先进光电测量、分析与制造

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250820001

输电线路检测中的机载毫米波SAR成像技术

袁齐坤[1]，潘树昌[2]，张宇雄[1]，陈宣林[1]，李一良[3]，程茂森[2*]

（1. 云南电网有限责任公司 曲靖供电局，云南 曲靖 655000；2. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院，哈尔滨 150001；
3. 上海交通大学四川研究院，成都 610072）

摘　要： 针对视觉和激光雷达在复杂气象条件下适应性差、检测精度有限，文章提出一种基于机载毫米波合成孔径雷达的高分辨率成像技术。该技术采用正侧视条带式成像模式，通过距离向脉冲压缩、距离徙动校正与方位向匹配滤波实现目标区域的精确聚焦和全天时、全天候的输电线路检测。为满足无人机平台的应用需求，设计了基于Xilinx Zynq-7000 SoC的数字采集与处理装置，可以无线完成雷达回波信号的采集、预处理和存储。在农田和输电线路实训场开展的飞行实验测试表明，所提出的技术可在全天候条件下实现较高成像成功率，为输电线路智能巡检及故障诊断提供了可靠的技术支撑。

关键词： 输电线路检测；毫米波SAR；无人机

中图分类号： TN958　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0803－08

Airborne Millimeter-Wave Synthetic Aperture Radar-Based Imsaging Technology for Power-Transmission-Line Inspection

YUAN Qikun[1], PAN Shuchang[2], ZHANG Yuxiong[1], CHEN Xuanlin[1], Li Yiliang[3], CHENG Maosen[2]

(1. Qujing Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Qujing 655000, CHN;
2. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, CHN;
3. Shanghai Jiao Tong Universtiy Sichuan Research Institute, Chengdu 610072, CHN)

Abstract: This paper introduces a high-resolution imaging technology, based on airborne millimeter-wave synthetic aperture radar, that circumvents the poor adaptability and limited detection accuracy of visual and light detection and ranging technologies in complex weather conditions. This technology employs a strip imaging mode, with forward- and side-looking capabilities, to achieve precise focusing of target areas and to facilitate continuous inspection of transmission lines in all weather conditions through range pulse compression, range motion compensation, and azimuth matching filtering. To meet the application requirements of unmanned aerial vehicle platforms, a digital acquisition and processing device, based on the Xilinx Zynq-7000 SoC, was designed that can acquire, preprocess, and store radar echo signals. Flight experiments conducted in agricultural fields and transmission-line training sites demonstrate that the proposed technology can achieve a high imaging success rate under all weather conditions, providing reliable technical support for the intelligent inspection and fault diagnosis of transmission lines.

Key words: transmission line inspection; millimeter-wave SAR; unmanned aerial vehicle

收稿日期：2025－08－20.

基金项目：中国南方电网有限责任公司科技项目(050200KC23100003(YNKJXM20230262)).

* **通信作者：**程茂森

0 引言

作为电能输送网络的核心组成部分，输电线路的运行质量直接决定电网系统的整体可靠性。然而，受我国特殊地理条件制约，架空线路普遍穿越山地、林区等复杂地貌，长期暴露于强风侵袭、冻雨覆冰等极端气象条件，各类环境胁迫因素显著增加了线路故障发生的概率。典型异常情况如异物缠绕、鸟类筑巢、导线覆冰等，均可能引发导线异常舞动、电弧闪络甚至断线等事故，严重威胁电力供应安全和公众生命财产。

输电线路的运维尤为重要。传统运维模式主要采用人工巡检方式，但在偏远山区、高海拔地区及地形复杂区域，传统巡检方式存在作业难度大、检测效率低等突出问题，造成大量人力资源与物资成本的无效消耗。此外，人工巡检存在检测周期固化、质量波动性强等技术缺陷，无法满足现代电网对高频次、全时段、高精度监测的技术需求，亟待通过技术创新实现运维体系的转型升级。

近年来，基于非接触式检测技术的激光雷达（LiDAR）系统[1-3]和光学相机[4-7]被广泛应用于输电线路巡检领域。在激光雷达感知方面，李杰等[8]提出利用原始点云空间分布特征实现输电导线精准坐标提取，朱丽婷等[9]构建多层级分类处理体系，显著提升了三维模型重建的自动化水平，冯迎春等[10]设计金字塔式数据分层管理架构，实现多尺度特征的智能分类。在视觉感知方面，王林林[11]构建了单目视觉驱动的线路巡检系统，张佩等[12]针对航拍图像中小目标识别提出抗干扰优化策略，徐继远[13]基于卷积神经网络提高了复杂航拍场景下的识别性能。这些研究极大推动了输电线路检测的智能化进程。

尽管激光雷达和光学视觉技术在多数环境下可取得良好应用，但在复杂气象条件下，系统的可靠性和适应性仍存在不足。激光雷达的测量依赖激光束的传播和反射，但在雨雪天气或雾霾环境中，激光信号会被散射和衰减，导致回波能量减弱、探测距离缩短，点云数据也因此变得稀疏甚至失真，难以保证稳定性。光学视觉系统对光照高度敏感，弱光下图像信噪比下降，容易出现模糊和细节缺失，强光下容易出现过曝等问题，导致目标轮廓模糊甚至关键信息丢失。此外，雨雪附着在镜头表面还会进一步加剧图像失真，降低成像稳定性。以上因素限制了激光雷达和光学视觉技术在全天候、全天时输电线路巡检中的应用效果。因此，如何构建一种具备较强环境适应性和气候鲁棒性的输电线路巡检感知系统，已成为亟需解决的问题。

毫米波雷达凭借其电磁波良好的穿透特性和高分辨率成像能力，为复杂环境下的输电线路监测提供了有效感知方案。合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）是一种利用雷达运动合成大孔径、实现高分辨率成像的算法。毫米波雷达被广泛用于构建SAR系统，该系统可以满足全天候、全天时的输电线路检测需求。赵新雅等[14]对直升机载毫米波SAR的电磁散射特性进行了研究，丰富了系统参数优化理论。然而，传统SAR装备体积庞大、系统复杂，难以在无人机等轻小型平台上高效部署[15-16]。随着微电子集成技术的突破，基于毫米波频段与调频连续波（Frequency Modulated Continuous Wave Radar，FMCW）体制的微型SAR系统得以实现，具有体积小、功耗低、高分辨率等特性，为空天地一体化智能巡检提供了新路径[17]。

本文立足输电线路智能巡检需求，创新性提出基于机载毫米波SAR的检测技术，重点突破复杂气象条件下输电线路目标的状态监测难题。设计了适用于无人机平台的数字采集与处理装置，可用于构建全天候、全天时的立体化监测体系，并通过实地实验验证了技术可行性。本文成果可为电网智能化运维提供有效的技术支撑。

1 基于毫米波SAR的成像算法

1.1 毫米波SAR的回波模型

方位分辨率作为雷达成像质量的核心指标，其性能提升受制于物理天线孔径的几何尺寸。虽然增大天线实孔径可改善分辨率，但由此带来的体积重量增加严重限制了机载平台的搭载适应性。为解决该问题，SAR技术通过载体运动轨迹上的回波信号融合，等效构建虚拟大孔径天线，可成功突破传统天线尺寸对分辨率的物理限制。

从成像几何视角划分，毫米波SAR技术可分为正侧视、斜侧视及下视三种工作模式。其中，正侧视模式通过构建与飞行航迹垂直的电磁波投影关系，形成几何关系简洁的二维成像平面，适用于大面积监测场景。

在成像工作模式层面，聚束式、扫描式与条带式构成毫米波SAR的三大技术体系。聚束式模式通过

波束指向的动态跟踪实现目标区域的高能量聚焦，虽然可获取高分辨率图像，但需解决复杂的运动补偿与时间同步问题；扫描式模式采用波束分时扫描策略扩展观测幅宽，但需要以空间分辨率为代价换取覆盖范围提升。相较之下，条带式模式通过保持天线波束指向与航迹的垂直关系，在运动过程中实现连续条带状区域成像，兼顾分辨率与宽幅覆盖的双重需求，成为工程应用中常用的成像方式。该模式通过优化合成孔径时间内的信号累积策略，可有效平衡成像质量与处理效率，适用于输电线路等线状目标的周期性监测需求。

在正侧视条带式成像模式下，SAR平台与目标的空间几何关系如图1所示。$t=0$时刻平台从坐标原点O以速度v沿y轴方向运动，目标开始进入波束范围内；平台与波束中央的垂直斜距为R_0，平台高度为H。

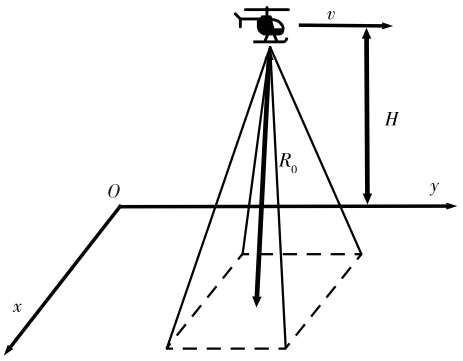


图1　SAR成像几何构型

毫米波雷达采用FMCW体制，通过设定固定脉冲重复周期（Pulse Repetition Time，PRT）构建周期性信号收发机制，在时域维度上形成与脉冲雷达相似的采样结构。这种设计不仅完整保留了FMCW体制固有的低功耗运行优势与高分辨特性，更通过时频域联合调制机制，完美适配SAR所需的空间维孔径合成需求，为构建空时二维高分辨成像技术奠定了技术基础。

在成像过程中，天线波束在地面上形成近似矩形的观测区域，区域内包含大量离散散射体。当发射信号照射目标区域时，各散射单元根据其电磁散射特性对入射波进行后向调制，返回信号在双向传播中携带了目标的空间几何信息和环境介质特性。电磁波与目标相互作用，并借助雷达平台的运动形成合成孔径效应，最终生成包含丰富空间信息的原始回波数据。此外，天线方向图的空间滤波特性与发射信号的时频特性相互耦合，使回波数据在方位-距离二维频域展现出独特的耦合特征，为后续高精度成像处理奠定基础。

线性调频信号脉冲模型为：

$$p(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T}\right)\exp\left(\mathrm{j}\pi kt^2\right)\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_c t\right) \tag{1}$$

式中，$p(t)$为脉冲信号，t为发射信号时间，T为限定脉冲宽度，$\mathrm{rect}\left(t/T\right)$表示脉冲包络，$k$为调频斜率，$k=B/T$，$B$为调频带宽，$f_c$为载频。

实际雷达发射的往往是一系列重复脉冲，脉冲重复周期为PRT。若记每个脉冲的幅度为a，则发射信号$s(t)$可以写成脉冲串形式：

$$s(t)=\sum_{n_p=0}^{N_p-1} ap(t-n_p\cdot PRT) \tag{2}$$

式中，N_p为脉冲的总个数，n_p为脉冲的序号。

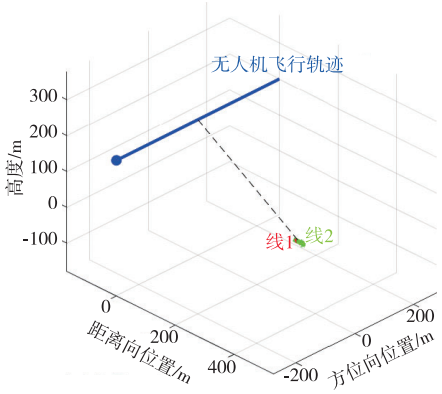
单点回波信号$S(t_\mathrm{A};r)$为：

$$\begin{aligned}S(t_\mathrm{A};r)=&\sigma\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{t-2R(t_\mathrm{A};r)/\mathrm{c}}{T}\right)\cdot\\&\exp\left[\mathrm{j}\pi k\left(t-\frac{2R(t_\mathrm{A};r)}{\mathrm{c}}\right)^2\right]\cdot\\&\mathrm{rect}\left(\frac{t_\mathrm{A}}{T_\mathrm{SAR}}\right)\cdot\exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t_\mathrm{A};r)\right]\end{aligned} \tag{3}$$

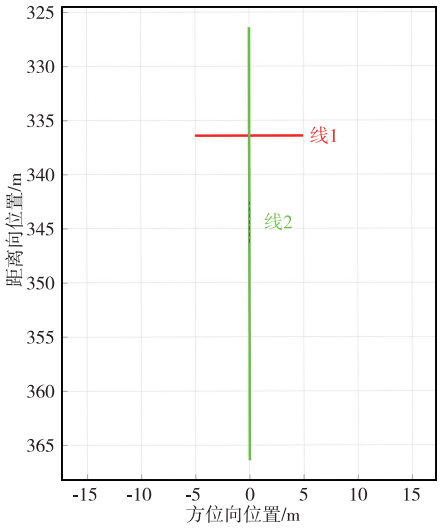
式中，σ为目标的散射系数，t_A为SAR平台的运行时间，$R(t_\mathrm{A};r)$为SAR平台到目标点的瞬时斜距，c为光速，合成孔径时间为T_SAR，λ为雷达工作波长。

在SAR信号处理流程中，方位向回波信号呈现离散脉冲序列特性，其等效采样率由硬件设定的脉冲重复频率决定。为实现全数字化信号处理，距离向采用均匀间隔采样机制，通过等效采样率匹配保证二维频谱的完整性。经双向正交采样后，原始回波数据形成$M\times N$维的二维矩阵，其中距离向通过去斜率处理获取M个等效采样点，方位向通过脉冲累积形成N个合成孔径单元。该矩阵完整保留了目标场景的空间频谱信息，为后续成像处理提供基础。

本文通过仿真验证了毫米波SAR成像技术在输电线路目标检测中的成像性能。针对机载毫米波雷达的仿真参数，设定雷达载波频率为77 GHz，雷达与水平面夹角为30°，无人机平台飞行高度为200 m，飞行速度为10 km/h。目标场景仿真示意图如图2所示，仿真中构建了包含双正交直线结构的检测目标，其中线1沿方位向分布，长度为10 m；线2则沿距离向分布，长度为40 m。



（a）3D仿真场景示意图



（b）2D仿真场景示意图

图2 毫米波SAR仿真场景示意图

通过电磁计算模型生成该场景的原始回波数据，其时频域特征如图3所示。回波信号在距离-多普勒二维频域呈现出明显的线性调频（Linear Frequency Modulation，LFM）特性，为后续成像算法验证提供了标准测试数据。

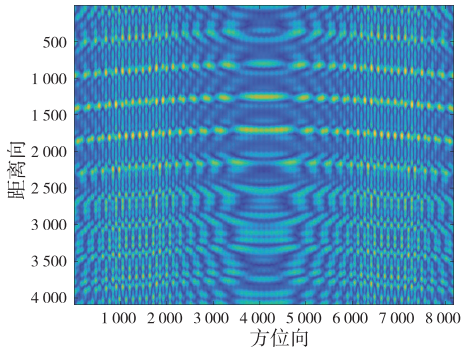


图3 毫米波SAR采集到的仿真原始信号

1.2 基于毫米波SAR的信号处理方法

1.2.1 距离向脉冲压缩

在距离维信号处理中，接收到的回波信号呈现典型的LFM特性。不同距离单元由于双向传播路径长度的差异，在快时间轴上产生与空间位置对应的相位延迟。基于这一特性，可以利用脉冲压缩技术显著提高距离分辨率。该方法通过构建与发射LFM信号共轭的参考函数，采用时域卷积或频域乘积对回波进行匹配滤波，实现解调和相位校正。当距离差异引起的频移被补偿后，原本宽脉冲的回波能量被压缩为窄脉冲响应，其带宽与时宽-带宽积成正比，距离分辨率可达到$1/B$量级（B为信号带宽），从而实现高精度的距离向聚焦。该处理过程在数学上可表示为接收信号与参考信号之间的二维相关运算：

$$y(t)=S(t_A;r)\otimes h(-t_A;r) \tag{4}$$

式中，$h(-t_A;r)=S^*(-t_A;r)$，脉冲压缩后的回波信号$y(t)$通常在频域内通过快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform，FFT）完成。通过该卷积运算，不同距离单元目标的散射特性在时间域得到聚焦，为后续的方位向处理提供高信噪比的中间数据。这种处理策略既有效提升距离分辨率与发射功率，也提高了探测灵敏度。经脉冲压缩后，可以将不同时间延迟的LFM信号收缩为窄脉冲响应，实现距离分辨率的显著提升，分辨率ΔR计算公式为：

$$\Delta R=\frac{c}{2B} \tag{5}$$

脉冲压缩处理后的信号如图4所示。在未经脉冲压缩的状态下，目标散射信号在快时间轴上表现为宽脉冲特性，难以有效区分相邻距离单元，导致距离分辨率受限。经脉冲压缩后，回波信号在时间域被压缩至单个窄脉冲，显著提高了雷达回波的分辨率。

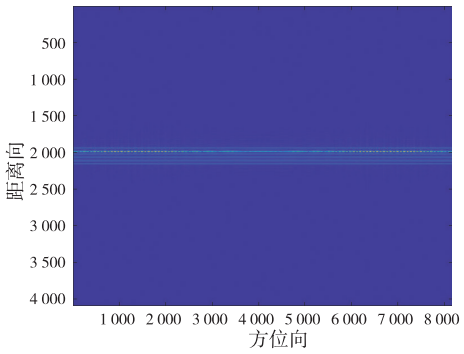


图4 毫米波SAR距离向脉冲压缩后的仿真信号

1.2.2 距离徙动校正

在斜视观测几何条件下，雷达平台的运动轨迹与目标空间位置之间呈非线性关系，导致同一地面目标在不同方位观测时刻的瞬时斜距产生显著差异。这种几何变化使目标回波信号在距离维的投

影轨迹呈现弯曲特征，形成距离徙动（Range Cell Migration，RCM）现象。

距离徙动效应本质上是目标回波在合成孔径时间内跨越多个距离分辨单元的空间投影过程。当雷达平台处于不同方位向采样位置时，斜距变化使目标回波在距离门中的映射位置不断偏移，导致目标能量在距离-多普勒二维频域产生显著耦合。这种扩散效应不仅会引起目标定位信息的系统性偏移，造成成像几何畸变，还会降低图像分辨率和回波信号的相干积累效率，同时使传统的匹配滤波方法失效，影响后续成像聚焦性能。

为解决上述问题，距离徙动校正（Range Cell Migration Correction，RCMC）成为SAR成像中的关键环节。RCMC通过构建精确的时空变换模型，在信号域利用时频插值对回波轨迹进行几何校正，将分散在不同距离单元的回波能量重新映射至正确的空间位置。经过RCMC处理，目标能量在距离-方位二维空间实现精确配准，为后续的方位压缩处理提供可靠基础，确保成像结果具备良好的几何保真性和辐射定标精度。

距离徙动校正采用邻近插值方法，其距离徙动量$\Delta R(f_{\mathrm{d}})$可表示为：

$$\Delta R(f_{\mathrm{d}})=\frac{1}{8}\left(\frac{\lambda}{v}\right)^{2}R_{0}f_{\mathrm{d}}^{2} \tag{6}$$

式中，v为SAR平台的运动速度，f_{d}为多普勒频率。经过离散化之后可得：

$$\Delta R(n,m)=\frac{1}{8}\left(\frac{\lambda}{v}\right)^{2}\left(R_{0}+\frac{mc}{2f_{\mathrm{s}}}\right)\left(\frac{n}{N}\cdot PRF\right) \tag{7}$$

式中，m，n分别为距离向和方位向的采样点序数，N为方位向采样点数，PRF为脉冲重复频率，f_{s}为距离向采样频率。

设校正前的信号为$S(n,m)$，由于徙动量$\Delta R(n,m)$通常不是整数采样点，需要对信号进行插值校正，使得校正后的信号能够回到正确的距离单元上。校正后的信号为$S'(n,m)$，则：

$$S'(n,m)=S(n,m+2\cdot\Delta R(n,m)\cdot f_{\mathrm{s}}/c) \tag{8}$$

为了便于讨论，令m'为$2^{*}\Delta R(n,m)^{*}f_{\mathrm{s}}/c$的整数部分，$\Delta m$为$2^{*}\Delta R(n,m)^{*}f_{\mathrm{s}}/c$的小数部分，但$S'(n,m)=S(n,m+m'+\Delta m)$不能直接从回波数据中得到，需要通过插值法进行估算。

邻近插值法是把校正前的信号$S(n,m)$中距离向位置最接近$(n,m+m'+\Delta m)$的值作为校正后的信号$S'(n,m)$的估计值$S''(n,m)$。相应的插值公式为：

$$S''(n,m)=\begin{cases}S(n,m+m'+\Delta m),\Delta m\geqslant 0.5\\S(n,m+m'),\Delta m<0.5\end{cases} \tag{9}$$

即若Δm大于0.5，就选择$m+m'+1$作为插值点；若Δm小于0.5，就选择$m+m'$作为插值点。

1.2.3　方位向脉冲压缩

在完成RCMC处理后，原本因空间几何关系导致距离向弯曲的目标回波信号实现了空间配准，其方位向投影轨迹由非线性曲线转化为直线特征。这种几何校正使后续方位压缩处理可转换为标准的一维匹配滤波操作，显著降低算法复杂度。特别是在正侧视观测模式下，目标方位向回波在完成距离压缩后仍保持LFM信号特性，其时频耦合关系与距离维信号具有同构性。

基于这种信号特性，方位压缩处理可采用与距离维相似的匹配滤波机制，其通过构建与发射信号共轭的方位参考函数，进而实现回波信号的相干积累与空间聚焦。

完成匹配滤波后，方位向的分辨率Δx由硬件参数决定，其理论表达式为：

$$\Delta x=\frac{\lambda}{2\theta} \tag{10}$$

公式（10）表明，SAR的方位向分辨率与波长λ和合成孔径角度θ有关，而与目标距离无关，在输电线路检测过程中具有较强优势。

经过方位向脉冲压缩后，最终成像效果如图5所示。方位向长度为10 m，距离向长度为40 m，成像结果与仿真中设置的实验场景完全相同，证明算法具有良好的成像效果。

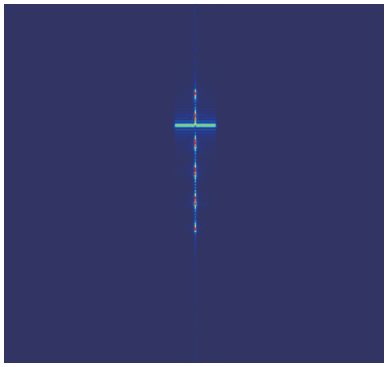


图5　毫米波SAR仿真成像效果

2 机载毫米波SAR的输电线路成像结果

2.1 基于FPGA的数字采集板卡

在毫米波SAR雷达数据采集领域，DCA1000数据采集平台作为常用设备，已广泛应用于雷达算法验证与数据集构建。然而，该平台通常依赖上位机的有线连接进行数据存储和处理，这一设计限制了其在动态移动平台（如无人机）中的应用灵活性。

为解决上述问题，本文设计了一种基于Xilinx Zynq-7000系列SoC芯片的数字采集板，可以实现雷达数据采集、预处理、存储与控制的高度集成，如图6所示。该装置融合了ARM Cortex-A9处理器（Processor System，PS）与FPGA可编程逻辑（Programmable Logic，PL），可直接接收雷达前端采集的LVDS数字信号，并在PL侧完成关键预处理操作，显著提升数据处理效率。



图6 毫米波SAR数字采集板实物图

具体而言，装置首先在PL端对接收的低电压差分信号进行解析与逻辑转换，并实施距离向脉冲压缩，显著提高回波信号的分辨率，同时有效减少数据量，降低存储和传输负担。预处理后的数据存储于本地DDR内存，由PS端负责后续的读取、转存及硬件参数配置。该装置同时支持通过SD卡或USB接口进行数据导出，方便后续分析与处理。

相较于传统DCA1000平台，该数字采集板在功耗、结构紧凑性以及边缘计算支持方面具有明显优势，适用于无人机平台电力巡检等应用场景。依托数字采集板，雷达数据的采集、存储与处理可在移动平台实时进行，充分满足巡检任务对数据可靠性和高效性的要求。

此外，PS端运行的Linux操作系统通过Xilinx PetaLinux工具定制，实现了灵活的通信链路配置。系统上行链路用于接收控制上位机的指令并配置雷达参数，下行链路则将实时工作状态反馈至控制上位机，便于进行远程监控与管理。

该毫米波SAR雷达装置如图7所示，其在功能集成度、平台适配性及能效方面，相较于传统的平台展现出明显优势。该装置不仅满足了轻量化、智能化和高效化的需求，还为无人机平台提供了一个高效的数据采集与处理解决方案，适用于电力巡检等场景中的毫米波雷达装置部署。

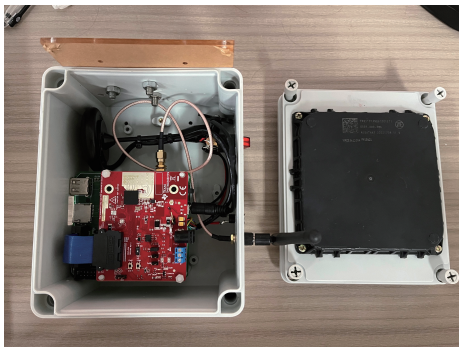


图7 毫米波SAR雷达装置实物图

2.2 测试环境搭建

采用大疆经纬M300 RTK无人机作为实验平台，无人机搭载毫米波SAR雷达装置，如图8所示。



（a）正视图 （b）侧视图

图8 机载毫米波SAR成像装置实物图

图9为所选取的实验场景，分别在典型农田环境和云南曲靖实训场开展了多次机载毫米波SAR输电线路检测实验，以验证成像装置在不同应用场景下的检测性能与成像效果。在实验过程中，无人机搭载毫米波SAR装置，距离输电线路5 m至10 m，沿输电线路方向以1.5 m/s的恒定速度匀速飞行，确保数据采集的稳定性和连续性。

在农田实验中，选取农田中的输电线路作为测试目标。雷达装置俯视角度设置为30°，以斜视方式对输电线路进行成像检测，重点观测四根架设在电线杆上的导线目标。在云南曲靖实训场实验中，雷达装置调



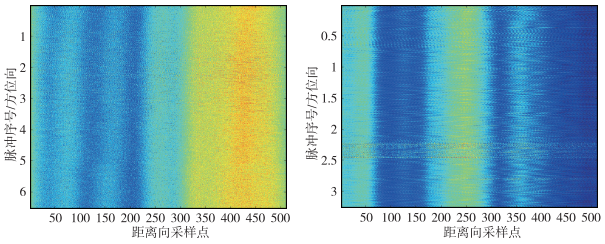
（a）农田实验　　（b）实训场实验

图9　实验场景

整为水平视角，面向铁塔输电线路进行正侧视观测，检测对象为铁塔上分布密集的10根导线。实训场地模拟复杂输电场景，环境干扰因素和背景杂波较为显著，对系统目标分辨能力和鲁棒性提出了更高要求。

2.3　测试实验结果

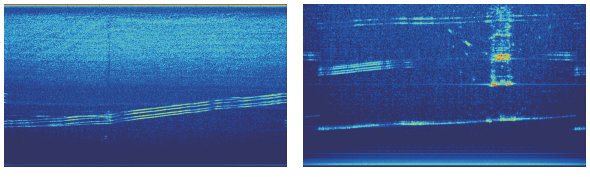
经过无人机搭载毫米波雷达对输电线路进行数据采集后，原始回波信号幅值图如图10所示。由于未经过SAR算法处理，目标反射信号非常小，能量分布极为分散，从原始回波信号中无法看到目标特征。



（a）农田实验原始回波信号成像结果　（b）实训场实验原始回波信号成像结果

图10　原始回波信号成像结果

经过SAR成像，结果如图11所示。在图11(a)中，4条导线均清晰显示在雷达图像中。在图11(b)中，显示了7条导线及部分铁塔，少于实际存在的10根导线。该差异主要由于水平视角下，仅有7条导线在可视区域内，3条导线在雷达波束中被前方其他导线遮挡而未能成像。



（a）农田实验SAR成像结果　（b）实训场实验SAR成像结果

图11　SAR成像结果

3　结论

本文针对传统输电线路检测技术在复杂气象条件下适应性不足的问题，提出一种基于机载毫米波SAR的成像技术。通过正侧视条带式成像模式与距离向脉冲压缩、距离徙动校正和方位匹配滤波等算法，实现对导线的精准识别。为适应无人机平台，设计了基于Xilinx Zynq-7000 SoC的无线数字采集与处理装置，有效提升数据处理效率和集成度。经实地飞行验证，该技术在全天候成像成功率较高，展现出优良的环境适应性和应用潜力。在未来，可将毫米波SAR成像结果与深度学习、目标检测和语义分割等智能算法结合，不仅能实现巡检数据的自动化处理和缺陷识别，还能构建面向大规模电网运维的智能诊断与决策支持体系。该研究成果为输电线路全天候智能巡检提供了有效技术支撑，为电网运维的智能化发展拓展了新路径。

参考文献：

[1] Liu Y, Zhao X, Jiao Y, et al. Method for real-time reconstruction of a transmission line based on the LiDAR point cloud data of a partial line segment[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 57: 103180.

[2] Dihkan M, Mus E. Automatic detection of power transmission lines and risky object locations using UAV LiDAR data[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(7): 567.

[3] Chen J, Zhuang Y, Lai L, et al. Three-dimensional modeling of 500 kV transmission lines by airborne LiDAR[J]. Heliyon, 2024, 10(21): e38833.

[4] Zhang X, Zhang Y, Liu J, et al. InsuDet: a fault detection method for insulators of overhead transmission lines using convolutional neural networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 5018512.

[5] Faiyaz Ahmed M D, Mohanta J C, Sanyal A, et al. Path planning of unmanned aerial systems for visual inspection of power transmission lines and towers[J]. IETE Journal of Research, 2024, 70(3): 3259-3279.

[6] Weng B, Gao W, Zheng W, et al. Newly designed identifying method for ice thickness on high-voltage transmission lines *via* machine vision[J]. High Voltage, 2021, 6(5): 904-922.

[7] Zhao Z, Pan Y, Guo G, et al. YOLO-AFPN: marrying YOLO and AFPN for external damage detection of transmission lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024, 18(9): 1935-1946.

[8] 李　杰，孔令凯. 架空输电线路激光雷达点云数据处理技术研究[J]. 物联网技术，2025，15(1)：142-145.
Li Jie, Kong Lingkai. Research on point cloud data processing technology of lidar for overhead transmission lines[J]. Internet

of Things Technologies, 2025, 15(1): 142-145.

[9] 朱丽婷, 肖发扬, 唐 杰, 等. 输电线路三维激光扫描点云数据处理及应用[J]. 光源与照明, 2022(12): 171-173.
Zhu Liting, Xiao Fayang, Tang Jie, et al. Data processing and application of three-dimensional laser scanning point cloud for transmission lines [J]. Lamps & Lighting, 2022 (12): 171-173.

[10] 冯迎春, 李 敏. 基于无人机搭载激光雷达的输电线路智能巡检研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(9): 66-69.
Feng Yingchun, Li Min. Research on transmission line intelligent patrol based on UAV-mounted lidar [J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(9): 66-69.

[11] 王林林. 基于单目测距的输电线路三维重构研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
Wang Linlin. Research and application of three-dimensional reconstruction of transmission lines based on monocular ranging [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

[12] 张 佩, 何宁辉, 周 秀, 等. 基于机器视觉的架空输电线路检测方法仿真[J]. 计算机仿真, 2025, 42(2): 123-127.
Zhang Pei, He Ninghui, Zhou Xiu, et al. Simulation of overhead transmission line detection method based on machine vision[J]. Computer Simulation, 2025, 42(2): 123-127.

[13] 徐继远. 基于无人机机器视觉的电力巡线若干关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
Xu Jiyuan. Research on several key technologies of power line inspection based on UAV machine vision[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[14] 赵新雅. 直升机载毫米波雷达电力线检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
Zhao Xinya. Research on the detection method of helicopter-borne millimeter-wave radar power line[D]. Xi'an: Xidian University, 2023.

[15] 秦萌毅. 基于直升机平台的海面舰船目标SAR/ISAR成像算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Qin Mengyi. Research on SAR/ISAR imaging algorithms of surface ship target with helicopter platform[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[16] 孙学娇, 潘志强. 国外典型SAR卫星发展概述与趋势展望[J]. 卫星应用, 2024(6): 14-21.
Sun Xuejiao, Pan Zhiqiang. Overview of the development and trend of typical foreign SAR satellites [J]. Satellite Application, 2024(6): 14-21.

[17] 姚 森, 李和平, 白浩琦. 基于TX2的微型SAR实时成像信号处理技术[J]. 电子技术应用, 2023, 49(11): 160-164.
Yao Sen, Li Heping, Bai Haoqi. Real-time imaging signal processing technology of miniature SAR based on TX2[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49 (11): 160-164.

作者简介:

袁齐坤(1977—),男,正高级工程师,主要研究方向为高压输电线路施工与运行维护、防灾减灾;

程茂森(2002—),男,硕士研究生,主要研究方向为仪器科学与技术、环境感知等。