

一种基于地理位置信息的无线传感器网最小能耗路由算法

侯惠峰 刘湘雯 于宏毅 胡捍英

(解放军信息工程大学通信工程系 郑州 450002)

摘要: 提高能量有效性是无线传感器网络(WSN)设计的主要目标之一,采用能量有效路由协议是提高 WSN 能量有效性的一种重要手段。该文提出了一种面向无线传感器网络的最小能耗(MEC)路由算法——GLB-DMECR。该算法采用了新颖的 MEC 路由思想,即利用理想的最小能耗路径来引导路由选择过程,从而发现实际的 MEC 路径;该算法采用分布式、基于局部网络状态信息的路由决策机制,具有良好的稳定性和可扩展性;该算法充分挖掘了节点地理位置信息在路由中的效用,利用地理位置信息实现路由而不需要网络付出过多的额外代价。该算法具有较低的实现复杂度。仿真结果说明,其最小能耗性能在非常广的网络环境下要优于或等同于现有典型同类算法。

关键词: 无线传感器网络;地理位置;最小能耗;路由算法

中图分类号: TN919.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0177-05

A Minimum Energy Consumption Routing Algorithm Based on Geographical Location Information for Wireless Sensor Networks

Hou Hui-feng Liu Xiang-wen Yu Hong-yi Hu Han-ying

(Dept. of Communication Engineering, University of Information Engineering P.L.A., Zhengzhou 450002, China)

Abstract: High energy efficiency is one of the most important requirements for Wireless Sensor Network (WSN) design, and energy efficient routing is an important measure to achieve this goal. In this paper, a routing algorithm is proposed for WSN, GLB-DMECR, which adopts the Minimum Energy Consumption (MEC) as the metric. Comparing with other algorithms, GLB-DMECR has three obvious features: Firstly, GLB-DMECR adopts a novel routing idea, that is, the ideal MEC path is used to guide the routing procedure to find a practical MEC path. Secondly, GLB-DMECR adopts a decentralized and localized routing decision mechanism, which makes it more stable and scalable. Finally, GLB-DMECR exploits the utility of nodes' Geographic Location Information (GLI) in routing and it adds little burden to the network. The implementation of GLB-DMECR is relatively simple, and it has been verified by simulation that the MEC performance of GLB-DMECR is better than or equivalent to that of present other typical MEC algorithms under wide network circumstances.

Key words: Wireless sensor networks; Geographical location; Minimum energy consumption; Routing algorithm

1 引言

提高能量有效性是无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的主要设计目标之一^[1,2],采用能量有效路由协议是提高WSN能量有效性的重要途径。在Ad hoc网络和WSN的能量有效路由协议中,最小能耗(Minimum Energy Consumption, MEC)路由是一个重要分支,它追求数据端到端(End to End, E2E)传输的最小能耗,在传输单个数据分组的过程中具有最高的网络能量效率,但由于它可能造成网络不同节点或区域间能量消耗的不均衡,并最终引起网络分割和覆盖损失等问题^[3,4],因此在以往研究中并未曾得到重视。在WSN中,由于能耗均衡可以通过其它一

些机制辅助实现或回避,如移动sink节点^[5]、数据聚合处理^[4]、节点布设密度(能量)控制等,如果将MEC路由与这些策略结合采用,既追求网络的能耗均衡,又追求能耗均衡基础上的最小网络能耗,从而最大化网络能量效率,则MEC路由将不失为一种良好的选择。

近年来,利用地理位置信息的路由协议在Ad hoc网络中得到了很大发展^[6,7]。地理位置信息对于降低路由协议的控制开销,提高路由协议的可扩展性具有非常重要的意义。随着小型化、廉价、低功耗GPS接收机的推广以及其它本地定位技术的发展,地理路由在无线Ad hoc网络中将具有越来越广阔的发展空间,一些研究者将其看作是能量和处理资源严重受限的Ad hoc网络最有前途的解决方案之一^[8]。另外,由于地理位置信息对于许多WSN应用来讲是完全必需的,利

2005-06-27 收到, 2006-02-14 改回

国家自然科学基金(60472064)和河南省自然科学基金(0511010700)资助课题

用该信息进行路由并不需要对系统提出过多的额外要求,因此,在WSN中采用地理路由具有良好的前提条件。

本文提出了一种面向WSN的基于地理位置信息的最小能耗路由算法GLB-DMECR。在理论层面,该算法基于“多跳中继+发射功率调整”的基本思想来优化E2E能耗,并且采用了一种新颖的路由策略,即利用理想MEC路径引导实际路由选择过程,从而发现实际的MEC路径;在实现层面,该算法充分挖掘了节点地理位置信息的效用,并且采用了分布式、基于局部网络状态信息的路由决策机制,既不需要网络付出太多的额外代价,又具有良好的稳定性和可扩展性,非常适合WSN无中心控制、节点易失效、网络规模大等特点。

论文的主要结构如下:第2节论述了该算法的基础理论问题;第3节介绍了算法实现方面的有关问题;第4节对该算法的性能进行了仿真分析,并与其它几个同类算法的性能进行了比较;第5节为结束语。

2 GLB-DMECR 理论基础

2.1 节点能耗模型

本文采用文献[9,10]等文献中广泛采用的节点能耗模型。即

$$P(d) = P_{tx}(d) + P_{rx} \quad (1)$$

$$P_{tx}(d) = (\alpha_{11} + \alpha_2 d^n) r \quad (2)$$

$$P_{rx} = \alpha_{12} r \quad (3)$$

其中 α_{11} , α_{12} , α_2 分别为发射机基带电路、接收机电路和发射机放大电路的能耗参数; n 为信道衰减指数(取值范围通常为2~5); r 是数据传输速率; $P_{tx}(d)$ 为当通信距离为 d 时,为使接收机能正确接收,发射机所需的最小功耗; P_{rx} 为接收机功耗(与距离 d 无关)。在此条件下,距离为 d 的一跳传输所需的最小功耗 $P(d)$ 为

$$P(d) = (\alpha_{11} + \alpha_2 d^n + \alpha_{12}) r \equiv (\alpha_1 + \alpha_2 d^n) r \quad (4)$$

2.2 多跳中继总功耗的优化

由式(2)可以看出,发射功耗 $P_{tx}(d)$ 与通信距离 d 之间存在非线性关系,当 d 比较大时,一跳传输并不利于节省通信功耗,而采用多跳中继方式并根据每一跳的距离合理调整节点的发射功率,在许多情况下将有助于降低端到端总功耗。假定S-D之间的距离为 d ,为降低E2E能耗,在S-D之间引入 $K-1$ 个中继节点,采用 K 跳传输,其中每跳传输距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_K 。如图1所示。

根据式(4),将每一跳传输功率都调整到最小值,则多跳传输所需的E2E总功耗为

$$P_{\text{relay}}(d) = \sum_{i=1}^K P(d_i) \quad (5)$$

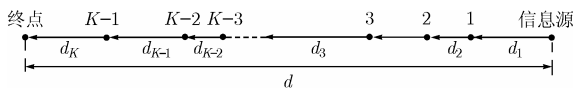


图1 K跳传输

那么,为了使 $P_{\text{relay}}(d)$ 最小,S-D之间应当采用几跳传

输?每一跳的传输距离又为多大?对此,文献[10]通过其中的两个定理给出并证明了理想情况下的结论。

定理1 在S-D距离 d 和跳数 K 给定的情况下,当每一跳的距离都相等且等于 d/K ,即源、目的和所有中继节点都在同一条直线上,且相邻两节点之间距离完全相同时,E2E总功耗 $P_{\text{relay}}(d)$ 最小。

定理2 最优跳数 K_{opt} 总是 $\lfloor d/d_{\text{char}} \rfloor$ 或 $\lceil d/d_{\text{char}} \rceil$ 二者之一。其中 d_{char} 为特征距离,它独立于 d ,且表示为 $d_{\text{char}} = \sqrt[n]{\alpha_1 / (\alpha_2(n-1))}$, $\alpha_1 = \alpha_{11} + \alpha_{12}$ 。

定理2只给出了最优跳数 K_{opt} 与 d 之间较为松散的关系,即 $K_{\text{opt}} = \lfloor d/d_{\text{char}} \rfloor$ 或 $\lceil d/d_{\text{char}} \rceil$,对此我们又作了进一步改进,即:

定理3 给定节点的能耗参数 α_s ,信道衰减系数 n 以及由此得出的特征距离 d_{char} ,存在一系列距离门限 $D_{12}^*, D_{23}^*, \dots, D_{i(i+1)}^*, \dots$,其通项为

$$D_{i(i+1)}^* = d_{\text{char}} \cdot \sqrt[n]{(n-1) / (i^{(1-n)} - (i+1)^{(1-n)})} \quad (6)$$

理想情况下, d 与 K_{opt} 之间的严格关系为

(1)若 $0 < d \leq D_{12}^*$,则 $K_{\text{opt}} = 1$;

(2)若 $D_{(i-1)i}^* < d \leq D_{i(i+1)}^*$, $i = 2, 3, 4, \dots$,则 $K_{\text{opt}} = i$ 。

即 $D_{i(i+1)}^*$ 是 i 跳和 $i+1$ 跳之间的距离门限。

通过比较不同跳数 K 情况下 $K(\alpha_1 + \alpha_2(d/K)^n)$ 的取值,可以对定理3进行证明,受篇幅所限,此处不在赘述。

在得出理想最优跳数的情况下,E2E最小功耗为

$$P_{\text{relay_min}}(d) = K_{\text{opt}}(\alpha_1 + \alpha_2(d/K_{\text{opt}})^n) \quad (7)$$

2.3 理想MEC路径引导下的路由选择

从上述分析可以看出,给定节点能耗模型及S-D距离 d ,存在一个最优跳数 K_{opt} ,当所有 $K_{\text{opt}} - 1$ 个中继节点正好位于S-D间的 K_{opt} 等分点位置时,S-D的E2E总功耗最小。本文将由S,D以及 $K_{\text{opt}} - 1$ 个这样的中继节点组成的路径称为理想最优路径,在理想最优路径下得到的E2E能耗称为理想最小能耗。

然而,在实际的网络环境中,受节点密度的限制,在每个 K_{opt} 等分点的位置恰好找到中继节点往往是不太现实的,因此,实际路径与理想最优路径必然会存在一定的差别。尽管如此,理想最优路径却为我们提供了一个重要启示:如果选择的每一个实际中继节点与理想最优路径的每一个 K_{opt} 等分点都最接近,则实际路径与理想最优路径也最接近,实际的E2E能耗也必然会最接近理想的最小能耗。理想最优路径为我们提供了所有中继节点的最优位置,选择最接近最优中继位置的节点作为中继节点,从而最大限度地降低E2E能耗,这正是GLB-DMECR的基本思想。

3 GLB-DMECR 实现

3.1 基于局部网络状态信息的分布式决策

在实际网络环境下,中继节点与理想最优位置的偏差不仅会影响到当前一跳的能量消耗,而且会对后续转发过程的

能量消耗产生影响。为了消除后者，另外还充分考虑到算法的稳定性和可扩展性，本文在GLB-DMECR实现的过程中，采用了一种“基于局部网络状态信息进行分布式决策”的路由决策方式。在该方式下，每个节点都可以通过特定的定位机制(如GPS)掌握自己的地理位置信息，每个节点通过周期性地与一跳邻节点之间的交互，可以掌握自己一跳范围内所有邻节点的地理位置信息，另外，sink节点的地理位置信息固定且为网络中所有节点已知，根据该局部网络状态信息(节点自己、所有一跳邻节点及sink节点的位置信息)，每个节点都可以独立地进行决策，选择自己的最优下一跳。考虑到GLB-DMECR实现的简单性，每个节点在选择最优下一跳的过程中，都基于一种简单的度量准则——单纯偏离欧氏距离(r)准则，即以邻居节点到最优中继位置的欧氏距离 r 作为度量二者接近程度的指标，选择距离最优下一跳位置最近的邻节点作为下一跳。下面以图2为例来说明GLB-DMECR路由过程。

在本例中，节点A要向节点B(通常为sink)发送一个数据分组，则路径上每个节点的处理过程如下：

(1) 节点A根据自己和目的节点B的地理位置信息，计算AB之间的距离并根据2.2节所述方法计算到B的理想最优跳数 K_{opt} (本例中为3)；

(2) 节点A根据自己和目的节点B的地理位置信息，计算AB之间与自己毗邻的第一个3等分点位置(o')，并将其确定为理想最优下一跳位置；

(3) 节点A将自己所有一跳邻节点分别与最优下一跳位置(o')作比较，发现节点C与其最接近，从而确定节点C为下一跳节点，并将分组发往节点C；

(4) 节点C收到该分组之后，重复(1)，(2)，(3)步骤，但此时去往B的最优跳数为2，最优下一跳位置为 o'' ，确定的最优下一跳节点为E，于是C将分组发往节点E；

(5) 节点E收到该分组后，重复(1)，(2)，(3)步骤，但此时发现去往B的最优跳数为1，于是E直接将该分组递交给节点B，该端到端路由过程完成。

3.2 环路避免及“空穴”迂回机制

如何有效避免路由由环路或最大限度地降低路由环路所带来的影响，是一切路由协议设计都需要重点考虑的问题。由于GLB-DMECR基于局部网络状态信息选择下一跳，与其它基于局部网络状态信息进行决策的算法相同，其造成环路的可能性也是存在的。为了有效避免路由由环路，本文采用类似于文献[8]中的下一跳节点选择策略。即下一跳节点只能从如图3所示的阴影区域中选择，以保证下一跳节点的前进距离(advance)为正，每一跳都遵循该原则，可以有效避免环路。

采用该机制虽然可以有效避免环路，但也会带来另外一个问题，即“空穴”(void)问题^[7]。在节点密度比较低或节点分布不均匀的情况下，在图3所示的阴影区域内可能不存在任何节点，即该区域为一“空穴”区域，此时，再采用上述机制

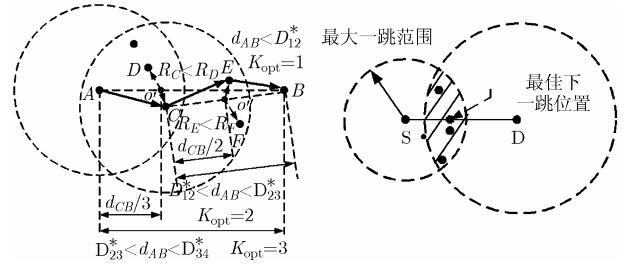


图2 GLB-DMECR路由过程 图3 下一跳节点选择范围

进行路由选择，将出现A找不到下一跳节点的情况。对于该问题，以前曾提出了许多具体的解决策略，如GPSR的边界转发策略^[7]；f-GEDIR向邻节点洪泛数据分组的策略⁷；c-GEDIR同时向 c 个邻节点转发分组的策略^[7]；GRA启动路由发现机制的策略^[7]等。这些策略或者过于复杂，或者造成太多的重复分组，由此造成很大的能量消耗，因此它们未必能很好地适用于WSN网络。为此，本文提出了一种随机选择一个邻节点作为下一跳节点的“空穴”迂回机制，当采用该机制仍不能摆脱路由由环路时，则依靠TTL到期丢包机制，由上层协议保证E2E的重传或干脆不予考虑(因为容错性是WSN的一个重要特色^[1])。

4 仿真及性能分析

通过仿真，我们对GLB-DMECR的性能进行了验证，并将其与理想最优能耗、以及PALR^[11]、P/D方式^[5]等类似算法或策略的能耗性能进行了对比分析。

4.1 仿真条件设置

- (1) 网络范围 $r \times r$ ($500\text{m} \leq r \leq 1000\text{m}$)；
- (2) 传感器节点数量 N ；
- (3) 节点分布：在网络范围内服从均匀分布；
- (4) sink 节点位置：固定在原点位置；
- (5) 节点的能耗参数^[10]：见表 1。

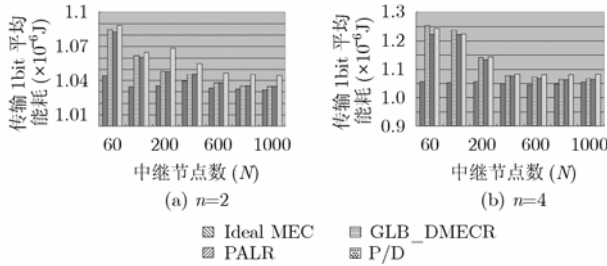
为消除节点位置随机性对算法性能的影响，下述每个数据结果都是在相同的网络拓扑上重复试验 10000 次所得的统计平均值。由于每次试验的数据包长度完全相同，不失一般性，每次试验只考虑传输 1bit 的能量消耗。

4.2 性能分析

图 4 是在 $r = 500\text{m}$ 情况下，GLB-DMECR 与理想最优能耗、PALR 和 P/D 方式的平均 E2E 能耗性能比较。从图中可以看出，随着节点密度的增加，3 种路由算法的能耗性能都呈现出越来越接近理想最优的趋势。GLB-DMECR 与其它两种算法相比，当 $n=2$ 时，在不同的节点密度下，其性能都优于 P/D 方式，当节点密度比较低时，GLB-DMECR 与

表 1 WSN 节点收发信机能耗参数

信道衰减指数	$n=2$	$n=4$
收发信机	$\alpha_{11}=45\text{nJ/bit}$	$\alpha_{11}=45\text{nJ/bit}$
	$\alpha_{12}=135\text{nJ/bit}$	$\alpha_{12}=135\text{nJ/bit}$
能耗参数	$\alpha_2=10\text{pJ}/(\text{bit}\cdot\text{m}^2)$	$\alpha_2=0.001\text{pJ}/(\text{bit}\cdot\text{m}^4)$

图 4 GLB-DMECR 与其它算法性能比较($r=500\text{m}$)

PALR 的能耗性能存在细微差异,但随着节点密度的增加,二者的差异逐渐缩小直至完全消失($N \geq 400$);当 $n=4$ 时,在节点密度比较低的情况下,GLB-DMECR 的性能稍逊于 P/D 方式和 PALR,但随着节点密度的增加,GLB-DMECR 的性能逐渐超过 P/D 方式($N \geq 200$)并基本接近 PALR。在 $r=1000\text{m}$ 且节点密度保持不变的情况下,GLB-DMECR 与理想最优能耗、PALR 和 P/D 方式的能耗性能呈现出与 $r=500\text{m}$ 情况下基本相同的趋势,如图 5 所示。

4.3 性能改进

在研究中发现,如果严格依据 2.2 节所述的距离门限 $D_{i(i+1)}^*$ 确定 K_{opt} ,在理想条件下可以达到理想最小能耗,但在实际网络环境中,考虑到实际中继节点与理想中继位置的偏差,当某一节点到目的节点的距离 d 稍大于某一距离门限 $D_{k(k+1)}^*$ 时,再严格按照该距离门限确定 K_{opt} ,将不利于降低实际的 E2E 能耗。经分析认为,在实际的网络环境中,造成 E2E 能耗增加的原因主要有两个:一是实际中继节点与理想中继位置之间的位置偏差;二是后继最优跳数的确定。在节点位置偏差不可避免的情况下,转发次数的增加将不利于 E2E 能耗的降低,因此路由算法应当尽量避免不必要的跳数增加。针对该问题,本文采用了一种修正距离门限的策略,以进一步改善 GLB-DMECR 的能耗性能。具体做法为:考虑到在距离门限 $D_{k(k+1)}^*$ 附近,选用 k 跳还是 $k+1$ 跳传输时的理想能耗差异不大这一情况,为了避免不必要的跳数增加,根据节点密度的情况为上述每个 $D_{i(i+1)}^*$ 都增加适当的修正值 Δ_i ($\Delta_i > 0$),即 $D_{i(i+1)}^{*'} = D_{i(i+1)}^* + \Delta_i$ ($\Delta_i > 0$),修正以后,当 d 处于 $[D_{i(i+1)}^{*'}, D_{i(i+1)}^{*'} + \Delta_i]$ 范围内时仍判定为最优 i 跳,而不是原来的 $i+1$ 跳。仿真结果说明,该方法可以在一定程度上改善 GLB-DMECR 的性能。

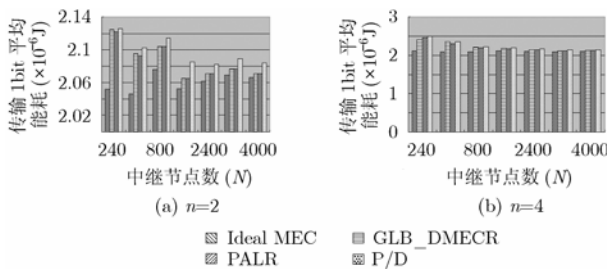
图 5 GLB-DMECR 与其它算法性能比较($r=1000\text{m}$)

图 6 是在 $r=500\text{m}$ 情况下,修正距离门限后的 GLB-

DMECR 与原始 GLB-DMECR 以及其它算法的性能比较。为简单起见,在某一节点密度下,每个距离门限都采用相同的修正值,即 $\Delta_i = \Delta, i = 2, 3, 4, \dots$ 。对应 $N=100, 200, 300, 400, 500$ 的情况,当 $n=2$ 时,所采用的修正值 Δ 分别取 $0.10 \cdot D_{\text{char}}, 0.05 \cdot D_{\text{char}}, 0.05 \cdot D_{\text{char}}, 0.03 \cdot D_{\text{char}}, 0.02 \cdot D_{\text{char}}$;当 $n=4$ 时,所采用的修正值 Δ 分别取 $0.14 \cdot D_{\text{char}}, 0.06 \cdot D_{\text{char}}, 0.05 \cdot D_{\text{char}}, 0.008 \cdot D_{\text{char}}, 0.003 \cdot D_{\text{char}}$ 。这些修正值都是经过 60000 次仿真后所得的经验值。从仿真结果可以看出,修正距离门限后的 GLB-DMECR 的性能相对原始的 GLB-DMECR 得到了有效改善,这一点在节点密度比较低且信道衰减系数较大($n=4$)的情况下更为明显,修正距离门限后的 GLB-DMECR 算法的性能要优于 P/D 方式、并且在大多数情况下要优于或等同于 PALR 算法。

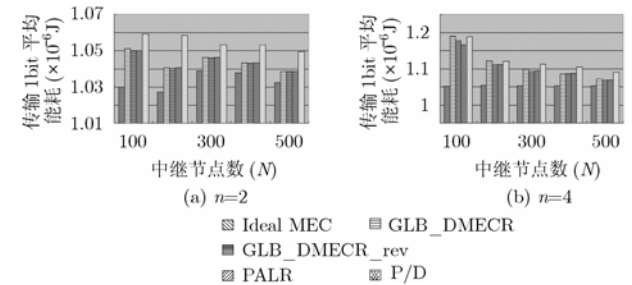
4.4 算法复杂度

在当前的实现方式下,GLB-DMECR 与 PALR 和 P/D 方式具有完全相同的控制开销,即 $O(N)$ 。但在 GLB-DMECR 方式下,由于每个节点可以获知后继最优跳数和最优一跳距离,它完全可以根据实际情况合理控制自己选择邻节点的一跳范围,从而降低网络的控制开销,以进一步优化网络的能耗性能。另外,由于 GLB-DMECR 选择下一跳的过程只涉及欧氏距离和最优跳数的计算,其计算复杂度要低于 PALR 和 P/D 方式。

5 结束语

GLB-DMECR 是一种面向 WSN 的基于地理位置信息的最小能耗路由算法。该算法采用分布式、基于局部网络状态信息进行路由决策的方式,具有良好的稳定性和可扩展性,非常适合适应 WSN 无中心控制、节点易失效、网络规模大等特点。仿真结果说明,该算法的性能在非常广的网络环境下要优于 P/D 方式,并且在大多数情况下要优于或等同于 PALR 算法。在节点密度比较大的情况下,其性能可以较好地接近理想最优性能,而且具有比较低的计算复杂度。因此,它在 WSN 中具有很好的应用价值。

下一步工作主要包括:

图 6 修正距离门限后 GLB-DMECR 与其它算法性能比较($r=500\text{m}$)

(1) 对距离门限修正程度的理论分析。对于判定最优跳数的距离门限 $D_{i(i+1)}^*$, $i = 1, 2, 3, 4, \dots$ 进行修正,其修正程

度 Δ_i , $i = 1, 2, 3, 4, \dots$ 与节点密度、信道衰减指数(n)等因素都密切相关, 需要进行深入的理论分析与证明。

(2) 多离散功率等级条件下的算法改进。本文假定每个节点都可根据单跳传输距离 d 任意地将发射功率调整到某一值, 在实际应用条件下, 每个节点具有多个离散的发射功率等级可能更为现实。因此, 在该条件下对算法作进一步改进将是今后的另一重要工作。

(3) 面向能量有效的拓扑控制。理想最优路径为 MEC 路由提供了重要启示, 同时也为优化网络拓扑提供了重要条件。每个节点根据自己的最优下一跳距离合理选择自己的邻节点选择范围(而不是最大一跳范围), 将有助于在不影响网络最小能耗性能的基础上进一步降低控制开销, 从而进一步优化网络的能耗性能。

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Su W, and Sankarasubramaniam Y, *et al.* Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393–422.
- [2] Chong C Y and Kumar S P. Sensor networks: Evolution, opportunities and challenges. *Proc. IEEE*, 2003, 91: 1247–1256.
- [3] Singh S, Woo M, and Raghavendra C. Power-aware routing in mobile Ad hoc networks. *Proc. of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom98)*, Fukushima, Japan, 1998: 181–190.
- [4] Mhatre V and Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation. *Ad Hoc Networks*, 2004, 2(1): 45–63.
- [5] Gao J L. Analysis of energy consumption for ad hoc wireless sensor networks using a bit-meter-per-joule metric. IPN Progress Report, August 2002: 42–150.
- [6] Giordano S, Stojmenovic I, and Blazevic L. Position based routing algorithms for Ad hoc networks: A taxonomy. July 2001, <http://www.site.uottawa.ca/ivan/routing-survey.pdf>.
- [7] 于宏毅. 无线移动自组织网络. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 222–244.
- [8] Melodia T, Pompili D, and Akyildiz I F. On the interdependence of distributed topology control and geographical routing in Ad hoc and sensor networks. *IEEE JSAC*, 2005, 23(3): 520–532.
- [9] Deng J, Han Y S, and Chen P N, *et al.* Optimum transmission range for wireless Ad hoc networks. *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '04)*, Atlanta, GA, USA, 2004: 21–25.
- [10] Bhardwaj M, Garnett T, and Chandrakasan A P. Upper bounds on the lifetime of sensor networks. *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC'01)*, Helsinki, Finland, 2001: 785–790.
- [11] Stojmenovic I and Lin Xu. Power-aware localized routing in wireless Networks. *IEEE Int. Parallel and Distributed Processing Symp.*, Cancun, Mexico, 2000: 371–376.

侯惠峰: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为 Ad hoc 网络和 WSN 路由协议、拓扑控制。

刘湘雯: 女, 1977 年生, 博士生, 研究方向为 Ad hoc 网络和 WSN 路由协议、能耗均衡。

于宏毅: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向包括阵列信号处理、第三代移动通信、Ad hoc 网络和无线传感器网络。

胡捍英: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 国家第三代移动通信系统专家组成员, 主要研究方向为第三代移动通信。