无线传感器网络中基于广播坐标的静态链簇路由算法

官 健[1],孙大洋[2],王爱民[1],刘衍珩[1]

(1.吉林大学 计算机科学与技术学院,长春 130012;2.吉林大学 通信工程学院,长春 130012)

摘 要:提出了一种基于广播坐标的无线传感器网络静态链簇路由算法SCTC。该算法在节点地理信息未知的情况下,利用双基站把网络划分为若干静态簇以降低网络动态成簇的能耗,采用簇内成链及簇间并行通信的方式减少簇内通信的能量损耗并降低传输时延,以轮换汇聚层的方法均衡节点能量消耗。仿真实验结果表明,该算法可以大幅度降低网络的能耗并延长网络的生存时间,降低了网络通信的时延。

关键词:计算机应用;无线传感器网络;广播坐标;能耗;生存时间

中图分类号:TP393 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2012)02-0412-06

Static chain-cluster routing algorithm based on transmitting coordinate for wireless sensor network

GUAN Jian[1], SUN Da-yang[2], WANG Ai-min[1], LIU Yan-heng[1]

(1. *College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun* 130012, *China*; 2. *College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun* 130012, *China*)

Abstract: A static chain-cluster routing protocol, SCTC, based on transmitting coordinate for wireless sensor network is proposed. Without location information of nodes, the protocol utilizes double base station to make networks into static clusters to reduce energy dissipation in dynamic clustering. It links the in-cluster nodes into a chain to decrease energy dissipation in in-cluster communication. The protocol reduces time delay by realizing parallel communication among the nodes in every cluster. It balances the energy consumption among the sensors in the network by rotating the collective layer. Simulation results show that SCTC can not only achieve reduction in energy dissipation and latency, but also can make the energy of the network burn evenly and thus improve the energy efficiency and lifetime of the networks.

Key words: computer application; wireless sensor network (WSN); transmitting coordinate; energy dissipation; lifetime

收稿日期:2011-03-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(60973136, 61073164);国家科技部国际合作与交流项目(2008DFA12140).

作者简介:官健(1977-),男,讲师,博士研究生.研究方向:移动通信,无线传感器网络. E-mail:gj_yeah@126.com

通信作者:刘衍珩(1958-),男,教授,博士生导师.研究方向:网络体系结构,无线传感器网络.
E-mail:lyh_lb_lk@yahoo.com.cn

如何高效地利用能量、均衡节点能耗、延长网络生存时间成为无线传感器(Wireless sensor network,WSN)网络路由算法研究的重要课题,其效果也成为评价无线传感器网络路由算法性能优劣的重要指标[1-4]。在战场、医药安全监视系统等很多场合,对数据传输的实时性要求很高[5-6],时延问题同样需重点考虑。Leach[7]首先提出数据聚合的分布式路由算法,但频繁地选举簇头、簇头分布不均等因素导致网络通信开销过大,负载不均衡。簇头以单跳方式与基站(Base station,BS)直接通信,导致远离 BS 的簇头节点过早死亡。PEGASIS 算法[8]利用贪婪算法生成一条由所有网络节点组成的基于地理位置的单链,链上各节点只与其最近邻节点通信,并轮流向 BS 传送数据,节省了通信能量,使能耗相对均衡。但 PEGASIS 算法构成的单链过长,导致网络通信时延急剧增大。

本文提出了一种新的基于广播坐标的静态链簇路由算法 SCTC。算法通过主辅 BS 向网络节点广播坐标划分簇,同时定义汇聚层和传输列。簇内节点采用贪婪算法连接成链,降低了网络成簇以及簇间通信的能耗。数据采集完成后,各传输列同步向汇聚层传送数据,减小了通信网络的时延。然后通过汇聚层剩余能量最多的节点向其最近邻 BS 传送数据,最终汇聚于主 BS,节约了 LEADER 节点的发送能量,使整个网络能量消耗更加均衡。

1　静态链簇路由算法

1.1　网络模型

在无线传感器网络中,BS 往往被设置在远离网络节点的位置收集网络感知的数据。本算法利用双 BS 以广播坐标的方法对网络进行分簇,模型描述如下:①网络存在两个可以相互通信的 BS。②两个 BS 固定在远离传感器节点的不同位置。③所有节点同构,且初始能量相同,都具备数据融合的功能。④每个节点都有唯一的标识(ID)。⑤所有节点都能够直接与 BS 进行通信。⑥节点的发射功率是可调的。⑦网络周期性收集数据,且对时延敏感。

1.2　能量模型

为了对比实验效果,本文采用文献[7]的能量模型。假设发送端能耗包括信号处理和功率放大两部分,接收端的能耗仅用于信号处理。当两个节点间距离小于 d_0 时采用自由空间路径损耗模型,大于等于 d_0 时采用多径衰落模型[5]。因此,当两个距离为 d 的节点之间发送和接收 l 比特数据时,发送端所消耗的能量为

$$E_{TX}(l,d)=\begin{cases} lE_{elec}+l\varepsilon_{fs}d^2, d<d_0 \\ lE_{elec}+l\varepsilon_{mp}d^4, d\geqslant d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收端消耗的能量为

$$E_{RX}(l)=E_{RX\text{-}elec}(l)=lE_{elec} \quad (2)$$

式中:d_0 为区分自由空间路径损耗模型和多径衰落模型的距离阈值;l 为数据包大小;E_{elec} 为电路发射、接收 1 bit 数据所消耗的能量;d 为两节点间的通信距离;ε_{fs}、ε_{mp} 分别为两种模型功率放大所需的能量。

节点间数据融合需要一定能耗,用 E_{DA} 表示融合 1 bit 数据所消耗的能量,则发送端所消耗能量变为

$$E_{TX}(l,d)=\begin{cases} l(E_{elec}+E_{DA})+l\varepsilon_{fs}d^2, d<d_0 \\ l(E_{elec}+E_{DA})+l\varepsilon_{mp}d^4, d\geqslant d_0 \end{cases} \quad (3)$$

本算法采用式(3)作为发送端能量模型。

1.3　相关定义

以发射点为圆心的同心圆区域内的节点可以接收发射功率级别相同的无线信号。据此,用两个不同地理位置的 BS 以多种级别的功率向无线传感器网络发射信号,根据节点可接收信号的发射功率不同,可将网络划分为若干簇。

1.3.1　广播坐标

如图 1 所示,对于不同功率划分出的每一个圆环区域,都定义一个非负整数 ρ($\rho=0,1,2,3,\cdots$)来标识。靠近发射点的圆环区域 ρ 值较小,远离发射点的圆环区域 ρ 值相对较大。称非负整数 ρ 为圆环区域的广播坐标。

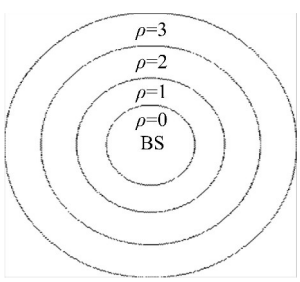


图 1　广播坐标

Fig. 1　Transmitting coordinate

1.3.2　簇的广播坐标

两个地理位置不同的 BS 向网络广播各自的 ρ 值(一侧的 BS 广播 ρ_L 值,另一侧 BS 广播 ρ_R

值)可以对网络进行区域划分,ρ 值相同的节点为同一区域,定义为簇,坐标为 $\rho(\rho_L,\rho_R)$,称为簇的广播坐标,如图 2 所示。

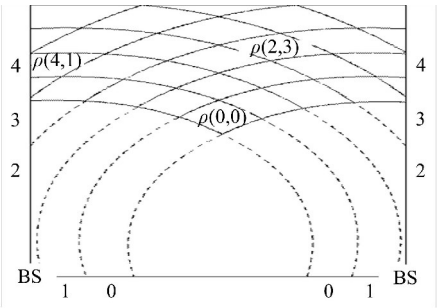


图 2 簇的广播坐标

Fig. 2 Transmitting coordinate of cluster

1.3.3 簇的层与列

在以广播坐标方式划分簇的网络中,簇 A 和簇 B 的广播坐标分别为 $\rho_A(\rho_{LA},\rho_{RA})$ 和 $\rho_B(\rho_{LB},\rho_{RB})$,如果 $\rho_{LA}=\rho_{RB}$ 且 $\rho_{RA}\geqslant\rho_{LA}$,$\rho_{LB}\geqslant\rho_{RB}$,那么称簇 A 和簇 B 同层,层号值为 ρ_{LA}。如果 $\rho_{LA}-\rho_{LB}=\rho_{RA}-\rho_{RB}$,即簇的坐标差相等,那么称簇 A 和簇 B 同列,列号值为 $\rho_R-\rho_L$。在本算法中,称 LEADER 节点(向 BS 发送数据的节点)所在层为汇聚层,坐标差相等簇组成的列为传输列,如图 3 所示。

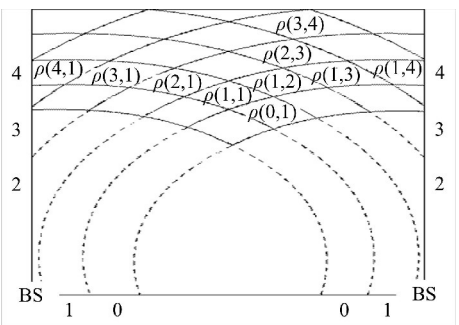


图 3 簇的层与列

Fig. 3 Row and column of cluster

1.3.4 节点信息表

节点信息表用来保存网络运行过程中的网络信息、标识节点状态信息,如表 1 所示。

1.4 算法描述

本算法中网络向 BS 传送数据分为成簇和数据传输两个阶段,其中成簇阶段只在网络启动时执行一次。首先利用双 BS 广播坐标方式把网络划分为若干静态簇,避免动态成簇带来的能量损耗;然后利用贪婪算法使簇内节点成链以减少簇内通信的能量损耗;采用各簇并行成链和传输列并行通信的方式减小网络传输的时延;通过轮换汇聚层以及选取剩余能量最大节点 LEADER 向最近邻 BS 传送数据来均衡网络节点能量消耗,节约发送能量;最后,辅 BS 数据汇聚至主 BS,完成网络数据收集。

表 1 节点信息表

Table 1 Information of node

参 数		意 义
ID		节点的物理标识
$\rho(\rho_L,\rho_R)$		节点的双 BS 广播坐标值,(初始值为 null)
LEADER		主簇头标识(主簇头坐标)
E		节点剩余能量
CS (chain-structure)	router	节点的前驱与后继 ID
	sender	本轮簇头标识
	list	簇内节点列表
	num	簇内节点数目

1.4.1 成簇阶段

成簇阶段分为两个步骤,分别是划分簇和簇内成链。

假设 BS 各级别广播功率为 P_i(i 由网络分簇数预期决定,$i=0,1,2,\cdots,\max$)。划分簇的步骤如下:①主 BS 以 P_i 功率向网络广播 ρ_L 值($\rho_L=i$)。②接收到 ρ_L 的网络节点,如果自身节点信息表中的 ρ_L 值为 null,则按广播设置节点信息表中的 ρ_L 值为 i,否则,ρ_L 值不做修改。③当 $i=\max$,即主 BS 以功率 $P_{\max}$ 向最远离其网络节点广播 ρ_L 值完毕,则主 BS 广播坐标结束,否则,i 值加 1,跳转至步骤①。

按照相同方法辅 BS 向网络广播 ρ_R。

具有相同 $\rho(\rho_L,\rho_R)$ 值的节点被划分到同一个簇内,划分簇完成。

对各簇内节点并行的连接成链,以实现簇内通信。族内成链步骤如下:①各节点以覆盖整个簇的发射功率在簇内广播自身的 ID 信息,同时接收来自其他节点的广播信息。②接收到其他节点 ID 信息的节点通过 ρ 值来判断是否与自身同簇。若同簇,则将接收到的节点的 ID 按信号的强弱顺序存储在自己的 CS. list 中,形成一个包含所有簇内节点及结构的列表,并按照列表的长度设置 CS. num。③设簇内 ID 最小的节点为端节点,同时将此节点作为第一次数据传输的簇头节点,即设置其节点信息表中 CS. sender 标识为真。通过贪婪算法将簇内节点逐个相连成链,刚加入链的节点需找到没有加入链的,且离自己最近的节点与其相连,节点在此过程中需在自己节点信息表

中记录其前驱节点和后继节点的 ID 信息,形成 CS. router 项。当链内节点总数与簇内节点列表中节点总数值 CS. num 一致,簇内所有节点组成一个单链后,簇内成链过程结束。

1.4.2　数据传输阶段

网络成簇后,除非出现节点死亡,否则拓扑结构不再改变,数据传输将一直持续下去。步骤如下:

(1)主 BS 向各簇节点广播本轮数据传输的 LEADER 节点 ID,并设置此节点的 LEADER 标识为真(首次传输将簇坐标为(0,0)的 sender 节点 LEADER 标识设置为真)。

(2)各节点收集感知到的数据并融合经过自身的数据(数据、自身的 ID 和剩余能量 E),根据 CS. router 信息,向簇头节点(sender)方向汇集数据。

(3)各簇头节点按照 LEADER 节点所在层,即汇聚层的方向,将包括本簇剩余能量最大的节点 ID 和剩余能量值在内的信息沿传输列发送至同列汇聚层簇头节点,同时根据剩余能量的多少确定本簇下一轮的簇头节点(sender),将其 CS. sender 标识设置为真。

(4)信息到达 LEADER 节点所在的汇聚层后,由该层簇头节点将信息向 LEADER 节点汇集。

(5)LEADER 节点以适当功率将收集的信息(包括网络中剩余能量最多的节点 ID)发送至其广播坐标分量值小者所对应的 BS。

(6)如果接收 LEADER 节点发送信息的为辅 BS,则将数据融合后发送至主 BS,否则,跳至步骤(7)。

(7)主 BS 经过计算分析得到下轮 LEADER 节点 $\rho(\rho_L,\rho_R)$值和 ID。

在文献[5]中,如果出现死亡节点,整个网络需要重新建立链。为了避免额外能量消耗,本算法采取将死亡节点两侧节点根据 CS. router 直接相连的方法。

2　仿真结果与分析

为了评价 SCTC 算法的性能,在 100 m×100 m 的矩形中随机部署 100 个节点,具体实验参数如下:数据包长度为 2000 bit;节点的初始能量 $E_0=0.5$ J;BS 坐标为(0,300),(100,300);电路消耗能量 $E_{elec}=5.0\times10^{-8}$ J/bit;数据融合能耗 $E_{DA}=5.0\times10^{-9}$ J/bit;信道传播模型参数 $\varepsilon_{fs}=1.0\times10^{-11}$ J/(bit·m^2),$\varepsilon_{mp}=1.3\times10^{-15}$ J/(bit·m^4)。

2.1　簇数目与生存时间的关系

BS 向网络广播坐标的功率级别和大小不同,可以对网络分簇并控制簇的数目,而网络中簇的数目对生存时间有较大影响。通过簇的数目变化与网络生存时间关系的实验(见图 4)可以看出,随着簇数目的增加,网络的生存时间快速提升,当簇的数目为 6 时,网络生存时间达到峰值 1732。而后生存时间开始下滑,当簇的数目增加到 75 时,生存时间开始平稳,保持在 150 轮左右。产生这样结果的原因在于:当簇的数目少于 6 时,虽然簇与簇间的通信次数以及参与簇间通信的节点数目减少了,但相邻簇头间通信半径却变长,增大了簇间通信的能量消耗;而当簇的数目多于 6 时,尽管相邻簇的通信半径变小,但簇头间通信的次数和参与簇间通信的节点数目却在增加。

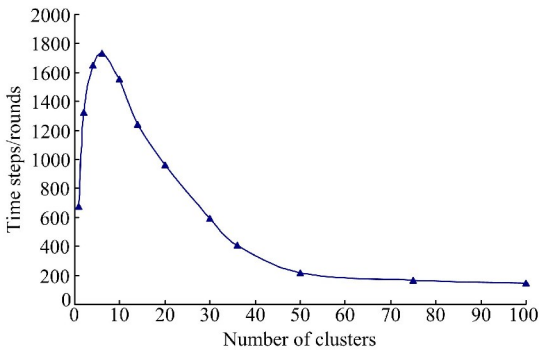


图 4　簇的数目与网络生存时间的关系

Fig. 4　Relationship between cluster's number and networks lifetime

整个网络在簇数目为 6 时,簇内链长占所有节点个数约为 17%,性能达到最优。当网络中簇的数目达到 75 时,簇内的节点数平均为 1～2 个,网络生存时间趋近于平面路由算法下的情况。

2.2　簇数目与传输时延的关系

网络的传输时延 T 由三部分组成:簇内节点通过链向簇头节点传输数据的时间,记作 T_1;各簇头节点将获得的数据沿传输列向汇聚层传送所需的时间,记作 T_2;汇聚层各簇头节点将数据向 LEADER 节点传送的时间,记作 T_3。与 LEACH 算法一样,SCTC 算法采用 TDMA 调度策略,假设网络被划分为 N 簇,网络中两个节点之间的通信时间为 t,那么 $T_1=[(100/N)-1]t$,即簇内节点数－1 倍通信时间 t;$T_2=(\max-1)$

t,max 为网络中簇的层数,即传输列中簇的数目;根据 1.3.3 节的定义,广播坐标为 (ρ,X) 与 (Y,ρ) 的簇同层,且广播坐标分量 X、Y 可取值 1,2,…,max,可知以 (ρ,X) 和 (Y,ρ) 为广播坐标的簇各有 max 个,去除 $X=Y=\rho$ 的重复情况,汇聚层中簇的数目为 $2\max-1$,则 $T_3=(2\max-2)t$。图 5 显示了簇的数目与网络传输时延的关系。可以看出:当簇的数目很少时,网络的传输时延很大。当整个网络为一个簇时,$T_2=0$、$T_3=0$,时延 T 为 $99t$。随着网络中簇数目的增加,时延开始大幅下降,当簇数目到 20 左右时,$T_1+T_2+T_3$ 最小,T 达到最小值。这是由于各簇在收集数据和向本簇簇头传输数据是并行的。簇的数目越多,簇内节点数越少,簇内通信的次数也越少,通信效率越高。时延 T 达到极小值后,逐渐缓慢小幅增大。当网络被划分为 100 个簇时,网络节点各自为簇,虽然簇内通信所需时间 $T_1=0$,但 T_2 与 T_3 都有所增加,其通信时延略大于 T 的最小值。

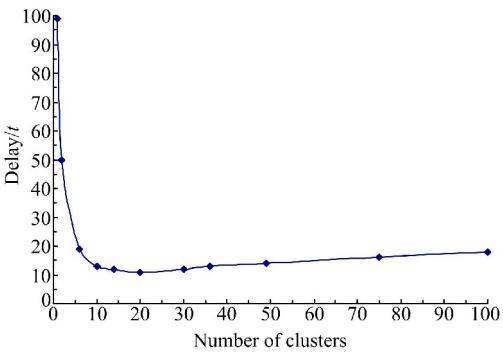


图 5 簇的数目与传输时延的关系

Fig. 5 Relationship between cluster's number and time delay

SCTC 算法在簇的数目增长到大于 6 时,传输时延曲线趋于平缓,显示了很好的稳定性。

2.3 传输时延对比分析

在网络传输时延方面的比对实验(见图 6)显示,SCTC 算法显著优于 LEACH 算法和 PEGASIS 算法。

PEGASIS 由于网络中的所有节点只连接成一个单链,对于 100 个节点的网络来说,每轮数据传输的时延均为 $99t$,明显高于 SCTC 和 LEACH 算法。

当簇数目小于 6 时,LEACH 算法和 SCTC 算法的网络传输时延接近,而且两者都随着簇数目的增加而快速减小。当簇的数目达到 6 时,LEACH 算法的传输时延开始缓慢下降。簇数目为 10 时,时延达到最小值 $18t$,而后平稳增加。而 SCTC 算法在簇数目为 20 时,传输时延达到最小值 $11t$,之后时延缓慢增加,到簇数目为 100 时,时延为 $18t$,仅相当于 LEACH 的最小值。原因是 LEACH 算法仅簇内通信并行,簇头向 BS 发送数据顺序进行。SCTC 不仅簇内通信并行,簇间通信也并行,保证了算法的低时延和稳定性。

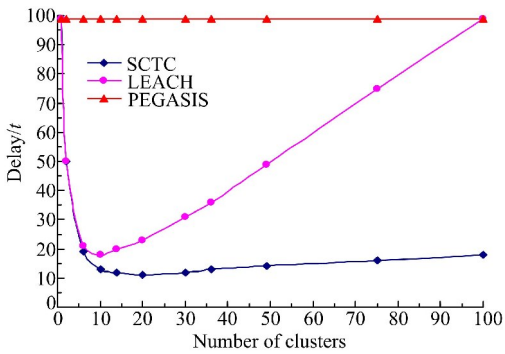


图 6 传输时延对比关系

Fig. 6 Contrast of delay time

2.4 生存时间与能量有效性分析

路由算法不仅要延长网络的生存时间,同时要保证较小的传输时延。图 7 显示了 SCTC 算法中簇的数目对二者的影响。可以看出,簇数目在 6~10 时,网络的生存时间与时延达到较好平衡。

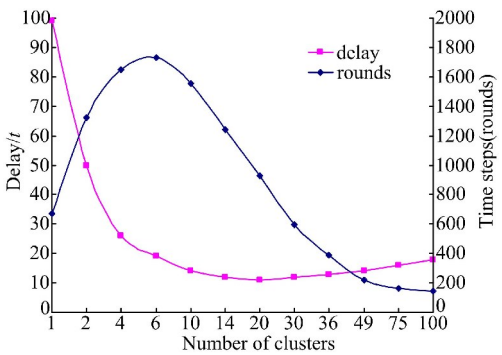


图 7 簇数目对传输时延和生存时间的影响

Fig. 7 Relationship between delay time and lifetime

网络的生存时间以及节点能耗的均衡性反映了网络的整体性能。在 SCTC 与 LEACH、PEGASIS 网络性能对比实验中,选择簇数目为 6。如图 8 所示,采用 LEACH 算法和 PEGASIS 算法网络分别在第 343 轮和第 679 轮开始出现死亡节点,而采用 SCTC 算法则在 1589 轮第一个节点死亡,比 LEACH 算法延长了 1246 轮,比 PEGASIS 算法延长了 910 轮,网络生存时间大幅提升。

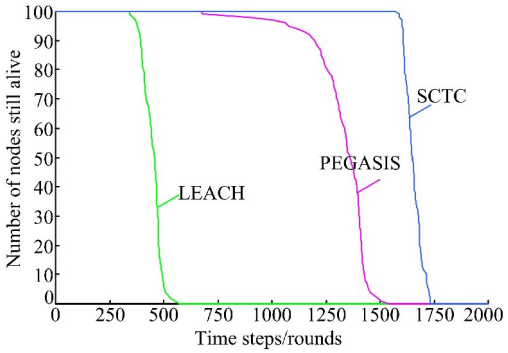


图 8　网络生存时间对比关系

Fig. 8　Contrast of networks lifetime

LEACH 和 PEGASIS 网络运行到第 574 轮和第 1541 轮节点全部死亡，从第一个节点死亡到最后一个节点死亡分别经历了 233 轮和 862 轮。SCTC 网络在第 1732 轮节点全部死亡，节点死亡经历了 143 轮。可以看出，采用 SCTC 算法，节点陆续死亡的时间较 LEACH 算法和 PEGASIS 算法少得多，网络能量下降均衡。

采用 SCTC 算法（见图 9），网络的能量在 1700 余轮的时间内逐渐耗尽，较 LEACH 和 PEGASIS 网络持续时间更长，能量消耗更均衡，节点能量得到有效利用。

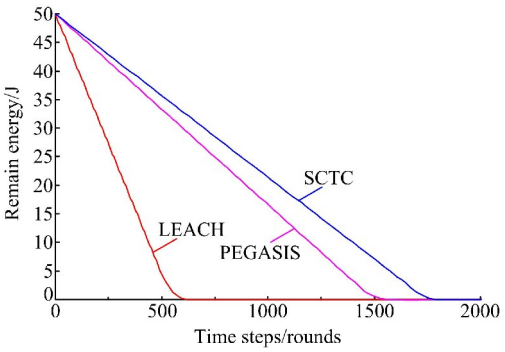


图 9　网络剩余能量对比关系

Fig. 9　Contrast of remaining energy of the entire networks

3　结束语

给出了一种基于广播坐标的分簇路由算法。算法通过双 BS 向网络节点广播坐标的方法划分簇，同时根据同心圆环距离定义了汇聚层，以簇坐标差的函数关系定义了传输列，然后采用贪婪算法将簇内节点连接成链。在数据采集完成后，各传输列同步工作向汇聚层传送数据，然后通过汇聚层剩余能量最多的节点向 BS 传送数据。实验表明，算法均衡了网络的通信能耗，减小了网络通信时延，网络的整体生存时间大幅提高。

参考文献：

[1] 司菁菁，庄伯金，蔡安妮. 基于网络编码的无线传感器网络生存时间最大化[J]. 吉林大学学报：工学版，2011，41(3)：822-827.
Si Jing-jing，Zhuang Bo-jin，Cai An-ni. Network coding based lifetime maximization in wireless sensor network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2011，41 (3)：822-827.

[2] Edgar H C. Wireless Sensor Networks：Architecture and Protocol[M]. New York：Auerbach Publications，2004.

[3] 张瑞华，程合友，贾智平. 基于能量效率的无线传感器网络分簇算法[J]. 吉林大学学报：工学版，2010，40(6)：1663-1667.
Zhang Rui-hua，Cheng He-you，Jia Zhi-ping. Energy-efficient clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2010，40 (6)：1663-1667.

[4] 李建中，高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展，2008，45 (1)：1-15.
Li Jian-zhong，Gao Hong. Survey on sensor network research[J]. Journal of Computer Research and Development，2008，45(1)：1-15.

[5] Heinzelman W B，Chandrakasan A，Balakrishanan H. An application-specific protocol architechture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun，2002，1(4)：660-670.

[6] Akkaya K，Younis M. Energy-aware routing of delay-constrained data in wireless sensor networks[J]. Journal of Communication Systems，2004，17(6)：663-687.

[7] Heinzelman W，Chandrakasan A，Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proc of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Maui：IEEE Computer Society，2000.

[8] Lindsey S，Raghavendra C. Pegasis：power- efficient gathering in sensor information systems[C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings，Montana，2002.