

水情自动测报系统中无线传感网络优化部署研究

卜晓东

东深智水科技（深圳）股份有限公司 广东 深圳 518057

【摘要】：水情自动测报系统对于防洪减灾、水资源合理调配意义重大，无线传感网络是其中关键构成。因监测区域复杂多样、节点能量受限等，无线传感网络部署存在覆盖不均、能耗不合理等问题。经研究多种优化部署策略，如结合地理信息的确定性部署、运用智能算法的优化部署等，可提升网络覆盖度，均衡节点能耗，延长网络生命周期。仿真及实际应用表明，优化后的无线传感网络在水情自动测报系统中能更精准、及时地采集和传输水情数据，有力增强系统整体性能，为水情监测与决策提供坚实技术支撑。

【关键词】：水情自动测报系统；无线传感网络；优化部署；覆盖度；能耗

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.072

1 现存部署问题剖析

1.1 地形适配性缺陷

水情监测区域的地理环境极为复杂，山川、河流、湖泊等地形交错分布。传统的随机部署方式缺乏对地形因素的深入考量，导致传感器节点分布呈现出明显的不均衡性。在地势平坦的区域，节点往往会因随机部署而过度聚集，形成资源浪费；而在山区、峡谷等地形复杂的地段，节点分布却十分稀疏，甚至出现大片监测盲区。这种不合理的分布状况，使得监测数据无法全面、准确地反映整个区域的水情变化，严重影响了水情测报系统的有效性。在偏远地区，信号传输受到地形的严重阻碍，山体、峡谷等地形对无线信号的遮挡和衰减作用显著，导致节点间通信不畅，数据无法及时上传，进一步削弱了监测系统的实时性和可靠性。

1.2 动态监测能力不足

水情数据表现出明显的动态变化特性，这些变化规律与季节更替、气候变化等多种因素紧密相连。特别是在洪水多发的季节，水位的升降、流量的增减等关键数据呈现出快速且不稳定的态势，这就要求我们进行高频率的数据采集和及时的数据传输工作，以便能够实时监控洪水的动态变化，为防洪减灾的决策过程提供坚实的数据支持。相对而言，在干旱少雨的枯水期，水情数据则显得相对平稳，因此数据更新的频率可以适当减少。目前我们所采用的水情监测部署模式显得过于固定和僵化，缺乏根据水情变化的实际情况进行灵活调整的能力。不论是洪水期还是枯水期，监测节点的采样频率和数据收集方式都基本保持一致，这种做法无法满足洪水期对高强度监测的迫切需求，同时也导致了在枯水期资源的无谓浪费。这种不合理的监测模式不仅降低了数据采集的效率，还使得

水情测报系统的整体效能难以得到充分发挥。

1.3 能耗管理困境

传感器节点的能源供应是水情自动测报系统面临的一大难题。目前，大多数节点依赖电池供电，而电池的容量有限，难以满足长期、持续的监测需求。在常规部署下，靠近汇聚节点的节点由于承担着大量数据转发任务，其能耗速度远远高于其他节点，往往会过早“死亡”。一旦这些关键节点失效，整个网络的数据传输路径就会受到破坏，导致部分区域的数据无法正常上传，严重缩短了网络的整体寿命。在数据传输过程中，路径选择不合理也是导致能耗过高的主要原因。部分链路因承担过多的数据传输任务而出现拥塞，能耗急剧增加；而另一些链路则处于闲置状态，造成了网络资源的极大浪费。这种不均衡的能耗分布，进一步加剧了传感器节点的能源消耗问题，限制了水情测报系统的长期稳定运行。

2 优化部署目标明确

2.1 全面精准监测覆盖

为了确保水情监测区域的全面覆盖，优化部署成为了我们工作的首要任务。特别是在那些重点防洪区域，例如河流中下游的洪水易发地段、城市防洪的关键区域等，我们必须实现多重覆盖。这需要通过增加节点密度和冗余配置，从而提高数据采集的准确性和可靠性，为防洪决策提供坚实的数据支撑。在水资源调度的关键地段，比如水库周边、跨流域调水工程沿线等，也需要进行重点监测，以保障水资源的合理调配和科学管理。通过优化节点布局，我们可以消除监测盲区，确保整个水情监测区域的每个角落都能得到有效监测。这样，我们就能全面掌握水情变化动态，为水资源管理和防洪减灾工作提供有力的保障。

2.2 动态智能监测调控

依据不同区域水情变化的特点，实现监测密度与频率的动态调整是优化部署的重要目标。在洪水频发区，由于水情变化迅速，危险性高，需要加密节点部署，并采用实时监测的方式，及时捕捉水位、流量等关键数据的细微变化，以便第一时间发出预警，为防洪抢险争取宝贵时间。而在干旱区，水情相对稳定，可适当减少节点数量，并采用定时监测的方式，在保证监测效果的降低能源消耗和运维成本。通过建立动态监测机制，使水情测报系统能够根据实际水情变化自动调整监测策略，提高监测的针对性和有效性，实现对水情的精准把控。

2.3 高效节能稳定运行

通过合理规划节点位置和数据传输路径，实现各节点能耗的均衡是延长网络寿命的关键。优化部署需要充分考虑节点的能源供应、数据传输任务等因素，避免部分节点因承担过多任务而过早耗尽能量。增强网络对水情动态变化和环境干扰的适应能力也是重要目标之一。系统应具备自动调整部署策略的功能，当遇到水情突变、环境干扰等情况时，能够迅速做出响应，重新优化节点布局和数据传输路径，确保网络的稳定运行。在满足监测需求的前提下，尽量减少节点使用数量，不仅可以降低硬件采购成本，还能减少安装和维护工作量，提高水情测报系统的整体经济效益和运行效率。

3 地理信息融合部署

3.1 地理数据深度分析与应用

高精度地理信息系统（GIS）是实现地理信息融合部署的核心工具。通过GIS技术，可以获取水情监测区域详细的地形、地貌数据，包括海拔高度、坡度、坡向、地表覆盖等信息。利用这些数据，能够深入分析不同区域水情监测的重要程度和信号传播特性。对于地势起伏较大的山区，地形对水情变化的影响更为复杂，需要重点关注山谷、山脊等关键地形部位的水情监测；而在开阔的平原地区，水情变化相对平稳，但也需要考虑河流走向、排水系统等因素对水情的影响。分析信号在不同地形中的传播规律，如在山区信号容易受到阻挡和衰减，在开阔地带信号传播相对顺畅，为后续的节点部署和信号优化提供科学依据。

3.2 差异化地形部署策略

在平原地区，由于地势平坦且水情变化平稳，采用规则网格部署方法是较为合理的选择。将监测区域划分成多个均匀的网格，每个网格的中心或关键位置

部署传感器节点，这种部署方式能够确保节点分布均匀，实现对整个区域的全面覆盖。均匀分布的节点便于数据的采集和管理，因为数据采集点相对规则，数据处理和分析也更具规律性，能够高效地获取区域内水情等信息，为后续的监测和决策提供有力支持。

对于地形复杂的山区，部署策略则需更具灵活性。山区的地形起伏较大，山谷、山脊以及河流的分布情况各异，因此要依据这些地形特征来确定节点的部署位置。在山谷底部和河流沿岸等水情变化敏感区域，增加节点密度是必要的。这些区域往往是水情变化的高发地带，增加节点密度可以确保能够及时监测到水情的细微变化，为预警和应对措施提供更准确的数据支持。同时，在山脊等高处合理设置节点也非常重要。山脊位置较高，利用这一优势可以扩大信号覆盖范围，提高数据传输的可靠性。高处的节点能够更好地接收和发送信号，减少信号传输过程中的干扰和衰减，保证监测数据能够稳定、准确地传输到监控中心，从而提高整个监测系统的运行效率和可靠性。通过这种差异化的部署方式，充分适应不同地形的特点，使监测系统能够更好地发挥其功能，提高监测的全面性和准确性。

3.3 重点区域强化与信号优化

结合历史水情数据，对洪水高发地段、水库周边等重点区域进行强化部署。在这些区域，提高节点部署密度，采用多重覆盖的方式，确保即使部分节点出现故障，也能保证数据采集的连续性和准确性。考虑信号在不同地形中的衰减与反射情况，合理设置节点的发射功率和通信半径。在山区，由于信号容易受到反射和干扰，适当降低发射功率，避免信号反射造成的干扰，同时通过优化节点布局和采用定向天线等技术，提高信号传输的稳定性；在开阔水域等信号传播条件较好的区域，增大发射功率，延长通信距离，确保数据能够及时、准确地传输到汇聚节点。通过对重点区域的强化部署和信号优化，进一步提高水情监测的可靠性和有效性，为防洪减灾和水资源管理提供更有力的数据支持。

4 智能算法优化策略

4.1 遗传算法的部署优化

遗传算法是一种基于自然选择和遗传机制的全局优化算法，在节点部署优化中具有独特优势。将节点部署位置编码为染色体，每个染色体代表一种可能的节点部署方案。通过定义合适的适应度函数，将网络覆盖度、能耗均衡度、数据传输效率等关键指标纳入

其中，以评估不同部署方案的优劣。在算法运行过程中，通过选择、交叉、变异等遗传操作，对染色体进行不断进化。选择操作依据适应度函数从当前种群中筛选出较优的个体，为下一代种群提供遗传信息；交叉操作模拟生物遗传中的基因重组过程，将两个父代个体的基因进行交换，产生新的个体；变异操作则以一定概率对个体的基因进行随机改变，增加种群的多样性，避免算法陷入局部最优解。通过不断迭代搜索，遗传算法能够逐步找到全局最优或近似最优的节点部署方案，有效提高网络覆盖度，降低整体能耗，提升水情测报系统的性能。

4.2 粒子群算法的部署探索

粒子群算法是一种模拟鸟群觅食行为的智能优化算法。在节点部署优化中，将每个传感器节点视为一个粒子，粒子在解空间中不断移动，通过调整自身的位置来寻找最佳部署方案。每个粒子都具有自己的速度和位置，速度决定了粒子移动的方向和快慢，位置则代表了节点的部署位置。粒子在移动过程中，会根据自身历史最优位置（个体最优）和整个种群历史最优位置（全局最优）来调整自己的移动方向和速度。当粒子发现更好的位置时，会更新自己的个体最优；当整个种群发现更优的位置时，全局最优也会随之更新。通过这种方式，粒子群算法能够引导粒子在解空间中不断探索，逐渐向最优解靠近，从而找到最佳的节点部署位置，提高网络的整体性能，如增强覆盖能力、优化数据传输路径等，为水情监测提供更高效的部署方案。

4.3 模拟退火算法的部署改进

模拟退火算法基于物理退火过程的原理，从初始部署状态出发，通过随机扰动产生新的状态。在每次产生新状态后，依据 Metropolis 准则决定是否接受该状态作为新的当前状态。Metropolis 准则考虑了新状态与当前状态的目标函数差值以及当前的温度参数，在算法运行初期，温度较高，算法以较大概率接受较差的状态，从而能够跳出局部最优解，在更大范围内搜索解空间；随着算法的进行，温度逐渐降低，算法接受较差状态的概率也逐渐减小，最终收敛到全局最优解或近似最优解。在节点部署优化中，模拟退火算法能够有效克服局部最优问题，从全局角度对节点部署方案进行优化。通过不断调整节点位置，在降温过程中逐渐逼近最佳部署方案，实现对水情监测区域的更合理、更高效的节点布局，提高无线传感网络的整体性能和稳定性。

5 能耗均衡技术运用

5.1 分簇路由优化策略

分簇路由算法是实现能耗均衡的重要技术手段。通过将传感器节点划分为多个簇，每个簇选举出一个簇头节点。普通节点将采集到的数据发送至所在簇的簇头节点，簇头节点对数据进行融合处理，去除冗余信息，然后再将处理后的数据发送给汇聚节点。这种数据传输方式大大减少了数据传输量，降低了节点的能耗。簇头节点的选举过程通常会综合考虑节点的剩余能量、位置、通信能力等因素，选择能量充足、位置合适的节点作为簇头，以确保簇内数据传输的高效性和稳定性。定期重新选举簇头节点，避免某些节点因长期担任簇头而过早耗尽能量，实现节点能耗的均衡分布，延长网络的整体寿命。

5.2 节点休眠调度机制

合理安排节点的休眠与工作时间是降低能耗的有效方法。在水情平稳时段，水情变化相对缓慢，对数据实时性的要求较低。此时，通过节点休眠调度机制，让部分节点进入休眠状态，仅保留少量关键节点处于工作状态，定时唤醒休眠节点采集数据。这样可以避免节点长时间处于空闲监听状态而消耗大量能量。节点的休眠与唤醒策略需要根据水情变化规律和网络需求进行精心设计。可以根据历史水情数据和实时监测情况，预测水情变化趋势，提前调整节点的工作模式；也可以通过网络中的控制节点或汇聚节点向普通节点发送休眠和唤醒指令，实现对节点工作状态的统一管理。通过这种方式，在保证监测效果的前提下，最大限度地降低节点能耗，提高能源利用效率。

5.3 能源综合管理技术

利用太阳能、水能等可再生能源为节点供电是解决能源供应问题的重要途径。结合能量收集与管理技术，实时监测节点的能量状态，根据能量的获取和消耗情况动态调整节点的工作模式。当节点收集到的能量充足时，可以适当提高数据采集频率和传输功率，增强监测能力；当能量不足时，则降低工作频率，进入低功耗模式，确保节点能够持续稳定运行。对采集到的数据进行预处理与融合，去除冗余信息，减少传输数据量，进一步降低通信能耗。采用均值、加权等算法对多节点采集的同类数据进行融合处理，不仅可以提高数据的准确性，还能有效减少数据传输量，降低节点的通信能耗。通过能源综合管理技术的运用，实现对节点能源的高效利用，保障水情自动测报系统的长期稳定运行。

6 结语

对水情自动测报系统中无线传感网络优化部署的研究,有效解决了传统部署的覆盖与能耗问题,显著提升系统性能。未来,随着技术发展,一方面应深入融合人工智能、大数据等前沿技术,进一步提高优化

部署的智能化与自适应能力,以应对更复杂多变的水情监测环境;另一方面要持续探索低功耗、高性能的传感器节点与通信技术,为无线传感网络在水情测报领域的广泛应用奠定更坚实基础,助力水利事业向智慧化、高效化方向迈进。

参考文献:

- [1] 陈雨泽.无线传感网络在水利监测中的应用优化[J].水利科技,2023,50(2):35-38.
- [2] 李昊阳.基于智能算法的水情监测网络节点部署研究[J].水电能源科学,2022,40(5):45-48.
- [3] 王宇轩.地理信息辅助的无线传感网络部署策略[J].测绘通报,2024,(3):78-82.
- [4] 张梓轩.能耗均衡的水情自动测报网络技术研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(18):123-128.
- [5] 赵梓涵.无线传感网络在复杂水情环境中的适应性优化[J].传感器与微系统,2025,44(1):45-48.