0 引言

跑道异物 (Foreign Object Debris, 简称 FOD) 是对影响机场航班起降的外来物质的总称, 跑道异物监测目前靠人工实现, 无法 24 小时进行监测, 可靠性不高, 影响机场航班秩序, 造成大量的经济损失和时间损失^[1-2]。因此 FOD 监测设备的发展趋势是一种能够自动探测、定位和上报 FOD 信息的机场常设设施^[3-5]。

由于毫米波雷达对雨、雪、雾等气候条件和强光、夜晚等光照条件适应性好, 且具备足够的探测和定位精度, 因此是 FOD 监测系统不可或缺的技术手段^[6-7]。美国、英国、以色列、新加坡等国家近年来开展了跑道 FOD 监测系统的研发, 英国的 Tarsier 技术成熟, 检测率低, 扫描速度慢, 有盲区^[8]; 以色列的 FODetect 系统检测性能较好, 设备部署、维护成本高^[9]; 新加坡 iFerret 设备安装、维护成本较低, 易受天气影响^[10]; 美国 FOD Finder 系统部署使用方便, 但不能连续工作^[11]; 此外, 加拿大的 Pavometrics 公司最近研制出了一套 LFOD (Laser Foreign Object Debris) 移动式探测系统, 德国的费劳恩霍夫技术研究院研制的基于 220 GHz FMCW 毫米波逆合于成孔径雷达技术的 CORBA-220 系统, 日本东京电子导航技术研究所 ENRI 以及法国尼斯大学的天线实验室 LETA 研制的采用类光学透镜天线的 FMCW 毫米波雷达等, 但距离产品成熟度还有一定距离。国内, 近 5 年来在 FOD 探测雷达技术方面取得了较大的进展^[12]。中国电子科技集团公司第 50 研究所研制了类似 Traiser 系统的塔台式 FOD 监测系统, 由毫米波雷达和光电设备组成^[13]; 成都赛英公司研制了基于 FMCW 体制的 W 波段毫米波 FOD 探测雷达^[14], 最大作用距离达到 350 m; 中国航空工业集团公司第 607 研究所研制了类似 FODfinder 的车载式 FOD 监测系统^[15]; 中国电子科技集团公司第 29 研究所联合中国民航局第 2 研究所研制了边灯式的 FOD 监测设备^[16]。

国内, 程一帆^[17]采用图像的方法分离背景与前景实现 FOD 异物检测; 成威^[18]对雷达采集图像进行 FOD 异物检测; 李海翔^[19]提出了基于图像处理方法的 FOD 检测系统的软硬件构架。国内一些研究所和公司近几年也研发了几款 FOD 设备, 一些高校开展了 FOD 技术研究, 但目前均处于研究阶段, 尚未正式在民用或军用机场正式投入使用。

本文采用一种全新的雷达体制——圆弧合成孔径雷达 (ArcSAR), 通过体制上的创新来解决实孔径扫描体制存在的原理性问题, 通过比较实孔径扫描和圆弧合成孔径雷达的优缺点开展信号模型仿真, 并与实测数据进行对比验证。

1 ArcSAR 雷达体制及成像原理

ArcSAR 利用长转臂旋转, 使得转臂顶端的低增益天线运动形成圆弧轨迹, 然后通过沿圆弧轨迹利用合成孔径原理, 在数字域综合出高分辨率成像波束。ArcSAR 由基座、转臂和天线支架等组成, 如图 1 所示。

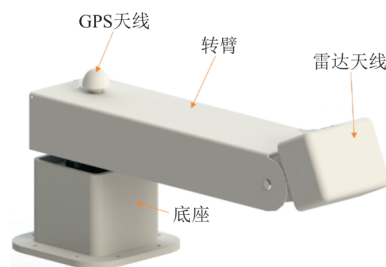


图 1 ArcSAR 体制 FOD 监测雷达组成
Fig. 1 ArcSAR FOD monitoring radar composition

ArcSAR 成像几何模型如图 2 所示, 假设远处存在目标点 P , 雷达天线的相位中心为 S , 雷达至目标 P 的俯视角为 β , 天线转台相对目标高度 H , 天线转动的角速度为 ω , 转臂长度为 L , 转臂旋转轴中心到目标的距离为 r_0 , 起始时刻为 τ_0 , $R(\tau_m)$ 为雷达与目标 P 的瞬时斜距, τ_m 为慢时间, t 为快时间。其中目标斜距 $R(\tau_m)$ 可表示为

$$R(\tau_m) = \sqrt{r_0^2 + L^2 - 2r_0L \cos \beta \cos \omega(\tau_m - \tau_0)} \quad (1)$$

在实际场景中因为 $L \ll r_0$, 通过泰勒展开得到目标斜距的近似表达式为

$$R(\tau_m) \approx r_0 - L \cos \omega(\tau_m - \tau_0) \cos \beta \quad (2)$$

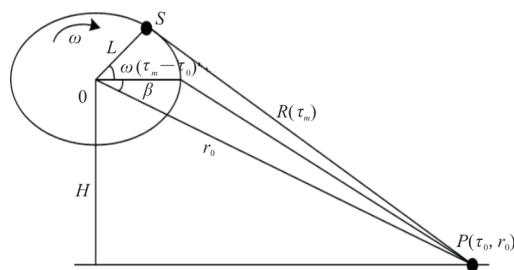


图 2 成像几何原理图
Fig. 2 Imaging geometry schematic diagram

2 ArcSAR 信号模型

ArcSAR以线性调频连续波(FMCW)信号体制为例,雷达发射调频连续波信号 $s_T(t)$ 为

$$s_T(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2} K_r t^2\right)\right] \quad (3)$$

则目标 P 的雷达回波信号为

$$s_R(\tau_m, t, \tau_0, r_0) = \text{rect}\left[\frac{t - \frac{2R(\tau_m)}{c}}{T_p}\right] \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2R(\tau_m)}{c}\right) + \frac{K_r}{2}\left(t - \frac{2R(\tau_m)}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (4)$$

由于 $\sin\beta = H/r_0$,因此:

$$s_{rd}(\tau_m, t, \tau_0, r_0) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left[-\frac{j4\pi}{c} K_r t R(\tau_m)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c} f_c R(\tau_m)\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi K_r}{c^2} R^2(\tau_m)\right] \quad (5)$$

式中: K_r 为调频斜率; T_p 为脉冲调制周期; f_c 为载波频率; $R(\tau_m)$ 为目标真实距离; c 为光速。

在一个周期内, $R(\tau_m)$ 为常数,式(5)第一项中 $\exp\left[-\frac{j4\pi}{c} K_r t R(\tau_m)\right]$ 表示距离所对应的相位,第二项中 $\exp\left[-j\frac{4\pi}{c} f_c R(\tau_m)\right]$ 和第三项中 $\exp\left[j\frac{4\pi K_r}{c^2} R^2(\tau_m)\right]$ 为常数,其中第二项是进行方位向脉压所必须处理的回波多普勒,第三项是剩余图像相位,两者需在成像过程中进行补偿。

获取距离像后,可以通过后向投影(Back-projection,简称BP)、距离—多普勒(Range-Doppler)^[20]、 ω - k 等成像算法生成二维雷达图像,其中BP算法没有成像几何的近似,更适合SAR高分辨率精细成像应用,因此本文以BP成像算法为例进行分析。对式(5)进行快时间 t 的傅里叶变换得到目标回波频谱:

$$S_f(\tau_m, f, \tau_0, r_0) = \text{FFT}\left[s_{rd}(\tau_m, t, \tau_0, r_0)\right] = \frac{K_r}{2} \text{sinc}\left[\pi T\left(f - \frac{2R(\tau_m)K_r}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f_c R(\tau_m)}{c}\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi K_r R^2(\tau_m)}{c^2}\right] \quad (6)$$

根据频率与目标距离的对应关系 $f = 2rK_r/c$,得到目标回波一维距离像:

$$S_{\text{mg}}(\tau_m, r, \tau_0, r_0) = \frac{K_r}{2} \text{sinc}\left[\frac{2\pi TK_r}{c} [r - R(\tau_m)]\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f_c R(\tau_m)}{c}\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi K_r R^2(\tau_m)}{c^2}\right] \quad (7)$$

根据走—停—走假设,对成像区域划定极坐标系下成像网格,像素点 (θ, r) 的雷达复散射图像 $I(\theta, r)$ 为积累角范围内各方位一维距离像对应距离值进行相位补偿后并相干积累的结果:

$$I(\theta, r) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} S_{\text{mg}}(\tau_m, r, \tau_0, r_0) \exp\left[j\frac{4\pi f_c r}{c}\right] \exp\left[-j\frac{4\pi K_r r^2}{c^2}\right] d\tau_m \quad (8)$$

式中: $\theta = \omega(\tau_m - \tau_0)$ 为图像像素 (θ, r) 对应的方位角; τ_1 和 τ_2 分别为积累角确定的像素点 (θ, r) 的雷达照射起止时刻。

采用式(8)可以获得二维极坐标形式的雷达图像,因此通过对雷达图像序列进行目标检测,获得FOD检测结果。

3 ArcSAR 信号仿真分析

按照我国民航的最高测试要求,采用直径1 cm和高1 cm的金属圆柱体,探测距离为75 m,则其雷达横截面(RCS)为-40 dBsm或1 cm²(实际圆柱体RCS大于此值),其参数如表1所示。

表1 仿真目标参数
Table 1 Simulation target parameters

参数	数值
散射强度/dBsm	-40
目标距离/m	75

雷达仿真参数如表2所示,信号体制为FM-CW,通过信号模型构建雷达信号回波进行仿真验证。

表2 圆弧合成孔径FOD监测雷达参数
Table 2 Parameters of ArcSAR FOD monitoring radar

参数	数值	参数	数值
频率范围/GHz	92~94	天线俯仰向波束角/(°)	4
信号带宽/MHz	200	收发天线隔离度/dB	60
方位覆盖角/(°)	180	发射信号相噪 (100 kHz)/(dBc·Hz ⁻¹)	-80
最大量程/m	100	发射信号相噪 (1 MHz)/(dBc·Hz ⁻¹)	-100
重复频率/kHz	1	接收机噪声系数/dB	8
扫描脉冲宽度/μs	819	附加损耗/dB	6
发射功率/dBm	20	采样频率/MHz	10
天线方位向波束角/(°)	60	采样位数	16

根据雷达方程进行计算,整机系统设计指标如表 3 所示。

表 3 整机系统设计指标
Table 3 Design index of whole machine system

参数	数值	参数	数值
调频斜率/(kHz·μs ⁻¹)	625	接收机热噪声/dBm	-70
最高中频/kHz	450	泄漏信号功率/dBm	-30
目标对应中频/kHz	320	泄漏信号相噪 (100 kHz)/dBm	-118
距离分辨率(加窗)/m	0.15	泄漏信号相噪 (1 MHz)/dBm	-130
脉冲压缩增益/dB	62	目标处泄漏信号 相噪/dBm	-121
SAR 积累增益/dB	30	目标信噪比/dB	21
原始接收回波 功率/dBm	-142	单次扫描数据量/kB	16
处理后接收机回波 功率/dBm	-49	总数据率/(MB·s ⁻¹)	16

圆弧合成孔径 FOD 设计指标与实孔径的比较如表 4 所示。

表 4 圆弧合成孔径 FOD 与实孔径设备指标比较
Table 4 Comparison of parameters between ArcSAR FOD and real aperture equipment

参数	数值	
	圆弧合成孔径	实孔径
频率范围/GHz	92~94	76~77
角分辨率/(°)	2	4
俯仰向波束角/(°)	4	4
接收机噪声/dB	4	12
接收机增益/dB	大于 50	32
发射功率/dBm	20	14
目标信噪比/dB	22	3

综上,采用圆弧合成孔径技术,比实孔径的接收性能及国内相似方案有显著的性能提升,对同样目标的探测距离将提高 2~3 倍。

ArcSAR 成像结果如图 3 所示。为了说明 ArcSAR 体制对“闪烁”杂波的抑制作用,对大雨情况下的实孔径与 ArcSAR 成像结果进行仿真分析。

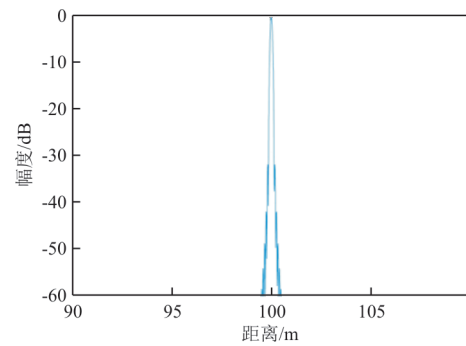
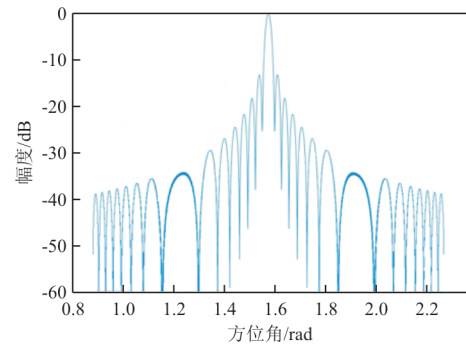
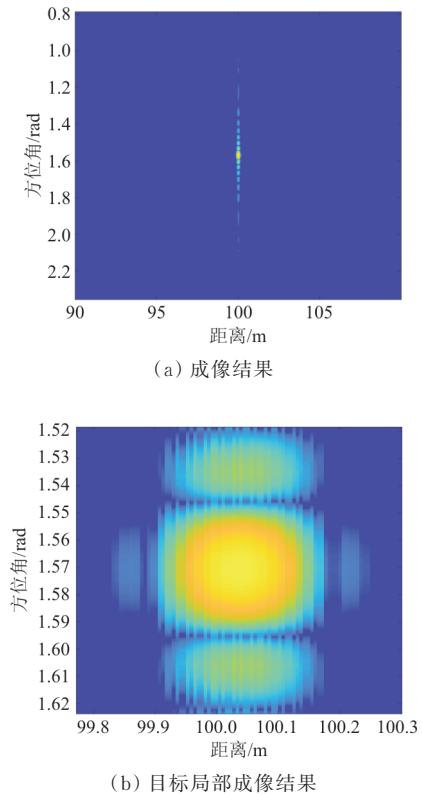
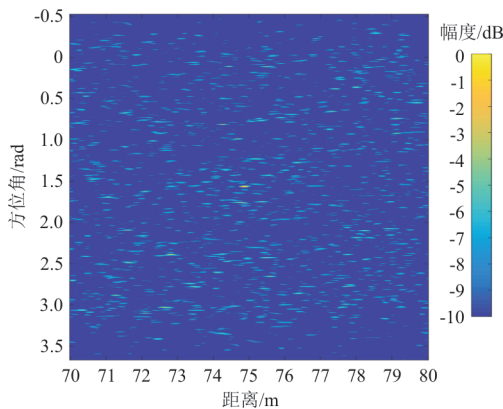
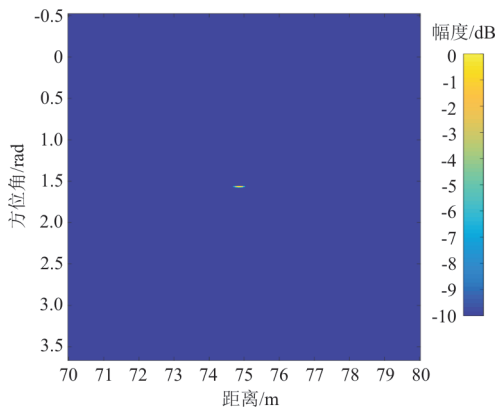


图 3 圆弧合成孔径(ArcSAR)FOD 监测雷达仿真成像结果
Fig. 3 Simulation imaging results of ArcSAR FOD

假定雨滴在跑道上形成的水花雷达散射截面积为均值 -30 dBm^2 和标准差 -305 dBm^2 的正态分布,水花出现频率为 20 个/秒/平方米,持续使时间为 200 ms,目标雷达横截面积为 -20 dBm^2 ,仍然采用上述仿真参数,仿真结果如图 4 所示(图像归一化,且最小幅度限制到 -10 dB),可以看出:实孔径体制无法抑制水花这类“闪烁”杂波,图像中形成密集的杂散,严重影响了多目标的检测和判决;ArcSAR 体制通过时间上的平均,可以有效抑制此类“闪烁”噪声,背景更为干净。



(a) 实孔径成像结果



(b) ArcSAR 成像结果

图 4 实孔径与 ArcSAR 成像体制对“闪烁”杂波抑制能力的仿真比较

Fig. 4 Simulation comparison of “flicker” clutter suppression ability between real aperture and ArcSAR

4 ArcSAR 实测数据验证

为了对技术原理进行验证,同时对部分关键

技术进行预先突破,构建的原理验证平台如图 5 所示,考虑到降低实现难度,原理验证平台采用 92 GHz 频段,并将转臂长度增加到 1 m。



图 5 ArcSAR FOD 监测雷达原理验证平台外场试验照片
Fig. 5 Photos of field test of principle verification platform

在长沙浏阳河鸭子铺段进行大范围成像试验,最远探测距离超过 1 km,结果如图 6 所示。

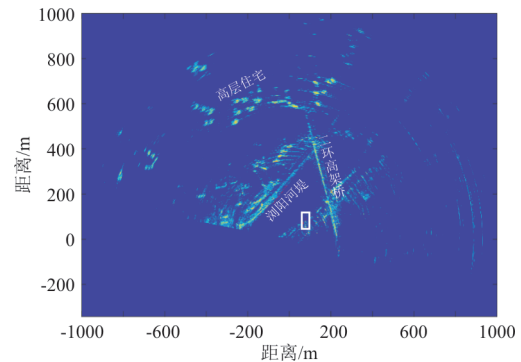
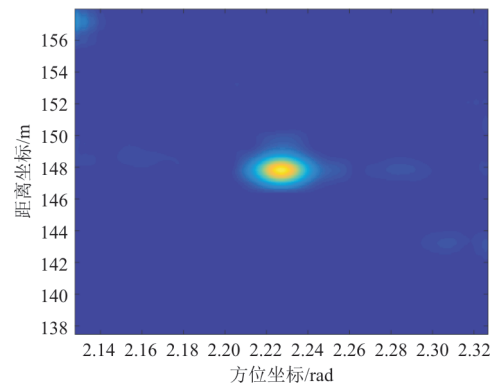


图 6 扫描扇区的二维高分辨直角坐标雷达图像
(白色方框为标定三面角)

Fig. 6 Two dimensional high resolution Cartesian coordinate radar image with scanning sector

标定的三面角成像结果如图 7 所示。



(a) 目标 2 维图像

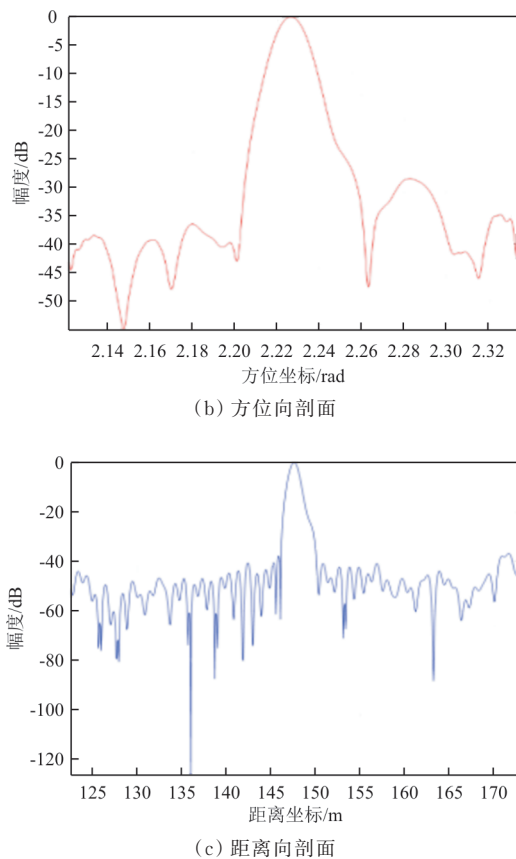


图7 标定三面角成像结果及距离/方面剖面
Fig. 7 Imaging results and range/aspect profile

由于雷达发射信号带宽为 200 MHz, 因此其理论的加窗距离分辨率为 0.97 m; 由于转臂长 1 m 且天线波束角为 50° , 因此其理论的方位向角分辨率为 0.11° 。根据标定三面角的图像分析可知, 实际的距离向分辨率为 0.98 m, 方位向角分辨率为 0.15° , 与理论值基本吻合, 证明了 ArcSAR 系统及成像算法的有效性。

为了进一步论证本文方法有效性, 在开慧通用机场采用 ArcSAR 系统对 FOD 进行成像试验。试验包括两个部分: 在保证雷达位置不动的情况下, 首先不在场景中放入任何 FOD 目标进行成像, 如图 8(a) 所示; 然后将多个 FOD 目标 (如 4 cm 螺柱、2 cm 钢珠等) 沿雷达径向放入场景进行成像, 如图 8(b) 所示, 目标清晰可见, 因此 ArcSAR 系统能够实现对 FOD 目标有效探测。在大兴机场的试验中, 采用半窗杂波跟踪算法, 提高复杂背景形式下目标判断和跟踪, 实现了对直径厘米级 (最小粒径 1 cm) 异物的稳健检测 (以色列 2.5 cm); 探测时

间 60 s (以色列 120 s), 具备更加及时的异物发现报告能力。

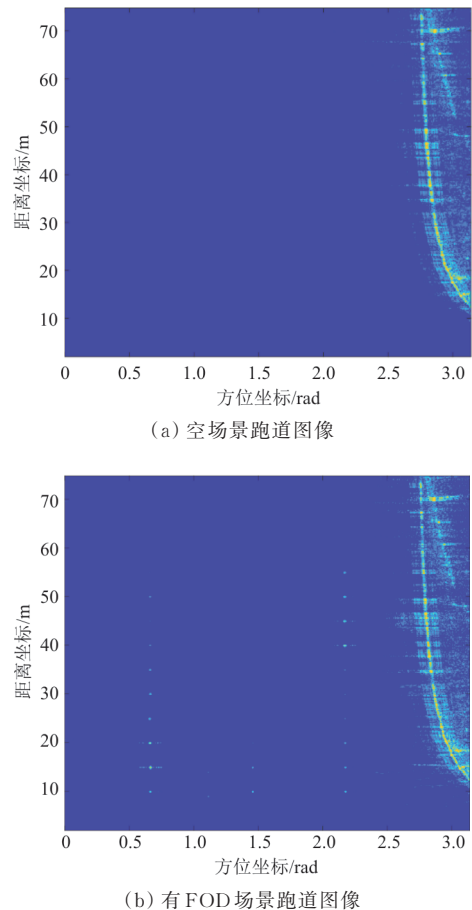


图8 开慧通用机场 ArcSAR 系统成像
Fig. 8 ArcSAR imaging system of Kaihui general airport

ArcSAR 体制实际上是通过多帧低增益天线回波形成的时间序列图像的相参积累而获得目标图像, 在时间上有平均和积累的效果, 因此具备以下独特优点:

(1) 实孔径对目标的照射时间为毫秒级, 对于雨滴/雪粒、跑道上移动的树叶/草团、偶尔停留的鸟、雨滴在跑道上溅起的水花等“闪烁”杂波, 在扫描期间无法与静止图像区别开, 因此对此类“闪烁”杂波抑制能力弱, 时间上突发的杂波会在整个扫描周期内停留于图像中。如果需要进行杂波抑制, 必须通过多帧扫描图像进行平均抑制, 但又增加了处理时间, 无法满足 FOD 监测对实时性的要求。本文对环境适应性将显著优于常规实孔径扫描体制。

(2) 图像方位分辨率由天线波束宽度决定,为了提高分辨率,因此天线增益很高,造成很强的等效全向辐射功率(EIRP),如此强辐射能量可能会造成未来潜在的电磁兼容问题,带来机载设备安全风险,或人身健康风险。本文所用天线增益为12 dBi,低增益天线有助于降低EIRP,从而易于满足未来电磁兼容性和人体安全要求。

(3) 毫米波频段上实现极窄的波束宽度,对反射式天线的加工精度要求极高,而且实孔径成像对转台位置精度的要求也很高,采用波导组件,造成加工成本也大幅提高,其制造成本较高。本文低增益天线价格低,降低了制造和维护成本。

5 结 论

(1) 本文开展了圆弧合成孔径雷达信号模型研究,圆弧合成孔径成像雷达不仅具有常规机载或星载的线性轨迹合成孔径雷达成像能力,又由于转臂的旋转使得其具备全方位观测能力。

(2) 圆弧合成孔径雷达对同样目标的探测距离提高2~3倍,并能有效抑制雨雪等“闪烁”杂波。

(3) 此外,圆弧合成孔径雷达采用低增益天线设计,制造和维护成本低,满足电磁兼容性和人体安全要求,市场前景广阔。

参考文献

- [1] 国家民航总局机场司民航安全技术中心. 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: 1-5.
Civil Aviation Safety Technology Center of Airport Department of CAAC. FOD prevention manual[R]. Beijing: Civil Aviation Safety Technology Center of Airport Department of CAAC, 2009: 1-5. (in Chinese)
- [2] PATTERSON J J. Foreign object debris (FOD) detection research[J]. International Airport Review, 2008, 11(2): 22-27.
- [3] FAA. Airport foreign object debris detection equipment: AC150/5220-24[R]. US: FAA, 2009: 1-13.
- [4] 蔡成涛, 吴科君, 严勇杰. 基于优化Yolo方法机场跑道目标检测[J]. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(3): 37-41.
CAI Chengtao, WU Kejun, YAN Yongjie. Airport runway target detection based on optimized Yolo method[J]. Command Information System and Technology, 2018, 9(3): 37-41. (in Chinese)
- [5] 朱代武, 周心阳, 吴题, 等. 基于MACAD模型的成都新机场交叉跑道容量评估[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(6): 40-44.
ZHU Daiwu, ZHOU Xinyang, WU Ti, et al. Capacity evaluation of Chengdu new airport cross runway based on MACAD model [J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(6): 40-44. (in Chinese)
- [6] MAZOUNI K, KOHMURA A, FUTASUMORI S, et al. 77 GHz FMCW radar for FODs detection[C]// Proceedings of the 77th European Radar Conference. Paris, France: IEEE, 2010: 451-454.
- [7] NICO G, LEVA D, ANTONELLO G, et al. Ground-based SAR interferometry for terrain mapping: theory and sensitivity analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(6): 1344-1350.
- [8] MOOG Aircraft Group. Tarsier® automatic runway FOD detection system[EB/OL]. [2020-09-27]. <https://www.tarsierfod.com/>.
- [9] DRIFFIELD A. FOD detect broadens its scope[J]. Jane's Airport Review, 2013, 25(4): 21.
- [10] Charlton Media Group. iFerret takes over Changi Airport [EB/OL]. [2020-09-27]. <https://sbr.com.sg/node/5805>.
- [11] Trex Enterprises Corporation. The total solution for FOD control[EB/OL]. [2020-09-27]. <http://www.fodfinder.com/>.
- [12] LUO Y, SONG H, WANG R, et al. Arc FMCW SAR and applications in ground monitoring [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5989-5998.
- [13] 中国电子科技集团公司第50研究所. FOD监控报警系统[EB/OL]. [2020-09-27]. <http://www.50.sh.cn/>.
The 50th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation. FOD monitoring and alarm system [EB/OL]. [2020-09-27]. <http://www.50.sh.cn/>. (in Chinese)
- [14] 中国成都赛英科技有限公司. 机场跑道异物(FOD)雷达检测系统[EB/OL]. [2020-09-27]. <http://www.sine.cn/product/647.html>.
Chengdu Saiying Technology Co., Ltd. FOD radar detection system for airport runway [EB/OL]. [2020-09-27]. <http://www.sine.cn/product/647.html>. (in Chinese)
- [15] 江苏摩立特科技有限公司. 雷达所FOD探测系统: 实时监测跑道状态护航飞机[EB/OL]. [2020-09-27]. <http://>

- www.monitorcity.cn/news/trade/15.html.
Jiangsu Moliter Technology Co., Ltd. FOD detection system of radar institute: real time monitoring runway status escort aircraft[EB/OL]. [2020-09-27]. <http://www.monitorcity.cn/news/trade/15.html>. (in Chinese)
- [16] 中国民航局第二研究所. 民航二所自主研发的机场FOD探测系统: 扫清跑道上的外来物[EB/OL]. [2020-09-27]. <https://www.caacsri.com/detail.do?id=1768>.
The Second Research Institute of CAAC. Airport FOD detection system independently developed by the Second Research Institute of CAAC: clearing foreign objects on the runway [EB/OL]. [2020-09-27]. <https://www.caacsri.com/detail.do?id=1768>. (in Chinese)
- [17] 程一帆. 基于图像处理的机场外来物检测研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
CHENG Yifan. Research on airport foreign object detection based on image processing[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [18] 成威. 机场跑道异物检测系统算法研究与软件实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
CHENG Wei. Algorithm research and software implementation of airport runway foreign body detection system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [19] 李海翔. 机场跑道异物监测雷达目标检测算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 1-6.
LI Haixiang. Research on target detection algorithm of airport runway foreign body monitoring radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 1-6. (in Chinese)
- [20] 林赞, 宋扬, 王彦平, 等. 旋转扫描地基SAR大视场快速成像算法[J]. 信号处理, 2019, 35(3): 499-506.
LIN Yun, SONG Yang, WANG Yanping, et al. Large field of view fast imaging algorithm for rotating scan ground based SAR[J]. Signal Processing, 2019, 35(3): 499-506. (in Chinese)

作者简介:

章林(1975-),男,学士,高级工程师。主要研究方向:空管监视及雷达信息处理。

龙超(1984-),男,博士,高级工程师。主要研究方向:空管监视及雷达信息处理。

童建文(1988-),男,硕士,工程师。主要研究方向:空管监视及雷达信息处理。

(编辑:丛艳娟)