

基于交叉流网络编码的节能路由

朱艺华* 唐春光 田贤忠

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘要: 节能路由是无线自组织网络的一个重要研究课题,对延长网络生存时间极为重要。在传统路由下,多对节点之间通信使用的多条数据传递路径会出现交叉——存在公共节点,这些公共节点因需要转发来自多条交叉路径的数据包而比其它节点消耗更多的能量,从而过早因能量耗竭而失效。为了克服这一能耗不均衡问题,该文提出基于网络编码的节能路由 NCBEER (Network Coding Based Energy Efficient Routing),它可捕捉多条路径交叉的机会,让公共节点对所转发的数据包进行编码,然后把编码数据包多播(Multicast)邻居节点,以减少公共节点转发数据包次数从而降低能耗;推导了编码节点使全部接收节点接收到编码数据包所需要的平均多播次数,定义了无线链路的传输代价,并将之作为信源将流量分配给不同路径的依据。仿真试验表明,NCBEER 可降低和均衡节点的能耗,且能够延长网络生存时间。

关键词: 无线自组织网络;路由;网络编码;节能

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-2984-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00119

An Energy-saving Routing Based on Network Coding on Intersecting Flows

Zhu Yi-hua Tang Chun-guang Tian Xian-zhong

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Energy-saving routing is one of the important topics in Wireless Ad hoc NETWORKS (WANETs), which is significant for prolonging network lifetime. Under convention routing, the data delivery paths, with each used by a pair of nodes, may intersect at some nodes, which causes these shared nodes to forward packets from multiple intersecting paths, making them expend more energy than other nodes and become invalid quickly due to energy depletion. To overcome the problem of uneven energy consumption among nodes, a Network Coding Based Energy Efficient Routing (NCBEER) is presented in this paper, which is able to capture the opportunity of path intersecting, allows the shared nodes to encode the forwarded packets, and multicasts the coded packets to neighboring nodes so that the number of transmissions and energy expenditure are reduced. In addition, the average number of multicasts for a coding node to guarantee the coded packet to be received by all the receiving nodes is derived; and the delivery cost of a wireless link is defined, which is used by NCBEER to dispatch packets to different paths. Simulation shows that NCBEER is able to reduce and balance energy expenditure of nodes and network lifetime is prolonged.

Key words: Wireless Ad hoc network; Routing; Network coding; Power saving

1 引言

在无线自组织网络(wireless Ad hoc network)中,节点通过合作以多跳方式传递信息。由于节点大多用电量非常有限的电池供电,因此,如何经济地消耗节点的电池能量以延长网络生存时间,是无线自组织网络有效运行的关键因素之一,设计节能

路由协议对网络长时间高效运转是非常重要的。

由于网络编码可以提高网络吞吐量,提高无线资源利用率,减小传输延迟,节省节点能耗^[1],近年来,基于无线网络编码的路由成为研究热点。例如,Katti 等人^[2]提出了 COPE 路由协议,允许节点以机会监听和机会编码的方式,在链路层实现了无线网络编码技术;Tong 等人^[3]考虑了时延以及拥塞因素,为无线传感器网络设计了基于网络编码的机会多路径路由 CodePaths,它能够获得较高的吞吐率、较低的时延和能耗;Chen 等人^[4]提出了辅助机会路由 AsOR 协议,把节点分成帧节点、辅助节点和未

2011-02-17 收到,2011-09-13 改回

国家自然科学基金(61070190),浙江省自然科学基金(Z1100455, Y1110570)和浙江省重大科技专项重点国际合作项目(2009C14033)资助课题

*通信作者:朱艺华 yhzhu@zjut.edu.cn

选节点 3 类，其中，帧节点解码并转发数据包，而辅助节点对不成功的机会传输进行保护。Le 等人^[5]提出了 DCAR (Distributed Coding-Aware Routing) 协议，扩展了源路由协议以支持编码操作，在路由发现的同时寻找编码节点。此外，王静等人^[6]给出冗余多播网络在不同发送速率下所需的最小有限域，构造最大距离可分码生成矩阵，实现了网络编码。卢文伟等人^[7]提出一种无需重传与确认的路由算法，对单位比特有效数据的能耗进行优化。

在无线自组织网络中，当多对节点通信时，路由协议需要为各对节点构建传递数据包的路径。一旦这些路径共享一些节点(下称“路径交叉”)，公共节点就需要为多条交叉路径传递数据包。从而，它们因比其它节点转发更多的数据包而消耗更多的能量，导致它们因能量过快耗竭而失效，进而缩短网络的生存时间。为了降低共享节点的能耗以克服上述能耗不均衡问题，我们让共享节点对来自交叉路径的上游邻居节点的数据包进行编码，然后采用多播方式把编码之后的数据包发送给下游邻居节点，以此减小共享节点传输数据包的次数，由此降低数据传输能耗。此外，受到“通过让节点把数据包按照比例发送到不同的通信链路，可以均衡节点的能耗并降低整个网络的能耗”这一结论^[8]的启发，我们在信源和信宿之间有多于一条通路时让信源按照一定比例将数据包发送到不同的路径。

本文的主要贡献与创新之处在于：提出能够捕捉多路径交叉编码机会的 NCBEER (Network Coding Based Energy Efficient Routing) 节能路由算法，导出了编码节点利用多播发送编码数据包并使全部接收节点接收到这个数据包所需要的平均多播次数公式，并基于此定义了无线链路的传输代价，让 NCBEER 按照各条路径的传输代价分配流量，以达到节能及延长网络生存时间的目的。仿真结果表明：NCBEER 路由的能耗优于 SMR 协议^[9]，且在链路传递数据包成功率较高或者交叉路径数目较大时，NCBEER 路由的能耗优于 DSR 协议^[10]。

2 NCBEER 算法及其实现

2.1 基于交叉流网络编码的节能思想

把从信源 S 到信宿 D 传递数据包的路径称为从信源到信宿的“流”(以下对流与路径不加区别)，表示为“ $S \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow \dots \rightarrow X_n \rightarrow D$ ”，其中， X_1, X_2, \dots, X_n 表示这个流所经过的中间结点。无线自组织网络中，选取不同流发送数据包所产生的能耗是不同的。如图 1，圆圈表示节点， S_1, S_2 为信源， D_1, D_2 为信宿。假设节点发送 1 个数据包的能耗为 1 个单位，

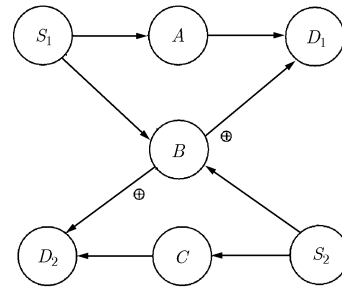


图 1 不同路径的数据传输方案

接收数据包能耗忽略不计；初始时各节点的电池能量均为 200 个单位。节点 S_1 和 S_2 各有 100 个数据包分别要发送给 D_1 和 D_2 。

方案 1 让节点 S_1 选择流 $S_1 \rightarrow A \rightarrow D_1$ 且 S_2 选择流 $S_2 \rightarrow C \rightarrow D_2$ 传递数据包，则每条流均有 2 次发送数据包，即每个包从信源传到信宿的能耗为 2，两条流总能耗为 4。因此，100 个包传输结束后，网络的总能耗为 $4 \times 100 = 400$ 。

方案 2 选择两条交叉流，即节点 S_1 选择 $S_1 \rightarrow B \rightarrow D_1$ 且节点 S_2 选择 $S_2 \rightarrow B \rightarrow D_2$ 。虽然方案 2 与方案 1 的数据包传递次数一样多，但两个流的交叉点 B 可以对来自节点 S_1 和 S_2 的数据包进行编码(如异或编码，图中用符号 \oplus 表示)，把编码之后的数据包多播给邻居节点 D_1 与 D_2 。这样，传输结束后，总的能量消耗为： $3 \times 100 = 300$ (即节点 S_1, S_2, B 各发送 100 个数据包)。因此，基于网络编码的方案 2 比非编码方案 1 节能 100 个单位。

事实上，在两个交叉流的公共节点不止一个的情况下，也可以采用网络编码方案实现节能。本文所提出的 NCBEER 路由正是基于上述思想。

2.2 选路度量

本文称对数据包进行编码的节点为“编码节点”，称编码之后的数据包为“编码包”。由于只有各接收节点均收到编码包，才能让信宿通过解码获得信源所发送的数据包。由于无线电波干扰等因素均会导致丢包，使得编码节点每次多播时，只有一部分接收节点正确收到编码包，因此，编码节点需要多次对同一个编码包进行多播，才能使所有接收节点正确收到这个编码包(显然，连接到低丢包率链路的接收节点可能多于一次接收到同一个编码包)。由于节点每次多播均产生能耗，因此，有必要研究：编码节点需要多播同一个编码包多少次才能确保所有接收节点至少一次正确接收到这个编码包。以下对此进行研究。

如图 2，设 X 为编码节点； $I_i (i=1, 2, \dots, m)$ 是“输入节点”即发送数据包给 X 的节点； $O_i (i=1, 2, \dots, n)$

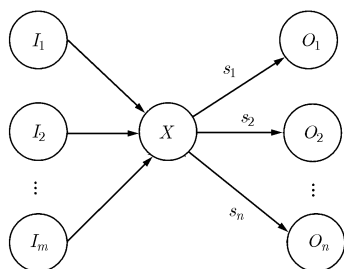


图2 编码节点

是“输出节点”即接收来自 X 的编码包节点； s_i 表示无线链路 XO_i 传递数据包的失败概率 ($i=1,2,\dots,n$)。

在 X 多播 1 个编码包之后，如果接收节点收到这个编码包，则它给 X 回复 1 个确认包(下称“ACK 包”)。由于 ACK 包所占的字节数较小，丢失的概率很小，因此，为了叙述简单起见，本文假设每个节点所发送的 ACK 包均被节点 X 接收。如果 X 所多播的同一个编码包被每个接收节点至少接收到一次，则称“多播成功”。以 ξ_X 表示随机事件“节点 X 多播成功一个编码包所需要的最小多播次数”，并设 $\omega_n(k) \equiv P\{\xi_X = k\}$ ；以 ξ_i 表示随机事件“为了使节点 O_i 至少一次接收到节点 X 所多播的编码包，节点 X 所需要多播的次数” ($i=1,2,\dots,n$)。这样， $\xi_i > k$ 表示节点 k 次多播均告失败，其概率为 s_i^k 。于是

$$P\{\xi_i \leq k\} = 1 - P\{\xi_i > k\} = 1 - s_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

由于 $\xi_X = \max\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ ，利用式(1)，得到：节点 X 成功多播一个编码包所需要的平均多播次数(具体推导过程略)为

$$\bar{\omega} \equiv \sum_{k=1}^{\infty} k \omega_n(k) = \sum_{i=0}^n \frac{1}{1-s_i} - \sum_{0 \leq i < j \leq n} \frac{1}{1-s_i s_j} + \sum_{0 \leq i < j < t \leq n} \frac{1}{1-s_i s_j s_t} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{1 - \prod_{i=1}^n s_i} \quad (2)$$

显然，在节点 X 发送一个编码包给节点 O_i 时，要使 O_i 成功接收， X 的发送次数符合参数为 s_i 的几何分布，均值为 $1/(1-s_i)$ 。此外，无线链路 XO_i 的传递失败概率 s_i 在所有无线链路传递失败概率总和中所占的比例为 $s_i / \sum_{j=1}^n s_j$ 。因此，定义无线链路 XO_i 的传播次数如下：

$$N_{X,O_i} = \begin{cases} \bar{\omega} s_i / \sum_{j=1}^n s_j, & X \in \Omega \\ \frac{1}{1-s_i}, & X \notin \Omega \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中 Ω 是编码节点的集合， $\bar{\omega}$ 由式(2)确定。

为了权衡节点能耗，本文采用文献[11]的能耗模型，即节点接收和发送 1 个 k bit 数据包的能耗分别

为 $E_{RX}(k) = kE_{\text{elec}}$ 和 $E_{TX}(k, d) = k(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{amp}} d^\gamma)$ 。其中， E_{elec} 为节点电路上传输或接收单位比特数据需要消耗的能量； ε_{amp} 为信号放大消耗的能量； d 是发送与接收节点之间的距离； γ 为路径损耗系数，在区间 $[2, 4]$ 内取值。在 NCBEER 算法中，无线链路 XO_i 的传输代价定义为

$$W_{X,O_i} = N_{X,O_i} [E_{RX}(k) + E_{TX}(k, d_{X,O_i})] \quad (4)$$

其中 d_{X,O_i} 表示节点 X 与 O_i 之间的距离。此外，一条路径的传输代价定义为组成这条路径的所有无线链路的代价之和。

2.3 路由与编码节点发现

在路由发现过程中，信源向邻居节点多播 RREQ(Route Request)数据包探寻通往信宿的路径。RREQ 包含 F_NodeID, F_SeqNo, F_Path 和 F_OverheardNodes 等域，分别存放节点 ID(唯一标识)、数据包序号、数据包所经过的路径(节点序列)以及可以监听到无线电信号的节点 ID。以符号 RREQ.F_NodeID 表示 F_NodeID 是数据包 RREQ 的域，其余域的表示方法类似。

对于从信源 S 到信宿 D 的流 $F: S \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow \dots \rightarrow X_n \rightarrow u \rightarrow Y_1 \rightarrow Y_2 \rightarrow \dots \rightarrow Y_n \rightarrow D$ ，引入符号 $U(u, F) \equiv \{S, X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 和 $D(u, F) \equiv \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n, D\}$ ，分别称为节点 u 的上游节点集和下游节点集。以 $N(u)$ 表示节点 u 的邻居节点集。如果 2 条流 F_1 和 F_2 交叉于节点 u ，则可以选取 u 为编码节点且可以安全解码的充分必要条件(以下简称“编码节点条件”)为^[5]

- (1) 存在 $v_1 \in D(u, F_1)$ ，满足： $v_1 \in N(v_2)$ ， $v_2 \in U(u, F_2)$ ；或者 $v_1 \in U(u, F_2)$ ；
- (2) 存在 $v_2 \in D(u, F_2)$ ，满足： $v_2 \in N(v_1)$ ， $v_1 \in U(u, F_1)$ ；或者 $v_2 \in U(u, F_1)$ 。

文献[5]指出，只要一个交叉节点知道经过它的各个流所包含的全部节点以及各个流的上游节点的邻居节点，就可以利用上述条件判断这个交叉节点是否可以选为编码节点。因此，在 NCBEER 算法中，每个节点配置缓存 UpNeighbors, Route_seeking 和 Nodes_in_a_Route，分别用于存放各个流的上游节点的邻居节点、从信源到该节点的探索路径以及所找到的路径所包含的所有节点 ID。

从信源到信宿的路由以及编码节点的发现过程的主要步骤如下：

(1) 信源向邻居节点发送 RREQ 包，其中，域 F_NodeID, F_SeqNo, F_Path, F_OverheardNodes 的内容分别为信源节点 ID、数据包编号、信源节点 ID 以及信源可以监听到的邻居节点的集。

(2) 一旦中间节点 u 收到一个 RREQ 包，则它按以下逻辑处理这个包。

步骤 1 如果当前 RREQ 包与之前收到的 RREQ 包在二元组(F_NodeID, F_SeqNo)上等值, 则转到步骤 2; 否则, 转到步骤 3。

步骤 2 如果 RREQ.F_Path 包含的节点数大于之前收到的 RREQ 包的域 F_Path 所包含的节点数, 则丢弃所收到的 RREQ(即丢弃跳数大的数据包), 转到步骤 4。

步骤 3 把 RREQ.F_Path 的内容复制到缓存 Route_seeking, 并把节点 u 的 ID 添加到 RREQ.F_Path, 把 RREQ.F_OverheardNodes 复制到缓存 UpNeighbors, 并把节点 u 能够监听到的节点集合添加到 RREQ.F_OverheardNodes 内, 向邻居节点多播更新之后的 RREQ 包。

步骤 4 结束。

(3)RREQ 到达信宿之后, 信宿向信源发送 RREP(Request Reply) 数据包, 它包含 F_ID, F_Path, F_Cost 等域, 分别表示目的节点 ID 从信源到信宿的完整路径以及从信源到信宿路径的累积代价。RREP 沿 RREP.F_Path 所指明的路径逆向单播传递给信源。如果到达信宿的 RREQ 多于一个, 则信宿选择不相交的路径, 向信源发送 RREP。

(4)中间节点 u 按以下逻辑处理所接收到的 RREP 包:

步骤 1 把 RREP.F_Path 路径上节点 u 的下游邻居节点记为 O_u 。将 RREP.F_Path 和缓存 Route_seeking 所保存的自信源到节点 u 的路径进行比对, 如果路径一致, 则转到步骤 2; 否则, 转到步骤 3。

步骤 2 将 RREP.F_Path 复制到缓存 Nodes_in_a_Route, 利用缓存 UpNeighbors 和 Nodes_in_a_Route 中的内容判断前述“编码节点条件”是否满足。如果不满足, 则转到步骤 3; 否则, 则按式(3)的第 1 行计算 N_{u,O_u} 。转到步骤 4。

步骤 3 按式(3)的第 2 行计算 N_{u,O_u} 。

步骤 4 按式(4)计算节点 u 与节点 O_u 的无线链路的代价 W_{x,O_u} , 并将之累加到 RREP.F_Cost 域。

步骤 5 根据 RREP.F_Path 所给出的路径向上游邻居节点转发更新之后的 RREP 包。

步骤 6 结束。

(5)在时间间隔 τ (路径发现时限)内, 如果信源只收到来自一条路径的 RREP 包, 则它把全部数据包发送到该路径; 如果它收到来自 w 条不同路径的 RREP 包, 则它按比例 $1/F_Cost(i)/\sum_{j=1}^w 1/F_Cost(j)$ 确定在第 i 条路径上所发送的数据包数目。这里, $F_Cost(i)$ 表示第 i 条路径的代价。

2.4 路由维护

流具有时限性, 一段时间后, 某些流会失效, 编码节点的编码方案就需要做相应的调整(不然, 信宿节点就难以解码), 而且部分流的失效会导致一些编码节点不再成为编码节点。因此, 在 NCBEER 路由中, 在一条流失效之时, 这个流的信源向中间节点发送一个 FIN 消息(表示流结束)。当编码节点收到 FIN 消息时, 它检查失效的流是否被用于网络编码。如是, 则它改变编码方案, 并向经过它的其它流的信源发送编码方案已经改变的消息 CHG_Coding, 其它流的信源在接收到 CHG_Coding 消息之后, 根据需要进行新一轮的选路。

2.5 网络编码方案及额外开销分析

编码节点可以采用异或操作, 也可以采用线性编码^[7]对来自交叉流的数据包进行编码。限于篇幅, 此处, 仅对异或编码进行分析。由于 NCBEER 路由用于网络层, 本文以网络层采用 IPv4 协议为例进行分析(如采用 IPv6 协议, 分析方法类似)。在 IPv4 数据包头部, 信源 IP 地址占 4 个字节, 每个数据包有占 2 个字节的标识。由于每一条流的信源是唯一的, 可以用“信源 IP 地址+数据包标识”(共 6 个字节)对各个流的数据包唯一标识。取 IP 数据包长度为 1300 Byte^[12]。

如果编码节点从 m 个交叉流中各取一个数据包进行异或操作生成一个编码包, 需要把这 m 个数据包的唯一标识(共 $6m$ Byte)添加到编码包, 才能使信宿可以解码。也就是说, 编码节点需要发送额外的 $6m$ Byte 数据。这样, 编码节点需要发送的数据量从原先的 $1300m$ Byte(m 个数据包)减小到只需要发送一个长度为 $1300+6m$ Byte 的编码包, 减少的比例为 $[1300m - (1300+6m)] / (1300m)$ 。在交叉流的数目 $m=2,3,\dots,10$ 时, 减少百分比如图 3 所示。从这个图可以看出, 随着流数目 m 的增大, 字节减少百分比越来越大, 即 NCBEER 算法的节能效率随着流数目的增大显得越来越明显。

值得说明的是, 所有节点不需要向信宿发送额外的数据包, 就可以实现信宿的成功解码。因此, 在 NCBEER 算法中, 编码节点所发送的编码包所增加的额外能耗可以忽略不计。

2.6 算法的复杂度

NCBEER 算法的核心之处在于第 2.3 节所述的从信源到信宿的路由发现以及编码节点的发现过程, 因此, 以下将对这一过程进行复杂度分析。在分析过程中, 以网络中节点的总计算次数(包括比较、判断、复制数据等操作次数)作为度量指标。在 NCBEER 算法中步骤(4)中复杂度最大。设节点总

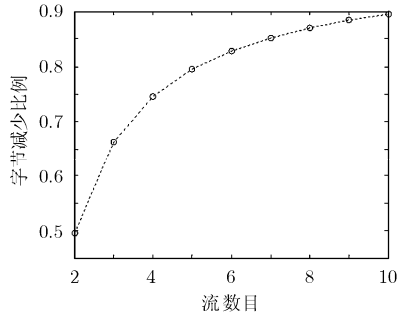


图 3 流数目与减少字节百分比

数为 h , 以 d 表示网络中节点的平均度数即邻居节点平均数, 则节点 u 的上游节点及其邻居节点的总数不超过 $(h-1)d$, 节点 u 的下游节点总数小于 $h-1$ 。于是, 节点 u 判断“编码节点条件”是否满足时所需要的计算次数小于 $(h-1)(h-1)d$ 。考虑到 $d < h$, 因此, 步骤(4)中的步骤 2 的复杂度为 $O(h^3)$ 。由于需要以步骤(4)中的逻辑进行操作的节点总数不超过 $h-1$, 因此, 步骤(4)的复杂度为 $O(h^4)$, 这就是算法 NCBEER 的复杂度。

3 仿真

采用 C++ 语言对 NCBEER 进行仿真并用 MATLAB 语言对仿真结果作图。设节点的通信半径为 15 m; 设 p 为链路传递数据包的成功率。与文献 [11] 相同, 取 $\gamma = 2$, $E_{elec} = 50$ nJ/bit, $E_{amp} = 10$ pJ/(bit · m²)。设网络中共有 30 个节点, 随机分布在

50×50 的区域中(为了确保网络连通性, 采用逐个产生连通节点的方法: 先随机产生一个节点, 再逐个随机产生其它节点, 如果所产生的节点在已有节点的通信范围之内, 则选取这个节点, 否则, 弃掉这个节点)。设所有节点的初始能量都为 100 J, 取每个数据包大小为 1300 Byte^[12]。后述实验结果是仿真程序运行 1000 次所得到的运算结果平均值。

随机选择信源与信宿对, 让流从 4 条增加到 11 条, 每条流从信源到信宿传输的数据量为 10 Mbit, 固定 $p=0.9$, 得到图 4-图 7。固定流数目为 10, 并让 p 变化, 得到图 8 和图 9。

从图 4 可以看出: (1)NCBEER 路由的能耗始终比 SMR 路由的能耗小, 且随着流数目的增大而减小, 这是因为 NCBEER 采用了网络编码, 流数目增大带来了更多的编码机会, 从而减少了节点的发送次数, 进而降低能耗; (2)当流的数目增加到一定程度(在图中流数目达到 9)之后, NCBEER 路由的能耗比 DSR 协议的能耗小。

在给定的流数目的情况下, NCBEER 路由中网络节点的剩余能量优于 SMR 路由, 而与 DSR 路由不相上下(参见图 5)。而且, NCBEER 路由中剩余能量的标准差小于 SMR 和 DSR 路由的剩余能量标准差(参见图 6), 也就是说, 在 NCBEER 路由中, 节点的能耗比较均衡, 因此, 网络生存时间得到延长, 这可以从图 7 看出。这里, 网络生存时间定义为网

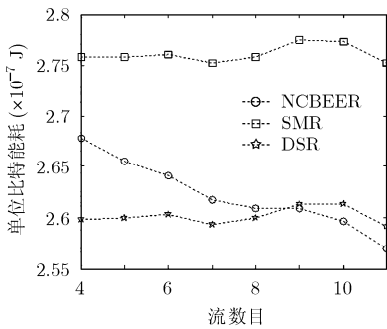


图 4 流数目变化时单位比特能耗

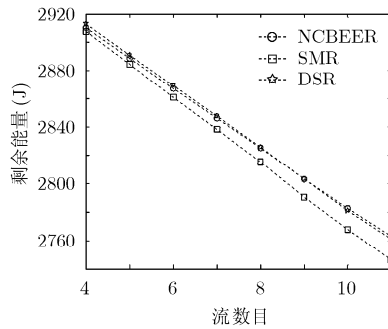


图 5 流数目变化时所有节点总剩余能量

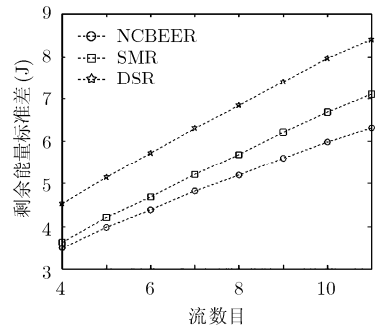


图 6 流数目变化时剩余能量标准差

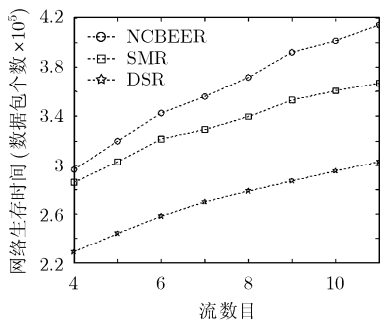


图 7 流数目变化时网络生存时间

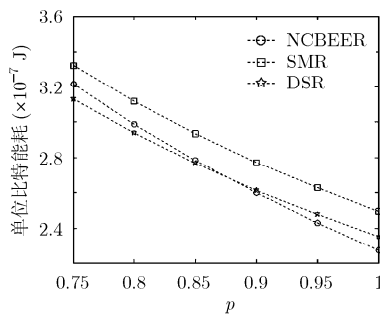


图 8 链路成功率变化时单位比特能耗

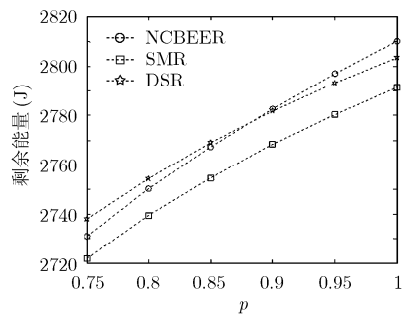


图 9 链路成功率变化时所有节点总的剩余能量

络中第 1 个节点能量耗尽时^[13]网络中所有节点所传递的数据包个数。

需要说明的是：在图 5 中，随着流数目的增大，NCBEER, SMR 和 DSR 这 3 种路由网络节点的剩余能量逐渐减小，这是因为在仿真实验中，每条流需要传输 10 Mbit 数据，从而流越多，能耗开销越大，剩余能量就越小。

从图 8 可以看出：(1)随着链路传递数据包成功率 p 的增大，NCBEER 路由的能耗呈减小趋势；(2)NCBEER 的能耗比 SMR 路由的能耗小；(3)NCBEER 的能耗与 DSR 路由的能耗接近，而且在链路成功率 p 增大到一定程度后，NCBEER 的能耗小于 DSR 路由的能耗，这是因为：在链路成功率 p 较小时，NCBEER 路由需要多次重复多播才能使所有接收节点收到编码包，能量开销较大，而随着链路成功率的增大，重复多播的次数随着减小，因而降低了能耗。从图 9 可以看出：当链路成功传输率到达 0.9 之后，NCBEER 路由的节点剩余总能量比 DSR 路由的节点剩余总能量大。

归纳上述仿真试验结果，我们获得：

(1)在 NCBEER, SMR, DSR 这 3 种路由中，从能耗角度来看，以 SMR 路由最差，而 NCBEER 和 DSR 不相上下；

(2)在链路传递数据包成功率较高或者网络中流数目较大时，NCBEER 路由的能耗优于 DSR 的能耗；

(3)NCBEER 路由的能耗标准差优于 DSR 和 SMR 路由，也就是说，在 NCBEER 路由中节点能量得到均衡消耗，因而使网络生存时间得到了延长。

4 结束语

节能是无线自组织网络的重要研究课题，无线信道的广播特性为实现网络编码技术奠定了基础，本文基于网络编码技术提出 NCBEER 路由算法，它可以捕捉交叉流并让流的交叉点进行网络编码，以此降低节点的能耗并延长网络生存时间。这种方法适用于无线链路传递数据包成功率较高或者网络中流数目较大的无线自组织网络。由于网络编码会给数据包的传递带来额外的时延，将来我们将对 NCBEER 路由的数据包传递时延进行研究。

参考文献

- [1] Fragouli C and Soljanin E. Network coding applications. USA: Now Publisher Inc., 2007.
- [2] Katti S, Rahul H, Hu W, *et al.* XORs in the air: practical wireless network coding. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(3): 497-510.
- [3] Tong J, Du Z, Liu Y, *et al.* Intra-flow network coding based multipath routing protocol for event-driven wireless sensor networks. Proc. 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), Fujian, China, 2009: 62-69.
- [4] Chen Wei, Chen Zhi, Fan Pingyi, *et al.* AsOR: an energy efficient multi-hop opportunistic routing protocol for wireless sensor networks over Rayleigh fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(5): 2452-2463.
- [5] Le Jilin, Lui J C S, and Chiu D M. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(4): 596-608.
- [6] 王静, 刘向阳, 王新梅. k 冗余多播网络中网络编码算法设计与分析. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2411-2415.
- [7] 卢文伟, 朱艺华, 陈贵海. 无线传感器网络中基于线性网络编码的节能路由算法. 电子学报, 2010, 38(10): 1-7.
- [8] Zhu Yi-hua, Wu Wan-deng, Pan Jian, *et al.* An energy-efficient routing algorithm to prolong lifetime of wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010, 33(5): 639-647.
- [9] Lee S and Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in Ad hoc networks. 2001 International Communications Conference, Beijing, China, 2001: 3201-3205.
- [10] Johnson D, He Y, and Maltz D. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile Ad hoc networks for IPv4. IETF RFC 4728. <http://tools.ietf.org/html/rfc4728>, 2007.
- [11] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, and Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [12] Zhu Yi-hua and Leung V C M. Efficient power management for infrastructure IEEE 802.11 WLANs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(7): 2196-2205.
- [13] Tan H O and Korpeoglu I. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks. *SIGMOD Record*, 2003, 32(4): 66-71.

朱艺华：男，1961 年生，博士，教授，博士生导师，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。

唐春光：男，1985 年生，研究方向为网络编码、无线网络路由协议与算法。

田贤忠：男，1968 年生，博士生，副教授，研究方向为网络编码、无线网络协议与算法。