

# 基于网络编码的 Ad Hoc 网络能量感知路由策略

王振朝<sup>1,2</sup> 蔡志杰<sup>1</sup> 薛文玲<sup>1</sup>

(河北大学电子信息工程学院 保定 071002)<sup>1</sup> (河北省数字医疗工程重点实验室 保定 071002)<sup>2</sup>

**摘要** 针对 Ad Hoc 网络终端节点能量受限对全网路由的影响,提出了一种基于网络编码的能量感知路由协议(Energy-aware Routing Protocol for Ad Hoc Network based on Network Coding, ERPNC)。ERPNC 采用数据流速率匹配的方法,利用节点编码机会降低能量消耗,同时通过节点剩余能量值和节点能耗速度预测节点剩余生存时间,并结合路径总能耗和节点剩余生存时间提出新的路由评价函数和路由发现策略。此外,ERPNC 通过引入本地路由维护策略来减少路由断裂和数据包重传情况的发生。仿真结果表明:与其他相关路由协议相比,ERPNC 能够有效降低传输能耗,均衡网络能量消耗,延长网络寿命,提高网络吞吐量。

**关键词** 网络编码,能量感知,剩余生存时间,路由维护策略

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.7.018

## Network Coding Based Energy-aware Routing Protocol for Ad Hoc Network

WANG Zhen-chao<sup>1,2</sup> CAI Zhi-jie<sup>1</sup> XUE Wen-ling<sup>1</sup>

(College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, China)<sup>2</sup>

**Abstract** A network coding based energy-aware routing protocol (ERPNC) was presented to minimize the effect of limited energy supply of end-nodes in Ad Hoc network. ERPNC uses coding opportunities of nodes to reduce the energy consumption by matching rates of data flows, and predicts remaining lifetime of nodes by using residual energy and energy consumption speed of nodes. ERPNC presents a new routing evaluation function and a new routing discovery strategy by combining the total energy consumption of the path and the remaining lifetime of nodes. Moreover, a local routing maintaining strategy was introduced to decrease the occurrence of route interruption and packet retransmission. Simulation results show that, comparing to other routing protocols, ERPNC performs more effectively on decreasing transmitting energy consumption, balancing network energy consumption, prolonging network lifetime and improving network throughput.

**Keywords** Network coding, Energy-aware, Remaining lifetime, Routing maintaining strategy

## 1 引言

Ad Hoc 网络是由一组无基础设施支持的移动终端组成的多跳临时性自治系统。在 Ad Hoc 网络中节点通常采用电池作为电源以满足其轻便、灵巧等便携性要求,而且每个节点都兼具主机和路由器的功能,如果网络中部分节点因能量耗尽而无法正常工作,就有可能导致网络的分割,严重时会造成生存下来的节点无法正常通信,影响整个网络的寿命。在 Ad Hoc 网络应用的领域(如自然灾害和战场),对节点进行随时充电或更换电池是极其困难的,且在当前技术条件下,电池容量平均每 10 年只提高 20% 左右。因此,如何对 Ad Hoc 网络路由协议进行优化,以达到节约节点能耗、均衡网络能量分布、延长网络生存时间的目的,具有重要的研究意义。

传统的 Ad Hoc 网络路由协议如 AODV<sup>[1]</sup>、DSR<sup>[2]</sup> 等没有考虑能量因素。近些年,针对 Ad Hoc 网络终端能量受限

这一缺陷,一些基于能量的路由优化协议<sup>[3-6]</sup>相继被提出。文献[3]提出的路由协议采用多跳短距离(小功率)路径替代少跳长距离(大功率)路径,尽管在一定程度上降低了链路传输总能耗,但在实际应用中,网络中部分关键节点会因过度使用而耗尽能量,导致网络过早发生分割。文献[5]提出的路由协议 EARP 引入相关阈值概念,将网络相对剩余能量划分区间,不同区间采用不同的路由选择策略,该协议在均衡负载、保护低能量节点的性能上有一定改善,但是路由的性能受到所设置阈值的影响,并且节点相对剩余能量并不能反映节点能量的变化趋势。

Ahlsweede 等人于 2000 年首次提出了网络编码(Network Coding)的概念<sup>[7]</sup>,即网络中间节点既能实现传统路由的“存储-转发”功能,又能实现对信息的编码处理。网络编码可以为网络提供多方面的好处,例如提升网络吞吐量、均衡网络负载、降低传输能耗等。近几年,将网络编码应用于路由协议,

到稿日期:2015-11-22 返修日期:2016-01-18 本文受河北省自然科学基金项目(F2014201168),河北大学研究生创新资助项目(X2015086)资助。  
王振朝(1958-),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网和工业数据通信, E-mail: 786657713@qq.com; 蔡志杰(1992-),女,硕士生,主要研究方向为网络编码和无线自组网; 薛文玲(1975-),女,博士生,副教授,主要研究方向为网络通信、无线通信。

充分利用网络编码机会改善路由性能已成为路由协议的研究热点<sup>[8-14]</sup>。文献[12]提出的路由协议 COER 和文献[13]提出的路由协议 NEMR 均利用网络编码机会降低能量的消耗,但是在计算节点开销时,它们仅考虑节点编码机会存在与否,忽略了流经节点的数据流传输速率匹配这一因素对节点开销的影响。

基于以上分析,本文提出了一种新的 Ad Hoc 网络能量感知路由协议 ERPNC。在路由发现过程中,本协议通过编码条件感知节点编码机会,同时采用速率匹配的方法结合编码机会降低能耗,尽量选择一条总能耗较低的路径;为了解决节点剩余能量不能反映节点能量变化趋势这一问题,本协议提出了一种预测节点剩余生存时间的方法,尽量选择节点剩余生存时间较长的路径。在路由维护过程中,当节点的预测剩余生存时间低于设定的门限值时,启动本地路由维护策略。

## 2 网络编码条件

文献[9]提出了一种分布式编码感知路由协议 DCAR,它将路由发现过程和编码机会的寻找过程结合在一起,并且允许编码节点的任一下游节点充当解码节点,因为放宽了解码节点的要求,DCAR 可以充分发现路径中的编码机会,因此本文采用文献[9]中给出的编码条件。

无线通信网络中, $D(a, F)$ 和 $U(a, F)$ 分别表示节点 $a$ 在数据流(简称为“流”) $F$ 上的上游节点集合和下游节点集合, $a \in F$ 表示节点 $a$ 是流 $F$ 上的节点, $N(a)$ 表示节点 $a$ 的一跳邻居节点集合。如果两条流 $F_1$ 和 $F_2$ 相交于节点 $c$ ,则流 $F_1$ 和流 $F_2$ 可以在节点 $c$ 编码,并且编码包可以被下游节点解码的充分必要条件<sup>[9]</sup>如下:

- (1)存在 $v_1 \in D(c, F_1)$ ,满足: $v_1 \in N(v_2), v_2 \in U(c, F_2)$ ;  
或者 $v_1 \in U(c, F_2)$ ;
- (2)存在 $v_3 \in D(c, F_2)$ ,满足: $v_3 \in N(v_4), v_4 \in U(c, F_1)$ ;  
或者 $v_3 \in U(c, F_1)$ 。

如图1所示,两条数据流 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ 和 $5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ 分别传送数据包 $P_1$ 和 $P_2$ ,它们在节点3处交叉。由上述编码条件可知,两条流可以在节点3处编码(异或操作),并且目的节点4和7可由侦听到的数据包和接收到的编码包解出数据包 $P_1$ 和 $P_2$ 。

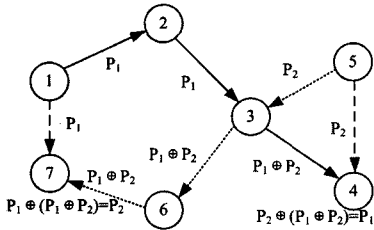


图1 编码机会实例

文献[15]证明了3条以上数据流的可编码概率是非常低的,并且远低于两条数据流的可编码概率,因此本文只考虑两条数据流进行编码的情况。

## 3 路由策略

### 3.1 路由评价标准

通过节点传输代价函数计算传输能耗,并结合预测的节点剩余生存时间提出一种新的能量感知路由评价函数。

#### 3.1.1 节点传输代价

在路由发现阶段采用上面的编码条件主动感知编码节点,并用节点传输代价函数表示节点传输路径请求数据分组(RREQ)所需的开销。忽略数据流传输速率匹配这一因素,当RREQ在节点 $u$ 存在编码机会时,分组以编码包的形式搭载在其他流上,不需要额外的传输,此时为0;反之,无编码机会时节点传输代价为1。但在实际无线网络中,节点开销还受数据流传输速率的影响。当RREQ在节点 $u$ 感知到可与它编码的数据流 $f$ 时,需要判断数据流 $f$ 的可匹配编码速率值,这是因为当 $f$ 的数据流速小于请求数据流速,或当已经存在可编码数据流,使得 $f$ 的剩余可编码流速小于请求数据流速时,新数据流就不能完全搭载在数据流 $f$ 上。因此,综合编码机会和数据流传输速率匹配等因素,节点传输代价函数如式(1)所示。

$$Cost(u) = \begin{cases} 1, & \text{无编码机会} \\ \frac{r_{new} - r_{ana}}{r_{new}}, & \text{存在编码机会且 } r_{new} > r_{ana} \\ 0, & \text{存在编码机会且 } r_{new} \leq r_{ana} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $r_{new}$ 为数据流请求速率,储存在RREQ中; $r_{ana}$ 为节点 $u$ 上可与请求数据流编码的其他数据流的可匹配编码速率,每个节点储存流经自身每条流的可匹配编码速率值。

#### 3.1.2 路径消耗总能量

本文采用文献[5]中的能耗模型。节点 $u$ 传送 $m$ 个单位的数据包需要消耗的能量如式(2)所示,接收节点 $v$ 接收 $m$ 个单位的数据包的能耗如式(3)所示,其中 $E_{elec}$ 为节点在发送和接收数据过程中内部电路的能耗, $E_{amp}$ 为放大信号所消耗的能量, $d$ 为发送节点与接收节点之间的距离。

$$E_{send}(m, d) = m(E_{elec} + E_{amp}d^2) \quad (2)$$

$$E_{rec}(m) = mE_{elec} \quad (3)$$

考虑发送节点 $u$ 处可能存在的编码机会对能耗的影响,则节点 $u$ 选择 $v$ 所形成的链路传输 $m$ 个单位的数据包消耗的能量为:

$$E(l) = E_{send}(m, d) \times Cost(u) + E_{rec}(m) \quad (4)$$

在一条数据传输的完整路径 $P$ 中,有:

$$E(P) = \sum_{l \in P} E(l) \quad (5)$$

#### 3.1.3 节点剩余生存时间

Ad Hoc 网络路由协议大多只考虑节点剩余能量这一参数来均衡节点能量消耗。在这类协议中,当某节点有较多能量时,它对接收到的路由请求分组均作转发处理,这将使大量的数据流在短时间内流经该节点。为避免这些节点可能因能量迅速耗尽而导致网络过早出现分区现象,本文将节点能量消耗速度考虑在内,提出了一种预测节点剩余生存时间的方法。

每隔周期 $\tau$ ,各个节点均更新一次自身的剩余生存时间,预测节点剩余生存时间的具体计算步骤如下。

步骤1 节点在第 $i$ 个周期内的能量消耗速度为:

$$R(i) = \frac{E_{residual}(i-1) - E_{residual}(i)}{\tau} \quad (6)$$

其中, $E_{residual}(i)$ 为经过 $i$ 个周期后节点的剩余能量,可由式(7)计算得出。

$$E_{residual} = E_{current} - N_{buffer} \times \frac{E_{send}(m, d)}{m} \quad (7)$$

其中, $E_{current}$ 为节点当前能量值。减号后面部分为节点发送

存数据所需消耗的能量,其中  $N_{buffer}$  为节点缓存的发送数据总量,  $E_{send}(m,d)/m$  为节点发送单位数据信息的能耗,可由式(2)求得。

步骤 2  $i$  个周期后,节点预测的剩余生存时间为:

$$T_{residual}^i = \alpha \times \frac{E_{residual}(i)}{R(i)} + (1-\alpha) \times (T_{residual}^{i-1} - \tau) \quad (8)$$

其中,  $\alpha$  为调整系数,本文取 0.5。

### 3.1.4 路由评价函数

通过以上分析,提出了一种基于能量的综合路由评价函数:

$$M(P) = \frac{E(P)}{\min_{n_j \in P} [T_{residual}(t)]} \quad (9)$$

其中,  $E(p)$  为路径  $P$  消耗的总能量,由式(1)一式(5)决定;将路径  $P$  上具有最短预测剩余生存时间的节点作为标记节点,  $\min_{n_j \in P} [T_{residual}(t)]$  为标记节点的预测剩余生存时间。

用  $M(P)$  作为路由评价函数时,在可选路径集  $\Lambda$  中选出一条  $M(P)$  值最小的路径  $P'$ :

$$M(P') = \min_{P \in \Lambda} M(P) \quad (10)$$

该路由评价函数选出来的路径一方面可以使路径总能耗较小;另一方面,尽量选择标记节点的预测生存时间较长的路径,从而更好地起到保护低能量节点、均衡网络能量消耗以及延长网络生存时间的作用。

### 3.2 路由发现过程

步骤 1 源节点广播一个 RREQ 分组开始路由发现过程。除基本路由信息外, RREQ 还增加了图 2 中所示的 4 项路由信息:  $r_{new}$ , 为数据流请求速率; Coding Information, 存储 RREQ 经过的每个节点的编码情况和传输代价,源节点不存在编码机会,传输代价为 1;  $E(p)$ , 为其经过路径的能耗,初始值为 0;  $\min_{n_j \in P} [T_{residual}(t)]$ , 为其所经路径的最小节点剩余时间,初始值为  $\infty$ 。

$r_{new}$	Coding Information	$E(p)$	$\min_{n_j \in P} [T_{residual}(t)]$
-----------	--------------------	--------	--------------------------------------

图 2 RREQ 增加的路由信息

步骤 2 接收到 RREQ 分组的中间节点需完成以下几步。

1) 检查该 RREQ 分组是否经过环路,若经过环路则丢弃该分组,否则临时存储该分组。

2) 更新该 RREQ 分组所经过路径的能耗值  $E(p)$ , 并依据自身存储的能量信息更新  $\min_{n_j \in P} [T_{residual}(t)]$ ; 计算该 RREQ 分组经过路径的  $M(p)$  值; 感知编码机会, 根据速率匹配结果计算传输代价, 并将这些信息存储在该 RREQ 分组中。

3) 根据自身在路由发现过程中接收 RREQ 分组的个数, 分两种情况讨论。

情况 1: 如果该 RREQ 分组是其接收到的第一个 RREQ 分组, 则存储该 RREQ 经过的路径, 并把它作为当前最好的路径  $p_0$ , 然后继续广播该 RREQ 分组。

情况 2: 如果该 RREQ 分组不是其接收到的第一个 RREQ 分组, 并且  $M(p) < M(p_0)$ , 则当前最好的路径  $p_0$  被  $p$  更新, 继续转发该 RREQ 分组; 如果  $M(p) \geq M(p_0)$ , 则  $p_0$  不被更新, 并丢弃该 RREQ 分组。

步骤 3 目的节点在时间  $T$  内接收多个 RREQ 分组后, 选择其中最好的路径  $P_L$  ( $M$  值最小的路径) 作为请求数据流的传输路径, 然后生成路由回复分组 RREP, RREP 沿着与路径  $P_L$  相反的路径单播至源节点。

步骤 4 接收到 RREP 分组的中间节点首先更新路由表, 然后根据 RREP 分组中存储的节点编码信息更新流经自身数据流的可匹配编码速率值。

步骤 5 源节点收到 RREP 分组后就开始沿着路径  $P_L$  传输数据分组。

### 3.3 本地路由维护策略

当网络中的节点能量不足时, 节点所在链路会发生断裂, 严重时会导致数据传输的中断。在本文的能量优化路由策略中, 节点可以预测自身的剩余生存时间, 参照文献[5]的路由维护思想, 当节点的剩余生存时间低于门限值  $T_h$  而即将导致链路断裂时, 本地路由维护策略被触发, 该节点通过与邻居节点交互信息, 寻找替代链路, 来避免路由中断。图 3 为本地路由维护策略的触发过程。

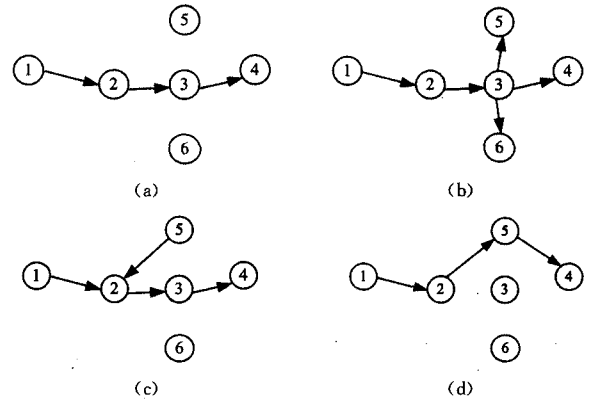


图 3 路由维护策略

如图 3(a) 所示,  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$  为一条完整的传输路径。如果在数据传输过程中, 节点 3 的剩余生存时间低于  $T_h$ , 节点 3 就会启动本地路由维护策略。如图 3(b) 所示, 首先, 节点 3 向邻居节点发送路由请求分组 RREQ, 邻居节点 5 和 6 接收到 RREQ 后, 查找自身路由表中是否存在可以替代节点 3 的路由, 若存在, 则检查节点的剩余生存时间是否大于  $T_h$ 。若节点 5 符合条件, 如图 3(c) 所示, 则节点 5 通知节点 3 的上游节点 2 更改新路径, 这样节点 2 更换剩余生存时间较长的节点 5 完成数据传输, 如图 3(d) 所示, 从而避免了路由断裂和数据重传。

### 3.4 复杂度分析

本文提出的 ERPNC 协议的复杂度主要由路由评价函数  $M(P)$  产生, 而  $M(P)$  的复杂度由路径消耗总能量  $E(P)$  和节点剩余生存时间  $T_{residual}$  决定。在  $E(P)$  的计算过程中, 与已有的 COER 协议一样, 运算复杂度主要由网络编码机会判定产生, 只是每个节点需额外存储流经自身每条流的可匹配编码速率值。假设网络中节点个数为  $N$ , 每个节点可储存的数据流个数为  $Q$ , 每个节点的邻居节点个数为  $b$ , 数据流的平均传输时间为  $h$ , 则编码机会判定的运算复杂度为  $O(N^{2bh} Q^2)$ 。此外, ERPNC 比 COER 还增加了预测节点剩余生存时间的复杂度, 因为其只是简单的四则运算, 所以计算复杂度为  $O(N)$ , 并且节点只需额外存储上一个周期的剩余能量值和预

测剩余生存时间值。

可以看出,虽然 ERPNC 协议的节点运算复杂度和所需存储空间有所增加,但是对于目前 Ad Hoc 网络中节点的计算存储能力,这是完全可以承受的。

#### 4 实验仿真与结果分析

本文采用 Matlab 仿真软件对 AODV、COER 以及本文提出的 ERPNC 路由协议进行模拟仿真,并对仿真结果进行分析比较。实验场景设置为:在  $300\text{m} \times 300\text{m}$  的模拟矩形区域中随机分布 50 个无线节点,节点的最大传输距离是 30m,每个节点以固定速率做随机运动,移动速率在 0m/s 到 5m/s 之间,每个节点的初始能量为 50J,取  $E_{dec}$  为  $40\text{nJ/bit}$ ,  $E_{amp}$  为  $10\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$ ,链路带宽为 2Mbit/s。预测节点剩余生存时间的周期  $\tau$  设为 5s,  $T_h$  设为 10s。网络初始数据流数为 0,每隔 10s 产生一条流速于 0.8Mbit/s~1.2Mbit/s 之间变化的数据流,流数从 1 增加到 10,仿真时间为 100s。受文献[12]启发,进行以下 4 组实验。

图 4 描绘了 3 种路由协议随数据流数增加平均每条流单位时间消耗能量的对比情况。由图可见:AODV 协议未考虑节点编码机会,数据流不能搭载在其他流上,平均能耗最大;COER 和 ERPNC 协议存在编码机会,平均每条流在单位时间内的能耗低于 AODV;数据流越多,编码机会也随之增多,所以 COER 和 ERPNC 平均每条流在单位时间内的能耗逐渐降低;ERPNC 由于考虑了流速匹配对节点传输代价的影响,其性能要好于 COER。

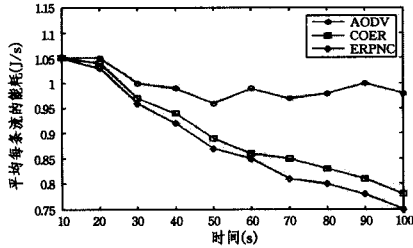


图 4 数据流增多时平均每条流在单位时间内的能耗对比

图 5 示出 3 种协议的网络节点剩余能量方差的对比情况。

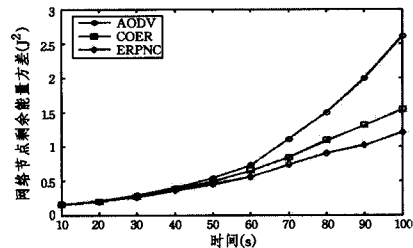


图 5 数据流增多时网络节点剩余能量方差的对比

可以看出:随着网络运行时间的增长以及业务量的增加,3 种协议的网络节点剩余能量分布都变得不平衡;ERPNC 和 COER 由于考虑了节点剩余能量,因此节点剩余能量分布比 AODV 更均衡;ERPNC 的节点剩余能量分布比 COER 均衡,这是因为:1)ERPNC 考虑了节点能耗速度和剩余生存时间,避免了一些剩余能量多的节点因大量数据流在短时间内聚集而能量迅速耗尽的现象;2)ERPNC 引入的本地路由维护策

略可以保护剩余生存时间较低的节点,进一步均衡了网络能耗。

本实验采用网络中死亡节点数与时间的对应关系来描述网络生存时间的长短。图 6 描绘了使用 3 种协议时网络产生死亡节点数随时间变化的情况。在网络建设初期,节点能量充足,业务流量较少,不会有节点死亡;随着时间的推移,AODV 最早产生死亡节点,COER 产生死亡节点的时间也要比 ERPNC 早,这说明 3 种协议中 ERPNC 的网络生存时间最长。

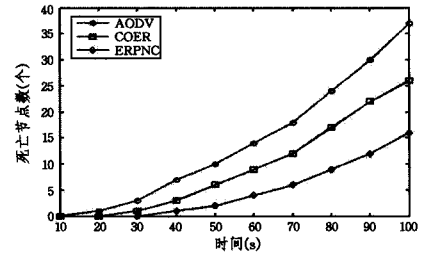


图 6 数据流增多时网络死亡节点个数的对比

图 7 示出 3 种协议的网络吞吐量的对比情况。通过观察可知:网络建设初期,3 种协议的网络吞吐量曲线整体区分并不是非常明显;随着数据流的增多,网络负荷开始增大,此时拥有较多编码机会的 COER 和 ERPNC 的优势开始体现,因为具有编码机会的节点可以使一条数据流搭载在另一条数据流上,使节点一次传输的数据量增加;由于 ERPNC 考虑了数据流速率匹配因素,与 COER 相比更能充分利用编码机会,此外,由图 6 可知,ERPNC 的网络生存时间最长,死亡节点数最少,这也在一定程度上减小了网络的堵塞程度,因此,ERPNC 的网络吞吐量要高于 COER。

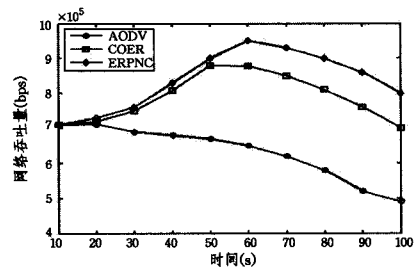


图 7 数据流增多时网络吞吐量的对比

**结束语** 本文针对 Ad Hoc 网络中节点能量受限这一缺陷,提出了一种能量感知路由策略 ERPNC。ERPNC 通过编码条件感知节点编码机会,并采用数据流速率匹配的方法,利用编码机会降低能耗,同时通过节点的剩余能量值和节点能耗速度预测节点剩余生存时间。ERPNC 提出的路由评价标准和路由发现策略可以选择一条能耗较小且节点剩余生存时间较长的路径。为了有效减小由于部分节点的剩余生存时间过短而引起的路由断裂和数据重传情况的发生概率,ERPNC 还引入了一种本地路由维护机制。仿真结果表明,与其他路由协议相比,ERPNC 可以有效降低路径传输能耗,均衡网络能量消耗,延长网络生存时间,提高网络吞吐量。

#### 参考文献

- [1] Perkins C E, Royer E M. Ad Hoc on-demand distance vector routing[C]//The Second IEEE Workshop on Mobile Computing

- System and Application. IEEE, 1999;90-100
- [2] Zhong Ying-ji, Yuan Dong-feng. Dynamic source routing protocol for wireless Ad Hoc networks in special scenario using location information[C]// International Conference on Communication Technology. IEEE, 2003;1298-1290
- [3] Mahfoudh S, Minet P. An energy efficient routing based on OLSR in wireless ad hoc and sensor networks[C]// International Conference on Advanced Information Networks and Applications. IEEE, 2008;1253-1259
- [4] Sun Bao-lin, Gui Chao, Liu Peng-yuan. Energy entropy multipath routing optimization algorithm in MANET based on GA [C]// The Fifth IEEE International Conference on Bio-inspired Computing; Theories and Applications (BIC-TA 2010). IEEE, 2010;943-947
- [5] Zheng Shi, Wu Wei-qiang, Zhang Qin-yun, et al. Routing protocol based on energy aware in ad hoc networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(4): 9-16 (in Chinese)  
郑石, 吴伟强, 张钦宇, 等. 基于能量感知的 Ad hoc 路由算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(4): 9-16
- [6] Gao Li, Zhan Tao, Wang Fang. Balance routing protocol based on game theory for Ad Hoc networks [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(2): 323-327 (in Chinese)  
高丽, 詹涛, 汪芳. 基于博弈论的 Ad Hoc 网络均衡路由协议[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(2): 323-327
- [7] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [8] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: Practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 487-510
- [9] Le J, Lui J C S, Chiu D M. DCAR: Distributed coding-aware routing in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 596-608
- [10] Chen Chen, Dong Chao, Mao Ya-fei, et al. Survey on network-coding-aware routing in wireless network [J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 82-87 (in Chinese)  
陈晨, 董超, 茅娅菲, 等. 无线网络编码感知路由综述[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 82-87
- [11] Gu Yan, Han Han, Li Xue-jie, et al. Network coding-aware routing protocol in wireless mesh networks [J]. Tsinghua Science and Technology, 2015, 20(1): 40-49
- [12] Tian Xian-zhong, Zhu Jin-feng, Chen Qun. Coding-aware based optimal energy routing algorithm in wireless networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(9): 1304-1311 (in Chinese)  
田贤忠, 朱金凤, 陈群. 无线网络中基于编码感知的能量优化路由算法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(9): 1304-1311
- [13] Shao Xing, Wang Cui-xiang, Xiang Hui-hui, et al. Network coding based energy efficient multicast routing for wireless sensor network [C] // IEEE Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). IEEE, 2013; 293-296
- [14] Li Tao-shen, Zeng Ming-fei, Ge Zhi-hui. New multicast routing algorithm based on network coding [J]. Computer Science, 2010, 37(7): 122-124 (in Chinese)  
李陶深, 曾明霏, 葛志辉. 一种基于网络编码的组播路由算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(7): 122-124
- [15] Wang Wei-ping, Wu Wei, Guan Qing-juan. TCAR: A new network coding-aware routing mechanism based on local topology detection [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(8): 3178-3185

(上接第 72 页)

率很大的图像数据,其包含的信息很大,使用本文的方法寻找最优分块将会很耗时,不能实时地得到融合结果,因此就大数据图片,调高算法的效率,也是未来的一个研究方向。

(5)在图像融合领域中,至今为止尚未出现公认的客观评价方法,每一个客观评价方法都有其缺陷,并不能完全取代主观评价。为此,非常有必要对图像融合质量的客观评价方法进行深入的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 才溪. 多尺度图像融合理论与方法[M]. 北京:电子工业出版社, 2014
- [2] 冈萨雷斯. 数字图像处理(MATLAB版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2014
- [3] Li Shu-tao, Kwok J T, Wang Yao-nan. Combination of images with diverse focuses using the spatial frequency [J]. Information Fusion, 2001, 2(3): 169-176
- [4] Petrovic V S. Multi-sensor Pixel-level Image Fusion [D]. University of Manchester, 2001; 52-58
- [5] Wang G F, Zhao L, Chen Z. Adaptive image fusion algorithm of SAR/CCD images based on wavelet transform [C] // Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation. 2006; 9694-9697
- [6] Li M, Wu S J. Multi-focus image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy [C] // Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing. Nanjing, China, December 2003; 951-955
- [7] Aslantas V, Kurban R. Fusion of multi-focus images using differential evolution Algorithm [J]. Expert Systems with Applications; An International Journal, 2010, 37(12): 8861-8870
- [8] AlZubi S, Islam N, Abbod M. Multiresolution analysis using wavelet, ridgelet and curvelet transforms for medical image segmentation [J]. Journal of Biomedical Imaging, 2011, 2011: 1-18
- [9] Wu Zhi-feng, Huang Hou-kuan, Zhang Ying. A differential evolution algorithm with double trial vectors based-on Boltzmann mechanism [J]. Journal of Nanjing University, 2008, 44(2): 195-203 (in Chinese)  
武志峰, 黄厚宽, 张莹. 基于 Boltzmann 机制的双子代竞争差分演化算法[J]. 南京大学学报, 2008, 44(2): 195-203
- [10] Wu Zhi-feng, Huang Hou-kuan. A modified differential evolution with two trial Vectors [J]. Computer Science, 2007, 34(8A): 111-115