

文章编号: 2095-4980(2020)06-1103-07

## 基于稀疏密集阵传输机制的 WSN 数据传输汇聚算法

王先清<sup>1</sup>, 彭成<sup>2</sup>

(1.广东科学技术职业学院 大数据与人工智能学院, 广东 广州 510640;

2.新疆师范大学 物理与电子工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 为了改善无线传感网(WSN)的数据传输汇聚能力, 提出了基于稀疏密集阵传输机制的 WSN 数据传输汇聚算法。引入核生成函数, 设计了一种新的传输矩阵, 将簇头节点与 sink 节点之间连通程度及负载程度进行量化, 以提升簇头节点传输效果的评估能力; 采用特征向量按列排序并结合卷积算法降低簇头节点传输值, 以有效减少簇头节点负载; 采用树分解模式搜寻可用哈密尔顿回路, 构建了基于路径分解优化机制的汇聚稳定方法; 通过使用哈密尔顿寻址来优化叶子节点与根节点之间的数据链路, 以增强簇头节点覆盖能力与提高数据传输过程的稳定性能。仿真实验表明, 与当前常用的基于阈值筛选模糊分簇的 WSN 数据稳定汇聚算法和面向医疗应用的无线传感器网络多径数据传输方法相比, 所提算法具有更为集中的传输报文集中度, 以及更高的传输链路抖动控制能力和网络汇聚带宽。

**关键词:** 无线传感网; 数据汇聚; 稀疏密集阵传输; 核生成函数; 树分解; 哈密尔顿回路

**中图分类号:** TN919.72; TP393 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2019530

## WSN data transmission aggregation algorithm based on sparse dense array transmission mechanism

WANG Xianqing<sup>1</sup>, PENG Cheng<sup>2</sup>

(1.School of Big Data and Artificial Intelligence, Guangdong Polytechnic of Science and Technology College, Guangzhou Guangdong 510640, China; 2.School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi Xinjiang 830054, China)

**Abstract:** In order to improve the data transmission convergence ability of Wireless Sensor Networks (WSNs), a data transmission and aggregation algorithm based on sparse dense array transmission mechanism is proposed. A new transmission matrix is designed by introducing the kernel generation function to quantify the connectivity and load between cluster head node and sink node for improving the evaluation ability of cluster head node transmission effect. And the eigenvectors are sorted by column and convolution algorithm to reduce the transmission value of cluster head nodes for effectively reducing the load of cluster head nodes. The tree decomposition mode is utilized to search available Hamiltonian circuits, and a convergence stability method based on path decomposition optimization mechanism is constructed. The Hamiltonian addressing mode is adopted to optimize the data link between leaf node and root node one by one so as to enhance the coverage ability of cluster head nodes and improve the stability performance of data transmission process. The simulation results show that, compared with the current common algorithm of a stable clustering for WSN data based on threshold filtering and fuzzy clustering, and the energy-saving and reliable multi-path data transmission in wireless sensor networks for medical applications, the proposed algorithm has higher concentration of message transmission, stronger control ability on transmission link jitter, and higher network bandwidth.

**Keywords:** Wireless Sensor Network; data aggregation; sparse dense array transmission; kernel generation function; tree decomposition; Hamilton loop

收稿日期: 2019-12-11; 修回日期: 2020-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61370229); 广东省重大科技专项基金资助项目(2016B010109008); 广东省自然科学基金资助项目(S2013010015178)

作者简介: 王先清(1966-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为传感器、无线网络通信、计算机应用技术。email:wangxq1966gky@aliyun.com

无线传感网(WSN)技术主要在一定地理范围内部署可采集数据的节点并形成自组织网络,从而实现数据实时采集、汇聚、传输与处理,实践中往往通过 sink 节点管理网络节点的部署和数据处理<sup>[1]</sup>。WSN 网络需要能够准确进行数据汇聚及传输,以便确保采集数据的准确性<sup>[2]</sup>。由于 WSN 网络部署环境具有复杂性,如露天环境、高污染、高噪声干扰等实际场景,客观决定了无线传感网节点容易受到干扰,导致节点出现受限现象,进而使得网络运行出现汇聚传输抖动现象<sup>[3]</sup>。当前研究表明<sup>[4]</sup>:为确保无线传感网稳定运行,需要采用如重传机制、纠错机制及多径传输等模式应付传输信道干扰等因素,以便提高数据汇聚传输稳定程度。因此,采取有针对性的机制提高无线传感网传输汇聚性能,成为当前研究的热点<sup>[5]</sup>。

当前提出了许多解决方案,在一定程度上稳定了 WSN 传输汇聚性能。Hao<sup>[6]</sup>等提出了一种基于冗余备份机制的 WSN 数据传输汇聚算法,采用信道编码方式增加传输数据冗余度,并利用数据报文增加的冗余报头进行链路探测及能量预估,可在多种复杂环境下准确评估 WSN 数据汇聚质量,具有很强的对端预测性能。但该算法在节点密集环境下也存在冗余度过高等问题,易引发严重的网络拥塞,降低网络传输能力。Zhang<sup>[7]</sup>等提出了一种基于压缩感知机制的 WSN 数据传输汇聚算法,主要采用抽样方式压缩待传输的数据报文,引入信道校验方法优化传输抗噪性能,可在多种环境下实现 WSN 数据快速汇聚,且具有汇聚质量可控的特点。但该算法在信道校验过程中需要采用贝利叶分布方式进行随机采样,信道噪声干扰较高时易出现严重的网络时延,导致网络易出现频繁的数据重传输现象,难以在实践中得到有效推广。Liu<sup>[8]</sup>等引入锚节点定位机制,提出了一种基于节点预部署方案的 WSN 数据传输汇聚算法,该算法主要通过热点区域部署若干性能较优节点的方式,实现数据预汇聚及簇头节点及时更新,可实现数据链路快速收敛及抖动抑制。不过,该算法实施过程中需要将链路信息存储在锚节点内,并由锚节点与 sink 节点进行实时更新。算法对锚节点性能要求较高,容易因一些骨干节点受限而导致网络出现大面积传输瘫痪的现象。为改善 WSN 的数据汇聚能力,本文提出一种新的基于稀疏密集阵传输机制的 WSN 数据传输汇聚算法。首先采用核生成函数优化簇头节点的传输矩阵,采用卷积机制降低传输矩阵对应的传输值,可显著降低簇头节点负载,增强簇头节点传输能力。随后,引入图论算法,将传输链路分割为若干回路性质的哈密尔顿路径,显著增强路径传输能力。

## 1 网络模型综述

无线传感网网络节点制式采用当前常用的 5G 信号传感器,信号调制方式为正交调制模式<sup>[9]</sup>,信号发射星座选取 128 振幅移相键控(Amplitude Phase Shift Keying, APSK)星座<sup>[10]</sup>。设 sink 节点与传感节点均按照随机方式进行区域部署,监测区域为矩形。sink 节点与传感节点彼此存在信息交互,构成相互连通的无向图  $G$ , 满足:

$$G = (V, E) \quad (1)$$

式中:  $V$  表示传感节点,  $E$  表示传感节点间的数据汇聚关系。  $V$  进一步满足:

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} \quad (2)$$

式中  $V_n$  表示各传感节点。若集合  $V$  中无线传感节点  $V_x$  和  $V_y$  存在数据汇聚关系,则满足如下关系:

$$(V_x, V_y) \in E \quad (3)$$

传感节点可以通过广播方式向周围节点发送数据报文,若能接受到周围节点反馈的数据报文,则说明该传感节点处于非孤立状态。此外,本文对无线传感网部署过程做如下规定:

1) sink 节点及传感节点部署完毕后将处于固定状态,若某传感节点的周围节点连续 2 个周期内均无法接受到该传感节点发送的数据报文,则将该传感节点规定为离线状态,无向图  $G = (V, E)$  中相应边将被标注为抖动状态(Jitter State, JS)。

2) 传感网络按照簇头(Cluster Head, CH)节点和簇内(Cluster, C)节点进行分层部署, C 节点采集数据后按周期将数据汇聚至 CH 节点内,由 CH 节点汇聚至 sink 节点。此外, C 节点可以根据网络负载及 sink 节点指令进入休眠状态(Dormancy State, DS),进入 DS 状态的 C 节点仅能在下一数据传输周期启动时,由 CH 节点或 sink 节点通过指令启动。

3) 节点部署完毕后,无论 CH 节点还是 C 节点均具有相同的能量,能量可由 sink 节点通过无线方式进行补充,在 sink 节点启动能量补充指令前,各节点能量消耗满足如下模型:

$$E(i) = (E_{\text{recv}} + E_{\text{tmm}} + P \times l^x) \times B_{\text{recv}}(i) \quad (4)$$

式中:  $E(i)$  表示节点  $i$  的能量消耗;  $E_{\text{recv}}$  表示节点进行数据接收时的固定耗能;  $E_{\text{tmm}}$  表示节点进行数据发送时的固定耗能;  $P$  表示节点功率;  $l$  表示节点间距离;  $B_{\text{recv}}$  表示节点数据传输带宽;  $x$  表示距离系数,一般而言,若节点间距离  $l$  在覆盖半径  $R$  之内时,  $x$  取 2,超过节点覆盖半径时,  $x$  取 4。

为便于进一步分析，本文做出如下定义：

**定义 1:** 无向图  $G$  的二次覆盖分解(Quadratic Cover Decomposition, QCD)。对于式(1)所示的无向图  $G$ ，可以通过 QCD 方式分解为若干棵树  $T$ ，并满足如下性质：

1)  $G$  可实现对  $T$  的全覆盖，即

$$G(V, E) \supseteq \sum_{i=1}^m T_i(V_m) \cup \{V_m \in V\} \tag{5}$$

式中： $T_i$  表示任意一棵树； $V_m$  表示树  $T_i$  的叶子节点。

2) 对于任意  $T(E) \in G(V, E)$ ，满足如下性质：

$$(V_x, V_y) \in E, V(V_x, V_y) \in G \tag{6}$$

式中： $V_x$  和  $V_y$  表示任意两节点； $E$  表示边。

**定义 2:** 伪随机分布。给定任意随机变量  $\mu$ ，若满足如下定义，则称该分布为伪随机分布。

$$\Delta\{\exp(\mu x)\} \leq \exp\left(\frac{\mu^2}{\sqrt{2\pi}}\right) \tag{7}$$

式中： $\Delta$  表示统计均值； $x$  表示任意正常数。

由于无线传感网多部署于较为恶劣的工作环境，如野外环境、核辐射环境、水坝环境等，一旦部署完毕将很难进行节点更新，因此需要采用一定措施，使节点在单位时间内可按照较高的效率实现数据采集。实践中可对采集数据进行压缩处理，采用抽样方式对汇聚结果进行重构，从而实现数据精确汇聚<sup>[11]</sup>。考虑到实际部署过程存在的环境干扰因素，容易发生严重的链路抖动现象，导致传输过程出现数据分组遗失的现象，见图 1(b)，因此需要采用一定的方式降低数据分组遗失事件的发生率，增强无线传感网数据汇聚性能<sup>[12]</sup>。

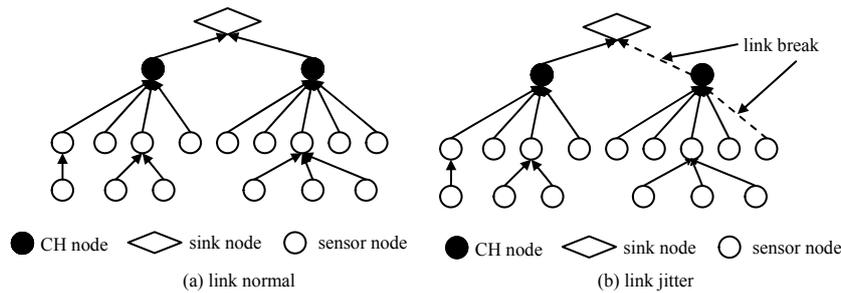


Fig.1 Process of data aggregation  
图 1 数据汇聚过程

## 2 本文 WSN 数据汇聚算法

由上文可知，无线传感网数据传输过程中存在一定的链路抖动问题。此外，由于地理位置相近节点采集的数据具有较高程度的相似性，因此可以采用稀疏模式对数据进行疏化处理<sup>[13]</sup>。据此，本文设计了一种基于稀疏密集阵传输机制的 WSN 数据传输汇聚算法。其主要由两部分构成：基于稀疏密集校验机制的数据传输稳定；基于路径分解优化机制的数据汇聚稳定。

### 2.1 基于稀疏密集校验机制的数据传输稳定

现有方案一般采用小波变换、离散傅里叶变换等方式实现传输数据的稀疏化<sup>[14]</sup>，数据压缩性能优越，具有数据恢复速度较快等特点。然而由于传感数据具有多样化特点，如视频、音频、图片、热感、温压等信号特征极为复杂，现有传输过程中校验矩阵对应的基矢量难以实现对信号特征的全覆盖。如离散傅里叶变化由于存在一一映射特性，难以实现温压、视频等高冗余信号的实时压缩传输。因此，本文提出了一种基于稀疏密集校验机制的数据传输稳定方法，其过程见图 2。

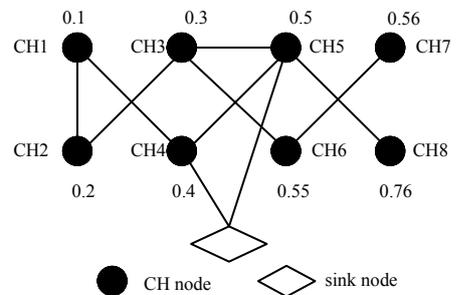


Fig.2 Transmission diagram of cluster head node  
图 2 簇头节点传输图

在所提算法中，传输矩阵使用核生成函数进行初始化。考虑到相邻节点间存在数据相似性，对于式(1)中任意  $V_x$  和  $V_y$  而言，设计如下核生成函数  $\Psi(V_x, V_y)$ ，用以校验两者间数据相似特性：

$$\Psi(V_x, V_y) = e^{-\frac{l(V_x, V_y)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} \quad (8)$$

式中： $l(V_x, V_y)$  表示节点  $V_x$  和  $V_y$  之间的距离； $\sigma$  表示信号发射的标准差，可由传感节点进行制式化处理，统计规律上遵循高斯分布。

此外，仅需要通过两点间距离  $l(V_x, V_y)$  即可实现对数据的相似性评估，具有较好的收敛性能。若整个传感网络中存在  $n$  个节点，则全部节点数据的相似特性为：

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} e^{-\frac{l(V1,V1)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} & e^{-\frac{l(V2,V1)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} & \dots & e^{-\frac{l(Vn,V1)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} \\ e^{-\frac{l(V1,V2)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} & e^{-\frac{l(V2,V2)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} & \dots & e^{-\frac{l(Vn,V2)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-\frac{l(V1,Vn)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} & e^{-\frac{l(V2,Vn)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} & \dots & e^{-\frac{l(Vn,Vn)}{\sqrt{2\pi\sigma}}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可知，该矩阵具有对称特性，因此该矩阵具有  $n$  个特征向量  $\mathbf{FV}(n)$ 。设对应的特征值为  $F(n)$ 。根据线性代数知识可知<sup>[14]</sup>，式(9)可进一步对角化为：

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}\mathbf{\Gamma}\mathbf{K}^T \quad (10)$$

式中： $\mathbf{\Gamma}$  表示单位对角矩阵； $\mathbf{K}$  表示特征向量按列排序形成的矩阵：

$$\mathbf{K} = (\mathbf{FV}(1) \quad \mathbf{FV}(2) \quad \dots \quad \mathbf{FV}(n)) \quad (11)$$

由线性代数知识可知，该矩阵具有正交特性，即任意两列特征向量  $\mathbf{FV}(x)$  和  $\mathbf{FV}(y)$  均正交：

$$\mathbf{FV}(x) * \mathbf{FV}(y) = 0 \quad (12)$$

为充分利用特征向量矩阵具有的正交特性，降低信道噪声对传输过程产生的串扰影响，将式(11)作为基检测矩阵，检测图 1(b)所示的链路抖动场景。由图 1(b)可知，相应叶子节点缺失时，可通过相邻区域叶子节点所感知的数据进行替代处理，但若根节点缺失时，将造成严重的数据遗失现象。这是由于根节点除了汇聚相应分簇区域内节点所采集的数据外，还需要对区域间各 CH 节点汇聚的数据进行中继传输。

本文设计的数据传输稳定方法，过程如下：

Step 1: 若传感节点为叶子节点，其数据将被汇聚到 CH 节点，直接运用式(11)进行数据校验，并按照发送周期进行数据压缩采样。

Step 2: 若传感节点为 CH 节点，按式(9)获取该节点的传输矩阵  $\mathbf{H}$ ，并按式(10)进行对角化，转 Step 3；

Step 3: 构建稀疏校验矩阵  $\mathbf{S}$ ：

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

记新传输矩阵  $\mathbf{H}'$  为：

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H} \otimes \mathbf{S} \quad (14)$$

Step 4: 将新传输矩阵  $\mathbf{H}'$  进行移位处理，随机选取 2 列元素进行交换后，再随机选取 2 行元素进行交换，一共进行  $2n$  次交换，得到稀疏传输矩阵  $\mathbf{M}$ ；

Step 5: 计算  $\mathbf{M}$  的  $n$  个特征值，相应的特征向量为  $\mathbf{MV}(n)$ ；

Step 6: 按式(9)将  $n$  个特征向量按列排序，获得新稀疏传输矩阵  $\mathbf{M}'$ ：

$$\mathbf{M}' = (\mathbf{MV}(1) \quad \mathbf{MV}(2) \quad \dots \quad \mathbf{MV}(n)) \quad (15)$$

Step 7: 将式(15)与式(11)进行卷积处理，得到传输矩阵  $\mathbf{N}$ ，并将该矩阵作为传输过程中的信道矩阵，算法结束。

$$\mathbf{N} = \mathbf{M}' \otimes \mathbf{K} \quad (16)$$

在传输矩阵  $\mathbf{N}$  的获取方法中，式(15)与式(11)均可直接通过特征向量生成，实践中直接利用对应的基检测矩阵进行卷积即可，时间复杂度为  $\phi(z)$ ，其中  $z$  为节点数量。Step 4 中交换过程为冒泡算法，时间复杂度为  $\phi(z^2)$ ，主要体现 CH 节点失效状态下算法对路径的搜寻复杂度，因此需进一步降低该复杂度，以便实现较高的算法效率。

2.2 基于路径分解优化机制的数据汇聚稳定

根据式(16)可以获得传输矩阵  $N$ ，该矩阵行列式的值  $|N|$  即为传输值。为降低路径搜寻过程的复杂度，需要为各个 CH 节点搜寻到一条最佳链路，并通过传输矩阵  $N$  及时恢复相应的传输数据。因此，搜寻到一条质量稳定的传输链路，可显著提高网络数据传输质量，增强网络生命周期。如图 2 所示，无线传感网中 CH 节点数为 8，各 CH 节点的传输矩阵  $N$  对应的行列式值  $|N|$  为：

$$|N| = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.55, 0.6, 0.7, 0.76\} \tag{17}$$

由式(17)可选取路径如下：

$$\text{CH1}-\text{CH2}-\text{CH3}-\text{CH4}-\text{CH5}-\text{CH6}-\text{CH7}-\text{CH8} \tag{18}$$

通过式(18)可选取一条传输值由低到高的传输链路，CH 节点之间可能存在多条可达链路，下一传输周期内各 CH 节点的传输矩阵  $N$  可能发生变化，并导致传输值发生改变。由图论知识可知，该问题属于典型汉密尔顿回路问题<sup>[15]</sup>，具有弱收敛性的特征。由于无线传感网中 CH 节点数目有限，因此本文提出一种基于路径分解优化机制的汇聚稳定方法，详细步骤如下：

Step 1: 获取网络中全部 CH 节点组成的无向图  $G=(V,E)$ ；

Step 2: sink 节点通过发送 Hello 数据报文的方式，按式(13)~(16)测量各 CH 节点相应的传输值。CH 节点将传输值以 Re\_Hello 数据报文的方式返回 sink 节点；

Step 3: 在  $G=(V,E)$  中逐个删除 CH 节点，并将最新传输值进行节点赋值，得到  $G=(V,E)$  的分解树  $\text{Tree}=(T,i)$ ，树高为  $n$ ；

Step 4: 针对分解树  $\text{Tree}=(T,i)$ ，逐个计算相应叶子节点在图  $G=(V,E)$  中的哈密尔顿回路，并将最短的一条回路作为最佳传输路径，计入 sink 节点缓存中，算法结束。

基于路径分解优化机制的数据汇聚稳定过程，选取一条传输值最低的路径作为最佳传输路径，此时传输代价最低，网络链路收敛性能最好。

表 1 仿真参数

Table1 Simulation parameters

parameter	numerical value
network node density/(nodes/m <sup>2</sup> )	≥10
network deployment area/m <sup>2</sup>	10 240×10 240
node layout mode	random distribution, one-time forming
low channel noise environment	standard Gaussian white noise
high channel noise environment	Les noise
relay node energy/J	≥10
whether sink node is powered	yes
minimum transmission bandwidth of node/Mbps	≥10
signal center frequency/MHz	1 024

3 测试结果与分析

为便于对比本文算法的性能，设置 Matlab 仿真实验环境<sup>[16]</sup>。信号调制方式为正交调制模式，信号发射星座选取 128-APSK 星座；部署区域为矩形区域，大小为 8 400 m×8 400 m；节点部署采用一次成型，位置不变。其余仿真参数见表 1。为

突出所提算法的优势，将当前 WSN 汇聚传输过程中常用的基于阈值筛选模糊分簇的 WSN 数据稳定汇聚算法<sup>[17]</sup> (Threshold Filtering And Fuzzy Clustering, TFFC)和面向医疗应用的无线传感器网络节能可靠的多径数据传输<sup>[18]</sup> (Energy Efficient Reliable Multi-Path, EER-MP)算法作为对照组。测试指标选取传输报文集中度、传输链路抖动频率、网络汇聚带宽。

3.1 传输报文集中度

数据传输轮数设为 500 轮，高斯信道白噪声，sink 节点逐轮统计接收到的数据报文并测量数据报文所对应的信号中心频率。图 3(a)~(c)为本文算法、TFFC 算法和 EER-MP 算法在传输报文信号中心频率上的测量结果。

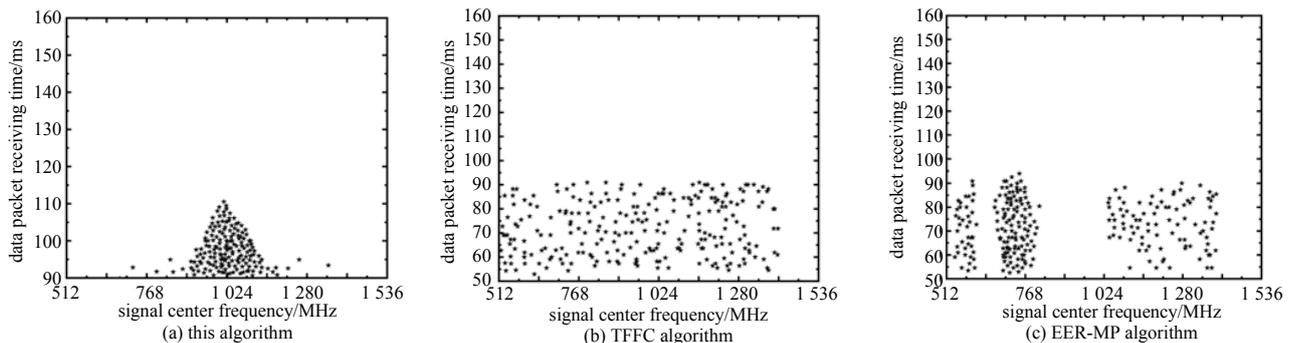


Fig.3 Transmission message concentration

图 3 传输报文集中度

由图 3 可知, 本文算法在整个数据传输期间具有很强的传输报文集中度, 绝大部分传输报文均集中在信号中心频率附近, TFFC 算法和 EER-MP 算法均呈现较为离散分布状态。这是由于本文算法可直接通过传输矩阵优化各 CH 节点的传输质量, 并通过切割哈密顿回路来进一步提高传输链路收敛速度, 传输报文因数据重传等因素导致信号出现漂移的概率较低, 因此具有很高的传输报文集中度。TFFC 算法主要采用模糊机制优化 CH 节点分布, 并采用阈值机制优化 CH 节点汇聚质量, 由于该算法未考虑 CH 节点间链路收敛问题, 难以优化传输路径, 因此传输报文易出现重传、时延等现象, 使传输报文集中度较低。EER-MP 算法主要采取基于分区模式的多径传输机制优化数据传输质量, 由于该算法并未对 CH 节点传输性能进行优化, 特别是该算法单纯采用拥塞概率控制方式优化链路筛选质量, 使网络易因拥塞控制失效而导致链路传输发生抖动, 因而传输报文集中度亦低于本文算法。

### 3.2 传输链路抖动频率

图 4 分别为高斯信道噪声和莱斯信道噪声环境下, 本文算法与 TFFC 算法和 EER-MP 算法的传输链路抖动频率的测试结果。其中, 数据传输轮数设定为 1 000 轮, 逐轮统计链路抖动次数并汇总。由图 4 可知, 本文算法在高斯信道噪声和莱斯信道噪声两种环境下, 均具有传输链路抖动频率较低的特点, 显示了良好的链路控制能力。这是由于本文算法考虑到无线传感网链路中断情形, 采用树分解机制建立多条具有较低传输值的可达链路, 链路拓扑具有优越的哈密顿回路特性, 可对流量进行实时分流, 因此传输链路抖动频率较低, 具有优良的传输链路控制能力。TFFC 算法虽然采用能量阈值方式优化区域内节点传输质量, 但由于未针对 CH 节点间传输链路进行优化, 易因局部流量过载而发生全链路抖动现象, 因而具有较高的传输链路抖动频率。EER-MP 算法主要按照跳数方式优化 CH 节点缓存, 跳数高的 CH 节点具有较高数值的冗余缓存, 使网络中可用于传输的节点资源被大量占用, 因此易出现 CH 节点受限现象, 使传输链路抖动现象的发生概率要高于本文算法。

### 3.3 网络汇聚带宽

图 5 分别为高斯信道噪声和莱斯信道噪声环境下, 本文算法与 TFFC 算法和 EER-MP 算法的网络汇聚带宽测试结果。数据传输轮数设定为 1 000 轮, 逐轮统计网络汇聚带宽并汇总。本文网络汇聚带宽始终具有优势, 这是由于本文算法可对 CH 节点逐个进行传输优化, 获取较低传输值并降低 CH 节点负载, 特别是本文算法采用哈密顿回路优化方式提高了 CH 节点间链路稳定性, 可显著降低节点受限概率, 因此具有较高的网络汇聚能力, 网络汇聚带宽也较高。TFFC 算法虽主要采用阈值控制方式优化分区内节点负载, 降低 CH 节点因过载而出现瘫痪的概率, 但由于该算法未整体考虑 CH 节点传输性能, CH 节点间传输链路易出现抖动现象, 因而降低了网络汇聚能力, 因此网络汇聚带宽较低。EER-MP 算法按照由远到近的方式梯次规划 CH 节点缓存, 存在一定的资源冗余现象, 在节点密度较高时, 易出现显著的 CH 节点受限现象, 因此该算法网络汇聚带宽也低于本文算法。

## 4 结论

为增强无线传感网的汇聚能力, 本文提出了基于稀疏密集阵传输机制的 WSN 数据传输汇聚算法。其主要

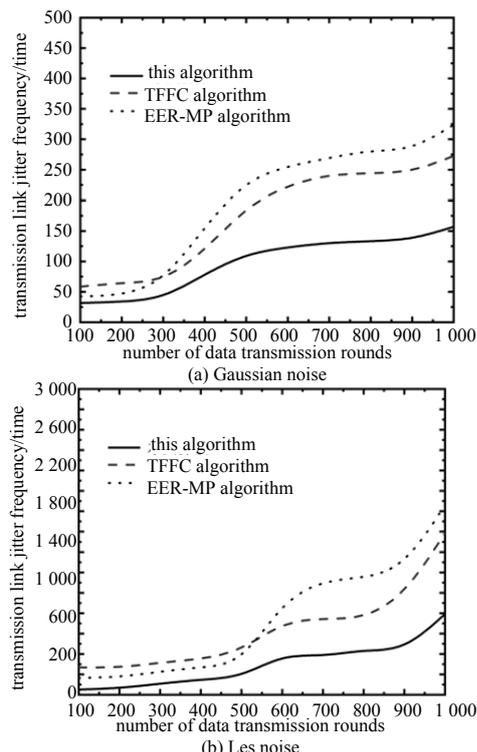


Fig.4 Transmission link jitter frequency  
图 4 传输链路抖动频率

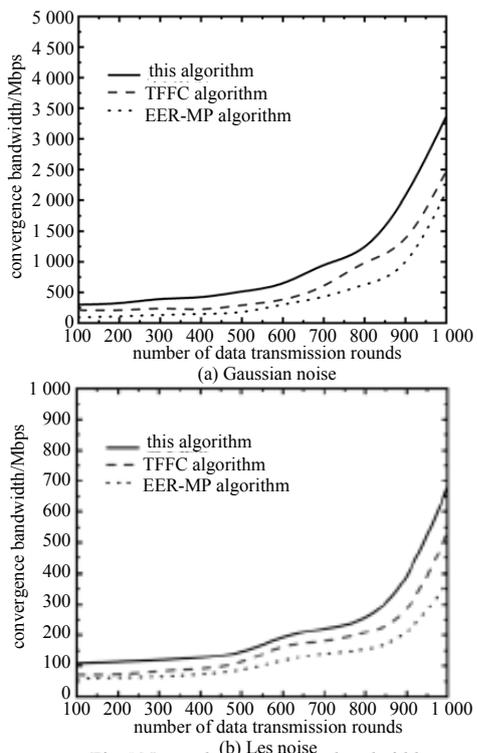


Fig.5 Network convergence bandwidth  
图 5 网络汇聚带宽

由基于稀疏密集校验机制的传输稳定方法、基于路径分解优化机制的汇聚稳定方法两部分构成。首先，采取核生成函数来提高簇头节点传输矩阵的生成效率，通过控制传输值来降低簇头节点负载，增强了网络传输能力。随后，采用哈密尔顿路径搜寻方法来提高传输链路收敛能力，降低传输路径负载水平，提高了数据传输的稳定性能。实验数据验证了所提算法的合理性与优势。下一步，将针对本文算法难以适应移动无线传感网的不足，拟引入移动拓扑校验机制，进一步提高本文算法的簇头节点传输汇聚能力，促进本文算法对多种部署环境的适应性。

#### 参考文献：

- [1] 姜倩倩,王磊,甄贵平. 一种节能无线传感器网络[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):90-94. (JIANG Qianqian,WANG Lei,ZHEN Guiping. An energy-saving wireless sensor network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):90-94.)
- [2] HAN Y F,BAIG G,ZHANG G X. Power allocation algorithm based on mixed integer nonlinear programming in WSN[J]. Cluster Computing, 2019,22(2):4519-4525.
- [3] 徐恒,王建平,李奇越. 基于多维尺度的矿山无线传感器网络定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,32(9):63-71. (XU Heng,WANG Jianping,LI Qiyue. Mine wireless sensor network location algorithm based on multi-dimensional scale[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018,32(9):63-71.)
- [4] DAVID A T. Low-latency and energy-balanced data transmission over cognitive small world WSN[J]. Information Technology Newsweekly, 2018,1(18):1127-1139.
- [5] 翁业林,周泓. 基于信道冲击成型自适应机制的 WSN 大数据采集算法[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2019, 40(3):56-61. (WENG Yelin,ZHOU Hong. WSN big data acquisition algorithm based on adaptive mechanism of channel impact molding[J]. Journal of Jinggangshan University(Natural Science Edition), 2019,40(3):56-61.)
- [6] HAO X C,RU X Y. Joint game algorithm of power control and channel allocation considering channel interval and relay transmission obstacle for WSN[J]. Wireless Personal Communications, 2016,86(2):521-548.
- [7] ZHANG D G,SONG X D,WANG X. Extended AODV routing method based on distributed minimum transmission(DMT) for WSN[J]. AEUE-International Journal of Electronics and Communications, 2015,69(1):371-381.
- [8] LIU F,ZHANG Z J. Research on the transmission diversity characteristics of a quadrifilar helix antenna and its application in the industrial WSN[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2013,8(8):1175-1186.
- [9] 米洪,杨习贝. 基于正交矩阵与联合独立滤波机制的无线传感网络信号定位算法[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018,151(3):85-91. (MI Hong,YANG Xibei. Signal location algorithm of wireless sensor network based on orthogonal matrix and joint independent filtering mechanism[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2018, 151(3):85-91.)
- [10] 余代中. APSK 调制解调方法研究[D]. 西安:电子科技大学, 2019:18-19. (YU Daizhong. Research on APSK modulation and demodulation method[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2019:18-19.)
- [11] DEVESH P S,GOUADR R H. Energy efficient clearance routing in WSN[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017,8(2):555-575.
- [12] SOUMYA B,CHANDREYEE C,SAMIRAN C. Two phased routing protocol incorporating distributed genetic algorithm and gradient based heuristic in clustered WSN[J]. Wireless Personal Communications, 2017,97(4):5401-5425.
- [13] GU X,WANG J. Self-recommendation mechanism in trust calculation among nodes in WSN[J]. Wireless Personal Communications, 2017,97(3):3705-3723.
- [14] SLAVICA T,RADUSINOVIC I. Mapping application requirements to virtualization-enabled software defined WSN[J]. Wireless Personal Communications, 2017,97(2):1693-1709.
- [15] WAHIBA L M. Minimum perimeter coverage set based on points of tangency and strong barrier for an extended WSN lifetime[J]. Wireless Personal Communications, 2017,97(2):2339-2358.
- [16] DEBANIAN S,SEELA V R. Effect of clock skew in event driven, delay constrained heterogeneous WSN with anycast[J]. Wireless Personal Communications, 2017,97(4):4967-4980.
- [17] 谷川,张志彦,开金宇. 基于阈值筛选模糊簇的 WSN 数据稳定汇聚算法[J]. 计算机工程与设计, 2016,37(9):2315-2320. (GU Chuan,ZHANG Zhiyan,KAI Jinyu. A stable clustering algorithm for WSN data based on threshold filtering and fuzzy clustering[J]. Computer Engineering and Design, 2016,37(9):2315-2320.)
- [18] PRABHUDUTTA M,MANAS R K. Energy efficient reliable multi-path data transmission in WSN for healthcare application[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2016,23(2):177-186.