

移动低占空比传感网中基于分段拟合压缩的数据容灾存储算法

蒋 婵, 梁俊斌, 马方强, 李陶深

(广西大学计算机与电子信息学院广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 广西南宁 530004)

摘 要: 数据存储是无线传感器网络中数据管理的基础操作. 在移动低占空比传感网中, 由于节点的移动性, 每个节点需要频繁更新邻居节点集合, 使得节点能量消耗过大; 同时, 节点大部分时间处于睡眠状态, 仅在少部分时间内苏醒工作, 造成数据备份的通信延迟过大. 提出一种快速的低能耗数据保存机制. 首先, 源节点基于连续时间序列对感知数据进行分段线性拟合压缩; 接着, 节点根据预估故障概率和存储空间大小, 计算出合理的压缩数据备份数量. 在此基础上, 设计一种动态自适应传输协议. 实验仿真表明, 与已有存储算法比较, 该机制具有更低的传输能耗和通信延迟.

关键词: 移动低占空比传感网; 数据存储; 分段线性拟合压缩; 数据备份; 自适应传输

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)12-2376-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.12.013

Disaster Recovery Data Storage Algorithm Based on Piecewise Fitting Compression in Mobile Low Duty-Cycle Wireless Sensor Networks

JIANG Chan, LIANG Jun-bin, MA Fang-qiang, LI Tao-shen

(Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, School of Computer and Electronics Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: Data storage is a basic operation of data management in wireless sensor networks. In mobile low-duty-cycle sensor networks, due to the mobility of the nodes, each node needs to frequently update the set of its neighbor nodes, which making energy consumption of the node too large. At the same time, each node is sleeping in most of its time, and wakes up to work in only a small portion of time. This sleeping/working mode results in excessive communication delay for data backup. A fast data storage mechanism with low energy consumption is proposed. First, each source node performs piecewise linear fitting compression on its sensing data based on continuous time series. Then, the node calculates a reasonable number of compressed data backups based on an estimated failure probability and the size of its storage space. On this basis, a dynamic adaptive transmission protocol is designed. Experimental simulations show that this mechanism has lower energy consumption of transmission and lower communication delay compared with existing storage algorithms.

Key words: mobile low duty-cycle sensor networks; data storage; piecewise linear fitting compression; data backup; adaptive transmission

1 引言

移动低占空比传感网(Mobile Low Duty-Cycle Wireless Sensor Networks, MLDC-WSNs)是一种由数量庞大且具有移动和睡眠特性的传感器节点自组织而成的新型无线传感网,通常部署在恶劣环境中执行长期的监测

任务,被广泛应用于森林火灾监控、火山活动监测和化学污染检测等场景^[1-3].

在实际应用中,传感器节点被嵌入移动装置或放置在动物身上而随机移动,使得节点需要额外的能量来维持网络连通性^[4,5],为此,节点采用睡眠/苏醒周期性切换的工作方式,以此延长网络寿命^[6,7].然而,节点

收稿日期:2019-11-12;修回日期:2020-07-15;责任编辑:梅志强

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61562005, No. 61762010);广西重点研发计划项目(No. 桂科 AB19259006);广西自然科学基金项目(No. 2019GXNSFAA185042, No. 2018GXNSFBA281169)

长时间睡眠导致了网络通信延迟增大.同时,节点遭受外力破坏损毁导致部分节点的感知数据丢失^[8],使得在节点能量、存储空间、传输带宽等资源有限的情况下,选取合适的存储位置进行及时的数据备份存储是一项挑战.为解决上述问题,本文提出了一种基于分段拟合压缩的容灾存储(Disaster Recovery Storage based on Piecewise Fitting Compression,DRS-PFC)算法.

2 相关工作

现有典型的分布式存储算法可以分为静态存储和动态存储两种方式.

2.1 静态数据存储

静态存储是指感知数据的存储位置一旦被确定就不会再发生改变的一种存储方式,如 DIFS^[9]、DIM^[10]、DIMENSIONS^[11]和 TSAR^[12]算法等.

早期,Greenstein 等^[9]提出一种分布式结构索引算法 DIFS,通过将网络区域划分为若干子区域,利用哈希函数将感知数据存储在该区域其它节点上.Li 等^[10]在此基础上提出一种分布式多维数据索引算法 DIM.Ganesan 等^[11]提出一种多分辨率存储评估算法 DIMENSIONS,采用分布式四分树方式构建层次索引存储结构,使源节点利用小波变换将感知数据在时间序列上进行压缩存储.Desnoyers 等^[12]设计了一种两层传感器数据存储结构算法 TSAR.

上述分布式存储算法,未考虑节点故障、移动等因素,导致感知数据丢失及网络拓扑结构断裂等问题.

2.2 动态数据存储

动态存储是指感知数据的存储位置会根据网络拓扑结构的改变而动态调整的一种存储方式,如 SCOOP^[13]、Double Ruling^[14]、BubbleGeocast^[15]和 PRCS^[16]算法等.

Gil 等人^[13]提出一种 SCOOP 存储算法,实现了数据的动态存储和快速的数据查询.然而,由于基站节点需要定期收集全网信息,导致其负载较大.Sarkar 等^[14]通过将节点映射为球面上的点,感知数据沿着任意一条过球心闭合曲线进行存储;而查询请求采用相同的方式访问,则至少存在一个节点匹配成功.该算法的数据存储与查询访问的最坏通信时延比较大.为了解决这个问题,彭绍亮等人^[15]提出一种实时有效的数据存储与查询方法 BubbleGeocast,源节点按照最优数据副本个数,多路均匀分发感知数据至网络中部分节点,查询消息则使用相同分发方式进行查询访问.向淑贞等人^[16]提出一种基于压缩感知的概率随机游走存储策略 PRCS,但是用户需通过全网泛洪查询以获取目标数据,网络能量消耗过大.

上述算法在一定程度节省可查询能耗和通信延迟,但却很少考虑到节点移动、低占空比等情况.

3 网络模型及问题描述

3.1 网络模型

假定无线传感器网络被部署在一个边长为 $L \times L$ 的矩形区域 A 上,随机均匀地分布着 n 个移动传感器节点,每个节点采用地占空比工作模式,且任意两个节点之间的距离 $d \leq R$ 时可以直接通信.因此,可将 MLDC-WSNs 视为连通无向图 $G(V, E)$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为网络传感器节点的有限集合, v_i 为节点唯一的编号; $E = \{e_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ 为任意两个节点间直接通信边 e_{ij} 的有限集合.此外,该网络具备以下特性:

(1) 节点采用随机路点(Random Way Point, RWP)模型进行移动^[17],即:移动具有随机性且速度相同,移动后会静止一段时间;

(2) 节点可根据定位技术或 GPS 获取位置信息.

3.2 问题描述

在危险的灾害环境中,节点容易遭受外力破坏或软件故障而导致存储数据失效.因此,数据备份存储为保证感知数据完整性的关键方式.

假定在 MLDC-WSNs 中节点 i 的感知数据块的备份数量为 $|U_i|$,则节点 i 发送感知数据到 $|U_i|$ 个目的地节点进行数据备份存储的通信能耗为

$$E = \sum_{j \in |U_i|} h_{ij} E_k \quad (1)$$

其中, h_{ij} 为节点 i 与备份节点 j 之间的跳数, E_k 为每一轮数据传输的平均能耗.

由于节点具有移动性和低占空比的工作模式,则每一轮数据传输时延 T_k 由邻居发现时延 t_{dis} 、等待时延 t_{wai} 和数据传输时延 t_{tra} 的和组成.因此,节点 i 发送数据到 $|U_i|$ 个目标节点进行数据备份存储的总时延为

$$T_{tra} = \sum_{j \in |U_i|} h_{ij} T_k \quad (2)$$

所以,可以将动态无线传感器网络中数据存储问题可以归纳为,以最小的通信能耗实现感知数据的备份存储时延最小化问题,即

$$\{\min E_{com}, \min T_{tra}\} \quad (3)$$

4 算法详细设计

4.1 基本思想

在 DRS-PFC 算法中,每个节点会采用拟合的方式,对连续时间段内的感知数据值进行合理的压缩;其次,以节点故障概率和有限的存储空间为约束条件,建立容灾存储优化模型,计算出优化的数据备份个数,以降低数据失效性;最后,设计一种动态自适应传输协议,通过动态构建邻居集合和自适应数据传输两个阶段.第一阶段,苏醒节点根据接收到邻居节点在每个时间片开始一段极小时隙发送的 beacon 消息,动态地构建邻

居集合;第二阶段,结合节点移动模型,苏醒节点将感知区域划分为三个环形子区域.在每次数据传输过程中,发送节点在最近的子区域选取苏醒节点作为接收节点.

在此过程中,为了避免子区域无苏醒节点或时钟偏移等异常情况,每个节点可以通过动态地调整下次苏醒时刻和苏醒时间片大小来完成数据传输,实现快速可靠的数据备份存储.

4.2 分段线性拟合压缩算法

在实际应用中,传感器节点采样的高频数据值往往与时间具有一定的相关性,即在极小的时间隙内,感知数据值的变化并不是很大.根据文献[18],提出一种基于时间序列分段的线性拟合压缩算法.

假定节点 i 在时间段 ΔT 内对事件进行了信息采样,可以将 ΔT 视为由一组时间序列点组成,每个时刻节点采样数值集合为 $Y_i = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$,其中 k 为 ΔT 内的时间点个数.因此,节点在该段时间内实际采集的数据样本容量为 $S_i = \langle t_1, y_1 \rangle, \dots, \langle t_k, y_k \rangle$.

定义 1 如果可以使用 S_i 中 $\langle t_1, y_1 \rangle$ 和 $\langle t_k, y_k \rangle$ 的两个元组构建的线性拟合曲线 $f(t)$ (即 $f(t) = y_1 + (y_k - y_1)(t - t_1)/(t_k - t_1)$) 近似替代节点 i 在时间段内的所有感知数据值,则该段拟合曲线至少满足以下某一条件:

(1) 存在任意小正值 ε_1 ,使得时间段 ΔT 内在时刻 t_i 处的数值 y_i 与拟合曲线数值 $f(t_i)$ 最大绝对误差值小于 ε_1 ,即 $\max |f(t_i) - y_i| \leq \varepsilon_1$;

(2) 存在任意小正值 ε_2 ,使得时间段 ΔT 内所有时刻 t_i 处的数值 y_i 与 $f(t_i)$ 的最大差平方和小于 ε_2 ,即 $\max \left\{ \sum_{i=1}^k (f(t_i) - y_i)^2 \right\} \leq \varepsilon_2$.

因此,在数据感知过程中,传感器节点首先将 t_i 时刻的监测值 y_i 和 t_{i+1} 时刻的监测值 y_{i+1} 保存在缓存中,计算出线性拟合曲线函数 $f(t)$,移动到下一时刻 t_{i+2} ,继续计算拟合曲线.若满足定义 1 中的阈值 ε_1 和 ε_2 ,则将 y_{i+2} 添加至缓存进行压缩,继续移动到下一时刻检验压缩.否则,从缓存中移除分段压缩数据保存在内存内, y_{i+2} 存储在缓存中进行新一轮分段压缩.

4.3 容灾存储优化模型

在 MLDC-WSNs 中,节点的意外损毁或故障可能会导致感知数据失效,使得网络需要对节点监测的数据进行备份存储.这里,假定网络中所有节点的故障概率均为 p ,节点 i 将感知数据存储在其他节点上的模型为

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 在节点 } j \text{ 上进行备份} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 未在节点 } j \text{ 上进行备份} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),节点 i 的数据备份个数为 $K = \sum_j D_{ij}$ 且 $1 \leq i, j \leq n$,则有节点 i 的至少存在一个可用的感知数

据块的概率为

$$P_i = 1 - \prod_i^K p \quad (5)$$

假设满足用户所需数据的可用概率为 P_{req} ,结合式(5)可以获得每个节点备份数据数量的取值范围为 $K \geq \log(1 - P_{\text{req}})/\log p$.

因此,对于单个节点而言,完成数据备份时的最小传输能耗优化模型可以表示为

$$E_{\text{tra}} = \min \sum_{j=1}^{K-1} S_{ij} \cdot h_{ij} \cdot H$$

$$\text{st} \begin{cases} K \geq \log(1 - P_{\text{req}})/\log p \\ \sum_{j=1}^{n-n/K} S_{ij} \cdot D_{ij} \leq C_j, D_{ij} \leq C_j \\ h_{ij} \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, S_{ij} 为节点 i 感知数据量大小, C_j 为节点 j 内存大小, h_{ij} 为节点 i 在节点 j 上进行一次数据备份的传输跳数, H 为接收与发送 1bit 数据流的平均能耗大小.

根据文献[19]可知,节点故障概率一般可以根据用户体验进行设定,当给定用户期望的数据可用概率 P_{req} 时,数据备份数量范围便可确定.由于 K 值越大,网络通信能耗越高,这里取 $K = \log(1 - P_{\text{req}})/\log p$.此外,当 D_{ij} 全为 1 时,则每次数据备份的数量范围为

$$S_{ij} \leq KC_j/(n(K-1)) \quad (7)$$

为避免节点移动和低占空比导致的副本传输时延过长,可在每个节点中设置一个容忍延迟时间,每块数据进行备份存储的时延不超过容忍延迟时间.此外,节点 i 可根据自身剩余存储空间 C_{re}^i 与 C_{re}^j 之间大小,决定是否接收该副本.

综上所述可知,每个节点的接收数据副本的概率为

$$P_{\text{req}} = \alpha \frac{\min\{L_{\text{tra}}, \Delta L_{\text{tol}}\}}{\Delta L_{\text{tol}}} + \beta \frac{\min\{2C_{\text{re}}^i, 2C_{\text{re}}^j\}}{(C_{\text{re}}^i + C_{\text{re}}^j)} \quad (8)$$

其中 $\alpha + \beta = 1$.

假定每轮发送节点选择接收节点的个数为 w ($w \leq K-1$),那么每个数据副本的平均传输跳数为

$$h_{ij} = (\log(K-1)/P_{\text{re}})/\log w \quad (9)$$

因此,结合上述公式,即可获得数据存储备份的最小通信能耗值.

4.4 动态自适应传输协议

本小节提出了一种动态自适应传输协议,分为动态构建邻居集合和自适应数据传输两个阶段.在第一阶段,节点采用多信标消息机制进行邻居发现,即节点在每个时间片(包括睡眠时间片)的开始阶段取一个很小时隙 $\Delta\tau$ 来发送 beacon 消息,其中,每个 beacon 消息由编号、位置和下一次苏醒时刻 t_{next} 组成,即 $\text{packet}_{\text{beacon}} = \langle \text{id}, \text{loc}, t_{\text{next}} \rangle$.当苏醒节点接收到 beacon 消息时,则可以确定在当前时刻 t 下的邻居节点集合 $G_i(t)$,且依

次在每个时间片的其实时刻更新邻居节点集合。

在第二阶段,设计一种自适应占空比数据传输方式。首先,发送节点 i 预估本次数据传输时间 Δt 计算接收节点之间最大的初始距离 d_{ij} ,即节点 i 和 j 以速度 \bar{v} 向背移动,它们之间的距离有 $d_{ij} = R - 2\Delta t\bar{v}$ 。其次,发送节点 i 以自身为中心,将通信范围按照 $[0, d_{ij})$, $[d_{ij}, d_{ij} + \Delta t\bar{v})$ 和 $[d_{ij} + \Delta t\bar{v}, R]$ 区间划分为三个环形区域为 $G_i^I(t)$, $G_i^{II}(t)$ 和 $G_i^{III}(t)$,如图 1 所示。节点可在集合 $G_i^I(t)$ 中选择苏醒节点发送数据副本,接收节点以概率 P_{re} 进行数据接收。若副本被接收,继续存储转发副本,直到 $\varphi_i = 0$ ($\varphi_i = (\varphi_i - 1)/w$) 停止,否则只转发不存储且 $\varphi_i = \varphi_i/w$ 。

在传输过程中,可能出现以下两种情况:(1)集合 $G_i^I(t)$ 中无苏醒节点,发送节点需要等待很长的时间才能完成备份存储;(2)节点间存在时钟偏移,使得苏醒节点未完成数据转发就进入休眠状态,导致数据传输突然中断。因此,提出一种自适应占空比工作模式。

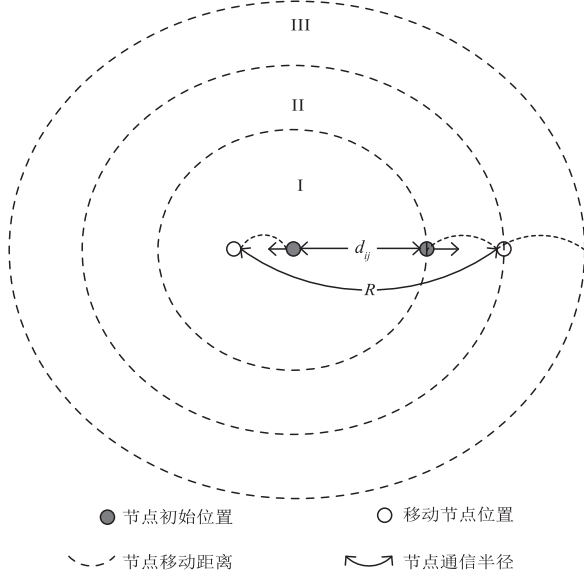


图1 邻居集合划分示意图

针对情况 1,发送节点 i 根据集合 $G_i^I(t)$ 中存储的邻居苏醒时刻表 $\{t_j | j \in |G_i^I(t)|\}$,计算当前时刻 t_i 与每个邻居节点下一次苏醒时刻的时间片间隔个数 $\rho_j = (t_j - t_i)/\Delta t_{slot}$ (Δt_{slot} 每个时间片大小),并选取 $\min\{\Delta t_{slot} \lceil \sqrt{\rho_j} \rceil + t_i | j \in |G_i^I(t)|\}$ 苏醒时刻作为自身下次苏醒时刻。接着,修改 beacon 消息中的苏醒时刻,将其发送给苏醒的邻居节点,让其调整下一次苏醒时刻,从而确保节点间话费尽可能短的时间内完成数据传输。针对情况 2,节点可以动态调整自身苏醒时间,以保证节点完成数据发送/接收后再进入睡眠状态。

4.5 算法性能分析

在这部分,从网络通信平均能耗和平均通信延迟

两个性能方面对该机制进行了详细的定量分析。

4.5.1 通信能耗分析

在 DRS-PFC 算法中,节点完成数据备份存储的总通信能耗 E_{total} 主要由数据传输能耗 E_{tra} 、节点间信息交互能耗 E_{cim} 和计算能耗 E_{cal} 组成,即 $E_{total} = E_{tra} + E_{cim} + E_{cal}$ 。

首先,针对数据传输能耗问题,假设给定节点传输数据容量 S_{ij} ,由容灾存储优化模型式(6)、(7)及式(9)可以获得实际数据传输的平均能耗为

$$E_{tra} = \sum_{j=1}^{(\log(1-P_{re})/\log p)-1} S_{ij} \left(\frac{(\log(\log(1-P_{re})/\log p) - 1)/P_{re}}{\log w} \right) H$$

根据 4.4 小节可知,节点可以通过缩减睡眠时间片间隔数,动态调整下次苏醒时刻且广播给邻居节点来降低通信延迟。假定节点的最小占空比为 DC_{min} ,苏醒节点进入睡眠状态的时刻为 t_{now} ,则该节点下次苏醒时刻为

$$t_{next} = \sqrt{1/DC_{min}} + t_{now} \quad (10)$$

其中 T_{max} 为占空比最大周期, $DC_{min} = \Delta t_{slot}/T_{max}$ 。

给定 beacon 消息容量 S_{Bea} ,结合式(10),可以获得节点间信息交互的通信能耗为

$$E_{com} = S_{Bea} \lceil \sqrt{m_{max}} \rceil H$$

假设每一段线性拟合压缩的能耗相等且为 E_{PLF} ,在连续时间段内,感知数据被分段压缩的个数为 N_{PLF} ,则节点的计算能耗为 $E_{cal} = E_{PLF} \cdot N_{PLF}$ 。

综上所述可知,节点完成所有副本数据存储的总通信能耗为

$$E_{total} = \left(\sum_{j=1}^{(\log(1-P_{re})/\log p)-1} S_{ij} \left(\log \left(\frac{\log(1-P_{re})/\log p - 1}{P_{re}} \right) / \log w \right) + S_{Bea} \lceil \sqrt{m_{max}} \rceil \right) H + E_{PLF} N_{PLF}$$

由于 $S_{Bea} \ll S_{ij}$ 且 E_{cal} 很小,则 E_{total} 主要受到数据传输能耗影响。当 P_{re} 和 p 给定值时,传输数据量 S_{ij} 越小,接收节点的个数为 w 越大, E_{total} 有最小值。

4.5.2 通信延迟分析

在 DRS-PFC 算法中,节点完成数据备份存储的总通信延迟 T_{total} 分为感知数据分段线性拟合压缩时延 T_{PLF} 、数据的实际传输时延 T_{tra} 和等待传输时延 T_{wai} 三部分组成。由于每个节点设置了缓存区域,感知数据的压缩处理和存储传输可以同步完成,所以,可以忽略掉感知数据的压缩时延,即

$$T_{total} = T_{tra} + T_{wai} \quad (11)$$

根据 4.3 小节中的容灾存储模型,计算出每个数据副本的平均传输跳数为 h_{ij} ,在给定节点传输带宽为 B 的条件下,则有传感器节点完成所有副本数据的平均传输时延为

$$T_{tra} = \log \left(\frac{\log(1-P_{re})/\log p - 1}{P_{re}} \right) / \log w \cdot (S_{ij}/B)$$

根据 4.4 小节可知,节点等待传输时间包括节点睡眠时间和节点间信息交互时间两部分.由于睡眠节点在每个时间片进行一次 beacon 消息广播,剩余时间继续保持睡眠状态,因此,节点的等待传输时延等于该节点等待接收节点苏醒的时间片个数与每个时间片的乘积.

由式(10)可知,在一个占空比周期内,两个节点同时苏醒时的最大时间间隔为 $\sqrt{m_{\max}}$.因此,在给定每个时间片长度 Δt_{slot} ,有节点的传输等待时间为 $T_{\text{wai}} = \Delta t_{\text{slot}} \sqrt{m_{\max}}$.

综上所述可知,结合式(11)可以得到节点完成所有数据副本存储的总时延为

$$T_{\text{total}} = \log\left(\frac{\log(1 - P_{\text{re}}) / \log p - 1}{P_{\text{re}}}\right) / \log w \cdot (S_{ij} / B) + \Delta t_{\text{slot}} \sqrt{m_{\max}}$$

在给定传输速率 B 和时间槽 Δt_{slot} 情况下,有数据量 S_{ij} 越小,接收节点的个数为 w 越大及时间片个数 m_{\max} 越小,总通信延迟有最小值.

5 实验与结果

5.1 实验环境

本节实验是在 Matlab2016 平台上开发的一个仿真平台,实现了 DRS-PFC 策略与另外两种算法 PRCS 和 BubbleGeocast.假定网络部署区域范围为 $500\text{m} \times 500\text{m}$,随机均匀地分布着 500 个移动占空比传感器节点.每个节点的平均移动速度为 2m/s ,占空比为 $DC = 1/10$,每个时间片长度为 1s .结合文献 [18,20] 中的实验数据,取节点采样的声音频率为 44.1kHz ,每个时间片长度为 0.6s ,传输带宽为 352kbits/s ,beacon 消息大小为 8Byte .根据路径损耗模型^[20]可知,在距离 d 上发送 1bit 数据的能量损耗为 $E_t = \varepsilon d^\lambda + E_{\text{ele}}$,接收 1bit 数据的能量损耗为 $E_r = E_{\text{ele}}$.其中, $\varepsilon = 10^{-11}$, $\lambda = 2$, $E_{\text{ele}} = 50 \times 10^{-9}\text{J}$.为方便与 PRCS 和 BubbleGeocast 算法性能进行对比,以上参数设置几乎保持一致.

5.2 性能表现

在这部分,首先对分段线性拟合压缩算法(Piecewise Linear Fitting Compression, PLFC)的压缩概率进行了仿真验证,接着,对几种算法的网络平均能耗和时延的时延结果进行了对比分析.

5.2.1 PLFC 参数分析

如图 2 所示,从传感器节点中取一段时长约为 1 秒的感知数据,使用 PLFC 算法对原始数据进行压缩处理,并与原始数据进行对比.可以发现,在容忍的阈值 $\varepsilon_1 = 0.002$ 范围内,原始音频数据与压缩后的音频数据几乎保持一致.

5.2.2 网络平均能耗

在网络能耗测定中,进行了 100 次试验取其平均

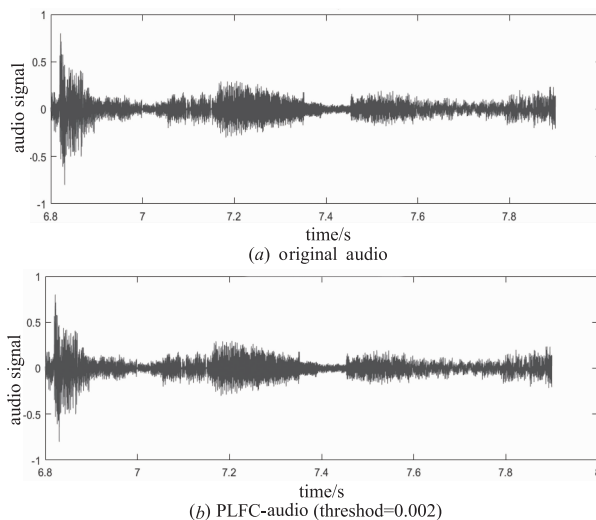


图2 拟合数据与原始数据对比

值,每次试验任意选取一个节点测定来评估网络能耗.根据 BubbleGeocast 及 DRC-PFC 算法中的节点接收概率值可将其设为 0.6 ,数据备份数设为 3 .

如图 3 所示,节点的通信半径范围为 $[40, 60]$,每隔 2m 测定一次,可以发现三种算法的通信能耗随着通信半径的增大而增大.其中, DRC-PFC 策略的通信能耗最小且增长趋势很小,而 PRCS 与 BubbleGeocast 算法的通信能耗却增长迅速且很高.

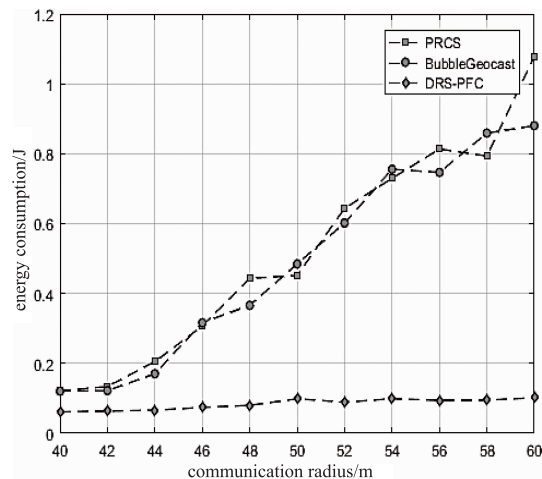


图3 半径不同的节点能耗

如图 4 所示,取节点的移动速度范围为 $[0, 20]$,每隔 2m/s 测定一次,可以发现三种算法的通信能耗随着节点的移动速度增大而减小.其中, DRC-PFC 策略的通信能耗最小,而 PRCS 与 BubbleGeocast 算法的通信能耗很高且下降速度均较快.

如图 5 所示,取节点的占空比范围为 $[1/30, 1/10]$,占空比周期的时间片间隔每减少 2 个时间片测定一次,可以发现 DRC-PFC 策略的通信能耗最小且几乎不改变,而 PRCS 与 BubbleGeocast 算法的通信能耗却很大且

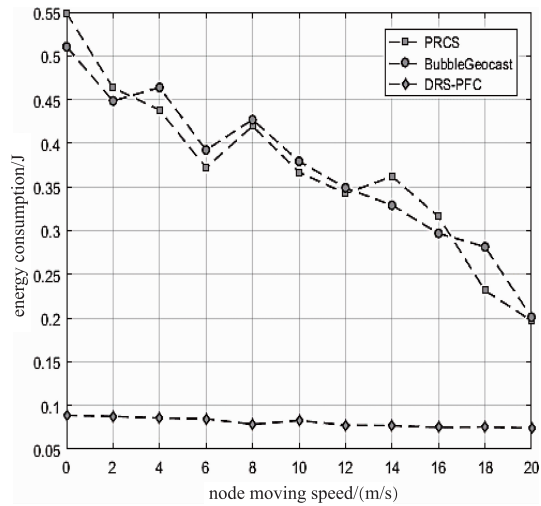


图4 移动速度不同的节点能耗

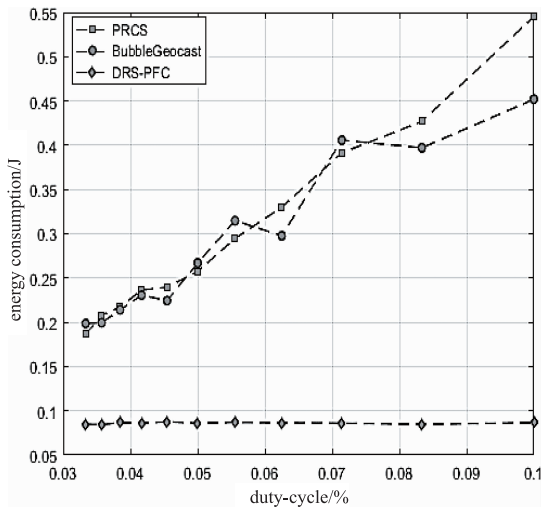


图5 占空比不同的节点能耗

上升趋势很快.

5.2.3 网络平均延迟

在通信延迟测定中,进行 100 次试验取其平均值,并在每次试验中选择任意一个节点进行测定来评估网络延迟.三种算法中的节点接收概率与 5.2.2 小结参数设置一致.

如图 6 所示,三种算法均随着通信半径 R 的增大呈下降趋势,且在 $R = 48\text{m}$ 时,通信延迟几乎都趋于稳定.由于节点存在移动和低占空比的特性,使得 DRC-PFC 策略在 $R = 42\text{m}$ 处出现通信延迟的高于其它两种算法的情况,但这并不影响该策略的整体通信延时优于 PRCS 和 BubbleGeocast 算法.

如图 7 所示,取节点的移动速度范围为 $[0, 20]$,每隔 2m/s 测定一次,可以看出三种算法的通信时延随着移动速度的增大均呈折线缓慢上升.其中,DRC-PFC 策略的通信时延最小且几乎不变,其它两种算法的通信

时延很高且增加缓慢.

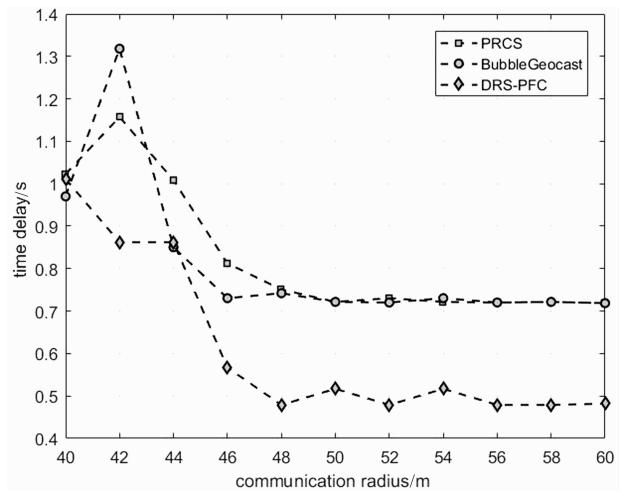


图6 半径不同的通信时延

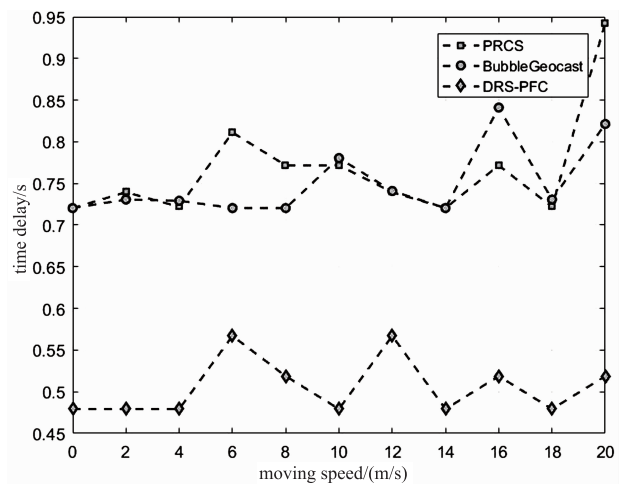


图7 移动速度不同的通信时延

如图 8 所示,取节点的占空比范围为 $[1/30, 1/10]$,占空比周期的时间片间隔每减少 2 个时间片测定一次,

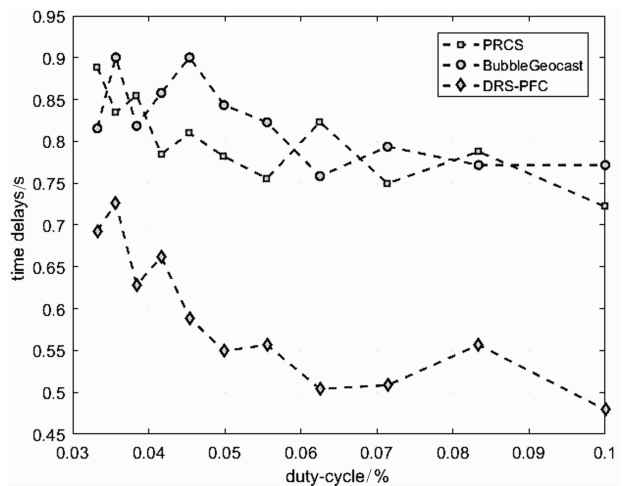


图8 占空比不同的通信时延

可以看出三种算法的通信延迟随着节点占空比的增大而降低. 其中, DRC-PFC 策略的时延最低且下降速度很快, 而 PRCS 和 BubbleGeocast 算法通信时延较高, 且下降速度低于 DRC-PFC 策略的下降速度.

5.3 实验总结

可以发现, 在 MLDC-WSNs 中, 提出的 DRS-PFC 策略不仅能够用户容忍数据失真度范围内, 采用分段线性拟合压缩算法极大降低感知数据容量, 而且在通信能耗和时延等性能各方面均优于 PRCS 和 BubbleGeocast 算法.

6 总结

本文提出一种基于分段拟合压缩的容灾存储策略. 该策略采用基于时间序列的分段线性拟合方式对感知数据进行压缩, 以缓解节点存储压力及降低通信延迟. 此外, 建立容灾存储优化模型, 计算出合理的数据备份个数和优化的通信能耗. 然后, 苏醒节点按照该数据副本数量备份存储数据, 并通过动态构建邻居节点和自适应地调整自身睡眠时刻及苏醒时间片来降低数据传输的等待时间, 从而快速地实现数据备份存储. 理论分析和实验结果表明, 该策略能够在保证数据完整性的前提下, 具有更小的存储时延及更低的存储能耗.

参考文献

- [1] Yue Y G, He P. A comprehensive survey on the reliability of mobile wireless sensor networks: Taxonomy, challenges, and future directions[J]. *Information Fusion*, 2018, 44: 188 - 204.
- [2] 陈良银, 颜秉姝, 张靖宇, 等. 移动低占空比传感网邻居发现算法[J]. *软件学报*, 2014, 25(06): 1352 - 1368.
Chen Liangyin, Yan Bingshu, Zhang Jingyu, et al. Neighbor discovery algorithm for mobile low duty ratio sensor networks [J]. *Journal of Software*, 2014, 25(06): 1352 - 1368 (in Chinese)
- [3] Razaque A, Elleithy K M. Low duty cycle, energy-efficient and mobility-based border node-MAC hybrid protocol for wireless sensor networks[J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2015, 81(2): 265 - 284.
- [4] 张晓娟, 马学彬, 王洪彬. 延迟容忍移动传感器网络中基于最优距离的可靠节能传输策略[J]. *电子学报*, 2019, 47(1): 105 - 112.
Zhang Xiaojuan, Ma Xuebin, Wang Hongbin. Energy-efficient reliable transmission strategy based on optimal distance in delay tolerant mobile sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(1): 105 - 112. (in Chinese)
- [5] 刘军, 程良伦, 王建华, 王涛. 移动传感器网络非均匀事件区域节点部署优化[J]. *电子学报*, 2015, 43(12): 2402 - 2407.
- [6] Liu Jun, Cheng Lianglun, Wang Jianhua, Wang Tao. Deployment optimization in non-uniform event area of mobile sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(12): 2402 - 2407.
- [7] Cheng L, Niu J, Luo C, et al. Towards minimum-delay and energy-efficient flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2018, 134: 66 - 77.
- [8] Chen Z, Liu A, Li Z, et al. Distributed duty cycle control for delay improvement in wireless sensor networks[J]. *Peer-To-Peer Networking and Applications*, 2017, 10(3): 559 - 578.
- [9] Morreale P, Goncalves A, Silva C. Mobile ad hoc network communication for disaster recovery[J]. *International Journal of Space-Based and Situated Computing*, 2015, 5(3): 178 - 186.
- [10] Greenstein B, Ratnasamy S, Shenker S, et al. DIFS: a distributed index for features in sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2003, 1(2-3): 333 - 349.
- [11] Li X, Kim Y J, Govindan R, et al. Multi-dimensional range queries in sensor networks[A]. *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. Los Angeles, California, USA: ACM, 2003. 63 - 75.
- [12] Ganesan, Deepak, Greenstein, et al. An evaluation of multi-resolution storage for sensor networks[A]. *Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. Los Angeles, California, USA: ACM, 2003. 89 - 102.
- [13] Desnoyers P, Ganesan D, Shenoy P. TSAR: a two tiers sensor storage architecture using interval skip graphs[A]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. New York, USA: ACM, 2005. 39 - 50.
- [14] Gil T M, Madden S. Scoop: An adaptive indexing scheme for stored data in sensor networks[A]. *IEEE 23rd International Conference on Data Engineering[C]*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007. 1345 - 1349.
- [15] Sarkar R, Zhu X, Gao J. Double rulings for information brokerage in sensor networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(6): 1902 - 1915.
- [16] 彭绍亮, 李姗姗, 彭宇行, 等. 无线传感器网络中一种实时高效的数据存储和查询方法[J]. *通信学报*, 2008, 29(11): 128 - 138.
Peng Shaoliang, Li Shanshan, Peng Yuxing, et al. A real-time and efficient data storage and query method in wireless sensor networks [J]. *Journal of Communications*, 2008, 29(11): 128 - 138. (in Chinese)
- [17] 向淑贞. 基于压缩感知的采样和存储方法研究[D]. 长

沙:湖南大学,2017.

Xiang Shuzhen. Sampling and Storage Methods Based on Compressed Sensing [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)

- [17] Sabor N, Sasaki S, Abo-Zahhad M, et al. A comprehensive survey on hierarchical-based routing protocols for mobile wireless sensor networks: review, taxonomy, and future directions [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2017, 2017(1): 1 – 23.
- [18] Soroush E, Wu K, Pei J. Fast and quality-guaranteed data streaming in resource-constrained sensor networks [A].

Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile ad Hoc Networking and Computing [C]. Hong Kong, China: ACM, 2008. 391 – 400.

- [19] Tang B, Jaggi N, Takahashi M. Achieving data k-availability in intermittently connected sensor networks [A]. 23rd International Conference on Computer Communication and Networks [C]. Shanghai, China: IEEE, 2014. 1 – 8.
- [20] Chen H, Jin H, Guo L. Sink-free audio-on-demand over wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(5): 1606 – 1618.

作者简介



蒋 婵 女, 1980 年 6 月生, 广西合浦人. 博士. 主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: Jiangchan@gxu.edu.cn



梁俊斌(通讯作者) 男, 1979 年 3 月生, 广西南宁人. 博士, 教授. 主要研究领域为无线传感器网络, 智能服务.
E-mail: liangjb2002@163.com



马方强 男, 1993 年 3 月生, 陕西咸阳人. 硕士研究生. 主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: 1964195239@qq.com



李陶深 男, 1957 年 6 月生, 广西南宁人. 博士, 教授. 主要研究领域为分布式数据库.
E-mail: tshli@gxu.edu.cn