Bandwidth Delay Sensing Data Aggregation Method for Multi source Wireless Sensor Networks*

GENG Zhongbao[1,2*], SONG Yalei[1]

(1.College of Information, Mechanical & Electrical Engineering, Zhengzhou Business University, Gongyi He'nan 451200, China;
2.School of Computer Science and Technology, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou He'nan 450000, China)

Abstract: To improve the transmission efficiency of multi-source wireless sensor networks, a bandwidth delay sensing data aggregation method for multi-source wireless sensor networks is designed. Three types of virtual queues are constructed and thresholds are determined based on bandwidth delay data to perform end-to-end calculation, so as choose corresponding bandwidth delay thresholds for different types of data streams. The chi square fitting test method is used to determine the trust level of the current delay perception data, and based on this, data samples that are abnormal or deviate from the distribution model are excluded. Information is compressed and extracted from data with high chi square statistics, and perceptual data aggregation is achieved through clustering weights. The simulation results show that the proposed method can control the transmission delay within 50 ms in Gaussian or Ricean noise environments, with high network bandwidth data aggregation results, and the network data transmission energy consumption is below 100 J, indicating that bandwidth delay aware data aggregation in multi-source wireless sensor networks can reduce transmission time and resource waste.

Key words: multi source wireless sensor network; bandwidth delay perception; data aggregation; chi square fit; node trust
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2024.09.022

多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚方法*

耿中宝[1,2*], 宋亚磊[1]

(1.郑州商学院信息与机电工程学院, 河南 巩义 451200; 2.郑州轻工业大学计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450000)

摘 要: 为提高多信源无线传感网络的传输效率, 设计了一种多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚方法。该方法构建三类虚拟队列, 并根据带宽时延数据判断阈值进行端到端计算, 以针对不同类型的数据流计算相应的带宽时延阈值。使用卡方拟合检验方法对当前时延感知数据的信任度进行判定, 在此基础上排除异常或偏离分布模型的数据样本。对高卡方统计量的数据进行压缩或信息提取, 并通过聚类权值实现感知数据汇聚。仿真结果显示, 该方法在高斯噪声或莱斯噪声环境下, 能将传输时延控制在 50 ms 以内, 网络带宽数据汇聚结果较高, 且网络数据传输耗能低于 100 J。这表明多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚可减少传输时间和资源浪费。

关键词: 多信源无线传感网络; 带宽时延感知; 数据汇聚; 卡方拟合度; 节点信任度
中图分类号: TP393 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2024)09-1638-06

多信源无线传感网络(Multi-source Wireless Sensor Network)是一种用于数据采集和传输的无线通信网络。由多个分布式信源节点组成[1], 这些信源节点能够感知、采集和传输环境中的各种数据, 节点之间的通信依赖于网络的带宽和时延性能[2-3]。但由于该类型网络中的节点数量庞大, 数据量巨大, 节点之间距离较远且不同信源之间的数据可能存在冲突或重复, 因此可能会造成网络带宽压力较大、数据传输的时延较长。有效的数据筛选和聚合可以保证数据的及时性和准确性[4], 优化数据的发送和接收过程, 提高网络的带宽利用率和数据传输效率。因此采用带宽时延感知的方法, 使节点可以感知到网络中的带宽和传输时延, 并根据这些信息动态选择合适的路径和策略来进行数据汇聚势在必行。目前相关领域研究学者也进行了一定的相关研究。

Chenthil 等[5]提出了一种名为 MSS-TLHIA 的多槽调度方法, 通过聚合器节点选择过程实现数据汇聚。首先按黄金比例划分网络为六边形网格, 提升节点覆盖区域。然后划分网络为多个簇, 使用排名模糊机制选择簇头。在两层六边形网格中选择共同聚合器节点, 每个时段重新选择聚合器节点以延长其生命周期。该方法实现了高效数据汇聚, 具有长生命周期、低能耗和避免碰撞等优势。在选择簇头和聚合器节点时需平衡能量消耗, 防止节点能量提前耗尽影响数据汇聚。张云天等[6]提出了信誉共识的数据汇聚方法, 构建基于区块链的数据汇聚模型, 优化时序数据库链, 并采用

项目来源: 河南省科技攻关计划项目(122102310440); 2023 年度河南省本科高等学校智慧教学专项研究项目(78)
收稿日期: 2023-11-28 **修改日期**: 2023-12-19

向量量化压缩来减少数据交互和内存消耗,同时也支持浮点型数据。最后,根据用户身份状况,基于信誉共识方法判定其是否能参与签名活动,并采用共识机制作出决策,实现数据汇聚。虽然向量量化压缩在减少数据交互和内存消耗方面具有优势,但若压缩算法不合理或压缩率过高,则可能会影响数据的准确性和完整性。Agarwal 等[7]提出了一种基于 3S 分层簇的无线传感器网络节能数据聚合协议,通过智能感知、选择性簇头提名和数据聚合调度实现数据汇聚,降低能耗、延长网络寿命。协议包括智能数据传感、簇选择和高级聚合调度三个阶段。其中,利用无界缓冲区储存数据值并减少传输,但需注意缓冲区设计和大小,否则可能导致数据丢失或过多。邢玉萍等[8]提出了 Worker 权重的数据汇聚方法,首先研究 Worker 加权差分演化算法来解决众包成员排序中的差异性问题。然后,在基于目标函数和 Worker 的基础上,构建差分进化算法的 Worker 权值优化模型,以获取适用于多数据情景的最佳候选结果的权值,并完成数据汇聚。需要注意的是,在构建差分进化算法的 Worker 权值优化模型时,如果目标函数与模型构建不准确或未考虑全面的因素,可能导致优化模型无法充分捕捉多数据情景下的最佳权值候选结果,进而影响数据汇聚结果的准确性和覆盖程度。

结合上述研究结果,提出了多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚方法。该方法主要考虑到了多信源节点之间的协作和信息共享。通过相互交流和共享感知到的带宽和时延信息,节点能够更好地调整自己的传输行为,避免网络拥塞和数据丢失。在此基础上对数据进行汇聚,使整个网络更加可靠和高效。

1　带宽时延阈值的计算

多信源无线传感网络通常由大量分布式信源节点组成,而节点之间的连接和拓扑可能会发生变化,导致不同节点的数据流可能具有不同的带宽和时延要求,而且多信源无线传感网络中不同的信源节点之间的带宽不同会导致多信源无线传感网络中的数据进行传输时产生时延现象,进而影响数据传输效率。因此,为了符合网络服务质量要求,对带宽时延阈值进行端到端计算,以针对不同类型的数据流计算相应的带宽时延阈值。

假定网络中任何一个会话流 f 都有相应的端到端带宽时延阈值 ρ_f。此外,假定每个会话流都有最低数据传输速率 a_f,也就是在整个网络中的平均数据传输速率应该不低于 a_f。由此,构建三类具体的虚拟队列,并对其进行理论分析,使其满足稳定性的要求,也可同时计算时延感知阈值。

第一类:多信源无线传感网络中的数据类型和流量可能具有时变性和不确定性。因此,在传输层构建网络虚拟队列 $U_f(t)$,使系统具备适应性和灵活性,能够根据实时的数据流量情况和网络状态进行动态调整[9]。

假定其具有一定的网络带宽数据服务率 $R_f(t)$,然后把等待队列中的数据发送到源节点,其输出率可看作为 $\mu_f(t)$,μ 为网络链路。从这一点出发,能够得出相应的队列变化表达式:

$$U_f(t+1)=d\left\{\left[U_f(t)-\boldsymbol{N}\sum_{f=1}^{s}\mu_f(t)\right]+R_f(t)\right\} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{N}$ 表示信源节点集合,s 表示多信源无线传感网络中的会话源,d 表示丢包率,t 表示时间。

假定输入满足条件 $R_f(t)\leqslant\mu_M$,其中,M 为容量数值。利用稳定性理论,获得网络带宽时延阈值条件:

$$\lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\sum_{t=0}^{t}R_f(t)\leqslant\lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}U_f(t+1) \tag{2}$$

第二类:多信源无线传感网络包含多个信源节点,其中含有多个数据源,可能涉及大量的数据流。因此对网络带宽 $Z_f(t)$ 进行构建,以考虑满足这些数据流的最小速率需求,以确保数据能够及时传输并得到处理。

初始值设置为 $Z_f(t)=0$,则多信源无线传感网络带宽变化形式可描述为:

$$Z_f(t+1)=a_f[Z_f(t)-R_f(t)] \tag{3}$$

式中:多信源无线传感网络带宽数据接收率 a_f 是会话 f 的最低数据传输速率。在网络带宽稳定且 $Z_f(t+1)\leqslant a_f$ 时,可以获得该网络带宽下的最小传输率。

第三类:多信源无线传感网络中的数据流具有不同的时延要求。通过考虑多信源无线传感网络中平均端到端时延感知数据,构建网络虚拟队列 $X_f(t)$。

该网络虚拟队列表示为:

$$X_f(t+1)=Q_n^{\mathrm{fsd}}(t)[X_f(t)-\rho_f Z_f(t+1)] \tag{4}$$

公式中,n 表示多信源无线传感网络信源节点,$n\in\boldsymbol{N}$;$Q_n(t)$ 表示队列积压。

通过构建这三类虚拟队列,根据数据流的类型和时延要求需要确定合适的带宽时延阈值,以保证数据传输的实时性和时效性。因此,当网络带宽保持稳定时,结合网络虚拟队列,则能够获得带宽时延阈值不等式:

$$\lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\sum_{t=0}^{t}Q_n(t)\leqslant\rho_f\lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\sum_{t=0}^{t}R_f(t) \tag{5}$$

由此可以得出端到端的带宽时延阈值,可表示为:

$$\rho_f \leqslant \frac{\sum_{t=0}^{t} Q_n(t)}{U_f(t+1)} \tag{6}$$

由式(6)可知,若多信源无线传感网络中的带宽都满足稳定条件,端到端平均时延高于阈值 ρ_f,则为时延感知数据;反之,不为时延感知数据。

2 感知数据汇聚方法设计

通过第 1 部分选择了相对合理的带宽时延阈值,可以控制数据的传输速率和延迟,为多信源无线传感网络的感知数据汇聚过程提供协调的节点数据收集和传输,以满足感知需求并保证网络的性能。为了进一步优化汇聚质量,通过端到端的带宽时延阈值 ρ_f 对多信源无线传感网络中已保存的 t 个时间点的历史数据进行筛选,并使用卡方拟合检验方法对当前时延感知数据的信任度进行判定[10],以排除异常或偏离分布模型的数据样本,实现感知数据汇聚。

在汇聚过程中,建立统一的假定变量,其中 r 为分簇数量,C_i 为第 i 个簇,m 为簇 C_i 中节点数目,X_{ij} 为簇 C_i 中第 j 个信源节点的读数值,在网络稳定的情况下,节点读数 X_{ij} 满足独立同分布。选择时延感知数据最弱的簇作为期望簇 C_z,通过对比 C_i 和 C_z 数据的差值,判定 C_i 的数据是否为时延感知数据。过程如下:

令 A_{ij} 表示 C_i 中第 j 个信源节点在该时间点上的读取,B_{ij} 表示 C_i 中第 j 个信源节点在 t 个时间的使用带宽时延阈值 ρ_f 对历史数据进行筛选后的平均值,那么 C_i 中第 j 个节点的信任度表达式为:

$$S_{ij} = \frac{\rho_f}{1+|B_{ij}-A_{ij}|} \tag{7}$$

对每一个节点的信任度标准化,其表达式为:

$$S'_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} S_{ij}} \tag{8}$$

那么,对第 i 个聚类的估算数值表达式为:

$$\hat{x}_i = \sum_{i=1}^{m} S'_{ij} \times A_{ij} \tag{9}$$

式中:X 表示聚合函数获得的目标变量,$\bar{X}$ 表示 X 的估计值,$\bar{X}_i$ 表示簇 C_i 目标变量 X_i 的估计值。

由于带宽时延感知的簇内节点大于阈值时,数据之间有很大差别,所以用中心距离表征簇中的数据被感知情况。则聚类 C_i 到 C_z 的中心距离表达式为:

$$d_i = |\bar{X}_i - \bar{X}_z| \tag{10}$$

式中:$\bar{X}_z$ 是一个预期聚类的估值。

然而,在少量的带宽时延下,网络节点所能感知到的信息并没有明显变化,很难精确地选择出没有带宽时延感知或者带宽时延感知最小的聚类作为预期模型,从而影响了数据汇聚的准确性[11]。为此,为了避免由于选择理想模型而引入的错误,使用卡方拟合度判定在带宽时延感知数据不大的情况下,每个聚类的感知大小。这时,第 i 个集群内可感知节点数据的卡方拟合度表达式为:

$$\delta_i = \frac{d_i}{1+\chi_i^2} \tag{11}$$

式中:χ_i^2 表示第 i 个集群的卡方统计量。C_i 的数据汇聚权重 w_i,w_i 是与 C_i 中心距离相对的权重。

$$w_i = \frac{\delta_i^2}{\sum_{i-1}^{r} \delta_i^2} \tag{12}$$

将 w_i 与其他 $r-1$ 个非期望聚类的估算数值作如下加权操作,其表达式为:

$$\hat{X}' = \sum_{i=1}^{r-1} w_i \times \hat{X}_i \tag{13}$$

将式(13)所求的数值再次与期望模型的估算值相聚合,以获得最后的聚合计算结果;

$$\hat{X} = f(\hat{X}', \hat{X}_z) \tag{14}$$

式中:$f(\,)$ 表示聚合函数计算的平均数。

从式(14)可以看出,卡方数值反映的是实际带宽时延感知和理论带宽时延感知之间的一致性,在假定样本符合理论分配的情况下[12],实际带宽时延感知与理论带宽时延感知之间的差异并不大;相反,实际带宽时延感知与理论带宽时延感知之间的差异会非常大。由此可知,当 χ_i 值较低时,实际带宽时延感知就会更接近于理论带宽时延感知。这时,聚类 C_i 数据汇聚权重 v_i,v_i 是相应于 C_i 卡方拟合度的权重。

$$v_i = \frac{\chi_i^2}{\sum_{j=1}^{r-1} d_j^2} \tag{15}$$

通过对每一类的估算值和相应权重的加权计算,实现多信源无线传感器网络带宽时延感知数据汇聚。最后的汇聚结果可表示为:

$$\hat{X}_{\text{end}} = \sum_{i=1}^{r} v_i \times \hat{X}_i \tag{16}$$

综上,所提方法在确定合理的带宽时延阈值的基础上,设定了三类虚拟队列,以确保节点之间的数据收集和传输的可靠性和效率。然后,利用带宽时延阈值筛选保存的历史感知数据,仅选择符合阈值要求的数据做进一步处理和传输。最后,使用卡方拟合检验方法对筛选后的数据样本的时延感知数据的信任度进行判定,排除异常数据样本,实现多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚。

3　仿真与分析

3.1　仿真设置

为了验证多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚方法的有效性,设置多信源无线传感网络环境如图 1 所示。

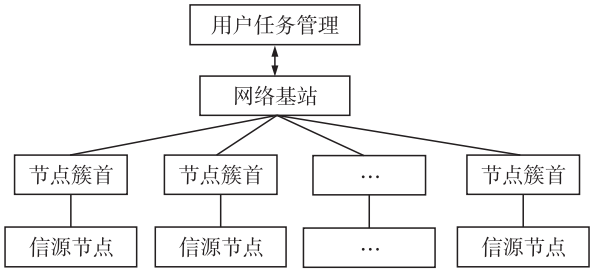

图 1　多信源无线传感网络

具体的无线传感网络仿真参数如表 1 所示。

表 1　无线传感网络仿真参数

仿真参数	仿真数值
网络部署面积	10 240×10 240/m^2
信源节点分布方式	随机分布
网络节点密度	≥10/(节点/m^2)
中继节点能量	≥10/J
高信道噪声环境	莱斯噪声
低信道噪声环境	标准高斯白噪声
信号中心频率	1 024/MHz
接收节点是否为通电状态	是
节点最小传输带宽	≥10/Mbit/s

通过上述仿真设置,选用文献[5]MSS-TLHIA 的多槽调度方法、文献[6]信誉共识方法和文献[7]3S 分层簇的无线传感器网络节能数据聚合协议作为带宽时延感知数据汇聚方法的对比方法进行仿真。

3.2　结果与分析

在多信源无线传感网络中,带宽时延感知数据汇聚是指将来自多个信源节点的数据汇集到集中的节点进行处理和传输。对于这样的系统,高斯噪声和莱斯噪声的存在会对数据的汇聚造成干扰和影响。高斯噪声会引入误差和丢失数据的可能性,而莱斯噪声则会增加数据的时延扩展,可能导致数据不完整或延迟。同时,高斯噪声和莱斯噪声具有不确定性和随机性,可以模拟无线信道传输的随机性质。在实际传输中,信道的特性和噪声水平都可能发生变化,在仿真中引入这些噪声可以更全面地考虑信道的不确定性,以及数据在不同信道条件下的传输效果,对数据汇聚方法的性能进行全面评估。因此,在仿真中,选取高斯噪声与莱斯噪声作为两种仿真条件,对高斯噪声与莱斯噪声干扰下多信源无线传感网络的数据传输时延和网络带宽汇聚效果进行分析,以验证多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚方法的有效性。其中,利用随机数生成器来生成服从均值为零、方差为指定值的高斯分布的噪声样本,然后将这些噪声样本与传输信号相加,以模拟高斯噪声对传输数据的干扰效果。高斯噪声干扰的噪声功率设定为-90 dBm;在模拟莱斯噪声时,可通过随机数生成器生成服从莱斯分布的样本,并根据设定的信号强度和 K 值进行适当的调整,以模拟莱斯噪声对传输数据的干扰效果。莱斯噪声干扰的信号强度设定为-30 dBm。

图 2、图 3 所示为高斯噪声与莱斯噪声两种条件下,带宽时延感知数据汇聚方法与信誉共识方法、MSS-TLHIA 的多槽调度方法和 3S 分层簇的无线传感器网络节能数据聚合协议的传输时延结果,设定数据传输轮数为 1 000 次。

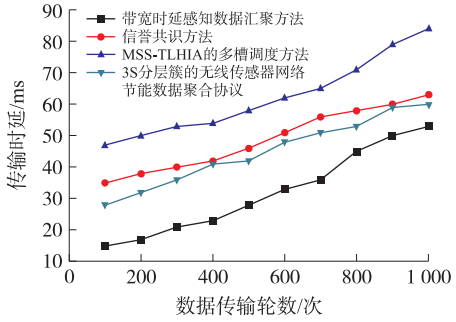

图 2　高斯噪声干扰下的传输时延

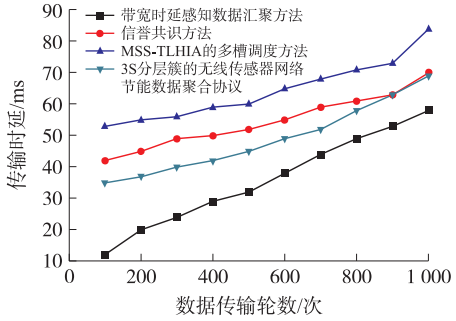

图 3　莱斯噪声干扰下的传输时延

通过图 2、图 3 能够明显观察到,带宽时延感知数据汇聚方法无论在高斯噪声还是莱斯噪声环境下,都能有效地将传输时延控制到 50 ms 以内,这是因为带宽时延感知数据汇聚方法对带宽时延阈值进行端到端计算,以针对不同类型的数据流计算相应的带宽时延阈值。通过监测网络的带宽限制以及数据流的时延要求,方法可以动态地确定适当的带宽时延阈值,以满足不同类型数据流的传输需求。这种计算带宽时延阈值的端到端方法可以使带宽时延感知数据汇聚方法根据实际需求灵活地调整数据传输的延迟。通过合适的带宽时延阈值,方法可以保障时延敏感的数据流能够及时传输并得到及时处

理,同时从整体上优化带宽利用和网络性能。

图 4、图 5 所示为高斯噪声与莱斯噪声两种条件下,带宽时延感知数据汇聚方法与信誉共识方法、MSS-TLHIA 的多槽调度方法的网络带宽汇聚结果。

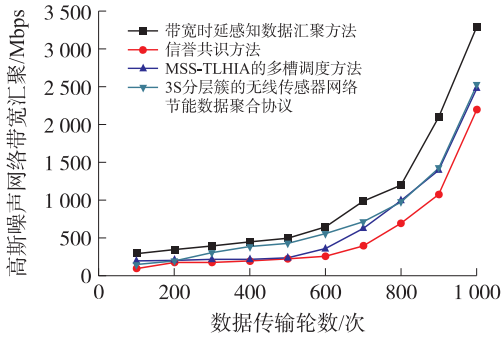

图 4 高斯噪声网络带宽汇聚

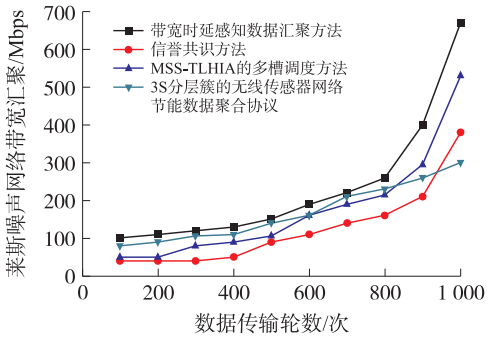

图 5 莱斯噪声网络带宽汇聚

通过图 4、图 5 可知,带宽时延感知数据汇聚方法在设计上考虑了节点的负载情况和带宽需求。使用卡方拟合检验方法对当前时延感知数据的信任度进行判定。使得带宽时延感知数据汇聚方法可以根据当前网络状态和数据流特性,调整数据传输的策略和优先级。对于信任度高的时延感知数据,方法会优先选择这些数据进行传输和处理,以确保数据能够及时传输和处理。而对于信任度较低的数据,则可能采取其他策略或进行进一步的检验和验证。这种设计使得方法能够综合考虑网络状态和数据流特性,并根据信任度调整数据的传输优先级,从而实现有效的带宽时延控制和数据汇聚。因此,带宽时延感知数据汇聚方法数据汇聚效率最佳,确保网络运行稳定,减少节点能量消耗。

通过图 6 能够看出,在相同信号频率的情况下,带宽时延感知数据汇聚方法在 1 400 MHz 时,数据传输耗能为 98 J;信誉共识方法在 1 000 MHz 时,数据传输耗能已经为 101 J;MSS-TLHIA 的多槽调度方法在 700 MHz 时,数据传输耗能是 101 J;3S 分层簇的无线传感器网络节能数据聚合协议在 800 MHz 时,数据传输耗能是 108 J。带宽时延感知数据汇聚方法基于卡方拟合检验的结果,排除异常或偏离分布模型的数据样本。可以精确地选择和传输有价值的时延感知数据,使得数据传输更加高效和节能。保证带宽资源的有效利用,减少传输过程中的冗余数据、错误和干扰,从而降低了系统的能量消耗,保证了网络传输的稳定性和可靠性。

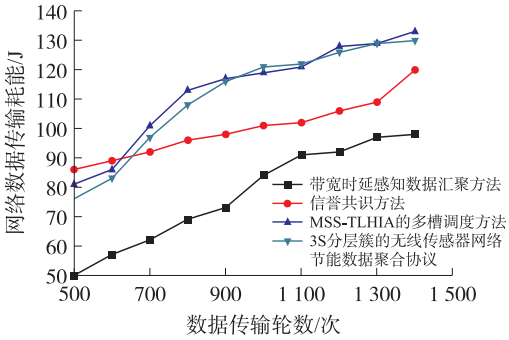

图 6 网络数据传输耗能

为了进一步验证带宽时延感知数据汇聚方法的汇聚效果,选用网络拥塞程度和数据分发覆盖率作为评估指标。通过评估网络拥塞程度,可以直观地了解带宽时延感知方法对于网络拥塞问题的解决效果。较低的网络拥塞程度表示带宽时延感知方法能够合理分配带宽,减少网络瓶颈,提高数据传输的稳定性和效率。而通过评估数据分发覆盖率,可以判断带宽时延感知方法对于数据的可靠传输能力。较高的数据分发覆盖率表示带宽时延感知方法能够有效选择路径和处理数据,从而提高数据的成功传输率,保证数据汇聚的完整性和准确性。网络拥塞程度和数据分发覆盖率的仿真结果如图 7、图 8 所示。

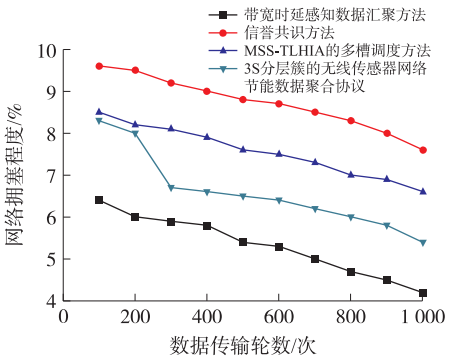

图 7 网络拥塞程度

从图 7 中可以看出,随着数据传输轮次的增加,四种方法的网路拥塞程度均呈现下降趋势。其中,带宽时延感知数据汇聚方法为了避免由于选择理想模型而引入的错误,使用卡方拟合度判定在带宽时延感知数据不大的情况下,每个聚类的感知大小,可以更精确地了解每个聚类的可用带宽情况和传输延迟。通过准确地估计感知大小,带宽时延感知数据汇聚方法能够更有效地进行数据传输的路径选择和

资源分配,使得带宽时延感知数据汇聚方法的网络拥塞程度整体相对较低,在 7.5%以下。

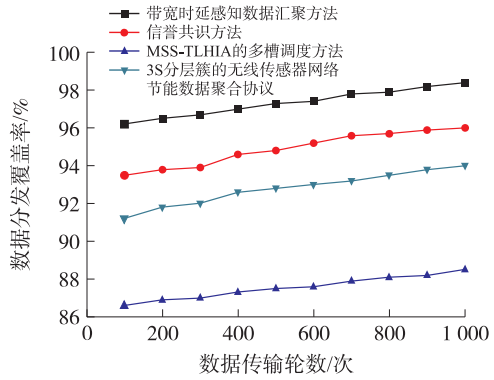

图 8　数据分发覆盖率

从图 8 中可以看出,四种方法的数据分发覆盖率均保持在 85%以上。其中,带宽时延感知数据汇聚方法对带宽时延阈值进行端到端计算,可以根据数据流类型计算相应的带宽时延阈值,对于大量数据流或者优先级较高的数据流,可以选择具有更高可用带宽和较小传输延迟的路径,从而提高数据分发覆盖率。因此,带宽时延感知数据汇聚方法得到的数据分发覆盖率可以保持在 96%以上。

综上所述,说明带宽时延感知数据汇聚方法在汇聚效果方面取得了良好的成果。通过合理选择路径、优化资源分配以及动态调整阈值等手段,该方法能够有效降低网络拥塞程度,提高数据分发覆盖率,从而改善系统的性能和稳定性。这进一步验证了带宽时延感知数据汇聚方法对于优化数据传输和应对网络拥塞的有效性。

4　结论

多信源无线传感器网络服务日趋多元化,为了保证数据的准确性,不同信源中的海量的数据信息需要汇聚,而无线传感器网络连接中存在诸多不确定性和节点能量约束,使得网络需要具备高效的数据汇聚能力。因此,提出了多信源无线传感网络带宽时延感知数据汇聚方法。仿真结果表明,带宽时延感知数据汇聚方法能维系网络运行稳定,减少节点能量消耗,降低网络传输耗能,从而保证接收和传输信息完整,具有较好的感知数据汇聚效果。

参考文献:

[1] 宋英杰,薄敬东,王义涛,等. 基于 RT-Thread 和 ESP-NOW 的无线传感器网络系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2023(6):71-75.

[2] 曲大鹏,张建坤,吕国鑫,等. 命名数据网络中带宽时延感知的拥塞控制机制[J]. 计算机科学与探索,2022,16(5):1076-1086.

[3] 徐志威,毕美华,季晨阳,等. 支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法[J]. 光通信技术,2022,46(5):15-19.

[4] 付翔,何宗权,黄斌,等. 基于多信息数据融合滤波的坡度识别算法[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2021,42(2):173-179.

[5] Chenthil T R,Jayarin P J. An Energy Aware Multi Slot Scheduling with Two-Layer Hexagonal Based Integrated Aggregation Approach for Underwater Wireless Sensor Networks(UWSN)[J]. Journal of Interconnection Networks,2022,22(4):44-71.

[6] 张云天,申玉民,王旭,等. 融合区块链信誉共识的动态数据汇集算法研究[J]. 计算机仿真,2023,40(3):413-416,425.

[7] Agarwal A,Dev A. 3S-Hierarchical Cluster-Based Energy-Efficient Data Aggregation Protocol in Wireless Sensor Network[J]. International Journal of Cloud Computing,2022,11(4):373-388.

[8] 邢玉萍,詹永照. 基于 Worker 权重差分进化与 Top-k 排序的结果汇聚算法[J]. 通信学报,2021,42(1):27-36.

[9] Shagari N M. A Hybridization Strategy Using Equal and Unequal Clustering Schemes to Mitigate Idle Listening for Lifetime Maximization of Wireless Sensor Network[J]. Wireless Networks,2021,27(4):2641-2670.

[10] 雷芳菲,褚继峰,刘洋,等. 基于半导体气体传感阵列的电缆过热故障诊断方法[J]. 电工技术学报,2023,38(13):3651-3664.

[11] 张俊豪,罗国富,杨幸博,等. 基于深度学习和机器视觉的多源数据感知技术研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(4):107-113.

[12] Elgendy I A,Muthanna A,Hammoudeh M,et al. Advanced Deep Learning for Resource Allocation and Security Aware Data Offloading in Industrial Mobile Edge Computing[J]. Big Data,2021,9(4):265-278.

耿中宝(1993—),男,汉族,河南孟州人,硕士,郑州商学院讲师、实验师,主要研究方向为计算机软件技术及应用、智慧化教学,主持市厅级项目 7 项,主持校级教改项目 2 项,参与省市级项目 20 余项,获奖 6 项,获得实用新型专利授权 2 项,发表学术论文 6 篇,2021 年获河南省教育厅教育信息化优秀成果奖二等奖,gengzhongbao2023@163.com。