

一种基于冗余策略的多路径可靠传输新方法

张 婷 张德干 崔玉亚 陈 露 葛 辉

(天津理工大学计算机科学与工程学院计算机视觉与系统教育部重点实验室 天津 300384)

(天津理工大学计算机科学与工程学院智能计算及软件新技术天津市重点实验室 天津 300384)

摘 要 在分布较为密集的无线传感器网络中,数据传输过程会产生大量的冲突问题,冲突会造成传输数据的丢失和传输时延的增大。多路径数据传输方法可以有效地减少冲突造成的数据丢失和传输时延较大问题。为此,提出了基于冗余策略的并发编织多路径可靠传输方法。该方法采用冗余策略,先对 WSN 进行层次分簇,然后传感器节点将采集到的数据信息发送至簇头节点,最后簇头节点将数据包分组并拷贝后通过编织多路径动态路径方式转发至汇聚节点。该方法建立在层次分簇完成后的网络拓扑结构上。大量的与现有多路径传输方法的对比分析实验测试结果表明,所提方法能有效地减少数据丢包率,减少传输时延,增加网络生命周期等,这对无线传感器网络数据的可靠传输有较大的实用价值。

关键词 多路径, WSN, 并发编织, 可靠传输, 数据冗余

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

New Method of Multi-path Reliable Transmission Based on Redundancy Strategy

ZHANG Ting ZHANG De-gan CUI Yu-ya CHEN Lu GE Hui

(Key Laboratory of Computer Vision and System Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(Tianjin Key Lab of Intelligent Computing & Novel Software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract In a wireless sensor network (WSN) with dense distribution, the data transmission process will generate a large number of conflicts, which will result in loss of transmission data and increase of transmission delay. The multi-path data transmission method can effectively reduce data loss and large transmission delay caused by collisions. The new method of redundant concurrent braided multi-path reliable transmission (RCB-MRT) was proposed in this paper. The method adopts the redundancy strategy. Firstly, it clusters the WSN, then sends the sensing data to the cluster nodes, and divides data packets that sensor nodes need to be transmitted into several sub-packages, and then forwards to the sink nodes in multi-path mode with concurrent weaving by intermediate nodes. After compared with the existing multi-path transmission methods, the experimental results show that the proposed multi-path reliable transmission method can effectively reduce data packet loss rate, reduce transmission delay and increase network lifetime, which is very useful for the application of reliable data transmission of WSN.

Keywords Multi-path, WSN, Concurrent weaving, Reliable transmission, Redundancy

1 引言

随着无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的不断发展,其应用领域越来越广泛,对 WSN 数据可靠传输的要求越来越高^[1-3]。WSN 环境中有许多不可预见的因素,比如现场环境、衰减、盲区等,这些因素会造成传感器节点故障,还会造成数据传输时产生错误和丢包问题^[4-5]。数据冗余传输技术是目前 WSN 中保障数据传输可靠性的主要手段,主要包括多路径和重传等方法,它们都是通过增加数据冗余传输来换取可靠性的提高^[6-8]。数据重传机制主要有逐跳重传和端到端重传两种形式,逐跳重传主要是指路径上每跳转发都要进行错误检查和应答,在传输失败的情况下,发送节点需要进行数据重传,重传次数是有限的,主要由链路质量和

可靠性要求等因素决定^[9-10]。端到端重传需要经过整条传输路径,这种方式虽然能够实现可靠的基站到节点间大块数据传输,但是随着路径跳数的增加,效率和性能降低。数据重传机制不仅能够保证分组的成功到达率,而且网络能够通过建立和维护多条端到端的独立路径来提高通信可靠性,但是会增加节点能量消耗,缩短网络生存时间^[11-13]。与单路径传输相比,多路径传输通过在源节点与基站(Base Station, BS)之间建立多条传输路径进行数据传输,这样数据传输的成功率会大大提高^[14-18]。该措施不仅能够有效降低单条路径失效对网络传输造成的不利影响,而且有利于均衡网络负载,提高容错率和可靠性^[19-25]。根据路径中间节点和链路的选择约束不同,多路径可以分为编织多路径和分离多路径^[26-31]。相对编织多路径而言,分离多路径所有路径之间没有共享节点

本文受国家自然科学基金(61571328),天津市重大科技专项(15ZXDSGX00050, 16ZXFWGX00010),天津市科技支撑重点项目(17YFZCGX00360),天津市自然科学基金重点项目(18JJCZJC96800),天津市科技创新团队项目(12-5016, 2015-23)资助。

张 婷(1972—),女,教授,CCF 会员,主要研究方向为物联网等;张德干(1970—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为物联网等,E-mail:2285246377@qq.com(通信作者)。

或链路,路径构建和维护的开销比较大,但带宽、传输时延以及数据流量方面会有很大的改善。

本文提出的 RCB-MRT 算法采用冗余策略,首先对 WSN 进行层次分簇,然后传感器节点将采集到的数据信息发送至簇头节点(Cluster Node, CN),最后簇头节点将数据包分组并拷贝后通过编织多路径动态路径方式转发至汇聚节点(Sink Node, SN)。新提出的方法能够减少数据在传输过程中的丢包率,提高数据传输的可靠性,并能够降低传输时延,均衡网络能耗。

2 算法设计与分析

2.1 网络模型

我们考虑了一种大规模的高冲突的 WSN 环境,它由成百上千个传感器节点组成,这些节点通过层次分簇算法从高到低划分为不同层次的集群,每个集群内的节点将感知到的数据信息发送给通过选举产生的簇头节点,最后由簇头节点将收集到的所有簇内节点数据信息通过多跳的形式转发至汇聚节点。不同的集群在数据传输的过程中会造成冲突,导致数据信息的丢失,负责转发的节点发生故障也会造成数据信息的丢失。为了便于研究,约定 WSN 网络模型具有如下性质:具有高密度特点,初始条件下不会出现孤立节点;基站是唯一的,且能量不受限制;传感器节点的初始能量均为 $E > 0$,且能量不能增加;传感器节点有一定的数据融合能力,且具有唯一的标识;传感器节点具有定位能力。

2.1.1 结构模型

网络的结构模型如图 1 所示,传感器节点将感知到的数据信息发送到该集群的簇头节点,簇头根据本地路由表信息,将数据包分成若干子数据包,以并发多路径方式将子数据包通过中间节点传送到汇聚节点,汇聚节点接收到来自同一集群的子数据包后进行简单的数据融合,若组成了完整的原始数据包,则自动丢弃传输线路上该集群所有的子数据包。

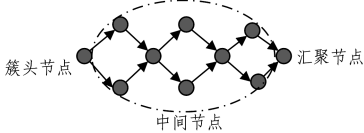


图 1 结构模型示例图

定义 1(兄弟数据包) 簇头节点在进行数据传输前,先对收集到的数据包进行数据数据处理,划分为若干子包,同一簇头生成的子包称为兄弟数据包。汇聚节点接收到转发的子包后,对兄弟数据包进行数据融合,得到完整的数据信息。

对于簇头节点 CN_i ,数据包 DP_i 分为若干兄弟数据包 $DP_{i1}, DP_{i2}, \dots, DP_{ij}, \dots, DP_{im}$,由定义可知:

$$DP_i = DP_{i1} \cup DP_{i2} \cup \dots \cup DP_{ij} \cup \dots \cup DP_{im} \quad (1)$$

引理 1 数据子包是原始数据包的非空真子集。

证明:原始数据包作为全集,其划分生成的数据子包大小小于原始数据包,数据子包的大小一定大于空集,否则没有物理意义。所以数据子包是原始数据包的非空真子集。

定理 1 原始数据包由至少两个兄弟数据包组成。

证明:由引理 1 可知,数据子包是原始数据包的非空真子集,兄弟数据包是数据子包,单个的兄弟数据包大小小于原始数据包。又由式(1)可知若干个兄弟数据包一定可以通过数据融合得到原始数据包。

2.1.2 能量消耗模型

在我们研究的 WSN 模型中主要存在 3 种消耗能量的方

式,第一种是簇头节点进行数据分组时所需消耗的能量,第二种是进行数据传输时所消耗的能量,第三种是汇聚节点进行数据融合时所消耗的能量。数据传输的能量消耗高于数据分组和数据融合^[26-27]。

簇头节点具有数据分组的能力,该模型中的数据分组主要是把数据包拆分为若干个相互之间具有交集的兄弟数据包,消耗的能量与分成的子数据包个数相关,用 E_{Dx} 表示将 u bits 数据包分为 2 个子数据包所消耗的能量。那么将 n bits 的数据包分为 x 个子数据包所消耗的能量为:

$$E_{Dx}(n, x) = \frac{n(x-1)}{u} E_{Dx} \quad (2)$$

根据无线电能量消耗模型,发送一个 k bits 的消息,能量消耗公式为:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) \quad (3)$$

$$\begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs} \times d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp} \times d^4, & d \geq d_0 \end{cases}$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (4)$$

式(3)中, d 为传输的距离,当传送距离小于阈值时,发射功率采用自由空间模式,否则,采用多路径衰减模式; k 为射频能耗系数; ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 分别为两种模式下,电路放大器的能耗系数^[28]。

接收这个消息所消耗的能量为:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = kE_{elec} \quad (5)$$

汇聚节点具有数据融合的能力,用 E_{cp} 表示融合 1 bit 数据所消耗的能量。那么将 x 个 1 bits 的数据分组融合成 1 个数据分组所消耗的能量为^[29]:

$$E_{Df}(x, l) = x l E_{cp} \quad (6)$$

2.2 算法设计

本文提出的并发编织多路径可靠传输算法建立在层次分簇完成后的网络拓扑结构上,将原始数据包根据路由信息分成若干子数据包,然后以并发多路径方式传输至汇聚节点。该算法中的普通传感器节点只具有感知数据和发送数据的能力,簇头节点具有数据融合、转发数据和数据分组的能力,汇聚节点具有数据融合的能力。算法主要分为 3 个阶段,分别是准备阶段、数据传输阶段和数据融合阶段。

2.2.1 准备阶段

准备阶段主要完成数据感知,簇头节点进行数据融合、簇头节点本地路由表的建立和数据分组任务。

传感器节点将感知到的数据信息发送至其所属的集群的簇头节点,然后簇头节点将收集到的分散的数据信息融合成数据包,称之为原始数据包。

定义簇头节点的数据结构为 $CN(\text{ID}, \text{Location}, \text{Energy}, \text{Level}, \text{RoutingTable})$,其中 ID 为簇头节点具有的唯一标识符,Location 包含簇头节点的位置坐标信息,用 $CN_i(cx_i, cy_i)$ 表示簇头节点 CN_i 的坐标位置,Energy 为簇头节点的当前能量值,Level 表示簇头节点所在的层次信息,RouTab 用于保存簇头节点的本地路由表。

在算法的初始阶段,需要计算每个簇头节点 $CN_i(cx_i, cy_i)$ 与汇聚节点 $SN(sx, sy)$ 的距离,表示为:

$$Dis_{cs}(i) = \sqrt{(cx_i - sx)^2 + (cy_i - sy)^2} \quad (7)$$

定义 2(转发节点集合) 层次分簇后形成的网络拓扑结构中,高层次的簇头节点通过低层次的簇头节点与汇聚节点进行数据传输。我们将簇头节点 CN_i 感知范围内的低层次

簇头节点组成的集合定义为转发节点集合,记为 TN_i ,计算公式为:

$$TN_i = \{CN_j \mid Dis(CN_j, CN_i) \leq CN_i.R \& \& Level(CN_j) < Level(CN_i)\} \quad (8)$$

其中, $CN_i.R$ 表示簇头节点的感知半径。

引理 2 与汇聚节点直接连接的簇头节点 CN_j 的转发节点集合 TN_j 为空。

证明:反证法。若簇头节点 CN_j 的转发节点集合 TN_j 不为空,则说明存在更低层次的簇头节点与汇聚节点相连接,只有最底层次的簇头节点才能与汇聚节点直接连接,所以两者显然是矛盾的。故,与汇聚节点直接连接的簇头节点 CN_j 的转发节点集合 TN_j 为空。

定理 2 转发节点集合 TN_j 的大小要么大于或等于 2,要么为空。

证明:高密度 WSN 环境下,由于簇头节点收集传感器节点数据信息时效率的限制,层次分簇过程生成的集群与集群之间存在较大的覆盖冗余,不同层次的邻近集群之间也会存在覆盖冗余。所以,不与汇聚节点直接连接的簇头节点的转发节点集合大小大于或等于 2,与汇聚节点直接连接的簇头节点不需要转发节点集合就可以完成数据传输,故其为空。

簇头节点 $CN_i(x_i, y_i)$ 计算与所有低层次的簇头节点的距离,若距离小于单跳上限阈值,则确定该低层次的簇头节点为 CN_i 的转发节点集合 TN_i 。

构建本地路由表(RoutingTable),数据结构为(RT_ID, NEXT_HOP),其中,RT_ID 表示路由表 ID,对应当前簇头节点 ID, NEXT_HOP 表示“下一跳”,对应当前簇头节点的转发节点集合。

根据转发节点集合 TN_i 的大小 C_i ,将原始数据包分成 C_i 份兄弟数据包,并编号为 $CN_iN_1, CN_iN_2, \dots, CN_iN_{C_i}$,根据式(1),这些兄弟数据包之间存在冗余信息,若干兄弟数据包可以组成完整的原始数据包。

2.2.2 数据传输阶段

数据传输阶段主要负责将兄弟数据包根据本地路由表以并发多路径的方式逐跳传输至汇聚节点。簇头节点 CN_i 根据自己的转发节点集合 TN_i 的大小将数据包分成均分为 N 份,满足式(9):

$$N = |TN_i| \quad (9)$$

簇头节点 CN_i 根据式(9)将原始数据包均分为 3 个子数据包,分别沿着路径 $d_{ij1}, d_{ij2}, d_{ij3}$ 传输至第 j 层簇头节点集合 CN_j ,然后再转发至第 k 层簇头节点集合 CN_k ,直至传送到汇聚节点 SN 为止。

数据传输成功的概率记为 p ,即传输过程中没有产生数据丢包问题。根据文献[13]给出的定理, p 与有向图节点的入度大小 d 有关,节点的入度越大,接收数据过程中产生冲突的可能性越大,成功的概率 p 越小,定义两者之间的关系为:

$$p = \frac{1}{d+1} \quad (10)$$

考虑将一个单元子数据包经过两条路径并发方式,两跳长度传输至汇聚节点的情况。如图 2 所示,簇头节点经过两个中间节点将数据传输至汇聚节点,两个中间节点的入度均为 $d_1=1$,汇聚节点的入度 $d_2=2$,此时,数据传输成功率 p_1 为:

$$p_1 = 1 - \left(1 - \frac{1}{d_1+1}\right)^2 - 2 \times \left(1 - \frac{1}{d_2+1}\right) \times \frac{1}{d_1+1} = 11/36 \quad (11)$$

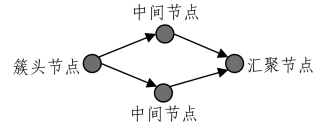


图 2 双路径、两跳情况下数据传输图

再考虑一种经过 3 条路径并发方式,两跳长度传输至汇聚节点的情况。如图 3 所示,簇头节点经过 3 个中间节点将数据传输至汇聚节点,3 个中间节点的入度均为 $d_1=1$,汇聚节点的入度 $d_2=3$,此时,数据传输成功率 p_2 为:

$$p_2 = 1 - \left(1 - \frac{1}{d_1+1}\right)^3 - 3 \times \left(\frac{1}{d_1+1}\right) \times \left(1 - \frac{1}{d_2+1}\right) \times \left(1 - \frac{1}{d_1+1}\right)^2 - 3 \times \left(\frac{1}{d_1+1}\right)^2 \times \left(1 - \frac{1}{d_2+1}\right) \times \left(1 - \frac{1}{d_1+1}\right) = 49/128 \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可知,多路径并发方式在理论上可以提高数据传输成功率,降低数据丢包率。

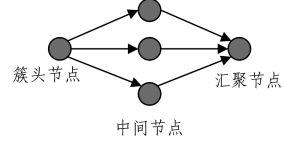


图 3 三路径、两跳情况下数据传输图

经过上述分析可知,虽然多路径并发方式可以提高数据传输的成功率,但是随着路径数目的增加,汇聚节点发生冲突的可能性变得很高,这会导致汇聚节点接收数据的成功率变得很低,这也是制约整个网络数据传输成功率的最大因素。所以,进行每一跳数据传输前,簇头节点都需要对通信链路进行冲突检测,主要侦听当前链路是否在进行数据传输,这里采用二进制指数退避算法。在 CSMA/CD 协议中,一旦检测到冲突,为降低再冲突的概率,需要等待一个随机时间,然后再使用 CSMA 方法试图传输。为了保证这种退避维持稳定,采用了二进制指数退避算法的技术,其算法过程如下:1) 将冲突发生后的时间划分为长度为 $2t$ 的时隙;2) 发生第一次冲突后,各个站点等待 0 或 1 个时隙再开始重传;3) 发生第二次冲突后,各个站点随机地选择等待 0,1,2 或 3 个时隙再开始重传;4) 第 i 次冲突后,在 0 至 2^i-1 间随机地选择一个等待的时隙数,再开始重传;5) 10 次冲突后,选择等待的时隙数固定在 0 至 1023。16 次冲突后,发送失败,报告上层。

经过二进制指数退避算法,当前单跳链路没有进行数据传输时,簇头节点开始将自己的数据包发送出去。这样可以减少数据传输过程中的冲突问题,提高数据传输的成功率。

无线传感器网络中,数据传输存在时延问题,由于本文建立的网络模型分布区域大小与电磁波每秒传播的距离相比较而言可以忽略不计,所以,这里不考虑传播时延问题,只考虑发送时延、处理时延和排队时延。

发送时延是指从发送数据包第一个比特开始,到发送完该数据包最后一个比特为止所需要的时间,记为 T_d ,发送时延的计算公式为:

$$T_d = Packet/R \quad (13)$$

其中,Packet 为数据包大小;R 为数据传输速率,计算公式为:

$$R = (1/T) * \log_2 N \quad (14)$$

其中, T 为一个数字脉冲信号(也称作码元)的宽度, N 为一个

码元所取的有效离散值个数(也称调制电平数), N 一般取2的整数次方。

处理时延是指簇头节点和汇聚节点处理所接收到的数据包的时间,用 T_p 表示。处理时延包括分析子数据包头部、查找路由等。

排队时延是指数据包在输入队列中排队等待处理的时间延迟,用 T_q 表示。由于数据包的到达速度大于路由器的处理速度,就会将数据包暂存起来,产生排队队列。在无线传感器网络中,排队时延与网络利用率有关,利用率越高,排队时延就越大,计算公式为:

$$T_q = \frac{Packet}{V_i} \times \frac{1}{1-U} \quad (15)$$

其中, V_i 表示路由器的传输速度, U 表示路由器的利用率。由式(15)可以看出,数据包越大,排队时延越长。所以,将原始数据包分成若干较小的兄弟数据包可以有效降低排队时延。

由上述分析可以得出,无线传感器网络中总时延 T 的计算公式为:

$$T = T_d + T_p + T_q \quad (16)$$

2.2.3 数据融合阶段

汇聚节点接收到子数据包后,根据编号信息进行数据融合,将来自于同一集群的兄弟数据包融合在一起,自动丢弃数据融合后多余的数据信息,并将融合后的数据包大小与原始数据包进行比较,若相等,说明汇聚节点已经接收到该集群完整的数据信息,此时,丢弃网络中所有与该集群相关的子数据包;若不相等,则继续等待,超过一定时间后,若仍未收到缺少的子数据包,申请重传该子数据包。

2.3 RCB-MRT 算法描述

本文提出了一种新的并发编织多路径可靠传输协议。通过将原始数据包根据路由信息分成若干子数据包,然后以并发多路径方式传输至汇聚节点。减小传输的数据包大小可以有效地降低发生冲突和节点故障时造成的成本代价,并发多路径传输可以大幅度提高数据传输效率,降低传输时延,还可以均衡网络能耗,从而保证数据的可靠传输,同时延长网络生命周期。该协议的主要工作步骤如下:

1)传感器节点进行数据感知,网络中所有传感器节点感知周围的数据信息,并将这些数据信息传输至对应集群的簇头节点,簇头节点对收集到的数据信息进行数据融合,形成一个数据包,称之为原始数据包。

2)簇头节点构建本地路由表,簇头节点根据式(8)得到自己的转发节点集合,然后根据转发节点集合,构建本地路由表,除了直接与汇聚节点相连接的集群外,簇头节点的“下一跳”不止一个,由转发节点集合组成,这里调用算法1。

3)簇头节点进行数据分组,簇头节点根据步骤2)构建的路由表,将步骤1)得到的原始数据包分成若干份后,按照冗余机制组合成与“下一跳”个数相同的兄弟数据包,此时会将簇头信息(包括簇头ID、原始数据包大小和划分后的数据包序列号)添加到兄弟数据包的头部,这里调用算法2。例如,将原始数据包分成1,2,3这3个部分,“下一跳”个数为3,则将原始数据包分成3个兄弟数据包,分别包含的数据信息为1:{1,2},2:{2,3}和3:{1,3}。

4)簇头节点进行并发多路径传输,簇头节点将步骤3)得到的兄弟数据包按照各自不同的“下一跳”路由信息并发地进行多路径传输,此时会建立子数据包与其选择的传输链路的对应关系,并将此信息添加到数据包的头部,这里调用算法3。

5)汇聚节点进行数据融合,汇聚节点接收到子数据包后,分析其头部信息,将来自于相同簇头节点的兄弟数据包进行数据融合,对于冗余的信息部分,只保存一份,然后比较融合后的数据包与原始数据包大小,若相等,说明汇聚节点已经接收到该集群完整的数据信息,此时,丢弃网络中所有与该集群相关的子数据包;若不相等,则继续等待,超过一定时间后,若仍未收到缺少的子数据包,申请重传该子数据包,这里调用算法4。

算法伪代码设计如下。

算法1 构建转发节点集合

```
define function Build_TN;
for node(i) in CN //计算所有簇头节点的转发节点集合
computeTNi by fomula(8); //构建本地路由表
Make RoutingTable(RT_ID, NEXT_HOP);
end
```

算法2 进行数据分组

```
define function Data_Grouping; //将原始数据包划分为若干子数据包
Divide Raw_Packet to Child_Packet cp1, cp2, ..., cpn according to its
RoutingTable; //将子数据包组合成兄弟数据包
Combine cp1, cp2, ..., cp1 to Sibling_Packet sp1; //将簇头信息添加到头部
Add ClusterHead_Info(CH_ID, Packet, SerialNumber) to Head;
Combine cp2, cp3, ..., cpj+1 to Sibling_Packet sp2;
Add ClusterHead_Info(CH_ID, Packet, SerialNumber) to Head;
...
Combine cpj, cpj+1, ..., cpn to Sibling_Packetspm;
Add ClusterHead_Info(CH_ID, Packet, SerialNumber) to Head;
end
```

算法3 进行并发多路径数据传输

```
define function Data_Trasmission;
for i in CN
Query the local RoutingTable; //查询本地路由表,选择传输链路
Establish links between Sibling_Packets and the NEXT_HOP;
//将链路信息添加到头部
Add Link ID to Head;
end
```

算法4 进行数据融合并选择性重传

```
define function Data_Confirm;
//根据兄弟数据包中的簇头节点信息以簇为单位进行数据确认
for spi in SP
for node(i) in CN //提取兄弟数据包中的簇头ID和序列号
Extract CH_ID and SerialNumber of SP;
If (spi.CH_ID == node(i).ID) //没有接收到所有子数据包
While(|serial| != |TNi|)
Retransmission lacking spj;
end
end
end
end
```

3 实验测试与分析

本文借助MATLAB2013a开发工具对本方法进行实验仿真验证,并与已有的CB-RACO协议、DE-MRT协议和FRSMC协议,在相同的测试环境与测试参数下,分析对比这4种不同的协议的数据丢包率、传输时延和生命周期参数。网络中的节点随机分布在400 * 400的区域内,基站不在该区

域内,汇聚节点位于区域的中心,汇聚节点负责将收集到的数据转发至基站。通过实验测试,对数据丢包率、传输时延和生命周期参数进行了详细的分析和对比,得到了一系列结果。表 1 给出参数设置。

表 1 测试参数设置

参数	取值
节点分布范围	400×400
SN 节点坐标	(200,200)
网络节点总个数 N	400
数据包长度/bit	2000
感知半径 R/m	50
节点的初始能量 E_0/J	0.5
电路消耗能量系数/(nJ/bit)	50
信道传播模型能耗系数 $\epsilon_{fs}/(pJ/(bit \cdot m^2))$	10

由图 4 可以看出,本文提出的 RCB-MRT 协议在进行数据传输的过程中,簇头节点消耗的能量低于其他 3 种协议,更能节约簇头节点能量开销。SPF 问题大多数是由于簇头节点能量耗尽造成的。所以,RCB-MRT 协议也能更好地减少 SPF 问题的发生。

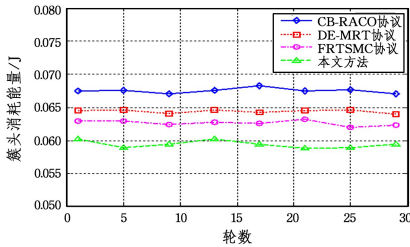


图 4 簇头能耗

由图 5 可以看出,本文提出的 RCB-MRT 协议较其他 3 种协议而言,能在最短的时间轮数内发送完所有簇头节点需要发送的数据信息。

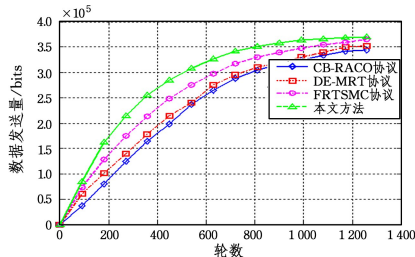


图 5 数据发送量

由图 6 可以看出,本文提出的 RCB-MRT 协议随着时间的推移,接收到的数据包是最多的,也就是说数据丢包率是最低的,也说明了采用该路由协议的无线传感器网络的可靠性最好。

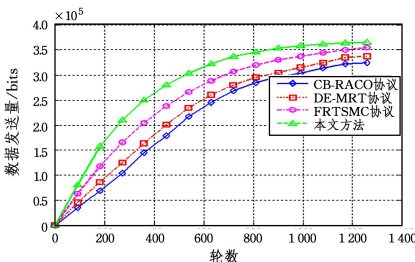


图 6 数据接收量

由图 7 可知,由于随着时间的推移,传感器采集到的数据信息越来越多地进入无线通信网络中。使用二进制退避算法

进行冲突检测时,等待时间越来越长,数据包从源节点传送到目的节点的网络时延也在逐渐增加。另外,可以看出,本文提出的 RCB-MRT 协议网络时延的增长趋势是最慢的。

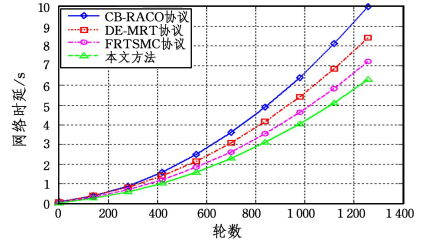


图 7 网络时延对比

本文提出的多路径可靠传输方法,可以应用到无线传感器网络安全环境监测领域,实现实际场景中的可靠数据传输,并且能够减少数据丢包率,减少传输时延,延长网络生命周期。簇头节点将监控信息发送至汇聚节点。主要测试目的是比较 4 种不同协议在相同的真实场景下的数据发送量、数据接收量、平均网络时延和网络能耗,抓取两个轮次点 ($t_1 = 540, t_2 = 1080$) 的实时数据作为比较对象,具体的场景测试参数如表 2 所列。

表 2 应用场景测试参数设置

参数	取值
节点分布范围	400×400
SN 节点坐标	(200,200)
网络节点总个数 N	400
数据包长度/bit	2000
感知半径 R/m	50
节点的初始能量 E_0/J	0.5
电路消耗能量系数/(nJ/bit)	50
信道传播模型能耗系数/(pJ/(bit · m ⁴))	$\epsilon_{fs}:10; \epsilon_{mp}:0.0013$

由图 8 可知,本文提出的 RCB-MRT 协议的平均网络时延明显小于其他 3 种协议,无线传感器网络平均时延越小,数据传输效率越高,数据传输的可靠性就越高。根据一系列的相关测试(因篇幅所限,一些真实场景测试更详细的描述、参数信息以及结果分析图等没有附上),以及大量的与现有多路径传输方法的对比分析实验测试结果表明,我们提出的基于冗余策略的并发编织多路径可靠传输方法(RCB-MRT)能将传感器节点需要传输的数据包分成若干带有数据冗余的子包,然后通过中间节点以多路径方式转发至汇聚节点,从而可以有效地减少数据丢包率、减少传输时延、增加网络生命周期。

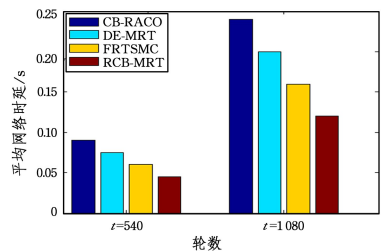


图 8 平均网络时延对比图

结束语 本文提出了一种基于冗余策略的并发编织多路径可靠传输方法,它建立在层次分簇完成后的网络拓扑结构上,通过将原始数据包根据路由信息分成若干子数据包,然后以并发多路径方式传输至汇聚节点。与已有的 CB-RACO 协议、DE-MRT 协议和 FRTSMC 协议等多路径传输方法的对比分析实验测试结果表明,我们的方法降低了数据丢包率、减少

了时延、提高了可靠数据传输的效率、延长了网络的生命周期。该方法对无线传感器网络数据的可靠传输有较大的实用价值。

参 考 文 献

- [1] ATTIAH A, AMJAD M F, CHATTERJEE M. An evolutionary routing game for energy balance in Wireless Sensor Networks [J]. *Computer Networks*, 2018, 138(19): 31-43.
- [2] LIU S. Dynamic Analysis For The Average Shortest Path Length of Mobile Ad Hoc Networks under Random Failure Scenarios [J]. *IEEE Access*, 2019, 1.
- [3] XIE K, WANG L L, WANG X. Low cost and high accuracy data gathering in WSNs with matrix completion [J]. *IEEE Trans. Mob. Computing*, 2018, 17(7): 1595-1608.
- [4] SAGINBEKOV S. Many-to-many data aggregation scheduling in wireless sensor networks with two sinks [J]. *Computer Networks*, 2017, 123(1): 184-199.
- [5] OLUWATOSIN A A, RAJA A J M. Impact of the energy-based and location-based LEACH secondary cluster aggregation on WSN lifetime [J]. *Wireless Networks*, 2018, 24(5): 1379-1402.
- [6] TANG L, SUN Y, GUREWITZ O. PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks [J]. *Proceedings-IEEE INFOCOM*, 2011, 34(17): 1305-1313.
- [7] KRISHNA C R M, VISSA M. Energy efficient cluster based routing protocol for wireless sensor networks [J]. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies*. IEEE, 2016, 71(7): 603-607.
- [8] TANG Y M. Novel Reliable Routing Method for Engineering of Internet of Vehicles Based on Graph Theory [J]. *Engineering Computations*, 2019, 36(1): 226-247.
- [9] TIAN Y, OU Y, KARIMI H R. Distributed multitarget probabilistic coverage control algorithm for wireless sensor networks [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014(5): 1-8.
- [10] LIU S. Novel Dynamic Source Routing Protocol (DSR) Based on Genetic Algorithm-Bacterial Foraging Optimization (GA-BFO) [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(18): 1-20.
- [11] SHILPA R, NEELESH B M. Energy harvesting WSNs for accurately estimating the maximum sensor reading: Trade-Offs and Optimal Design [J]. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 2015, 14(8): 4562-4573.
- [12] ANTONI M, ALEJANDRO C V, MARC B. Data aggregation and principal component analysis in WSNs [J]. *IEEE Trans Wireless Communications*, 2016, 15(6): 3908-3919.
- [13] ZHOU Z B, DU C, SHU L. An energy-balanced heuristic for mobile sink scheduling in hybrid WSNs. *IEEE Trans [J]. Industrial Informatics*, 2016, 12(1): 28-40.
- [14] BRUNO F M, MANUEL R. Energy-efficient node selection in application-driven WSN [J]. *Wireless Networks*, 2017, 23(3): 889-918.
- [15] HU Y, NIU Y G. An energy-efficient overlapping clustering protocol in WSNs [J]. *Wireless Networks*, 2018, 24(5): 1775-1791.
- [16] QIU C X, SHEN H Y, CHEN G. An energy-efficient and distributed cooperation mechanism for k-coverage hole detection and healing in WSNs [J]. *IEEE Trans. Mob. Computing*, 2018, 17(6): 1247-1259.
- [17] MAHMOOD M A, SEAH W K G, WELCH I. Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead [J]. *Computer Networks*, 2015, 2015(79): 166-187.
- [18] CHEN C. New Method of Energy Efficient Subcarrier Allocation Based on Evolutionary Game Theory [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2018, 9.
- [19] ZHANG T. Novel Self-Adaptive Routing Service Algorithm for Application of VANET [J]. *Applied Intelligence*, 2018, 11.
- [20] GAO J X. Novel Approach of Distributed & Adaptive Trust Metrics for MANET [J]. *Wireless Networks*, 2019, 1. DOI: 10.1007/s11276-019-01955-2.
- [21] ZHANG D G, ZHANG T. Novel Optimized Link State Routing Protocol Based on Quantum Genetic Strategy for Mobile Learning [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, 2018(122): 37-49.
- [22] ZHANG D G, GE H, ZHANG T. New Multi-hop Clustering Algorithm for Vehicular Ad Hoc Networks [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(4): 1517-1530.
- [23] BARATI A, MOVAGHAR A, SABAEI M. RDTP: reliable data transport protocol in wireless sensor networks [J]. *Telecommunication Systems*, 2016, 62(3): 611-623.
- [24] ROSSET, VALÉRIO, PAULO M A. Enhancing the reliability on data delivery and energy efficiency by combining swarm intelligence and community detection in large-scale WSNs [J]. *Expert Systems with Applications*, 2017(78): 89-102.
- [25] ZHANG T. A Kind of Effective Data Aggregating Method Based on Compressive Sensing for Wireless Sensor Network [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 2018(159): 1-15.
- [26] KUMAR A, VERTICALE G. Fault Recovery in Time-Synchronized Mission Critical ZigBee-Based Wireless Sensor Networks [J]. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2017, 24(3): 268-277.
- [27] ZHANG D G, LI G. An energy-balanced routing method based on forward-aware factor for Wireless Sensor Network [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1): 766-773.
- [28] ZHOU S, TANG Y M. A low duty cycle efficient MAC protocol based on self-adaption and predictive strategy [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2018, 23(4): 828-839.
- [29] MORELL A, VILA A C, BARCELO M. Data Aggregation and Principal Component Analysis in WSNs [J]. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 2016, 15(6): 3908-3919.
- [30] ZHANG D G. A Novel Approach to Mapped Correlation of ID for RFID Anti-collision [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2014, 7(4): 741-748.
- [31] LIU S, ZHANG T. Novel Unequal Clustering Routing Protocol Considering Energy Balancing Based on Network Partition & Distance for Mobile Education [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, 88(15): 1-9.