

基于小世界的传感器网络查询能量空洞问题

刘学军^{1),2)} 陆海明¹⁾ 周水庚²⁾ 白光伟¹⁾

¹⁾(南京工业大学电子与信息工程学院 南京 210009)

²⁾(复旦大学计算机科学技术学院 上海 200092)

摘 要 靠近 Sink 的传感器节点因为需要转发来自其它节点的数据而承担了更多的通信负载,这些节点往往更早地耗尽自身能量而有更短的生命周期,这种现象被称为“能量空洞”问题.文中基于小世界思想,通过向 Sink 节点添加一些长链,减少 Sink 周围节点转发数据的数量来缓解能量空洞的出现,从而延长网络的生命周期.首先对等距传输的网络进行了能耗分析,然后提出采用小世界的策略缓解能量洞的出现,从理论上分析了长链的位置和数量对能量消耗和网络生命周期的影响,提出了一种实用的小世界网络实现方法.仿真实验验证了理论分析结果.

关键词 传感器网络;小世界;能量洞;网络生命周期;能量消耗

中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2012.02676

The Energy Hole Problem Based on Small World in Wireless Sensor Networks

LIU Xue-Jun^{1),2)} LU Hai-Ming¹⁾ ZHOU Shui-Geng²⁾ BAI Guang-Wei¹⁾

¹⁾(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009)

²⁾(School of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200092)

Abstract Sensor nodes closer to the sink need to relay more traffic compared to other nodes in outer sub-regions, thus they suffer much faster energy consumption rates and have much shorter expected lifetime. This phenomenon of uneven energy consumption is called the “energy holes” problem. In this paper, we propose a new method to solve the “energy holes” problem. The method is based on the concept of small worlds where the addition of a small number of long-range links to Sink results in significant reduction in traffic of nodes closer to the Sink. This method balances the energy expenditure among sensors and alleviates the energy holes problem, thus prolongs the lifetime of the sensor network. We analyze the optimal location and quantity of long-range links theoretically. Moreover we further explore their influence on energy expenditure and network lifetime. On this basis, we present a practicable method to realize the small world network. Simulation experiments verify the results of theoretical analysis.

Keywords sensor networks; small world; energy hole; network lifetime; energy consumption

1 引 言

在传感器网络中,如何有效地提高网络的生命

周期是一个核心研究问题.感知数据通常以多跳的方式传送到 Sink 节点,这样靠近 Sink 的传感器节点因为需要转发来自其它节点的数据而承担了更多的通信负载,所以这些节点容易过早耗尽自身能量

收稿日期:2009-06-11;最终修改稿收到日期:2011-06-13. 本课题得到国家自然科学基金(60873070,61073197)、江苏省自然科学基金(BK201054)和江苏省科技支撑计划(SBE201077457)资助. 刘学军,男,1970年生,博士,副教授,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究方向为传感器网络、数据库和数据挖掘. E-mail: lxj_njgd@163.com. 陆海明,男,1986年生,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络. 周水庚,男,1966年生,教授,博士生导师,主要研究领域包括数据库、P2P计算、传感器网络、生物信息学等. 白光伟,男,1961年生,教授,博士生导师,主要研究领域为无线移动自组织网络、无线传感器网络、多媒体网络服务质量等.

而失效,导致在 Sink 周围形成能量空洞. 能量空洞的出现使得传感数据无法送达 Sink 节点,于是网络生命周期终结,而此时网络中还有大量的剩余能量被白白浪费. 文献[1]中的实验结果表明,当一个传感器网络生命结束后,总的节点剩余能量超过 90%. 如何有效地进行网络设计,充分利用这些剩余能量来延长网络的生命周期,是一个具有重要意义的研究课题. 为了解决能量空洞问题,人们提出了许多方法.

与已有的研究不同,本文基于小世界思想,通过向 Sink 节点添加一些长链,减少 Sink 周围节点转发数据的数量来缓解能量空洞的出现,从而延长网络的生命周期,该方法不仅能够显著提高网络的生命周期,而且,很容易在实际中实现. 我们从理论上分析了长链的数量和位置对网络能量消耗和能量空洞的影响. 网络中的长链可以是无线长链或有线长链. 无线长链布置灵活,但是,可能会增大网络的能量消耗;有线长链一旦布置很难改变,而且在很多应用环境中难以部署有线长链,但是,它有利于降低网络总的能量消耗. 考虑到便于实际应用,本文主要采用了无线长链,基于小世界思想提出了一种有效缓解能量空洞的新方法.

本文第 2 节介绍相关的研究工作;第 3 节给出本文使用的网络模型和能量模型;第 4 节具体阐述基于小世界的能量空洞解决方法;第 5 节通过实验验证我们的理论分析;第 6 节对全文进行总结.

2 相关工作

Lian 等人^[1]研究了传感器网络中的能量消耗,他们通过实验发现,对于一个 Sink 静止、节点均匀分布的大规模网络,当网络生命周期结束时,仍然有高达 90% 的剩余能量. 因此,这种由均匀分布的同构节点组成的静态模型不能充分利用网络的能量. 这也预示了实际的网络生命周期可以进一步延长. 为此,他们提出了一种传感器节点不均匀分布策略,靠近 Sink 的区域布置更多的传感器节点,实验表明,新策略能够显著提高网络的生命周期. Wu 等人^[2]同样采用不均匀的节点布置策略来缓解能量空洞. 他们从理论上探讨这种策略,证明在节点非均匀分布的圆形网络中,如果节点持续向 Sink 节点发送数据,能量空洞现象将无法避免,而当节点数目满足一定关系时,网络中能够实现次优能耗均衡. 他们提出一种节点非均匀分布策略及相应的路由算法

用于实现这种次优能耗均衡. 节点非均匀分布是解决能量空洞的一种有效方法,但在实际中往往很难实施.

宋超等人^[3]基于改进的分级环模型,通过调节各环内节点的数据传输距离实现网络节能的目的. 他们证明搜索各区域最优的传输距离是一个多目标优化问题,从而提出一种基于蚁群优化的分布式算法,各区域根据其节点分布情况自适应地探索近似最优的传输距离,实现网络寿命延长. 这种方法往往需要复杂的计算,也不适用传感器节点存在移动的场所.

Li 等人^[4]研究了多对一传感器网络的能量空洞,他们建立了一个分析模型. 基于该模型,分析各种现存技术对于缓解能量空洞的有效性,但他们没有提出新的解决能量空洞的方法. Olariu 等人^[5]从理论上分析了传感器网络的不均匀能量消耗,作者假定一个圆形网络中的节点均匀分布,节点持续向 Sink 传送数据. 文中使用的能量消耗模型是 $E = d^\alpha + c$,其中 $d(d \leq t_r)$ 是传输距离, $\alpha \geq 2$ 是能量衰减系数, c 是一个正常数, t_r 是传感器节点的最大传输半径. 作者证明了如果网络中被划分的圆环等宽,在路由上的能耗能够降到最低. 而且,他们发现当 $\alpha > 2$ 时通过调整圆环的宽度可以避免能量空洞出现,而 $\alpha = 2$ 时,网络中则无法避免能量空洞形成.

Jarry 等人^[6]基于最大化网络生命周期的目的,提出一种混合式路由策略,采用线性规划的方法平衡各区域的能量消耗以延长网络寿命,作者假设所有传感器节点都能直接传递数据到 Sink,即任何一个传感器到 Sink 的距离均小于其最大传输距离,节点基于一个剩余能量的函数直接或多跳的方式将数据传递到 Sink. Perillo 等人^[7]分析指出,在采用相同通信半径的多跳方式时,靠近基站的节点更容易耗尽能量而失效;相反,节点与基站采用直接单跳通信时,距离基站较远的节点因能耗较大而提早死亡. 为此,提出一种功率控制策略来平衡各节点间的能耗,将网络生命周期的最大化问题归结为一个线性规划问题. 上述算法对大规模传感器网络是不适用的.

Dasgupta 等人^[8]提出了通过节点职责分配来使网络生存期最大化的算法,该算法包含 2 种节点类型,即传感器节点和转发节点. Hou 等人^[9]采用层次结构来平衡能量的消耗,作者提出了一种双层的无线传感器网络体系,其节点被分成组,每一组包含一个汇聚传递(AFN)节点,该节点负责汇集本组

所有节点的数据和向 Sink 传递数据,这些 AFN 节点和 Sink 形成了网路体系的第 2 层。

文献[10-13]通过引入动态性来缓解无线传感器网络中的能量消耗不均衡问题。Wang 等人^[10]采用移动中继来延长网络的生命周期,作者发现移动中继仅需要在离两跳范围内移动就可以显著提高网络的生命周期。但是,在很多实际网络中,特别是环境比较恶劣的情况下,很难有效实现移动中继。文献[11-13]采用移动 Sink 来进行数据的收集。由于 Sink 的移动,它周围的节点不断变化,这样可以避免在 Sink 的周围形成能量空洞。但是,在很多应用场合, Sink 是不适合移动的,特别是在敌对方的区域内。

Helmy^[14]通过在无线传感器网络中引入逻辑链路形成具有小世界效应的无线网络,验证了小世界网络同样适用于具有空间属性的无线传感器网络。Sharma、Chitradurga 等人^[15-16]的研究表明,通过向网络中添加少量的长链,可以显著地改善能量消耗的不均匀性,提高网络的生命周期。但是,他们的工作都没有考虑能量空洞问题。

Liu 等人^[17]类似文献[2]采用不均匀的节点布置策略来缓解能量空洞,策略的核心是让近 Sink 的簇半径较小,而远 Sink 的簇半径较大。Liu^[18]提出了一种基于节点能量非均匀分布的能量空洞避免机制,即根据节点的能耗水平为每个节点储备不同的初始能量,其实质类似于文献[17]和文献[2]。

上述解决能量空洞的方法主要可以归纳为两种:(1)通过节点的不均匀分布来解决能量空洞,即越靠近 Sink 越布置更多的传感器节点,研究表明,这种方法能显著提高网络的生命周期,但这种非均匀的节点分布策略在实际中较难实现,因为大多数情况下节点的分布都是随机的,局部区域的节点密度难以控制;(2)采用线性规划或优化方法等搜索传感器节点适合的传输距离来延长网络的生存时间,从而解决能量空洞,这类方法通常要求不同节点使用不同的通信半径,有的方法还要求每个节点都有能力与 Sink 直接通信,计算的复杂性和对节点的移动性比较敏感等都限制了它们在实际中的应用。

与上述研究不同,本文基于小世界的思想,提出了一种新的能量空洞解决方法,不仅能够显著提高网络的生命周期,而且很容易在实际中实现。

3 网络模型和能量模型

与文献[7]类似,本文假设所有传感器节点均匀

分布在一个半径为 R 的圆形区域, Sink 被布置在网络的中心。网络被 k 个中心圆分割成若干环形区域,中心圆的半径分别为 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k$,且满足 $0 < r_1 < r_2 < r_3 < \dots < r_k = R$,特别地 $r_0 = 0$ 。当 $1 < i < k$ 时,对于任意圆环 C_i 是由半径为 r_{i-1} 和 r_i 的两个同心圆所分隔的环形区域。圆环的最大宽度是传感器节点的最大传输半径 t_x 。假设圆环 C_i 中的传感器节点采用传输距离 $r_i - r_{i-1}$ 将数据传递给 C_{i-1} 中的传感器节点。每个节点收集它感应范围内的数据并向 Sink 传送。假设网络规模很大,数据的传递需要多跳才能完成。环 C_i 内的节点不仅需要传递它自身产生的数据,还要传递 C_{i-1} 到 C_i 的数据。网络结构如图 1 所示。

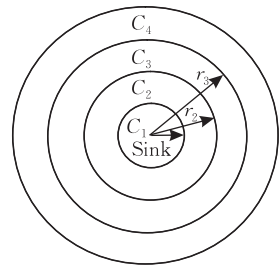


图 1 网络模型

一个典型的传感器节点通常由 3 部分组成:感知单元、处理单元和收发单元。假设所有传感器节点有相同的初始能量 E , Sink 节点的能量是无限的。网络采用了一种优化的睡眠调度协议,空闲的传感器节点进入睡眠状态,因此传感器节点在空闲状态的能量消耗被忽略。由于传感器网络的能量消耗主要是由数据传输引起的,因此能量模型仅考虑传输数据的能耗和接收数据的能耗。本文采用文献[3-4]的能量消耗公式:

$$E_{tx} = \beta_1 + \beta_2 d^\alpha, E_{rx} = \beta_3,$$

其中, E_{tx} 为传输单位数量数据的能量消耗, E_{rx} 为接收单位数量数据的能量消耗, β_1, β_2 和 β_3 是正常数, d 是数据的传输距离, $2 \leq \alpha \leq 6$ 。根据文献[6], α 的典型值是 2 或 4, $\beta_1 = 45 \times 10^{-9}$ J/bit, $\beta_2 = 10 \times 10^{-12}$ J/(bit \cdot m⁻²) (当 $\alpha = 2$), 或 $\beta_2 = 0.001 \times 10^{-12}$ J/(bit \cdot m⁻⁴) (当 $\alpha = 4$), $\beta_3 = 135 \times 10^{-9}$ J/bit。

4 基于小世界的查询能量空洞问题

本节从能量的角度对传感器网络采用小世界的策略进行理论分析。首先对等距传输的网络进行能耗分析,然后提出采用小世界的策略缓解能量洞的出现,从理论上分析了长链的位置和数量对能量消

耗和网络生命周期的影响,讨论了小世界网络的实现方式。

4.1 等距离传输的能耗分析

在多对一的传感器网络中,所有传感器节点的感知数据都通过多跳方式传送到 Sink 节点,这导致了能量消耗的不均匀,靠近 Sink 的传感器节点由于需要转发更多来自其它节点的数据而较早地耗尽自身的能量,导致 Sink 的周围出现能量空洞. 我们假设每个传感器节点单位时间产生 b 个单位数据,由于节点是均匀随机分布的,因此整个网络的节点密度也是均匀的,即

$$\rho = \frac{N}{A},$$

其中, N 是网络中传感器节点的总数, A 是网络区域的面积。

根据我们的网络模型和能量模型,环 C_1 的总能量消耗是

$$E_{1\text{total}} = E_{rx1} + E_{rx1} \\ = \rho \pi r_k^2 b (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \beta_3 \rho \pi (r_k^2 - r_1^2) b \quad (1)$$

文献[7]从理论上分析了传感器网络的不均匀能量消耗,作者证明了如果网络中被划分的圆环等宽,在路由上的能耗能够降到最低. 因此,我们的模型也采用了等宽的圆环,这样 $r_i = ir_1$ ($1 \leq i \leq k$), 式(1)转化为

$$E_{1\text{total}} = \rho \pi b (r_k^2 \beta_1 + r_k^2 \beta_2 r_1^\alpha + r_1^2 (k^2 - 1) \beta_3).$$

环 C_1 内每个节点的平均能量消耗是

$$E_1 = \frac{E_{1\text{total}}}{\rho \pi r_1^2} \\ = \frac{\rho \pi b (r_k^2 \beta_1 + r_k^2 \beta_2 r_1^\alpha + r_1^2 (k^2 - 1) \beta_3)}{\rho \pi r_1^2} \\ = b (k^2 \beta_1 + k^2 \beta_2 r_1^\alpha + (k^2 - 1) \beta_3) \quad (2)$$

假设圆环 C_i 中的传感器节点采用传输距离 $r_i - r_{i-1}$ 将数据传递给 C_{i-1} 中的传感器节点,环 i 内节点数量为 $\rho \pi (r_i^2 - r_{i-1}^2)$,接收的数据量是 $\rho \pi b (r_k^2 - r_i^2)$,需要传输的数据量是 $\rho \pi b (r_k^2 - r_{i-1}^2)$,若总能耗是 $E_{i\text{total}}$,每个节点的平均能量消耗是 E_i ,则有

$$E_{i\text{total}} = \rho \pi b (r_k^2 - r_{i-1}^2) (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \rho \pi b (r_k^2 - r_i^2) \beta_3 \\ = \rho \pi b r_1^2 (k^2 - i^2 + 2i - 1) (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ \rho \pi b r_1^2 (k^2 - i^2) \beta_3, \\ E_i = \frac{E_{i\text{total}}}{\rho \pi (r_i^2 - r_{i-1}^2)} \\ = \frac{\rho \pi b r_1^2 (k^2 - i^2 + 2i - 1) (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \rho \pi b r_1^2 (k^2 - i^2) \beta_3}{\rho \pi r_1^2 (2i - 1)} \\ = b \frac{(k^2 - i^2 + 2i - 1) (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + (k^2 - i^2) \beta_3}{2i - 1}.$$

所以,

$$\frac{E_i}{E_1} = \frac{(k^2 - (i-1)^2) (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + (k^2 - i^2) \beta_3}{(2i-1) (k^2 \beta_1 + k^2 \beta_2 r_1^\alpha + (k^2 - 1) \beta_3)}.$$

由此,我们得到

$$\frac{k^2 - i^2}{k^2 (2i-1)} \leq \frac{E_i}{E_1} \leq \frac{k^2 - (i-1)^2}{(2i-1) (k^2 - 1)} \quad (3)$$

最大环数 k 分别取 10、20 和 30,根据式(3),得到 E_i/E_1 值的范围如表 1。

表 1 E_i/E_1 值的变化趋势

环数 i	最大环数 $k=10$		最大环数 $k=20$		最大环数 $k=30$	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
1	1	1	1	1	1	1
2	0.320	0.333	0.330	0.333	0.332	0.333
3	0.182	0.194	0.195	0.198	0.198	0.199
4	0.120	0.131	0.137	0.140	0.140	0.142
5	0.083	0.094	0.104	0.107	0.108	0.109

从表 1 可以看出,环 C_1 节点的能耗远远大于其它环的能量消耗,它们能量的耗尽是能量空洞形成的主要原因,而且,最大环数的改变并不影响上述规律. 因此,我们可以通过添加少量长链,将其它环的部分数据直接发送给 Sink,从而降低环 C_1 的能量消耗,延长网络的生命周期。

4.2 基于小世界的能耗分析

由于节点能量的消耗与传输距离的 α 的 2~6 次方成正比,因此,长链的存在会增加相应节点的能量消耗. 通过前面的分析,我们发现随着远离 Sink,传感器节点的能耗急剧下降,能量空洞主要出现在靠近 Sink 的圆环,特别是第一个圆环 C_1 . 因此,可以通过一定的长程连接,增大远离 Sink 的节点能耗和降低靠近 Sink 的节点能耗,从而实现能量均衡,延长网络的生命周期. 但是,增加多少长链,在哪里加长链最为有利,这些长链对网络的生命周期有多大影响? 下面进行分析。

考虑在环 C_i ($2 \leq i \leq k$) 内存在一定比率 $(1 - \lambda_i)$ 的长链,通过这些长链,相应节点可以和 Sink 直接通信,这些节点的数据不需要环 C_1 内的节点转发,即第 i 至第 k 环产生的数据量中需要环 C_1 内节点接收和转发的数据量为 $\rho \pi b \lambda_i (r_k^2 - r_{i-1}^2)$,环 C_1 内节点还要转发第 1 至 $i-1$ 环产生的数据量 $\rho \pi b r_{i-1}^2$,环 C_1 内节点还需要接收来自第 2 至 $i-1$ 环产生的数据量 $\rho \pi b (r_{i-1}^2 - r_1^2)$,因此,环 C_1 的总能量消耗是

$$E_{1\text{total}} = E_{rx1} + E_{rx1} \\ = \rho \pi b \lambda_i (r_k^2 - r_{i-1}^2) (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ \rho \pi b r_{i-1}^2 (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ \rho \pi b \lambda_i (r_k^2 - r_{i-1}^2) \beta_3 + \rho \pi b (r_{i-1}^2 - r_1^2) \beta_3,$$

环 C_1 内每个节点的平均能量消耗是

$$\begin{aligned} E_{1l} &= \frac{E_{1l\text{total}}}{\rho\pi r_1^2} \\ &= (\rho\pi b((\lambda_i r_k^2 - \lambda_i r_{i-1}^2 + r_{i-1}^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad \beta_3(\lambda_i r_k^2 - \lambda_i r_{i-1}^2 + r_{i-1}^2 - r_1^2)))/(\rho\pi r_1^2) \\ &= b((\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad \beta_3(\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2 - 1)). \end{aligned}$$

在存在长链的情况下, 环 C_1 内节点能耗降低:

$$\begin{aligned} \frac{E_{1l}}{E_1} &= (b((\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad \beta_3(\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2 - 1)))/ \\ &\quad (b(k^2\beta_1 + k^2\beta_2 r_1^\alpha + (k^2 - 1)\beta_3)) \\ &= ((\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad \beta_3(\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2 - 1))/ \\ &\quad (k^2\beta_1 + k^2\beta_2 r_1^\alpha + (k^2 - 1)\beta_3), \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} \frac{E_{1l}}{E_1} &\leq ((\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad \beta_3(\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2 - 1) + \beta_3)/ \\ &\quad (k^2\beta_1 + k^2\beta_2 r_1^\alpha + (k^2 - 1)\beta_3 + \beta_3) \\ &= \frac{(\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha + \beta_3)}{k^2(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha + \beta_3)} \\ &= \lambda_i + \frac{(1-\lambda_i)(i-1)^2}{k^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{E_{1l}}{E_1} &\geq ((\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad \beta_3(\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2 - 1) - (\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha))/ \\ &\quad (k^2\beta_1 + k^2\beta_2 r_1^\alpha + (k^2 - 1)\beta_3 + \beta_3) \\ &= \frac{(\lambda_i k^2 - \lambda_i(i-1)^2 + (i-1)^2 - 1)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha + \beta_3)}{k^2(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha + \beta_3)} \\ &= \lambda_i + \frac{(1-\lambda_i)(i-1)^2 - 1}{k^2}, \end{aligned}$$

即

$$\lambda_i + \frac{(1-\lambda_i)(i-1)^2 - 1}{k^2} \leq \frac{E_{1l}}{E_1} \leq \lambda_i + \frac{(1-\lambda_i)(i-1)^2}{k^2} \quad (4)$$

传感器网络中的长链数量受到能量消耗和实现的限制, 不宜过多. 设网络中有固定数量的长链, 记作 n 个, 这些长链出现在环 C_i 内, 环 C_i 内节点总数为 N_i , 长链的比率为 $(1-\lambda_i)$, 则有

$$\begin{aligned} n &= (1-\lambda_i)N_i = (1-\lambda_i)\rho\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \\ &= \rho\pi r_1^2(1-\lambda_i)(2i-1). \end{aligned}$$

所以,

$$\lambda_i = 1 - \frac{n}{\rho\pi r_1^2(2i-1)} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, λ_i 随着 i 的增大而增大. 根据式(4)和式(5), 当长链出现在远离 Sink 的圆环内时, 环 C_1 内节点的平均能耗 E_{1l} 将增大, 即 E_{1l} 随着 i 的增大而增大. 因此, 长链布置在环 C_2 内最为有利, 即有利于延长网络的生命周期, 同时, 由于长链的长度较短, 又便于实现.

环 C_2 内节点接收能耗为 $\beta_3\rho\pi b(r_k^2 - r_2^2)$, 设环 C_2 内总计有 N_2 个传感器节点, 那么有 λN_2 个传感器节点将数据传送给 C_1 内的节点, 发送能耗为 $\rho\pi b(r_k^2 - r_1^2)\lambda(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha)$, $(1-\lambda)N_2$ 个传感器节点通过长程连接将数据直接传送给 Sink, 能耗为 $\rho\pi b(r_k^2 - r_1^2)(1-\lambda)(\beta_1 + \beta_2 r_2^\alpha)$, 所以环 C_2 的总能量消耗是

$$\begin{aligned} E_{2l\text{total}} &= E_{tx2l} + E_{rx2l} \\ &= \rho\pi b(r_k^2 - r_1^2)\lambda(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad \rho\pi b(r_k^2 - r_1^2)(1-\lambda)(\beta_1 + \beta_2 r_2^\alpha) + \\ &\quad \beta_3\rho\pi b(r_k^2 - r_2^2). \end{aligned}$$

环 C_2 内每个节点的平均能量消耗是

$$\begin{aligned} E_{2l} &= \frac{E_{2l\text{total}}}{\rho\pi(r_2^2 - r_1^2)} \\ &= (\rho\pi b((\lambda r_k^2 - \lambda r_1^2)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad (r_k^2 - r_1^2)(1-\lambda)(\beta_1 + \beta_2 r_2^\alpha) + \beta_3 r_1^2(k^2 - 4)))/ \\ &\quad (3\rho\pi r_1^2) \\ &= (b((\lambda k^2 - \lambda)(\beta_1 + \beta_2 r_1^\alpha) + \\ &\quad (k^2 - 1)(1-\lambda)(\beta_1 + \beta_2 r_2^\alpha) + \beta_3(k^2 - 4)))/3. \end{aligned}$$

为了缓解能量空洞, 延长网络的生命周期, 需要环 C_1 和环 C_2 内的节点有相同的寿命, 即它们的能量消耗相同, 因此, 令 $E_{1l} = E_{2l}$, 得到

$$\lambda = \frac{(k^2 - 4)(\beta_1 + \beta_3) + (2^{\alpha}k^2 - 2^{\alpha} - 3)\beta_2 r_1^{\alpha}}{3(k^2 - 1)(\beta_1 + \beta_3) + (k^2 - 1)(2^{\alpha} + 2)\beta_2 r_1^{\alpha}} \quad (6)$$

对于具体的网络, 将相关参数代入式(6)就可以得到 λ 值.

4.3 网络的生命周期和长链的实现

本节首先计算等距传输网络和小世界网络的生命周期, 并将它们进行对比分析, 然后介绍小世界网络中的长链实现方法.

根据式(2), 得到等距传输网络的生命周期, 其中 e 为节点能量:

$$T = \frac{e}{E_1} = \frac{e}{b(k^2\beta_1 + k^2\beta_2 r_1^\alpha + (k^2 - 1)\beta_3)}.$$

当在环 C_2 内有 $(1-\lambda)N_2$ 个长链时, 根据式(4), 我们有

$$\lambda - \frac{\lambda}{k^2} \leq \frac{E_{1l}}{E_1} \leq \lambda + \frac{(1-\lambda)}{k^2},$$

所以,小世界网络的生命周期

$$\frac{ek^2}{E_1[\lambda(k^2-1)+1]} \leq T_l = \frac{e}{E_{1l}} \leq \frac{ek^2}{E_1\lambda(k^2-1)},$$

即

$$\frac{k^2}{\lambda(k^2-1)+1} T \leq T_l \leq \frac{k^2}{\lambda(k^2-1)} T \quad (7)$$

根据式(7),在环 C_2 内加入部分长链后,网络的生命周期至少提高 $\frac{k^2}{[\lambda(k^2-1)+1]}$ 倍. 对于具体的网络,将相关参数代入式(6)和式(7)就可以得到 T_l 值.

我们通过在环 C_2 内布置具有两种传输半径的传感器节点来实现长程连接. 一种最大传输半径是 r_1 , 只能将数据传送给 C_1 内的节点, 另一种最大传输半径是 $2r_1$, 可以将数据直接传给 Sink. 以 Sink 为坐标原点, 将圆形区域划分为 4 个象限. 长程连接由 Sink 发起, 每隔一定时间, Sink 随机从每个象限选择具有较大剩余能量的 $(1-\lambda)N_2/4$ 个节点建立长程连接, 即这些节点采用通信半径 $2r_1$ 将数据直接传送给 Sink. C_2 内的其它节点只能通过 C_1 内节点的转发才能将数据传送给 Sink. 当 C_2 内的某个节点的剩余能量低于 C_1 内节点的平均剩余能量时, 它不能被选为长程连接节点, 从而防止 C_2 内节点比 C_1 内节点更早耗尽能量.

从 4.1 节表 1 可以看出, 环 C_1 节点能量的耗尽是能量空洞形成的主要原因, 因此, 可以通过添加少量长链, 将其它环的部分数据直接发送给 Sink, 从而降低环 C_1 的能量消耗, 延长网络的生命周期. 根据 4.2 节式(4)和(5), 当长链出现在远离 Sink 的圆环时, 环 C_1 内节点的平均能耗 E_{1l} 将增大, 即 E_{1l} 随着环数 i 的增大而增大. 因此, 长链布置在环 C_2 内最为有利, 即有利于延长网络的生命周期, 同时, 由于长链的长度较短, 又便于实现. 根据 4.3 节式(7), 在环 C_2 内加入部分长链后, 网络的生命周期至少提高 $k^2/[\lambda(k^2-1)+1]$ 倍, 若 λ 近似取 0.5, 网络生命周期大约提高 2 倍. 通过上述分析可以看出, 在环 C_2 内加入部分长链可以有效地提高网络的生命周期, 而且, 与其它相关方法相比, 很容易在实际中实现.

5 仿真实验

本节从实验的角度对上述理论分析结果进行验

证, 并分析最大环数 k 和圆环宽度 r_1 对网络生命周期的影响, 通过与等距离传输网络进行对比, 验证了我们的方法可以显著提高网络的生命周期. 由于能量空洞问题主要关注的是网络的生命周期, 因此, 仿真实验主要考核、分析了网络生命周期. 在模拟实验中, 参数 α 、 β_1 、 β_2 和 β_3 取典型值: $\alpha = 2$, $\beta_1 = 45 \times 10^{-9}$ J/bit, $\beta_2 = 10 \times 10^{-12}$ J/bit/m², $\beta_3 = 135 \times 10^{-9}$ J/bit. 节点初始能量 $e = 100$ J, 单位时间产生的数据量 $b = 10^4$ bit/s, 普通节点的最大传输半径为 r_1 , 长链节点的最大传输半径为 $2r_1$, 仿真节点数分别为 1000 个、2200 个、4000 个、6000 个节点(分别对应于不同的 k 值). 传感器节点均匀分布. 我们假设 MAC 层是理想的, 不存在冲突和数据重传导致的额外能量消耗. 在 C_2 内有 $(1-\lambda)N_2$ 个传感器节点直接和 Sink 通信, λ 值根据式(6)得到.

传感器所在的区域被分割成若干个等宽的圆环, 圆环的宽度等于 r_1 , 最大圆环的半径为 r_k , k 表示网络中圆环的总数. T_l/T 表示小世界网络和等距传输网络的生命周期之比, 反映了采用少量长链后的生命周期提高程度. 从图 2 可以看出, 当 r_1 一定时, 网络规模对生命周期提高程度的影响很小, 这说明我们的方法不仅适用于小规模网络, 而且, 同样适用于大规模传感器网络, 具有很好的扩展性. 这一结论与 4.3 节式(7)基本吻合.

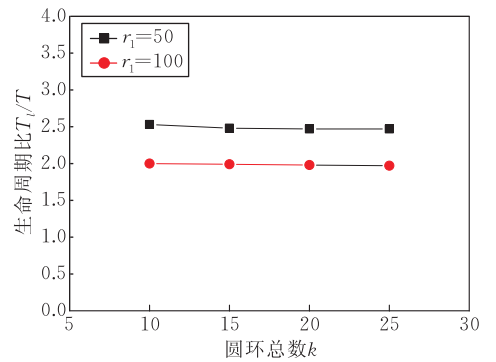


图 2 网络规模的影响

从网络能量模型可以看出, 数据从一个节点传到另一个节点, 其能量消耗正比于 r_1 的 α 次方. 根据本文的网络模型, 当 k 值一定时, 数据传输的跳数也是一定的. 因此, k 值不变时, 不同的 r_1 值反映了单跳传输距离(或圆环宽度)对网络生命周期的影响. 从图 3 可以看出, 单跳传输距离 r_1 对网络生命周期的提高程度有很大的影响, T_l/T 随着 r_1 的增大不断下降, 但是, 下降的趋势逐渐减缓. 这主要是由于随着 r_1 的增大, 长链传输将消耗更多的能量, 增大

了网络的总能量消耗.这也说明了将长链布置在环 C_2 内最为有利,特别是在单跳传输距离较大时.我们的进一步分析表明,当 r_1 增大一定值时, T_l/T 基本保持不变,接近于 λ 值.

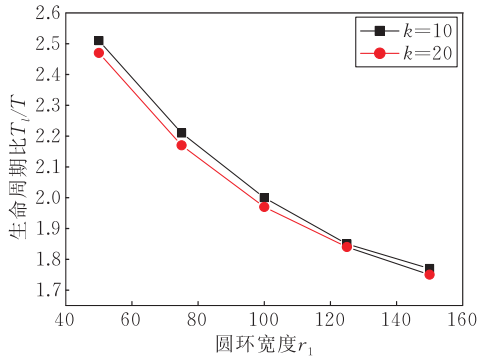


图 3 单跳传输距离的影响

图 4 反映了长链的数量 $((1-\lambda)N_2)$ 对网络生命周期的影响.其中 $k=10$, r_1 分别取 80 m 和 100 m.可以看出添加长链能够显著地提高网络的生命周期,而且,随着 λ 的增大,网络生命周期逐渐提高,然而当 λ 达到一定值 λ_{lj} 时,随着 λ 的增大,网络生命周期反而逐渐降低.这是因为长链的存在将增大环 C_2 内节点的能耗,当 $\lambda < \lambda_{lj}$ 时,节点的失效发生在环 C_2 内,随着 λ 的增大,更多的数据传给环 C_1 ,因此,延长了环 C_2 内节点的生命周期.当 $\lambda > \lambda_{lj}$ 时,节点的失效发生在环 C_1 内,随着 λ 的增大,由于更多的数据传给环 C_1 ,环 C_1 内节点的生命周期变得更短.在 $\lambda = \lambda_{lj}$ 时,环 C_1 和环 C_2 内节点具有相同的平均能耗,此时,网络具有最大的生命周期.

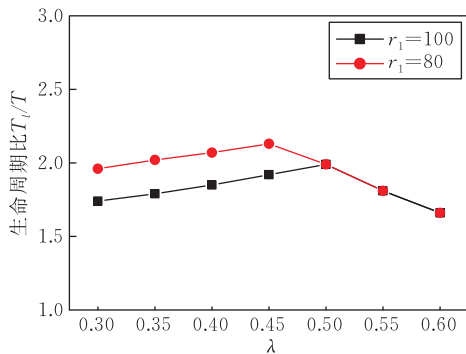


图 4 长链数量的影响

图 5 反映了由于长链的存在导致环 C_2 内节点能耗的增加情况.其中 $k=10$, r_1 分别取 80 m 和 100 m,根据图 4, λ 分别取 0.45 ($r_1=80$ 时) 和 0.50 ($r_1=100$ 时), E_{2l}/E_2 表示环 C_2 内存在长链和不存在长链时的节点能耗比.环 C_2 内部分数据通过长程连接直接发送给 Sink,由于传输距离的增大,导致了环 C_2

内节点能耗的增加.另一方面,减少了传送给环 C_1 的数据量,降低了环 C_1 内节点的能耗.通过前面的分析,我们知道能量空洞主要出现在环 C_1 内,因此,添加长链延长了网络的生命周期,但是,它是以增大环 C_2 内节点能耗为代价的.

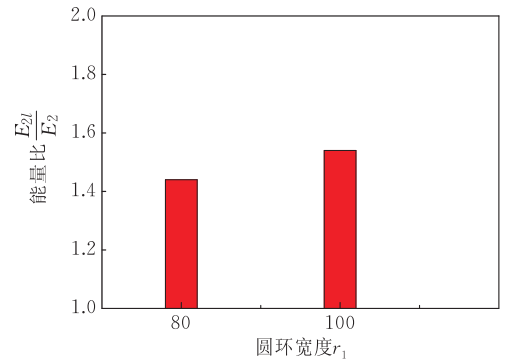


图 5 存在长链时环 C_2 内节点能耗

文献[2]通过节点的不均匀分布来解决能量空洞,但是由于大多数情况下节点的分布都是随机的,局部区域的节点密度难以控制,这种非均匀的节点分布策略在实际中较难实现.文献[3]通过蚁群优化算法来决定各个节点的传输半径,计算的复杂性和对节点的移动性比较敏感等都限制了它们的实用性.我们的工作与文献[10]比较接近.因此,我们和文献[10]进行了比较.文献[10]通过在环 C_2 和 C_1 内加入一个移动中继来达到缓解能量空洞的目的.图 6 反映了两种方法对网络生命周期的影响.其中, T_l/T_{mr} 表示本文提出的方法和文献[10]方法的生命周期之比, $r_1=80$ m, 节点密度 $\rho=4$, k 分别取 5、7、9、11、13 和 15.

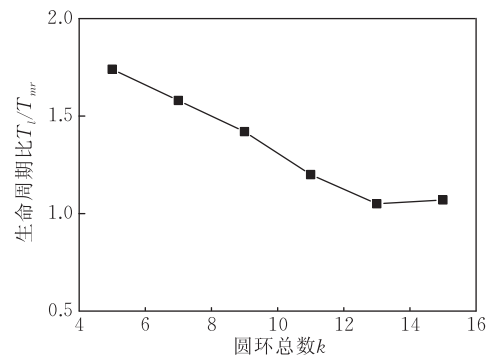


图 6 网络生命周期的比较

从图 6 可以看出,在最大环数 k 较小时,我们的算法明显优于文献[10]的方法.另外,文献[10]的方法增加了网络的构造成本,也带来较大的网络传输延迟,而且,在很多应用环境中根本无法采用移动中继,例如:地形复杂的环境,因此,其应用存在很大的

局限性. 而本文提出的方法不仅网络构建和节点部署代价小, 通信机制简单, 受系统所处环境影响小, 而且容易实现, 具有很好的实用价值.

6 结束语

在传感器网络中, Sink 的周围很容易形成能量空洞. 能量空洞使得数据无法送达 Sink 而使网络生命周期结束, 这时网络中仍然有大量的剩余能量. 为了解决能量空洞问题, 人们提出了许多方法. 与已有研究不同, 本文研究并提出了一种基于小世界的能量洞解决方法, 通过在网络中添加少量的长链, 减少靠近 Sink 节点的数据转发量来延长网络的生命周期. 本文分析了长链的不同位置对网络生命周期的影响, 也从理论上分析了长链的最佳比例和对网络生命周期的影响. 我们的方法不仅能够显著提高网络的生命周期, 而且, 很容易在实际中实现. 实验仿真也验证了我们的理论分析结果.

参 考 文 献

- [1] Lian J, Naik K, Agnew G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2006, 2(2): 121-145
- [2] Wu X, Chen G, Das S K. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed System*, 2007, 19(5): 710-720
- [3] Song Chao, Liu Ming, Gong Hai-Gang, Chen Gui-Hai, Wang Xiao-Min. ACO-based algorithm for solving energy hole problems in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2009, 20(10): 2729-2743(in Chinese)
(宋超, 刘明, 龚海刚, 陈贵海, 王晓敏. 基于蚁群优化解决传感器网络中的能量洞问题. *软件学报*, 2009, 20(10): 2729-2743)
- [4] Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2007, 3(3): 233-254
- [5] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting//*Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications*. Barcelona, Spain, 2006: 1-12
- [6] Jarry A, Leone P, Powell O, Rolim J. An optimal data propagation algorithm for maximizing the lifespan of sensor networks//*Proceedings of the 2nd Distributed Computing in Sensor Systems*. San Francisco, CA, USA, 2006: 405-421
- [7] Perillo M, Zhao C, Heinzelman W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks//*Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference Workshops*. Piscataway, NJ, USA, 2004: 74-79
- [8] Dasgupta K, Kukreja M, Kalpaki K. Topologyaware placement and role assignment for energyefficient information gathering in sensor networks//*Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Computer and Communication Antalya*. Turkey, 2003: 341-348
- [9] Hou Y T, Shi Y, Sherali H D, Midkiff S F. On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2579-2590
- [10] Wang W, Srinivasan V, Chua K C. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks//*Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Cologne, Germany, 2005: 270-283
- [11] Luo J, Panchard J et al. MobiRoute: Routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks//*Proceedings of the 2nd IEEE/ACM DCSS*. San Francisco, CA, USA, 2006: 480-497
- [12] Vincze Z, Vass D, Vida R, Vidács A. Telcs: Adaptive sink mobility in event-driven densely deployed wireless sensor networks. *International Journal on Ad Hoc & Sensor Networks*, 2007, 3(2-3): 255-284
- [13] Jain S, Shah R, Brunette W, Borriello G, Roy S. Exploiting mobility for energy efficient data collection in sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, Springer Science, 2006, 11(3): 327-339
- [14] Helmy A. Small worlds in wireless networks. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(10): 490-492
- [15] Sharma G, Mazumdar R. Hybrid sensor networks: A small world//*Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Urbana, IL, USA, 2005: 366-377
- [16] Chitradurga R, Helmy A. Analysis of wired short cuts in wireless sensor networks//*Proceedings of the IEEE/ACS International Conference on Pervasive Services*. Lebanon, 2004: 167-176
- [17] Liu A, Wu X, Chen Z, Gui W. Research on the energy hole problem based on unequal cluster-radius for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010, 33(3): 302-321
- [18] Liu Tao. Energy consumption analysis and energy holes avoidance for gradient based routing in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(8): 1353-1361(in Chinese)
(刘韬. 基于梯度的无线传感器网络能耗分析及能量空洞避免机制. *自动化学报*, 2012, 38(8): 1353-1361)



LIU Xue-Jun, born in 1970, Ph.D., associate professor. His research interests include sensor networks, database and data mining.

LU Hai-Ming, born in 1986, M. S. candidate. His research interests focus on sensor networks.

ZHOU Shui-Geng, born in 1966, professor, Ph.D. supervisor. His research interests include database, P2P computing, sensor networks, bioinformatics etc.

BAI Guang-Wei, born in 1961, professor, Ph.D. supervisor. His research interests include mobile ad hoc networks, wireless sensor networks, QoS for wireless multimedia communication, etc.

Background

Wireless sensor networks have attracted unprecedented attention in recent years. A wireless sensor network consists of a set of micro sensors deployed within a fixed area. The sensors sense a specific phenomenon in the environment and route the sensed data to a relatively small number of central processing nodes, called sinks. In a many-to-one sensor network, all sensor nodes generate data and send them to a single sink via multihop transmissions. Nodes nearer the sink have to take heavier traffic load. Therefore, nodes around the sink would deplete their energy faster, leading to what is called an energy hole around the sink. If this happens, no more data can be transmitted to the sink. As a result, the

network lifetime ends and much energy of the nodes would be wasted. How to design network structure is a important research topic in order to use unused energy to achieve the energy holes and prolong the lifetime of the sensor network.

In this paper, we propose a new method to solve the “energy holes”. Our method not only significantly prolongs the lifetime of the sensor network, but also is easy to realize. Our research is supported by the National Natural Science Foundation of China (60873070, 61073197), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK201054) and the Key Technology R&D Program of Jiangsu Province (SBE201077457).