



区域不同数据产生率的传感网络能量空洞避免研究^{*}

刘明生¹, 苗 森², 李 燕¹

(1. 邯郸学院 邯郸 056038; 2. 河北工程大学信息与电气工程学院 邯郸 056038)

摘 要: 研究区域不同数据产生率的无线传感网络的“能量空洞”现象, 采用环形网络模型, 在此基础上规定了数据的同环内传输和相邻环间传输两种传输机制。当一个簇区域的剩余能量大于设定的阈值时, 就停止转发其他扇区内节点的数据分组, 转而只发送本区域内节点的数据分组, 需要通过此区域转发的数据分组的区域转而寻找同环的其他扇区转发数据。通过理论分析和仿真实验表明, 该方法能够平衡无线传感网络的能量消耗, 增加网络寿命。

关键词: 能量空洞; 无线传感网络; 能量阈值; 数据产生率; 邻环传输

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.020

Research to Avoid the Energy Hole Problem in the Wireless Sensor Network that Different Data Generation Rate in Different Regional

Liu Mingsheng¹, Miao Sen², Li Yan¹

(1. Handan College, Handan 056038, China;

2. Information and Electrical Engineering Institute, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The energy hole problem that different data generation rate in different regional in wireless sensor network was studied, using ring network model. Based on this, two kinds of mechanism were defined, which are the data transmitted in the same ring but different area and the data transmitted in the same area but different rings. When the residual energy in an areas was lower than the energy threshold, the area would stop data packet forwarding for other areas, and only send data packet generated by nodes inside. The data packet that generated by other areas would find other areas in the same ring for data packet forwarding. Theory analysis and simulation test display that this strategy could balance energy consumption in network and prolong the network lifetime.

Key words: energy hole, wireless sensor network, energy threshold, data generation rate, neighbor ring transmit

1 引言

无线传感网络由大量具有采集、传输和控制等能力的传感节点组成。传感节点负责采集数据并通过多跳的方式将数据转发给汇聚节点(sink 节点), sink 节点负责收集和

处理数据, 大量数据的发送和接收导致在 sink 节点周围出现能量空洞, 网络中的数据得不到转发, 致使网络生命周

期结束^[1,2]。研究表明, 在能量空洞出现时, 网络中剩余约 90% 的能量^[3-5]。因此, 如何提高能量的利用率、平衡能量的消耗对能量有限的无线传感网络具有重要的意义。

近年来, 许多研究人员已经提出了许多可行的措施来解决无线传感网络中的“能量空洞问题”^[6-8]。比较经典的有基于不等簇半径轮换的能量空洞避免、基于可移动 sink 节点的能量空洞避免^[9,10]、基于增加有线长链的能量空洞避免

^{*} 邯郸市科学技术研究与发展计划基金资助项目 (No.1220103080)



等^[1]。这些方法基本上是基于整个网络模型各区域节点单位时间内发送数据分组的频率相等的前提下进行的,且有些方法实现难度相对较大,而在现实网络中的许多情况下,不同区域的数据产生率是不相同的。

本文首先从理论上分析了能量空洞产生的原因主要是能量消耗不均,然后兼顾现实传感网络的特点提出了一种能够解决不同区域、不同数据分组产生率的无线传感网络中能量空洞问题的策略。本文的主要工作在于首次提出了在不同区域节点、不同数据分组发送率的网络模型的基础上解决能量问题,并提出了一个簇区域由转发自身和其他簇区域数据分组转为仅发送自己区域数据分组的能量阈值 f 。

2 网络模型及说明

2.1 网络模型

本文假设所有节点分布在半径为 R 的圆形区域, sink 节点位于圆形区域的中心,具有以下性质:初始时每个节点都具有相同的能量,它们一旦被部署将不会变化,节点的能量不能被补充;节点的最大发送距离 tx 远小于最远节点到 sink 节点的距离 R ,即节点采用多跳的方式将数据传给 sink 节点;所有节点均匀地分布在区域中,密度为 ρ ,不同扇区的节点发射率不同,扇区 i 内节点单位时间内发送 s_i bit 的数据,并假设网络的数据链路层具有完美的性能,在数据传输过程中不存在冲突和重发。

定义 1 图 1 中半径 OG 、 OH 与弧 GH 围成的区域叫做一个扇区。

定义 2 图 1 中线段 CD 、线段 AF 、弧 AC 和弧 DF 围成的区域 $CDFA$ 称为一个环形扇区。

2.2 能量消耗模型

本设计采用参考文献[1]中的能量消耗模型,节点发送数据和接收数据消耗的能量如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} E_s = lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{fs}}, d < d_0 \\ E_s = lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{amp}}d^4, d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_r(l) = dE_{\text{elec}} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 为数据发送或接收时发射器所消耗的能量, E_s 为发送数据消耗的能量, $E_r(l)$ 为接收 l bit 数据消耗的能量。当传输距离 d 小于节点传输数据距离的阈值 d_0 时,功率放大损耗采用自由空间模型;当传输距离 d 大于节点传输距离阈值 d_0 时,功率放大损耗采用多路径衰减模型。 ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 为这两种功率放大模式下功率放大所需要的能量。以上参数的具体取值参照参考文献[1]。

2.3 问题描述

将整个圆形区域划分为宽度相同、以网络中心为圆心的同心圆环,圆环半径采用参考文献[1]中的最优簇半径,然后再将整个圆形区域划分为多个圆心角相同的扇区。如图 1 所示, C_i 表示第 i 个圆环,环形扇区 $BCDE$ 和环形扇区 $FEHI$ 分别为环形扇区 $ABEF$ 的邻环形和外环形扇区。

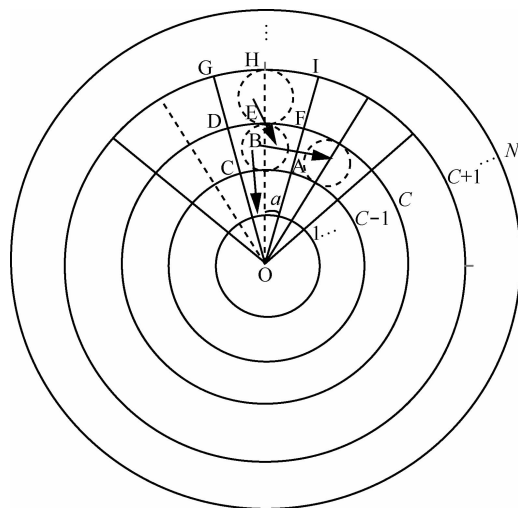


图 1 区域网络模型

设计中所有簇头节点负责转发本簇中所有节点和其他邻簇节点的数据。当一个环形扇区的总能量未达到设定阈值时,簇头节点转发本环形扇区内产生的数据和所有外环形扇区产生的数据;当环形扇区总能量小于或等于设定阈值时,此环形扇区的簇头节点只负责转发此环形扇区产生的数据,同时通知外环形扇区,此环形扇区的外环形扇区需要转发的数据将通过相应的邻环形扇区进行转发。

3 基于能量平衡的传感器网络能量分析

设计中通过平衡同一个扇区中不同环形扇区的能量消耗来实现平衡整个网络的能量消耗,进而增加网络寿命。在本网络模型中,越靠近 sink 节点的环形扇区能量消耗越快,因为它需要转发本扇区内离 sink 节点相对较远的环形扇区中需发送到 sink 节点的数据分组。基于以上分析,设计了同扇区间数据转发和同环间环形扇区数据转发两种机制,即当某一个环形扇区剩余能量未达到能量阈值 f 时,它负责接收本环形扇区产生的数据分组和本扇区内其他环形扇区发送到 sink 节点的数据分组并进行转发;当环形扇区剩余的能量达到能量阈值后,则该环形扇区不再转发其他环形扇区产生的数据分组,只发送本环形扇区产生的数据分组。由此可见,

计算出一个合理的能量阈值 f 是本设计的关键。

3.1 能量消耗计算

简化问题,假设在节点数据转发时,簇头节点到内环形扇区簇头节点和到左邻环形扇区簇头节点数据转发距离 d 均小于传输距离阈值 d_0 ,且认为每次簇头轮换后,簇头节点的位置仍为此环形扇区的中心。所以整个网络内部数据发送功耗放大均为自由空间模型。

定理 1 设某一环形扇区内簇头节点与 sink 节点间的距离为 cr ,所在扇区的圆心角为 ∂ ,则此环形扇区面积和需要接收转发的数据的区域面积分别为 $\partial(2c-1)r^2$ 和 $\partial(n-c)^2r^2$ 。

证明 距离 sink 节点为 cr 的环形扇区是由半径为 $(c-1)r$ 和 cr 的圆组成,如图 1 中弧 AC、弧 DF 和线段 CD、AF 所围成的区域。圆心角为 ∂ ,所以此环形扇区的面积为:

$$\frac{\partial}{\pi} [\pi c^2 r^2 - \pi (c-1)^2 r^2] = \partial(2c-1)r^2 \quad (3)$$

同理,此扇区内节点所要转发的区域为半径为以 nr 和 cr 围成的圆环中的一个环形扇区,面积为:

$$\frac{\partial}{\pi} \pi (n-c)^2 r^2 = \partial(n-c)^2 r^2 \quad (4)$$

定理 2 设某一环形扇区内簇头节点与 sink 节点间的距离为 cr ,所在扇区的圆心角为 ∂ ,单位时间内产生数据量为 s_i ,则此环形扇区需要接收、融合(数据融合率为 ϕ ,融合单位比特消耗能量为 E_{df})并转发其他环形扇区发送的数据分组所消耗的能量为:

$$\partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i (2\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})$$

证明 根据式(3)可计算出单位时间内接收的数据分组个数为:

$$\partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i \quad (5)$$

单位时间内转发的数据分组个数为:

$$\partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i \phi \quad (6)$$

根据式(1)~式(6)可得距离 sink 节点为 cr 的区域单位时间内接收、融合并转发数据分组能量为:

$$\begin{aligned} & \partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i \phi E_{elec} + \partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i \phi (E_{elec} + \epsilon_{fs} d^2) + \\ & \partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i E_{df} = \partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i (2\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df}) \end{aligned} \quad (7)$$

定理 3 距离 sink 节点距离为 cr 的环形扇区单位时间内发送数据分组所消耗的能量为:

$$\partial(2c-1)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})$$

证明 距离 sink 节点为 cr 的区域为由半径为 cr 的

圆、半径为 $(c-1)r$ 的圆、线段 OG 和线段 OI 围成的环形扇区,根据式(3)得其面积为 $\partial(2c-1)r^2$,单位时间内消耗的能量由发送数据分组能量和数据融合消耗能量两部分组成,其中发送数据消耗的能量为:

$$\partial(2c-1)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \epsilon_{fs} d^2) \quad (8)$$

数据融合的能量为:

$$\partial(2c-1)r^2 \rho s_i E_{df} \quad (9)$$

由式(9)可得距离 sink 节点为的环形扇区发送本区域内的数据分组所消耗的能量为:

$$\begin{aligned} & \partial(2c-1)r^2 \rho s_i \phi (E_{elec} + \epsilon_{fs} d^2) + \partial(2c-1)r^2 \rho s_i E_{df} \\ & = \partial(2c-1)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df}) \end{aligned} \quad (10)$$

定理 4 一个环形扇区在未达到能量阈值前和达到能量阈值后接收和转发数据所消耗的能量分别为 $\partial r^2 \rho s_i [(\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})(n^2 - 2nc + c^2 + 2c - 1) + \phi E_{elec}]$ 和 $\partial(2c-1)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})$ 。

证明

(1)达到能量阈值前一个环形扇区的能量消耗由融合并发送本区域产生的数据分组的能量消耗和接收、融合并转发其他区域的数据分组的能量消耗两部分组成。根据定理 3 和定理 1 可得在未达到能量阈值前一个环形扇区单位时间的能量消耗为:

$$\begin{aligned} & \partial(2c-1)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df}) + \\ & \partial(n-c)^2 r^2 \rho s_i (2\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df}) = \\ & \partial r^2 \rho s_i [(\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})(n^2 - 2nc + c^2 + 2c - 1) + \phi E_{elec}] \end{aligned} \quad (11)$$

(2)达到能量阈值以后,环形扇区不再负责接收和转发其他区域的数据分组,它的能量消耗仅用于融合和发送本区域单位时间产生的数据分组,依据定理 3 达到阈值后环形扇区的能量消耗为:

$$\partial(2c-1)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df}) \quad (12)$$

3.2 能量阈值计算

根据定理 4 计算出在达到能量阈值 f 前和到达能量阈值 f 后区域的能量消耗,可以计算出 f 的最优值。

定理 5 环形扇区的能量阈值为:

$$\begin{cases} f = \frac{2c+1}{n^2-c^2} F - (2c-1)E \\ E = \phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df} \\ F = (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})(n^2 - 2nc + c^2 + 2c - 1) + \phi E_{elec} \end{cases}$$



证明 设环形扇区 i 达到能量阈值的时间为 t , 则在达到阈值 f 前环形扇区的能量消耗如式(11)所示, 达到能量阈值 f 后的能量消耗如式(12)所示, 为了提高整个网络的数量, 要求在 i 扇区达到能量阈值 f 后的寿命和 $i+1$ 环形扇区的寿命相等, 所以有:

$$\begin{cases} X_1 f = \frac{X_2 - X_4}{X_3 - X_4} t \\ t = \frac{X_1 - X_1 f}{E_{c1}} \\ X_1 = \delta(2c-1)r^2 \rho e \\ X_2 = \delta(2c+1)r^2 \rho e \\ X_3 = \delta(2c-1)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df}) \\ X_4 = \delta(n^2 - c^2)r^2 \rho s_i (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df}) \\ E_{c1} = \delta r^2 \rho s_i [(\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})(n^2 - 2nc + c^2 + 2c - 1) + \phi E_{elec}] \end{cases} \quad (13)$$

其中, X_1 为 i 环形扇区的初始能量, X_2 为 $i+1$ 环形扇区的初始能量, X_3 为 i 环形扇区达到能量阈值 f 后单位时间的能量消耗, X_4 为 $i+1$ 环形扇区单位时间的能量消耗。

由式(13)可得 f 为:

$$f = \frac{\frac{X_2}{X_4} - \frac{X_1}{E_{c1}}}{\frac{X_1}{X_3} - \frac{X_1}{E_{c1}}} \quad (14)$$

代入式(13)得:

$$\begin{cases} f = \frac{\frac{2c+1}{n^2 - c^2} F - (2c-1)E}{F - (2c-1)E} \\ E = \phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df} \\ F = (\phi E_{elec} + \phi \epsilon_{fs} d^2 + E_{df})(n^2 - 2nc + c^2 + 2c - 1) + \phi E_{elec} \end{cases} \quad (15)$$

4 仿真实验

根据第2节所述的网络模型, 在 OMNet-C++ 平台下进行仿真实验, 底层采用 IEEE 802.11MAC 协议, 路由协议为在 LAECH 协议基础上增加本文提出的达到能量阈值后采用的同环簇区域数据转发机制。仿真实验在第2.1节构建的网络模型假设的基础上, 规定节点初始能量相同, 均为 $e=50$ J, $r=100$ m, 网络圆环数 $n=5$, 其他仿真参数参照参考文献[1]。图1中用于仿真测试的扇区中的节点每单位时间产生的数据量为 50 kbit, 假设阴影部

分相邻的区域单位时间内产生的数据量 (到达能量阈值后有剩余能量转发阴影区域簇中节点产生的数据量) 远小于 50 kbit, 能量计算式参照式(1)和式(2)。

首先仿真未采用同环簇区转发机制时的整个网络的能量消耗和生存周期。在传感网络中靠近 sink 节点的圆环消耗的能量相对较快, 所以当环 C_1 中任意一节点能量消耗尽时整个仿真过程结束, 这段时间就是网络的生命周期。由图2可以看出网络的生命周期大概为 480 s, 当仿真结束时网络中剩余的能量接近 90%。

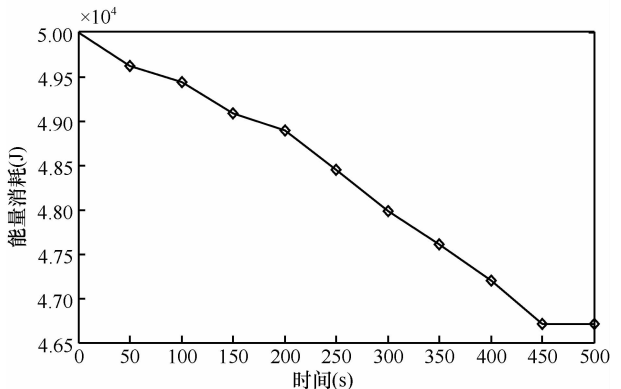


图2 未采用同环簇区转发机制能量消耗和生存周期

其次仿真在区域不同数据产生率的无线传感网络中采用同环簇区转发机制时整个网络的能量消耗和生存周期。由图3可以看出网络的生命周期大概为 2 400 s, 而当仿真结束时网络的能量剩余量明显降低, 达到了均衡网络能量消耗和提高网络生存时间的预想目标。

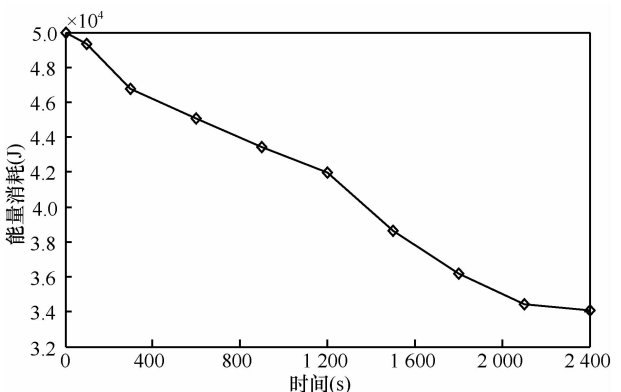


图3 未采用同环簇区转发机制能量消耗和生存周期

由于在一般无线传感网络中靠近 sink 节点的环 C_1 会最先消耗尽能量, 所以接下来仿真环 C_1 中能量阈值 f 取不同值时整个网络的能量消耗和网络的生存周期。由图4可以看出当 f 为 66% 时, 网络的整体剩余能量比较少, 网络的生存时间接近 2 400 s。

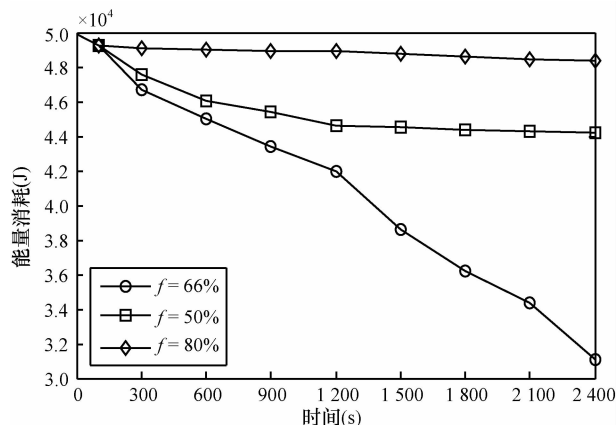


图4 能量阈值 f 取不同值时环 C_1 的能量消耗和生存周期

根据定理5可知,能量阈值 f 的取值与环形网络的环数 n 及数据融合率 ϕ 等都有联系,图5给出了在不同的网络环数和不同的数据融合率下能量阈值 f 的取值情况,可以看出能量阈值 f 的取值与数据融合率 ϕ 和环数 n 均成正比。由于篇幅有限,其他能影响能量阈值 f 取值的参数在此不一一列出。

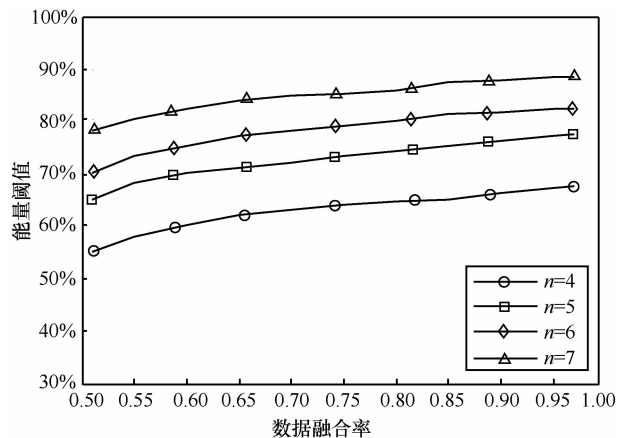


图5 数据融合率 ϕ 和环数 n 对能量阈值 f 的影响

5 结束语

构建基于区域不同数据产生率的无线传感网络,在此基础上分析了能量空洞产生的原因,提出了环间簇区数据转发和环内扇区数据转发两种转发机制,并给出了某个簇区由环内簇区转发到环内簇区转发机制切换的能量阈值 f 的算法。经过试验得到结果:采用这种根据阈值切换转发机制的无线传感网络的网络寿命得到明显的提高。

参考文献

- 刘安丰,阳国军,陈志刚.基于不等簇半径轮换工作的传感器网络能量空洞避免研究.通信学报,2010,31(1):2~8
- 刘宇,聂闻.基于量子免疫的无线传感网络能量空洞避免.传感器与微系统,2011,30(5):24~26
- 陆海明,刘学军,钱江波.异构传感器网络的能量空洞.传感技术学报,2010,23(10):1480~1485
- 曾志文,陈志刚,刘安丰.无线传感网络中基于可调节发送功率的能量空洞避免.计算机学报,2010,33(1):12~22
- 王东方,齐小刚.无线传感网络解决能量空洞问题综述.计算机科学,2010,37(12):18~21
- Chen G, Li C F, Ye M, et al. An unequal cluster-based routing strategy in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2009,15(2):193~207
- Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problems in sensor networks. Pervasive and Mobile Computing,2007,3(3):233~254
- You J X, Dominik L, Dirk T. Context-based topology management for wireless sensor networks. Proceedings of 7th International Forum Life Science Automation (LSA2009), Rostock, Germany, September 2009
- Young I K, Park C S, Song I C, et al. An efficient void resolution method for geographic routing in wireless sensor networks. Journal of Systems and Software, 2009, 82(6):963~973
- 胥楚贵,邓晓衡,邹豪杰.无线传感网络覆盖空洞修复策略.传感技术学报,2010,23(2):256~258
- 吴晓兵,陈贵海.无线传感网络中节点非均匀分布的能量空洞问题.计算机学报,2008,31(2):253~260

[作者简介]



刘明生,男,博士,邯郸学院教授,主要研究方向为信息技术。



苗森,男,河北工程大学硕士研究生,主要研究方向为物联网技术应用、WSN 和嵌入式技术。



李燕,女,博士,邯郸学院教授,主要研究方向为光电器件与传感技术。

(收稿日期:2013-01-29)