

无线传感器网络多信道通信资源压缩感知分配

代静佳¹ 梁冲¹

DAI Jingjia LIANG Chong

摘要

在周期固定分配信道资源方式下,当节点暂停发送数据时,部分信道资源会被浪费,形成空白子帧;而当多个节点同时使用相近信道通信时,又易导致空闲信道被占用,共享时隙竞争难度大,致使整体的分配效率过低。为此,文章提出一种无线传感器网络多信道通信资源压缩感知分配方法。该方法先根据当前分配需求,进行多信道通信资源的采集与预处理,以减少数据冗余并优化传输效率。然后针对预处理的通信资源,利用压缩感知技术提取关键信息、重构信号以引导资源分配,并设计分配机制。该机制通过基于信道数据集合的判定选择合适信道通信,并设置优先级辅助条件来确定信道带宽,以最小化下行资源分配整体传输能耗和时延。最后基于这一机制建立资源分配模型。该模型通过动态分配物理信道,有效避免传统固定周期分配方式下的信道资源浪费和空闲信道占用问题,显著提升网络带宽与系统容量。在信道容量限制下,引入决策变量建立多目标分配表达式,实现多任务并行执行,解决固定周期分配效率低下的问题,输出更为可靠的多信道资源分配结果。通过实验可知,应用该方法后,信道1和信道2的带宽均提升至200 Hz以上,复用链路可达速率均在125 Mbit/s以上,有效提高了资源利用率和通信资源分配效率,应用效果较好。

关键词

压缩感知;无线传感器;传感网络;多信道;通信资源;资源分配

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.022

0 引言

无线传感器网络通常部署在复杂环境中,节点数量众多且资源有限,如何优化资源分配,提高网络的整体性能,显得尤为重要。有研究学者在DEABC算法下利用差分进化与人工蜂群算法的优势,提高了农业物联网的频谱感知与传输优化^[1]。该方法缺乏动态感知机制,传感器节点的感知时隙可能因空闲信道被占用而缩减,进而影响通信信道的平均传输速率。还有学者基于多源数据分析物联网智能跨层资源分配算法^[2],动态调整资源分配策略,最大化用户服务质量、吞吐量。但该方法在多信道传输场景下难以解决资源拥挤问题,导致带宽下降,整体资源分配效率偏低。压缩感知技术(compressive sensing, CS)可以利用信号的稀疏性,在远低于奈奎斯特采样率的条件下,通过随机投影和重构算法实现信号的精确恢复^[3]。该技术能显著减少节点间传输的数据量,同时合理分配多信道资源,从而提升数据传输的可靠性和效率。基于此,本文基于压缩感知技术,针对无线传感器网络多信道通信资源分配方法展开研究。希望通过本次研究,能够提出一种更加高效、合理的资源分配策略,以优化无线传感器网络的性能。

1 无线传感器网络多信道通信资源分配设计

1.1 资源采集和预处理

资源采集主要涉及传感器节点对环境参数的测量,而预处理则利用压缩感知技术减少数据冗余,优化传输效率^[4]。一般情况下,多信道的通信资源分配需要提前对数据和信息进行整合处理,为后续的分配奠定基础条件^[5]。因此,先进行环境数据的采集。预设原始的数据集合,用公式表示为:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (1)$$

式中: X 代表数据集合; $x_1 \sim x_N$ 分别代表多个节点的测量值。在当前预设的集合之中,设定多个周期,按照周期对实时数据进行采集、存储,以待后续使用。对采集的数据预处理,首先基于小波分析去除数据中的噪声,采用线性插值法补充数据中的缺失值,删除数据中的异常值,并将数据转换为可应用的统一标准,具体公式为:

$$x'_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

式中: μ 代表去除噪声补偿缺失值并完成异常值删除的数据集 X' 的均值; σ 代表数据集 X' 的标准差; x'_i 代表数据集 X' 的数据。以此为基础,从数据集 x'_i 中提取关键信息,利用稀疏性先验知识求解优化来重构原始信号,其过程为:

1. 郑州工商学院信息工程学院 河南郑州 450000

设测量矩阵为 ϕ ；观测向量为 y ；稀疏基为 ψ 。原始信号 x 在稀疏基 ψ 下是稀疏的，即 $x = \psi\theta$ （ θ 是稀疏系数向量），观测模型为 $y = \phi x + n$ （ n 为噪声）。通过求解如 L1 范数最小化问题来重构稀疏系数 $\hat{\theta}$ ：

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \arg \min_{\theta} \|\theta\|_1 \\ \text{s.t. } \|y - \phi\psi\theta\|_2 &\leq \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

式中： ε 是一个噪声衰减系数。最后重构原始信号 $\hat{x}$ ，其表达式为：

$$\hat{x} = \psi\hat{\theta} \quad (4)$$

完成原始信号重构后，以此作为后续资源分配的引导条件^[6]。

1.2 设计多信道资源分配机制

通信资源采集与预处理可收集各类通信相关数据并对其进行去噪、缺失值填补、标准化等操作，为后续高效且合理的通信资源分配提供高质量的数据基础。接下来，开展多信道资源分配机制设计。设置多信道资源分配机制，可强化资源分配处理效率，避免空闲占用。该机制基于无线传感器网络中的信道数据集，判定当前信道状态、数据传输量以及网络负载情况，先选择合适的信道建立关联通信，分别为上行方向分配和下行方向分配两个阶段^[7]，具体如图 1 所示。

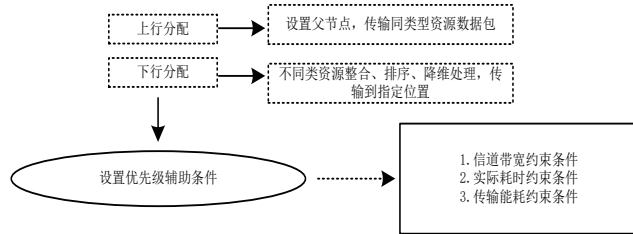


图 1 多信道资源分配机制结构图

上行的资源分配机制从叶子节点开始，每个节点需要传输数据到父节点^[8]。此时，假设当前标定的每个节点设置一个需要传输的数据包，将每一个数据包之间的时隙进行控制，并在规定的范围之内进行调整，直至资源包传输结束，此时需要计算出当前单个节点的负载值，如公式所示：

$$H = \kappa^2(\hat{x}) - \frac{1}{W} \times \varphi \quad (5)$$

式中： H 代表单个节点负载值； κ 代表预设传输资源包总量； W 代表单点传输量； φ 代表预设采集周期。在多信道环境中，节点间的干扰会影响通信质量和资源分配。假设节点 i 和节点 j 之间的干扰系数为 I_{ij} ，其公式为：

$$I_{ij} = \frac{P_i G_i G_j h_{ij}}{d_{ij}^\alpha} \quad (6)$$

式中： P_i 是节点 i 的发射功率； G_i 和 G_j 分别是节点 i 和节点 j 的天线增益； h_{ij} 是节点 i 到节点 j 的信道衰落系数； d_{ij} 是节

点 i 和节点 j 之间的距离； α 是路径损耗。

在选择上行信道时，需要综合考虑节点负载和信道干扰。假设共有 M 个信道，对于节点 n ，选择信道 k 的优先级 P_{nk} 可通过公式表示为：

$$P_{nk} = \omega_1 \frac{1}{H_n} + \omega_2 \sum_{i \in N_n} (1 - I_{ni}^k) \quad (7)$$

式中： ω_1 和 ω_2 是权重系数，用于平衡节点负载和信道干扰的影响； H_n 是节点 n 的负载值； N_n 是节点 n 的邻居节点集合； I_{ni}^k 是在信道 k 上节点 n 与邻居节点 i 之间的干扰系数。节点 n 会选择 P_{nk} 最大的信道进行上行数据传输。以此为基础，实现第一阶段的分配调度。

下行通信资源分配处理则是针对上行资源分配的结果，对不同类的资源重新整合、排序，确保后续的传输及实时分配^[9]。这部分先对数据进行降维处理，针对不同类资源，在传输时，避免出现衰减的情况，需要在对资源包处理过程中，设置优先级辅助条件，确定所剩资源需要的信道带宽，用公式表示为：

$$U = H(\zeta) P_{nk} \left(1 + \frac{\aleph}{\gamma(m_1 + n)}\right)^2 - m_2 \quad (8)$$

式中： U 代表信道带宽； ζ 代表下行处理所剩资源； $\aleph$ 代表实时信道资源总量； γ 代表传输时间； n 代表可扩展带宽； m_1 和 m_2 分别代表预估的信道带宽和实际的信道带宽。在当前的信道带宽标准之内，最小化下行资源分配整体传输能耗和时延，为后续的分配处理奠定基础条件。

1.3 建立压缩感知的多信道通信资源分配模型

多信道资源分配机制通过动态地分配多个物理信道，使节点能够进行多信道通信，从而极大提升了网络带宽和系统容量，确保信道带宽的充分利用及资源利用率的提高。然而，鉴于无线信道带宽的有限性，直接进行资源分配可能无法最大化利用信道带宽，进而导致资源的浪费或通信效率的降低^[10]。为此，设计了一种传感器网络多信道通信资源分配模型^[11-12]。该模型基于资源分配机制，针对传感器网络中的节点集合，采用压缩感知技术进行数据压缩，得到压缩后的数据向量。引入决策变量，在信道容量限制的范围之内，建立模型的多目标分配表达式：

$$I = \sum_{Y=1} \rho Y - \frac{(t + \sigma)^2}{TU} \quad (9)$$

式中： I 代表多目标资源分配任务^[13]； ρ 代表传输所需资源量； Y 代表预设传输周期； t 和 σ 分别代表分配前后期的数据向量； T 代表决策变量。将分配任务导入模型，用压缩感知技术稀疏采样资源，通过上行和下行资源分配处理实际情况，对比资源分配稀疏特性^[14-15]，具体如图 2 所示。

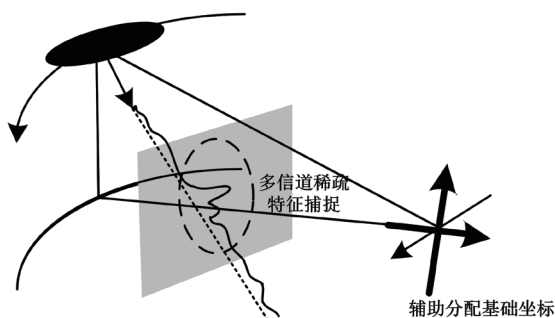


图2 多信道资源分配稀疏特性对比图

在当前的资源分配状态下，结合多信道的传输环境，不同压缩点形成的分配目标也会形成对应的分配任务。这些任务将同时执行，以加强对分配时间和效率的控制^[16]。通过一系列的计算和处理，获取最终的分配处理结果，用公式表示为：

$$P = I(Z - \sqrt{v})^2 + B \quad (10)$$

式中： P 代表资源分配输出结果； Z 代表预估的最大资源分配标准值； v 代表重复分配资源； B 代表捕捉的不同类资源^[17-18]。综上所述，基于资源分配机制，模型能够实现对传感器网络多信道通信资源的有效分配。这种分配方式不仅提高了网络带宽和系统容量，还确保了信道带宽的充分利用及资源利用率的提高。同时，通过多目标优化和决策变量的引入，模型还能够平衡多个目标之间的冲突，得到更为可靠和高效的资源分配结果。

2 实验

为验证无线传感器网络多信道通信资源压缩感知分配方法的实际应用效果，开展实验研究。针对往期测定的数据以及信息，汇总整合，在压缩感知技术的辅助与支持下，进行基础测试环境的设定与细化部署。期待通过本次实验，为无线传感器网络通信资源的优化分配提供更具实践价值的参考依据，推动相关领域的技术发展与应用创新。

2.1 实验设置

结合压缩感知技术，设定无线传感器网络多信道通信资源分配方法的实际测试环境。当前，先随机定位2个信道，每一个信道部署一定数量的监测节点，节点之间互相搭接，形成循环式的监测环境，以便于实时数据以及信息的传输共享。随后，进行测试数值及参数设置，如表1所示。

表1 多信道通信资源分配测试辅助数值预报表

资源分配测试辅助项目	数值标准
随机监测节点 / 个	800~1 200
阈值范围 / %	5.5~10.5
传输效率比	3.7
可控时延 / s	0.12~0.35

将初始的资源进行整合，建立辅助的资源分配链路，并导入无线传感网络虚拟平台 OPNET 之中，完成对基础测试环境的设定部署。在此基础上，明确当前的无线传感网络总容量，并建立辅助的资源分配链路，如图3所示。

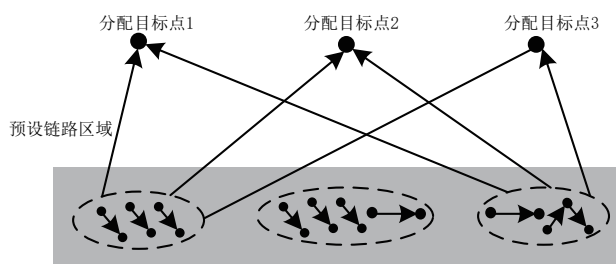


图3 无线传感网络辅助资源分配链路结构图

按照该顺序，将初始的资源进行整合，导入此结构之中，完成对基础测试环境的设定部署。

2.2 实验结果与分析

2.2.1 带宽对比

在上述搭建的测试环境中，结合压缩感知技术，采集各个周期的基础可传输资源，按照需求预处理，将资源转换为资源包的形式。通过预设的链路传输到指定的处理位置。在不同的节点位置上，采用所提方法对选定的信道1和信道2的资源进行分配，对分配后的信道带宽进行对比。实验结果如图4所示。

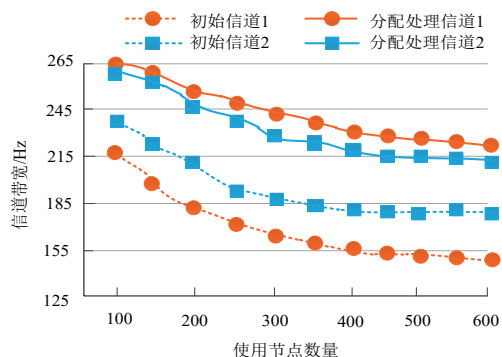


图4 多信道资源实时分配后的带宽对比图

通过图4可知，随着节点增多，资源分配处理的信道带宽虽然呈现逐渐下降的趋势，但与所提方法应用前相比，仍有着较为明显的提升。其中，当最多有600节点参与时，信道1带宽从180 Hz提升至210 Hz，信道2的带宽从150 Hz提升至220 Hz。这表明，在压缩处理技术的应用下，通信资源得到了有效调度和调整，从而有助于提高多信道通信资源的分配效率。

2.2.2 复用链路可达速率对比

为确保最终测试结果真实可靠，采用对比形式进行验证，选定 DEABC 算法的资源分配算法和多源数据分析的资源分

配算法作为对比方法,与设计的压缩感知无线传感器网络多信道通信资源分配方法一同开展实验。复用链路可达速率体现了资源分配策略下链路支持的数据传输速率,若算法能使该速率最大化,则意味着资源利用更有效,可提升无线传感器网络整体性能,故将其作为评价指标。针对当前测定得出的数据,分4组同步传输分配,得到对比结果如图5所示。

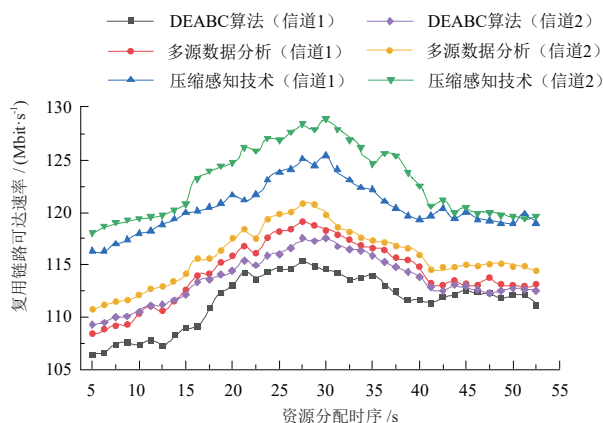


图5 资源分配复用链路可达速率对比

通过图5可知,相较于DEABC算法的资源分配算法和多源数据分析的资源分配算法,所提压缩感知技术能够有效提高资源分配复用链路可达速率。其中,信道1的资源分配复用链路可达速率最高为128.75 Mbit/s,信道2的资源分配复用链路可达速率最高为125.63 Mbit/s,均高于另两种对比方法。这表明本研究设计的资源分配方法传输速率较快,资源分配处理效果更佳,资源利用更有效,进而提升了无线传感网络整体性能。

3 结语

为应对无线传感器网络在复杂多变环境中的通信挑战,本文提出无线传感器网络多信道通信资源压缩感知分配方法。该方法能够针对复杂多变的背景条件,有效突破传统通信资源分配的局限,增强了分配过程的可控性和安全性。同时,通过引入压缩感知机制,该方法成功减少了数据传输中的冗余信息,显著提升了传输效率。在此基础上,通过对多信道资源的精细分配,有效避免了信道冲突,进而优化了网络的整体性能,应用效果较好。

参考文献:

[1] 崔馨月,富爽.基于DEABC算法的EH-CRAIoT的资源分配算法研究[J].现代电子技术,2024,47(13):55-60.
[2] 张进军,周锐.基于多源数据分析的物联网智能跨层资源分配算法[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2024,29(2):73-81.
[3] 李翔.城市轨道交通规划通信资源分配研究[J].人民公交,

2024(10):85-87.

[4] 韩东升,梁燊.无人机辅助传感器网络中吞吐量与节点能量优化方法[J].电讯技术,2024,64(7):1005-1014.
[5] 郝万兵,张军,张昕.基于改进遗传算法的干扰资源分配方法研究[J].火控雷达技术,2023,52(2):56-60.
[6] 周琳,王祎,朱效洲,等.面向反导预警作战的多传感器任务分配拍卖方法[J].现代雷达,2023,45(6):42-50.
[7] 董赞亮,刘春辉,黄丽珍.面向区域覆盖的多无人机动态通信资源分配方法[J/OL].北京航空航天大学学报:1-17[2024-04-30].https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0745.
[8] 胡继圆,于璠.结合信誉积分的PBFT改进方案[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2023,41(2):28-31.
[9] 黄杰,李幸星,杨凡,等.基于图卷积神经网络的超密集物联网资源分配策略[J].通信学报,2024,45(10):243-252.
[10] 周浩浩,马武彬,吴亚辉,等.CPS中面向区间任务的多类资源分配方法[J].运筹与管理,2024,33(9):106-112.
[11] 程伟,周伟敏.无线传感器网络的多信道信息融合方法设计[J].传感技术学报,2024,37(5):898-903.
[12] 郑岚.多信道通信网络环境下基于节点组簇技术通信资源调度算法[J].山西能源学院学报,2021,34(5):97-99.
[13] 宋晓勤,张文静,雷磊,等.多目标联合优化的车联网动态资源分配算法[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(1):266-274.
[14] 张子睿,张贞凯,商晓可.基于分布式MIMO的雷达通信一体化功率分配算法[J].现代雷达,2024,46(12):95-101.
[15] 谢桦泽,袁昊,李若哲,等.面向作战环的战术通信网络资源分配方法[J].火力与指挥控制,2025,50(1):130-137.
[16] 孙飞,李新洪.基于NSGA-NN多目标优化框架的快速响应星座设计方法[J].计算机应用与软件,2025,42(2):129-135.
[17] 刘衍平,张坤坤,宋富洪.基于多目标的无人机辅助无线传感器网络数据收集方案[J].科学技术与工程,2025,25(3):1272-1279.
[18] 安威鹏,刘镕飞.基于多目标优化策略的最佳无线传感器布置[J].小型微型计算机系统,2025,46(3):751-758.

【作者简介】

代静佳(1985—),女,河南洛阳人,本科,助教,研究方向:计算机应用技术。

梁冲(1991—),男,河南商丘人,本科,助教,研究方向:计算机科学与技术。

(收稿日期:2025-01-14 修回日期:2025-05-22)