

煤矿井下人员精确定位系统基站布局优化与信号覆盖盲区消除研究

龙 鹏

天地（常州）自动化股份有限公司 江苏 常州 213000

【摘要】：煤矿井下定位系统在保障矿工安全与生产管理中起着关键作用。通过优化基站布局，可以有效提高定位精度，消除信号盲区。研究提出了一种基于井下环境的基站布局优化方案，通过合理配置基站数量与位置，有效克服地下复杂环境带来的信号衰减问题。实验结果表明，优化后的布局显著提升了定位系统的覆盖范围与精确度，能够及时发现人员位置并实现精确追踪。本研究为煤矿井下人员定位系统的实际应用提供了理论依据与技术支持。

【关键词】：煤矿井下；基站布局；精确定位；信号覆盖；盲区消除

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.037

引言

煤矿井下环境复杂，地下通道狭窄且多变，传统的定位系统常常面临信号盲区和定位精度不足的问题。这些问题直接影响到矿工的安全监测与应急响应。随着现代通信技术的不断发展，精确的人员定位技术成为保障煤矿安全的重要组成部分。如何在复杂的地下环境中实现高效、稳定的信号覆盖与精确定位，成为煤矿安全监控系统中的难点。为了解决这一问题，优化基站布局，消除信号盲区，提升定位系统的精度与可靠性，已经成为当前技术研究的重要方向。

1 煤矿井下定位系统的现状与挑战

1.1 井下定位技术发展历程

井下定位技术经历了从初期的人工标记与简单无线通信，到现代复杂的无线定位系统的演进。早期，煤矿井下定位依赖于人工监测和低精度的地面指挥系统，无法实时获取矿工位置。随着无线电技术的发展，基于超宽带（UWB）、射频识别（RFID）等技术的定位系统开始应用于煤矿，但这些系统受限于信号传播环境。进入 21 世纪后，基于传感器网络的多重定位系统逐渐得到应用，并利用精确的地理信息系统（GIS）支持，为矿工定位提供了更高的精度和可靠性。受井下环境影响，信号衰减、反射和多径效应等问题依旧未能完全解决。

1.2 传统定位系统的局限性

尽管传统的无线定位系统通过多种技术手段改进了精度，但煤矿井下的复杂环境仍然对定位精度产生了极大影响。矿井内多层的地质结构、复杂的通道布局以及大量的金属物体会导致信号的严重衰减与反射，使得定位系统存在较大的误差范围^[1]。现有系统多依赖于单一技术手段，往往难以适应矿井内快速变化的环境。在极限环境下，传统系统无法做到对所有矿工位置的准确、实时监控，导致部分盲区的产生，严重影响安全管理和紧急响应效率。

1.3 煤矿安全监控系统的需求分析

煤矿作业条件的日益复杂与安全管理要求的提高，对井下安全监控系统提出了更高的要求。为了有效防止煤矿事故的发生，实时监测矿工位置与作业环境变得尤为重要。安全监控系统不仅需要精确定位矿工位置，还需能够应对井下复杂多变的环境条件，保证在任何时刻都能够提供稳定的信号覆盖与准确的人员定位。对此，定位系统必须具备更高的抗干扰能力，优化基站布局与信号传输路径，以保证在井下多障碍的环境中，实现精确无盲区的全覆盖定位。

2 基站布局优化的理论基础与方法

2.1 基站优化算法概述

基站优化算法用于解决在煤矿井下有限空间内，如何合理配置基站位置，以最大化信号覆盖并减少盲区。常见的优化算法包括遗传算法、粒子群优化（PSO）算法和模拟退火算法等。这些算法通过对基站布置的多次迭代优化，能够找到最优的基站位置分布。遗传算法通过模拟生物进化过程进行搜索，适用于高维度的复杂问题；粒子群优化算法通过模拟鸟群觅食行为，快速收敛到全局最优解，适用于快速求解。模拟退火算法则通过模拟物理退火过程，避免陷入局部最优解，适合复杂的环境优化问题。这些优化算法在实际应用中，能够根据井下的具体地质条件与矿工作业需求，提供最合适的基站布局方案。

2.2 基站布局对定位精度的影响

基站的布局直接决定了井下定位系统的精度。基站之间的距离、相对位置及其覆盖范围，都会影响信号的传播与接收质量。过于集中或过于分散的基站布局均会导致定位精度的降低。密集的基站布置虽然能提供较好的信号覆盖，但容易产生信号干扰；而稀疏的基站布置则可能造成信号盲区，影响定位系统的可靠性。为了在复杂环境中实现高精度定位，必须在覆盖范围和信号强度之间找到平衡。基站布局的优化不仅是信号覆盖的任务，还包括提高定位精度和系统稳定性的综合目标^[2]。

通过合理优化基站的布局，可以有效降低系统误差，提高定位系统的精确度，确保矿井内矿工的实时监控与安全保障。

2.3 信号覆盖与盲区问题的解析

煤矿井下由于其特殊的环境，信号传播常常受到地质结构、矿井通道、设备和矿产材料等因素的影响，形成多个信号盲区。盲区的存在直接影响到人员定位的准确性与系统的可靠性。在某些深层或狭窄的矿道中，传统的信号覆盖方式无法满足需求，导致信号在这些区域的传播受到严重阻碍。针对井下信号盲区的消除问题，必须考虑信号的传播模型、衰减规律以及多径效应等因素。通过采用高精度的无线电频率设计、改进的信号传播算法和合适的基站配置，能够有效地减少或消除这些盲区。基站的高度配置、信号频率的选择以及传感器网络的布置，都对信号覆盖范围及盲区问题的解决起着至关重要的作用。

3 优化基站布局方案设计

3.1 井下环境分析与基站配置要求

煤矿井下环境复杂，井下空间狭窄且地质条件多变。矿井的通道多为弯曲且狭窄的隧道，井下设备和矿石的分布也会干扰信号的传播。进行井下环境分析时，必须考虑到这些环境因素的影响。井下信号传播通常受到墙壁、地面和天花板等物体的衰减、反射和多径效应的影响。基站配置要求基于这些环境因素，必须确保信号能够穿透复杂的地质结构，覆盖矿井的各个区域，尤其是重要的工作区域和紧急通道。基站的数量、功率、频率和安装位置等，都必须根据井下的实际需求进行精细化配置。为满足不同工作区域的需求，基站配置需充分考虑信号强度与信号衰减特性，避免因盲区造成定位系统失效。根据井下环境分析，合理设置基站功率和位置，确保系统的稳定性和高效性是基站布局的核心。

3.2 基站位置选择的优化策略

基站位置的选择不仅影响信号的覆盖范围，还决定着系统的定位精度。在煤矿井下，由于空间限制与障碍物的影响，选择基站的位置时要综合考虑多个因素。优化策略包括基站间距的合理设定，以确保信号能够均匀覆盖整个矿井。在选择基站位置时，考虑到井下的通道布局，避免高密度区域产生信号干扰，同时保证覆盖盲区最小化^[1]。矿井的深度与形状也是关键因素，基站的布置应尽可能避免信号的死角。通过应用优化算法，如粒子群优化（PSO）或遗传算法（GA），可以对不同配置方案进行评估，逐步寻找最优解。通过对基站部署的智能化优化，使得信号在井下环境中能够以最小的资源消耗覆盖最大的工作区域，同时提高定位精度，减少盲区的产生。

3.3 优化设计的数学模型与计算方法

为了实现基站布局的优化设计，必须建立数学模型，以量化评估布局方案的效果。基站优化的数学模型通常涉及到信号

传播损耗模型、覆盖范围模型以及定位误差模型。在信号传播损耗模型中，需要考虑到矿井中的墙壁、金属设备等物体对信号的衰减效应，同时还需考虑信号的多路径传播影响。通过构建基于路径损失的模型，可以精确计算信号在矿井中的衰减程度。在覆盖范围模型中，通过对基站位置的模拟，可以计算出每个基站的覆盖范围，并优化布局以消除盲区。定位误差模型则通过考虑信号的多重传播路径及干扰因素，来评估基站布局的定位精度。采用数值优化方法，如最小化误差的目标函数，能够帮助在多种约束条件下得到最优的基站位置配置。模拟退火、粒子群优化等优化算法在此类问题中被广泛应用，用于寻求最优解并确保布局方案的实际可行性。

4 信号覆盖盲区消除技术研究

4.1 盲区定义与影响因素

在煤矿井下，信号盲区指的是由于信号传播受到障碍物或环境因素的阻挡，导致某些区域无法获得足够的信号覆盖，从而影响定位精度和系统的稳定性。盲区的产生主要受多种因素的影响，首先是矿井的地质结构，如岩层、金属结构和矿石等物质对信号的吸收与反射，造成信号衰减或失真。其次是矿井的复杂通道布局也容易在某些深层或转角位置形成盲区，尤其是在较深的矿道或隐蔽的工作区域，信号难以穿透。其他影响因素还包括基站的配置不合理、信号发射功率不足，以及设备故障等。信号盲区的存在不仅影响人员的精确定位，还会妨碍监控与应急响应，增加煤矿作业的安全风险。消除盲区成为提升煤矿井下通信与定位系统性能的重要课题。

4.2 信号传播模型的建立与分析

为了有效消除信号盲区，需要通过建立科学的信号传播模型来准确描述信号在煤矿井下环境中的传输规律。信号传播模型通常考虑路径损耗、衰减和多径效应等因素。在煤矿井下，由于矿井的特殊地理环境，信号的传播特性与传统开放空间大不相同。信号衰减速率受矿井深度、通道形状以及井下物质分布的影响显著。通过分析信号从发射到接收的过程，可以建立路径损耗模型，计算信号的衰减与反射，模拟不同环境下的信号强度变化^[4]。多径效应也是井下信号传播的重要因素，信号在矿井内部反射、折射及散射，造成接收信号的干扰。通过构建基于地形、设备及矿物成分的传播模型，能够更精准地预测信号传播的实际效果，为盲区消除提供理论依据。

4.3 消除盲区的技术方案与实施

消除煤矿井下信号盲区的关键在于优化基站布局和采用合适的技术手段来增强信号覆盖。优化基站的位置与数量，确保信号能够覆盖所有重要区域，是解决盲区问题的基础。通过智能算法，如遗传算法或粒子群优化算法，分析井下通道的形状与地质特征，计算最佳基站布置方案。可以通过引入中继基站或信号转发器来增强信号的传播距离与覆盖范围，尤其是在

井下远离主基站的区域。利用高频信号传输技术或改进的无线电频率，能够有效穿透岩层与障碍物，减少衰减和反射，提升信号的稳定性。在实施过程中，还可以结合无线传感器网络，实时监测信号强度变化，并动态调整基站功率，以适应矿井环境的变化。通过这些技术手段，能够最大程度地消除盲区，提高煤矿井下通信系统的覆盖效果和可靠性。

5 优化方案的实验验证与效果分析

5.1 实验环境与测试方法

实验验证阶段，选择了具有代表性的煤矿井下环境作为测试场地，涵盖了不同的矿道布局与深度变化。在此环境下，布置了多个基站并依据优化方案进行配置。测试过程中，首先对井下环境的地质特征进行了详细分析，识别出可能影响信号传播的关键因素，包括岩层类型、金属设备分布以及通道的形状与尺寸。在实验设计中，采用了现代无线通信测试设备来测量信号强度与定位精度。在测试方法上，使用了信号衰减和反射的实地测量，结合路径损耗模型进行预测，确保所测数据能够真实反映信号在矿井中的传播特性。通过设置多个标定点来验证定位系统的精度，并利用传感器网络实时记录数据变化。实验过程中，还考虑到系统的稳定性和应急响应能力，以确保测试结果在实际应用中的可靠性。

5.2 实验结果与优化效果

实验结果表明，基于优化方案的基站布局显著提高了信号覆盖范围，尤其是在先前存在盲区的区域，信号质量得到了有效增强。经过优化的布局在井下复杂环境中，尤其是深层和弯曲通道区域，成功消除了大部分盲区。通过动态调整基站功率与位置，系统能够实时适应矿井环境的变化，保证了信号的持

续稳定。定位精度方面，优化后的系统较传统系统有了显著提升，矿工的实时位置能够更为准确地追踪和显示^[5]。信号干扰与多径效应的影响也得到了有效抑制，极大地提升了通信系统的抗干扰能力和可靠性。优化方案不仅解决了信号覆盖盲区的问题，也增强了系统在极端环境下的适应性，为煤矿井下人员定位提供了更加安全和精确的技术保障。

5.3 优化方案的实际应用前景

煤矿生产环境的不断复杂化，对井下定位系统的需求越来越高，优化方案的实际应用前景广阔。通过科学合理的基站布局 and 信号覆盖优化，不仅能够提升煤矿井下人员的实时定位精度，还能大幅提高矿井安全监控系统的稳定性和效率。特别是在矿井深处及隐蔽区域，优化后的系统能够实现全覆盖，消除信号死角，为矿工提供更安全的作业环境。在未来的应用中，该优化方案还可与人工智能、大数据等技术结合，进一步提升井下安全管理水平，提供更精细化的人员调度与应急响应能力。随着设备成本的逐渐降低和技术的不断进步，该方案的推广与普及有望在全国范围内得到更广泛的应用，成为煤矿安全管理的重要组成部分。

6 结语

在煤矿井下人员定位系统中，优化基站布局与消除信号盲区的技术方案极大地提升了定位精度和信号覆盖效果。通过合理配置基站位置与功率，系统能够有效应对井下复杂的地质环境，确保矿工的实时安全监控与精准定位。随着技术的不断发展，该优化方案在实际应用中的前景广阔，能够为煤矿安全管理提供更加可靠的支持，推动矿井作业环境的智能化与安全化。

参考文献:

- [1] 索智文,王亚坤.煤矿井下重点场所 5G 覆盖性能研究及验证[J].工矿自动化,2025,51(2):34-40.
- [2] 樊森,苗曙光,郭梦旭,张秋悦.融合 UWB 与 RFID 的煤矿井下人员定位系统[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2025,35(4):47-51.
- [3] 陶德保.基于 TOF 技术的煤矿井下精确定位系统设计及应用[J].今日自动化,2026(1):46-48.
- [4] 王洋洋,张洪亮.基于 UWB 技术与 DS-TWR 算法的煤矿井下人员精确定位系统[J].煤炭技术,2022,41(11):200-202.
- [5] 马超,姚兴,田诚.煤矿井下 UWB 定位系统的基站布局优化[J].煤矿机械,2024,45(1):119-122.