

# 基于自动化采煤设备定位系统应用研究

安文利, 李国强, 孙炜歆

(国能宝日希勒能源有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

**摘要:** 介绍了一种基于雷达的长壁采煤机械定位系统, 该系统基于雷达测距传感器, 用于确定采矿设备相对于矿山煤巷基础设施的位置, 通过试验验证了使用雷达传感器进行定位的合理性; 为了从单个雷达信号中估计两个关键的定位参数, 即沿轨位置和跨轨位置, 研究了几种概率数据处理技术, 对于跨轨位置, 传统的卡尔曼滤波方法足以实现可靠的估计, 对于沿轨位置估计, 必须通过跟踪算法来识别煤巷肋墙上的特定基础设施元素, 我们在三维交互显示中探索了一种新的可视化分析方法以方便识别重要特征用于分类器算法, 基于分类器的输出, 使用已识别的元素作为位置路径点, 可以提供一个稳定和准确的采矿设备定位估计。

**关键词:** 定位; 路标导航; 机器学习; 雷达; 地下; 长壁采矿; 自动化

## Application and Research on Positioning System Based on Automatic Coal Mining Equipment

AN Wenli, LI Guoqiang, SUN Weixin

(State-owned Baorixile Energy Co., Ltd., Hulunbuir 021000, China)

**Abstract:** A long wall coal mining machinery positioning system based on radar is introduced, the system is based on radar ranging sensor to determine the position of mining equipment relative to mine coal roadway infrastructure. The positioning rationality by using the radar sensor is verified by the experiment. In order to estimate two key positioning parameters from single radar signal, i. e. along track position and cross track position, several probabilistic data processing technologies are studied. For the cross track position, traditional Kalman filtering is enough to achieve reliable estimation. For the along track position estimation, specific infrastructure elements on the rib wall of coal roadway must be identified by tracking algorithm. A new visual analysis method in 3D interactive display is explored to facilitate the identification of the important features for the classifier algorithm. On the basic output of classifier, the identified elements are taken as the location path points, can provide a stable and accurate location estimation of mining equipment.

**Keywords:** positioning; landmark navigation; machine learning; radar; underground; longwall mining; automation

## 0 引言

煤矿是我国工业生产的主要能源之一, 对促进社会经济发展也起着十分重大的作用<sup>[1]</sup>。尽管近年来风能、核电、水电、地热、石油等能源的消费占比在不断提升, 但是已开采利用了上千年的煤炭资源依然有着不可替代的位置, 依然是当今工业能源最大需求商品之一。据国家统计局发布的中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报, 2021 年全年规模以上工业中, 原煤产量 41.3 亿吨, 在未来很长一段时间内, 煤炭仍是中国的主体能源, 同时, 我国也是一个煤矿灾害多发的国家<sup>[2]</sup>, 据国家统计局发布的中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报, 2021 年各类生产安全事故共死亡 26 307 人, 工矿商贸企业就业人员 10 万人生产安全事故死亡人数 1.374 人, 煤矿百万吨死亡人数 0.045 人, 因此对于采矿作业, 特别是地下采矿作业存在的固有危险<sup>[3]</sup>, 如矿井高瓦斯、高潮湿、视线昏暗以及片帮脱落、塌方等危险源, 使得发生矿井事故具有不确定性。使得人们对采矿自动化的需求日益增长。但

是由于生产环境的相对非结构化性质以及随之而来的设备精确监测方面的困难<sup>[4]</sup>, 使得采矿自动化技术发展缓慢。地表采矿现在采用 RTK-GPS 和广泛的无线通信系统来协助准确定位设备, 煤矿井下由于环境特殊且条件恶劣, GPS 等地面应用较多的导航定位系统无法在井下完全发挥作用<sup>[5]</sup>, 现有的矿下定位方法研究内容主要为井下人员定位, 如基于 WiFi 无线通信的煤矿井下人员定位系统<sup>[6]</sup>、基于 LoRa 的煤矿井下人员定位系统<sup>[7]</sup>, 以及煤矿井下超宽带 (UWB) 人员定位系统<sup>[8]</sup>等, 而对于采煤机械的定位研究就少, 为了在长壁采煤中实现连续自主开采, 必须解决的一个重要问题是测量作业周期内采矿设备特定部分的位置或方向的微小变化。

需要测量和跟踪的关键参数是跨轨位置和沿轨位置, 长臂后退是长壁工作面进入未开采的煤层的过程, 同时, 随着采矿的进行, 地质和设备的相互作用造成了长壁工作面的压力变化, 导致工作面设备逐渐侧滑进煤巷, 这就产生了长臂徐变, 这种侧向运动是不利的, 如果不加以控制,

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-07-05。

作者简介: 安文利(1969-), 男, 河北新城人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事煤矿机械方向的研究。

引用格式: 安文利, 李国强, 孙炜歆. 基于自动化采煤设备定位系统应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 147-152.

可能会导致长壁设备最终撞上煤巷肋，使工作面停止。后退和徐变对应了采矿设备的沿轨和跨轨位置，煤巷机械的准确定位能够改善长壁工艺的管理，整个矿区内的相对定位和绝对定位都是至关重要的。来自工厂车间的传统闭环自动化技术通常对关键设备参数具有高度的确定性，而这在采矿环境中往往不能实现，因此，基于数据分析的概率方法在管理和自动化挖掘方面显示出巨大的潜力，在此背景下，本文研究了一个稳定和精确的设备定位系统。

## 1 定位系统所用传感器

### 1.1 用于位置测量的传感器

由于煤矿开采需要在地下进行，工作环境存在较多的不确定性，造成相关数据收集的延迟。因此需要采用精准的定位系统技术被应用到煤矿开采工作当中，通过精准的定位技术为开采工作提供技术支撑。为了实现精确的定位，人们在各种采矿环境中考虑了各种传感技术<sup>[9]</sup>。相对定位技术，如激光扫描仪和基于雷达的传感器，已应用于类似的非采矿领域。对于绝对定位，由于地下缺乏普遍的定位基础设施，导致了替代技术的使用，特别是分布式传感器网络。作为高精度的应用，惯性导航系统<sup>[10]</sup>已被澳大利亚的 CSIRO 组织成功地应用于长壁和连续采煤的机器导引，目前煤矿开采中较为常见的是长壁采煤法<sup>[11]</sup>，它分为后退式和前进式两种情况，长壁开采过程中主要有未开采区、采空区、长臂工作面、长臂板等区域，煤从长壁工作面开采出来，通过主煤巷运至地表，长壁工作面采矿设备向前移动，进入采煤后留下的空穴，当工作面后退时，设备后面的顶板倒塌，不稳定的采空区留在后面。然而，即使是高端的惯性系统，对于位置估计精度也容易随着时间的推移而发生改变，因此需要一个外部参考传感器，通过周期性地修正惯性估计来对这个误差源设定一个界限。

激光传感器是一种具有高速度、高效率和高精度的光学非接触测量方法，它具有结构简单，测量方便可靠等特点。早已经应用于各领域，在测量方面的应用也越来越广泛，其中，基于线结构光原理的激光扫描传感器具有结构简单、测量方便可靠等优点，在长壁采煤自动化的背景下，一种激光扫描传感器<sup>[12]</sup>已经被用来进行位置校正，但这个方案费用高，需要一个大型防爆盒来容纳激光扫描器，以便在地下煤矿的易爆环境中安全运行。更重要的是，激光扫描仪的测距性能很容易因空气中或表面灰尘的存在而降低，当有水存在时，其表面就会迅速被一层不透明的泥浆覆盖，完全遮住仪器的视野，如图 1 所示。

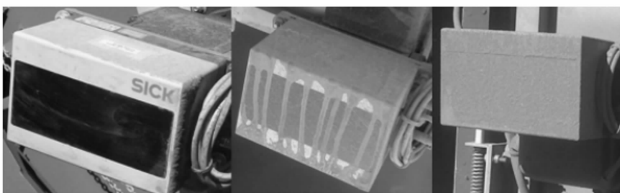


图 1 采矿作业中激光扫描仪表面被泥浆层覆盖

### 1.2 基于雷达的测量传感器

鉴于雷达在多尘环境中的优越性能，有人提议将基于雷达的传感器作为更合适的外部参考测量系统进行试验<sup>[13]</sup>，本文研究了各种概率数据分析技术对原始雷达数据的应用以确定是否可以提取足够的信息，为生产环境下的长壁徐变和后退提供有用的监测，有关长壁徐变细节如图 2 所示。在这两种测量中，徐变是更直接也是更关键的测量，因为它提供了设备和隧道墙之间潜在碰撞的直接反馈。后退测量更困难，因为需要根据相邻肋壁目标识别的间接推断来跟踪长壁设备的沿轨位置，但是在典型的煤巷中没有稳定的沿轨目标。本研究将无处不在的顶板和肋结构螺栓以及它们的大板垫圈视为强大的雷达目标，并通过一系列的测试和试验来验证该方法的可行性。针对这一应用开发的特定雷达系统改自 Endress-Hauser FMR 250 工业雷达液位传感器，这种传感器能在易爆环境中使用，这是煤矿井下富甲烷环境中电气设备运行的关键要求<sup>[14]</sup>。

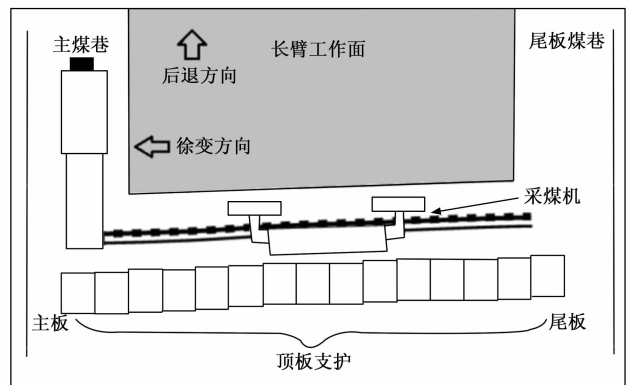


图 2 显示徐变和后退的长壁工作面细节图

## 2 系统试验

### 2.1 雷达系统初始测试

最初的雷达测试是在地面上进行的。雷达装置安装在装满煤的盒子上的可移动龙门架上，以便在采煤坑的各个点进行测量，测试包括到煤表面的基本测距，以及基于煤表面上通常会在矿井环境中遇到的各种目标的雷达响应变化的详细分析。

雷达传感器的第一次现场测试是在内蒙古一个地下煤矿的废弃部分进行的，目标是煤巷肋墙的很小部分，只扫描了 3 个连续的螺栓板，肋壁表面没有任何杂乱，这为测试提供了理想的条件，为了进行传感器的全现场试验，需要在更现实的条件下包括存在管道、标识和在典型煤矿中存在的其他金属结构进行试验。

### 2.2 矿井试验现场描述

接着在一个已投入使用的长壁矿井中使用预生产煤巷进行现场试验，试验场地是一条 50 米长的煤巷，测试在两条直通之间进行，这是一个理想的试验地点，因为有直通是所有地下煤矿巷道的共同特征。直通是一个非常明显的检测特征，它们的位置能被精确测量，因此它们可以用作任何累积定位错误的修正点，测试地点的巷道开发在试验

时已经完成, 其中包括所有典型的矿场基础设施, 如液压系统、标识和配电系统。

### 2.3 传感器平台系统

地下试验采用了一套完整的传感器硬件, 如图 3 所示, 将仪器放置在与煤巷采煤机械相同的高度, 同时开发了一系列定制的软件应用程序, 以从各种传感器中获取和同步数据。

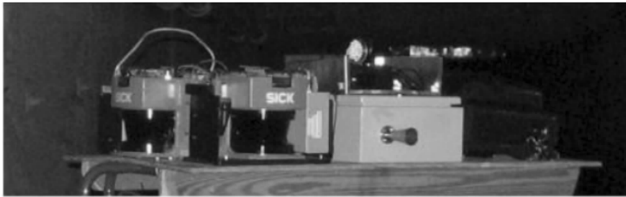


图 3 测试平台上的传感器组件 (雷达盒在右侧)

试验中使用的传感器有:

- 1) 主要雷达单元, 基于 26 GHz Endress-Hauser 仪器, 如第 1 节所述。
- 2) 三台 SICK LMS 200 激光扫描仪, 两台安装在安装在侧面, 扫描隧道壁, 第三台安装在行驶方向。
- 3) 一种在地下使用的低照度摄像机。
- 4) 数据采集笔记本电脑。

实时数据采集系统对来自雷达和激光扫描仪的数据进行时间同步, 允许快速的后处理、比较分析和数据融合。试验后的数据处理在 Matlab 中进行, 但数据存储和检索协议最终集成到现有的实时长壁自动化软件系统中。

### 2.4 系统测试的说明

现场试验进行了两天, 在距离肋墙不同偏移距离处, 沿着确定的煤巷进行了一系列测量。关于煤巷的一个值得注意的特点是, 在煤巷的与直通通道的同侧肋墙上, 存在着大量的矿山服务设施如水、电和通风系统, 隧道的另一侧肋相对干净, 这种服务侧肋和清洁侧肋的对比在地下矿井中很常见, 这为研究这两种情况下的雷达传感器性能提供了一个很好的机会。面向两侧和不同偏移距离进行了多次单独的测试, 在两天的测试期间, 总共获得了 26 个数据集。

在大部分测试中, 雷达传感器定位在测试小车沿轨道 90°方向, 传感器直接指向肋壁, 以提供徐变距离的直接测量。这段矿井的肋壁没有被钢网覆盖, 由于金属网为雷达传感器提供了一个额外的杂波源, 因此也对沿着试验道路的整个试验长度的顶部进行了额外的扫描, 进行这些额外的扫描, 是为了确保能够生成一个真正具有代表性的数据集, 其中包含了绝大多数地下煤矿中遇到的最常见的顶板和肋壁条件。

## 3 试验结果

激光和雷达数据都在每次试运行后立即进行初始显示, 原始的雷达数据由雷达信号的“包络曲线”组成, 通过滤波消除了发射和接收电路之间的增益偏差和串扰等伪影信号。然后, 单个雷达轨迹被叠加, 形成雷达输出的三维时变显示。图 4 显示了在距肋墙 4 米的偏移距离下雷达测试的

典型结果。在图中可以看到的两个显著特征是主信号明显空隙对应着一条直通和主信号的频繁峰值对应螺栓板。这两个特性对于测量沿轨道距离是有价值的。

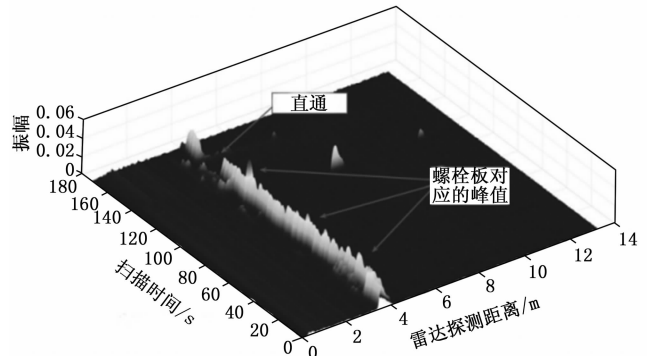


图 4 一段带直通的煤巷雷达数据

激光扫描仪的输出用于提供地面真实测量值, 以便与雷达数据进行比较。通过合并来自前置扫描仪的数据, 评估出一个煤巷区段的平面图, 如图 5 所示, 它显示了用于测试的界定区域的两条路径, 测试段的长度约为 50 米, 宽度为 5 米。此外, 使用激光扫描仪进行了几次测试, 以捕获煤巷肋和巷顶的整个表面, 进行这些扫描是为了得出更完整的矿山环境图像, 并为试验一些雷达/激光数据融合技术提供了机会。由激光扫描仪数据建立的巷顶的详细截面如图 6 所示, 图 6 中的变化对应于激光器的扫描范围。

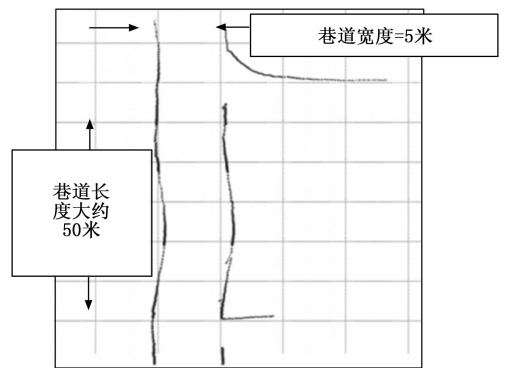


图 5 测试现场煤巷区段平面图

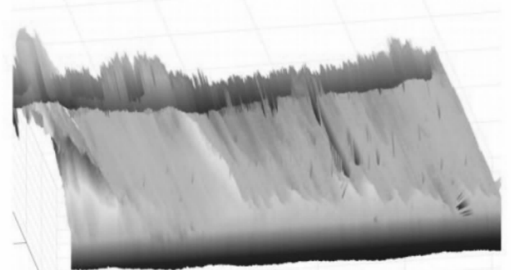


图 6 带网格的详细巷顶部分的激光图

## 4 分析和讨论

### 4.1 初步雷达处理和徐变测量估计

雷达传感器原始数据的首次处理为分离每个雷达轨迹

的最大回波位置和振幅，这一特征对应于肋壁的反射，因此可用于提供徐变估计，它还应由于煤巷螺栓板的存在而有所不同，从而为后退测量提供路径点参考。图 7 所示为堆叠的原始雷达轨迹数据、到最大回波点的距离以及每条轨迹回波的最大振幅。从图 7 中可以清楚地看出原始最大回波雷达数据相当有噪声，因此需要进行滤波以获得徐变的合理位置估计。移动平均<sup>[15]</sup> (MA) 滤波是一种滤除信号中高频尖峰脉冲 (干扰或频繁随机起伏) 的简捷而有效的滤波方式，其实质是对信号波形的平滑处理，卡尔曼滤波器<sup>[16]</sup> (KF) 主要利用被提取信号的预测值和测量值，采用迭代方法得到被测信号的估计值。由于迭代过程中消减了系统的量测噪声和过程噪声，因此卡尔曼滤波器 (KF) 可以对被测信号进行精确估计，可以用于解决随机信号以及噪声的功率谱不稳定、多维、时变、非平稳等问题。因此采用移动平均滤波和卡尔曼滤波对最大回波雷达距壁估计进行平滑处理，如图 8 所示。正如预期的那样，一个调整良好的卡尔曼滤波比 MA 滤波提供了更好的徐变距离估计，对范围内的快速变化的反应比 MA 滤波在一个合理的窗口大小下可以做的更平稳，卡尔曼滤波结果与从激光扫描仪数据获得的徐变估计更匹配。

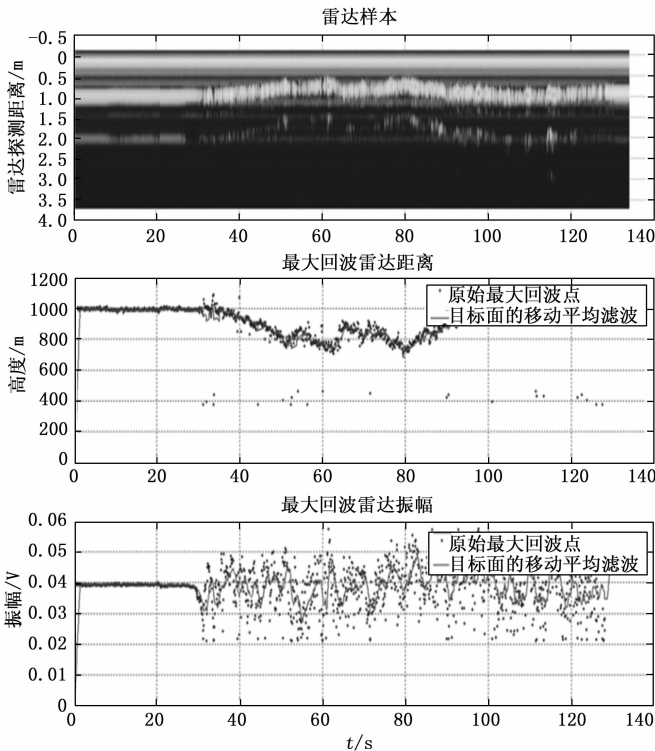


图 7 原始雷达数据、最大回波距离和最大回波振幅

对从卡尔曼滤波中获得的徐变位置估计值和指向与雷达传感器相同肋壁的激光扫描仪的数据进行了比较。激光扫描仪生成了一个离散点的二维扫描线而不是像雷达那样进行单点测量，对于徐变估计，激光数据未经处理，在数据采集电脑上雷达轨迹进行同步。图 9 中显示了在小车与矿壁公称偏移 1 米处运行 50 米时典型系统徐变的对比，当

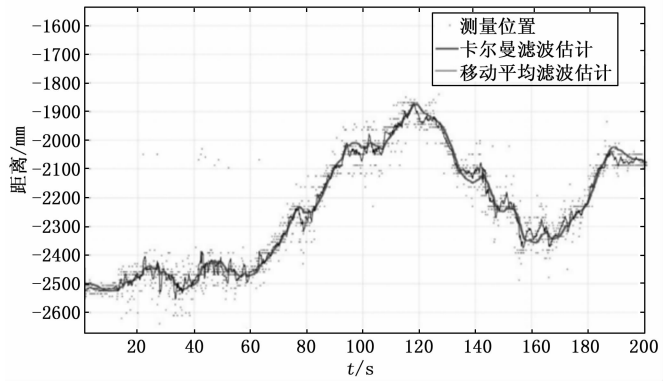


图 8 徐变位置估计，KF 和 MA 滤波器基于原始雷达信号滤波的比较

雷达传感器与调谐好的滤波器结合时，与激光扫描数据有良好的相关性，其性能超过了基本徐变测量应用的精度要求，这一结果在现场试验生成的多个数据集中非常一致。

尽管在巷顶上存在网格，但是从原始巷顶扫描数据中提取的煤巷高度测量也得到了较好的结果，巷顶的雷达与激光扫描的对比结果如图 10 所示，两个结果之间的相关性非常好。

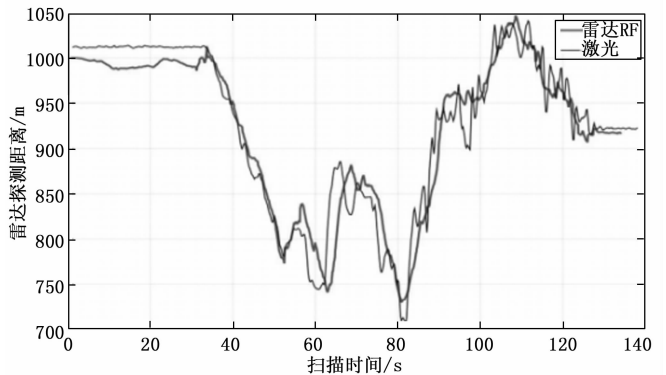


图 9 雷达徐变测量与激光扫描仪数据的比较

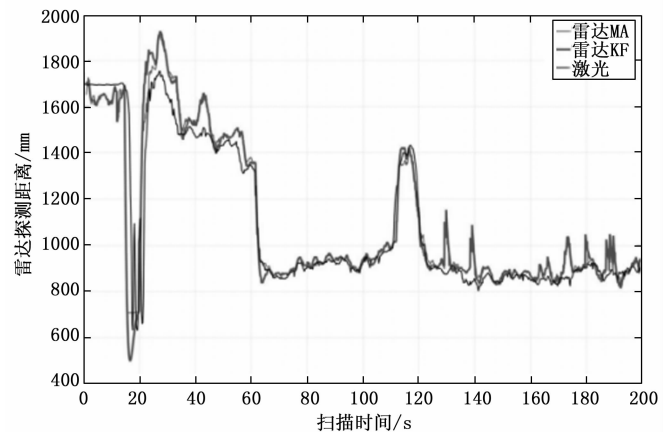


图 10 雷达巷顶高度测量与激光扫描仪数据的比较

### 4.2 煤巷高度测量的扩展试验

徐变测量技术接着被应用于内蒙古一个地下矿山的长臂煤巷，目的是测量煤巷的高度，在这次试验中测量的煤

巷长度超过 500 米, 雷达和激光扫描仪数据均用于验证, 从得到的煤巷高度测量试验的雷达和激光数据可知, 在大部分的煤巷上, 雷达和激光数据之间的相关性相当强, 主要的偏差是由于灰尘对激光扫描系统的影响, 蓝色激光数据的较大的垂直偏差发生在激光扫描仪防爆盒被灰尘或泥浆模糊, 导致对传感器的估计不准确直到被清洗。这一结果证明了基于雷达的传感方法的优势, 雷达安装在与激光扫描仪相邻的封闭装置中, 而不受有效蒙蔽激光的相同灰尘条件的影响, 而且激光扫描仪的结果会受到巷顶局部坑洼的影响发生微小偏差导致高估巷顶高度, 使用雷达技术则不会, 这种扩展试验也表明雷达技术在实际采矿环境中使用是相当稳定的。

#### 4.3 后退测量估计

后退测量系统基于对螺栓板的识别, 并使用这些特性作为定位的参考路径点。锚杆支护技术<sup>[17]</sup>在煤矿掘进巷道中的应用最为常见, 因为它们构成了防止巷道塌方的主要支撑, 利用这种技术, 可以充分利用矿井原岩的应力, 使其与支护强度同步, 防止围岩松动、脱落。因此, 在矿井掘进巷道中, 运用支护技术可以极大地提高巷道的安全、稳定, 既能保证工人的生命财产安全, 又能保证施工单位的经济利益, 因此, 在矿井中使用锚杆支护技术时, 支护人员会根据巷顶顶板的位置, 设计出科学、安全的间距来布置锚杆, 因此煤巷的螺栓数量是一个已知的参数, 通过跟踪前一次直通后所遇到的螺栓数量, 可以准确地估计出采煤机沿轨迹的位置。图 11 显示了侧面雷达对服务侧肋墙的原始最大回波输出, 以及 MA 滤波和 KF 滤波结果。KF 滤波的优越性非常显著, 该滤波器的响应能更紧密地跟踪螺栓板与背景煤之间的快速变化, 提高了识别效果。

虽然图 11 中的结果较好, 但进一步检查发现, 峰值的数量与煤巷肋测试段中存在的螺栓数量 (40 个) 并不相同。虽然一些螺栓板提供了强烈的反射, 因此产生了最大的信号振幅, 但在有些情况下, 螺栓板与背景煤的对比不足以进行识别。由于来自板块结构的强散射和其他重要的散射源, 将构成不必要的雷达杂波<sup>[18]</sup>, 使探测和测量过程进一步复杂化, 因此为了成功区分螺栓板和其他结构甚至煤墙本身, 识别螺栓板的强相关特征成为研究的重要内容。

#### 4.4 特征选择的可视化分析

由于检测环境的复杂性, 识别目标的一致特征并不容易, 本文采用了一种新的数据融合和视觉分析方法, 即将激光扫描仪和雷达数据结合在一个三维交互式显示器中, 以方便检查重要特征, 在试验过程中, 激光装置扫描捕获煤巷肋和巷顶的整个表面, 利用激光和雷达传感器之间的同步, 雷达返回的信息可以覆盖在激光数据的高分辨率点云结构上。由此产生的三维表面允许将雷达数据与激光扫描仪显示的物理表面结构进行详细的对齐检查<sup>[19]</sup>, 如图 12 所示, 通过调整雷达回波覆盖在投影肋壁结构上的部分, 可以得到雷达回波的不同方面的变化, 并与激光点云里的特定特征相联系, 特别是螺栓板。

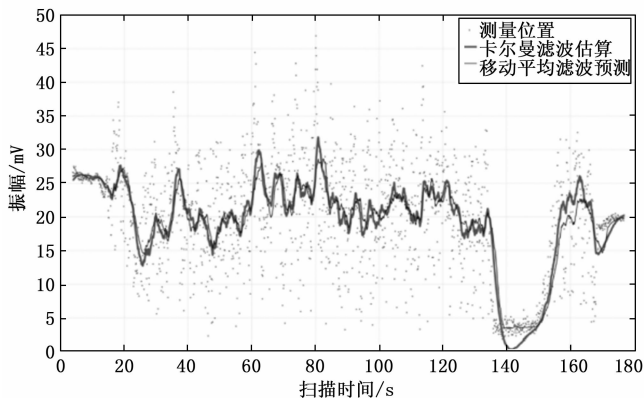


图 11 使用 KF 和 MA 滤波的最大振幅回波点

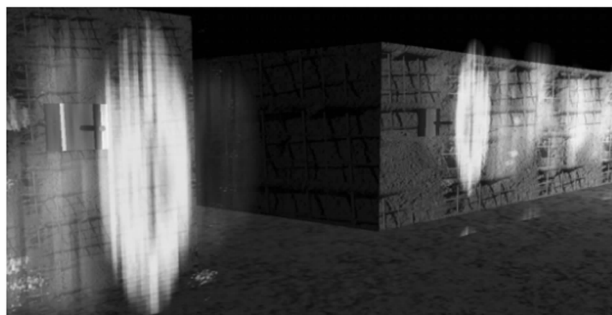


图 12 基于雷达数据叠加激光点云的矿井结构可视化分析

将这种可视化数据融合方法应用于矿场试验的激光和雷达数据集, 使雷达返回的信息投影到由激光扫描仪数据生成的三维表面上, 图 13 显示了巷顶截面的组合信息, 在图 13 中, 各种雷达目标的强反射清晰可见, 并且可以很容易地识别出它们与激光数据特定特征的对应关系, 如螺栓板和其他基础元件。雷达和激光数据的结合提供了一种强大的机制来表征对应于螺栓板目标的特定雷达数据集特征, 这也是进行后退测量路径点跟踪的主要特征。

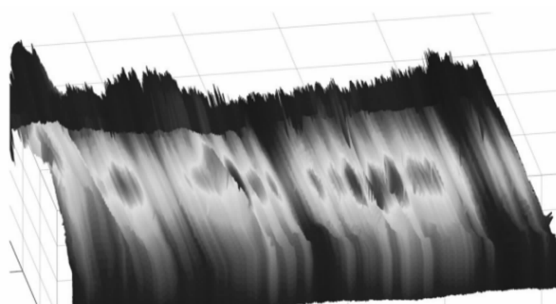


图 13 覆盖雷达振幅的三维巷顶表面

#### 4.5 探索可视化分析的特征生成

通过将不同的特征集整合到可视化分析方法中, 可以实现对螺栓板位置估计的进一步改进, 例如, 通过使用共振频率目标识别方法, 可以显著的缓解基于信号强度的目标识别方法的模糊性, 具有显著的面无关成像特性。利用该技术提取的特征可以结合到分类器算法<sup>[20]</sup>中进一步细化识别结果, 随着互联网的发展, 分类器算法在不同行业内的应用越来越多, 各种分类器已经试验用于处理雷达数据, 常见的分类算

法有朴素贝叶斯、K 近邻、决策树等，其中决策树<sup>[21]</sup>结构允许规则的简单实现，具有过程清晰、理解和解释起来简单方便、且准确性高等优点<sup>[22]</sup>，是一种适合使用的算法，决策树算法在进行分类时，先计算选出一种属性，将其放置到决策树的根节点上，然后再由该点划分出多个分枝，分别表示一种不同的分类特性，并将其与新的决策点相连，以上的步骤可以在这些决策点上反复进行，直到达到一个无法再向下分的时候为止，最好可以根据最终点的个数和属性来判断样本的类别。如图 14 所示，该技术具有明显的优势，任何关于煤巷配置和/或设备的结构层次的先验信息都可以有意义地纳入，以提高检测和估计的准确性。

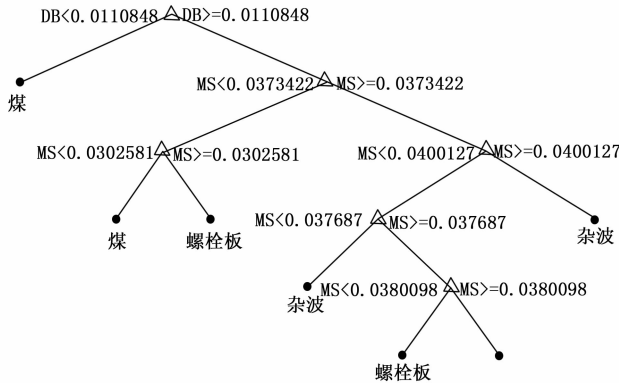


图 14 分类螺栓板、煤和杂波的决策树

#### 4.6 定位的实现

由前文可知实现长壁采煤机械定位需要测量和跟踪的关键参数是跨轨位置和沿轨位置，为了估计跨轨运动（徐变）和沿轨运动（后退），数据分析主要内容是寻求从原始雷达信号数据中分离这两个独立参数的方法。原始数据显示的初始处理在第 3 节中已有介绍，并且由第 2 节和第 3 节的实验结果可知，所用到的雷达系统是非常可靠的。而用于提取关键的两个参数的技术在第 4 节中已有讨论，通过 4.1 节和 4.3 节可得到徐变测量估计和后退测量估计，同时为了进一步展示雷达技术相对于激光扫描仪的优越性，即不会被灰尘和巷顶局部坑洼的影响，实验中进行了煤巷高度测量的扩展试验。后退测量系统主要基于对螺栓板的识别并使用这些特性作为定位的参考路径点，因此为了在复杂的检测环境中更加准确识别目标的一致特征，提出了一种新的数据融合和视觉分析方法，该方法可以很容易地识别出螺栓板和其他基础元件的特征，为了实现进一步提高螺栓板位置估计的准确性，介绍了一种分类器算法，该方法能更准确分类螺栓板、煤和杂波。

#### 5 结束语

我们描述了一种新的基于雷达的地下矿机定位系统。该方法通过利用地下采矿环境中已经存在的采矿结构来生成特征丰富的雷达信号回波，从而避免了安装额外的参考基础设施。探索了不同的概率数据处理技术，以提供设备沿轨和跨轨位置的估计。这些估计随后通过使用激光扫描仪进行验

证，发现结果非常一致。这些试验的成功促进了一种改进系统的开发，该系统现在已经准备好集成到一个运作的矿山机械自动化系统中。目前正在努力改进分类器算法的性能，以便将这些结果合并到一个自动化操作系统中。

#### 参考文献：

- [1] 刘 韬, 周 毅. 基于 ZigBee 的煤矿井下甲烷浓度检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 68-70, 75.
- [2] 施赛杰, 俞阿龙, 韩 浩, 等. 基于 ZigBee 的煤矿井下预警防爆监测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2669-2672.
- [3] 徐宝国. 采矿过程中存在的危险技术因素与应对措施 [J]. 民营科技, 2015 (3): 21.
- [4] 周仁斌. 基于 UWB 技术的煤矿井下人员精确位置监测系统 [J]. 煤矿机械, 2022, 43 (6): 181-184.
- [5] 贺建伟. 煤矿井下连续采煤机定位方法研究 [J]. 工矿自动化, 2021, 47 (10): 42-48.
- [6] 许 峰. 基于无线通讯的煤矿井下人员定位系统设计应用 [J]. 机械研究与应用, 2022, 35 (1): 163-165.
- [7] 仲会娟, 刘 旭. 基于 LoRa 的煤矿井下人员定位系统设计 [J]. 廊坊师范学院学报 (自然科学版), 2022, 22 (1): 20-23.
- [8] 张海军, 孙学成, 赵小虎, 等. 煤矿井下 UWB 人员定位系统研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48 (2): 29-34, 41.
- [9] 张海涛. 煤矿智能化开采技术的创新与管理 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021 (8): 151-152.
- [10] 张仟雨, 杨文博, 吴亚丽. 惯性导航系统中信息处理的特点研究 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (24): 34-42.
- [11] 郭 阳. 煤矿采煤方法与技术的核心探析 [J]. 技术应用与研究, 2021 (19): 73-74.
- [12] 阮文惠, 李志浩, 黄 珍. 基于激光扫描的智能交通系统中运动目标检测跟踪研究 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (4): 50-54.
- [13] 马国英. 煤矿智能化开采技术质量研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41 (12): 177-178.
- [14] 梁运涛, 陈成锋, 田富超, 等. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49 (4): 40-48.
- [15] 黄进文. 移动平均滤波对 Logistic 混沌信号的影响 [J]. 保山学院学报, 2015, 34 (5): 18-21.
- [16] 熊 磊, 陈相全, 谢 晖, 等. 基于卡尔曼滤波的 PID 控制在 PLC 中的实现及应用 [J]. 现代电子技术, 2022, 45 (6): 5-8.
- [17] 原建波. 煤矿掘进巷道锚杆支护技术 [J]. 矿业装备, 2022 (1): 22-24.
- [18] 唐文武, 袁子乔, 赵 博. 雷达杂波建模与评估方法研究 [J]. 火控雷达技术, 2022, 51 (1): 87-91.
- [19] 花向红, 赵不飏, 陈西江, 等. 地面三维激光扫描点云质量评价技术研究与发展 [J]. 地理空间信息, 2018, 16 (8): 1-7, 9.
- [20] 肖 铮. 常用的 3 种分类算法及其比较分析 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2020, 22 (5): 101-106.
- [21] 邓晓林, 陈毅红, 王登辉. 大数据环境下决策树的研究 [J]. 太原师范学院学报 (自然科学版), 2021, 20 (2): 47-57.
- [22] 张良山, 田建恩, 张 哲. 基于 LBP 与 LSSVM 的数字图像分类算法 [J]. 液晶与显示, 2020, 35 (5): 471-476.