

基于网络编码的 WSN 机会路由优化算法

姚玉坤, 张 毅, 李 娟

(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 在无线传感器网络中, 现有基于网络编码的低能耗可靠机会路由算法(EROR), 在均衡节点能量消耗和延长网络生存时间上存在不足。为此, 提出一种基于网络编码的机会路由优化算法(OPEROR)。通过信道误码率和丢包率计算节点接收编码包失败的概率, 以减少编码包的重复次数。转发集中的节点在收齐解码所需的编码包后直接广播自己的代价数据包, 不再发送确认包, 从而减少网络开销和确定主转发节点的等待时间。主转发节点的邻居节点根据收到的代价数据包更新自己的转发代价后再判断自己是否成为协助转发节点, 防止转发代价大的邻居节点也转发编码包。仿真结果表明, 与 EROR 算法相比, OPEROR 算法可以延长网络生存时间并降低平均能耗。
关键词: 无线传感器网络; 机会路由; 网络编码; 主转发节点; 代价数据包

中文引用格式: 姚玉坤, 张 毅, 李 娟. 基于网络编码的 WSN 机会路由优化算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(6): 68-73.

英文引用格式: YAO Yukun, ZHANG Yi, LI Juan. Optimized opportunistic routing algorithm based on network coding in wireless sensor network[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6): 68-73.

Optimized Opportunistic Routing Algorithm Based on Network Coding in Wireless Sensor Network

YAO Yukun, ZHANG Yi, LI Juan

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

[Abstract] In Wireless Sensor Network (WSN), the current Energy-efficient Reliable Opportunistic Routing (EROR) algorithm based on network coding has shortcoming in balancing the energy consumption of nodes and prolonging the lifetime of network, so an optimized opportunistic routing algorithm based on network coding named OPEROR is proposed. It uses the channel bit error rate and packet loss rate to calculate the probability of failure of the received encode packets, reducing the retransmitted number of encode packets. The nodes in the forwarding set broadcast the cost packet directly instead of acknowledgement packet when it collects enough encode packets, reducing the network overhead and the waiting time of primary forwarding nodes. The neighbors of the primary forwarding nodes update their own forwarding cost based on the received cost packet, and decide whether to become assistant forwarding node, thus can prevent the neighbors with large forwarding cost from forwarding encode packets. Simulation results show that compared with EROR algorithm, the performance of OPEROR algorithm is improved in prolonging the lifetime of network and reducing the average energy consumption.

[Key words] Wireless Sensor Network (WSN); opportunistic routing; network coding; primary forwarding node; cost data packet

DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0046846

0 概述

近年来, 微电子学与低功率无线通信技术的发展, 极大地促进了无线传感器网络^[1] (Wireless Sensor Network, WSN) 在环境、军事、医疗^[2] 等领域的应用。WSN 是由大量安置在监控区域内的传感器节点以

多跳及自组织的方式构建而成的无线网络, 网络中的节点可以收集、分析和传输区域内的各种信息, 并将这些信息汇聚给网络所有者。

传统的无线网络路由需构建一条或几条源到目的节点的传输路径^[3]。当网络中的节点接收数据失败时, 其上一跳节点需要重新发送数据, 如果此时链

基金项目: 国家自然科学基金(61379159); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjBX0085)。

作者简介: 姚玉坤(1964—), 女, 教授, 主研方向为无线宽带自组织网络、网络编码; 张 毅、李 娟, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-04-18 **修回日期:** 2017-06-23 **E-mail:** 1392551455@qq.com

路质量较差,上一跳节点可能需要多次重传才能保证数据包成功被下游节点接收,频繁地重传将消耗大量带宽资源和节点能耗。因此,传输数据时,应充分考虑无线信道的广播特性,减少数据包的重传次数。

无线信道中的节点广播数据包时,其邻居节点都有一定的概率监听到该数据包,麻省理工大学利用这一特性提出了机会路由^[4-5]策略。机会路由中的数据包不再是按一条固定路线进行传输,而是数据包每次都会转发给一组节点,然后从这一组节点中选出一个节点转发数据包,如此重复直至最后到达目的节点。机会路由充分利用了无线信道的广播特性,进一步提高了网络性能。

网络编码技术^[6]通过网络中的节点对收到的数据包进行编码处理,然后转发给下一跳节点,以此提高整个网络的吞吐量和可靠性。文献[7]提出让处于瓶颈区域内的部分节点采用网络编码技术,将多个数据包编码成一个编码包后再发送给 sink 节点,从而减少数据包的传输次数,提高整个网络的生存时间。在机会路由与网络编码技术融合方面,文献[8]提出的 COPE 协议是一种基于 MAC 层编码的路由协议,该协议将网络编码和机会路由简单结合。MORE^[9]协议在使用机会路由传输数据的同时,还结合了随机线性网络编码,使网络中的节点可以协作转发数据。该协议的缺陷在于源节点只有收到目的节点的 ACK 确认信息后才开始发送下一段数据,在数据包转发跳数比较多的情况下,严重影响了网络的吞吐量。文献[10]提出的 MinACK 算法能够使节点及时回复 ACK 消息并且每发送一段数据只需回一个 ACK,允许网络中同时传输多个数据段,提高了网络吞吐量。文献[11]提出的 CodePower 算法不仅将机会路由和随机线性网络编码应用到无线传感器网络中,还让节点通过计算端到端的路径代价来选择最优发射功率,节省了网络能量消耗,但该算法不能保证数据的可靠传输。

文献[12]提出了一种能量有效可靠机会路由(Energy-efficient Reliable Opportunistic Routing, EROR)算法。该路由采用分布式算法,数据包发送功率可调,节点在发送数据包时只需获取邻居节点的相关信息,不需要提前构建路由,但该算法在确定主转发节点时易造成节点能量浪费。

本文针对 EROR 算法在均衡节点能量消耗和延长网络生存时间上的不足,提出一种基于网络编码的机会路由优化算法(OPEROR)。

1 EROR 算法问题描述

文献[12]针对基于 IEEE802.15.4 标准的无线传感器网络提出了 EROR 算法,该算法利用流内随

机线性网络编码来传递数据,可保证数据包每一跳的可靠传输。其核心思想是节点可以通过计算自己的转发代价来选择发射功率和转发集,并由协助转发节点和主转发节点将编码包发送至目的节点,最后在目的节点完成解码获得原始数据。但该算法存在以下4个问题:

1) 计算节点接收编码包失败的概率仅依据信道误码率。由于传感器节点的缓存空间受限,当节点无法再缓存数据包时只能将接收到的新的数据包直接丢弃,因此导致节点接收数据包失败。

2) 每个转发集中有节点收齐编码包后,需要广播一个 ACK 消息通知上游节点停止发包。由于转发集中可能存在多个节点在同一时刻收齐编码包,如果这些节点同时发送 ACK 消息,ACK 包可能发生碰撞。为避免这种情况发生,节点收齐编码包后都会延迟一定时间再发送 ACK 消息,并且每个节点至少延迟 12 个符号周期。这将导致上游节点过多地发送多余的编码包,而其余没有收齐编码包的节点仍在缓存,极大浪费了节点能耗和缓存区资源。

3) 确定协助转发节点时需计算主转发节点邻居的转发代价,但 EROR 算法在计算时没有将只存在于邻居节点转发集内而不在主转发集中的节点排除掉。该算法只是简单地计算邻居节点转发集中的所有节点,使得计算转发代价值时出现差错,导致转发代价大的邻居节点也可能成为协助转发节点,从而不能有效地均衡各节点的能耗并延长网络寿命。

4) 在计算节点发送 ACK 消息的时延以及协助转发节点的转发数据量的公式中,需知道当前协助转发节点转发代价的最小值和最大值,而这些信息节点本身并没有储存,只有通过额外的数据包才能获取,增大了网络开销。

针对 EROR 算法的缺陷,本文提出的 OPEROR 算法设计了4种优化机制,分别是节点发射功率和转发集选择机制、主转发节点选择机制、协助转发节点选择机制、协助转发节点发送数据量确定机制,下面进行详细介绍。

2 OPEROR 路由算法优化机制

2.1 节点发射功率和转发集选择机制

节点发射功率和转发集选择机制是指节点通过比较不同发射功率下的转发代价后,选择转发代价最小的转发集来传输数据。设节点的发射功率集合为 E 。节点 u 以功率 ε 以及其转发集 F_u 发送一个数据包的代价 $C_u(\varepsilon, F_u)$ 用下式表示:

$$C_u(\varepsilon, F_u) = C_u^{bc}(\varepsilon, F_u) + C_u^{fw}(\varepsilon, F_u) \quad (1)$$

其中, $C_u^{bc}(\varepsilon, F_u)$ 表示节点 u 以功率 ε 成功发送一个数据包到转发集 F_u 的代价, $C_u^{fw}(\varepsilon, F_u)$ 表示节点 u 的转发集 F_u 中的节点成功发送一个数据包的代价。

计算 $C_u(\varepsilon, F_u)$ 的具体步骤如下:

步骤 1 计算节点发送数据时消耗的能量 $E_t(\varepsilon, l)$, 以及节点 v 接收数据时消耗的能量 $E_r(l)$, 依据文献[13]中的能耗公式, 两者的计算方法如下:

$$E_t(\varepsilon, l) = \left(A + \frac{\varepsilon}{\beta} \right) \frac{l}{R} \quad (2)$$

$$E_r(l) = B \frac{l}{R} \quad (3)$$

其中, ε 为功率, l 为发送或接收的数据量, A 为节点分析处理数据时的平均功率, B 为节点接收数据的平均功率, β 为放大器的效率 ($0 < \beta < 1$), R 是物理层的数据速率。

步骤 2 计算数据包出现误码的概率。本文考虑瑞利衰落无线信道, 根据文献[14]中的计算方法, 节点 u 以功率 ε 发送信号给节点 v 的误码概率为:

$$e_{u,v} = \frac{1}{2(1 + \bar{\gamma}_{u,v})} \quad (4)$$

其中, $\bar{\gamma}_{u,v}$ 为接收信号与干扰加噪声比, 可由下式计算:

$$\bar{\gamma}_{u,v} = \frac{\varepsilon}{d_{u,v}^\eta} \times \frac{g_1}{\varepsilon_N} \quad (5)$$

其中, g_1 为与发送和接收天线有关的常数, ε_N 是噪声与干扰的功率, η 为路径衰减指数, $d_{u,v}$ 是两节点之间的距离。

步骤 3 利用排队论模型计算由节点缓存队列及服务率引起的丢包率。根据文献[15], 由节点缓存及服务率引起的丢包率 p_v 计算公式为:

$$p_v = \begin{cases} \frac{1}{k+1}, & \rho = 1 \\ \frac{\rho^k (1-\rho)}{1-\rho^{k+1}}, & \rho \neq 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, λ 是数据包的到达率, μ 是服务率, k 是节点缓存大小。

步骤 4 计算节点 u 以功率 ε 发送 l 比特的数据到节点 v , 节点 v 不能成功接收这个数据包的概率 $q_{u,v}^\varepsilon(l)$ 。由式(4)和式(6)可知:

$$q_{u,v}^\varepsilon(l) = 1 - (1 - p_v)(1 - e_{u,v})^l \quad (7)$$

由式(7)可得节点 u 广播数据包时, F_u 中至少有一个节点收到该数据包的概率为 $1 - \prod_{v \in F_u} q_{u,v}^\varepsilon(l)$, 即要保证数据包至少被 F_u 中的一个节点成功接收, 节点 u 需要广播的次数为 $1 / [1 - \prod_{v \in F_u} q_{u,v}^\varepsilon(l)]$ 。

步骤 5 由上述公式可得发送方和接收方收发数据包的总能耗为:

$$\frac{1}{1 - \prod_{v \in F_u} q_{u,v}^\varepsilon(l)} [E_t(\varepsilon, l) + \sum_{v \in F_u} E_r(l)] \quad (8)$$

考虑到剩余能量较小的节点如果过多地收发数据包, 可能会过早地使能量耗尽, 因此参照式(8), 节

点 u 发送一个数据包, 使得 F_u 中至少有一个节点成功接收的代价表达式为:

$$C_u^{bc}(\varepsilon, F_u) = \frac{1}{1 - \prod_{v \in F_u} q_{u,v}^\varepsilon(l)} \left[\frac{E_t(\varepsilon, l)}{RE_u} + \sum_{v \in F_u} \frac{E_r(l)}{RE_v} \right] \quad (9)$$

其中, RE_u 和 RE_v 分别代表节点 u, v 的剩余能量。

步骤 6 本文中主转发节点的定义为第一个收齐编码包并发送自己代价数据包的节点, 集合 F_u 中节点均有可能成为主转发节点。一般来说, 集合 F_u 中接收数据包成功率最高的节点会比其他节点更早收齐编码包, 因此, 将 F_u 中节点按照数据包接收成功率由大到小的顺序依次记为: v_1, v_2, \dots, v_n , n 为 F_u 中节点的个数, 则这些节点成为主转发节点及其对应的概率如表 1 所示。

表 1 转发集 F_u 中主转发节点及对应概率

主转发节点	概率
v_1	$1 - q_{u,v_1}^\varepsilon(l)$
v_2	$q_{u,v_1}^\varepsilon(l) [1 - q_{u,v_2}^\varepsilon(l)]$
\vdots	\vdots
v_n	$[1 - q_{u,v_n}^\varepsilon(l)] \prod_{i=1}^{n-1} q_{u,v_i}^\varepsilon(l)$

将 $C_u^{fw}(\varepsilon, F_u)$ 定义为转发集 F_u 中节点转发代价的期望值, 由表 1 可得:

$$C_u^{fw}(\varepsilon, F_u) = \sum_{i=1}^n C_{v_i}^* \frac{[1 - q_{u,v_i}^\varepsilon(l)] \prod_{j=1}^{i-1} q_{u,v_j}^\varepsilon(l)}{1 - \prod_{v \in F_u} q_{u,v}^\varepsilon(l)} \quad (10)$$

其中, $C_{v_i}^*$ 为转发集中各节点最后确定的转发代价, 其计算方法由 SelectSet 算法得出, 式(10)中的分式代表在 F_u 中至少有一个节点成功接收 u 发送的数据包时, 节点 v_i 成为主转发节点的概率。

对于一个节点 u , 它的发射功率 ε^* 、转发集 F_s^* 和转发代价 C_u^* 最终由 SelectSet 算法确定, 其中, N_u^e 为节点 u 按功率 ε 广播数据时的邻居节点集, F_p 为节点 u 的上游节点集。SelectSet 算法如下:

算法 SelectSet

1. $C_u^* = \infty$
2. for each $\varepsilon \in E$ do
3. $F = \emptyset$
4. for each $f \in N_u^e - F_p$ do
5. if $C_u(\varepsilon, F \cup \{f\}) < C_u^*$ then
6. $F_u = F \cup \{f\}$
7. $C_u^* = \min C_u(\varepsilon, F_u)$
8. $\varepsilon_u^* = \varepsilon, F_u^* = F_u$
9. end if
10. end for
11. end for

2.2 主转发节点选择机制

当上游节点发送编码包时, 下游转发集中在同

时刻可能存在多个节点缓存到足够的数据包。假如这多个节点同时广播代价数据包(包含该节点的转发集和转发代价),可能会导致数据包的碰撞或产生多个主转发节点,则主转发节点按以下方法确定:

1) 当数据包发生碰撞时,让节点随机延迟 T 个符号周期发送自己的代价数据包,而且在延迟时间内,若有其他节点广播了自己的代价数据包,则该节点直接放弃成为主转发节点。由于 IEEE802.15.4 标准中规定确认包发送的时延区间为 $[12, 32]$, 因此 $T \in [12, 32]$ 。

2) 当产生多个主转发节点时,由于节点发送的代价数据包中包含节点的转发代价,因此将转发代价最小的节点确定为主转发节点。

2.3 协助转发节点选择机制

协助转发节点选择机制是指当主转发节点确定之后,选择某些满足规定条件的邻居节点向下游节点广播自己缓存的编码包,从而减少主转发节点的发包次数,达到延长网络生存时间的目的。协助转发节点的具体选择方法如图 1 所示。

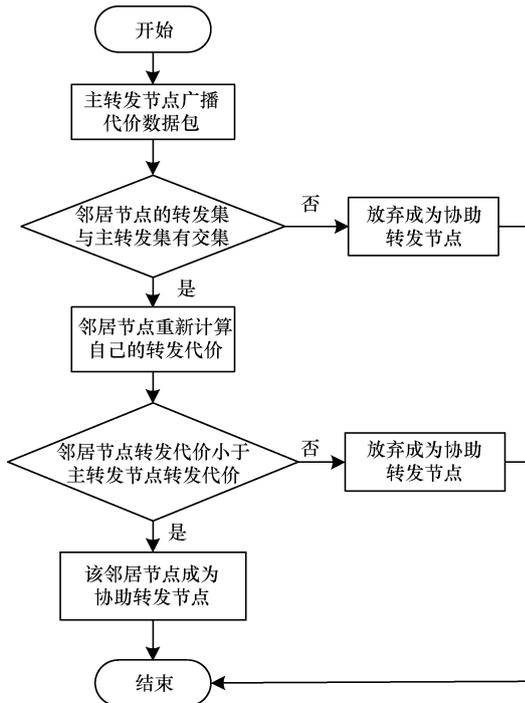


图 1 协助转发节点选择流程

在收到主转发节点的代价数据包后,如果邻居节点的转发集与主转发节点的转发集有交集,则邻居节点需要利用式(1)重新计算自己的转发代价,此时转发集合取邻居节点原转发集合(即由 SelectSet 算法确定的集合)与主转发节点集合的交集。

2.4 协助转发节点发送数据量确定机制

为了防止某个协助转发节点发送的数据过多,造成节点能量消耗过快,其转发的编码包数量需要进行限定。假设节点 f 为节点 u 的协助转发节点,定

义一个变量 Q_f , 其表达式如下:

$$Q_f = \frac{C'_f}{C_u^*} \quad (11)$$

其中, C_u^* 表示主转发节点 u 的转发代价, C'_f 表示邻居节点按式(1)重新计算后的转发代价, 由于 $C'_f < C_u^*$, 因此可以得出 $0 < Q_f < 1$ 。则协助转发节点发送的最大编码包个数 M_f 为:

$$M_f = \Gamma_f Q_f / [1 - \prod_{v \in F_u} a_{f,v}^e(l)] \quad (12)$$

其中, Γ_f 为节点 f 已接收的编码包数量, 只要节点 f 发送的编码包数量达到 M_f 或者收到下游节点的代价数据包时, 节点 f 就停止发送编码包。

3 OPEROR 算法描述

本文的 OPEROR 算法主要利用流内随机线性网络编码来传输数据, 编码包通过主转发节点和协助转发节点共同转发, 最后由目的节点完成编码包的解码工作。OPEROR 算法的数据传输过程如图 2 所示。

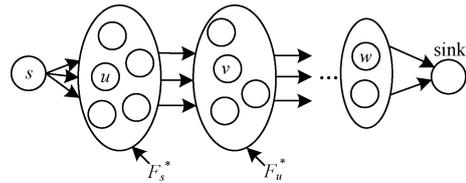


图 2 OPEROR 算法的数据传输模型

在图 2 中, 源节点 s 向 sink 节点发送数据时, 首先, 利用 SelectSet 算法计算出自己的转发代价 C_s^* 、转发集 F_s^* 和发射功率 ε_s^* 。本文在计算转发代价时考虑了节点因缓存区满而丢包的情况, 在选择转发集时可避开缓存数据过多的节点集。假定 sink 节点有足够多的能量, 因此, 不考虑 sink 节点的能量消耗, 其代价值取 0。然后, 源节点将需要发送的原始数据分成 m 个等长片段: p_1, p_2, \dots, p_m , 并且利用随机线性网络编码生成新的编码包后向其转发集 F_s^* 广播, 直到收到 F_s^* 中某个节点的代价数据包(包含该节点的转发代价和转发集)。源节点广播的第 i 个编码包为 $PC_i = \sum_{j=1}^m k_{i,j} p_j$, 其中, $k_{i,j}$ 从有限域 $GF(q)$ 中随机选取^[12]。

当源节点 s 广播编码包时, 处于其转发集 F_s^* 中的节点若发现监听到的编码包与缓存的编码包线性无关, 就将该包放入缓存; 否则, 丢弃这个编码包。当 F_s^* 中某个节点收齐 m 个编码包后, 该节点向源节点 s 广播自己的代价数据包, 源节点停止向下游节点广播编码包。

本文中主转发节点定义为转发集中最先缓存到 m 个编码包的节点。如图 2 所示, 节点 u 为转发

集 F_s^* 的主转发节点,只有当发送的代价数据包碰撞时,才会产生等待时延,否则可以直接确定主转发节点,减少网络时延。当节点 u 收齐 m 个编码包时就能按照以下方式通过高斯消元解码出原始数据包:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \cdots & k_{mm} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} PC_1 \\ PC_2 \\ \vdots \\ PC_m \end{pmatrix}$$

当源节点 s 停止广播编码包时, F_s^* 中的其他节点由于没有收齐 m 个编码包,因此不能得到原始数据,但它缓存的编码包可能帮助下游节点解出原始数据包。从中选取一些符合条件的节点(即协助转发节点),让其转发自己的编码包给下游节点。为了节省协助转发节点的能耗,其转发编码包的个数通过转发公式进行限定,公式中所用参数值皆为节点已经储存的数据信息,不用再另外获取。当上游节点广播编码包时,只有处于主转发节点转发集的下流节点才监听并缓存编码包(例如,在图2中,当 F_s^* 中节点广播编码包时,只有 F_s^* 中的节点才监听并缓存编码包)。

主转发节点 u 和它的协助转发节点在向下游节点转发收到的编码包之前,需要先利用随机线性网络编码将各自缓存的编码包进行再次编码,然后将这些新的编码包发送给 F_u^* 中的节点,直到收到节点 v (如图2,节点 v 为 F_u^* 中的主转发节点)的代价数据包。转发节点虽然对缓存的编码进行了再次编码,但新的编码包依然是原始包的线性组合,理由如下:

$$PC_i = \sum_{j=1}^m r_j PC_j = \sum_{j=1}^m (r_j \sum_{i=1}^m k_{ji} P_j) = \sum_{j=1}^m (r_j \sum_{i=1}^m k_{ji}) P_j$$

OPEROR 算法中数据包的传输按上述过程逐步推进,直到 sink 节点发送自己的代价数据包,最后由 sink 节点解出相应的原始数据包。

4 仿真实验与结果分析

本文使用 OPNET14.5 软件进行网络建模与仿真实验,为验证 OPEROR 算法的有效性,对比分析该算法与 EROR 算法、CodePower 算法的网络生存时间、节点平均能耗和吞吐量。

4.1 仿真设置

本文仿真区域为 $800 \text{ m} \times 800 \text{ m}$ 的正方形, sink 节点位于该区域的右上角,传感器节点随机分布在该区域内。式(5)中 g_1/ϵ_N 的值取 3 121 875,它使得节点 u 以最大功率广播一个 128 Byte 的数据包时,距离其 50 m 远的节点 v 成功接收此包的概率为 0.6。式(6)中数据包的到达率与服务率之比 $\rho \in [0.5, 1.3]$,其他仿真参数设置如表2所示。

表2 部分仿真参数设置

参数	数值
数据包长度 l/Byte	128
节点能量/J	1.5
路径衰减指数 η	3
物理层数据速率 $R/(\text{Kb} \cdot \text{s}^{-1})$	250
放大器效率 β	0.9
发射功率集 E/mW	{20, 25, 30, 35, 40}
处理数据平均功率 A/mW	5
接收数据平均功率 B/mW	38

4.2 仿真结果分析

4.2.1 网络生存时间

图3是在不同节点数的网络模型下,网络生存时间的仿真结果。本文中的网络生存时间用发包总数来度量,生存时间表示源节点开始发送第一个编码包到网络中出现第一个能量耗尽节点为止的这段时间。随着网络中节点数的增加,3种算法的网络生存时间都出现先上升后下降的趋势。这是由于当网络中节点数量增多时,每个节点的邻居节点也会变多,这使得节点有更大的概率选择代价更小的邻居节点来转发数据,所以开始阶段随着节点数的增多网络生存时间会呈上升趋势。但当节点密度持续增大时,导致节点的转发集过大,转发数据的节点过多,无法有效地达到负载均衡的目的,从而引起网络生存时间的下降。同时可以观察到 OPEROR 算法优于其他2种算法,这是因为本文算法中的节点不再发送 ACK 确认消息,也不需要额外地获取其他节点的转发代价,并且在确定主转发节点时,减少了因时间延迟导致的各节点能量消耗,从而有效地提高了网络的生存时间。

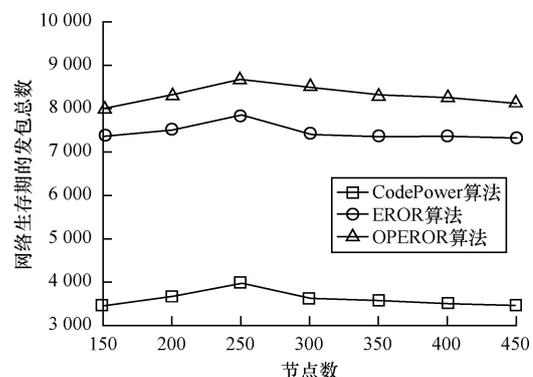


图3 不同节点数下的网络生存情况

4.2.2 节点平均能耗

图4是各算法在不同节点数网络模型下,节点平均能耗的仿真结果。本文中节点平均能耗是指网络生存时间内所有到达 sink 节点的数据包能量消耗的平均值,即网络总能耗与数据包个数的比值。图4表明,当网络规模不断扩大时,CodePower 算法由于采用端到端确认来保证可靠传输,导致一个数据包

因中途失效需要重传时,可能已经传输了多跳,所以其平均能耗与其他2种算法相比上升较快。OPEROR算法之所以优于EROR算法,是因为该算法在保证数据每跳可靠传输的同时,能够正确选择代价小的节点来协助转发部分编码包,并且在计算转发代价时考虑了节点本身的丢包率,减少了编码包的传输次数。

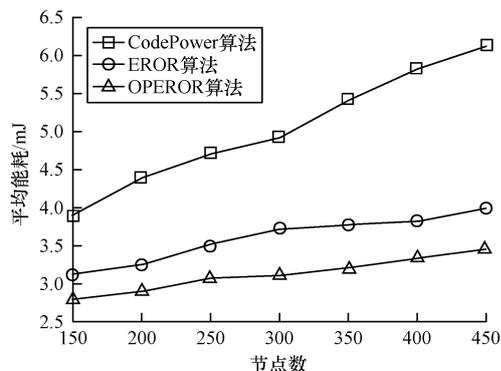


图4 不同节点数下的平均能耗

4.2.3 网络吞吐量

网络吞吐量是单位时间内传输的数据量,本文根据目的节点接收数据包个数和时间的比值来计算,不同节点数下的网络吞吐量仿真结果如图5所示。从图5中可以看出,当节点数量增多时,3种算法的吞吐量都呈现上升趋势,但后来都逐渐平稳。OPEROR算法的吞吐量高于其他2种算法,这是因为该算法相对于CodePower算法能够保证数据包的每一跳可靠传输,防止数据包因中途丢失而成为无效数据包;OPEROR算法对比于EROR算法,减少了确定主转发节点的时间,因而可以在相同的时间内传输更多的数据包,增大网络吞吐量。

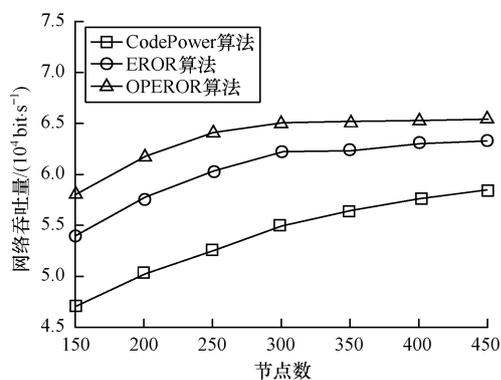


图5 不同节点数下的网络吞吐量

5 结束语

针对机会路由与无线传感器网络的相关特性,本文在EROR算法的基础上提出了一种优化算法OPEROR,通过减少选择主转发节点的时间以及网络开销,从而减少网络中节点的能耗。在选择协助转发节点时,根据邻居节点转发集的变化,相应地更

新其转发代价。另外,该算法在计算节点转发代价时,考虑了节点本身的丢包率,减少了重传次数。由于本文传输数据时需要向多个节点广播编码包,因此如何减少转发集内节点的数量是以后研究的方向。

参考文献

- [1] 张永梅,杨冲,马礼,等.一种低功耗的无线传感器网络节点设计方法[J].计算机工程,2012,38(3):71-73.
- [2] HACKMANN G, GUO Weijun, YAN Guirong, et al. Cyber-physical codesign of distributed structural health monitoring with wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(1):63-72.
- [3] 李亮亮,覃团发,闫龙.基于网络编码的无线传感网多路径节能算法[J].广西大学学报(自然科学版),2013,38(6):1402-1407.
- [4] BISWAS S, MORRIS R. Opportunistic routing in multihop wireless networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(1):69-74.
- [5] BISWAS S, MORRIS R. ExOR: Opportunistic multi-hop routing for wireless networks [J]. ACM SIGCOMM Opportunistic Computer Communication Review, 2005, 35(4):133-144.
- [6] 董赞强,沈苏彬.网络编码研究综述[J].南京邮电大学学报,2012,32(3):66-75.
- [7] ROUT R, GHOSH S. Enhancement of lifetime using duty cycle and network coding in wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2):656-667.
- [8] KATTI S, RAHUL H, KATABI D, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3):497-510.
- [9] CHACHULSKI S, JENNINGS M, KATTI S, et al. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4):169-180.
- [10] 田贤忠,刘强,胡同森.一种基于网络编码的无线网络机会路由算法[J].传感技术学报,2011,24(12):1771-1776.
- [11] TONG Jie, QIAN Depei, DU Zhigao, et al. Energy-efficient coded routing with selective transmission power for wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 72nd Vehicular Technology Conference Fall. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010:1-5.
- [12] 徐骥,朱艺华,田贤忠,等.无线传感器网络中利用随机网络编码的低能耗可靠机会路由[J].电子学报,2016,44(8):1799-1805.
- [13] VAZIFEHDAN J, PRASAD R V, NIEMEGERERS I. Energy-efficient reliable routing considering residual energy in wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 13(2):434-447.
- [14] PROAKIS J, SALEHI M. Digital communications [M]. [S. l.]: McGraw-Hill Education, 2007.
- [15] BHAT U N. An introduction to queueing theory modeling and analysis in applications [M]. Basel, Swiss: Birkhauser Press, 2008.