

一种基于能量捕获无线传感网的三维地理机会路由

王晨阳 林 辉

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 采用能量捕获技术的无线传感器网络节点,具有从环境捕获能量的能力,自带较少的能量就可以维持长时间的工作。实际应用中传感器网络大多分布在三维空间环境下,基于传统地理路由协议的研究,提出了一种适用于能量捕获无线传感网的三维地理机会路由算法。该算法首先将空间均匀划分为多个立方体,以确定合适的转发域,然后针对转发域内的各节点,根据剩余能量和传递成功率决定退避时间,最后将具有最小退避时间的节点作为转发节点。实验结果表明,该算法可以显著提高数据传递成功率,平衡网络节点的能耗,缩短数据包的平均发送时间,提高网络吞吐率。

关键词 能量捕获,地理路由,机会路由,三维

中图分类号 TN911.2 文献标识码 A

Three-dimensional Geographic Opportunistic Routing Based on Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

WANG Chen-yang LIN Hui

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

Abstract Using energy harvesting technology, the nodes in wireless sensor networks can gain energy from the environment, and keep working for a long time with a small battery capacity. Considering the WSNs mostly deployed in three-dimensional space in practical applications, based on the study of traditional geographic routing protocols, this paper proposed a three-dimensional geographic opportunistic routing algorithm for energy harvesting wireless sensor networks. First, the algorithm divides the space into cubes, and chooses an appropriate cube as next forward region. The nodes in the region calculate the back off time according to the residual energy and delivery rate. The node with shortest back off time becomes the transmission node. The simulation result shows that this algorithm can improve the data delivery rate effectively, balance the energy consuming of the nodes, reduce the average packet delivery time and make the throughput better.

Keywords Energy harvesting, Geographic routing, Opportunistic routing, Three-dimensional

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由若干个传感器节点组成的无线多跳网络,它面临的关键问题之一就是如何将数据稳定高效地从源节点传输到目的节点。通常情况下,传感器节点的电池容量非常有限,优化网络生命周期是设计 WSNs 路由协议的重要目标。即使经过优化,在节点电池能量耗尽后更换电池是非常困难的,因此限制了 WSNs 的实际应用。能从环境中捕获能量的无线传感器网络(Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, EH-WSNs)提供了一种有效突破能量供应瓶颈的方案^[1-2]。

EH-WSNs 的传感器节点可以将电磁波、光照、振动等形式的能量转化成电能,从理论上来说其可以永久地工作,因此引起了很多学者的关注和研究。文献[3]总结了 EH-WSNs 领域在资源分配和传输调度策略上的最新进展;文献[4]介绍了射频供能的无线传感网具有更高的吞吐量、较低的运行开销和更长的设备寿命。结合能量捕获技术,Kansal 等^[5]综合考量剩余能量与能量捕获速率,提出了节点最小代价路由;Dong 等^[6]提出了一种基于簇的 EH-WSNs 路由协议;Kwon 等^[7]基于能量捕获技术设计了一种低时延路由方案;Zhi 等^[8]提出了一种自适应机会路由协议;池凯凯等^[9]设计了一

种基于能量捕获的吞吐量最大化占空比方案。

传感器网络的实际应用大多将节点部署在三维空间环境中,如丘陵地形、大楼仓库等。现有的大多数位置路由协议是假设应用在理想的二维环境中,若将节点投影到某个平面上再使用平面路由算法,则因为维度的缺失,看似一跳可达的节点在实际上可能并不连通,性能也会受到影响。Abdallah 等^[10]设计了一种三维地理路由算法,可以显著地提升数据发送成功率和网络平均寿命。文献[11]设计了一种划分胞元的分簇路由算法,有效地提高了网络在出现空洞时的发送率,平衡了各节点之间的能耗。然而,上述现有的传统无线传感网的三维地理路由方案没有考虑到节点捕获到的能量,在 EH-WSNs 中的适用性不佳。

Biswas 等^[12]提出了机会路由(Opportunistic Routing, OR)这一动态路由算法,利用无线电波通信的广播传输特性,显著地提高了网络传输的可靠性和吞吐量。随后,Spachos 等^[13]提出的基于节点剩余能量的 EAOR 算法,以及文献[14]提出的能量潜能机会路由,均进一步改善了网络性能。在能量捕获的传感器网络中,节点的能量捕获速率比节点工作时的能量消耗速率低 3~6 个数量级,因此整个网络中的节点拓扑时常会动态变化,机会路由是一种无须维护邻居节点信息的动态选择路径的算法,非常适合这种情况。

针对上述问题,本文结合能量捕获技术和传统的三维地理路由,提出了一种基于能量捕获无线传感网的三维地理机会路由(Three-dimensional Geographic Opportunistic Routing, 3DGOR)算法。3DGOR算法将传感器网络空间划分为多个立方体区域,先选定其中一个最合适的转发区域,再结合区域内候选节点的剩余能量和历史传递成功率,使最优的节点竞争成为转发节点。综合考虑了上述因素的3DGOR算法,不仅可以保证数据的传输成功率,平衡各节点之间的能耗,还可以缩短数据端到端的时间,增加网络吞吐量。

本文第2节介绍系统模型;第3节介绍算法的基本思想;第4节介绍3DGOR算法的具体实现;第5节对实验仿真结果进行分析;最后总结全文。

2 系统模型

2.1 空间模型

本文考虑所有传感器节点分布在一个三维的网络空间中,每个节点在部署时通过全球定位系统芯片确定自己的三维坐标位置,最大通信半径为 R 。以源节点为原点建立三维坐标系,将网络空间划分成多个边长为 D_c 的立方体区域(见图1),将每个立方体区域称为一个域,源节点所在的位置为发送域,目的节点所在的位置为目的域,将每个域的几何中心位置称为域心。数据传输就是从源节点经过多个转发域内的中继节点,多跳传输到达目的节点的过程。

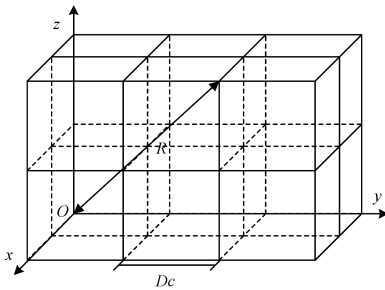


图1 网络空间划分示意图

2.2 能量模型

节点自身具有初始能量 E_0 ,通过捕获环境中的射频能量维持工作,本文考虑的数据发送持续时间并不长,可以近似认为捕获速率固定为 e_h 。节点的发送速率为 k 比特每秒,单个数据包的大小为 L 比特,发送数据的能耗模型为:

$$E_{tx} = e_{tx} \times \frac{L}{k} \quad (1)$$

其中, e_{tx} 为节点发送单位比特数据所消耗的能量。节点接收数据的能耗模型为:

$$E_{rx} = e_{rx} \times \frac{L}{k} \quad (2)$$

其中, e_{rx} 为节点接收单位比特数据所消耗的能量。节点的能量捕获模型为:

$$E_h = e_h \times t_h \quad (3)$$

其中, t_h 为节点捕获能量的时长。因此,节点转发一个数据包后的能量状况为:

$$E_r = E_0 - (e_{tx} + e_{rx} - e_h) \times \frac{L}{k} \quad (4)$$

3 路由算法的思想

本节将先描述传统地理机会路由算法,再介绍本文提出的能量捕获无线传感网的3DGOR算法。

3.1 机会路由的基本思想

机会路由通常有4种帧类型:Request To Send(RTS), Clear To Send(CTS),DATA和 Acknowledge(ACK),候选转发节点之间采用类似IEEE802.11 MAC层的DCF机制进行协调。如图2所示,当源节点 t 有数据需要向目的节点 d 传输时,它向周围节点广播一个RTS帧并等待节点答复CTS帧。周围的节点 n (例如 n_1, n_2, n_3)在收到RTS帧后,会在等待退避时间 T_D 之后回复CTS帧, T_D 的具体计算方法如下:

$$T_D = C_1 \left(1 - \frac{D_{t,d} - D_{n,d}}{R}\right) + SIFS, t \neq d \quad (5)$$

其中, $D_{a,b}$ 用于表示两个节点 a 和 b 之间的距离, C_1 是一个与距离相关的系数, $SIFS$ 是短帧间间隔。分析式(5)可以发现 T_D 与 $D_{t,d} - D_{n,d}$ 是负相关的,即离目的节点越近的节点所需的退避时间也越短。除了第一个收到的CTS帧,其余节点的CTS帧都会被源节点忽略,源节点会向最先回复CTS帧的节点发送数据包。中继节点在成功接收数据包之后回复ACK帧,若源节点未收到ACK帧,则将对数据包进行重传。

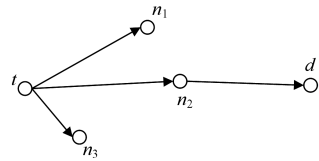


图2 机会路由示意图

相比传统的机会路由算法,文献[13]提出的基于能量感知的EAOR算法,在退避时间上会考虑到节点的剩余能量,采用式(6)计算候选节点的退避时间。

$$T_D = C_2 \left(1 - \frac{D_{t,d} - D_{n,d}}{R}\right) + C_3 \left(1 - \frac{E_r}{E_C}\right) + SIFS, t \neq d \quad (6)$$

其中, C_2, C_3 为相关系数, E_r 为节点的剩余能量, E_C 为节点电池最大容量。

3.2 3DGOR算法

上述的能量感知地理机会路由算法只考虑了地理位置和节点的剩余能量,离目的节点越近,剩余能量越充足,竞争成为转发节点的可能性就越大。它没有考虑到节点以往转发数据的成功率,以及剩余能量是否足够完成此次数据转发。若节点陷入路由空洞或者剩余能量不够继续往下一跳转发,则该节点是不应作为中继节点的。因此,本文提出了3DGOR算法,具体的处理流程如图3所示。

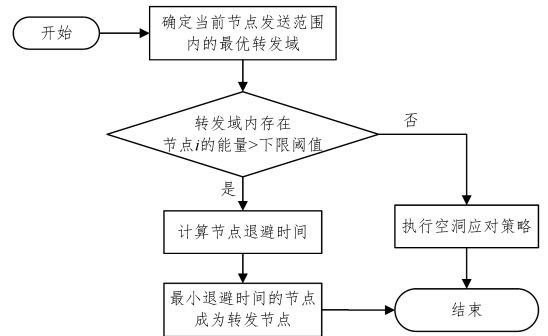


图3 3DGOR算法的流程图

4 3DGOR算法的具体实现

4.1 转发域和候选节点集

由图1可知,传感器网络空间根据地理位置被划分为了多个立方体域,我们根据以下规则选择一个合适的立方体域

作为下一跳的转发域:1)该域的域心相比其他域的域心距离目的节点的位置更近;2)该域完全在发送节点的最大通信半径内。为了保证规则2),需要满足式(7):

$$R^2 \geq D^2 + D^2 + D^2 \quad (7)$$

其中, $D = cD_c$, c 是一个划分精细度相关的参数, c 越大, 划分得越细, 域边长 D_c 越小。图1所示的是 $c=2$ 时的情形。

最后, 得到式(8):

$$D_c \leq \frac{R}{c\sqrt{3}} \quad (8)$$

确定最优的转发域之后, 转发域内的节点构成了本次传输的候选节点集, 只有该节点集内的节点才有条件参与竞争, 这一转发域的信息会被包含在源节点发出的 RTS 帧中。另外, 参与竞争的节点的剩余能量必须大于设定的阈值下限 E_n , 不满足条件的节点将会进入休眠状态, 直到捕获足够的能量后才会复活, 重新获得参与竞争的机会。

4.2 节点退避时间

转发节点的完整路由流程如图4所示。当发送节点 t 有数据包需要传输时, 先侦听信道的空闲情况, 如果空闲则在等待一个分布式帧间间隔时间 $DIFS$ 后, 发送 RTS 帧。候选转发节点集内的多个节点在接收到 RTS 帧后, 会启用类似 IEEE 802.11 MAC 层协议的 DCF 机制, 等待各自相应的退避时间 T_D 后回复 CTS 帧, 最先回复 CTS 帧的节点将成为转发节点。之后由发送节点 t 向转发节点 n 发送数据包, 转发节点 n 在成功接收数据包后回复 ACK 帧, 完成一次数据传输。

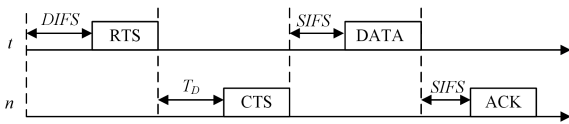


图4 节点转发流程图

本文算法的退避时间 T_D 的计算式如式(9)所示:

$$T_D = C_4 \left(1 - \frac{E_r}{E_c}\right) + C_5 (1 - q) + SIFS, t \neq d \quad (9)$$

其中, q 为该节点最近 m 次的平均发送成功率, C_4 和 C_5 为相关系数。

4.3 空洞应对策略

通常情况下, 具有贪婪性质的地理位置路由算法, 在路由时会重复选择相同的下一跳中继节点, 造成这些节点因能量消耗过快而死亡, 虽然在能量捕获技术的帮助下, 节点经过一段时间后会重新复活, 但是这依旧摆脱不了陷入路由空洞的局面, 即发送节点在传输范围内找不到比当前节点更靠近目的节点的邻居节点, 导致寻路失败, 最终影响数据吞吐率。为此, 本文提出了一种应对路由空洞的策略来弥补其不足。当转发域内没有节点响应, 从而形成空洞域时, 使用空洞绕行路由策略, 如算法1所示。

算法1 空洞绕行路由策略

输入: VoidCube 空洞域

输出: nextNode

1. function VOIDDETOUR(VoidCube)
2. while distance(VoidCube, d) < distance(t, d) do
3. BlackList ← VoidCube 将空洞域加入黑名单
4. Node t resend RTS contains BlackList frame
5. for i received RTS frame do
6. calculate $T_D(i)$ by formula(5) 见 3.1 节

7. if $T_D(i) < \text{shortest_time}$
8. shortest_time ← $T_D(i)$
9. temp ← i
10. end if
11. end for
12. nextNode ← temp 最小退避时间的节点成为下一跳
13. end while
14. return nextNode
15. end function

5 实验仿真

本文采用 MATLAB 进行路由方案的仿真评估, 主要采用 OR 算法、EAOR 算法与 3DGOR 算法进行比较。这里假设无线传感器网络中的节点都是布置在三维地理环境中, 且具有环境能量捕获能力。具体参数设置如表1所列, 以下结果都是 100 次实验结果的平均值。

表1 仿真参数

参数	单位	值
物理空间范围	m^3	$20 \times 20 \times 20$
源节点坐标		(0, 0, 0)
目的节点坐标		(20, 20, 20)
n		200
R	m	20
D_c	m	5
L	bit	2000
k	bit/s	10^5
E_O	J	0.5
E_C	J	0.5
E_n	J	0.01
e_{tx}	J/bit	7×10^{-6}
e_{rx}	J/bit	5×10^{-6}
e_h	W	3×10^{-4}
$SIFS$	μs	10
$DIFS$	μs	50
m		5
c		2

图5给出了数据包到达率与数据包发送量之间的关系, 通过观察可以发现, 随着数据包发送量的增长, 采用 OR 算法和 EAOR 算法时的数据包到达率不断下降, 采用 3DGOR 算法时的数据包到达率稳定在 90% 左右。这符合预期的结果, 因为 OR 算法会始终选择离目的节点最近的节点作为中继节点, 随着能量的耗尽, 逐渐出现失败的情况, 而周围的其他节点基本保持着能量充足的状态, 得不到有效的利用。EAOR 算法考虑到了节点的剩余能量, 当离目的节点最近的节点的能量较低时, 能量充足而稍远的节点得以竞争成功, 分担了部分传输任务, 这在短时间内可以减少节点死亡的数量, 如图5中数据包数为 50 时相比 3DGOR 算法还略微占优, 但是随着数据量的增长, 分担节点的能量也逐渐耗尽, 丢包率增大。3DGOR 算法通过划分立方体转发域的方式, 解决了过分依赖极少个距离较优节点的问题, 在出现空洞时选择其他转发域, 让剩余能量更充足、发送成功率更高的节点参与竞争。

在能量捕获无线传感器网络中, 节点的能量不是一直减少的, 耗尽能量后死亡的节点只是暂时进入了休眠状态, 当捕获的能量到达一定阈值后, 节点会重新复活, 恢复正常工作。这里定义的 EH-WSNs 中的节点死亡次数的概念, 指的是整个网络中所有节点能量耗尽后从工作状态切换到休眠状态的总次数。由图6可知, 随着发送数据包的个数逐渐增多, 采用 OR 算法时的节点死亡次数出现了爆炸性增长, 采用 EAOR 算法的节点死亡次数也有明显的增多。相比之下, 采用

3DGOR算法时的节点死亡次数维持线性增长。这样的结果与算法的选路方式有关,OR算法总是选择距离目的节点最近的节点作为中继,该节点在耗尽能量而死亡后,一旦捕获少量能量就可复活,就会立刻被选作中继节点。这样导致那些源节点到目的节点直线路径上的节点频繁经历死亡-复活的循环。EAOR算法虽然考虑了剩余能量的情况,抑制了节点的过快死亡,但是经历多轮传输之后,在各节点能量均不充足的情况下,距离上占优的节点的死亡次数仍较大。3DGOR算法不仅考虑了节点的剩余能量,还考虑到节点的历史发送成功率,那些死亡次数较多的节点竞争获胜的概率较低,因此不会反复在濒死状态徘徊。综上分析可以说明,3DGOR算法相比OR算法和EAOR算法可以提高网络的健壮性,使网络中节点的能量更加均衡。

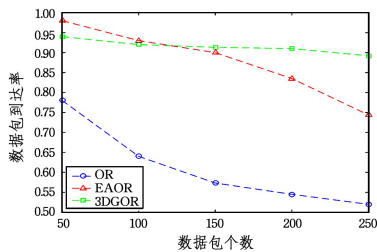


图5 数据包到达率随着数据包个数变化的情况

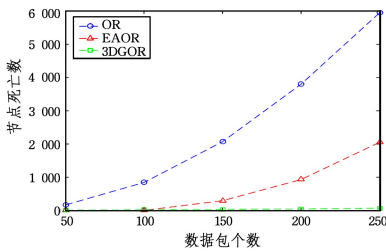


图6 节点死亡次数随着数据包个数变化的情况

图7给出了随着累计成功发送数据包个数的增长,各算法成功发送一个数据包所需的平均时间的变化情况。因为OR算法和EAOR算法的数据包到达率下降,平均时间呈增长趋势。3DGOR算法的平均时间波动不大,传输的可靠性更高。

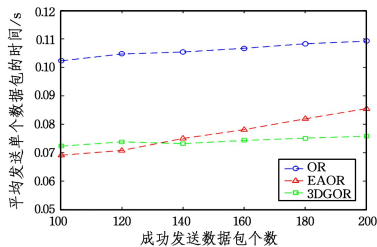


图7 数据包的平均发送时间随数据包个数的变化

图8给出了经过相同时间之后各算法的数据包吞吐量。可以看到3DGOR算法的吞吐量在前期与EAOR算法的吞吐量差异不大,后期占据一定优势。

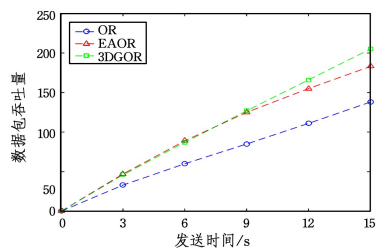


图8 数据包吞吐量随着发送时间的变化

结束语 本文提出了一种适用于能量捕获无线传感网的三维地理机会路由算法,该算法将网络空间均匀划分为多个立方体区域,选定转发域内的各节点根据剩余能量和传递成功率计算退避时间,具有最小退避时间的节点成为转发节点。实验仿真表明,该算法可以显著提高数据传递成功率,平衡网络各节点之间的能耗,增强网络的健壮性,降低数据包的平均发送时间,提高数据吞吐率。未来可以从随机能量捕获的场景以及多节点对多节点进行数据传输的方面来进行深入研究。

参考文献

- [1] KANSAL A, HSU J, ZAHEDI S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2007, 6(4): 32.
- [2] BANDYOPADHYAY S, CHANDRAKASAN A P. Platform Architecture for Solar, Thermal, and Vibration Energy Combining With MPPT and Single Inductor[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(9): 2199-2215.
- [3] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(3): 360-381.
- [4] BI S, ZENG Y, ZHANG R. Wireless powered communication networks: an overview [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 10-18.
- [5] KANSAL A, HSU J, SRIVASTAVA M, et al. Harvesting aware power management for sensor networks[C]// *Design Automation Conference*, 2006, ACM/IEEE. IEEE, 2006: 651-656.
- [6] DONG Y, WANG J, SHIM B, et al. DEARER: A Distance-and-Energy-Aware Routing with Energy Reservation for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12): 3798-3813.
- [7] KWON H, NOH D, KIM J, et al. Low-Latency Routing for Energy-Harvesting Sensor Networks[C]// *International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*. Springer-Verlag, 2007: 422-433.
- [8] ZHI A E, TAN H P. Adaptive opportunistic routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks[C]// *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2012: 318-322.
- [9] 池凯凯, 林一民, 李燕君, 等. 能量捕获传感网中吞吐量最大化的占空比方案[J]. *计算机科学*, 2018, 45(06): 100-104.
- [10] ABDALLAH A E, FEVENS T, OPATRYN J. High delivery rate position-based routing algorithms for 3D ad hoc networks [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(4): 807-817.
- [11] 柯涛, 孙晖, 刘俊延. 基于三维胞元空间的无线传感器网络路由算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(6): 1298-1304.
- [12] BISWAS S, MORRIS R. Opportunistic routing in multi-hop wireless networks [J]. *Microcomputer Information*, 2004, 34(1): 69-74.
- [13] SPACHOS P, CHATZIMISIOS P, HATZINAKOS D, et al. Energy aware opportunistic routing in wireless sensor networks [C]// *IEEE Globecom Workshops*. 2012: 405-409.
- [14] 田贤忠, 肖赞. 一种能量捕获无线传感网络机会路由算法[J]. *计算机科学*, 2016, 43(S1): 288-290, 327.