

能量捕获无线传感网的吞吐量最大化路由

池凯凯^{1,2} 杜文洁¹ 李燕君¹ 程 珍¹

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)¹

(浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室 杭州 310023)²

摘 要 能量捕获无线传感器网络(EH-WSNs)具有从环境中捕获能量的能力,可以无限期持续工作,因此具有非常广泛的应用前景。目前已有的大多数 EH-WSNs 路由方案往往侧重于如何有效地节能,而吞吐量作为 EH-WSNs 重要的性能指标之一却几乎没有得到考虑。首先建模出 EH-WSNs 端到端吞吐量最大化路由问题,为深入了解该问题提供理论基础,然后提出了一种 EH-WSNs 端到端吞吐量最大化路由方案。相比最小跳数路由方案,本路由方案能显著提高数据流的端到端吞吐量。

关键词 无线传感器网络,能量捕获,路由方案,吞吐量

中图分类号 TN 911.2 **文献标识码** A

Throughput-maximized Routing Scheme for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

CHI Kai-kai^{1,2} DU Wen-jie¹ LI Yan-jun¹ CHENG Zhen¹

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)²

Abstract Energy harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs) have the capability of harvesting environment energy, can work forever and thus have a lot of promising applications. Most of the available routing schemes of EH-WSNs focus on selecting energy-efficient routes. Few of them consider the throughput of routes, which is clearly one of most important performance metrics. This paper first formulated the throughput-maximized routing problem for EH-WSNs so as to deeply and theoretically understand this routing problem, and then presented a throughput-maximized routing scheme. Simulation results demonstrate that, compared to the minimum-hop routing, the proposed routing scheme is able to greatly improve the throughput.

Keywords Wireless sensor networks, Energy harvesting, Routing scheme, Throughput

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)中的传感器节点一般以电池来供电,由于电池能量非常有限,优化网络的生存时间是设计 WSNs 通信和网络协议的重要目标之一。但是,即使采用经过优化的通信和网络协议,节点的能量最终还是会耗尽,而节点上电池的更换在很多应用场景中是一件非常困难的事。这极大地限制了 WSNs 的实际应用。由能从环境中捕获能量的传感器节点组成的无线传感器网络(Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks, EH-WSNs)^[1-3]提供了一种有效突破能量供应瓶颈的传感器网络方案,具有非常广泛的应用前景。

目前已经有一些研究 EH-WSNs 的路由协议设计的相关工作。Voight 等^[4]针对能够捕获太阳能的无线传感器网络,在定向扩散^[5](Directed Diffusion)协议的基础上,较早地提出了一种 EH-WSNs 路由方案。其基本思想是将传感器节点分

为两类:当前能够捕获太阳能的节点和当前不能够捕获太阳能的节点;然后选出一条路由,该路由包含相对较多的有太阳能捕获机会的节点和相对较少的没有太阳能捕获机会的节点。Kansal 等^[6]给出了综合考虑节点剩余能量和能量捕获速率这两方面的节点能量性能指标,并讨论了基于该节点能量性能指标的最小代价路由;Kwon^[7]提出了基于能量捕获的低时延路由方案;Zeng 等^[8]提出了基于地理位置信息的能量捕获路由方案;Eu 等^[9]提出了基于能量捕获的机会式路由方案;Martinez 等^[10]提出了最小化数据传递能耗与溢出能耗这两方面总能耗的路由方案,从而最大化网络节点的总剩余能耗。

吞吐量是 EH-WSNs 重要的性能指标之一。已有的大多数 EH-WSNs 路由方案往往侧重于如何有效地节能,而吞吐量却几乎没有得到考虑。本文首先在考虑节点能量收支平衡约束的基础上建模出 EH-WSNs 端到端吞吐量最大化路由问题,为深入了解该问题提供理论基础,然后提出了一种 EH-

本文受国家自然科学基金(61472367, 61202204),浙江省自然科学基金(LY15F020029, LY15F020027)资助。

池凯凯(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信, E-mail: kckchi@zjut.edu.cn; 杜文洁(1990—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络; 李燕君(1982—),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络; 程 珍(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为网络安全。

WSNs 端到端吞吐量最大化路由方案。相比最小跳数路由方案,本路由方案能显著提高 EH-WSNs 数据流的端到端吞吐量。

2 系统模型

本节介绍本文所考虑的无线传感器网络模型。

2.1 网络模型

本文考虑具有能量捕获能力的无线传感器网络。将传感器网络表示为 $G(V, E)$, 其中 V 为节点集合, E 为链路集合。在网络中, 处于感知状态的节点生成恒定速率的数据包。当前需要建立路由的数据源节点 s 以恒定速率 r_s (数据包/秒) 生成数据包。传感器节点产生的数据包长为 L bit。

任意节点 i 在当前新数据流到来的时刻正在中继的数据流数目用 N_i 来表示, 这 N_i 个数据流速率分别为 $r_i^{(1)}, r_i^{(2)}, \dots, r_i^{(N_i)}$, 单位为数据包每秒。节点的数据传输速率为 Kbit/s。

2.2 能量捕获模型

在 EH-WSNs 中, 部署在不同地理位置的节点的能量捕获速率是不同的, 对同一个节点来说, 不同时刻的能量捕获速率也是不一样的。本文考虑数据流持续时间不长的场景, 在这种场景中, 可以近似认为一个数据流持续时间内的节点能量捕获速率为固定值。用 $E_h^{(i)}$ 表示从新源节点 s 发起数据流时刻开始接下来的数据流持续时间内的节点 i 每秒捕获的能量。 $E_h^{(i)}$ 的值往往可以通过特定方式知道。比如对于太阳能捕获这类能量捕获速率变化较慢的场景, 可以用数据流发起时刻的能量捕获速率来近似代表接下来的数据传递时间段内的能量捕获速率。而对于能量捕获速率变化相对较快的场景, 也可以利用指数加权移动平均 (Exponential Weighted Moving Average, EWMA) 等方法来估计接下来一段时间内的能量捕获速率值^[8]。

2.3 能耗模型

节点接收数据的能耗模型为:

$$E_{rx} = e_{dkt} t \quad (1)$$

其中, e_{dkt} 为收发模块电路每秒的工作能耗, t 为接收数据所耗的时间。而节点发送数据的能耗模型为:

$$E_{tx} = (e_{dkt} + P)t \quad (2)$$

其中, P 为节点的发送功率, t 为发送数据所耗的时间。

3 高吞吐量路由问题建模

本节将本文所考虑的吞吐量最大化路由问题数学建模为一个 0-1 整数规划问题。所考虑和设计的路由为单路径路由。

用变量 $\delta_{i,j}$ 来刻画节点 i 到节点 j 的链路 (i, j) 是否在路由算法所选出的路径 σ 上, $\delta_{i,j} = 0$ 表示 (i, j) 不在选出的路径上, $\delta_{i,j} = 1$ 表示 (i, j) 在选出的路径上。变量组 $\{\delta_{i,j} : (i, j) \in E\}$ 的取值决定了所选的路由, 其取值要满足能量收支平衡、流平衡等方面的约束, 并以最大化端到端通信吞吐量为目标。

3.1 节点能耗分析

首先分析节点 i 接收和发送一个数据包所消耗的能量。由于包长为 L bit, 数据传输速率为 K bit/s, 因此节点 i 接收一个数据包所消耗的能量为:

$$E_R^{(i)} = e_{dkt} \frac{L}{K} \quad (3)$$

而节点 i 发送一个数据包所消耗的能量为:

$$E_T^{(i)} = (e_{dkt} + P_i) \frac{L}{K} \quad (4)$$

因此, 节点 i 接收和发送一个数据包所消耗的总能量为:

$$E_{RT}^{(i)} = \frac{(2e_{dkt} + P_i)L}{K} \quad (5)$$

接着分析节点 i 在每秒内为当前正在中继的数据流所消耗的能量 $E_c^{(i)}$ 。如前所述, 节点 i 正在为 N_i 个数据流提供中继服务, 每秒内为第 m 个数据流接收和转发数据包的数目为 $r_i^{(m)}$, 因此每秒内接收和转发数据包的总数目为 $\sum_{m=1}^{N_i} r_i^{(m)}$ 。由式 (5) 可知, 节点 i 每秒内为已有的 N_i 个数据流中继所消耗的能量为:

$$E_c^{(i)} = E_{RT}^{(i)} \cdot \sum_{m=1}^{N_i} r_i^{(m)} = \frac{(2e_{dkt} + P_i)L}{K} \sum_{m=1}^{N_i} r_i^{(m)} \quad (6)$$

关于式 (6) 需要说明的是, 在节点 i 正在服务的 N_i 个数据流中, 如果有数据流是以节点 i 为源节点 (目的节点), 即对于该数据流节点 i 只发送 (接收) 数据包, 则针对该数据流只需计算发送能耗 (接收能耗)。

由于节点 i 每秒捕获的能量为 $E_h^{(i)}$, 因此节点 i 每秒内盈余的能量为:

$$E_r^{(i)} = E_h^{(i)} - E_c^{(i)} = E_h^{(i)} - \frac{(2e_{dkt} + P_i)L}{K} \sum_{m=1}^{N_i} r_i^{(m)} \quad (7)$$

3.2 节点最大速率分析

节点 i 当前正在为 N_i 个数据流服务, 如果当前新数据流的路径包含该节点, 那么新数据流在节点 i 上每秒预期消耗的能量不能超过节点 i 每秒时间内盈余的能量 $E_r^{(i)}$, 称之为节点能量收支平衡约束。因此新数据流的速率不能超过某个值, 否则节点 i 由于没有足够的能量来完全支持这 $N_i + 1$ 个数据流中继服务, 从而将发生缓存区溢出即数据包丢失。

因此, 对于新数据流的源节点 s , 能为新数据流发送数据包的最大速率为:

$$R_s = \left\lfloor \frac{E_r^{(s)}}{E_T^{(s)}} \right\rfloor \quad (8)$$

对于新数据流的目的节点 d , 能为新数据流接收数据包的最大速率为:

$$R_d = \left\lfloor \frac{E_r^{(d)}}{E_R^{(d)}} \right\rfloor \quad (9)$$

而对于任意一个既不是当前新数据流源节点, 又不是新数据流目的节点的节点 i , 能为该新数据流中继的最大速率可以表示为:

$$R_i = \left\lfloor \frac{E_r^{(i)}}{E_{RT}^{(i)}} \right\rfloor \quad (10)$$

3.3 流平衡约束

对于源节点 s , 由于它是当前新数据流的发起者, 因此任意一条流入节点 s 的链路都不会是所选路径上的链路, 即必须满足:

$$\sum_{j: (j, s) \in E} \delta_{j,s} = 0 \quad (11)$$

而在流出节点 s 的所有链路中有且只有一条链路在所选路径上, 即必须满足:

$$\sum_{j: (s, j) \in E} \delta_{s,j} = 1 \quad (12)$$

对于目的节点 d , 由于它是当前新数据流的最终接收者, 因此任意一条流出节点 d 的链路都不会是所选路径上的链路, 即必须满足:

$$\sum_{j:(d,j) \in E} \delta_{d,j} = 0 \quad (13)$$

而在流入节点 d 的所有链路中有且只有一条链路在所选路径上,即必须满足:

$$\sum_{j:(j,d) \in E} \delta_{j,d} = 1 \quad (14)$$

对于任意一个不是当前新数据流的源节点和目的节点的节点 i ,其流入的数据量要等于流出的数据量,即满足以下流平衡约束:

$$\sum_{j:(j,i) \in E} \delta_{j,i} = \sum_{j:(i,j) \in E} \delta_{i,j} \quad (15)$$

3.4 目标函数

本文研究的 EH-WSNs 单路径路由问题以最大化端到端吞吐量为目标。由于端到端的最大速率为源节点、中继节点和目的节点中瓶颈节点上的可支持最大速率,因此端到端吞吐量 R 可以表示为:

$$R = \min\{R_s, R_d\} \cup \left\{ \frac{R_i}{\sum_{j:(j,i) \in E} \delta_{j,i}} : i \in V \setminus \{s, d\} \right\} \quad (16)$$

式中,对于不包含在路径上的节点 i ,由于 $\sum_{j:(j,i) \in E} \delta_{j,i} = 0$ 即

$\frac{R_i}{\sum_{j:(j,i) \in E} \delta_{j,i}} = \infty$,不影响端到端吞吐量 R 的值;而对于包含在

路径上的不是源节点和目的节点的节点 i ,由于 $\sum_{j:(j,i) \in E} \delta_{j,i} = 1$

即 $\frac{R_i}{\sum_{j:(j,i) \in E} \delta_{j,i}} = R_i$,因此影响着端到端吞吐量 R 的值。

3.5 最优路由问题建模

基于以上分析,本文所考虑的端到端通信吞吐量最大化单路径路由问题建模为以下 0-1 整数规划:

最大化 R

约束条件:

$$\begin{aligned} & \sum_{j:(j,s) \in E} \delta_{j,s} = 0 \text{ 和 } \sum_{j:(s,j) \in E} \delta_{s,j} = 1 \\ & \sum_{j:(j,d) \in E} \delta_{j,d} = 1 \text{ 和 } \sum_{j:(d,j) \in E} \delta_{d,j} = 0 \\ & \sum_{j:(j,i) \in E} \delta_{j,i} = \sum_{j:(i,j) \in E} \delta_{i,j}, \forall i \in V \setminus \{s, d\} \end{aligned} \quad (17)$$

对于 EH-WSNs 的单路径路由最优化问题,设计分布式路由协议为源节点找出吞吐量最大化路径是接下来要考虑的问题。下面介绍本文提出的吞吐量最大化单路径路由方案。

4 高吞吐量路由方案

DSR(Dynamic Source Routing)路由是一个用于无线多跳网络的经典按需路由协议^[11]。本节介绍基于 DSR 修改的用于 EH-WSNs 的分布式高吞吐量路由。具体对 DSR 路由方案进行以下几部分修改。

RREQ 域内容。在路由请求包 RREQ 中,除了包含在 DSR 中域内容外,还包含数据包长 L 、可支持速率 R 这两个域值。

源节点 s 首先生成一个 RREQ 包,然后将数据包长写入 RREQ 包中对应的域里,并基于式(8)来计算 R_s 以及将其值写入 RREQ 包中的可支持速率域,最后将该 RREQ 包进行全网广播,或基于物理位置信息进行定向广播。

在 RREQ 包到达目的节点的过程中,每到一个中继节点 i ,该中继节点首先检查缓存表,查看是否已经收到过该 RREQ 包,如果之前已经收到过,则丢弃该 RREQ 包以降低路由的通信开销;否则,如 DSR 一样将节点 i 的 ID 号记录到该 RREQ 包中,并从包中读出可支持速率 R 、数据包长 L 的值,再根据式(10)计算出能为新数据流中继的最大速率 R_i 。

如果 $R_i \geq R$,则不修改 RREQ 包中的可支持速率域值,否则将可支持速率域值改为 R_i 值。最后将该 RREQ 包广播出去。

目的节点 d 上进行候选路径的性能比较。目的节点每接收到一个 RREQ 包就从中读出该 RREQ 所走过的路径,该路径为候选路径之一。目的节点在收到当前数据源广播的第一个 RREQ 包时启动一个计时器,在计时器溢出之前所收到的每一 RREQ 对应一条候选路径,当计时器溢出时就不再对后续接收的当前数据源的 RREQ 包进行处理。假设目的节点 d 从收到的 RREQs 得知 N 条候选路径。目的节点 d 首先根据式(9)计算出能为新数据流接收数据包的最大速率 R_d ,接着对于任意一条候选路径,从它对应的 RREQ 中读出其可支持速率 R ,并将该路径的可支持速率最终更新为 $\min\{R, R_d\}$ 。目的节点选取可支持速率最大的候选路径作为最终路径。如果有多条路径有相同的最大可支持速率,则选取 RREQ 最早到达目的节点的那条路径作为最终路径。最后,目的节点给源节点以单播的方式发送路由回复包 RREP 来告知源节点该最终路径。

5 性能评估

本节通过将所提的路由方案与最短跳数路由方案进行比较,评估所提路由方案的性能,评估的性能指标是网络中所有数据流的平均吞吐量。

源节点发送的数据包长为 100byte。每 T s 发起一个新的数据流,每个数据流的源节点和目的节点在所有节点中随机选取,每个数据流的持续时间为 15s。每比特接收的能耗为 $7\mu\text{Wh}$,每比特发送的能耗为 $10\mu\text{Wh}$ 。每个节点的能量捕获速率为 $[0.1, E_{h_max}]$ 区间内的随机选取值,单位为 Wh/s 。下图中的所有数据都是 1000 个仿真场景下的平均吞吐量提高比值。

首先在如下的网络场景进行路由方案性能评估:网络中有 36 个节点,节点的物理位置如图 1 所示,虚线表示节点之间的通信链路。图 2 给出了不同数据流负载下数据流平均吞吐量的提高比值, T 值越大则数据流负载越小。从该图中可以看出,当网络负载越大时,吞吐量提高也越大,达到 20% 以上。另外,当 E_{h_max} 越大即节点的能量捕获速率越不均匀时,吞吐量提高比值也越大。由此可知,在高负载、节点能量捕获速率不均匀的 EH-WSNs 中,本文提出的路由方案能显著提高数据流吞吐量。

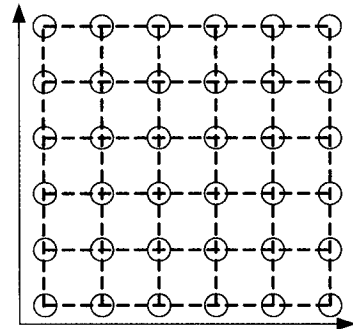


图 1 EH-WSN 仿真拓扑结构

接着在如下的网络场景进行路由方案性能评估。网络的物理范围是 $500\text{m} \times 500\text{m}$,网络节点数目为 N ,每个节点的物

(下转第 267 页)

结束语 本文提出了一种能量捕获无线传感器的高吞吐量

量单跳多播方案。该方案采用纠错码,综合考虑节点当前储能、能量捕获速率以及当前信道质量这3方面因素,计算出当前待接收数据块的正确接收数据包数目期望值,只有当该期望值大于等于一定值时或者如果不接收该数据块则将发生储能溢出时才接收该数据块,有效地降低了因信道质量差而造成的接收失败和节点储能溢出这两种事件的发生频率。仿真结果表明,本方案能显著提高单跳多播的吞吐量,具体提高程度取决于能量捕获速率等参数。

参考文献

- [1] Wan Z G, Tan Y K, Yuen C. Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks [C] // Proceedings of IEEE 13th ICCT. Jinan, China; IEEE, 2011:362-367
- [2] Seah W, Eu Z A, Tan H P. Keynote: Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting [C] // Proceedings of IEEE Wireless VITAE 2009. Aalborg, Denmark; IEEE, 2009
- [3] Sudevalayam S, Kulkarni P. Energy harvesting sensor nodes;

- Survey and implications[J]. IEEE Commun. Surv. Tuts., 2011, 13(3):443-461
- [4] Hsu J, Kansal A, Friedman J, et al. Energy harvesting support for sensor networks[C] // Proceedings of IPSN'05. Los Angeles, USA; IEEE, 2005
 - [5] Jiang X, Polastre J, Culler D E. Perpetual environmentally powered sensor networks[C] // Proceedings of IPSN'05. Los Angeles, USA; IEEE, 2005
 - [6] Ammar Y, Buhrig A, Marzencki M, et al. Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator[C] // Proceedings of sOc-EUSAI'05. New York, USA; IEEE, 2005
 - [7] Ozel O, Yang J, Ulukus S. Broadcasting with a battery limited energy harvesting rechargeable transmitter[C] // Proceedings of IEEE WiOpt, 2011
 - [8] Yang J, Ozel O, Ulukus S. Broadcasting with an energy harvesting rechargeable transmitter [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(2):571-583
 - [9] Kuan C, Lin G, Wei H. Reliable Multicast and Broadcast Mechanisms for Energy-Harvesting Devices [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(4):1813-1826

(上接第244页)

理位置随机生成,节点的通信距离为100m。 $T=1$ 和 $E_{h,max}=1.0$ 。图3给出了不同节点数目即不同节点密度下的数据流平均吞吐量的提高比值, N 值越大则节点密度越大。从该图中可以看出,数据流吞吐量提高比值随着节点密度的增加而升高。例如,当 $N=70$ 时使用所提出的路由方案带来的平均吞吐量提高为21.75%,而 $N=100$ 时使用所提出的路由方案带来的平均吞吐量提高为25.64%。

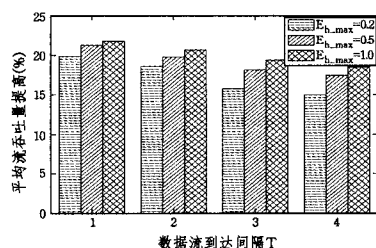


图2 不同数据流负载下平均数据流吞吐量的提高比值

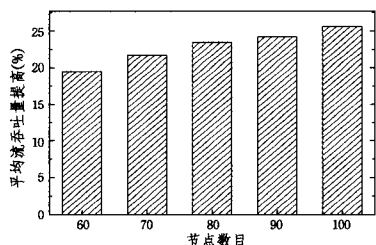


图3 不同节点密度下平均数据流吞吐量的提高比值

结束语 本文首先建模出EH-WSNs端到端吞吐量最大化路由问题,为深入了解该问题提供理论基础,然后提出了一种EH-WSNs端到端吞吐量最优路由方案。相比已有的路由方案,本路由方案能显著提高数据流的端到端吞吐量。当网络负载越大、节点的能量捕获速率越不均匀和节点密度越高时,吞吐量提高比值也越大。

参考文献

- [1] Wan Z, Tan Y, Yuen C. Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks [C] // IEEE 13th ICCT. Jinan, China, 2011
- [2] Seah W, Eu Z, Tan H. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP)-survey and challenges [C] // IEEE Wireless VITAE 2009. Aalborg, Denmark, 2009
- [3] Sudevalayam S, Kulkarni P. Energy harvesting sensor nodes; Survey and implications [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2011, 13(3):443-461
- [4] Voight T, Ritter H, Schiller J. Utilizing solar power in wireless sensor networks [C] // LCN'03. 2003
- [5] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion; a scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C] // ACM MOBICOM. 2000
- [6] Kansal A, Hsu J, Srivastava M, et al. Harvesting aware power management for sensor networks [C] // 43rd IEEE/ACM Design Automation Conference. 2006
- [7] Kwon H, Noh D, Kim J, et al. Low-latency routing for energy-harvesting sensor networks [C] // 4th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing. 2007
- [8] Zeng K, Ren K, Lou W, et al. Energy-aware geographic routing in lossy wireless sensor networks with environmental energy supply [C] // QShine'06. 2006
- [9] Eu Z, Tan H. Adaptive opportunistic routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks [C] // IEEE ICC. 2012
- [10] Martinez G, Li S, Zhou C. Wastage-Aware Energy-Harvesting Routing in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9):2967-2974
- [11] Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks [J]. Mobile Computing, 1996, 353:153-181