

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.10.020

引用格式:罗旌胜,贺治华,熊伟,等.毫米波雷达高压线检测技术的研究进展[J].电讯技术,2016,56(10):1174-1182.[LUO Jingsheng, HE Zhihua, XIONG Wei, et al. Research progress of high voltage line detection by millimeter-wave radars[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(10):1174-1182.]

毫米波雷达高压线检测技术的研究进展*

罗旌胜**¹, 贺治华¹, 熊伟^{1,2}, 陶飞翔¹

(1. 中航工业雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063; 2. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 210016)

摘 要: 高压线是威胁飞行器低空安全飞行的主要障碍, 高压线的准确检测和有效预警是毫米波低空防撞雷达最重要的功能需求之一。首先介绍了毫米波雷达高压线检测技术的研究现状, 其次重点分析了高压线的电磁散射特性、检测算法和检测系统三个主要方面的研究进展, 提出了毫米波防撞雷达应具备大空域扫描、高数据更新率、高分辨率、小目标检测和抗杂波干扰等特点, 最后指出了高压线检测技术的未来发展趋势, 即基于多传感器信息融合检测、自主学习的智能化检测和深度信息检测。

关键词: 毫米波雷达; 低空防撞雷达; 高压线检测; 电磁散射; 研究进展

中图分类号: TN959.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2016)10-1174-09

Research Progress of High Voltage Line Detection by Millimeter-wave Radars

LUO Jingsheng¹, HE Zhihua¹, XIONG Wei^{1,2}, TAO Feixiang¹

(1. Leihua Electronic Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi 214063, China;
2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016, China)

Abstract: High voltage line (HVL) is the main safety threat of low-flying aircrafts, and its accurate detect and effective early-warning is one of the most important functional requirements for low-altitude collision avoidance radars at millimeter-wave (MMW). This paper starts with introduction of the present research on HVL detection technology at millimeter-wave, then analyzes the main progress on electromagnetic scattering, detection algorithm and detection system of HVL detection, proposes that MMW collision avoidance radars should possess some necessary characteristics such as large scan volume, high data refreshment rate, high resolution, small target detection and anti-jamming clutter capability. Finally, it points out the main developing trends of HVL detection technology, i. e. HVL detection algorithms based on multi-sensor information fusion, intelligence of active learning and depth information.

Key words: millimeter-wave radar; low-altitude collision avoidance radar; detection of high voltage line; electromagnetic scattering; research progress

1 引 言

随着现代战争形式的复杂化, 低空突防和低空搜救成为越来越重要的飞行任务。从近些年来飞行

器的事故统计得知, 飞行器与低空障碍物碰撞的事故频频发生, 地面的烟囱、高压线成为威胁其飞行安全的主要障碍。高压线由于其体积小, 在视线不好

* 收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-06-29 Received date: 2016-02-29; Revised date: 2016-06-29

** 通信作者: 362046864@qq.com Corresponding author: 362046864@qq.com

• 1174 •

和前方有遮挡等情况下肉眼难以发现,因此高压线成为飞行器在低空飞行中最危险的障碍物。美军的“阿帕奇”武装直升机就曾多次因为碰撞高压线而撞毁坠地。

毫米波雷达用于探测高压线具有体积小、分辨率高、可全天时全天候使用等特点,成为近年来世界各国发展低空防撞系统的优先选择^[1-4]。

近几十年来,高压线检测技术的发展已成为关注重点,但大多数的研究都是针对高压线探测的某些难点开展的。大量的研究结果表明:高压线检测技术流程复杂,算法思路多样,涉及技术领域广泛,因此有必要对高压线检测技术的研究现状进行专门性的整理与总结。

本文首先总结了毫米波雷达高压线检测技术的研究现状,其次重点分析了高压线检测系统、高压线电磁散射特性和高压线检测算法三个方面内容的研究进展,最后指出了高压线检测技术未来的研究方向。

2 研究现状

近些年来,由于低空防撞装备的应用及发展需求不断增加,世界各国开展了大量毫米波雷达高压线检测技术的研究工作。下面对主要的研究现状进行介绍。

2.1 高压线检测系统技术要点

高压线作为低空安全飞行的主要威胁,对其有效的探测和及时的告警是毫米波高压线探测系统的首要任务。

低空飞行器希望高压线探测系统可以全天时全天候在足够大的空间快速扫描,尽可能远距离准确地获得目标的位置信息,并进行威胁分析与飞行引导。高压线检测的技术要点是高分辨率、高数据更新率、大扫描空域、小目标检测、远距离探测和抗杂波干扰等^[3]。由于高压线结构复杂,雷达散射截面小,杂波干扰严重,要想完全实现这些技术要点对于毫米波雷达来说是非常具有挑战性的。

2.2 高压线电磁散射特性

雷达信号回波与目标的电磁散射特性密切相关。高压线的结构特殊,探测环境复杂,需要人们深入地研究其在各个空间方向、各种频率下包括幅度、

相位和极化等方面的电磁散射特性。

用简单长导体圆柱模型可近似模拟高压线,但其模型结构不够精细,只能反映高压线在 X 频段及以下频段的电磁散射特性。麻省理工大学林肯实验室 Al-Khatib^[5]用几何光学模型近似推导了单根高压线的雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)计算公式,从理论上较为精准地反映了高压线的周期结构特性,并且进一步预言了高压线 Bragg 散射特性的存在。

随后伊朗的 Sarabandi^[6-8]和日本的 Hiroyuki Yamaguchi^[9]等人都证实了高压线 Bragg 散射特性的存在。Sarabandi 等人发现了高压线与杂波的极化分量有着明显区别,这为基于雷达极化特征的高压线检测与识别方法奠定了基础。近几年来,文献[10-13]对 76 GHz 高压线的电磁散射特性做了重点研究,为满足低成本小型化的应用需求提供了技术方案。

高压线是成组存在的,雷达在探测过程中一个波束内往往会包含多根高压线,文献[14-16]研究了高压线的群组特性,证实了多根高压线的 Bragg 散射特性仍然存在,可以作为高压线的不变特性。

2.3 高压线检测算法

最早的高压线检测方法是基于恒虚警自动目标检测的,此方法在信杂比不足和雷达入射角度不佳的情形下,检测效果很不理想。

高压线的 Bragg 散射特性是区别高压线与其他目标的最有效特征,文献[17]利用此特征提出了角度模板匹配(Angular Profile Matching, APM)高压线检测算法,文献[7-8]和文献[18]也将 Bragg 散射特性作为检测高压线的重要特征。

由于高压线的结构特点使得其不同极化方式下的回波特征与地面的树木、沙地等杂波有较大区别, Sarabandi 等人提出了基于极化合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像特征提取的高压线检测方法,研究结果表明该算法具有较好的抗杂波性能。

通常高压塔架设基本处于一条直线,文献[18-19]提出了用霍夫变换从信号或图像中提取直线,再利用高压线的 Bragg 散射特性、平均峰值距离等作为检测特征的高压线检测思路,其中 Ma Qirong 等人与霍尼韦尔公司的 Goshi^[20]展开合作完成了算

法的初步应用,他们的公开测试结果表明算法对 500 m 左右的高压线正确检测概率达到 98%,其检测效果在特定的环境下已经相当有效了。

3 高压线检测关键技术

高压线的 RCS 很小,受地表强杂波干扰也很严重,信噪比和信杂比的不足成为其探测的主要难点。要想解决这两个难点,首先的研究重点是高压线在毫米波段的电磁散射特性,其次是根据目标的特性研究适合于高压线探测的雷达体制、扫描策略等系统技术,最后是着重于研究高压线检测算法。下面分别对这三个关键技术的发展进行回顾与分析。

3.1 高压线的散射特性

高压线的材料成分特殊,几何结构相对复杂,因此研究高压线电磁散射特性,提炼出高压线不同于其他目标例如幅度、相位和极化等的电磁散射特性,是高压线检测的基本工作。

3.1.1 高压线的结构特征

图 1 为高压线的物理结构示意图,高压传输线缆是由一根承重线和多股绞合线缠绕而成的长形导线。一组高压线都是由两根以上的火线和地线组成的,由此可知,在探测中高压传输线总是成群成组出现在视场中的。

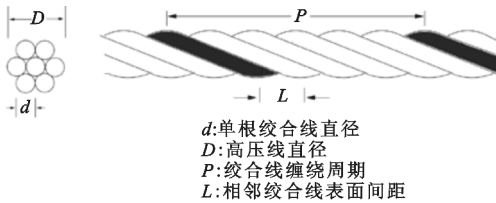


图 1 高压线物理结构
Fig. 1 Physical structure of HVL

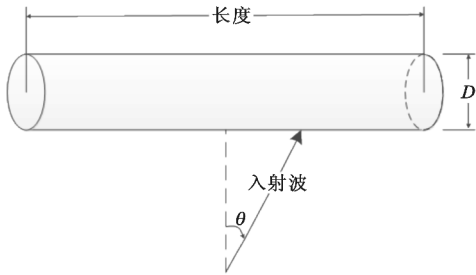
低空架设的高压线根据地形、传输电压的差异,所使用的线型会有所不同,通常单根高压线直径在 10 ~ 50 mm,单根绞合线的直径在 5 ~ 10 mm,相邻绞合线的表面间距在 10 ~ 20 mm^[9],缠绕周期 P 要远大于单根高线的直径。

由于电磁波的散射特性与目标的结构尺寸相关,高压线的几何尺寸处于毫米量级,因此研究高压线在毫米波频段的电磁散射特性是极为关键的。由于在 35 GHz、76 GHz 和 94 GHz 这几个频段电磁波传

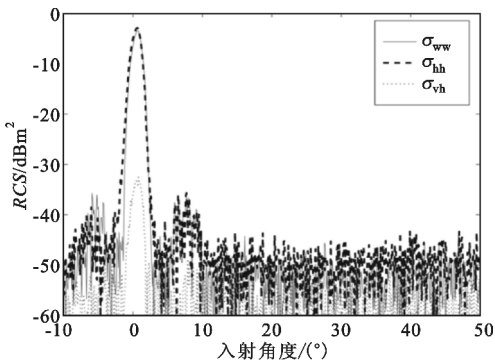
播过程中大气衰减较小,目前毫米波雷达高压线散射特性的研究主要集中在这些频段附近。

3.1.2 高压线电磁散射特性研究现状

长导体圆柱高压线模型如图 2(a)^[7]所示,当雷达电磁波在 0°角入射时,其 RCS 达到最大,如图 2(b)所示。长导体圆柱模型基本可以反应高压线在 X 频段及以下频段的电磁散射特性,但并不能完全反映毫米波频段的电磁散射特性。



(a) 模型几何结构



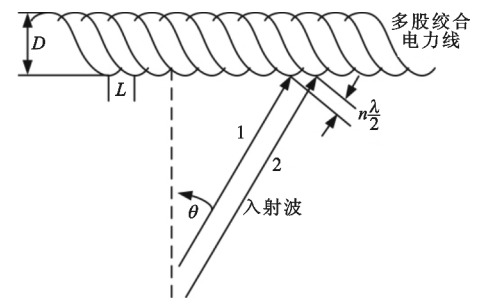
(b) 一定入射角度范围 RCS

图 2 圆柱高压线模型
Fig. 2 Cylinder model of HVL

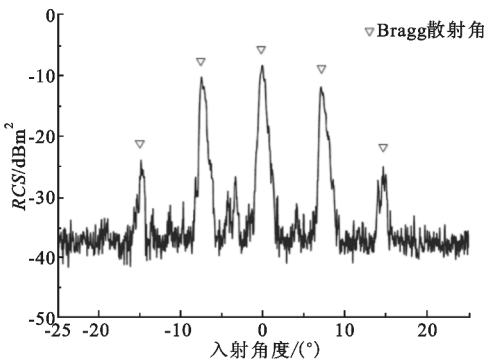
电磁波带有重要的相位信息,当接收到的电磁波相位相同时可达到最佳叠加效果。图 3^[9]为精细化的高压线结构模型,图 3(a)所示为考虑高压线绞合周期结构,当入射波到达相邻绞合线表面的波程差为半波长的整数倍时,其后向散射回波将同相叠加,即入射角满足

$$L\sin(\theta_n) = n\lambda/2, n=0, \pm1, \pm2, \cdots \tag{1}$$

时,散射回波出现峰值如图 3(b)所示。式(1)中:θ_n为第 n 个散射峰值角;λ 为波长。这种在特定的入射角出现散射峰值的现象被称为 Bragg 散射特性,入射角 0°时散射峰值达到最大,将其称为 Bragg 散射主瓣,其他散射峰称为副瓣。



(a) 高压线模型几何结构



(b) 一定入射角度范围 RCS

图 3 高压线结构模型
Fig. 3 HVL model

在 20 世纪 90 年代到 21 世纪初,世界范围内开展了大量的高压线电磁散射特性研究。Sarabandi^[6]建立了精细的高压线结构模型,仿真研究了 C 频段(4.5 ~ 5 GHz)、X 频段(9.25 ~ 9.75 GHz)和 Ka 频段(34.5 ~ 35 GHz)下几种不同规格参数的高压线电磁散射特性,得出的研究结论可归纳如下:

- (1)在 C、X 频段,高压线 RCS 模型可近似为长导体圆柱;
- (2)高压线在 Ka 频段存在明显的 Bragg 散射主副瓣;
- (3)Bragg 散射副瓣在多种极化条件下都存在,且垂直极化要强于其他极化方式。

1999 年, Sarabandi^[7] 在实验室条件下比较了 94 GHz 频段下同等直径不同线型的高压线和圆柱体的 RCS 特性,证实了文献[6]中的结论,并且验证了高压线悬挂有冰晶或雨水时其 Bragg 散射特性仍然存在。

在同一时期,日本的 Hiroyuki Yamaguchi 和 Akihiro Kajiwar 等人^[9]在微波暗室内,获取了 35 GHz、94 GHz 不同极化方式下的高压线回波,相比于 Sarabandi 等人他们对高压线 RCS 特性的研究工作更加定量。其主要的研究结论可归纳为以下 3 条:

- (1)35 GHz 和 94 GHz 的散射主副瓣都与 Bragg 散

- 射角度相符,垂直共极化的 RCS 要强于水平共极化;
- (2)相同的高压线,94 GHz 的 Bragg 散射副瓣要比 35 GHz 高 7 ~ 13 dB;
- (3)相同角度范围内 94 GHz 的 Bragg 散射副瓣要多于 35 GHz,满足与频率成正比例关系。

前期的高压线电磁散射特性研究工作主要集中在 35 GHz 和 94 GHz 附近,在 76 GHz 的研究由于其较低的发射功率和较近的探测距离并未得到重视,但考虑到低造价小型化^[21]的民用防撞检测系统需求,76 ~ 77 GHz 的高压线散射特性和防撞雷达系统的研究得以开展。Shunichi Futatsumori^[10-11]细致地研究了 76 GHz 的高压线极化特征,证实了垂直极化 Bragg 散射第一、二个副瓣的大小主要受高压线直径的大小影响,水平极化 Bragg 散射主瓣大于垂直极化。德国 Volker Ziegler 和 Falk Schubert 等人^[13]构建了小型化、低造价的民用防撞检测系统地面实验平台,实验中他们获取的 140 m 的高压线信噪比 (Signal-to-noise Ratio, SNR) 为 32 dB, 245 m 的高压线 SNR 为 25 dB,通过三维空间内探测目标的重构可分辨出真实障碍物和虚假障碍物。

很显然低空架设的高压线不是单根存在的。如图 4 所示,一组高压传输线通常架设 3 ~ 5 层,每层的两捆线缆又有 2 ~ 6 根单线。为了更符合实际,有必要研究多根、多组类型的高压线 RCS 特性。

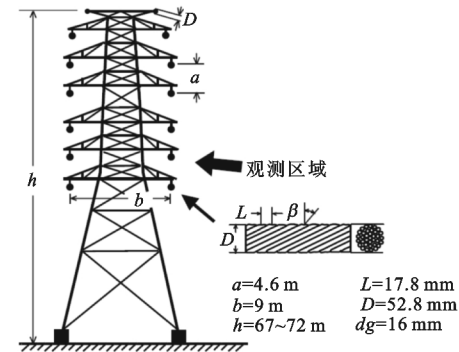


图 4 典型高压线实物图
Fig. 4 Typical HVL

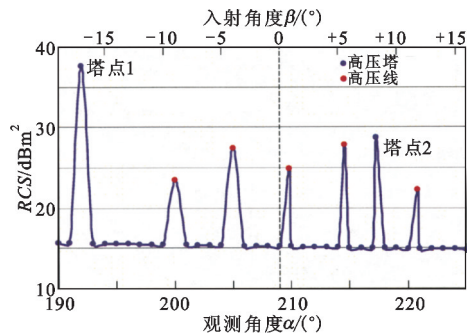
德国的 Helmut Essen^[16]研究了 10 GHz、35 GHz 和 94 GHz 频段两种类型高压线缆的 RCS 特性,但其研究的重点是在仿真数据与实测数据的对比,并未对单根线缆和多根线缆的散射特性差异作进一步分析。

受实验条件约束,早期的高压线散射特性研究主要集中在近距离(大多在 100 ~ 200 m)。Yamamoto^[15]利用地面实测数据对 500 m 外 94 GHz 频段的高压线 RCS 特性做了相应的研究,其高压线及塔的结构示意图如图 5^[15]所示,高压线离地 44 ~ 49 m,塔高 67 ~ 72 m。研究结果表明:

- (1)在远距离同一波束内的高压线的条数要比近距离的多,其 RCS 要大于近距离单根高压线的情况;
- (2)高压线组的 Bragg 散射特性仍然存在;
- (3)实测的数据中高塔的 RCS 比高压线要大 1 ~ 15 dB,如图 5(b)所示。



(a) 高压塔结构



(b) 散射特性

图5 高压塔/线结构及其 RCS

Fig. 5 Structure and RCS of high voltage tower/line

经证实,多根高压线的 Bragg 散射回波可以叠加。高压线散射特性的研究已经逐渐深入,高压线的模型越来越精细,建模的场景也越来越真实,高压线 Bragg 散射特性、极化特性、群组特性等的发现为高压线检测技术的发展奠定了基础。

3.2 高压线检测系统技术

高压线检测实际上是对空间环境的一种感知,从作战使用的角度出发,应充分考虑检测系统在体积、成本和探测能力方面的要求。毫米波雷达基本满足军用直升机体积和重量的要求。已被广泛装备于武装直升机上,探测能力主要指的是在探测距离、探测精度和探测范围等方面的要求。为确保飞行的安全性,探测系统需要满足 4 个设计要点。

(1) 大空域扫描

直升机机动性强,特别是在低速飞行时水平变向能力很强,因而雷达要有足够大的扫描范围。欧洲直升机公司的 Heliradar^[1]毫米波引导与防撞雷达

探测视角水平方向为 70°,垂直方向为 40°;Honeywell 公司专门采访了几十个直升机飞行员,了解到他们对扫描空域的指标需求是垂直方向视场大于 15°,水平方向视场大于 24°。实际的天线扫描策略应根据飞机的飞行状态、机动性能动态地调整,在保证安全飞行的同时提高探测性能。

(2) 高数据更新率

一般的直升机飞行速度在 250 km/h 左右,高速直升机的速度可达到 400 km/h 以上。若雷达在一次扫描中未能检测到高压线,数据更新周期太长则在下一次发现目标时可能已经相当危险了。加拿大的 Oasys 直升机态势感知系统扫描速率达到 150°/s,具有快速空间感知能力;国外典型的雷达数据更新周期在 1 ~ 3 s^[4]。快速扫描同时也带来了大量的信息数据处理压力,因此高数据更新率要考虑到扫描策略的制定,还应该考虑到系统的数据处理能力。

(3) 高分辨率

目标的探测精度不仅与距离分辨率相关,还受限于角度分辨率,这是因为随着距离的增加波束覆盖范围增大,目标区域以外的障碍物和地面回波干扰将更加严重。出于对小目标检测和强杂波抑制的考虑,也要求雷达有较高的距离和角度分辨率。典型的欧洲直升机公司的 Heliradar 雷达是 SAR 体制系统,其方位分辨率优于 0.2°,俯仰角误差小于 3°,距离分辨率小于 2 m;德国的 Hivision 毫米波视景增强雷达其距离分辨率优于 5 m。距离与角度分辨率与目标特性、波束宽度、信号波形等都密切相关,因此要从探测精度的要求出发综合设计雷达系统。

(4) 小目标检测和抗杂波干扰

目标回波中如果受到有强杂波干扰其检测难度非常大。天线副瓣水平和脉压副瓣性能也将影响回波的质量。为提高小目标检测性能,尽可能减少杂波的影响,需要设计高增益低副瓣天线,同时应降低脉压副瓣的影响,并且可以考虑将增强信号的小目标检测方法如检测前跟踪^[22](Track before Detect, TBD)应用于高压线检测中。国外研究的极化 SAR 体制高压线检测系统,综合利用了水平极化、垂直极化和交叉极化的信息,具有较好的抗杂波性能。

高压线检测系统所需的大空域扫描、高数据更新率、高分辨率等特点,涉及到雷达体制的选择、发射波形的设计和波束扫描策略的制定等技术领域,其复杂度可想而知,然而即便解决完这些问题也只是满足了获取高质量的探测数据的要求,高压线检测算法也是值得深入研究的课题。

3.3 高压线检测算法

高压线的体积非常小,与地面多数目标如树丛、

水塔、建筑等相比,其回波强度普遍要小 10 ~ 20 dB, 想要在极复杂的低空环境下检测到极小的雷达散射截面面积的高压线,就要充分提取出高压线区别于其他目标或是杂波的特征。高压线的 Bragg 散射特性、多极化特性、群组特性等是其重要特征,目前大多数的高压线检测算法都是基于这些特征开展的。下面重点介绍几种比较有代表性的高压线检测算法。

3.3.1 恒虚警检测方法

自 1960 年以来,基于恒虚警率 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 的自动目标检测技术就被提出来,但由于高压线检测中受杂波的影响严重,直接将 CFAR 方法用于高压线检测其效果并不理想。

3.3.2 APM 检测方法

APM 高压线检测算法是由日本的 Hiroyuki Yamaguchi 等人^[17]提出的,算法基本的检测流程是将每种高压线在各个入射角度的 RCS 特征作为模板,使用高分辨毫米波雷达对高压线进行扫描,用各个角度检测到的高压线信号与特征模板进行匹配完成相关性排序,最后对检测序列判决,从而实现高压线的检测。此方法与恒虚警检测相比,有 5 dB 左右的信噪比提升。但 Yamaguchi 未考虑到杂波干扰对检测性能的影响,并且在实际应用中扫描出完整的高压线截面也是相当困难的。

3.3.3 基于极化 SAR 图像的检测方法

由前文分析得知高压线垂直极化的 RCS 要大于水平极化,多种极化方式下都存在 Bragg 散射副瓣,因此研究基于极化特征的高压线检测算法是较为有效的途径。

Sarabandi 和 M. Park 等人^[7-8]研究了不同极化方式的高压线电磁散射特性,并提出可以用不同极化分量来区别高压线和杂波;Lei Xie^[23]证明了极化雷达的线性极化率和线极化维度两个参数可用于区分水平结构目标和垂直结构目标;邓少平^[24]提出了基于 Hough 域同极化和交叉极化相干性恒虚警率电力线自动检测方法。这些都是基于极化的高压线检测算法的很好应用。

高压线下方的杂波背景通常为草地和森林等,其散射具有方位对称性,散射矩阵的同极化和交叉极化分量是不相关的,然而高压线不满足散射对称性,极化分量则具有相关性。同极化及正交极化相关系数定义为

$$\gamma = \frac{\langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{vv}|^2 \rangle \langle |S_{hv}|^2 \rangle}} \quad (2)$$

式中: S_{vv} 为散射矩阵的水平共极化分量; S_{hv} 为散射矩阵的正交极化分量。Sarabandi 理论推导了目标

检测的虚警概率和检测概率,计算了相关系数与检测概率的变化关系。图 6^[8] 为高压线极化相关系数与概率密度函数的关系,从图中可以看出杂波和目标有明显的相关系数门限。

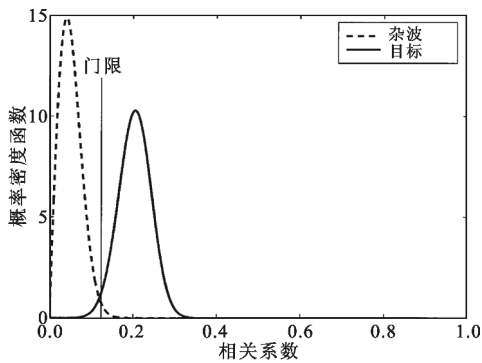


图 6 相关系数
Fig. 6 Correlation coefficient

Sarabandi 利用相关系数特征,提出基于极化的高压线检测算法,将其应用于毫米波极化 SAR 图像的高压线检测中。实验数据表明高压线水平极化与正交极化的相关性要强于大部分的地面杂波(如树木、沥青地面等),在强杂波背景条件下,极化检测在大入射角度甚至可提高 20 dB 的信杂比。

基于 SAR 极化的高压线检测方法具有分辨率高、覆盖面积广的特点,用于大面积的高压线测绘应用前景广阔,但 SAR 图像数据量大、实时性差,并且无法对飞行前视范围的目标成像,这也将制约其在低空飞行器的应用。

3.3.4 基于特征分类器的检测方法

模式识别的方法经常被用于目标检测和识别中。经典的支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 是基于特征的,适用于训练样本小、特征维数高的模式识别方法,已经被广泛应用于目标识别与分类。高压线的散射特性与噪声及杂波存在差异,高压线又是由分布较为均匀的高压塔支撑的,因此提取回波中的平均功率、峰值功率、强散射点均值和方差等特征用于检测或识别高压线是完全可行的。

2011 年, Ma Qirong^[18] 提出了一种联合利用 Hough 变换和 SVM 分类器的自适应高压线检测算法。算法的基本流程为:雷达获取前方一定空域的扫描回波图像(以下称为天线帧图像),如图 7^[18] (a) 所示;用 Hough 变换提取图像中的直线,得到如图 7(b) 所示的一维像素点信息;计算直线的功率均值、平均峰值间距和方差等多维特征信息;用 SVM 分类器分类,加入 Bragg 散射特征判断,完成高压线的检测。在考虑了多个天线帧之间高压线的积累问

题^[20],检测算法更加稳定。

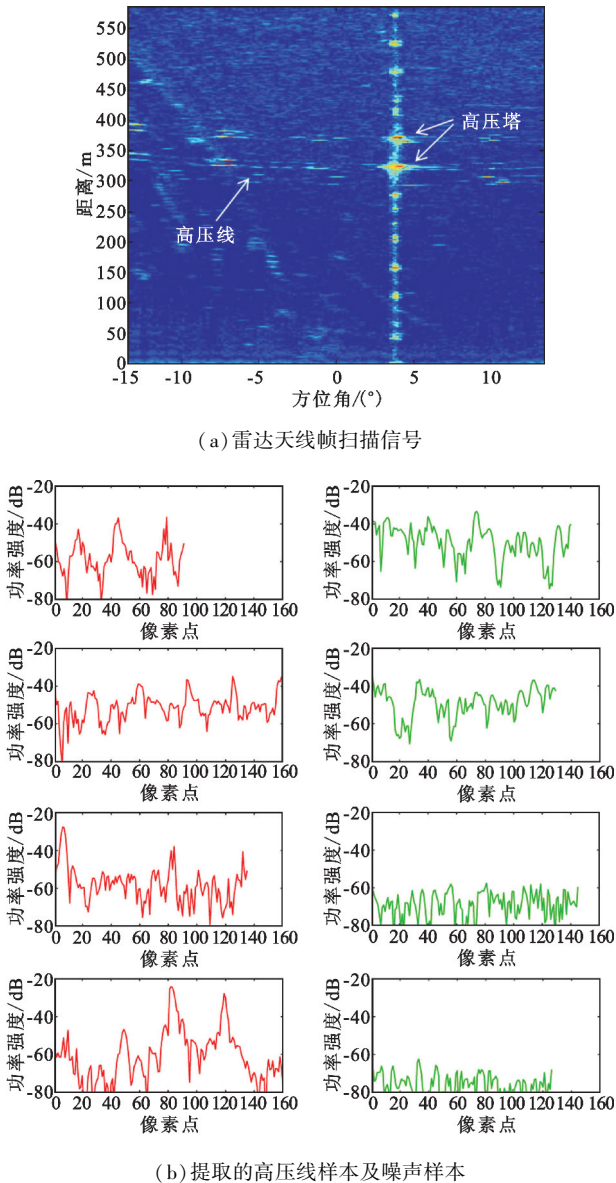


图 7 雷达天线帧信号
Fig. 7 Scan image of radar

基于特征分类器的高压线检测方法易于推广,对于新的高压线特征,经过训练后可快速应用于检测中,但此方法对目标的训练样本较为敏感,要适应各种不同环境下的高压线检测,需要大量不同类型的样本。

3.3.5 其他检测算法

毫米波雷达高压线检测算法还有很多:魏玺章等^[25]研究的 34 GHz 水平极化毫米波雷达的高压线检测算法是基于一维距离像特征的;卫青春等^[19]也做了相关的研究工作,其中卫青春对多个天线帧高压线的 Bragg 散射点积累,用 Hough 变换提取高压线强散射点回波用于检测高压线具有一定的参考价

值;文献[26–27]对基于塔与线、线与线的空间位置关系的高压线检测算法的研究,具有一定的指导意义。这些检测算法主要区别是在高压线特征选择或是特征获得的方法不同。在未来的高压线检测算法中应考虑不同的应用场景,挖掘出更多有用的高压线特征,提高检测算法的可靠性。

表 1 对比了不同的高压线检测算法的原理和优缺点,结果表明极化 SAR 检测方法信杂比高,适于大面积测绘,特征分类检测方法实时性强、稳定性好,更适用于飞行器低空防撞。

表 1 高压线检测算法比较			
Tab. 1 Comparison between HVL detection algorithms			
检测算法	原理特点	优点	缺点
恒虚警检测	CFAR 自动目标检测	复杂度低,适于弱杂波环境	低信杂下比性能差
APM 检测	高压线 Bragg 散射角匹配	信噪比高	难以获取大角度范围的高压线回波
极化 SAR 检测	高压线与杂波极化特性不同	信杂比高,适于大面积测绘	SAR 图像数据量大,实时性差
特征分类检测	综合 Bragg、功率、塔线间距等多特征	实时性强,多特征稳定性好	对训练样本敏感

4 未来发展趋势分析

近些年来,国内外的研究人员对高压线电磁散射特性得到了比较统一的认识,高压线检测算法也逐渐成熟,这为高压线检测技术的进一步发展、低空飞行的安全保障奠定了更坚实的基础。纵观上述的研究进展,结合高压线检测在信号增强及杂波抑制的技术难点,从未来信息的获取途径、维度和深度等方面扩展,毫米波雷达高压线检测技术未来值得重点关注的方向主要有:

第一,多传感器信息融合检测。随着未来高压线的探测需求不断提高,单一传感器的信息承载量难以满足探测要求,融合 GPS^[28]、光学、红外、激光和毫米波等多传感器的高压线探测系统是未来的发展趋势之一。如何协调不同传感器之的工作,在不同层次上对多传感器的数据进行融合,最大限度发挥多传感器的探测优势,确保系统高效稳定工作是后续要考虑的问题。

第二,基于自主学习的智能化探测。现有基于特征分类的高压线检测算法都是通过提取已知目标特性完成检测或识别处理的,这实际是一种监督学习分类的方法。这样的识别分类方法需要人工选取目标样本,花费大量人力的同时也限制了机器的学

习能力。自主学习方法不再被动地接受信息,而是主动询问对用户有价值的信息进行标记学习^[29],例如:通过学习获得不同杂波环境、不同目标的回波特性,用于调整波形、扫描策略及高压线的检测算法等。通过这一途径可突破传统的检测方法的瓶颈,完成对探测环境和探测目标的学习,达到智能化检测高压线的目的。

第三,基于深度信息的高压线检测。深度信息最早是从计算机视觉引入的,其研究内容是由多幅二维平面图恢复出三维空间信息^[30]。目前的高压线检测算法大都是基于一维信息或是二维信息完成的,若能恢复探测区域的三维信息,进行目标信息的提取,立体匹配或是识别处理,就如同视觉系统中看到了高压线一般,这将极大地提高探测能力。基于深度信息的高压线检测其研究重点是三维信息的获取、三维特征的提取和立体的匹配识别算法等。

5 结束语

毫米波雷达高压线检测技术是低空防撞领域备受关注的研究内容,检测性能的优越与否对于飞行器低空飞行的安全起到了至关重要的作用。近年来随着高压线检测技术研究的不断深入,已完成了多个方面多个角度的探索。本文围绕高压线检测技术的发展现状,重点分析了高压线电磁散射特性、高压线检测系统和高压线检测算法三个方面的研究进展,并提出了未来的研究方向,希望可以对高压线检测技术的发展提供帮助。

参考文献:

- [1] 何晓晴,徐永胜. 直升机毫米波防撞雷达的发展与应用[J]. 电讯技术,2006,46(3):15-19.
HE Xiaoqing, XU Yongsheng. Development and application of helicopter-borne millimeter wave collision avoidance radars[J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(3):15-19. (in Chinese)
- [2] 石星. 毫米波雷达的应用和发展[J]. 电讯技术,2006,46(1):1-9.
SHI Xing. Application and development of millimeter-wave radars[J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(1):1-9. (in Chinese)
- [3] 王家秀. 直升机载毫米波防撞系统技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2011.
WANG Jiayou. Study on techniques of helicopter-borne millimeter radar collision avoidance system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] 喻江波. 毫米波雷达对电力线检测的关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.

- YU Jiangbo. Study on key technologies of power line detection for millimeter radar[J]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] AL-KHATIB H H. Laser and millimeter-wave backscatter of transmission cables[J]. SPIE, 1981, 300(6):212-229.
- [6] SARABANDI K, PIERCE L, OH Y, et al. Power lines: radar measurements and detection algorithm for polarimetric SAR images[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1994, 30(2):632-642.
- [7] SARABANDI K, PARK M. Millimeter-wave radar phenomenology of power lines and a polarimetric detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(12):1807-1813.
- [8] SARABANDI K, PARK M. Extraction of power line maps from millimeter-wave polarimetric SAR images[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(12):1802-1809.
- [9] YAMAGUCHI H, KAJIWARA A, HAYASHI S. Radar cross section measurements for collision avoidance with power transmission line at millimeter-wave frequencies[C]//Proceedings of 1999 IEEE Radar Conference. Waltham, Massachusetts: IEEE, 1999:148-153.
- [10] FUTATSUMORI S, KOHMURA A, YONEMOTO N. Performance measurement of compact and high-range resolution 76 GHz millimeter-wave radar systems for autonomous unmanned helicopters[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2013, E96-C(4):586-594.
- [11] FUTATSUMORI S, MORIOKA K, KOHMURA A, et al. Evaluation of polarisation characteristics of power-line RCS at 76 GHz for helicopter obstacle detection[J]. Electronics Letters, 2015, 51(14):1110-1111.
- [12] MING C, CHI-CHIH C. RCS patterns of pedestrians at 76-77GHz[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2014, 56(4):252-263.
- [13] ZIEGLER V, SCHUBERT F, SCHULTE B, et al. Helicopter near-field obstacle warning system based on low-cost millimeter-wave radar technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 60(1):658-665.
- [14] YAMAMOTO K, YAMADA K. Millimeter wave radar for the obstacle detection and warning system for helicopters[C]//Proceedings of 2002 IEEE Radar Conference. Massachusetts, Boston: IEEE, 2002:94-98.
- [15] YAMAMOTO K, YAMADA K, et al. Power line RCS measurement at 94 GHz[C]//Proceedings of 2007 IET International Conference on Radar Systems. Edinburgh, UK: IEEE, 2007:15-18.
- [16] HELMUT E, STEPHAN B, GREGOR B, et al. On the scattering mechanism of power lines at millimeter-waves[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(9):1895-1903.
- [17] YAMAGUCHI H, KAJIWARA A, HAYASHI S. Power transmission line detection using an azimuth angular profile matching scheme[C]//Proceedings of 2000

- IEEE International Radar Conference. Alexandria, VA: IEEE, 2000; 787-792.
- [18] MA Q R, GOSHI D S, SHI H Y. An algorithm for power line detection and warning base on a millimeter-wave radar video [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20 (12): 3534-3543.
- [19] 卫青春, 杨晓亮, 赵华敏. 直升机防撞系统的电力线检测方法[J]. 无线电工程, 2012, 42 (12): 36-38. WEI Qingchun, YANG Xiaoliang, ZHAO Huamin. Detection method of power lines for helicopter collision avoidance system [J]. Radio Engineering, 2012, 42 (12): 36-38. (in Chinese)
- [20] MA Q R, GOSHI D S, BUI L. An algorithm for radar power line detection with tracking [C] // Proceedings of 2012 Asia Pacific Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference. Hollywood, California: IEEE, 2012; 1-4.
- [21] NILS G, PAUL B, SERGIO M. Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors [J]. IEEE Access, 2015 (3): 599-609.
- [22] 杨威, 付耀文, 潘晓刚, 等. 弱目标检测前跟踪技术研究综述 [J]. 电子学报, 2014, 42 (9): 1786-1793. YANG Wei, FU Yaowen, PAN Xiaogang, et al. Track-before-detect technique for dim targets: an overview [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42 (9): 1786-1793. (in Chinese)
- [23] LEI X, HONG Z, CHAO W, et al. High-voltage transmission towers detection using hybrid polarimetric SAR data [C] // Proceedings of Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications. Changsha: IEEE, 2014; 353-356.
- [24] 邓少平, 张继贤, 李平湘, 等. 霍夫域极化相干性的雷达影像电力线检测 [J]. 测绘科学, 2015, 40 (2): 66-71. DENG Shaoping, ZHANG Jixian, LI Pingxiang, et al. Power line extraction from SAR imagery using polarimetric coherence in Hough domain [J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40 (2): 66-71. (in Chinese)
- [25] WEI X Z, ZHANG R, DENG B. A recognition algorithm for high voltage transmission lines at horizontal polarization millimeter-wave radar [C] // Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Information and Automation. Zhangjiajie: IEEE, 2008; 1172-1175.
- [26] ZHANG J, SHAN H, CAO X, et al. Pylon line spatial correlation assisted transmission line detection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50 (4): 2890-2905.
- [27] SHAN H, ZHANG J, CAO X. Power line detection using spatial contexts for low altitude environment awareness [C] // Proceedings of 2015 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference. Rome, Italy: IEEE, 2015; 2-10.
- [28] SUMAN S, ASHUTOSH N, SONI A. A real-time monocular vision-based frontal obstacle detection and avoidance for low cost UAVs in GPS denied environment [C] // Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology. Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2014; 189-195.
- [29] 王剑桥, 李跃华, 罗磊. 基于主动学习的毫米波距离像识别算法 [J]. 微波学报, 2012 (增 1): 271-275. WANG Jianqiao, LI Yuehua, LUO Lei. Millimeter wave range profile recognition algorithm based on active learning [J]. Journal of Microwaves, 2012 (s1): 271-275. (in Chinese)
- [30] 杨磊, 蔡纪源, 任衍允, 等. 一种基于深度信息的障碍物检测方法 [J]. 计算机技术与发展, 2015, 25 (8): 44-47. YANG Lei, CAI Jiyuan, REN Yanyun, et al. A method of obstacle detection based on depth information [J]. Computer Technology and Development, 2015, 25 (8): 44-47. (in Chinese)

作者简介:



罗旌胜 (1987—), 男, 福建永安人, 2013 年于电子科技大学获硕士学位, 现为工程师, 主要从事雷达防撞技术和信号处理的研究;

LUO Jingsheng is born in Yong'an, Fujian Province, in 1987. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2013. He is now an engineer.

His research concerns radar collision avoidance and signal processing.

Email: 362046864@qq.com

贺治华 (1973—), 男, 河北沧州人, 2005 年于国防科技大学获博士学位, 现为高级工程师, 主要从事雷达目标识别和雷达防撞技术的研究;

HE Zhihua is born in Cangzhou, Hebei Province, in 1973. He received the Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2005. He is now a senior engineer. His research concerns radar target recognition and collision avoidance.

熊伟 (1984—), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 南京航空航天大学博士研究生, 主要从事雷达图像目标识别的研究;

XIONG Wei is born in Xinyang, Henan Province, in 1984. He is now a senior engineer and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns radar image target recognition.

陶飞翔 (1990—), 男, 江苏如皋人, 2015 年于南京航空航天大学获硕士学位, 主要从事雷达目标识别的研究。

TAO Feixiang is born in Rugao, Jiangsu Province, in 1990. He received the M. S. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2015. His research concerns radar target recognition.