

传感器网络簇间通信自适应节能路由优化算法

李文峰, 沈连丰, 胡静

(东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 提出了一种用于无线传感器网络簇间通信的自适应节能路由优化算法。网络中以总体通信能耗最小为首要原则建立端到端之间的路由, 并对簇间通信提出了一种优化算法, 使得簇首之间相互通信时, 可以在直接、中继以及协作 3 种不同方式中自适应地选择最节能的通信方式。所提出的路由算法可确保源节点与基站通信过程中选择到最优或次优的节能路由, 并可降低由于通信覆盖盲区造成的通信中断的概率。仿真结果表明, 与其他传感器网络路由算法相比, 所提出的路由算法在相同吞吐量和误码率前提下每一轮都消耗更少的能量, 并且在不同的节点密度下都可有效地延长网络的生命周期和工作时间。

关键词: 传感器网络; 节能; 簇间通信; 路由

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)03-0010-10

Adaptive energy-saving routing algorithm for inter-clustering communications in WSN

LI Wen-feng, SHEN Lian-feng, HU Jing

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An adaptive routing algorithm was proposed for saving inter-clustering communication energy in wireless sensor networks (WSN). In the network, the end-to-end route discovery mechanism was based on the primary principle of the minimum communication costs. An algorithm was proposed for inter-clustering communication optimization by adaptively selecting the most energy-efficient communication mode among direct, relaying and cooperative communications. The proposed routing algorithm guarantees that the source node can discover the minimum or sub-minimum energy consumption route to the base station. It also decreases the probability that the communications are interrupted due to the coverage holes. Compared with the other routing algorithms, the simulation results show that the proposed routing algorithm makes WSN consume less energy in each round under the same throughput and bit error ratio (BER). It can also prolong the network lifetimes and operation times under the different node densities.

Key words: sensor network; energy saving; inter-clustering communication; routing

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor net-

works) 是由传感器节点通过无线通信技术自组织构成的网络^[1]。由大量高度集成的小型传感器节点构成的大规模无线传感器网络, 在远程大气监测以及地

收稿日期: 2011-07-15; 修回日期: 2012-01-04

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03006-002-01); 国家自然科学基金资助项目 (60872004); 东南大学移动通信国家重点实验室自主研究基金资助项目 (2011A08)

Foundation Items: The Important National Science & Technology Specific Projects (2010ZX03006-002-01); The National Natural Science Foundation of China (60872004); The Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2011A08)

震、医疗、资源保护等领域的数据采集方面得到更加广泛的应用。但是,网络节点的小型化意味着其能量极为有限,在网络运行过程中,为大量传感器节点更换电池显然不切实际。因此,如何让由有限能量的微型传感器节点所构成的无线传感器网络实现较长的生命周期,成为大规模无线传感器网络发展所面临的重大挑战。人们普遍认识到,进一步拓宽大规模无线传感器网络应用潜力的关键技术,就是尽量地减小其工作时的功耗,延长其生命周期。

延长无线传感器网络生命周期的研究大体可以分为 2 个方向,其一是减小节点自身和物理层链路的功耗^[2~4]。例如,Chouhan 等人^[2]分析了加性高斯白噪声信道下,纠错码和调制参数在无线传感器网络通信过程中对于节点能量变化的影响。在此分析基础上提出了选择纠错码与调制方式的最佳匹配方案,以达到节约通信功耗的目的。Kalis 等人^[3]则将网络中的众多节点作为整体看作是一个朝向数据融合中心并具有高度定向增益的天线阵列,通过波束成形的方式使得节点与数据融合中心之间可直接通信。而网络中的节点仅当需要向数据融合中心发送数据时才被激活,无需考虑 MAC 层的通信冲突和路由算法,从而保证节点可运行较长的周期。Abouei 等人^[4]针对能量受限的无线传感器网络提出了一种节能的最优化非相干 MFSK 调制方式 (NC-MFSK, non-coherent M -ary frequency shift keying)。该调制方式尤其适用于室内短距离低密度传感器网络,其工作复杂度及节能效率要好于其他调制方式。

另一方向则是研究协作策略^[5~7],即各传感器节点如何协作,以最节能的方式实现网络功能。例如,Zhuo 等人^[5]假设分簇传感器网络中所有簇间通信距离均远远大于簇内通信半径,在此前提下将多输入多输出 (MIMO, multiple-input-multiple-output) 协作通信作为簇间通信方式来提高通信时的能量效率。作者基于误包率 (PER, packet-error-rate) 建立了源节点与目标节点之间通信的能耗模型,并以此来优化降低整个网络的通信能耗。但实际网络中,簇间通信距离并不一定远远大于簇内通信距离,因而限制了文献[5]中的协作通信方式在实际传感器网络中的应用。Gao 等人^[6]则将多输入多输出协作通信与数据融合技术相结合,通过减少数据传输的总量以及借助协作通信更好地整合网络资源来提高能量效率、延长传感器网络的生命周期。Ke

等人^[7]为了延长网络的生命周期提出了一种基于能量定价的中继选择和功率分配算法。该算法将网络中的节点看作能量销售员,通过图解法得到源节点与中继节点之间的最佳功率分配解决方案,并依据成本最小化原则选择最佳中继节点。

本文提出一种适用于分簇无线传感器网络的自适应节能路由优化选择算法。与其他同类算法相比,该算法能够优化簇间通信路由,使得簇首之间通信时能自适应地选择最节能的通信方式,以确保源节点与目标节点之间能够建立最优或次优的节能路由;同时,该算法还可利用协作通信的方式修复或重建由于通信覆盖盲区所造成的路由中断,延长网络的生命周期及有效工作时间。

2 系统模型

假设无线传感器网络由基站和传感器节点组成。网络中各个节点随机分布在某一区域内,节点经过分簇后组成不同的簇,如图 1 所示。从图 1 中可以看到,簇成员将自身采集到的数据发送给各自的簇首,再由簇首将这些数据汇合处理后统一发送至基站。簇内通信均采用直接通信的方式,而簇间通信则可选择直接通信、中继节点接力通信以及多节点协作通信等不同通信方式。不同簇间通信方式的具体定义和能耗模型分析可参见第 3 节。在通信过程中,簇首将数据分组发送至基站时,若无法与基站直接通信,则需首先建立与基站之间的路由,通过其他节点将数据转发至基站。为了确保源簇首与基站之间能够建立最优或次优的节能路由,簇首在建立簇间通信路由时选择适宜的簇首作为下一跳路由对象,以保证其与基站之间的总体通信能耗最小。

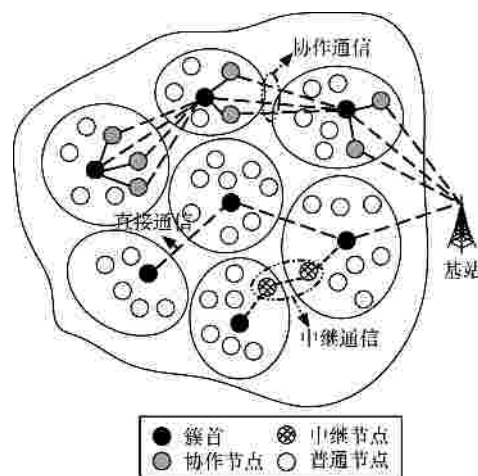


图 1 系统模型

在网络中，假设每个节点均装备有全向天线，且各个节点均已知自身的位置信息。除基站外，所有节点的能量均由电池提供。节点通信过程中通信能耗主要来源于功率放大器的发射能量以及收发机的电路损耗。若通信信道是基于高斯白噪声下的瑞利衰落信道，则发射端成功发送单位比特数据所需的发射能量可表示为

$$E_t = \bar{E}_b \frac{(4pd)^a}{G_t G_r l^2} = \bar{E}_b e d^a \quad (1)$$

其中， $e = \frac{(4p)^a}{G_t G_r l^2}$ ； \bar{E}_b 表示在给定误码率条件下接收端正确接收单位比特数据所需的最低能量； d 表示通信距离； G_t 和 G_r 分别表示发送端和接收端的天线增益； l 表示载波波长； a 表示路径损耗指数，通常 $2 \leq a \leq 4$ 。

另外，功率损耗还包括发送电路损耗和接收电路损耗，分别用 E_{ct} 和 E_{cr} 表示。

3 簇间通信能耗模型分析

如图 2 所示，簇间通信分为直接通信、中继节点接力通信以及节点协作通信 3 种方式。图 2 中采用与图 1 中一致的标识符号来代表不同类型的节点。下面分别对这 3 种通信方式的能耗模型进行分析比较。

3.1 簇间直接通信

簇间直接通信是指源簇首与目标簇首之间直接进行通信，如图 2(a)所示。簇首 A 向簇首 B 传输 k bit 数据帧所需消耗的发射能量为

$$E_t = k\bar{E}_b e d_{AB}^a \quad (2)$$

其中， d_{AB} 指簇首 A 与簇首 B 之间的通信距离。传输过程中，簇首 A 和簇首 B 电路部分的损耗为

$$E_c = k(E_{ct} + E_{cr}) \quad (3)$$

因而簇首 A 与簇首 B 之间通过直接通信方式传输 k bit 数据帧所需耗费的总能量为

$$E = E_t + E_c = k\bar{E}_b e d_{AB}^a + k(E_{ct} + E_{cr}) \quad (4)$$

3.2 簇间中继通信

簇间中继通信是指源簇首与目标簇首通信时依靠其他节点对通信数据进行转发从而完成簇首间的通信，其中在簇首之间转发数据的节点称作为中继节点，如图 2(b)和图 2(c)所示。

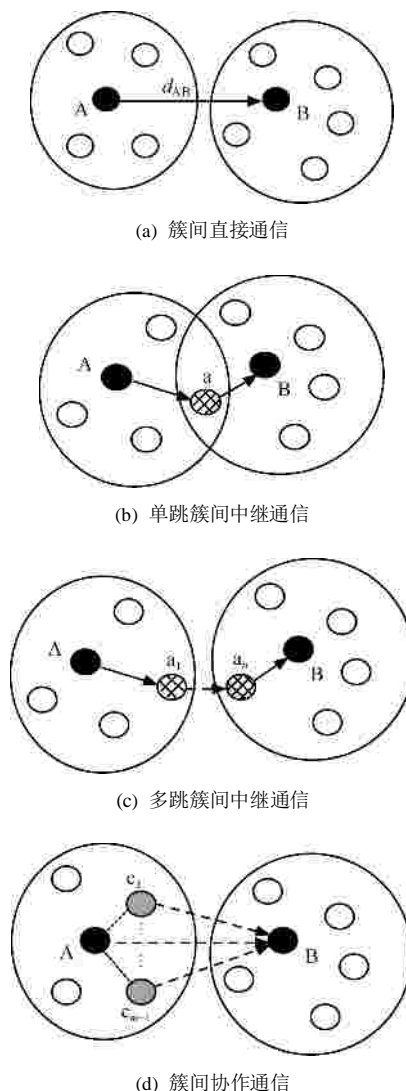


图 2 簇间通信方式

图 2(b)为单跳簇间中继通信，簇首 A 和簇首 B 利用单个中继节点 a 进行中继通信。从图中可以看出，单跳簇间中继通信过程可等效为 A 与 a 以及 a 与 B 之间的直接通信。因此，簇首 A 与簇首 B 之间通过单个节点 a 中继传输 k bit 数据帧所需耗费的总能量可表示为

$$E = E_{Aa} + E_{aB} = k\bar{E}_b e (d_{Aa}^a + d_{aB}^a) + 2k(E_{ct} + E_{cr}) \quad (5)$$

其中， E_{Aa} 和 E_{aB} 分别表示 A 与 a 以及 a 与 B 之间直接通信所需耗费的能量； d_{Aa} 和 d_{aB} 分别为 A 与 a 以及 a 与 B 之间的通信距离。

比较式(4)与式(5)可知，当 $d_{Aa}^a + d_{aB}^a < d_{AB}^a$ 时，中继通信所消耗的总能量小于直接通信所需的总能量。由于发送过程中，电路损耗所需的能量远小于功率放大器所耗费的能量，在比较过程中忽略了

电路损耗部分。

簇首 A 与簇首 B 之间的簇间中继通信还可扩展为多跳簇间中继通信, 即利用 2 个簇首之间的多个中继节点 (假设为 n 个) 对数据进行多跳转发从而完成簇首之间的通信, 如图 2(c) 所示。类似单跳中继通信, 当 $\sum_{i=1}^{n+1} d_i^a < d_{AB}^a$ 时, 多跳中继通信所消耗的总能量小于直接通信所需的总能量, 其中 d_i 指中继转发时每一跳的通信距离。

3.3 簇间协作通信

簇间协作通信是指利用多输入多输出通信技术, 由源簇首及其所选择的协作节点组成虚拟天线阵列与目标簇首进行通信。如图 2(d) 所示, 簇首 A 与协作节点 $c_1 \sim c_{m-1}$ 组成虚拟天线阵列向簇首 B 发送数据。比较图 2(a) 和图 2(d) 可以看出, 簇间直接通信和协作通信可分别看作为 SISO (single-input-single-output) 和 MISO (multiple-input-single-output) 系统。在同样的发射功率负载和误码率标准下, MISO 系统能够支持更高的传输速率, 也就是说, 在同样吞吐量和误码率前提下, 簇间协作通信所需的传输能量要比簇间直接通信所需的传输能量要小。

簇间协作通信时, 假设源簇首选择了 $m-1$ 个协作节点 ($m \geq 1$) 并共同组成虚拟天线阵列向目标簇首发送数据, 则源端到目标端之间共有 m 条独立信道, 此处将源簇首看作第 m 个协作节点。根据链路负载关系, 由式(1)知, 源端向目标簇首成功发送单位比特数据所需的发射能量为

$$E_t(m) = \frac{1}{m} \bar{E}_b e \sum_{i=1}^m d_{c_i, B}^a \quad (6)$$

其中, $d_{c_i, B}$ 为协作节点 c_i 与目标簇首 B 之间的通信距离。

协作通信时的信道衰减矩阵是一个 $1 \times m$ 维包含独立高斯随机变量的矩阵, 可表示为 $\mathbf{H}=[h_1 h_2 \dots h_m]$, h_i ($i=1, 2, \dots, m$) 是对应于第 i 个分支的信道传输函数, 并且信道矩阵 \mathbf{H} 中每个元素的方差均为 1。当 $m=1$ 时, $\mathbf{H}=[h_1]$, 可将其看作为协作通信的一个特例, 等效为直接通信。假设协作通信时, m 个协作节点发射天线功率相等, 于是接收端信噪比为

$$t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |h_i|^2 \frac{\bar{E}_b}{N_0} \quad (7)$$

其中, N_0 表示加性高斯白噪声的单边功率谱密度。

若接收端采用最大似然检测技术, 根据 Chernoff 边界定理, 接收端相应的误符号率为^[8, 9]

$$P_e \approx \bar{N}_c Q \left(\sqrt{\frac{t d_{\min}^2}{2}} \right) \leq \bar{N}_c e^{-\left(\sum_{i=1}^m |h_i|^2 \right) \frac{t^2 d_{\min}^2 \bar{E}_b}{4m N_0}} \quad (8)$$

其中, \bar{N}_c 表示星座图中相邻点的个数; d_{\min} 表示星座图中相邻点的最短距离。对式(8)求期望, 可得到接收端平均误符号率的上界为

$$\bar{P}_e = E[P_e] \leq \bar{N}_c \prod_{i=1}^m \frac{1}{1 + \frac{d_{\min}^2 \bar{E}_b}{4m N_0}} \quad (9)$$

若采用 BPSK 调制, 则其误符号率和误码率相同。当信噪比较高时, E_b/N_0 远远大于 1。因而由式(9)可得到 \bar{E}_b 的取值范围为

$$\bar{E}_b \leq \frac{mN_0}{\bar{P}_e} \quad (10)$$

将式(10)取最大值, 可得到源端发送单位比特数据所需的平均发射能量为

$$E_t(m) = \frac{N_0}{\bar{P}_e^{1/m}} e \sum_{i=1}^m d_{c_i, B}^a \approx \frac{mN_0}{\bar{P}_e^{1/m}} e d_{AB}^a \quad (11)$$

式(11)中假设源簇首与目标簇首之间相隔较远, 因而各个协作节点与目标簇首之间的通信距离看作近似相等, 即 $d_{c_i, B} \approx d_{AB}$ 。令

$$g(x) = \frac{xN_0}{\bar{P}_e^{1/x}}$$

显然, $g(x)$ 在区间 $(0, +\infty)$ 上连续并且可导。推导可知当满足 $x < -\ln \bar{P}_e$ 时, $g(x)$ 在区间 $(0, -\ln \bar{P}_e]$ 上单调减少。通常 $0 < \bar{P}_e < 1$, 故可满足 $-\ln \bar{P}_e > 1$ 。若令 $n = \lfloor -\ln \bar{P}_e \rfloor$, 则当 m 为大于 1 小于等于 n 的整数时, 必然有 $g(m) < g(1)$, 因而 $E_t(m) < E_t(1)$, 即发射能量随着天线数 m 的增加而降低, 也就是说, 簇间协作通信源端所需的发射能量小于直接通信源端所需的发射能量。然而, 由于协作通信过程中参与的节点更多, 因此发送和接收电路必然消耗更多的能量。当簇间通信时, 若簇间通信距离较短, 收发两端发送和接收电路部分的能量损耗也是一个不可忽略的因素。协作通信时, 收发两端电路部分在传输单位比特数据时消耗的能量 E_c 可近似表示为

$$E_c(m) = mE_{ct} + E_{cr} \quad (12)$$

因而使用协作通信方式传输单位比特数据所需的总能量为

$$E(m) = E_t(m) + E_c(m) = \frac{mN_0}{\bar{P}_c^{1/m}} e d^{a_{AB}} + (mE_{ct} + E_{cr}) \quad (13)$$

图 3 和图 4 比较了协作通信与直接通信的能耗与通信距离的关系。比较时所引进的通信系统参数如表 1 所示^[10]，其中， T_t 表示数据发送周期。

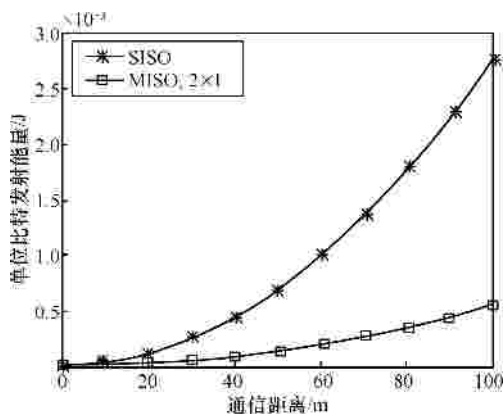


图 3 传输单位比特消耗的能量

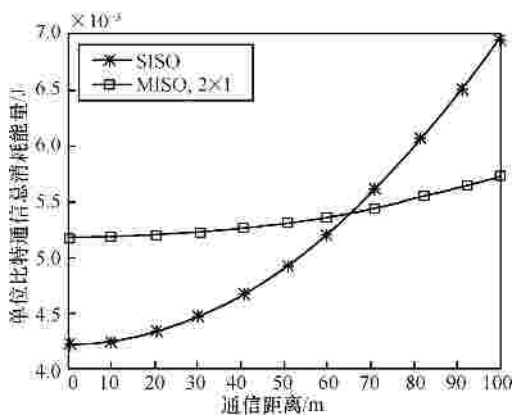


图 4 单位比特通信过程中需要的总能量

表 1 系统参数

$f_c=2.5\text{GHz}$	$\bar{P}_c=10^{-3}$
$B=10\text{kHz}$	$E_{ct}=4.91\text{mJ}$
$G_r G_t=5\text{dBi}$	$E_{cr}=5.63\text{mJ}$
$N_0/2=-174\text{dBm/H}$	$T_t=20\text{ms}$

图 3 比较了 2x1 MISO 系统与 SISO 系统发送单位比特数据时所需的发射能量。从图中可以看出，协作通信相比直接通信始终占用更少的发射能量。

在考虑通信过程中电路部分的能耗后，MISO 系统与 SISO 系统的能耗比较如图 4 所示。从图中可以看出，在短距离通信中，电路损耗相较于通信能耗占据主导地位，因而参与节点较少的直接通信显然更为节能；而在长距离通信中，随着通信距离

的增加，路径衰落成为能耗的主导因素，因而具有天线增益和抗多径衰落特性的协作通信较为节能。

在实际簇间协作通信过程中，源簇首先需要先将待发送的数据发送给协作节点，然后再利用虚拟天线阵列同时发送给目标簇首。因而在估算簇间协作通信总能耗时，除了式(13)列出的簇间通信能耗外，还需包括簇内的通信开销。簇内部分的能耗开销包括源簇首向协作节点发送数据时的发射能耗以及各个通信节点的电路损耗。簇内通信一般采用直接通信方式，若协作节点为 $m-1$ 个，则源簇首与协作节点之间簇内通信能耗开销为

$$E'(m) = E_t'(m) + E_c'(m) = E_t(1) + [E_{ct} + (m-1)E_{cr}] = \frac{N_0}{\bar{P}_c} e d^a + [E_{ct} + (m-1)E_{cr}] \quad (14)$$

其中， d 是簇内通信半径。此处需满足 $m \geq 2$ ，否则除簇首外无其他节点作为协作节点，簇间协作通信等效为簇间直接通信，则无簇内能耗开销。因而簇间协作通信从源簇首发送单位比特数据到目标簇首总的通信能耗为

$$E_{\text{MISO}} = E'(m) + E(m) = \frac{N_0 e d^a}{\bar{P}_c} + \frac{m N_0 e D^a}{\bar{P}_c^{1/m}} + (m+1)E_{ct} + mE_{cr} \quad (15)$$

其中， D 是簇间源簇首与目标簇首之间的通信距离。而若采用簇间直接通信方式，通信总能耗为

$$E_{\text{SISO}} = \frac{N_0}{\bar{P}_c} e D^a + (E_{ct} + E_{cr}) \quad (16)$$

比较式(15)和式(16)，簇间协作通信的通信能耗是否小于簇间直接通信的通信能耗，取决于簇间通信距离 D 、簇内通信半径 d 、协作节点数目 m 以及电路损耗参数。若 $E_{\text{MISO}} < E_{\text{SISO}}$ ，则可得到

$$D > \left(\frac{mE_{ct} + (m-1)E_{cr} + N_0 e d^a / \bar{P}_c}{\left(\frac{1}{\bar{P}_c} - \frac{m}{\bar{P}_c^{1/m}} \right) N_0 e} \right)^{1/a} \quad (17)$$

因而当簇间通信距离满足式(17)时，簇间协作通信的总体通信能耗小于簇间直接通信的通信能耗。

通过对上述 3 种不同簇间通信方式通信能耗模式的比较可知，在相同簇间通信距离条件下，簇间中继通信的通信能耗通常要小于直接通信的通信能耗；而当簇间通信距离大于距离敏感参数 D 时，

簇间协作通信的通信能耗小于直接通信的通信能耗。因此,当簇间通信距离小于距离敏感参数 D 时,可优先采用簇间中继通信方式,其次考虑采用直接通信方式;而当簇间通信距离大于距离敏感参数 D 时,考虑到时延的关系,可优先采用簇间协作通信方式,其次考虑采用中继通信方式。

针对上述不同簇间通信方式的能耗特点,本文设计出一种更节能的簇间通信自适应路由优化算法,从而延长网络生命周期。

4 算法描述

当传感器网络初始化之后,所有节点均处于未分配任务状态。基站利用泛洪方式向所有节点广播发送一个 SETUP 请求分组,通知节点系统开始工作。节点接收到请求分组首先判断该分组的发送路径是否成环。若是则丢弃该请求分组,否则记录下接收到该信息分组的跳数并将其加 1 后再转发给相邻节点,同时开始调用分簇算法选择簇首并进行分簇。若节点接收到多个 SETUP 信息分组,则仅记录下最小跳数并将其加 1 后转发,其余接收到的 SETUP 信息分组均丢弃。节点可以根据接收到的 SETUP 信息分组中包含的跳数和接收信息分组的信号强度判断与基站之间的距离远近,为后续的路由选择做准备。

4.1 节点分簇

每个节点通过分布式的算法决定自身是否成为簇首。成为簇首的节点发布广播信息给周围节点,而没有成为簇首的节点收到簇首的广播信息后,从中选择一个最适合的(可按距离最近原则)簇首并加入相应的簇中,同时反馈一个加入信息给相应簇首,在该反馈信息中需要包含该节点自身的剩余能量值及位置信息等相关信息。另外,由于在网络运行过程中簇首的能量通常消耗较大,因而可采用周期性重新分簇,经过一定条件的筛选,选择适合条件的不同节点来轮流担任簇首,从而均衡网络中节点能量的消耗。具体的分簇算法可根据实际网络运行条件和需求参考已有的相关分簇算法,如 LEACH^[11]、HEED^[12]等典型分簇算法。

4.2 簇间通信路由获取

当网络中节点分簇完成后,簇首负责将簇内成员采集到的数据汇合处理后发送到基站。若簇首无法与基站之间直接通信,则需首先建立与基站之间的路由,借助其余簇首或节点,通过多跳转发将数

据续传至基站。簇间通信路由获取流程如图 5 所示。

当源簇首 S 需要与基站通信, S 首先检查自己的路由表,看是否已存在到基站的路由。若存在,将路由写入数据报文的头部,并将数据发送至基站;否则 S 启动路由请求,以最大功率广播“路由请求”给所有相邻的下游簇首,并开始等待相应的路由回答。此处下游簇首是指比源簇首距离基站更近的簇首。收到“路由请求”的簇首判断自己是否位于请求簇首的下游,若不是则丢弃该请求分组,否则处理如下。

1) 检查是否曾收到过该报文,若收到过则将报文删除,避免循环处理。

2) 检查自己是否已拥有到基站的路由。若有,则转至 8)。

3) 将自己的 ID 和邻接关系值附加到请求报文中,并将报文继续发送给自身相应的相邻下游簇首,其后请求报文将沿着头部记录的路由到达基站,不再被广播。

4) 等待下游簇首的路由回答。

5) 等待一定时长后,若未接收到路由回答,则将重发次数 i 加 1;否则转至 7)。

6) 若 $i \leq 2$,则转至 3);若 $2 < i \leq 4$,则启用簇间协作通信方式扩大请求簇首通信范围并转至 3),以避免通信覆盖盲区的出现;否则,将 i 清零并结束路由回答进程。

7) 估算与回答簇首之间的通信距离及通信所需的能耗,并根据路由回答报文中所携带的通信能耗信息,估算发送单位比特数据至基站所需的总能量。将对应总能量估值最小的回答簇首作为下一跳候选路由。

8) 针对下一跳候选路由簇首启动簇间通信自适应优化选择算法,选择相应最节能的通信方式,并更新经过优化后到该候选簇首的路由以及与基站通信所需的总能耗估值。

9) 从所有候选中选择对应与基站通信能耗估值最小的路径作为路由序列。

10) 将节点 ID 加入正式路由的头部,将该路由序列放入路由回答报文并发送给相应的上游请求簇首,同时将 i 清零。回答中携带回答簇首到基站的完整路由序列以及使用该路由传输数据到基站所需的能耗估值,路由回答的发送和路由请求的发送类似。

S 收到路由回答后通过簇间通信自适应优化选择算法选择最节能的路由,就可以向基站发送数据。在

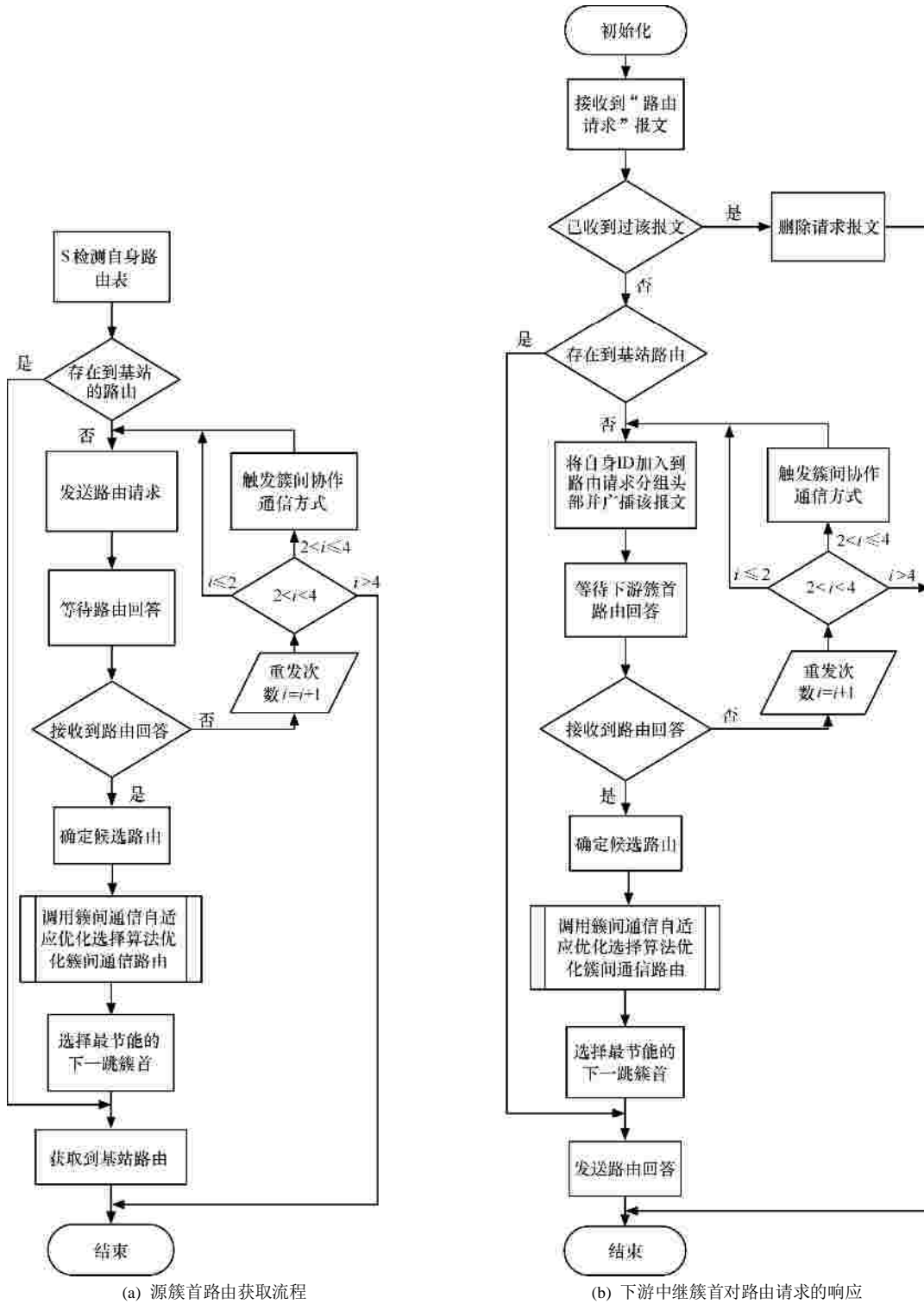


图 5 簇间通信路由获取流程

数据报文的头部携带到基站的路由序列，沿途簇首按照该路由转发报文。若 s 超时没有收到回答，则重新发送“路由请求”，直到收到回答或尝试给定次数后触发协作通信模式扩大通信范围重新进行“路由请求”，具体可参考 4.3 节中的路径重建部分。

请求簇首根据接收到的路由回答，可使用簇间通信优化算法自适应选择最节能的通信方式来进一步优化簇间通信路由，并确定到基站的路由序列。簇间通信优化算法基于第 3 节中各种簇间通信方式的能耗模型，具体处理过程如图 6 所示。

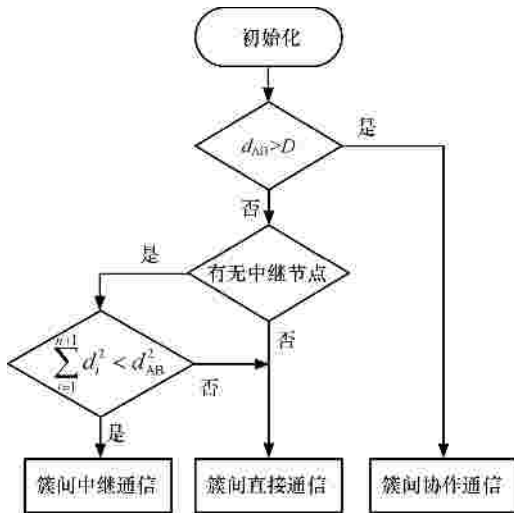


图 6 簇间通信自适应优化选择算法流程

簇间通信自适应优化选择算法中, 所用到的距离敏感参数 D 的数值可通过网络中节点的数目和分簇的数量以及具体的通信系统参数预先设定, 设定值的估算可参见第 3 节的协作通信触发条件分析。

在簇间通信方式优化选择过程中, 若选择簇间协作通信方式进行通信, 源簇首需选择适宜的簇成员作为协作节点共同组成天线阵列。源簇首根据簇成员的状态信息, 从距离最近的簇成员中选择不超过 $m-1$ 个剩余能量较多的节点作为协作节点。 m 的值可根据第 3 节中的相关内容通过通信过程中的平均误码率进行估算。若选择簇间中继通信方式进行通信, 则依据能耗最小原则, 选择转发数据时从源簇首到目标簇首总体通信耗能最小的中间节点作为中继节点。

网络中节点与其他节点间的路由可使用按需路由。当源节点需要目的节点的路由, 则源节点通过自身所属的簇首发送“路由请求”报文, 最终获取路由的处理过程类似于建立与基站之间路由的过程。

4.3 路由维护

路由维护负责监测网络中链路的状态, 一旦发现链路断开, 立刻通知网络中的簇首, 以便及时删除包含断开链路的路由。网络中每个簇首周期性地发送 Hello 报文, 当某个簇首在给定的 T_s 内没有收到原下游簇首的 Hello 报文, 该簇首将重新发送“路由请求”, 建立到基站的新路由。同时, 该簇首将在随后 T_s 内的 Hello 报文中携带该断开链路, 收到 Hello 报文的簇首检查自己的路

由表, 查看是否包含该断开链路。若有, 则将该路由删除, 重新查找到基站的路由。这些簇首在随后 T_s 内的 Hello 报文中也携带该断开链路。由此, 所有包含该断开链路的路由都将被最终删除, 这样可以防止路由无效时, 源簇首在不知情的情况下仍然使用该失效路由发送数据, 造成数据的丢失和能量的浪费。

考虑到无线传感器网络节点能量受限的特点, 为了避免在路由维护中不断转发链路断开信息从而占用网络资源造成浪费, 可采用按需维护策略。所谓按需维护是指某个链路断开时, 只有当簇首使用该链路时才进行维护, 通知网络中包含断开链路路由的源簇首, 若簇首不使用该断开链路, 将不进行路由维护, 由此减小维护开销。

当断开路径需要修复和重建时, 簇首发送“路由请求”, 直至建立其与基站之间的路由。若尝试给定次数“路由请求”均未得到响应时, 则认为检测到通信覆盖盲区, 即一跳范围内没有其他簇首作为中继进行数据转发。此时, 源簇首触发协作通信模式, 从自己簇内成员中选择合适的节点作为协作节点共同组成虚拟天线阵列, 并以最大功率重新广播发送“路由请求”以扩大通信覆盖范围, 尝试与远端下游簇首建立联系。

本文所提出的节能路由优化算法主要适用于静态无线传感器网络。对于动态传感器网络, 由于节点的移动性导致网络拓扑结构不断变化, 将使得端到端之间的路由维护代价过高。但对于动态无线传感器网络中的簇间通信, 当相邻分簇之间的拓扑变化速度较慢时, 仍可使用簇间通信自适应优化选择算法进行优化, 降低簇间通信开销。

5 性能评估

本节通过仿真来评估所提出的通信路由算法的性能。对所提出的路由算法与 HEED 协议进行了性能比较。为使性能评估结果公平起见, 网络中节点均按照 HEED 协议中的分簇算法进行分簇。假设传感器节点随机分布在 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 的区域内。实验中无线通信参数如表 1 所示, 其余仿真参数如表 2 所示。下面所列出的实验值都是 20 次实验结果的平均值, 各次实验中的数据吞吐量和接收端的误码率都相同。

类型	参数	值
网络	规模	1 000m×1 000m
	基站	位于(50, 75)
	初始能量	2 J/电池
应用	数据分组长度	100byte
	广播分组长度	25byte
	分组头长度	25byte

图 7 比较了采用不同路由算法的网络生命周期。无线传感器网络中的运行时间以“轮(round)”为单位,“轮”由簇的建立和稳定工作 2 个阶段组成。每一轮当重新选举簇首后进入稳定工作阶段,簇成员在一段时间内向簇首发送所采集到的数据,并由簇首将数据汇合处理后发送至基站,直至下一轮重新选举簇首建立分簇。实验中假设有 1 000 个节点随机分布在区域内。可以看出,随着网络运行时间的推移,采用本文所提出路由算法存活的节点数目始终要多于采用 HEED 算法存活的节点数目。这是由于所提出的路由算法在通信过程中,能够使得数据发送到基站时的路径最短且优化了簇间的通信方式,为节点节省了能量。无线传感器网络对网络的生命周期有多种不同的定义。无论是将无线传感器网络的生命周期定义为从网络启动到网络中首次出现节点死亡所持续的时间,或是定义为从网络启动到网络中仅存活一定比例的节点所持续的时间,从图 7 中均可看出,本文提出的路由算法可以使得网络的生命周期更长。

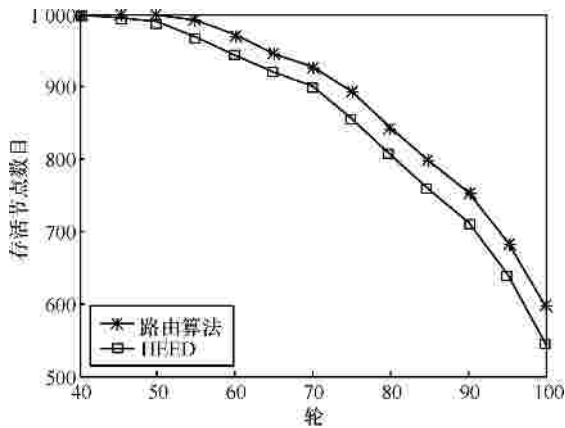


图 7 网络生命周期比较

图 8 给出了不同节点密度下每一轮通信平均所消耗的能量,网络中传感器节点数量从 400 个变化

到 1 600 个。从图中可看出,在不同的节点密度下,所提出的簇间通信自适应节能路由优化算法每一轮均花费更少的通信能量。这是因为每一轮通信过程中,所提出的路由算法可以使得每个源节点都将采集到的数据沿着最优化的节能路由发送至基站,因而节省了通信能耗开销。

图 9 比较了不同节点密度下网络有效的工作时间,网络中传感器节点数量从 400 个变化到 1 600 个。此处网络有效的工作时间定义为从网络启动到网络中首次出现通信覆盖盲区造成源簇首与基站之间的路由失效且无法修复的时间。从图中可以看出,无论节点的密度是多少,所提出的路由算法的有效工作时间均优于 HEED 算法。这主要是因为以下原因:所提出的路由算法在簇间通信时每一跳均选用了最节能的通信方式,从而为节点节省了能量;当发现通信覆盖盲区时,利用簇间协作通信扩大了通信覆盖范围,可直接与远方的节点通信,降低了路由中断的概率,减少了路由维护所需的能量开销。

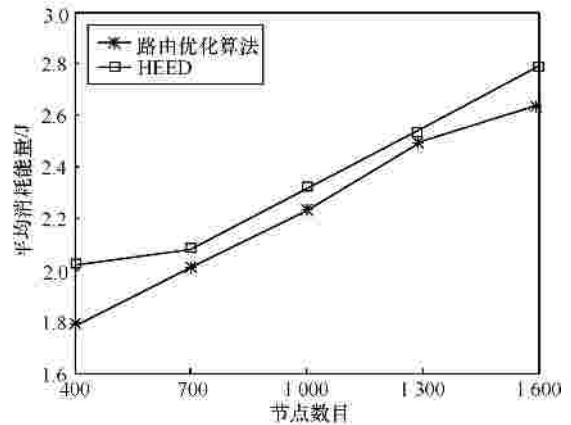


图 8 平均每轮通信消耗能量

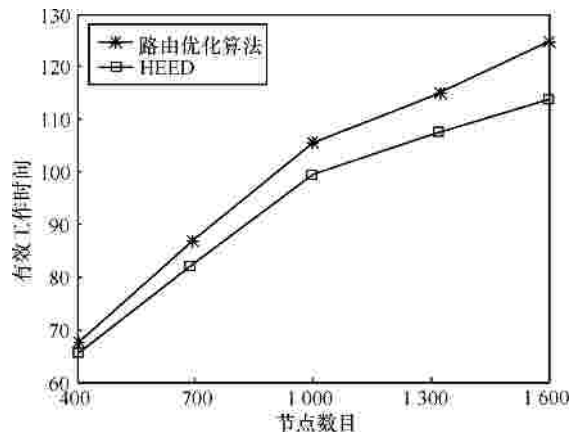


图 9 网络有效工作时间比较

6 结束语

本文提出了一种无线传感器网络簇间通信自适应节能路由优化算法。该算法依据簇间通信距离以及不同簇间通信方式所消耗能量的差异, 自适应地选择最节能的每一跳路由, 从而保证得到最优或次优的节能路由。仿真结果表明, 所提出的路由算法使得每一轮的通信能耗都减少, 并且延长了网络的生命周期和有效工作时间。

本文所提出的自适应簇间节能路由优化算法可与其他各类分簇算法相结合, 从而进一步优化网络簇间通信能量效率, 延长网络生命周期和有效工作时间。

参考文献:

- [1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(4): 2292-2330.
- [2] CHOUHAN S, BOSE R, BALAKRISHNAN M. Integrated energy analysis of error correcting codes and modulation for energy efficient wireless sensor nodes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(10): 5348-5355.
- [3] KALIS A, KANATAS A G, EFTHYMOGLOU G P. A co-operative beamforming solution for eliminating multi-hop communications in wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 1055-1062.
- [4] ABOUEI J, PLATANIOTIS K N, PASUPATHY S. Green modulations in energy-constrained wireless sensor networks[J]. *IET Communications*, 2011, 5(2): 240-251.
- [5] ZHOU Z, ZHOU S, CUI S, *et al.* Energy-efficient cooperative communication in a clustered wireless sensor network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3618-3628.
- [6] GAO Q, ZUO Y, ZHANG J, *et al.* Improving energy efficiency in a wireless sensor network by combining cooperative MIMO data aggregation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(8): 3956-3965.
- [7] KE F, FENG S, ZHUANG H. Relay selection and power allocation for cooperative network based on energy pricing[J]. *IEEE Communica-*

tions Letters, 2010, 14(5): 396-398.

- [8] PROAKIS J G. *Digital Communications (5th Edition)*[M]. New York: McGraw-Hill Science, 2008.
- [9] PAULRAJA A, NABAR R, GORE D. *Introduction to Space-Time Wireless Communications*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [10] CUI S, GOLDSMITH A J, BAHAI A. Energy-constrained modulation optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2349-2360.
- [11] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [12] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.

作者简介:



李文峰(1975-), 男, 江苏常州人, 东南大学博士生, 主要研究方向为无线自组织网络、无线传感器网络、协作通信等。



沈连丰(1952-), 男, 江苏邳州人, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信、短距离无线通信与泛在网络等。



胡静(1975-), 女, 江苏扬州人, 东南大学副研究员, 主要研究方向为短距离无线通信及无线传感器网络。