MPE^{2}S: 基于多路径纠删编码的无线传感器网络可靠传输策略

李洪兵 [1,3] 熊庆宇 [1,2] 石为人 [1] 陈 强 [4] 蒋亿松 [1] 何 栋 [1]

摘 要 传输可靠性是衡量无线传感器 (Wireless sensor networks, WSN) 网络性能的一个重要指标. 针对节点故障会影响网络传输稳定性和可靠性的问题, 提出了基于多路径纠删编码的无线传感器网络可靠传输策略 (Multi-paths and erasure encoding strategy, MPE^{2}S). 根据反映链路质量的最优最差蚂蚁系统的信息素归一化值, 在相邻等级节点间建立多条互不交叉的传输路径, 将源数据包经纠删编码的数据片沿多条路径分配和传输以实现负载均衡和故障容错. 理论分析和仿真结果表明, MPE^{2}S 具有较高数据包接收率、数据准确率和能效性, 体现了良好的故障容错性、数据传输稳定性和可靠性.

关键词 无线传感器网络, 可靠传输, 故障容错, 多路径路由, 纠删编码

引用格式 李洪兵, 熊庆宇, 石为人, 陈强, 蒋亿松, 何栋. MPE^{2}S: 基于多路径纠删编码的无线传感器网络可靠传输策略. 自动化学报, 2013, **39**(10): 1691−1702

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.01691

MPE^{2}S: Multi-paths and Erasure Encoding Based Reliable Transmission Strategy for Wireless Sensor Networks

LI Hong-Bing[1,3] XIONG Qing-Yu[1,2] SHI Wei-Ren[1] CHEN Qiang[4] JIANG Yi-Song[1] HE Dong[1]

Abstract Transmission reliability is one of the important indexes reflecting the performance of wireless sensor networks (WSN). Aiming at the issue that the nodes′ failures affect the stability and reliability of the data transmission, a multi-paths and erasure encoding based reliable transmission strategy (MPE^{2}S) is presented. According to the normalized values of the ants′ pheromone produced in best-worst ant system which reflect the quality of links, multiple disjoint paths for data transmission are established between the nodes with the adjacent hierarchies. The erasure-coded data packets from the source data is to be allocated to and transmitted through the multi-paths by the load balance mechanism to realize the fault tolerance. Theoretical analysis and simulations show that MPE^{2}S has a higher receiving rate and accuracy rate of the data packets and energy efficiency. It has the good performance of fault tolerance, stability and reliability of data transmission.

Key words Wireless sensor networks (WSN), reliable transmission, fault tolerance, multi-paths routing, erasure coding

Citation Li Hong-Bing, Xiong Qing-Yu, Shi Wei-Ren, Chen Qiang, Jiang Yi-Song, He Dong. MPE^{2}S: multi-paths and erasure encoding based reliable transmission strategy for wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(10): 1691−1702

无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSN) 具有无中心自组网、网络拓扑动态变化、应用相关性、计算传输受限和能量约束等特性[1], 以及工作环境存在不可预测性, 诸如振动与电磁等外界干扰因素, 容易引起网络出现射频冲突、时钟异步、电池耗尽、信号丢失和软件错误等故障, 影响无线传感器网络数据接收率、准确率和传输平均时延等关键性技术指标, 降低无线传感器网络传输稳定性和可靠性, 削弱网络预定功能, 对现有的网络技术带来较大的挑战[2−3]. 尤其是应用在环境较复杂、对网络

收稿日期 2012-07-05 录用日期 2013-01-29
Manuscript received July 5, 2012; accepted January 29, 2013
国家科技重大专项 (2009ZX07528-003-09), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20100191110037), 重庆市科技攻关项目 (CSCT2010AA2036, cstc2012gg-yyjs40008), 重庆市教委科技项目 (KJ131117), 重庆万州区科技计划项目 (201203037, [2010]23), 重庆三峡学院科技项目 ([2011]52) 和重庆三峡学院青年项目 (12QN14) 资助
Supported by National Science and Technology Major Projects of China (2009ZX07528-003-09), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20100191110037), Chongqing Key Project of Science and Technology of China (CSCT2010AA2036, cstc2012gg-yyjs40008), Science and Technology Project of Chongqing City Board of Education Committee (KJ131117), Wanzhou Science and Technology Planning Projects of China (201203037, [2010]23), Science and Technology Projects of Chongqing Three Gorges University ([2011]52), and Youth Project of Chongqing Three Gorges University of China (12QN14)
本文责任编委 关新平
Recommended by Associate Editor GUAN Xin-Ping
1. 重庆大学自动化学院 重庆 400030 2. 重庆大学软件学院 重庆 400030 3. 重庆三峡学院计算机科学与工程学院 重庆 404100 4. 重庆三峡学院电子与信息工程学院 重庆 404100
1. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030 2. School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030 3. School of Computer Science and Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100 4. School of Electronic and Information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100

性能要求苛刻的领域, 如关键设施运行状态监控、有毒有害气体监测与抢险救灾等.

良好的无线传感器网络应具有故障特征的完整性、故障诊断准确性和故障恢复快速性. 在能量消耗的节约性、抵御入侵的抗毁性、节点互连的鲁棒性和信息传输的正确性等方面应有较好的表现. 在出现节点或链路故障时, 网络能及时做出诊断, 寻找合理的容错控制方案, 自适应地处理网络故障, 提高网络传输的稳定性和可靠性, 继续提供高可信的计算服务. 传输稳定性和可靠性是无线传感器网络一个共性的关键性技术问题[4−7], 已引起学者们极大关注, 是无线传感器网络领域的研究热点[2].

提高无线传感器网络传输稳定性和可靠性, 主要包括网络各层容错协议设计与多层联合优化控制等研究内容[2, 8−9]. 网络层及与其他层协同优化设计是重要的研究内容[3, 10−11], 主要通过多路径传输容错技术和网络编码数据冗余传输的方式实现. 多路由传输容错技术在源节点与目的节点间建立多条传输路径, 是以增加路由复杂度为代价, 改进网络负载均衡和传输带宽, 提高数据传输的稳定性和可靠性[3, 12−13]. 网络编码数据冗余传输是将源数据编码后的数据片进行多路径传输, 在目的节点对一定数量的编码数据片解码重组成源数据[14−16]. 对多种方法的优化组合或与其他层联合优化控制将会取得更好的效果[3, 17−18].

本文针对无线传感器网络网络层因节点故障影响传输稳定性和可靠性问题, 提出的基于多路径纠删编码的无线传感器网络可靠传输策略 (Multi-paths and erasure encoding strategy, MPE^{2}S), 主要研究内容包括: 1) 建立具有不同等级区域网络结构, 运用改进蚁群算法的信息素归一化值反映链路质量, 并在相邻等级节点间建立多条互不交叉的传输路径; 2) 研究适合于无线传感器网络特点的纠删编码方式, 并结合多路径传输模式实施负载均衡, 以提高节点故障容错性和传输可靠性; 3) 根据扩展的 Gilbert 模型对能耗期望、数据传输成功率和能耗有效性等进行分析证明并仿真实现.

本文贡献在于: MPE^{2}S 首先对网络节点进行等级区域划分, 根据改进蚁群算法的快速收敛性以及对网络路由建立的优势, 创新地运用可衡量链路质量的最优最差蚂蚁系统的信息素归一化值, 在网络相邻等级节点间建立互不交叉的多条传输路径, 减小建立与优化多条传输路径的计算复杂度. 改进 Reed-Solomon 编码方式, 减小编解码运算量, 实施多路径负载均衡的数据编解码传输. 建立数学模型对网络各性能参数进行证明并仿真验证. MPE^{2}S 降低了多路径路由建立的复杂度, 避免单一传输路径因节点故障导致整条链路数据传输丢失的风险, 根据蚂蚁信息素归一化值实施负载均衡机制, 能提高编码数据片成功传输率、源数据包准确率和能效性, 以提高网络节点故障容错性和传输可靠性.

本文组织结构如下: 第 1 节介绍相关研究工作; 第 2 节提出了基于改进蚁群算法的多路径路由传输容错机制; 第 3 节提出了基于纠删编码的多路径负载均衡机制, 建立 Gilbert 模型对网络可靠性和能耗性等参数进行分析证明; 第 4 节为仿真分析与评价; 最后是本文的小结.

1 相关研究工作

无线传感器网络多路径路由传输机制与数据编解码传输机制主要是提高网络传输的稳定性和可靠性, 提高网络传输故障容错能力. 本节将介绍相关研究工作的研究进展情况.

1.1 多路由传输容错技术

多路由传输容错技术可分为节点故障时重新建立多条传输路径或在已建立好的多条路径中选择激活等方式. N. Hoang 等提出了在源节点和目的节点间建立互不交叉的多路由传输机制 DM (Disjoint multi-paths) 和部分路径交叉的多路由机制 (Braided multi-paths, BM)[15]. 文献 [19] 是在源节点和目的节点间建立多条传输路径, 其中一条作为传输路径, 其余作为备份路径. Lee 等通过建立多条路径同时传输源数据包, 但因多条互不交叉传输路径存在不同延迟, 此方法并不适合 TCP 连接的无线网络[20]. 安全多路径高可靠入侵故障容错机制 (Secure and efficient intrusion-fault tolerant protocol, SEIF)[12] 是建立在多路径选择机制 (Sub-branch multi-path routing protocol, SMRP) 基础上通过 DM 方法提高容错性. 自适应选择可靠路径进行传输的路由算法 (Self-selecting reliable path routing, SRP) 包括的 SSR (Self-selecting routing) 和 SHR (Self-healing routing) 两部分[13] 是建立在多路径传输模式上. REAR (Reliable energy aware routing) 协议提出在源节点和目的节点间, 建立主路径和备份路径两条互不相连的路径提高网络稳定性和可靠性[21].

1.2 网络编码数据冗余传输

网络编码数据冗余传输是将源数据包进行编码后, 将编码数据片经多条路径传输, 在目的节点处对一定数量的编码数据片解码重组成源数据包, 以实现传输故障容错[14−15, 22−24]. ReInForm (Reliable information forwarding)[25] 将源数据包的多个副本沿随机选择的多条路径进行传输. Djukic 等提出在源节点运用 (Forward error correction, FEC) 将源数据包编码成多份数据片, 运用负载均衡算法沿互不交叉的多条路径传输到目的节点以降低数据丢失率 (Probability of packet loss, PPL)[15]. Reed Solomon 算法结合多路径按需路由 (Multipath on demand routing, MDR) 和数据编码传输方式以提

高传输可靠性[23]. Kim 等将重传机制和纠删编码等多种传输容错方法进行组合[22]. 文献 [24] 根据路由协议 (Auto repeat request, ARQ) 的反馈信息, 动态配置纠删编码机制的参数以减小编解码运算量和存储空间.

2　多路径路由传输容错机制

2.1　网络节点等级标定

根据节点距离目的节点远近, 将网络划分为不同等级区域, 网络节点进行等级标定. 每个等级区域的节点具有相同的等级度, 即

$$G_i = m \quad \text{若 } \mathrm{dist}(s,i) \in ((m-1)\cdot r, m\cdot r) \tag{1}$$

其中, G_i 表示节点 i 的等级度, m 为等级值, $\mathrm{dist}(s,i)$ 为节点到 Sink 节点的欧氏距离, r 为初始设定的距离值.

2.2　确定路径信息素值

最优最差蚂蚁系统 (Best-worst ant system, BWAS) 是对蚁群算法的改进, 引入对最优最差蚂蚁的奖惩机制, 增强最优路径搜索指导, 加速蚁群算法收敛速度. 蚂蚁能记忆所经历路径产生的信息素值. 利用 BWAS 的群智能搜索优势和快速收敛特性, 搜寻并建立目的节点到源节点间的较优路径. 根据蚂蚁在路径上产生的信息素归一化值, 建立源节点到目的节点之间互不交叉的多条传输路径.

表 1　参数含义

Table 1　Parameter meaning

参数	参数含义
P_{ij}^k	蚂蚁 k 的转移概率
j	尚未访问的节点
τ_{ij}	边 (i,j) 上的信息素强度
η_{ij}	边 (i,j) 的能见度, 反映节点转移到节点的启发度
$\mathrm{allowed}_k$	蚂蚁下一步允许选择的节点集合
ρ, ε	均为参数, $0<\rho<1$
n	节点数量
L_{nn}	最近领域启发产生的路径长度
$L_{\mathrm{best}}, L_{\mathrm{worst}}$	当前循环中最优最差蚂蚁经历的路径长度
L_{gb}	当前循环中全局最优路径
α	信息素挥发参数, $0<\alpha<1$

步骤 1. 初始化参数, 根据式 (2) 和 (3) 为每只蚂蚁选择路径.

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}(t)}{\sum\limits_{s\in \mathrm{allowed}\ k}\tau_k^{\alpha}(t)\eta_{is}^{\beta}(t)}, & j\in \mathrm{allowed}_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho_1\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t,t+n) \tag{3}$$

$$\Delta\tau_{ij}(t,t+n) = \sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{ij}^k(t,t+n) \tag{4}$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t,t+n) = \begin{cases} \dfrac{Q}{L_k}, & \text{若 ant } k \text{ passes path}(i,j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{5}$$

式 (3) 是在蚂蚁建立了完整的路径后更新轨迹量, 并非在每一步都对其更新.

步骤 2. 当蚂蚁生成路径后, 对其信息素值按式 (6) 进行局部更新.

$$\tau_{rs} \leftarrow (1-\rho)\tau_{rs} + \rho\Delta\tau_{rs} \tag{6}$$

$$\Delta\tau_{rs} = (nL_{nn})^{-1} \tag{7}$$

步骤 3. 循环执行步骤 1 和 2 直至簇头节点中的每只蚂蚁都生成一条路径, 并根据簇头节点的每只蚂蚁经历路径的长度, 评选出最优最差蚂蚁.

步骤 4. 对最优蚂蚁按式 (8) 进行全局更新.

$$\tau_{rs} \leftarrow (1-\alpha)\tau_{rs} + \alpha\Delta\tau_{rs} \tag{8}$$

其中

$$\Delta\tau_{rs} = \begin{cases} (L_{gb})^{-1}, & \text{若}(r,s)\in \text{global best} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{9}$$

步骤 5. 对最差蚂蚁按式 (10) 进行全局更新.

$$\tau(r,s) = (1-\rho)\tau(r,s) - \varepsilon\frac{L_{\mathrm{worst}}}{L_{\mathrm{best}}} \tag{10}$$

步骤 6. 分别对其余节点中的蚂蚁执行步骤 2 ~ 5, 直至所有节点的蚂蚁建立路径, 并记录各路径信息素值. 根据 BWAS 计算出各路径的信息素值并归一化, 作为衡量链路质量的依据.

2.3　蚁群算法的实现过程

1) 在每个节点设置一定数量的信息包 (蚂蚁), 初始化信息包的基本参数, 每个信息包携带目的节点地址、源节点地址和跳数信息等信息, 根据节点禁忌表和信息包转移概率选择下跳节点.

2) 信息包前行过程中在本地节点路由表中创建一个表项, 记录下信息素浓度、跳数和上下跳节点坐标等信息, 并更新节点禁忌表. 当中间节点收到来自邻居节点信息包时, 检查是否已收到过来自相同节点的信息包; 若是, 则回退前一节点继续寻找下跳节点; 否则, 将跳数增 1.

3) 当有信息包从源节点到达目的节点后停止搜寻, 对路由表中生成的链路的信息素进行更新, 直到在每个节点上的信息包到传输到目的节点. 在生成的路由表里计算信息包的路径长度并记录最优最差路径值, 并将最优最差路径上的信息素更新.

2.4 多路径传输机制

2.4.1 多路径建立规则

节点不与同级节点建立传输路径, 只与在其发射功率覆盖范围的邻级簇头节点建立传输路径. 源节点首先选择质量最优路径的节点为下一跳数据传输的节点, 建立一条到目的节点的最优传输链路. 源节点选择次优链路质量的节点为下一跳节点, 并依次选择链路质量最优且未位于第一条传输路径的节点为下一跳传输中继节点, 建立第二条从源节点到目的节点的次优传输链路. BWAS 在每两个不同等级节点之间的链路上生成了信息素值, 通过信息素值反映链路的质量. 具有较大信息素值的链路具有较高的数据成功传输率和较低的传输时延. 将所有路径信息素值归一化, 根据木桶定律, 选择链路中最小一段路径的信息素归一化值反映传输链路质量, 取 $P_{\min} \geq p'$ (p' 为一给定参数) 建立有限条互不交叉的传输路径, 如图 1 所示. 图 1 中 S_1, S_2, S_3 为源节点, D_1, D_2 为目的节点, 其余节点为中继节点. S_2 与 D_1 建立了 3 条路径, 分别为 $S_2 \rightarrow N_3^1 \rightarrow N_2^1 \rightarrow N_1^1 \rightarrow D_1$, $S_2 \rightarrow N_3^2 \rightarrow N_2^2 \rightarrow N_1^2 \rightarrow D_1$, $S_2 \rightarrow N_3^3 \rightarrow N_2^3 \rightarrow N_1^3 \rightarrow D_1$. 根据路径建立规则, S_1 不能与 N_3^1 和 N_2^1 建立路径, S_3 不能与 N_3^2 建立路径.

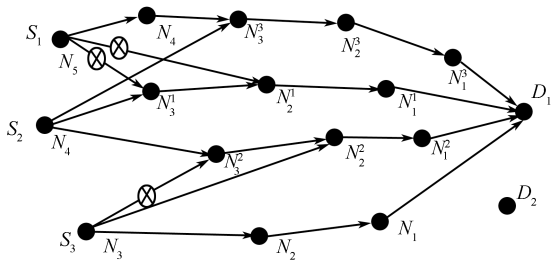


图 1 多路径数据传输机制

Fig. 1 Multi-path data transmission mechanism

2.4.2 多路径建立过程

步骤 1. 初始化参数, 计算每个节点的等级.

步骤 2. 执行 BWAS 算法, 计算每条路径信息素归一化值 τ.

步骤 3. 源节点选择在发射功率范围内的具有最大信息素归一化值的邻居等级节点作为下跳节点建立传输路径, 并依此建立到目的节点的第一路径.

步骤 4. 源节点选择在发射功率范围内的具有较次信息素归一化值的邻居等级节点作为第一个下跳节点, 并依次选择在发射功率范围内具有最大信息素归一化值的且未位于已建立路径上的邻居等级节点作为下跳节点, 建立到目的节点的路径.

步骤 5. 目的节点对建立的多条路径的路径质量进行评估, 并将信息包沿建立好的路径返回到源节点, 源节点根据返回信息包确认多路径的建立并实施负载均衡机制.

3 基于纠删编码的多路径负载均衡机制

纠删编码是针对在传输过程中因网络故障出现数据包丢失的一种数据冗余传输容错机制, 编码数据片必然在多路径上进行传输, 并在目的节点解码重组以提高源数据准确率. 负载均衡机制是多路径传输和纠删编码的数据传输方式需考虑的问题, 即将源数据包的编码数据片在多条路径上优化分配与传输, 以提高数据片接收率、源数据准确率和能效性.

3.1 纠删编码容错机制

3.1.1 纠删编码容错机理

纠删编码 (Erasure coding) 是将源节点的数据包编码后沿多条路径传输, 在目的节点对接收的一定数量的编码数据片解码重组成源数据包. 源节点将大小为 bM 字节的数据包分解成大小为 b 字节的 M 个数据片, 将此 M 个数据片进行编码, 生成 $N+R$ 个编码数据片在网络中沿从源节点到目的节点的 x_1 到 x_n 这 n 条路径进行传输, 有 $\sum_{i=1}^{n} x_i = N+R$. 目的节点将接收到 N' ($N \leq N' \leq N+R$) 个编码数据片. 根据解码规则, 目的节点至少接收到 N 个编码数据片才能重组成 M 个源数据片, 允许丢失最多 R 个数据片. 如果随机变量 Z_i 是路径 x_i 上接收到的数据片量, 则有 $\sum_{i=1}^{n} z_i \geq N$. 数据编码冗余度以 R 表示. 当 R 大于数据传输丢失率时, 通过冗余数据传输就能在目的节点获得源节点的数据包, 提高网络数据传输故障容错性. 其容错编码机理如图 2 所示.

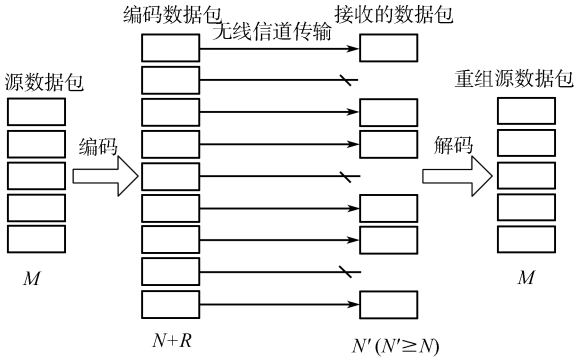


图 2 纠删编码容错机理

Fig. 2 Fault-tolerant mechanism of erasure coding

3.1.2 基于 Reed-Solomon 的纠删编码

针对计算资源受限的无线传感器网络, 基于范德蒙矩阵的 Reed-Solomon 编码方式, 在优化编码方式, 减小编码计算量, 提高编解码速度等方面有着较好的特性. Reed-Solomon 编码[22] 的基本思想就是产生含有 m 个未知量的 n 个方程, 只需其中 m 个方程便能求解出 m 个未知量. 对于一个给定的数据, 将其分解成 $w_0, w_1, w_2, \cdots, w_{m-1}$, 运

用这些系数构建多项式 $p(\boldsymbol{X}) = \sum_{i=0}^{m-1} w_i x^i$. 计算多项式 $p(\boldsymbol{X})$ 在 n 个不同点 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的值 $p(x_1), p(x_2), \cdots, p(x_n)$ 可以用矩阵与向量的乘积表示.

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{m-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{m-1} \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \cdots & x_3^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 & \cdots & x_{n-1}^{m-1} \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_{m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p(x_1) \\ p(x_2) \\ p(x_3) \\ \vdots \\ p(x_{n-1}) \\ p(x_n) \end{bmatrix} \tag{11}$$

线性方程 $A\boldsymbol{W} = \boldsymbol{Z}$ 中, A 为范德蒙矩阵, $n \times m$ 的范德蒙矩阵的元素有如下特征: $A(i,j) = x_i^{j-1}$ 非零, 任何 m 行元素都可以组成一个非奇异矩阵, m 行元素线性独立. $\boldsymbol{X}$ 与 $\boldsymbol{Z}$ 分别为 m 行向量. 通过矩阵 A 和向量 $\boldsymbol{Z}$, 可以唯一确定出 $\boldsymbol{W}$ 向量.

Reed-Solomon 编码方式对源数据包分解成的 m 个数据片 $W_0, W_1, W_2, \cdots, W_{m-1}$ 都要进行编码和解码, 这需要无线传感器网络节点较多的计算和能量资源. 对 Reed-Solomon 编码改进, 只对部分数据片编解码以节约计算资源. 当对一个数据包分解的数据片进行编码时, 如果部分已编码数据片是源数据片本身, 则在目的节点处不需要解码就能得到源数据片. 而对于冗余数据片的编解码, 仍按照 Reed-Solomon 编码方式进行. 这种改进的编解码方式称为系统编码. 运用系统编码对源节点的数据片编码时, 就不需要对 m 个源数据片进行编码计算. 在目的节点对收到的数据进行解码, 若得到越多的源数据片, 则解码矩阵越近似于单位矩阵, 解码的速度也就越快. 编码原理如式 (12) 所示.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & x_{m+1} & \cdots & x_{m+1}^{m-1} \\ 1 & x_{m+2} & \cdots & x_{m+2}^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^{m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_{m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_{m-1} \\ p(x_{m+1}) \\ p(x_{m+2}) \\ \vdots \\ p(x_n) \end{bmatrix} \tag{12}$$

3.2　多路径负载均衡机制

3.2.1　多路径负载均衡思想

因节点计算传输资源受限, 不应在所建立的每条路径上对源节点的所有编码数据片进行传输. 这将会导致大量冗余数据片在网络中传输消耗较多的能量, 也容易因数据碰撞等产生传输时延, 且对于目的节点解码重组源数据的过程也并不需要过多的冗余数据片, 这对解码的计算和目的节点存储空间等都造成了极大的资源浪费. 因此, 须实行多路径负载均衡机制, 根据建立的传输链路质量, 将已编码的数据片在传输路径上进行分配传输, 如图 3 所示.

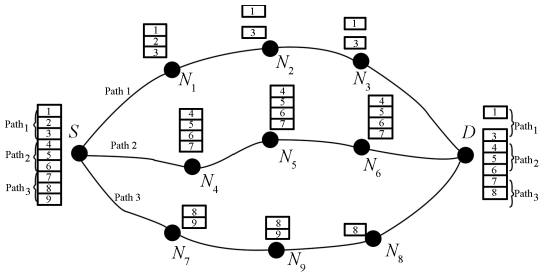


图 3　多路径负载均衡机制

Fig. 3　Multi-path load balance mechanism

图 3 为多路径负载均衡机制示意图. 在源节点 S 和目的节点 D 之间建立了 3 条传输路径 $\mathrm{Path}_i\,(i = 1, 2, 3)$. 多路径负载均衡机制根据每一条链路传输质量 p_i, 对源节点编码后的数据片进行分配. 具有较高质量的传输链路将分配较多的编码数据片, 低质量的数据片将分配较少的编码数据片, 优化编码数据片在多路径的分配, 实现负载均衡传输. 如图 3 所示, 源节点 S 的源数据经编码后生成数据片 $1 \sim 9$, 根据链路质量 $\mathrm{Path}_2 \geq \mathrm{Path}_1 \geq \mathrm{Path}_3$, 链路 2 将分配较多的编码数据片. 在传输过程中, 因为链路质量或节点故障等原因, Path_1 与 Path_3 发生部分数据片丢失, 最终在目的节点 D 处收到数据片 1, $3 \sim 8$.

3.2.2　多路径负载均衡法

蚁群算法的信息素是反应最优路径的一个重要参数, 综合了路径寻优过程中节点的能量、路径距离的启发度和群智能信息计算的优势. 改进蚁群算法的信息素 τ 值越大, 对应的路径质量较高, 实施负载均衡所分配的编码数据片较多. 设 $R_i\,(i = 1, 2, 3\cdots)$ 为第 i 条链路分配的编码数据片数量, 由蚁群算法的信息素归一值 p_i^j 反应第 i 条路径的第 $j-1$ 跳与第 j 跳节点间路径的质量, 其中, $i \in (1, 2, \cdots, m)$, $j \in (1, 2, \cdots, n)$. 根据木桶定律确定整条传输链路质量为 $p_i{}' = \min(p_i^1, p_i^2, \cdots, p_i^n)$, 将 m 条链路的 $p_i{}'$ 归一化为 p_i, 则第 i 条链路上分配的编码数据片数量为 $R_i = (N + R)p_i$.

3.3　性能评价分析

评价无线传感器网络的数据包接收率、数据准确率和能耗有效性等, 需建立数学模型进行评估. 数据包在网络中通过多跳方式从源节点传输到目的节点, 因为每一条路径的数据成功传输率不等, 伯努利概率模型不能较好地反映. 利用马尔科夫模型–Gilbert 模型和扩展的 Gilbert 模型来评价网络各项指标[26] 更为合适. 在此状态转移概率模型上, 求解在负载均衡下网络多路径的传输性能. 所建立的两个状态的 Gilbert 模型如图 4 所示.

图 4 中, p 为从状态 0 (数据未丢失状态) 至状态 1 (数据丢失状态) 的转移概率, q 为从状态 1 至状态 0 的转移概率, $1-q$ 为条件丢包率. 可知对于状态 0 与 1 的状态概率 π_0 和 π_1 分别为

$$\pi_0 = \frac{q}{p+q},\ \pi_1 = \frac{p}{p+q} \tag{13}$$

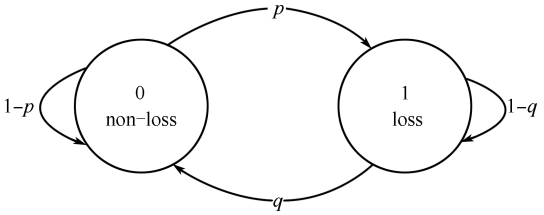


图 4 两个状态的 Gilbert 模型

Fig. 4 Two states based Gilbert model

引入纠删编码的数据冗余传输机制后, M 个源数据片通过编码产生 $N+R$ 编码数据片. 目的节点须至少接收到 N 个数据包, 才能解码重组原 M 个源数据片. 因此, 数据包的突发性丢失将显著影响到 $N+R$ 个数据的成功到达率, 其扩展的 Gilbert 模型[26] 如图 5 所示.

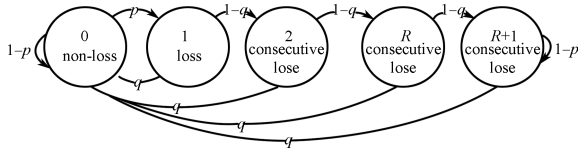


图 5 扩展的 Gilbert 模型

Fig. 5 Extended Gilbert model

定义随机变量 X 如下: $X=0$ 为无数据包丢失, $X=k$ 为有 k 个连续数据包丢失. 因此, 将两种状态的 Gilbert 模型扩展为 $R+2$ 态扩展型 Gilbert 模型, 其转移状态有 $R+2$ 个. 状态 $R+1$ 表明数据包的丢失数已大于 R 个, 在目的节点已不能重构源数据包, 马尔科夫链的状态转移概率矩阵 P 为

$$p = \begin{bmatrix} 1-p & q & q & \cdots & q & q \\ p & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1-q & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1-q & 1-q \end{bmatrix} \tag{14}$$

因此, 各稳态概率可以由下式确定:

$$\begin{bmatrix} 1-p & q & q & \cdots & q & q \\ p & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1-q & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1-q & 1-q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \pi_2 \\ \vdots \\ \pi_R \\ \pi_{R+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \pi_2 \\ \vdots \\ \pi_R \\ \pi_{R+1} \end{bmatrix} \tag{15}$$

由式 (15) 得稳态概率为

$$\begin{aligned} &\pi_0 = \frac{q}{P+q}, \quad \pi_{R+1} = \frac{P}{P+q}(1-q)^R \\ &\pi_k = \frac{Pq}{P+q}(1-q)^{k-1}, \qquad k \in [1, R] \end{aligned} \tag{16}$$

对于从 M 个源数据片经编码后的全部 $N+R$ 个编码数据片, 经过网络中的一条 n 跳传输路径后能耗期望值为[26]

$$E = \varepsilon(N+R)\pi_0^n n + \sum_{k=1}^{n} \varepsilon(N+R)\pi_0^{k-1}\pi_1 k = \frac{\varepsilon(1-\pi_0^n)(N+R)}{(1-\pi_0)} \tag{17}$$

在基于 Reed-Solomon 编码实行负载均衡的多路径传输模式下, 设在源节点和目的节点间共建立 m 条传输链路, 每条链路分配的编码数据片数量为

$$R_i = [(N+R)p_i], \qquad i = 1, 2, \cdots, m \tag{18}$$

其中, $\sum_{i=1}^{m} R_i = N+R,\ \sum_{i=1}^{m} p_i = 1$.

在单路径传输情况下, 至多有 $R+2$ 转移状态. 但在多路径传输情况下, $N+R$ 个数据片被分到多条路径上, 路径的转移状态至多有 $R+1$ 个. 因此, 第 i 条传输链路的稳态概率为

$$\begin{aligned} &\pi_0^i = \frac{q_i}{P_i+q_i}, \quad \pi_{R_i+1}^i = \frac{P_i}{P_i+q_i}(1-q_i)^{R_i} \\ &\pi_k^i = \frac{P_i q_i}{P_i+q_i}(1-q_i)^{k-1}, \quad k \in [1, R_i] \end{aligned} \tag{19}$$

根据多路径传输机制, 从源节点到目的节点的每条路径均具有相同的跳数. 对于 $N+R$ 个编码数据片, 经 m 条 n 跳传输链路后能耗期望值为

$$E_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon R_i \frac{(1-{\pi_0^i}^n)}{(1-\pi_0^i)} = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon(N+R)p_i \frac{(1-{\pi_0^i}^n)}{(1-\pi_0^i)} \tag{20}$$

因此有:

$$E_{\text{all}} < E \tag{21}$$

引理 1. 基于负载均衡的多路径纠删编码传输的能耗期望小于单路径纠删编码传输的能耗期望, 即 $E_{\text{all}} < E$.

证明. 在本文方法下建立的多条传输路径中, 有链路质量 $P_1 > P_2 > \cdots > P_m$. π_0^i 为第 i 条链路的数据成功传输率, 传输路径质量为 $\pi_0^1 > \pi_0^2 > \cdots >$

π_0^m. 在源节点和目的节点间只建立一条传输路径的与建立多条路径中最优路径的 π_0^1 相等, 即 $\pi_0 = \pi_0^1$.

$$\frac{(1-{\pi_0^1}^n)}{(1-\pi_0^1)} > \frac{(1-{\pi_0^2}^n)}{(1-\pi_0^2)} > \cdots > \frac{(1-{\pi_0^m}^n)}{(1-\pi_0^m)} \tag{22}$$

$$E_1 = \varepsilon(N+R)p_1\frac{1-{\pi_0^1}^n}{1-\pi_0^1} = \varepsilon(N+R)p_1\frac{1-{\pi_0}^n}{1-\pi_0} = p_1\cdot E \tag{23}$$

$$E_2 = \varepsilon(N+R)p_2\frac{1-{\pi_0^2}^n}{1-\pi_0^2} < \varepsilon(N+R)p_2\frac{1-{\pi_0}^n}{1-\pi_0} = p_2\cdot E \tag{24}$$

同理, $E_j < P_j\cdot E,\ j\in(3,4,\cdots,m)$

$$E_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{m}\varepsilon(N+R)p_i\frac{(1-{\pi_0^i}^n)}{(1-\pi_0^i)} = E_1+E_2+\cdots+E_m < (p_1+p_2+\ldots+p_m)\cdot E = E \tag{25}$$

□

现对基于单路径纠删编码和基于 MPE^{2}S 策略的数据成功传输率进行分析. 基于单路径纠删编码方式的数据成功传输率为

$$P_{\text{one}} = \sum_{k=N}^{N+R} C(N+R,k)(\pi_0^n)^k(1-\pi_0^n)^{N+R-k} \tag{26}$$

基于 MPE^{2}S 策略的数据成功传输率为

$$P_{\text{suc}} = \sum_{i=1}^{m} p_i^2 \tag{27}$$

两种方式下数据成功传输率关系为

$$P_{\text{suc}} \geq P_{\text{one}} \tag{28}$$

引理 2. 无线传感器网络中基于负载均衡的多路径纠删编码方式的数据成功传输率高于基于单路径纠删编码方式的数据成功传输率, 即 $P_{\text{suc}} \geq P_{\text{one}}$.

证明. 基于 m 条路径传输方式的成功传输的数据片量为

$$\sum_{i=1}^{m} p_i\cdot\rho_i = \sum_{i=1}^{m} p_i^2(N+R) \tag{29}$$

基于多路径纠删编码方式的数据成功传输率为

$$P_{\text{suc}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} p_i^2(N+R)}{N+R} = \sum_{i=1}^{m} p_i^2 \tag{30}$$

当 $i=1$ 时, $\pi_0^1 = \pi_0$, 因为两种情况下最优路径质量相等. 现以多路径传输模式中第一条路径即最优路径为例:

$$P_1 = (\pi_0{}^n)^2 = \pi_0{}^{2n} \tag{31}$$

$$P_{\text{one}} = \sum_{k=N}^{N+R} C(N+R,k)(\pi_0^n)^k(1-\pi_0^n)^{N+R-k} < {p_{\text{one}}}'(R=0) \tag{32}$$

$${p_{\text{one}}}' = (\pi_0{}^n)^n(1-\pi_0{}^n)^R = \pi_0{}^{n^2} \tag{33}$$

当 $n\geq 2$ 时, $P_1 \geq P_{\text{one}}^{'}$
所以, 当 $P_1 > P_{\text{one}}$ 时, 有

$$P_{\text{suc}} = \sum_{i=1}^{m} p_i^2 \geq p_{\text{one}} \tag{34}$$

因为 $p_i \geq 0$. □

引理 3. 基于负载均衡的多路径纠删编码方式的能耗有效性高于基于纠删编码单路径数据传输方式.

证明. 网络能耗有效性定义为总的传输能耗与成功传输数据片的能耗的比值. 基于负载均衡的多路径纠删编码方式的能耗有效性为

$$E_{\text{mul}} = \frac{E_{\text{all}}}{M\cdot p_{\text{suc}}} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\varepsilon(N+R)p_i\frac{(1-{\pi_0^i}^n)}{(1-\pi_0^i)}}{\sum_{i=1}^{m} p_i^2\cdot M} \tag{35}$$

基于纠删编码单路径传输方式的能耗有效性为

$$E_{\text{one}} = \frac{E}{M\cdot P_{\text{one}}} = \frac{\varepsilon\,(1-\pi_0^{\pi})\,(N+R)}{P_{\text{one}}\,(1-\pi_0)\,M} \tag{36}$$

根据引理 1 与引理 2 可知: $E_{\text{mul}} > E_{\text{one}}$. 因为 $E_{\text{all}} < E$, $P_{\text{suc}} \geq P_{\text{one}}$. □

现对基于负载均衡的多路径纠删编码方式和基于非负载均衡的多路径纠删编码方式的数据成功传输率作比较分析.

引理 4. 基于负载均衡的多路径纠删编码方式的数据传输成功率高于基于非负载均衡的多路径纠删编码方式, 即 $P_{\text{suc}} > P_{\text{suc}}^{'}$.

证明. 基于非负载均衡的多路径纠删编码方式的数据成功传输率为

$$P_{\text{suc}}^{'} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{1}{m}p_i(N+R)\right)}{N+R} = \sum_{i=1}^{m}\frac{1}{m}p_i \tag{37}$$

令

$$f(m)=P_{\rm suc}-P_{\rm suc}^{'}=\sum_{i=1}^{m}{p_i}^2-\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{m}p_i=\sum_{i=1}^{m}\left(p_i-\frac{1}{2m}\right)^2-\frac{1}{4m} \tag{38}$$

对 $f(m)$ 求导有:

$$f^{'}(m)=\frac{1}{m^2}\sum_{i=1}^{m}\left(p_i-\frac{1}{2m}\right)+\frac{1}{4m^2}=\frac{3}{4m^2}>0$$

当 $m=1$ 时, 即为单路径传输方式, 有 $P_1=1$, 从而 $f(m)=f(1)=0$.

当 $m\geq 2$ 时, 即为多路径传输方式, 因 $f^{'}(m)>0$, 所以 $f(m)>0$, 即 $P_{\rm suc}>P_{\rm suc}^{'}$ □

因此, 在多路径数据传输中引入改进的 Reed-Solomon 纠删编码机制, 通过质量较优的传输链路分配较多的编码数据片的多路径负载均衡法, 能提高编码数据片的成功传输率、能耗均衡性和能耗有效性.

4 理论分析与仿真评价

4.1 算法性能分析

1) 最优最差蚂蚁系统 BWAS 是对蚁群算法的改进, 引入对最差蚂蚁惩罚机制, 增强了最优路径搜索过程指导. 在所有蚂蚁完成一次循环后, 对最差蚂蚁所经过的且非最优蚂蚁路径的路径信息素进行更新, 进一步增大最优与最差蚂蚁的信息素, 增强了最优路径搜索过程指导, 加快收敛速度. 对 BWAS 与 ACO (Ant colony optimization) 在旅行商问题上进行的验证, 其收敛性能对比如表 2 所示, BWAS 收敛性能优于 ACO (基本参数: $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.1$, $\tau=10$, $N_{\rm node}=30$, $N_{\max}=40$).

表 2 BWAS 与 ACO 收敛特性对比

Table 2 Comparison of convergence performance between BWAS and ACO

	参数 $k=30$		参数 $k=50$		
	路径长度	运行时间 (s)	路径长度	运行时间 (s)	迭代次数
BWAS	462.4024	1.4422	462.4024	1.2529	30
ACO	472.8267	2.7651	462.4024	6.3853	48

2) MPE^{2}S 容许在建立的多路径中出现节点故障和数据片丢失, 通过编码数据片的冗余性提高数据准确率. 对比以往的在节点出现故障时, 临时建立或从已建立好的多路径表中选择备份路径进行重传的多路径传输方式, MPE^{2}S 运用蚂蚁信息素归一化值衡量质量, 优化编解码方式和实施负载均衡策略, 减小了建立多条传输路径的复杂度和降低传输时延. MPE^{2}S 算法复杂度主要体现在运用改进蚁群算法构建多路径路由和纠删编码等方面. 平面结构的网络里 BWAS 算法复杂度为 $\mathrm{O}(N\cdot k\cdot(R-1)^2)$, 其中, N 为算法的迭代次数, R 为网络节点数, k 为蚂蚁数. 基于范德蒙矩阵的 Reed-Solomon 编解码方式, 其优化之前以高斯消元法求解的复杂度为 $1/3n^3$, 优化之后以高斯消元法求解的复杂度仅为 $1/3(n-m)^3$, 其中, $n-m$ 为编码后冗余数数据片, 是反映数据冗余传输的度量. 改进的 Reed-Solomon 编解码方式减小了编码计算量, 提高了编解码速度等, 这对资源受限的无线传感器网络节点具有重要的意义.

3) MPE^{2}S 具有较好的可扩展性, 因为改进蚁群算法的群智能优势能适应网络拓扑结构的变化. 当网络为平面拓扑结构, 节点数量较小时, 运用蚁群算法建立多路径路由并求解各路径信息素值的算法复杂度为 $\mathrm{O}(N\cdot k\cdot(R-1)^2)$. 当网络节点规模较大时, 网络可采用分簇的拓扑结构, 运用蚁群算法在网络节点等级划分的簇头节点间建立多条传输路径, 建立多路径路由的算法复杂度为 $\mathrm{O}(N\cdot k\cdot(R_1-1)^2)$, R_1 为网络簇头节点数. 算法复杂度与网络分簇算法、簇头节点数和迭代次数相关.

4.2 多路径路由建立

条件假设: 1) 网络节点是静止的; 2) 各节点的地理位置已知; 3) 分簇前各传感器节点地位平等, 拥有相同的参数和初始能量; 4) 网络节点处于全双工工作模式; 5) 节点随机均匀分布在矩形区域内, 目的节点位于外侧.

仿真测试是在处理器为 i3-2100, 内存 4 GB 的 PC 机上, 基于 Matlab R2008 环境编程仿真实现. 在 [100, 100] 区域内随机部署 150 个节点, 区域数 $n=5$, Sink 节点的初始坐标为 (120, 50). 区域半径 $R=40$, 其值由 Sink 节点距离区域远近和 n 值确定. 节点置放蚂蚁个数 $k=30$, 初始化信息素强度 $\tau=100$, 信息启发因子 $\alpha=1$, 期望启发式因子 $\beta=5$, 信息素挥发系数 $\rho=0.1$, 信息素残留因子为 $1-\rho$, 最大迭代次数 $N_{\max}=200$.

现将第 1 ∼ 5 等级区域分别以区域 A ∼ E 等级标识, (x_I, y_I) 标识第 I 等级区域的节点坐标, ρ' 为路径蚂蚁信息素的归一化值, ${\rho'}_{E\rightarrow D}$ 表示 E 区点 (7, 42) 到 D 区点所有节点的路径的蚂蚁信息素的归一化值. E 区点 (7, 42) 被假设为源节点, 路径信息素归一化值和对应节点坐标分别为表 3 ∼ 5 所示.

表 3 与表 4 分别为运用改进蚁群算法从 E 区节点 (7, 42) 到目的节点建立的两条路径上的节点与其邻级节点链路的信息素归一化值. 表 5 为每个信息素归一化值对应的节点坐标信息. 若 $\rho'=0.3034$, 表示点 (7, 42) 与 $(x_D, y_D)=(16, 35)$ 链路上的信息素归一化值. E 区点 (7, 42) 到 D 区所有节点的信息素归一化值中, $\max\ \rho'=0.3034$. 因此, E 区点 (7, 42) 选择 $(x_D, y_D)=(16, 35)$ 建立传输路径. 若

表 3　Path_1 信息素归一化值

Table 3　Pheromone normalized values on Path_1

$\rho_{E\to D}{}'$	$\rho_{D\to C}{}'$ $\rho_{C\to B}{}'$	$\rho_{B\to A}{}'$	
0.3034	0.1814	0.1285	0.1162
0.1515	0.1033	0.0873	0.0742
0.0920	0.1469	0.1277	0.1029
0.1299	0.1300	0.0796	0.1254
0.1041	0.0683	0.1086	0.0510
0.0608	0.1188	0.0983	0.0868
0.1039	0.1039	0.0619	0.0601
0.0544	0.0881	0.0889	0.0710
–	0.0729	0.0726	0.0360
–	–	0.0578	0.0525
–	–	0.0461	0.0375
–	–	0.0426	0.0564
–	–	–	0.0454
–	–	–	0.0409
–	–	–	0.0438

表 4　Path_2 信息素归一化值

Table 4　Pheromone normalized values on Path_2

$\rho_{E\to D}{}'$	$\rho_{D\to C}{}'$ $\rho_{C\to B}{}'$	$\rho_{B\to A}{}'$	
0.1515	0.0471	0.1070	0.0327
0.1041	0.1521	0.0423	0.0421
0.1299	0.2081	0.1146	0.0616
0.3034	0.1033	0.0518	0.1652
0.0544	0.1116	0.0550	0.0423
0.1039	0.1106	0.0485	0.0487
0.0608	0.0627	0.1229	0.0386
0.0920	0.1281	0.1319	0.0594
–	0.0764	0.0803	0.0343
–	–	0.0722	0.0553
–	–	0.1123	0.0424
–	–	0.0613	0.1045
–	–	–	0.0926
–	–	–	0.0741
–	–	–	0.1063

表 5　路径对应的节点坐标

Table 5　Coordinates of corresponding nodes on the paths

(x_E, y_E)	(x_D, y_D)	(x_C, y_C)	(x_B, y_B)	(x_A, y_A)
(1, 53)	(18, 62)	(56, 13)	(57, 74)	(88, 4)
(4, 63)	(30, 66)	(33, 50)	(68, 4)	(100, 35)
(4, 80)	(29, 27)	(32, 63)	(55, 52)	(82, 43)
(6, 11)	(16, 35)	(46, 58)	(66, 18)	(69, 71)
(7, 42)	(33, 100)	(44, 59)	(71, 99)	(96, 31)
(10, 53)	(32, 20)	(39, 78)	(81, 98)	(92, 38)
–	(30, 94)	(36, 19)	(54, 72)	(100, 27)
–	(23, 76)	(32, 44)	(53, 56)	(93, 57)
–	–	(44, 34)	(61, 85)	(93, 11)
–	–	–	(58, 32)	(67, 29)
–	–	–	(58, 62)	(74, 17)
–	–	–	(62, 26)	(77, 66)
–	–	–	–	(78, 84)
–	–	–	–	(64, 40)
–	–	–	–	(71, 56)

节点 (16, 35) 发生故障, 应选择 $\rho = 0.1515$ 的路径, 则应选择节点 $(x_D, y_D) = (18, 62)$ 建立传输路径关系. 节点连接顺序为 (7, 42) → (16, 35) → (32, 44) → (53, 56) → (71, 56) → Sink 节点.

建立第二条传输路径. 源节点仍为 (7, 42), 选择次最大值 $\rho' = 0.1515$ 对应的 (18, 62) 为下跳节点. 在下一跳时选择最大归一化值且非第一条线路上的节点为下一跳节点. 对应的节点坐标如表 5 所示. 依此方法根据链路质量建立多条互不交叉的传输路径.

4.3　数据包接收率和准确率

采用文献 [27] 中的数据传输能耗模型, 故障节点定义为节点能耗达到初始设定的阈值 δ 时为故障节点. 网络节点的数据为定时采集传输, 在节点以一定的时间间隔 $\triangle t$ 内对收集到的编码数据片进行重组成源数据包. 下面将: 方法 1: 本文提出的 MPE²S; 方法 2: 本文提出的方法中没有采用多路径负载均衡法, 而将数据包均衡分配在建立的多条传输链路中; 方法 3: 未经编码直接将源数据包直接均匀分配在建立的多条传输链路中; 方法 4: 基于 FEC 编码的多路径传输容错策略[15] 作比较分析.

数据包接收率和准确率是反映链路质量与容错效果的指标. 数据包接收率定义在目的节点接收到数据包与源节点发送数据包量的比值. 数据包的接收率越大, 数据包传输过程中丢包率越小, 节点间的链路质量越好. 数据包接收率仿真结果分别如图 6 和图 7 所示.

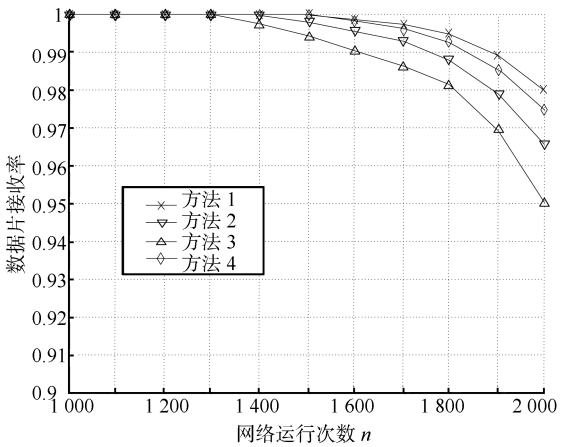


图 6　数据包接收率 (能耗参数: $E_{\text{fuse}}, E_{\text{elec}}, \varepsilon_{\text{amp}}$)

Fig. 6　Packet receiving rate (energy consumption parameters: $E_{\text{fuse}}, E_{\text{elec}}, \varepsilon_{\text{amp}}$)

图 6 和图 7 为无线传感器网络工作运行至 1 000 ∼ 2 000 次过程中 4 种方法的数据接收率比较. 由图 6 可知, 方法 1 与 4 具有较高的数据接收率, 在网络运行到 2 000 次时, 数据接收率仍在 0.97 以上. 方法 2 与 3 在网络运行至 1 600 次后, 随着网络故障节点数的增多, 数据接收率下降较快.

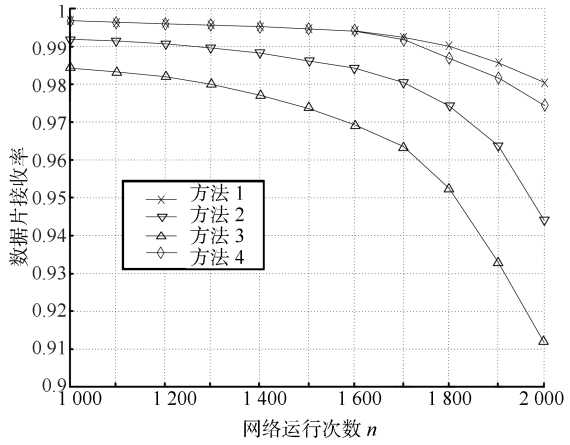


图 7 数据包接收率 (能耗参数: $5E_{\rm fuse}, 5E_{\rm elec}, 5\varepsilon_{\rm amp}$)

Fig. 7 Packet receiving rate (energy consumption parameters: $5E_{\rm fuse}, 5E_{\rm elec}, 5\varepsilon_{\rm amp}$)

图 7 增大了网络运行的能耗参数, 增大了网络在建立链路和数据传输时的能耗, 增大了在相同运行次数时的故障节点数. 由图 7 可知, 在网络故障节点数增多的情况下, 各方法的数据接收率差别较为明显. 方法 3 与 4 下降较快, 数据接收率较差. 方法 1 与方法 4 在数据接收率指标上差别较小, 具有较高的数据接收率.

数据准确率定义为所接收到的能重组成源数据的数据包量与源节点所发送的数据包量的比值. 数据包准确率反映了数据编解码及重组数据包的准确率. 数据准确率仿真结果如图 8 和图 9 所示.

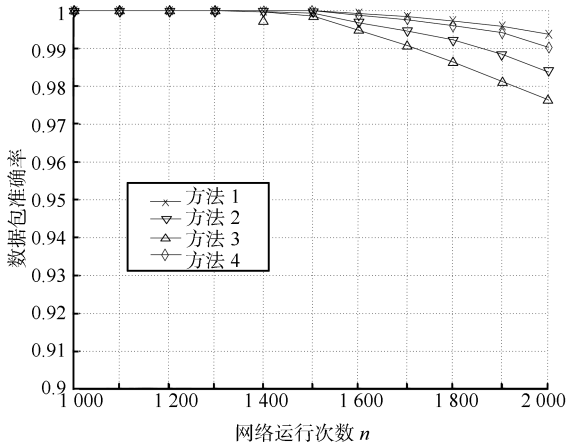


图 8 数据准确率 (能耗参数: $E_{\rm fuse}, E_{\rm elec}, \varepsilon_{\rm amp}$)

Fig. 8 Packet accurate rate (energy consumption parameters: $E_{\rm fuse}, E_{\rm elec}, \varepsilon_{\rm amp}$)

图 8 和图 9 为网络工作运行至 1 000 ∼ 2 000 次时, 4 种方法的数据接收率比较. 图 8 在故障节点相对较少的情况下具有较高的接收率, 能重组成源数据包的概率较高, 即具有较高的数据准确率. 图 9 增大了能耗参数, 相比于变化较大的数据接收率, 因为纠删编码冗余数据片传输, 方法 2 与 3 的数据准确率较高且变化平缓.

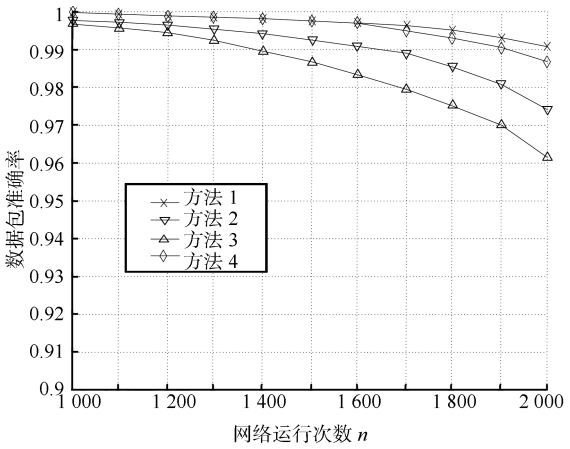


图 9 数据准确率 (能耗参数: $5E_{\rm fuse}, 5E_{\rm elec}, 5\varepsilon_{\rm amp}$)

Fig. 9 Packet accurate rate (energy consumption parameters: $5E_{\rm fuse}, 5E_{\rm elec}, 5\varepsilon_{\rm amp}$)

4.4 能耗有效性分析

有效数据能耗率定位为在目的节点接收到的源数据包所需能耗与源节点发送的数据包比值. 有效数据能耗率仿真结果如图 10 所示.

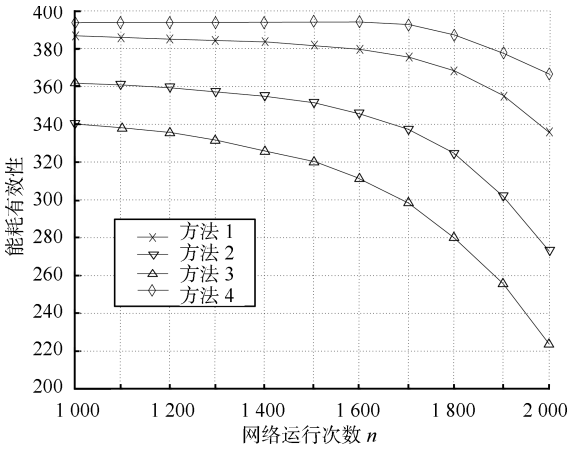


图 10 能耗有效性分析

Fig. 10 Efficiency analysis of energy consumption

图 10 为网络工作运行至 1 000 ∼ 2 000 次时 4 种方法的能耗有效性分析. 其中, 方法 4 的能耗有效性最高, 方法 1 因运用蚁群算法在路由建立和寻优过程消耗一定的能量, 在总体能效性上略差, 方法 2 与 3 的能效性较低, 尤其是随着网络运行次数的增加, 网络故障节点数增多, 其能耗有效性下降更快. 由图 10 可知, 基于纠删编码机制的多路径负载均衡传输机制能效性高于单路径模式或未编码传输模式.

5 结论

本文针对节点故障影响无线传感器网络数据传输准确率与可靠性问题, 提出了无线传感器网络多

路径编码传输容错策略 MPE^{2}S. MPE^{2}S 是根据最优最差蚂蚁系统的信息素归一化值, 在相邻等级节点间建立多条互不交叉的传输路径. 运用多路径负载均衡机制, 将源数据包进行纠删编码后的编码数据片进行分配和传输. MPE^{2}S 主要是在网络层将 Reed-Solomon 纠删编码的数据包通过互不交叉的多路径传输实现容错. 理论分析和仿真结果表明, 当网络存在故障节点情况下, MPE^{2}S 具有较高数据包接收率和数据包准确率, 较低平均传输时延和能耗均衡等, 体现了较好的故障容错性和数据传输可靠性.

References

1 Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008, **52**(12): 2292−2230

2 Paradis L, Han Q. A survey of fault management in wireless sensor networks. *Journal of Network and Systems Management*, 2007, **15**(2): 171−190

3 Hind A, Anjali A. A survey on fault tolerant routing techniques in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications. Athens, Glyfada: IEEE Computer Society, 2009. 366−371

4 Liu Y H, Zhu Y M, Ni L M, Xue G T. A reliability-oriented transmission service in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, **22**(12): 2100−2107

5 Zhou H B, Wu Y M, Hu Y Q, Xie G Z. A novel stable selection and reliable transmission protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010, **33**(15): 1843−1849

6 Zhang Y Y, Shu L, Park M S, Wang L, Lee E M. An intelligent and reliable data transmission protocol for highly destructible wireless sensor networks. *Journal of Internet Technology*, 2009, **10**(5): 539−548

7 Oh H, Han T D. A demand-based slot assignment algorithm for energy-aware reliable data transmission in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2012, **18**(5): 523−534

8 Du Jun-Zhao, Liu Hui, Chen Ping, Wu Bo. Building the best reliable routing tree using link quality services in WSNs. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(12): 1269−1275
(杜军朝, 刘惠, 陈平, 武波. 无线传感器网络中基于链路层服务的最可靠路由路径建立算法. 自动化学报, 2007, **33**(12): 1269−1275)

9 Badonnel R, State R, Festor O. Management of mobile ad hoc networks: information model and probe-based architecture. *International Journal of Network Management*, 2005, **15**(5): 335−347

10 Hong Zhen, Yu Li, Zhang Gui-Jun. An adaptive distributed clustering routing protocol for wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1197−1205
(洪榛, 俞立, 张贵军. 无线传感器网络自适应分布式聚簇路由协议. 自动化学报, 2011, **37**(10): 1197−1205)

11 Liu Tao. Energy consumption analysis and energy holes avoidance for gradient based routing in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(8): 1353−1361
(刘韬. 基于梯度的无线传感器网络能耗分析及能量空洞避免机制. 自动化学报, 2012, 38(8): 1353−1361)

12 Challal Y, Ouadjaout A, Lasla N, Bagaa M, Hadjidj A. Secure and efficient disjoint multipath construction for fault tolerant routing in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, **34**(4): 1380−1397

13 Babbitt T A, Morrell C, Szymanski B K, Branch J W. Self-selecting reliable paths for wireless sensor network routing. *Computer Communications*, 2008, **31**(16): 3799−3809

14 Rizzo L. Effective erasure codes for reliable computer communication protocols. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1997, **27**(2): 24−36

15 Petar D, Shahrokh V. Reliable packet transmissions in multipath routed wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, **5**(5): 548−559

16 Dulman S O, Nieberg T, Wu J, Havinga P J M. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2003 Wireless Communications and Networking. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2003. 1918−1922

17 Azzedine B, Pazzi R W N, Araujo R B. Fault-tolerant wireless sensor network routing protocols for the supervision of context-aware physical environments. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2006, **66**(4): 586−599

18 Kang Yi-Mei, Li Zhi-Jun, Hu Jiang, Dong Ji-Chang. A low-power hierarchical wireless sensor network topology control algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(4): 543−549
(康一梅, 李志军, 胡江, 董吉昌. 一种低能耗层次型无线传感器网络拓扑控制算法. 自动化学报, 2010, **36**(4): 543−549)

19 Nasipuri A, Castañeda R, Das S R. Performance of multipath routing for on-demand protocols in mobile ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 2001, **6**(4): 339−349

20 Lee S J, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Communications. Helsinki, Finland: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001. 3201−3205

21 Hassanein H S, Luo J. Reliable energy aware routing in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Dependability and Security in Sensor Networks and Systems. Columbia, MD, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2006. 54−64

22 Kim S, Fonseca R, Culler D E. Reliable transfer on wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Santa Clara, CA, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004. 449−459

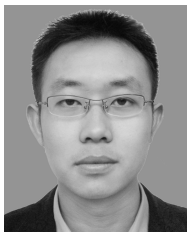
23 Wu J, Dulman S, Havinga P, Nieberg T. Multipath routing with erasure coding for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 15th Annual Workshop on Circuits, Systems, and Signal Processing. Veldhoven, the Netherlands: [s. n.], 2004. 181−188

24 Xiong Z Q, Yang Z K, Liu W, Feng Z. A lightweight FEC algorithm for fault tolerant routing in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2006 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Wuhan, China: IEEE, 2006. 1−4

25 Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForm: reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks. In: Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Bonn/Konigswinter, Germany: IEEE, 2003. 406−415

26 Wen H, Lin C, Ren F Q, Yue Y, Huang X M. Retransmission or redundancy: transmission reliability in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Pisa, Italy: IEEE, 2007. 1−7

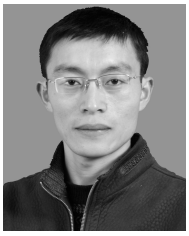
27 Lindsey S, Raghavendra C S Sivalingam K M. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2002, **13**(9): 924−935



李洪兵 重庆大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为智能信息号处理, 无线传感器网络故障诊断.
E-mail: sxxylhb@163.com
(**LI Hong-Bing** Ph. D. candidate at the School of Automation, Chongqing University. His research interest covers intelligent information processing and wireless sensor networks.)

熊庆宇 重庆大学自动化学院教授. 主要研究方向为智能感知与智能计算, 普适计算与嵌入式系统, 图像与视频压缩技术. 本文通信作者.
E-mail: xiong03@cqu.edu.cn
(**XIONG Qing-Yu** Professor at the School of Automation, Chongqing University. His research interest covers intelligent perception and computing, ubiquitous computing and embedded systems, image and video compression technology. Corresponding author of this paper.)

石为人 重庆大学自动化学院教授. 主要研究方向为智能感知, 控制与决策, 无线传感器网络, 智能信息处理.
E-mail: wrs@cqu.edu.cn
(**SHI Wei-Ren** Professor at School of Automation, Chongqing University. His research interest covers intelligent sensing, control and decision-making, wireless sensor networks, and intelligent information processing.)



陈 强 重庆三峡学院信号与信息处理重点实验室讲师. 2012 年获得西安电子科技大学硕士学位. 主要研究方向为智能信息处理, 电子系统集成.
E-mail: dypcq@hotmail.com
(**CHEN Qiang** Lecturer at the Key Laboratory of Signal and Information Processing, Chongqing Three Gorges University. He received his master degree from Xidian University in 2012. His research interest covers intelligent information processing and electronic system integration.)

蒋亿松 重庆大学博士研究生. 2010 年于重庆大学获得学士学位. 主要研究方向为无线传感器网络, 嵌入式技术.
E-mail: jys12398@126.com
(**JIANG Yi-Song** Ph. D. candidate at the School of Automation, Chongqing University. He received his bachelor degree in engineering from Chongqing University in 2010. His research interest covers wireless sensor network and embedded technology.)

何 栋 重庆大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络, 建筑节能. E-mail: hedfly@163.com
(**HE Dong** Ph. D. candidate at the School of Automation, Chongqing University. His research interest covers wireless sensor network and building energy efficiency.)