

无线传感器网络中一种基于跳数梯度场的路由协议

陈 龙¹, 陈志刚¹, 张德宇²

(1. 中南大学 软件学院, 长沙 410075; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 为提高网络的可靠性与能量有效性, 提出一种基于跳数梯度场的能量均衡的健壮的路由协议。该协议通过设置节点维护邻节点剩余能量表, 记录剩余能量最多的 N 个邻节点。某一梯度源节点产生的消息携带源节点的梯度值及其邻节点剩余能量表中的最小值, 邻节点可根据梯度值及最小值判断是否转发该消息, 从而控制转发节点的数量, 在保证网络可靠性的同时避免过多的能耗和消息的洪泛。理论分析和模拟实验结果表明, 该协议在传输可靠性和网络延迟方面均优于 GRAB 和 SPBT 协议, 当邻节点剩余能量表最大记录数为 3 时, 协议性能最佳。

关键词: 无线传感器网络; 跳数梯度场; 剩余能量; 可靠性; 路由协议

中文引用格式: 陈 龙, 陈志刚, 张德宇. 无线传感器网络中一种基于跳数梯度场的路由协议[J]. 计算机工程, 2016, 42(10): 129-134.

英文引用格式: Chen Long, Chen Zhigang, Zhang Deyu. A Routing Protocol Based on Hop-count Gradient Field in Wireless Sensor Network[J]. Computer Engineering, 2016, 42(10): 129-134.

A Routing Protocol Based on Hop-count Gradient Field in Wireless Sensor Network

CHEN Long¹, CHEN Zhigang¹, ZHANG Deyu²

(1. School of Software, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

【Abstract】 In order to improve the reliability and energy efficiency of the networks, a Hop-count Gradient field based Energy-balanced Routing protocol (HGEBR) is proposed. In the protocol, each sensor node has a Neighbor Node Residual Energy Table (NNRET) which records the residual energy of the N nodes with the most residual energy in the neighbor nodes. The messages generated by the source node in a gradient carry the gradient value and the minimum value in the NNRET of the source node. According to the information carried by the message, the neighbor nodes decide whether to forward this message, thereby controlling the number of forwarding nodes, thus ensuring the reliability of the network and avoiding message flooding and too much energy consumption. Theoretical analysis and simulation results show that the protocol has better performance in the transmission reliability and network delay than GRAB and SPBT protocol. When the NNRET is 3, the performance of the proposed protocol is the best.

【Key words】 Wireless Sensor Network (WSN); hop-count gradient field; residual energy; reliability; routing protocol

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.10.023

1 概述

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是由大量传感器节点构成的自组织测控网络, 普遍应用在医疗、军事、安全等各个领域^[1]。由于传感器节点能量、计算和存储资源有限^[2-3], 数据的搜集、处理和通信都面临着严峻的挑战, 因此, 设计一个好的路由协议^[4-6]对无线传感器网络十分重要, 可以降低网

络的能耗, 延长网络的寿命, 提高网络的可靠性。基于跳数梯度场^[7]的路由协议因为实现简单, 并在能耗、延迟和可靠性上有着较好的均衡性而被普遍关注。

在跳数梯度场中, 源节点以广播的方式传递数据包, 梯度值比源节点小的邻居节点接收到数据包后继续广播此数据包^[8], 虽然数据包最终以最小的跳数传递到 sink 节点, 降低了网络的延迟, 但是在传

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61379057, 61309001, 61272149); 教育部博士点基金优先发展领域课题基金资助项目 (20120162130008); 博士生自主探索创新基金资助项目 (2014zzts043)。

作者简介: 陈 龙 (1991—), 男, 硕士研究生, 主研方向为无线传感器网络; 陈志刚, 教授、博士、博士生导师; 张德宇, 博士研究生。

收稿日期: 2015-09-14 **修回日期:** 2015-11-18 **E-mail:** 924378590@qq.com

输过程中没有控制中转节点的数量;若中转节点的数量过多,则会加剧网络的能耗,缩减网络的寿命,若中转节点数量过少,则会降低网络的可靠性。

针对以上问题,本文提出一种基于跳数梯度场的能量均衡的健壮的路由协议(Hop-count Gradient field based Energy Balance and Routing protocol, HGEBR)。在 HGEBR 协议中,节点维护一张邻节点剩余能量表 NNRET,记录剩余能量最多的 N 个邻节点的剩余能量。源节点广播的数据包中携带剩余能量表中的最小能量值以及标志位 θ 。若中转节点较少,即剩余能量表中的记录数小于 N ,则设置标志位 θ 为真,使满足一定条件的同梯度邻居节点也可以转发此数据包,从而提高网络传输的可靠性。若剩余能量表中的记录数不小于 N ,则设置标志位 θ 为假,接收到此数据包 of 邻居节点,满足其梯度值比源节点小,且剩余能量大于数据包中携带的最小能量值才能转发此数据包。

2 相关工作

无线传感器网络需要采集的信息通常和地理位置联系在一起,而且地理位置信息维护简单,基于此,人们提出了基于地理位置信息的路由协议。文献[9]提出启发式的 MIG 路由协议,通过提前绕过能量空洞,均衡了网络的能耗,延长了网络寿命,但是却增加了网络的延迟,不适用于高时效性网络。

在地理位置信息路由的基础上,根据传感器节点的传输半径,到达 sink 所需要的跳数,人们将网络划分为一个梯度场,提出一种基于跳数梯度场的路由协议。文献[10]考虑到传感器节点的剩余能量,提出一种梯度场建立算法,以节点跳数与剩余能量的比值作为梯度值构建梯度场,延长了网络寿命。但是算法没有考虑到两次网络重建之间节点能耗的均衡问题,若是重建的时间间隔偏大,能耗的不均衡会促使节点死亡率的提高。

文献[11]提出一种新的机制和协议的集合,即 GRAB,该协议针对节点不可靠性和链路失败而设计以保证高可靠性数据传输。GRAB 将数据沿着一条从源节点到 sink 的带状路径,数据在带中的节点中交叉传输。GRAB 通过每条消息所携带的 credit 数量来控制带状的宽度,从而调整数据传输的可靠性。但是当代价是跳数时,GRAB 网络中外边界节点待选的路径较少,降低了网络传输的可靠性。

文献[12]提出一种基于路由表的路由协议 SPBT。该协议在路由表记录信息的基础上优化了传感器节点到达 sink 的传输路径,同时权衡了节点的能量损耗;为了提高数据传输的可靠性,SPBT 使用回溯策略,但是增加了数据传输的延迟,不适用于

对实时性有很高要求的环境。

文献[13]提出一种基于最小跳数的分簇路由算法 RIA。RIA 将网络分簇,划分成 sink、簇头和簇头 3 类节点,非簇头节点将信息发送至对应的簇头节点,簇头节点之间构建最小跳数梯度场传递数据。因为采用了分簇机制,RIA 提高了能量有效性,但是缺乏对数据延迟的控制,不适用于实时性网络。

根据以上讨论,本文基于跳数梯度场提出了 HGEBR 协议,通过节点维护的邻节点剩余能量表控制中转节点的数量,均衡网络的能耗和数据传输的可靠性,降低网络延迟,并在数据传输过程中时刻更新邻节点剩余能量表,保证了协议的健壮性。

3 问题描述

梯度场可以看作是从传感器节点到 sink 最小消耗的最佳路径。每个中转节点的梯度值代表着到达 sink 的最小代价。此代价可以是跳数、能耗、延迟等^[14]。本文主要讨论跳数梯度场。在跳数梯度场中,相邻梯度层次间的分界线称为梯度层次边界,边界上或边界附近的节点称为边界节点;对于某个梯度层次,离 sink 节点近的边界称为内边界,离 sink 节点远的边界称为外边界,外边界附近的节点称为外边界节点,内边界附近的节点称为内边界节点。

如图 1 所示,内边界节点 1 广播数据时,有大量节点可以转发其数据,若不做控制则会造成大量的能量损耗。而外边界节点 2 广播数据时,只有节点 3 可以转发数据,且节点 3 仍然是外边界节点,其广播的数据只有节点 4 能够转发,因为可选传输路径的缺乏,外边界节点 2 的数据传输到 sink 的可靠性很低。

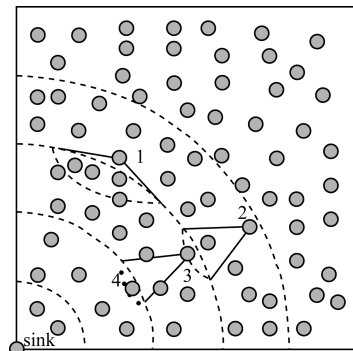


图 1 边界节点数据转发情况

图 2 统计了模拟实验网络中每个节点的邻居节点梯度小于自身的节点数量(图 2 中横坐标 0 对应的点是梯度值为 1 的节点的数量),从图 2 中可以看出,网络中有 329 个节点其直接可达的下一梯度节点数量只有 1 个或 2 个,有 124 个节点直接可达的下一梯度节点数量超过 10 个,而这些节点会成为网

络能耗和可靠性性能的瓶颈。

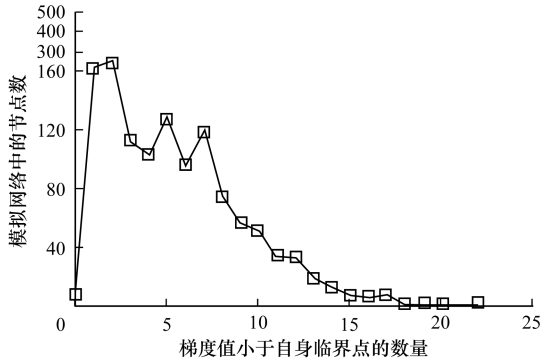


图 2 模拟网络中节点可达下一梯度中节点的数量

4 HGEBR 协议

4.1 网络模型分析

如图 1 所示,外边界节点产生的数据包在最差的情况下可能每个梯度都只有 1 个节点转发,其数据传输模型如图 3(a) 所示,假设每次传输的失败率是 f , m 是数据包中转的次数,则数据包从节点 P 成功传输到 sink 的概率为:

$$P_{\text{normal}}(m) = (1 - f)^{m+1} \quad (1)$$

若 $f=0.1$, P 节点的数据 (m) 需要 5 次中转到达 sink,其成功率只有 53%。内边界节点数据传输模型如图 3(b) 所示,每一跳内中转数据的节点的数量无法控制,会造成大量的能量损耗。为了提高外边界节点传输的可靠性,同时防止过多的节点中转内边界节点的数据,本文提出 HGEBR 数据传输模型,如图 3(c) 所示,每个节点有且仅有 N (图中 $N=3$) 个节点转发其数据。

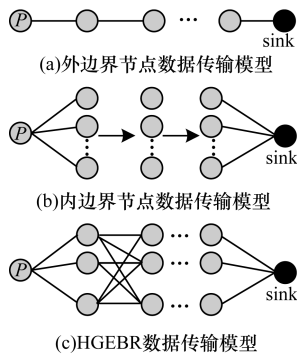


图 3 数据传输模型

定义 $P(i, j)$ 为某一跳 i 个节点发送数据、下一跳 j 个节点接收到数据的概率, $C(i, j)$ 为在第 0 跳 i 个节点发送数据,在第 j 跳没有节点接收到数据且在第 $j-1$ 跳至少一个节点接收到数据的概率,可以得到:

$$P_{\text{HGEBR}}(m) = 1 - \sum_{i=1}^m C(N, i) \quad (2)$$

$$\begin{cases} C(i, 1) = P(i, 0), i = 0, 1, \dots, N \\ C(i, m) = \sum_{j=1}^N P(i, j) C(j, m-1) \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} P(0, 0) = 1 \\ P(0, j) = 0, j \neq 0 \\ P(i, j) = \binom{j}{N} (1 - f^i)^j (f^i)^{N-j}, i \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

若 $f=0.1$, P 节点的数据 (m) 需要 5 次中转到达 sink, HGEBR 数据传输模型的可靠性在 95% 以上。

为了保证 HGEBR 协议数据传输如模型中一样进行,要保证当下一跳节点过多时,源节点的数据不能超过 N 个中继节点转发,而当下一跳节点较少时 (小于 N),源节点的数据仍有不少于 N 个中继节点转发。

在 HGEBR 协议中,每个节点维护一张邻节点剩余能量表 (NNRET),保存邻节点中剩余能量最多的 N 个节点的 ID 和剩余能量。下一跳节点的剩余能量要达到 NNRET 中最小值才可以转发数据,从而保证源节点的数据不超过 N 个中继节点转发,提高网络的能量有效性。

为了使下一跳节点数小于 N 的源节点仍有 N 个节点中转其数据, HGEBR 定义了标志位 θ ,并将 θ 设置为真,使满足一定条件的同梯度的节点可以转发数据。

如图 4 所示,外边界节点 $P(X_p, Y_p)$ 进行数据传输,其 θ 为真,为了防止过多的同梯度节点转发数据包,邻节点 $Q(X_q, Y_q)$ 应满足:

(1) Q 与 P 之间的距离 l_{PQ} 大于传输半径的一半。

$$l_{PQ} > R/2 \quad (5)$$

(2) 经过 P, Q 的直线与经过 P, sink 的直线夹角小于 a ,即使 Q 落在阴影范围之内。

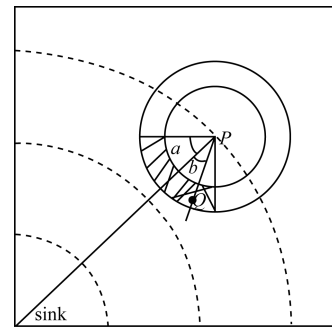


图 4 HGEBR 外边界节点数据传输模型

为了使 P 的数据包有 N 个中转节点,令 $length$ 为 NNRET 中当前的记录数,则阴影范围内的节点数量至少为 $N - length$ 。假设所有的 M 个传感器节点平均分布在面积为 S 的区域内,可以得到:

$$\frac{a}{\pi} \pi \left((R)^2 - \left(\frac{R}{2} \right)^2 \right) \frac{M}{S} = N - \text{length} \quad (6)$$

推出:

$$a = \frac{4(N - \text{length})S}{3MR^2} \quad (7)$$

要使节点 Q 在阴影区域内,则经过 P, Q 的直线与经过 P, sink 的直线夹角 b 的正弦值应小于 a 的正弦值,即:

$$\sin b < \sin a \quad (8)$$

夹角 b 的正弦值为:

$$\sin b = \frac{l_{qps}}{l_{pq}} \quad (9)$$

令 l_{qps} 是节点 Q 到直线 PQ 的距离; l_{pq} 是节点 P, Q 之间的距离,得到:

$$l_{qps} = \frac{|Y_p X_q - X_p Y_q|}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2}} \quad (10)$$

$$l_{pq} = \sqrt{(X_p - X_q)^2 + (Y_p - Y_q)^2} \quad (11)$$

由式(5)、式(7)~式(11)推出节点 Q 可以转发节点 P 数据的条件为:

$$\begin{cases} 2 \sqrt{(X_p - X_q)^2 + (Y_p - Y_q)^2} > R \\ \frac{|Y_p X_q - X_p Y_q|}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2} \sqrt{(X_p - X_q)^2 + (Y_p - Y_q)^2}} < \sin \frac{4(N - \text{length})S}{3MR^2} \end{cases} \quad (12)$$

4.2 消息格式

在 HGEBR 协议中,每个传感器节点维护一张自身的信息表 INFO,格式如表 1 中 INFO 所示,其中, ID 是节点 ID; X 和 Y 是节点的位置信息; RE 是节点剩余能量; $COST$ 是节点梯度值; NNRET 是邻节点剩余能量表,共含有 N 条记录,每条记录格式如表 1 中临界点剩余能量表所示,其中, ID 表示邻居节点的 ID; RE 是其对应的剩余能量。

表 1 HGEBR 协议中各信息表的记录格式

表名	记录格式
INFO	ID, $X, Y, RE, NNRET, COST$
邻节点剩余能量表	ID, RE
INIT	ID, $RE, COST$
数据包	EVENT, ID, $X, Y, RE, NE, \theta, COST$

HGEBR 协议中有 2 种消息,一种是梯度场建立阶段网络中传递的 INIT 消息,格式如表 1 中 INIT 所示,其中, ID 是节点的 ID; RE 是节点的剩余能量; $COST$ 是节点的梯度大小。另一种是数据传输阶段数据包格式如表 1 中数据包所示,其中, EVENT 表示事件信息,其余是附加控制信息; ID 是节点 ID; X 和 Y 是节点的位置信息; RE 是节点剩余能量; NE 表示接收此消息节点剩余能量的最小值,即此节点维护的 NNRET 表中的最小值; $COST$ 是节点梯度值, θ

是一个标志位(如果 θ 为真,则此消息可以被梯度值为 $COST$ 的节点接收)。

4.3 梯度场建立阶段

假设节点之间的链接是对称的,即节点 P 能够将消息发送给 Q ,那么 Q 也能将消息发送给 P 。

首先,每个传感器节点初始化自身 $cost$ 为 ∞ , sink 节点的 $cost$ 为 0,每个节点维护一张自身的信息表 INFO 和一张邻节点剩余能量表 NNRET,保存自身的信息和邻居节点中剩余能量最大的 N 个节点的 ID 和剩余能量。然后, sink 广播一条包含自身 ID、 $cost$ 和剩余能量的 INIT 消息。当节点 Q 收到一个来自节点 P 的 INIT 消息时,执行算法 1,产生新的 INIT 消息并广播。

梯度场建立阶段 HGEBR 主要为每个传感器节点初始化梯度值和邻节点剩余能量表 NNRET。NNRET 表中最多有 N 条记录,记录邻节点中剩余能量较多的节点的信息,从而使数据传输阶段节点的消息可以由剩余能量较多的节点转发,预防消息的洪泛。

算法 1 梯度场建立

输入 来自 P 的 INIT

输出 Q 生成的新 INIT 消息

- 1: $q \leftarrow Q$ 节点的 $COST$;
- $p \leftarrow P$ 节点的 $COST$, 即 INIT. $COST$;
- 2: IF ($q > p$)
 - $Q.COST \leftarrow p + 1$;
 - 清空 NNRET;
 - Q 广播生成的新 INIT 消息;
- 3: ELSE IF ($q < p$)
- 4: IF (NNRET.length $< N$)
 - P 的 ID, 剩余能量插入 NNRET;
- 5: ELSE
 - 更新 NNRET 使其中记录为当前记录 and INIT 中所含记录中剩余能量最大的 N 个记录;
- 6: END IF
- 7: END IF

4.4 数据转发阶段

在数据转发阶段,源节点监测到事件源,生成数据包,通过无线信道将数据包转发出去。数据包不仅包含必要的事件信息 EVENT,还包含一些附加控制信息。若源节点的 NNRET 表中记录数小于 N ,可能此节点是边界节点或者此节点邻居节点较少,其下一跳节点数量不足以保证数据传输的可靠性,设置标志 θ 为真,使此数据包可以被同梯度的节点接收并转发。

当节点 Q (梯度为 q) 收到一个来自 P (梯度为 p) 的数据包 DATA 后,启动算法 2,产生新的 DATA 消息并广播。若 $q = p$,且 θ 为真, Q 与 P 的距离满足式(12),则 Q 转发此数据包,保证当下一跳节点小于 N 时,源节点的数据仍有不少于 N 个中继节点转

发。若 $q < p$ 且 Q 的剩余能量不小于节点 P 所要求的最小转发能量,则 Q 转发此数据包,保证当下一跳节点过多时,源节点的数据不能超过 N 个中继节点转发。若 $q > p$,更新 NNRET 表,保证表中记录的准确性和及时性,提高算法的健壮性。

算法2 数据转发

输入 Q 收到的来自 P 的 DATA

输出 Q 生成的新 DATA 消息

```

1:  $q \leftarrow Q.COST$ ;
    $p \leftarrow P.COST$ , 即  $DATA.COST$ ;
2: IF ( $q = p$  &&  $\theta = true$  && condition)
    $Q$  生成新的 DATA, 并广播;
3: ELSE IF ( $q < p$  &&  $Q.RE \geq DATA.NE$ )
    $Q$  生成新的 DATA, 并广播;
4: ELSE IF ( $q > p$ )
5:   IF ( $N.ID$  in  $Q.NNRET$ )
     更新  $Q.NNRET$  中  $P.ID$  对应的值为  $P.RE$ ;
6:   ELSE IF ( $Q.NNRET.length < N$ )
     将  $P.ID$  和  $P.RE$  插入  $Q.NNRET$ ;
7:   ELSE IF ( $Q.NNRET$  中最小的值  $< P.RE$ )
     将  $Q.NNRET$  表中最小的剩余能量对应的记录
     替换为  $P.ID$  和  $P.RE$ ;
8:   END IF
9: END IF

```

5 性能分析与仿真结果

5.1 算法性能分析

HGEBR 算法分为 2 个阶段,在梯度场构建阶段,首先初始化参数,比较 2 个节点的梯度值,决定是否广播 INIT 消息、更新 NNRET 表,其时间复杂度都不超过 $O(n)$;在数据转发阶段,首先进行数据初始化和条件判定,其时间复杂度为 $O(1)$,接着若产生并广播新的数据包,该过程时间复杂度为 $O(n)$,若不产生新的数据包只更新 NNRET 表,其时间复杂度为 $O(N)$,则数据转发阶段的时间复杂度为 $O(1 + n + N)$,即 $O(n)$ 。

虽然 HGEBR, SPBT 和 GRAB 的算法复杂度都是 $O(n)$,但是 HGEBR 中的 NNRET 表有效地限制了数据包转发的数量,均衡了网络的能耗。

5.2 仿真结果分析

本文使用 OMNET++^[15] 仿真模拟器进行实验,模拟一个总共有 1 200 个传感器节点,且节点平均分布在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 平面区域内的无线传感器网络。Sink 节点坐落在 $(0,0)$ 位置,节点的坐标随机分布在 $0 \sim 500$ 之中。传感器节点的传输半径是 40 m。传感器节点的能量初始化为 1 000 ~ 1 200 内的一个随机数值。传感器节点广播数据,每次消耗 0.625 J 的能量。接收数据包和空闲状态能量不考虑。

首先在网络中随机选取 100 个外边界节点,每

个节点产生数据包后广播该数据包,以 sink 节点接收到的数据包与总数据包的比例作为数据包传输的成功率。

图 5 为 HGEBR, GRAB^[9] 和 SPBT^[10] 网络传输成功率和总源数据包数量的关系,其中每次传输失败率 $f=0.1$ 。从图 5 中可以看出外边界节点的传输成功率 HGEBR 比 GRAB 和 SPBT 高,且数据传输的成功率稳定在一个水平线上,与源数据包产生数量无关,其原因在于前 2 种算法都采用可控的洪泛机制相较于 SPBT 一条路径传输成功率更高,而 GRAB 没有考虑到外边界节点的情况,传输成功率低于 HGEBR。

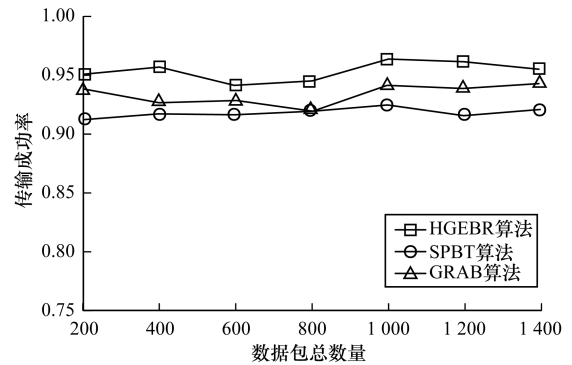


图5 数据包数量和传输成功率的关系

从网络中随机选取 100 个节点(可能是内边界节点,也可能是外边界节点)统计模拟实验的结果。图 6 显示了 HGEBR, GRAB 和 SPBT 的能量损耗和数据包总数的关系,图 7 表明了 3 种算法平均网络延迟和数据包数量的关系。从图 6 可以看出 HGEBR 和 GRAB 能量损耗多于 SPBT 算法,其主要原因是 SPBT 进行了下一跳的选择,而 HGEBR 和 GRAB 将消息广播出去,造成了更多的能量损耗。为了保证数据传输的可靠性, HGEBR 算法通过可控广播保证每一个消息都有 N 个中继节点转发,而 SPBT 则通过回溯法保证消息的可靠传输,增加了网络延迟,如图 7 所示, HGEBR 的平均网络延迟低于 SPBT 算法。

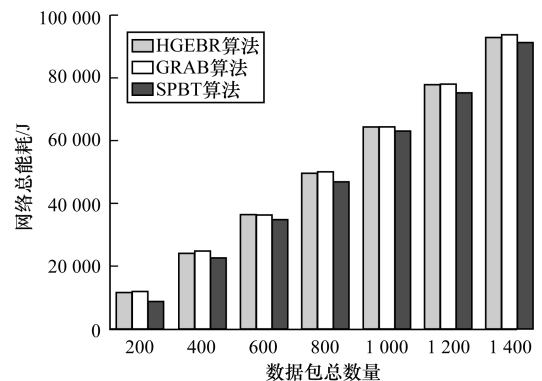


图6 HGEBR, GRAB 和 SPBT 能量损耗对比

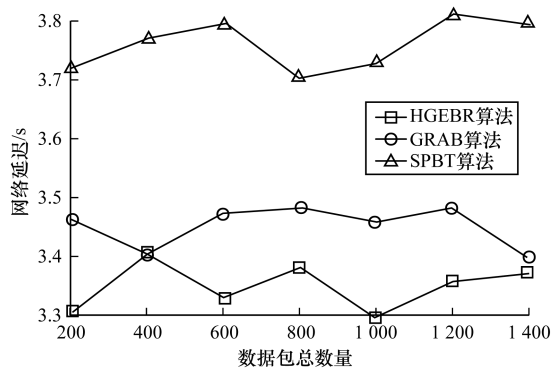


图7 HGEBR, GRAB 和 SPBT 平均网络延迟对比

图8表明HGEBR中邻节点剩余能量表最大记录数 N 与网络能耗和网络传输成功率的关系。从图中可以看出 N 从1~3的过程中,网络传输的成功率增长显著,而从3开始成功率基本不再变化,而网络的能耗则一直在增长。因此,从实验结果可以看出, N 的最优取值是3。

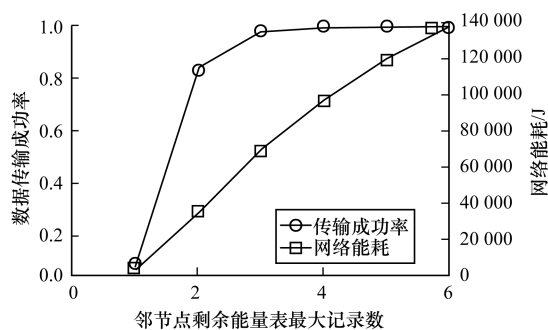


图8 HGEBR 邻节点剩余能量表最大记录数与网络传输成功率及能耗的关系

6 结束语

本文基于跳数梯度场,针对无线传感器网络中节点能耗不均衡、外边界节点数据传输不可靠性问题,提出一种新的能量均衡的健壮路由协议HGEBR。该协议通过节点维护的邻节点剩余能量表的大小来控制数据包的分发,分为梯度场的建立、数据转发2个阶段,介绍2个阶段的算法,并与现有协议进行对比,理论分析与模拟实验证明,其在数据传输可靠性和能量有效性上优于现有算法。

参考文献

[1] Jennifer Y, Biswanath M, Dipak G. Wireless Sensor Network Survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330.

[2] 魏永红,李科杰. 层次拓扑结构的无线传感器网络能量模型[J]. 计算机应用, 2010, 30(7): 1731-1735.

[3] Chiara B, Andrea C, Davide D, et al. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution[J]. Sensors, 2009, 9(9): 6869-6896.

[4] Boulfekhar S, Benmohammed M. A Novel Energy Efficient and Lifetime Maximization Routing Protocol in Wireless Sensor Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72(2): 1333-1349.

[5] Chi Yuan-po, Chang Hsung-pin. An Energy-aware Grid-based Routing Scheme for Wireless Sensor Networks[J]. Telecommunication Systems, 2013, 54(4): 405-415.

[6] Ben-Othman J, Bashir Y. Energy Efficient and QoS Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(8): 849-857.

[7] Thomas W, Kris P, Dominique B, et al. Implementation of Gradient Routing in Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 1-6.

[8] Ma Di, Joo E M, Wang Bang. Analysis of Hop-count-based Source-to-destination Distance Estimation in Wireless Sensor Networks with Applications in Localization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2998-3011.

[9] 王国军,王田,贾维嘉. 无线传感器网络中一种基于行进启发的地理位置路由[J]. 传感技术学报, 2007, 20(2): 382-386.

[10] Li Xia, Chen Xi, Guan Xiaohong. A New Gradient-based Routing Protocol in Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of Conference on Embedded Software and Systems. Berlin, Germany: Springer, 2005: 318-325.

[11] Ye Fan, Zhong Gary, Lu Songwu, et al. Gradient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks[J]. Wireless Networks, 2005, 11(3): 285-298.

[12] 田丰,仇庆丰,孙小平,等. 一种基于路由表的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机应用, 2008, 28(10): 2584-2586.

[13] 范书平,马宝英,高晨光,等. 一种分簇WSN最小跳数路由算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(8): 1775-1779.

[14] 邬春学,叶胤鹏,许博威. 基于梯度阈值和时延的定向扩散路由协议[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 77-79.

[15] Andras V, Rudolf H. An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 60-78.

编辑 索书志