

无线传感器网络节点协作的节能路由传输

李彬¹, 王文杰¹, 殷勤业¹, 杨荣², 杨小勇², 王慧明¹

(1. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 国家无线电频谱管理研究所, 710061, 西安)

摘要: 针对无线传感器网络(WSN)中数据传输低能耗的需求,提出了一种节点协作的节能路由传输(ECGR)算法. 该算法由以下 2 个方面构成:在物理层,WSN 根据数据包循环冗余校验功能获得能够正确解包的节点,然后利用竞争选取算法推举出簇头节点,并通过与簇头节点进行信息交换,形成协作节点簇,从而进行协作发射信号,最终实现多节点分集增益;在网络层,协作节点簇利用基于地理位置信息路由算法,促使数据包始终向目的节点路由,避免了数据包路由向其他方向扩散. 与其他同类算法相比,ECGR 算法不仅增加了节点簇的传输距离,而且降低了网络整体能耗,并将能耗平衡分布于诸多节点,进而延长了网络寿命. 仿真实验表明,当节点密度为 0.03 时,历经 400 次仿真,ECGR 算法的节点存活率比基于地理位置的路由算法提高了 70%.

关键词: 无线传感器网络;发射分集;多节点协作;节能路由

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0001-06

An Energy-Efficient Routing with Sensor Nodes Cooperation in Wireless Sensor Network

LI Bin¹, WANG Wenjie¹, YIN Qinye¹, YANG Rong², YANG Xiaoyong², WANG Huiming¹

(1. MOE Key Laboratory for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Research Institute of Radio Spectrum Management, Xi'an 710061, China)

Abstract: An energy-efficient cooperative geographic routing (ECGR) is proposed for wireless sensor networks(WSN). The proposed algorithm is composed of two aspects: at physical layer, WSN uses cyclic redundancy check to find out the nodes that can correctly decode the packet. A competitive selection algorithm is then used to select a header node from these nodes and a new cluster is formed through information exchange with the header node. Then, the cluster transmits the packet cooperatively and finally realizes multi-node diversity gain. At the network layer, ECGR uses the geographic routing to make the packet always rout toward the destination and to avoid diverging routes. Compared with other works, the ECGR increases the transmit distance of each hop, reduces the overall network energy consumption and balances the energy consumption among the sensor nodes, and hence the life of the network is extended. Simulation results in 400 simulation rounds and comparisons with geographic routing algorithm with 0.03 node density show that the alive rate of nodes in ECGR improves about 70%.

Keywords: wireless sensor networks; transmit diversity; multi-node cooperation; energy-efficient routing

收稿日期: 2011-10-27. 作者简介: 李彬(1983—),男,博士生;王文杰(通信作者),男,副教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071216, 61102081);国家自然科学基金创新群体资助项目(60921003);教育部博士点基金资助项目(200806980020);中国博士后科学基金资助项目(20100481346).

网络出版时间: 2012-03-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120325.1528.003.html>

无线传感器网络(WSN)由于具有强大的数据采集、信号处理及无线通信的能力,从而被广泛应用于环境监测、军事侦察等领域.在WSN中,由于无线传感器网络节点依靠电池供电,故节点的能量有限,因此如何最大限度地减少WSN能耗成为路由设计中非常重要的问题.为降低网络能耗而设计的路由算法总体分2大类:第1类算法是在网络层选择合适的节能路由方式,例如基于地理位置信息的路由(GF)算法、CAGRF算法^[1]、机会路由算法^[2]等.在GF算法中,每个节点通过GPS或者分布式节点定位^[3-4]来获知自身地理位置信息,从而利用该位置信息选择下一跳中继节点进行路由传输;然而,使用单个中继节点并不能充分发挥和利用无线信道的广播特性.第2类算法是在物理层选择合理的节能发射策略,例如协作传输算法^[5]、基于中继节点协作GF算法^[6]、基于分簇的协作路由(CGR)算法^[7]等.这类算法利用了协作传输来降低网络能量的消耗.然而,以上协作传输算法往往是在数据路由之前就形成协作节点簇,而无线信道的时变特性会引起网络拓扑结构的改变,先前形成的节点簇可能在进行数据传输时已不适用,随着时间推移,一些节点会由于电能耗尽而死亡,进而改变网络拓扑结构.这时频繁地针对拓扑结构改变而进行重新分簇的行为会大大增加系统的能耗.

针对上述两类算法中的问题,本文提出了一种利用节点地理位置信息,并结合发射分集和多节点分集的节能路由传输(ECGR)算法.在发射端,ECGR算法协作发送数据包,从而获得发射分集;在接收端,正确解包的节点自主地形成协作节点簇,从而获得多节点分集增益.同时,利用节点的地理位置信息,ECGR算法使得节点总是朝向目的节点方向路由,从而有效地避免了由于路由扩散^[8]而造成的不必要的能量消耗和信号干扰.

1 ECGR 系统模型

在ECGR系统中,无线传感器多跳网络由大量无线传感器节点组成,每个节点配备有单天线,并可以通过定位算法获得自身的地理位置信息.网络中的节点大都是使用飞行器如飞机进行撒布的,因此假设节点在二维空间内服从均匀分布,无线信道为瑞利信道模型,调制方式为BPSK.当一个源节点发射数据时,那些正确解包的节点通过一定的规则形成下一跳中继节点簇,并通过多跳的方式最终将数据传递到目的节点,如图1所示.

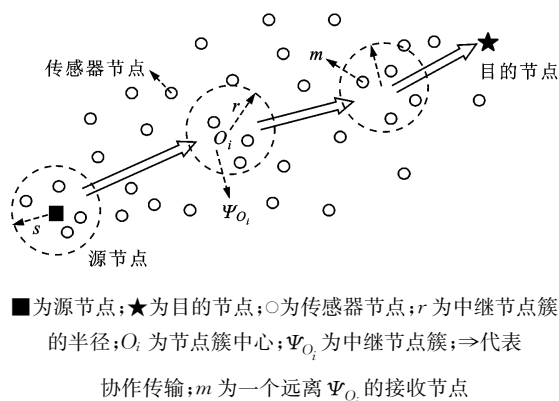


图1 ECGR算法系统模型

2 ECGR 算法

ECGR算法分为发射端协作传输和接收端形成中继节点簇2个阶段.

2.1 节点协作传输

为了方便描述,本文以图1中的中继节点簇 Ψ_{O_i} 为例进行描述. Ψ_{O_i} 由正确解包的节点组成.与CDMA算法类似,位于簇 Ψ_{O_i} 中的节点 n 利用系统分配给自己的扩频码 c_n 对数据包 $d(t)$ 进行扩频,远离 Ψ_{O_i} 的节点 m 接收到的信号为

$$x_m(t) = \sum_{n=1}^{N_i} E_n^{1/2} h_n c_n d(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: N_i 为 Ψ_{O_i} 中参与协作发射节点的个数; E_n 为节点 n 在接收端处的能量; h_n 表示无线信道,具体为归一化的复高斯变量.由于节点 m 远离 Ψ_{O_i} ,故认为协作发射节点到 m 具有相同的距离,即 h_n 是独立同分布的, $n(t)$ 为接收端高斯白噪声.文献[9]提出了一种在接收端无需扩频码而进行盲信道估计的算法.这里利用该文献的算法,使节点 m 通过这些正交扩频码获得空间分集.

根据文献[10]可知,当协作节点平均分配发射能耗时,平均误码率(BER)可以表示为

$$\bar{p}_b = \left(\frac{1-\mu}{2}\right)^{N_i} \sum_{l=0}^{N_i-1} \left[\begin{matrix} N_i-1 \\ l \end{matrix} \right] \left(\frac{1+\mu}{2}\right)^l \quad (2)$$

式中: $\mu = \left(\frac{E_r/(N_0 N_i)}{1+E_r/(N_0 N_i)}\right)^{1/2}$, E_r 为接收端的总能量, N_0 为噪声能量.当接收信噪比较大时, $\bar{p}_b$ 又可表示为

$$\bar{p}_b \approx \left[\begin{matrix} 2N_i-1 \\ N_i \end{matrix} \right] \frac{1}{(4E_r/(N_0 N_i))^{N_i}} \quad (3)$$

文献[11-13]给出了总发射能量 E_t 和接收能量

E_r 间在自由空间传播时的关系,据此 E_t 表示为^[11]

$$E_t = \frac{(4\pi)^2 d^2 M_1 N_f}{G \lambda_w^2} E_r R_b \quad (4)$$

式中: d 为传输距离; λ_w 为载波波长; R_b 为比特速率; G 为收发机的天线增益; M_1 是对链路的硬件损耗及背景噪声或干扰的补偿; N_f 为噪声系数. 结合式(3)、式(4),可得

$$\bar{p}_b \approx \left[\frac{2N_i - 1}{N_i} \right] \left(\frac{(4\pi)^2 d^k M_1 N_f R_b N_0 N_i}{4E_t G \lambda_w^2} \right)^{N_i} \quad (5)$$

设定数据包的长度为 L , 则误包率(PER)可表示为

$$\bar{p}_p = 1 - (1 - \bar{p}_b)^L \quad (6)$$

图2给出了在一定发射总能耗下发射距离与PER之间的关系. 设定扩频码长度为32, 节点簇半径 $r=10$ m, $f_c=2$ GHz, $G=5$ dB, $R_b=10$ kb/s, $N_f=10$ dB, $M_1=40$ dB, $\bar{p}_b=10^{-4}$, $L=50$ B, $N_0/2=-174$ mdB, $E_t=1.3 \times 10^{-5}$ J. 对于相同的PER, 利用协作传输的方式(协作节点个数 $N=2, 3$)比非协作传输的方式($N=1$)能实现更远的传输距离, 并且传输距离会随协作节点数的增加而增大. 这种优势是由协作发射中的分集增益带来的. 利用协作发射的方式进行路由时, ECGR 算法可增加每跳的距离, 从而减少跳数, 进而达到降低总能耗的目的.

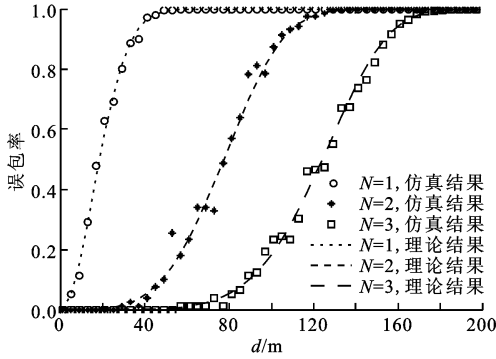


图2 PER在不同协作节点下随单跳传输距离变化的特性曲线

2.2 中继节点簇分布式形成

在瑞利信道下, 由于信道的波动性, 并不是每个下一跳节点都能对数据包正确解调, 但是通过无线信道广播的特点和 WSN 节点大量冗余的特性可知, 下一跳中能成功解码的节点是以很高的概率存在的, 这与多用户分集的概念^[12]相似, 故称之为多节点分集. ECGR 算法采用在路由过程中分布式形成节点簇的方式, 充分地适应了无线信道时变的特性和 WSN 网络的分布式特点. 协作节点簇形成的具体过程如图3所示, 可分为以下3个步骤.

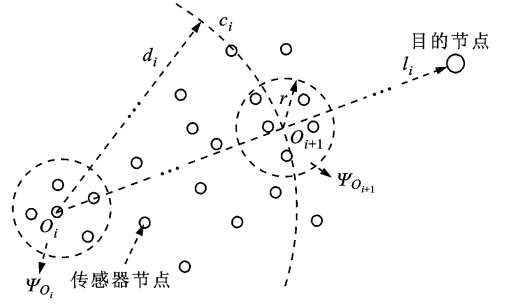


图3 节点簇的形成

步骤1 协作节点簇的初步形成. 当 Ψ_{O_i} 进行协作发射时, 协作节点将协作节点数 N_i 、下一跳节点簇簇心以及目的节点地理位置信息加入数据包, 以便为下一跳节点提供路由信息. 为使数据包总是朝向目的节点路由, 我们只选择沿路线 l_i 分布, 且靠近目的节点来形成下一跳节点簇, 其中 l_i 是连接 Ψ_{O_i} 的中心 O_i 与目的节点的连线. 假设下一跳节点簇为 $\Psi_{O_{i+1}}$ 且其簇心为 O_{i+1} , 则簇中包含的节点 n_j^{i+1} 可由下式确定

$$n_j^{i+1} \in \Psi_{O_{i+1}} \quad (7)$$

式中: Φ_{i+1} 为成功解调数据包的节点(通过数据包循环冗余校验码校验判断)集合; $L_{n_j^{i+1}}$ 为节点 n_j^{i+1} 的位置信息; r 为节点簇半径. 假设 c_i 为以 O_i 为圆心、 d_i (Ψ_{O_i} 的平均传输距离)为半径的圆, 则簇心 O_{i+1} 由 l_i 与 c_i 的交点确定. 根据式(5)和式(6), d_i 可以表示为

$$d_i = g(N_i, \bar{p}_p) = \left[\left(\frac{1 - (1 - \bar{p}_p)^{1/L}}{\left[\frac{2N_i - 1}{N} \right]} \right)^{1/N_i} \frac{4E_t G \lambda_w^2}{(4\pi)^2 R_b M_1 N_f N_0 N_i} \right]^{1/2} \quad (8)$$

由于数据包含有 N_i 、 O_i 以及目的节点位置信息, 因此 Φ_{i+1} 中的节点可以根据式(8)独立计算出 d_i 并根据上文描述计算出 O_{i+1} . 最终, 节点可根据自身的地理位置信息来判断是否满足式(7).

步骤2 簇头节点的选取. 当 $\Psi_{O_{i+1}}$ 形成后, $\Psi_{O_{i+1}}$ 中的每个节点设定定时器, 定时时间由下式确定

$$T_k = \|L_{n_k^{i+1}} - O_{i+1}\| \quad (9)$$

式中: N_{i+1} 为 $\Psi_{O_{i+1}}$ 中的协作节点个数. 当某个节点最先耗尽时间时, 它便发射推举帧并成为簇头节点, 与此同时, 其他节点收到推举帧后便中断自身的定

时器,从而变为从节点.

步骤3 计算协作节点数. 当簇头节点确定后,从节点发送 ACK 指示帧(帧中包括节点 ID). $\Psi_{O_{i+1}}$ 中的簇头节点通过接收 ACK 帧来计算协作节点(即从节点)的数目 N_{i+1} ,并将 N_{i+1} 和正确解包的节点 ID 在簇内进行广播. 通过簇头节点,每个协作节点都获取了其他协作节点的信息. 由于推举帧和 ACK 帧为控制帧,相比数据包,它们都只含有几个比特的信息,故忽略其所需能耗. 与此同时,协作节点将 N_{i+1} 和 O_{i+1} 写入数据包中. 最后,协作节点通过簇头节点的上述协调,进行协作发射.

根据步骤2与步骤3,每个协作节点的数据包中含有协作节点数、中继节点簇心以及目的节点位置信息. 当下一跳节点对其正确解包后,节点可以利用数据包中的信息来执行步骤1,通过上述3个步骤的循环执行,可最终将数据包发送到目的节点.

3 性能分析与仿真

3.1 节点簇平均传输距离

假设节点在二维空间中服从密度为 λ 的均匀分布,则 n 个节点落入节点簇的概率为

$$P_r\{n\} = (\lambda\pi r^2)^n e^{-\lambda\pi r^2} / n! \quad (10)$$

由于无线信道的波动性,并非所有在节点簇区域的节点都能正确解包,假设 k 个节点能正确解包的概率为

$$\begin{aligned} P_r\{k\} &= \sum_{n=k}^{\infty} \binom{n}{k} P_r\{n\} \bar{p}_p^{n-k} (1 - \bar{p}_p)^k = \\ & ((\lambda\pi r^2)^k (1 - \bar{p}_p)^k e^{-\lambda\pi r^2} / k!) \cdot \\ & \sum_{n=k}^{\infty} (\lambda\pi r^2)^{n-k} \bar{p}_p^{n-k} / (n-k)! = \\ & (\lambda\pi r^2)^k (1 - \bar{p}_p)^k e^{\lambda\pi r^2 (\bar{p}_p - 1)} / k! \end{aligned} \quad (11)$$

根据式(8)和式(11),节点簇期望传输距离 $E(d)$ 可表示为

$$\begin{aligned} E(d) &= \sum_{k=0}^{\infty} P_r(k) g(k, \bar{p}_p) = \\ & \sum_{k=0}^{\infty} g(k, \bar{p}_p) (\lambda\pi r^2)^k (1 - \bar{p}_p)^k e^{\lambda\pi r^2 (\bar{p}_p - 1)} / k! \end{aligned} \quad (12)$$

由第2节的表述可知,节点簇的平均传输距离受到节点密度 λ 和 $\bar{p}_p$ 的影响. 根据式(8)所示,在给定 λ 的情况下,尽管减小 $\bar{p}_p$ 能增加正确解包的节点数,但未必能增加节点簇的传输距离. 为了方便说明这个问题,首先令 $\bar{p}_p = 0$,根据式(8),此时 $d = 0$. 同理,当 $\bar{p}_p = 1$ 时,由于节点簇内没有节点正确解包,依然得到 $d = 0$. 因此,在一定的节点密度下,可以选择合

适的 $\bar{p}_p$ 将 $E(d)$ 优化为

$$\bar{p}_p^* = \operatorname{argmax}_{\bar{p}_p} \{E(d)\} \quad (13)$$

式中: $\bar{p}_p^*$ 为最佳误包率.

设定扩频码长度为 32,节点簇半径 $r = 10$ m, $f_c = 2$ GHz, $G = 5$ dB, $R_b = 10$ kb/s, $N_f = 10$ dB, $M_1 = 40$ dB, $\bar{p}_b = 10^{-4}$, $L = 50$ B, $N_0/2 = -174$ mdB, $E_t = 1.3 \times 10^{-5}$ J. 图4给出了在不同节点密度的情况下,归一化的 $E(d)$ 与 $\bar{p}_p$ 的关系. 从图4中可以看出, $E(d)$ 是关于 $\bar{p}_p$ 的凸函数. 在一定的节点密度下,存在一个最佳的 $\bar{p}_p$ 值使得 $E(d)$ 最大化为 $E_{\max}(d)$. 当节点密度较大时, $E_{\max}(d)$ 周围的曲线趋于平坦,这是由于在节点高密度的情况下,中继节点簇范围内能正确解包的节点数以很高的概率存在. 这种效果抵消了由于 $\bar{p}_p$ 增加所造成的正确解包的节点数减小的影响.

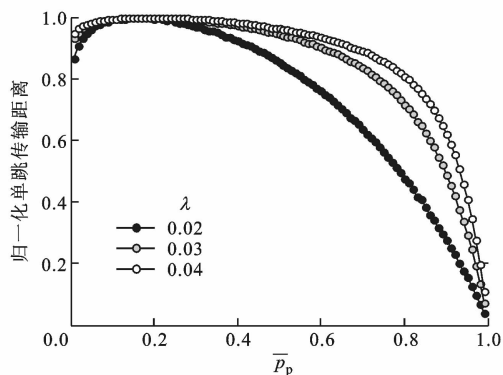


图4 归一化单跳传输距离在不同节点密度下随误包率变化的特性曲线

3.2 端对端的收包率和平均多跳数

在 ECGR 算法中,选择满足式(8)的节点形成节点簇进而进行协作传输. 因此,若下一跳中没有满足式(8)的节点时,即下一跳节点簇中有效协作节点数为空时,路由将中断,这也直接影响端对端的收包率(PRR). 通过3.1节中的假设,可知下一跳节点簇中有效协作节点数为空的概率 $P_r(\emptyset)$ 为

$$P_r(\emptyset) = \sum_{k=0}^{\infty} (\lambda\pi r^2)^k e^{-\lambda\pi r^2} \bar{p}_p^k / k! = e^{(\bar{p}_p - 1)\lambda\pi r^2} \quad (14)$$

由于 ECGR 算法利用节点位置信息使数据包总是朝向目的节点路由,因此平均多跳数可表示为

$$M \approx D/E(d) =$$

$$D / \sum_{k=0}^{\infty} g(k, \bar{p}_p) (\lambda\pi r^2)^k (1 - \bar{p}_p)^k e^{\lambda\pi r^2 (\bar{p}_p - 1)} / k! \quad (15)$$

式中: D 为源节点与目的节点之间的距离. 因此, PRR 可表示为

$$P_{\text{PRR}} \approx (1 - P_r(\bigcirc))^{D/E(d)} = (1 - e^{(\hat{p}_p - 1)\lambda\pi r^2})^M \tag{16}$$

式(15)表明,PRR 直接受到 $P_r(\bigcirc)$ 和 M 影响. 为了分析其性能,本文采用 ns-2 仿真软件来进行实验,仿真中假设无线传感器节点平均分布于 $1\,800\text{ m} \times 1\,800\text{ m}$ 的区域内,源节点和目的节点分别位于 $(1\text{ m}, 1\text{ m})$ 和 $(1\,800\text{ m}, 1\,800\text{ m})$,其他仿真条件如 3.1 节所示. 图 5 给出节点密度和 PRR 之间的关系. 仿真结果表明,PRR 随着网络中节点密度的增大而增加,在一定的节点密度下,ECGR 算法的性能要优于 CAGR 算法及文献[6]中提出的算法. 图 6 显示了不同路由算法下多跳数的对比. 由于采用了多节点协作发送,ECGR 算法增加了每跳的传输距离,故其多跳数要小于 CAGR 算法及文献[6]中提出的算法. 由式(15)可知,较小的多跳数意味着较大的 PRR 值. 尽管 CGR 算法在低网络密度下性能要优于 ECGR 算法,但 CGR 算法需频繁对收发间无线信道进行估计和反馈,因此大大增加了系统的复杂性. 当节点密度增大时,ECGR 算法依然能以较低的系统复杂度获得与 CGR 算法相同的性能.

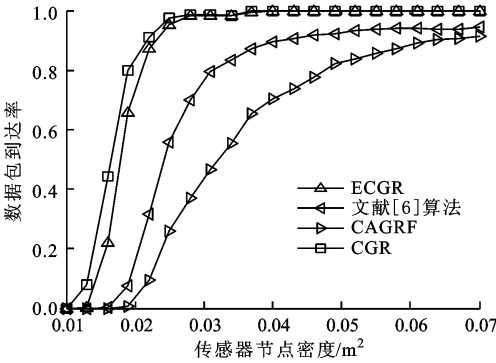


图 5 PRR 在不同算法中的性能对比曲线

3.3 网络寿命

由上述分析可知,在给定发射总功率下,节点簇协作发送不仅增加了传输距离,而且将总发射能耗分散于各协作节点中,ECGR 算法正是利用这种在节点之间平衡发射能耗的特性来延长网络的总寿命. 为了显示其性能,依然假设节点平均分布于 $1\,800\text{ m} \times 1\,800\text{ m}$ 的区域内,目的节点位于点 $(1\,800\text{ m}, 1\,800\text{ m})$ 处. 每个节点所储蓄的能量为 $65 \times 10^{-5}\text{ J}$,源节点随机地分布在网络中,扩频码长度为 32,节点簇半径 $r = 10\text{ m}$, $f_c = 2\text{ GHz}$, $G = 5\text{ dB}$, $R_b = 10\text{ kb/s}$, $N_f = 10\text{ dB}$, $M_1 = 40\text{ dB}$, $\bar{p}_b = 10^{-4}$, $L = 50\text{ B}$, $N_o/2 = -174\text{ mdB}$, $E_t = 1.3 \times 10^{-5}\text{ J}$. 同时,假设每次仿真中只有一个源节点发送数据包. 图 7 给出了在不同的网络密度下仿真次数与节点存活率之间的关系. 当仿真次数较小时,网络中的节点都没有死亡(能量耗尽),但是随着仿真次数的增加,其他算法开始出现节点死亡的现象,而 ECGR 算法中由于发射能耗被众多协作节点分担,故网络中依然有大量节点存活. 当仿真次数大于一定数值后,ECGR 算法中存活的节点骤然减少. 这说明网络中总的发射能耗平衡于各节点之间,从而延长了网络整体寿命.

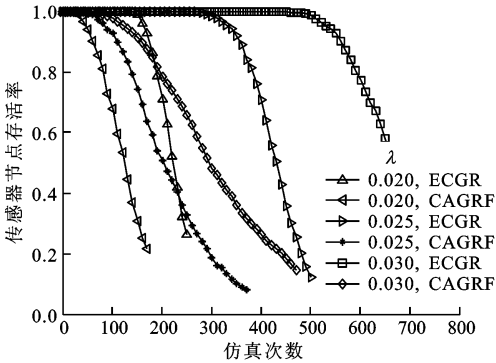


图 7 网络寿命性能指示曲线

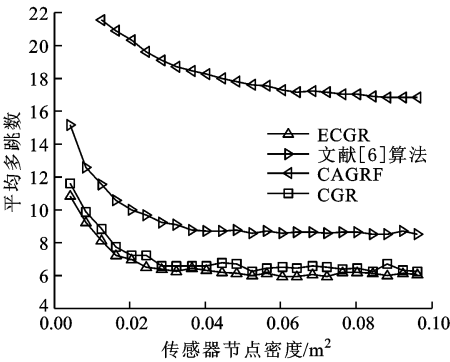


图 6 平均多跳数在不同算法中的性能对比曲线

4 结 论

本文提出了一种节能路由传输 ECGR 算法. 在物理层,ECGR 算法充分利用 WSN 中的大量冗余节点自主形成节点簇,并协作发射信号. 在网络层,ECGR 算法利用基于地理位置信息路由算法的优势,促使数据包始终朝向目的节点路由,同时通过设置最佳误包率来提高单跳距离. 仿真实验表明,本文算法在提高 PRR 的同时有效地降低了网络的整体能耗,并将能耗平衡分布于诸多节点,以此延长了网络的寿命.

参考文献:

- [1] ZHANG Lili. Energy-efficient cross-layer protocol of channel-aware geographic-informed forwarding in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(6):356-363.
- [2] 田克,张宝贤. 无线多跳网络中的机会路由[J]. 软件学报, 2010, 21(10):133-138.
TIAN Ke, ZHANG Baoxian. Opportunistic routing protocols for wireless multihop networks [J]. Journal on Software, 2010, 21(10):133-138.
- [3] 王文杰,张渭乐,殷勤业. 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法 [J]. 西安交通大学学报, 2010,42(2): 61-66.
WANG Wenjie, ZHANG Weile, YIN Qinye. A distributive localization method for WSN using angle of departure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 42(2):61-66.
- [4] BULUSU N, HEIDEMANN J, ESTRIN D. GPS-less Low-cost outdoor localization for very small devices [J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28-34.
- [5] ZHANG Wei, LETAIEF K. Full-rate distributed space-time codes for cooperative communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2008, 7(7): 2446-2451.
- [6] CORONEL P, DOSS R SCHOTT W. Geographic routing with cooperative relaying and leapfrogging in wireless sensor networks [C] // Proceedings of IEEE Globalcom. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 2101-2107.
- [7] GE Weiyang, ZHANG Junshan, XUE Guoliang. Cooperative geographic routing in wireless sensor networks [C]//Proceedings of IEEE Military Communication. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:1983-1989.
- [8] ROZNER E, SESHADRI J, MEHTA Y, et al. Simple opportunistic adaptive routing protocol for wireless mesh networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(1):1622-1635.
- [9] JACOB H, LEE S. Recursive blind symbol estimation of convolutionally coded cochannel signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(4):956-965.
- [10] GOLDSMITH A. 无线通信[M]. 杨鸿文,译.北京:人民邮电出版社,2007.
- [11] CUI Shuguang, GOLDSMITH A, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. IEEE Journal on Se-

lected Areas Communications, 2003, 22(6): 1089-1098.

- [12] DAVID T. 无线通信基础[M]. 李镭,译.北京:人民邮电出版社,2007.
- [13] 范建存,殷勤业,王文杰,等. 无线传感器网络中协作波束形成的能量有效性分析[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 145-151.
FAN Jiancun, YIN Qinye, WANG Wenjie, et al. Analysis of energy efficiency for cooperative beam-forming in wireless sensor networks [J]. Journal of Communication, 2008, 29(11): 145-151.

[本刊相关文献链接]

- 刘遼,刘三阳,冯海林. 双信道无线传感器网络移动代理路由算法. 2012,46 (2):113-118.
- 李彬,王文杰,殷勤业,等. 一种利用天线旋转的无线传感器网络定位算法. 2011,45 (4):60-66.
- 金枫,郑辑光,曹建福,等. 一种高吞吐量的无线传感器网络多信道 MAC 协议. 2010,44 (12):32-37.
- 何欣,桂小林,安健. 面向目标覆盖的无线传感器网络确定性部署方法. 2010,44 (6):6-9.
- 代亮,沈中,常义林,等. 无线传感器网络多轮任务调度算法. 2010,44 (6):27-32.
- 张荣博,曹建福. 利用蚁群优化的非均匀分簇无线传感器网络路由算法. 2010,44 (6):33-38.
- 安源,孙利民,马彩文,等. 一种能量高效的无线传感器网络等值线监测技术. 2010,44 (2):56-60.
- 王文杰,张渭乐,殷勤业. 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法. 2010,44 (2):61-66.
- 陈衡,钱德沛,伍卫国. 无线传感器网络地理位置路由度量方法. 2009,43 (12):55-59.
- 方维维,钱德沛,褚天舒,等. 分簇无线传感器网络可靠高效的数据传输方案. 2009,43 (8):28-32.
- 张渭乐,殷勤业,王文杰,等. 无线传感器网络分布式射频干涉定位方法. 2009,43 (8):48-52.
- 杨军,张德运. 非均匀分簇的无线传感器网络数据传送机制. 2009,43 (4):14-17.
- 方维维,钱德沛,刘轶. 一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案. 2009,43 (2):33-37.
- 王庆华,屈玉贵,柏荣刚,等. 多输入多输出的异构无线传感器网络时分多址调度算法. 2008,42 (11):1402-1407.
- 何欣,桂小林. 基于自愈技术的无线传感器网络基站生存模型. 2008,42 (8):950-953.
- 王毅,张德运,梁涛涛. 无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法. 2008,42 (4):389-394.
- 黄建辉,钱德沛,王胜灵,等. 用于无线传感器网络的比例公平队列调度算法. 2008,42 (2):129-132.

(编辑 刘杨)