

无线传感器网络中基于线性网络 编码的节能路由算法

卢文伟^{1,2}, 朱艺华¹, 陈贵海³

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 310023; 2. 浙江林学院信息工程学院, 浙江临安 311300;
3. 南京大学计算机科学与技术系, 江苏南京 210093)

摘 要: 该文基于网络编码思想, 提出一种无需重传与确认的路由算法, 这种算法以最小化单位比特有效数据的能耗为目标, 给出最优化数学模型, 并用遗传算法进行求解. 所提出的免重传路由算法可以降低能耗, 减轻节点之间的无线电干扰, 节省了节点用于重传数据包所需配置的缓存.

关键词: 无线传感器网络; 路由; 节能; 网络编码

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2309-06

Energy-Efficient Routing Algorithms Based on Linear Network Coding in Wireless Sensor Networks

LU Wen-wei^{1,2}, ZHU Yi-hua¹, CHEN Gui-hai³

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
2. School of Information Engineering, Zhejiang Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;
3. Dept. of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Based on network coding, a retransmission-free routing (RFR) algorithm is proposed, in which an optimization model that minimizes energy cost per bit of useful data is presented and solved by genetic algorithms. The RFR reduces energy cost of nodes, alleviates radio interferences among nodes, and eliminates memory used to buffer packets for retransmitting.

Key words: wireless sensor networks; routing; power-saving; network coding

1 引言

在无线传感器网络的应用中, 节点需要通过中间节点的中继以多跳方式将所感知到的数据汇聚到 sink 节点. 由于受到环境变化、信号干扰、节点失效等因素的影响, 在无线传递过程中可能会丢失数据分组. 为了使数据包可靠传递, 重传 (Retransmission) 与确认 (Acknowledgement, ACK) 机制被采用. 然而, 采用重传及确认机制会带来额外的能耗, 导致节点过早失效, 进而降低网络的工作时间. 于是, 降低重传及确认次数在无线传感器网络中显得尤为必要.

无线网络具有以下特点: (1) 由于无线信道的广播特性, 一个节点所发送的数据包可以被多个邻居节点同时收到; (2) 一个节点可能配置多个无线接口卡 (如 802.11 WLAN 接口卡、3G 数据卡等); (3) 无线网络的一个接口卡可以使用多个频段作为信道 (如在 IEEE 802.11a 无线局

域网中, 可以使用 11 个不同频段). 因此, 多路径路由在无线网络中有着得天独厚的应用基础.

考虑到多路径传递——信源节点利用多条不同路径将数据包传递到信宿——是提高数据传递可靠性的重要方法之一, 同时, 利用多条从信源到信宿的路径同时传递数据包也可以提高传递效率, 注意到网络编码 (Network coding)^[1]能够使信宿在收到一定数量的数据分组之后采用解码的方法, 解出信源所发送的数据分组. 因此, 本文基于网络编码思想并结合多路径数据传递方法, 提出一种称为“免重传网络编码路由”的节能算法 (以下简称“免重传路由”). 在这种路由算法支持下, 信源将要发送的数据分成多个数据片, 然后选取一组线性独立的系数, 利用线性网络编码形成新的数据分组 (下称“编码数据分组”), 将编码数据分组分别通过不同的路径发送, 确保信宿收到一定数量的编码数据包进而获得信源所发送的数据. 这种路由算法的主要特点在

于:不需要重传机制,也就是说接收节点不需要发送 ACK 包,同时发送节点也不需要重发数据包.本文的主要贡献在于:利用无线网络编码技术,在多条路径中选择最佳路径进行数据传递,避免了数据包重传与确认,同时降低能耗及减轻无线电干扰,节省所有节点为重发数据包所必须配置的用于存储尚未得到接收节点确认的数据包的内存空间.

网络编码在 2000 年被提出^[1],它对网络的相关理论研究和实际应用都产生了深刻的影响.在无线网络编码技术支持下,网络的节点除了发送和接收数据外,还被允许对所收到的多个数据包进行编码,然后将经过编码的数据包发送到通信链路上.无线网络编码可以提高网络的吞吐量和鲁棒性^[1].S.R.Li 等人证明了:在有限域中,只要域足够大,则通过合适的线性网络编码,就能使组播传输达到最大流量^[2].Ho T 等人提出了随机网络编码方法^[3]——中间节点在一个有限域内随机选择一组元素作为系数对所接收到的信息进行编码,并证明了:只要有限域足够大,这种方法的失败率就可以很低.M.Ghaderi 等人对网络编码应用于无线网络的可靠组播的可靠性收益进行了量化,指出:与 ARQ 协议相比,网络编码明显减少数据包重传次数^[4].S.Dulman 等人研究了多路径路由的开销及可靠性的权衡问题^[5].Y.-M.Chen 等人利用指数加权移动平均方法,对传感器网络的擦除码与多路径传输的容错以及流量与传输失效之间的平衡问题进行研究^[6].

本文同样基于多路径路由并采用网络编码以提高可靠性.然而,本文与上述研究的主要不同之处在于:本文采用线性网络编码;以传输单位比特的能耗最小为目标;允许节点将多个数据包拼成一个较大的数据片段.本文的路由算法假设已经建立了从信源到信宿的多条不相交路径(即节点不重复路径),这可以用常用的多路径路由协议实现,如 SMR 协议^[7],等等.

2 算法及其组合优化问题

在无线传感器网络中,我们假定:所有节点的位置是固定的;网络中只有一个 sink 节点,且 sink 保存了整个网络拓扑结构信息;普通节点(非 sink 节点)具有相同的属性(如无线电发射功率、通信半径、单位时间能耗等);普通节点能量受限,但 sink 节点能量不受限制;普通节点通过直接或多跳的方式把数据传送给 sink 节点.

在计算能耗时,我们采用文献[8]的能耗模型,即节点接收一个 k 比特数据包的能耗为:

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (1)$$

将 k 比特数据从一个节点发送到另一个节点所需消耗能量为:

$$E_{Tx}(k, d) = k(E_{elec} + \epsilon_{amp}d^\gamma) \quad (2)$$

其中, E_{elec} 为电路上接收或发送每比特数据的能耗; E_{amp} 是信号放大所消耗的能量; d 为发送节点与接收节点之间的距离; γ 是路径损耗系数,一般取值范围在 $[2, 4]$ 之间.

为了减轻无线传感器节点在转发数据时所产生的无线电干扰而加剧丢包,并降低节点的能耗,在无线传感器网络中,我们选取一些节点作为“编码节点”.编码节点除了采用传统路由协议转发数据包之外,还可以对所收到的数据包进行线性编码,然后,将编码之后的数据包发送到无线链路上.本文着重研究单个编码节点的情形,同时,将编码节点称为信源,并以 S 表示.此外,假设已经采用多路径路由协议(如 SMR^[7])建立了从信源 S 到信宿(即 sink 节点)的 K 条不相交路径,记作 $P(1), P(2), \dots, P(K)$.赋予第 i 条路径 $P(i)$ 一个三元组 $(h_i, P_i, E_i(k))$,其中, h_i 表示数据包沿路径 $P(i)$ 从节点 S 到 sink 的跳数, P_i 表示从这条路径成功传递数据的概率, $E_i(k)$ 表示通过路径 $P(i)$ 传递一个 k 比特数据包的能耗.同时,我们以 $e_{i,j}$ 表示路径 $P(i)$ 的第 j 跳无线链路($j = 1, 2, \dots, h_i$).

假定网络中每跳无线链路的数据包丢失概率为 p .易知

$$P_i = (1 - p)^{h_i}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

以 $H(i)$ 表示一个在路径 $P(i)$ 上传递的数据包所经过的最大跳数,则在无重传与确认机制下,随机事件 $\{H(i) = n\}$ 发生意味着这个数据包在第 $1, 2, \dots, n$ 次被转发时均成功,但在第 $n + 1$ 次被转发时丢失($n < h_i$)或成功到达信宿($n = h_i$).于是, $H(i)$ 满足以下概率分布^[9]:

$$\omega_i(n) \equiv \Pr\{H(i) = n\} = \begin{cases} p(1 - p)^n, & 0 \leq n < h_i \\ (1 - p)^{h_i}, & n = h_i \end{cases} \quad (4)$$

由此可得一个数据包在路径 $P(i)$ 上的平均传递跳数为:

$$\begin{aligned} \bar{H}(i) &= \sum_{n=0}^{h_i} n\omega_i(n) = \sum_{n=0}^{h_i-1} np(-pn) + h_i(-p)^{h_i} \\ &= \frac{1 - (1 - p)^{h_i+1}}{p} - 1 \end{aligned}$$

在数据包在路径 $P(i)$ 上经过 j 跳的条件下,如果 $j < h_i$,则意味着这个数据包被发送了 $j + 1$ 次,但被正确接收了 j 次;如果 $j = h_i$,则表明这个数据包被发送了 j 次,且均被正确接收.于是,在无重传与确认机制的情况下,由式(1)与式(2)可知,在路径 $P(i)$ 上一个经过 j 跳的 k 比特数据包的能耗

$$EC_{i,j}(k) = \begin{cases} \sum_{r=1}^{j+1} E_{Tx}(k, d(e_{i,r})) + jE_{Rx}(k), & j = 0, 1, \dots, h_i - 1 \\ \sum_{r=1}^{h_i} E_{Tx}(k, d(e_{i,r})) + h_iE_{Rx}(k), & j = h_i \end{cases}$$

从而,在路径 $P(i)$ 上传递一个 k 比特数据包的平均能耗^[9]:

$$\begin{aligned} E_i(k) &= \sum_{j=0}^{h_i} \omega_i(j) EC_{i,j}(k) \\ &= \sum_{j=0}^{h_i-1} \omega_i(j) \left(\sum_{r=1}^{j+1} E_{Tx}(k, d(e_{i,r})) + jE_{Rx}(k) \right) \\ &\quad + \omega_i(h_i) \left[\sum_{r=1}^{h_i} E_{Tx}(k, d(e_{i,r})) + h_i E_{Rx}(k) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $d(e_{i,j})$ 为无线链路 $e_{i,j}$ 两个端点的距离。

如果采用重传与确认机制,由于链路的失效概率为 p ,因此每个数据包及 ACK 包(即确认包)均需要发送 $1/(1-p)$ 次.以 z 表示 ACK 包的比特数,由式(1)与式(2)可知:一个经历了 h_i 跳的数据包的平均能耗为:

$$\begin{aligned} \hat{E}_i(k) &\equiv \sum_{j=1}^{h_i} \left\{ \frac{E_{Tx}(k, d(e_{i,j}))}{1-p} + E_{Rx}(k) \right. \\ &\quad \left. + \frac{E_{Tx}(z, d(e_{i,j}))}{1-p} + E_{Rx}(z) \right\} \\ &= \sum_{j=1}^{h_i} \frac{E_{Tx}(k, d(e_{i,j})) + E_{Tx}(z, d(e_{i,j}))}{1-p} \\ &\quad + h_i E_{Rx}(k) + E_{Rx}(z) \end{aligned} \quad (6)$$

与文献[9]类似,设信源要发送给 sink 节点的数据是来自有限域 F_2^n 的元素所组成的符号串.由于传感器节点在捕捉事件时所产生的数据是源源不断的,我们设信源每次向 sink 节点发送 N 个大小相同的数据块 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$,即每个数据块所含的字符个数相同,不妨设各个数据块含 m 个字符.信源采用线性网络编码,产生以下数据块(即“编码数据块”):

$$\beta_i = r_{i1}\alpha_1 + r_{i2}\alpha_2 + \dots + r_{iN}\alpha_N \quad (7)$$

其中, r_{ij} 是有限域 F_2^n 中的元素. sink 节点在收到 N 个线性独立的编码数据块 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ 之后,就可以解得^[9]

$$(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)^T = \mathbf{R}^{-1}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)^T \quad (8)$$

其中, $\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_N)^T$, $\mathbf{r}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN})$.

本文的免重传路由算法关键要解决以下两个问题:

(1) 在已知的 K 条路径中选择 L 条路径,产生 L 个编码数据块 $\beta_i (i = 1, 2, \dots, L; L > N)$,使得其中任意 N 个数据块的编码系数向量是线性独立的;

(2) 在确保 sink 节点至少收到 N 个编码数据块的前提下(这样 sink 节点就可以解码还原数据),求 N 的最优值,使得单位比特有效数据的能耗最小。

通过构造一个范得蒙(Vandermonde)行列式,可以解决问题(1)^[9].故而,此处我们仅给出解决问题(2)的方法.以函数 $\Phi(x)$ 表示 x 所占的比特数.由于 r_{ij} 是有限域 F_2^n 中的元素,故 $\Phi(r_{ij}) = n$,因为 α_i 包含这个域的 m 个字符.因此

$$\Phi(\alpha_i) = nm, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

而且,可用一个字符串把它表示为 $\alpha_i \equiv \overline{\alpha_{i,1}\alpha_{i,2}\dots\alpha_{i,m}}$,其中 $\alpha_{i,j} \in F_2^n$,且 $\Phi(\alpha_{i,j}) = n, j = 1, 2, \dots, m$.诚然, α_i 可以进一步表示为二进制形式:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \alpha_{i,1}(2^n)^{m-1} + \alpha_{i,2}(2^n)^{m-2} + \dots + 2^n\alpha_{i,m-1} + \alpha_{i,m} \\ &= \sum_{j=0}^{m-1} 2^{nj}\alpha_{i,m-j} \end{aligned} \quad (10)$$

利用式(7)及式(10)可得:

$$\beta_i = \sum_{k=1}^N r_{ik} \sum_{j=0}^{m-1} 2^{nj}\alpha_{k,m-j} = \sum_{j=0}^{m-1} 2^{nj} \sum_{k=1}^N r_{ik}\alpha_{k,m-j} \quad (11)$$

由于 $\alpha_{i,j} \in F_2^n, r_{i,j} \in F_2^n, i, j = 1, 2, \dots, N$,且有限域上的任意有限个元素的线性组合仍然是这个域的元素,因此, $\sum_{k=1}^N r_{ik}\alpha_{k,m-j} \in F_2^n$,即 $\Phi(\sum_{k=1}^N r_{ik}\alpha_{k,m-j}) = n$.于是,由式(11)知

$$\Phi(\beta_i) = nm, \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (12)$$

考虑到 sink 节点在解码时需要编码数据块 β_i ,同时需要与之相关联的编码系数向量 $\mathbf{r}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN})$,因此,为了使 sink 节点通过解码获得信源所发送的数据,链路上所传递的数据包至少应包含编码数据块及编码系数向量,即这个数据包的比特数不少于 $\Phi(\beta_i) + \Phi(\mathbf{r}_i) = \Phi(\beta_i) + N\Phi(\mathbf{r}_{i,j}) = n(m + N)$.

设节点在链路上所传递的数据包大小限制为 B 比特,则

$$n(m + N) + v = B \quad (13)$$

其中, v 为数据包头部、校验和(Checksum)及其他域所包含的比特数。

以 x_i 表示信源在传递数据时是否选中第 i 条路径(若选中,取 $x_i = 1$,否则,取 $x_i = 0$).这样,第 i 条路径上成功到达 sink 节点的数据包个数为 $x_i p_i$.因此,为了确保信宿解码,需要至少有 N 个数据包到达 sink 节点,即

$$N \leq \sum_{i=1}^K x_i p_i \quad (14)$$

依式(5),信源选择多条路径发送数据分组给 sink 节点的总能耗

$$\begin{aligned} E_{total}(x_1, x_2, \dots, x_K) &= \sum_{i=1}^K x_i E_i(B) = \sum_{i=1}^K x_i \sum_{j=0}^{h_i-1} \omega_i(j) \\ &\quad \cdot \left(\sum_{r=1}^{j+1} E_{Tx}(B, d(e_{i,r})) + jE_{Rx}(B) \right) + \sum_{i=1}^K x_i \omega_i(h_i) \\ &\quad \cdot \left(\sum_{r=1}^{h_i} E_{Tx}(B, d(e_{i,r})) + h_i E_{Rx}(B) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

显然,在信源所发送的所有数据包中,有效数据为 N 个数据块 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$.由式(9)及式(13)知,每个数据块所占的比特数为 $\Phi(\alpha_i) = nm = B - nN - v$,因此,信源所发送的总的有效数据为 $N(B - nN - v)$.于是,发送单位

比特有效数据的能耗

$$E_{bit}(x_1, x_2, \dots, x_K) \equiv \frac{E_{total}(x_1, x_2, \dots, x_K)}{N(B - nN - v)} \quad (16)$$

这样一来,由式(13)~(16),上述问题(2)等价于以下组合优化问题:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \frac{1}{N(B - nN - v)} \\ & \cdot \left\{ \sum_{i=1}^K x_i \sum_{j=0}^{h_i-1} \omega_i(j) \left(\sum_{r=1}^{j+1} E_{Tx}(B, d(e_{i,r})) + jE_{Rx}(B) \right) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^K x_i \omega_i(h_i) \left(\sum_{r=1}^{h_i} E_{Tx}(B, d(e_{i,r})) + h_i E_{Rx}(B) \right) \right\} \\ \text{s.t. } & \begin{cases} N = \lfloor \sum_{i=1}^K x_i p_i \rfloor \\ x_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

其中,符号 $\lfloor a \rfloor$ 表示不超过 a 的最大整数.

3 组合优化问题求解及算法的实现

注意到优化问题(17)的组合特性,我们用遗传算法对之求解.考虑到 x_i 只取0或1,在遗传算法中,我们选取染色体为 K 个0或1组成的二进制串 $\xi \equiv x_1 x_2 \dots x_K$,把 ξ 的取值范围记为 Ω ,即 $\Omega = \{0, 1\}^K$.

取适应度函数为

$$f(\xi) \equiv \frac{1}{E_{bit}(x_1, x_2, \dots, x_K)} = \frac{N(B - nN - v)}{E_{total}(x_1, x_2, \dots, x_K)}$$

它是优化问题(17)的目标函数值的倒数.

初始种群产生:随机产生 M 个长度为 K 的二进制串.

选择(Selection)操作:计算每个染色体的适应度值,在每一代群体中,将适应度最大的染色体直接传入下一代.此外,根据概率 $f(\xi) / \sum_{\eta \in \Omega} f(\eta)$ 且按轮盘赌法选择其它染色体 ξ .

交叉(Crossover)操作:随机选择一对染色体并随机产生交叉点(交叉位置),以交叉概率 p_c 进行交叉运算(单点交叉),形成一对新的染色体.例如,对于一对染色体: $\xi = x_1 x_2 \dots x_K$ 与 $\eta = y_1 y_2 \dots y_K$,如果交叉点为 i ($1 \leq i < K$),则交叉操作后新产生的一对染色体是: $\xi' = x_1 x_2 \dots x_i y_{i+1} y_{i+2} \dots y_K$ 和 $\eta' = y_1 y_2 \dots y_i x_{i+1} x_{i+2} \dots x_K$.

变异操作(Mutation):对任意一个染色体,根据变异概率 p_m ,随机选择一个基因进行变异,即把基因1变为0,把0变为1.

在文献[9]中,我们提出了上述算法的实现方法.值得指出的是,从式(7)、(9)及(12)可以看出:由 N 个原始数据块 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 编码而得的“编码数据块” β_i 所占的比特数与任何一个原始数据块 α_i 所占的比特数是相等的,这就要求有限域足够大,即 n 足够大.

4 数值实验与分析

以图1所示的无线传感器网络为例,我们使用Matlab程序设计语言编制仿真程序进行实验,并对实验结果进行分析.在图1中,链路旁边的数字表示节点之间的距离.与文献[8]相同,取路径损耗指数 $\gamma = 2$, $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$, $E_{amp} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$.在求解组合优化问题(17)时,我们利用第3节所述的遗传算法,取种群规模为200个染色体,交叉概率 $p_c = 0.8$,变异概率 $p_m = 0.05$,遗传代数为200.此外,取数据包头部以及ACK包所占的字节数均为30字节,即 $v = z = 30$ 字节.

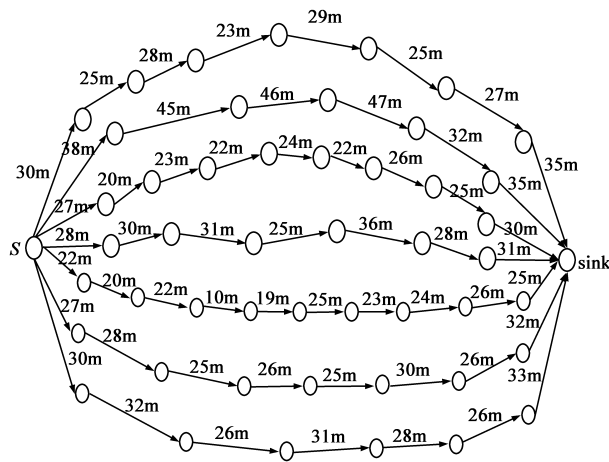


图1 模拟实验场景

首先考察参数对免重传路由算法的能耗的影响.我们已经发现^[9]:对于给定的 p ,随着数据包的长度增大,传递单位比特的能耗减小;对于给定的 p ,减小有限域的元素个数 n ,免重传路由算法能耗也随之降低.这也说明,在我们的免重传路由算法中,应尽可能选取长度较大的数据包进行传递,也尽可能选择值较小的 n .值得注意的是, n 的值是不能无限制减小的.例如,在信源向信宿发送ASCII码字符所组成的字符串时, n 的值不能小于8.

固定 $B = 64$ 字节,让 $n = 8, 48$ 及 $p = 0.02, 0.04, \dots, 0.18$,我们得到图2和图3.图2告诉我们:在 B 与 n 确定后,免重传路由的能耗随着 p 的增大总体呈现波动增大趋势,但并非严格递增.从图3可以看出,随着 p 的增大,免重传路由算法所发送的数据包的数目(即最优数据片段数目)呈现逐渐减小趋势,直到只能发送一个数据包(如 p 大于0.14).因此,在链路失效概率较大时,本文所提出的免重传路由不能同时传送多个数据包,这会降低效率.

当 $P = 0.04$, $n = 8$, $B = 64, 128, 192, 256, 320$ (字节)时,让信源发送10M比特数据,我们得到图4.这个图对本文的免重传路由(RFR, Retransmission-Free Routing)与

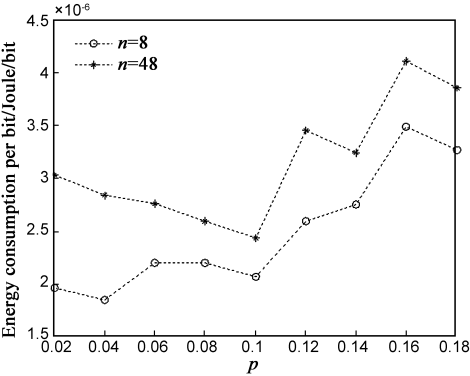


图2 p 的变化对能耗的影响

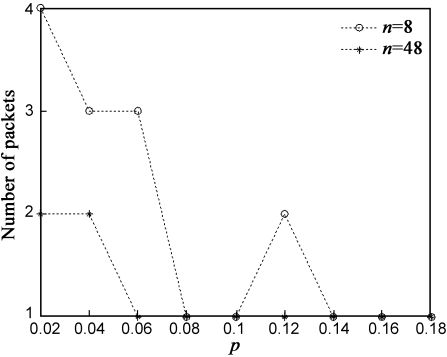


图3 p 的变化对可发送原始数据包数目的影响

基于重传的“最短路径优先”(SPF, Shortest Path First)及“最可靠路径优先”(MRPF, Maximum Reliable Path First)等单路路径路由算法的能耗进行比较。所谓“最短路径优先”,是指信源节点只选择跳数最少的单条链路发送数据;而“最可靠路径优先”是指信源节点只选择路径失效率最小的单条链路发送数据。从图 4 可以看出:(1) RFR,SPF 与 MRPF 三种路由算法中,单位比特的能耗均随着 B 的增大而减小;(2)在 B 的值较小(如 $B=64$ 字节)时,RFR 的能耗比 SPF 与 MRPF 的能耗均低,但在 B 较大时,RFR 的能耗比两者高。

图 5 显示的是,当 $B=64$ 字节, $n=8$, $p=0.02, 0.04, \dots, 0.18$ 时,让信源发送 10M 比特数据,RFR 与 SPF、MRPF 能耗的对比。这个图表明:在 p 比较小(如 p

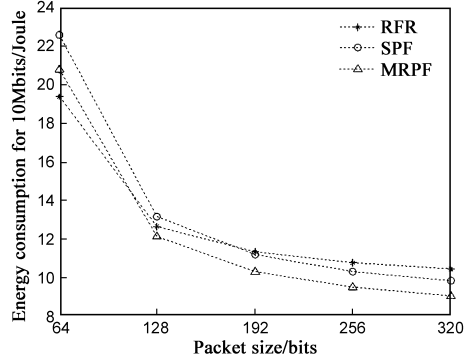


图4 不同路由算法的比较(B 变化)

$=0.04$)时,RFR 路由能耗可低于 SPF 与 MRPF 的能耗;当 p 比较大时,RFR 路由的能耗明显高于 SPF 与 MRPF 的能耗。图 4 与图 5 说明:在 B 与 p 取值较小的值时,本文的免重传路由比“最短路径优先”及“最可靠路径优先”节能。

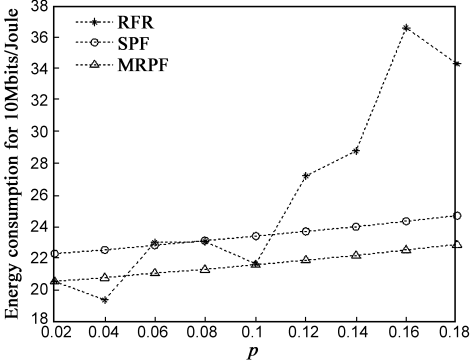


图5 不同路由算法的比较(p 变化)

5 结论

在无线传感器网络中,由于链路受干扰,节点之间需要进行多次重传才能可靠地将一个数据包从一个节点传递到另一个节点。在重传与确认机制中,接收节点需要向发送节点发送 ACK 包进行应答。此外,在节点到 sink 节点的路径较长时,多次重传会引起信源节点超时从而不断地重发数据包,这会导致网络出现拥塞。此外,重传及应答需要消耗节点的电能,同时,也会给其它节点的通信带来干扰。我们所提出的基于网络编码的免重传路由算法,节点之间无须重传数据包,也不需要节点对收到的数据包进行确认,降低了节点的能耗,同时减轻了节点之间的无线电干扰。从上述实验来看,本文的免重传路由算法适用于 p 取值较小的场合,其主要不足在于:信宿需要接收一个满秩矩阵才能解码,这会带来一定的时延。

参考文献:

[1] R Ahlswede, N Cai, S R Li, R W Yeung. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46: 1204 – 1216.

[2] S R Li, R W Yeung, N Cai. Linear network coding[J]. In IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49: 371 – 381.

[3] Ho T, Karger D, Medard M, et al. The benefits of coding over routing in a randomized setting[A]. IEEE International Symposium on Information Theory[C]. Yokohama, 2003.

[4] M Ghaderi, D Towsley, J Kurose. Reliability gain of network coding in lossy wireless networks[A]. IEEE INFOCOM 2008 [C]. Phoenix, AZ, 2008. 2171 – 2179.

[5] S Dulman, T Nieberg, J Wu, P Havinga. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless

- sensor networks[A]. Wireless Communications and Networking[C]. New Orleans, LA, USA, 20 – 20 March 2003, 3. 1918 – 1922.
- [6] Y M Chen, Y J Xu, Q G Wang, L Xie. An adaptive fault-tolerant scheme for wireless sensor networks[A]. 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing[C]. New York, USA: IEEE Computer Society, 6 – 8 Jan. 2009. 2. 32 – 36.
- [7] S J. Lee, M Gerla. Split multipath routing with maximally disjoint paths in Ad hoc networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. New York, USA: IEEE Communication Society, 2001. 10. 3201 – 3205.
- [8] W B Heinzelman, A P Chandrakasan, H Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for Wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, Oct. 2002, 1(4): 660 – 670.
- [9] 卢文伟, 朱艺华, 陈贵海. 基于网络编码的无线传感器网络免重传多路径节能路由算法[J]. 计算机科学, 2009, 36(10A): 209 – 212.
- Lu Wen-wei, Zhu Yi-hua, Chen Gui-hai. Retransmission-free and multipath power-saving routing algorithms based on network coding in wireless sensor networks[J]. Computer Science, 2009, 36(10A): 209 – 212.

作者简介:



卢文伟 男, 1979 年出生于浙江临安, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向: 网络编码、无线传感器网络路由协议与算法。

E-mail: lww_infor@yahoo.com.cn



朱艺华 男, 1961 年生于浙江玉环, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国计算机学会传感器网络专业委员会委员, 主要研究方向为移动计算、无线网络的协议、算法、性能分析与优化, 在《IEEE Transactions on Wireless Communications》、《IEEE Transactions on Vehicular Technology》、《IEEE Communications Letters》等各类期刊及 IEEE 国际会议论文集上发表学术论文 100 余篇。

陈贵海 男, 1965 年生于江苏盐城, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 传感器网络、路由算法、对等计算等。