

复杂地形下无线传感器网络移动基站的路径规划研究

苏明霞

武汉华夏理工学院, 湖北 武汉 430223

DOI: 10.61369/TACS.2025100021

摘 要 : 随着科技的不断发展, 物联网技术在网络通信等领域得到了广泛应用。在此背景下, 无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, 简称 WSN) 移动基站建设问题备受各界关注。尤其是在山地、丘陵、矿区等一些复杂地形条件下, 无线传感器网络移动基站的路径规划也迎来了诸多挑战。基于此, 本文在对复杂地形下无线传感器网络移动基站的现实挑战进行分析的同时, 就其有效的路径规划进行了探讨, 旨在为相关人士提供一些参考借鉴。

关 键 词 : 复杂地形; 无线传感器网络; 移动基站; 路径规划

Research on Path Planning of Mobile Base Stations in Wireless Sensor Networks Under Complex Terrain

Su Mingxia

Wuhan Huaxia Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430223

Abstract : With the continuous development of science and technology, the Internet of Things (IoT) technology has been widely applied in fields such as network communication. Against this backdrop, the construction of mobile base stations in Wireless Sensor Networks (WSN) has attracted extensive attention from all sectors. Especially under complex terrain conditions such as mountains, hills, and mining areas, the path planning of mobile base stations in WSN is confronted with numerous challenges. Based on this, this paper analyzes the practical challenges of mobile base stations in WSN under complex terrain and explores effective path planning strategies, aiming to provide some reference for relevant personnel.

Keywords : complex terrain; wireless sensor networks (WSN); mobile base stations; path planning

无线传感器网络作为物联网技术的核心支撑, 已广泛应用于环境监测、灾害预警、军事侦察、精准农业等领域^[1]。通常来说, 在平原地区, 固定基站部署便捷性可以满足当下的网络通信需求。但是, 在一些山地、丘陵以及矿区等复杂地形条件下, 固定基站极易受到地形影响, 出现通信盲区, 进而影响着实际的通信质量。而路径规划作为移动基站发挥自身价值的重要技术, 主要旨在围绕周围环境来科学规划通信路线, 减少移动基站的能量消耗, 是新时期复杂地形下无线传感器网络移动基站创新建设的必经之路。

一、复杂地形下无线传感器网络移动基站的现实挑战

(一) 地形复杂度引发的多重约束

复杂的地形条件下移动基站的移动能力以及通信质量等都会受到巨大影响, 一方面受山地坡度等地形因素影响, 移动基站的阻力加大, 移动的灵活性和速度受阻, 进而出现能耗增加, 路径的连续性难以得到保障; 另一方面, 由于复杂地形中往往存在树木、岩石等各式各样的障碍物, 这也会导致基站的通信质量受阻^[2]。此外, 对于复杂地形而言, 其非均匀性也会导致无线信道特性动态变化, 使得通信过程中出现信号不稳定等问题, 影响着实际的通信质量。

(二) 网络系统的多目标优化矛盾

从网络角度而言, WSN 的路径规划需要保证传感器节点的低通信延迟、全面覆盖以及可靠的数据传输。而从移动基站角度而

言, 则需要保证路径的合理性、能量消耗以及转向次数少等等。但是, 这些目标在彼此之间是存在冲突的^[3]。例如, 为了保证传感器节点的全覆盖的话, 往往需要增加路线长度, 这也会导致实际的能耗增加。同时, 如果要保证路线少、转向次数少的话, 则可能会导致部分节点出现信号传输不流畅等问题^[4]。因此, 如何有效处理多目标之间的冲突矛盾, 是复杂地形下无线传感器网络移动基站的路径规划需要重点解决的问题之一。

(三) 环境动态性带来的路径失效风险

通常而言, 复杂的地形环境下往往有着一定的多变性风险^[5]。例如, 在复杂地形环境下, 大雪、暴雨等特殊天气将会直接导致地形结构的变化, 这也会影响实际的路径预设。同时, 在自然界生物活动也是时刻存在的, 如一些森林中树木的倒伏等等, 这些情况也都会给地形环境带来直接冲击。此外, 网络环境方面, 传感器节点可能会因为移动、能耗不足等问题, 使得部分地区出现

基金项目: 无人智能清扫车的路径规划算法及系统的研究与设计
项目编号: 23006

通信质量下降,甚至是通信盲区问题,这些环境动态性因素也会给路径规划带来失效的风险。

(四) 能量供给与消耗的失衡问题

移动基站的能量大多依赖于电池,因此可以说其能量供给是“有限”的。但是,复杂的地形环境会进一步增加其能耗,一方面在其实际移动过程中,往往会因为复杂地形环境而消耗大量机械能,另一方面,为了保证覆盖面,移动基站往往会强化发射功率,这也会使得通信方面的耗能大大增加^[6]。同时,在复杂的地形条件下,传感器节点的能量消耗也是不一样的,一些偏远地区的节点可能会对能量供给需求较大,这也要求基站应当及时做出位置方面的调整,保证能耗的平衡分配,所以,这一点也是路径规划中需要深入思考和解决的问题。

二、复杂地形下无线传感器网络移动基站的路径规划

(一) 锚定核心目标,构建“三维约束”规划原则体系

在复杂地形下,无线传感器网络移动基站的路径规划应当改变以往“距离-覆盖”的传统模式,充分基于地形适应性、网络性能以及能量均衡来构建“三维约束”体系,从而保证路径规划的科学性与合理性^[7]。首先,在地形适应性方面,应当基于复杂地形的实际特征进行匹配设计。一方面通过数字技术来进行建模,然后量化实际参数,如可以将地形的坡度划分成平缓($<15^\circ$)、较陡($15^\circ-30^\circ$)、陡峭(30°)三个等级,在实际路径规划中优先选择平缓区域,避开陡峭区域等等,以此来实现路径和地形的有效兼容目标;另一方面,要在路径规划中保证容错性,如可以在特殊地形中预留出一定的坡度变化波动范围等等,以此来减少后续地形变化带来的影响。其次,在网络性能方面,应当充分关注 WSN 的通信和传输质量。一方面应当保证全面覆盖,其间通过“节点+基站”的距离模型(考虑地形衰减系数)计算覆盖范围,从而有效减少通信盲区,实现全面覆盖的目标;另一方面,在节点比较密集的区域,应当规划驻留点,延长通信时间以保障数据完整接收。此外,在通信稳定性方面,应当尽可能避开一些特殊区域,如电磁干扰区等等,借助路径分段的方式来有效减少信号遮挡情况,将每段路径的信号中断风险控制在5%以内。而数据传输方面应当兼顾节点访问顺序以及路径最优方案,有效访问数据缓存大的节点,以此来充分保障数据传输质量。再者,在能量均衡方面,应当注重网络能量的有效运用,如要注重路径曲率的优化,从而降低实际能耗;借助地形阻力模型来优化路径选择,从而达到降低能耗的目的。在此基础上,路径规划中应当设置太阳能充电等一些补给区域,从而保证移动基站工作的连续性与有效性。

(二) 突破技术瓶颈,融合地形特征的路径规划方法创新

在复杂地形下无线传感器网络移动基站的路径规划应当突破技术瓶颈,以此来更好地适应特殊地形并保证路径规划的科学性与合理性^[8]。具体来说,首先,要注重地形建模的运用,采用数字高程模型(DEM)与地理信息系统(GIS)相结合的方式对坡度、高度、障碍物等地形的参数进行量化处理,然后生产栅格

地形图,每个栅格赋予地形阻力值(0-1,值越大阻力越大)。在此基础上,通过传感器网络来反馈信息,以此来及时呈现出改革节点的实际状态、通信情况,形成动态化的数据资源库。此外,为了有效保障建模质量,可以将地形衰减系数 η 引入建模之中,基于地形土壤、密度等情况,进行取值,修正无线通信距离模型为: $d=\eta \times d_0$ (d_0 为自由空间通信距离),通过此举来提高覆盖范围计算的质量。其次,是通过改进 A* 算法来生成初始路径。可以看到,以往的 A* 算法在应用过程中,往往存在“局部优,整体差”的情况,对此,应当融入启发函数 $[f(n)=g(n)+h(n)]$,其中 $g(n)$ 为起点到当前节点的实际能耗(结合地形阻力与移动距离), $h(n)$ 为当前节点到终点的预估能耗(引入地形坡度权重),避免因地形差异导致的路径误判]以及约束条件(设置栅格阻力阈值(如0.7),拒绝进入高阻力区域;同时,结合通信覆盖范围,确保路径上每个点都能覆盖至少一个传感器节点,避免无效路径)。通过此举来打造可行路径。再者,为智能优化,基于改进粒子群优化(PSO)算法优化初始路径。一方面基于多目标来构建响应函数,综合路径长度(权重0.3)能耗(权重0.3)覆盖完整性(权重0.2)通信稳定性(权重0.2),将多目标问题转化为单目标优化;另一方面对惯性权重进行动态调整,前期采用较大惯性权重(0.8-1.0)增强全局搜索能力,后期采用较小惯性权重(0.4-0.6)提高局部优化精度。再者,要积极融入地形方面的约束因素,对高阻力区域的例子进行惩罚机制处理,以此来保证其适应性。同时,在算法迭代中,要保留最优粒子,直到满足迭代次数或适应度值收敛(波动小于1%),最终输出最优路径。

(三) 强化实用效能,构建“多维度”路径优化策略体系

在复杂地形下,无线传感器网络移动基站的路径规划也要注重“多维度”优化。首先,基于全局规划和各个节点的地形情况来划分路段并设置针对性的目标。例如,针对平原地区应当明确“最短路径,减少移动时间”的目标;山地地区应当明确“能耗低”的目标;节点密集的地区应明确“全面覆盖”的目标等,在此基础上,通过实时的能耗检测来精准把控各路段的能耗预算,以此来保证能耗平衡^[9]。其次,针对移动基站的驻留,要围绕节点数据传输差异来进行优化设计,如明确驻留点的标准为:覆盖至少五个或节点,数据缓存大于10MB;地形比较平坦、误码率小于3%通信干扰较小。同时,驻留应尽可能选择靠近太阳能充电补给区,而且时间根据节点数据量动态调整,采用公式 $T=k \times Q$ (k 为数据传输系数, Q 为平均数据缓存量)计算,确保数据完整接收。再者,要优化容错备份,一方面可以规划主备双跳路线,主路线方面注重性能,备路线方面注重安全性。如果主路线出现特殊情况时,及时切换到备路线。同时,主备路线距离应当合理,如要小于50米等等,以此来保证信号覆盖率和安全性。此外,在障碍物处以及陡坡顶端等关键节点应当做好标记,通过GPS与惯性导航双重定位来保证其始终处于正确路径之上。

(四) 验证方法有效性,基于复杂地形的仿真实验与结果分析

为了进一步提高路径规划的科学性与合理性,应当基于复杂地形仿真场景,在A*算法、标准PSO算法基础上进行改进优

化,并进行多维度评估。首先,是仿真实验设置,依托 MATLAB 与 NS2 仿真平台来构建地形场景,区域面积 $1000\text{m}\times 1000\text{m}$,海拔 $500\text{—}800\text{m}$,坡度范围 $0\text{—}40^\circ$,随机分布岩石障碍物(面积 $50\text{—}200\text{m}^2$)与植被区域(信号衰减系数1.8)。部署50个传感器节点,随机分布于场景中,初始能量均为 5000mAh ;移动基站最大通信距离 100m ,移动速度 $1\text{—}3\text{m/s}$,初始能量 20000mAh 。实验参数:改进A*算法栅格大小 $10\text{m}\times 10\text{m}$,阻力阈值0.7;改进PSO算法粒子数量50,迭代次数100,惯性权重 $0.4\text{—}1.0$ 。路径指标性能方面,包括长度、转向次数等,通过对比明确新算法规划下的路径科学性。此外,改进算法覆盖较为完整且与A*算法趋于一致,同时覆盖率要优于PSO算法,通信中断率、平均传输

延迟等也表现较优。再者,在能量型指标方面,移动基站的循环能耗在新算法下也是比较优秀的,其相对于A*算法以及PSO算法分别减少了40%以及20%左右。最后,新算法的动态环境测试(如突发障碍物等)中调整时间优于A*以及PSO算法,调整后的路径能耗增加情况也较为理想,这也说明了其良好的动态适应性^[10]。

总的来说,在复杂地形下,无线传感器网络移动基站的路径规划也面临着诸多挑战。对此,相关人员应当基于这些问题与挑战,不断运用新的思路和方法来探索有效路径,从而进一步优化网络性能,推动移动基站路径规划的现代化转型与发展。

参考文献

[1] 段林妍. 无线传感器网络节点定位算法优化研究 [J]. 技术与市场, 2024, 31(02): 59–62.

[2] 彭铎, 吴海涛, 曹坚, 等. 基于多策略优化的三维无线传感器网络定位算法 [J]. 微电子学与计算机, 2024, 41(08): 81–90.

[3] 张迪, 韩铮, 王雪丽. 基于无线传感器网络的电气故障点定位仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(11): 86–90.

[4] 戴玲, 徐锋, 刘政雳, 等. 多基站无线传感网络中移动定位的越区算法研究 [J]. 浙江万里学院学报, 2021, 34(06): 90–96.

[5] 阳勇, 孟相如, 康巧燕, 等. 基于流量优化的可靠服务功能链部署方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10): 3017–3025.

[6] 曹佳, 严培辉, 刘江华, 等. 高精度低功耗室内外无缝定位的实验室物品追踪管理系统设计 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(06): 235–238+282.

[7] 肖玮, 涂亚庆. 基于等级的无线传感网自适应分簇算法 [J]. 计算机应用, 2017, 37(06): 1532–1538.

[8] 杜刚. 基于无线基站移动传感器的传输与网络优化 [J]. 科技创新与应用, 2017, (15): 96.

[9] 侯彦辰, 周国祥, 石雷. 移动基站无线传感器网络优化研究 [J]. 软件导刊, 2015, 14(06): 56–58.

[10] 史久根, 江锋. 多移动基站无线传感器网络生命周期最大化算法 [J]. 计算机系统应用, 2014, 23(10): 107–111.