

UCRP——一种能量有效的 WSN 非均匀分簇路由协议

樊爱京

(平顶山学院 网络计算中心, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 提出了一种新的能量有效的非均匀分簇路由协议—UCRP. 根据距离基站的远近将网络分为大小不同的簇; 簇内数据传输根据簇范围的大小采用单跳或多跳; 簇间数据传输构建多跳路由, 簇首选择下一跳节点时将能量与最小跳数路由算法相结合; 最后在能量有效的前提下对 LEACH 协议易受到 HELLO flooding 攻击提出了安全设想. 仿真结果表明: 该协议能够有效地均衡簇首和全网能耗, 延长网络生存时间.

关键词: 无线传感器网络; 能量有效; 非均匀分簇; 多跳路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)02-0065-04

UCRP—An Energy Efficient Uneven Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

FAN Ai-jing

(Center of Network Compute, Pingdingshan University, Pingdingshan 476000, China)

Abstract: The paper design a new energy efficient uneven clustering routing protocols-UCRP. Dividing the network into some clusters of different size according to the distance from base station; the protocol transmits data using one-hop or multi-hop at intra-cluster; and constructs the multi-hop routing among inter-clusters, the cluster head select it's next hop node combining the energy of node with the minimum-hop routing algorithm; finally, under the premise of the energy efficient the paper put forward security idea based on the LEACH protocol is easily attacked by HELLO flooding. Simulation results show that the routing protocol effectively balances the energy consumption of cluster heads and the whole network, prolongs the network lifetime.

Key words: WSN; energy efficient; uneven clustering; multi-hop routing

1 引言

无线传感器网络路由协议根据网络逻辑结构的不同分为平面路由协议与分簇路由协议两类. 由于分簇路由协议与平面路由协议相比能够有效地利用节点能量且易于扩展等, 因此对于它的研究一直在进行. 前期主要是对均匀分簇路由协议^[1-6]进行研究, 在该类协议中, 节点分为簇首节点与成员节点两类, 成员节点主要负责收集簇内数据传输给簇首, 簇首节点对来自成员节点的数据进行融合并经过单跳或者多跳转发至基站. 因此单跳时距离基站较远的簇首能耗快, 多跳时距离基站较近的簇首除了完成自身工作外还需要转发来自其他簇首的数据, 导致

距离基站较近的簇首能量消耗较快, 生存时间较短, 从而造成网络分割, 减少了整个网络的生存周期, 该问题被称为“热区”问题^[7]. 基于这个原因, 研究人员提出了非均匀分簇^[7-8]的思想. 本文在对现有分簇路由协议 LEACH^[1]、PEGASIS^[2]、HEED^[3]、EE-UC^[8]等进行研究的基础上, 提出了一种新的能量有效的非均匀分簇路由协议—UCRP(Uneven Clustering Routing Protocol).

2 相关工作

LEACH 协议与 HEED 协议为典型的均匀分簇路由协议. 其中 LEACH 是无线传感器网络中提出的第一个分簇路由协议, 该协议提出的簇首轮换

机制和基于分簇结构的数据融合技术是动态分簇算法最基本的特点. 但是 LEACH 协议随机选择簇首, 簇首在网络内的分布不均, 簇内簇间均采用单跳, 使得远离基站的节点死亡过快; HEED 协议最先只对簇首选择与成簇提出了新的算法思想, 在后来的研究中, 在簇间引入了多跳路由——HEED-M, 与 LEACH 相比, 虽然一定程度上延长了网络生存时间, 但是簇首选择与成簇比较复杂, 簇的负载均衡性较差, 距离基站较近的节点死亡较快等. 文献[8]中提出了非均匀分簇路由协议——EEUC, EEUC 形成不同的簇半径, 使距离基站较近的簇较小, 从而使簇首能有较多能量用于转发来自其他簇首的数据, 与均匀分簇路由协议相比, 可以较好地均衡簇首能耗, 但是它随机选择簇首, 不论簇范围大小簇内均为一跳, 且簇间数据传输时没有考虑时延.

本文通信模型基于以下假设: (1) 网络中所有节点相同且能量有限; (2) 对于给定的信噪比信道是对称的; (3) 基站固定, 并且在覆盖区域外, 离网络较远; (4) 无线电信号在各个方向上能耗相同; (5) 节点在网络内具有唯一的 ID 且具备数据融合的功能; (6) 已知对方发射功率, 节点可以根据接收信号的强度 RSSI 计算出自己与发送节点之间的近似距离^[7].

网络工作时, 发送节点发送 k bit 信息到距离 d 的接收方时, 能耗为

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} k * E_{elec} + k * \xi_{fs} * d^2 & d < d_0 \\ k * E_{elec} + k * \xi_{amp} * d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

同时, 每个节点接收 k bit 信息消耗能量为

$$E_{Rx}(k) = k * E_{elec} \quad (2)$$

簇内成员节点传输数据到簇首, 簇首可以将接收到的数据进行融合, 此时需消耗一定的能量, 然后通过单跳或多跳方式发送给基站.

3 UCRP 协议描述

UCRP 协议在簇首选择与成簇时根据距离基站远近形成大小不同的簇且尽可能使能量较多的节点成为簇首, 位于多个簇范围内的节点加入簇时选择距离基站较远的簇首加入, 簇内根据距离基站的远近采取单跳传输与节点成链传输两种方法, 簇间综合考虑时延与能量形成多跳路由.

3.1 簇首选择

在簇首选择之前根据文献[8]中的方法确定每个节点的竞争半径, 计算公式如下:

$$R_c = [1 - c * (d_{max} - d_{toBS}) / (d_{max} - d_{min})] R_c^0 \quad (3)$$

该公式可以控制竞争半径的取值范围, 使距离基站较近的候选簇首竞争半径较小, 距离基站较远的候选簇首竞争半径较大, 从而控制形成大小不同的簇; 本文中取 c 为 0.5, R_c^0 为 60.

簇范围确定后, 进入簇首选择阶段. 剩余能量高于平均能量的节点成为候选簇首, 然后由候选簇首竞争成为簇首. 具体方法如下: 首先根据节点剩余能量产生其竞争时间, 以候选簇首 M, N 为例, $T_M = T_0 * [(1 - E_M) / (1 + E_M)]$, $T_N = T_0 * [(1 - E_N) / (1 + E_N)]$ (E_M, E_N 为节点 M, N 的剩余能量, T_0 为最大竞争时间), 如果 $E_M > E_N$, 则 $T_M > T_N$; 竞争时间确定后, 节点 M 进入倒计时状态, 如果在竞争时间结束之前, 接收到了来自其它节点的消息 “MSG_Cluster head”, 则结束计时, 节点状态由候选簇首变为非簇首, 如果到其竞争时间结束仍没有收到其它节点的 “MSG_Cluster head” 消息, 则节点状态由候选簇首变为簇首, 并以发射半径 M, R_c 发出 “MSG_Cluster head” 的消息, 该消息中包括 M 的当前能量、ID 号、 $d_{M \text{ to BS}}$ 、 M, R_c 和标识, 以表明该消息是广播消息, 在其半径范围内的节点收到该消息后停止计时.

3.2 成簇

在成簇阶段, 节点根据接收到的簇首选择合适的簇加入. 为了防止出现覆盖空洞, 网络中的不同簇之间存在重叠区域, 因此存在节点可能位于两个或者多个簇的范围之内, 由于距离基站较近的簇首在收集传输本簇数据的同时需要转发来自其它簇的数据, 因此选择距离基站较远的簇首加入. 这样, 可以使距离基站较近的簇首更好的完成数据传输且延长其生存时间. 另外, 通过广播消息来交换与获得信息的协议易受到 hello flooding 攻击, 为了在能量有效基础上增加安全性, 可以在成簇时采取以下措施: 节点向簇首发送请求加入信息 (MSG_Request), 簇首向发送请求的节点发送时分配隙信息时加入对 MSG_Request 的确认, 如果节点在一定时间内没有收到时隙分配信息或者收到的时隙分配信息里没有确认消息, 则认为该簇首为恶意节点. 在全网内广播, 告知所有节点该节点为攻击者, 此后忽略来自该节点的信息, 然后重新成簇.

3.3 数据传输

UCRP 协议在簇内根据簇范围大小构建单跳或多跳路由, 簇间采取多跳路由.

3.3.1 簇内数据传输

非均匀分簇路由协议 UCRP 将网络划分为大小不同的簇,在簇的范围比较小时簇内节点可以与簇首直接进行数据传输,但是当簇的范围比较大时直接传输则不合适,这是由于范围较大的簇内节点较多且部分节点距簇首较远,采用直接传输的方式则可能增加节点能耗、减少节点的生存时间,因此在远离基站范围较大的簇内需要采用多跳传输. UCRP 簇内传输采用方法如下:当簇的半径大于某个值时,将簇内除了簇首之外的节点使用贪婪算法成链,选择一个领导节点将采集到的数据传输给簇首;反之,则采用直接传输的方法.

3.3.2 簇间数据传输

簇间进行数据传输时,采取多跳路由将数据传输给基站,且兼顾到节点、链路能耗与网络时延. 簇间路由构建具体方法如下:

首先,根据 WSN 平面路由协议中的最小跳数路由算法得到每个簇首的邻簇首集合. UCRP 将网络划分为大小不同的簇,靠近基站的簇较小,远离基站的簇较大,因此距离基站越近,簇首个数越多,分布较为密集,利用最小跳数路由算法可以得到每个簇首在其半径范围内通往基站且跳数比其小一的多个节点,这些节点所形成的集合称为邻簇首集合.

其次,从邻簇首集合中得到下一跳节点集合.

形成下一跳节点集合时,不仅要考虑到链路时延,还需要考虑下一跳簇首的能量与整体链路能量消耗. 以簇首 M 为例进行说明(采用自由空间模型):

当 M 直接传输 k bit 数据到基站时,能耗为 E_1 :

$$E_1 = E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * d^2(M, \text{Sink}) \quad (4)$$

簇首 M 通过 N (N 为 M 的邻簇首) 转发数据,则能耗为 E_2 :

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * d^2(M, N) + \\ &E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * d^2(N, \text{Sink}) + E_{\text{elec}} * k \\ &= 3 * E_{\text{elec}} * k + \xi_{\text{amp}} * k * [d^2(M, N) + \\ &d^2(N, \text{Sink})] \end{aligned} \quad (5)$$

由于节点的接收能耗远小于发送能耗,因此链路的总能耗由 $d^2(M, N) + d^2(N, \text{Sink})$ 决定,如果 $d^2(M, N) + d^2(N, \text{Sink}) < d^2(M, \text{Sink})$ (6) 则可以在均衡单个节点能耗的同时减少链路上的总能耗.

因此在选择簇首的下一跳节点时,首先进行能量比较,如果 $E_M < E_N$ 且满足式(5),则将 N 加入 M 的下一跳节点集合. 在进行簇间数据传输时,簇首只

需在其下一跳节点集合中随机选择即可.

在实际的无线传感器网络应用中,节点数目庞大,相应的簇首个数也多,同时由于非均匀分簇路由协议的特性,每个簇首的下一跳节点比均匀分簇要多. UCRP 在簇间进行数据传输时采用动态路由:允许簇首节点从一组候选节点中动态选择数据转发的下一跳节点,而不是固定每个簇首的转发节点. 该方法可以在一定程度上减少攻击者完全控制数据流的可能性,安全性有了一定的提高.

4 仿真实验

4.1 仿真说明

本文采用 OMNET++ 仿真环境对 LEACH、HEED-M、EEUC 与 UPRC 四种协议进行仿真验证,通过仿真结果对其性能进行比较. 参数设置如表 1 所示.

表 1 参数设置

参数	取值
网络覆盖区域	(0,0)~(200,200)
基站位置	(100,250)
节点总数	400
节点初始能量	0.5 J
E_{elec}	50 nJ/bit
ξ_{fs}	10 pJ/(bit · m ²)
ξ_{mp}	0.001 3 pJ/(bit · m ⁴)
d_0	87 m
E_{DE}	5 nJ/bit/signal
数据包大小	4 000 bits

4.2 仿真结果

由前文分析可知,簇半径小于 r 时,簇内采取单跳数据传输,反之采用多跳.

图 1 显示了第一个节点死亡时间随 r 值的变化,可知当 r 值较小时,簇内构建多跳路由消耗能量多于直接传输消耗能量,当 r 值较大时,某些范围较大的簇采用单跳传输则会增加能量消耗,因此, r 值的确定影响了网络的生存时间.

图 2 显示随机选择的轮数中网络簇首消耗能量的方差,可知,LEACH、HEED-M 的方差较大,EEUC 与 UCRP 的方差较小;其中 UCRP 的方差一般小于 EEUC 且波动较小,因此它较好的均衡了簇首能量消耗.

图 3 显示了网络中节点存活个数随轮数的变化

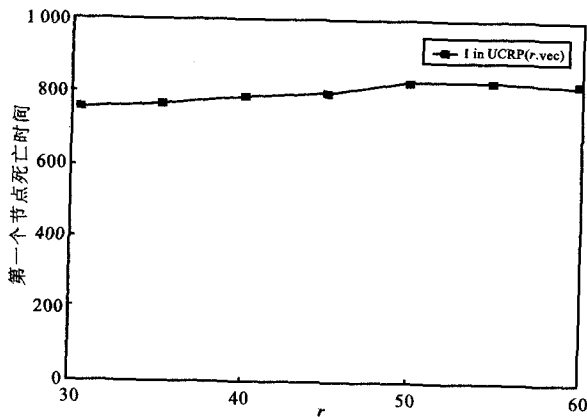
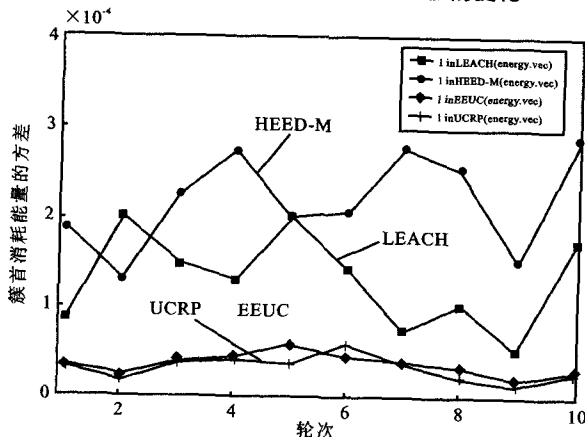
图1 第一个节点死亡时间随 r 值的变化

图2 簇首消耗的能量方差

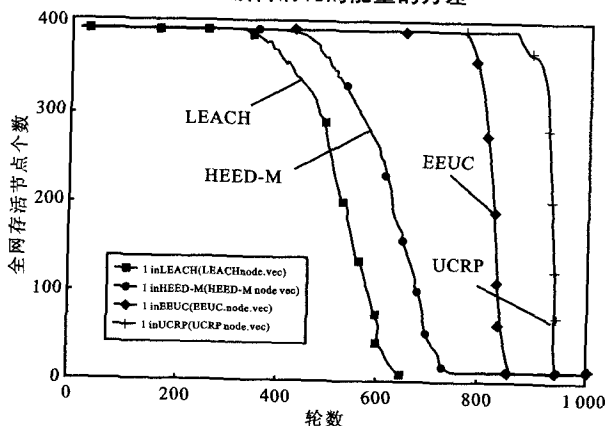


图3 四种分簇协议网络存活时间

趋势。其中,UCRP 的第一个节点死亡轮次(F)与最后一个节点死亡轮次(L)比其它协议都高,且其 L 与 F 的差值最小,由此可知 UCRP 可以延长网络的生存时间且能在一定程度上均衡全网节点能耗。

图4显示了全网剩余能量随轮数的变化趋势。由图可知,UCRP 在每轮工作结束后全网剩余能量均为最大,这是因为该协议在选择簇首时没有过多的信息交换且成簇信息不全网广播,在较大的簇范围内采用多跳路由,簇间综合考虑节点、链路能耗与

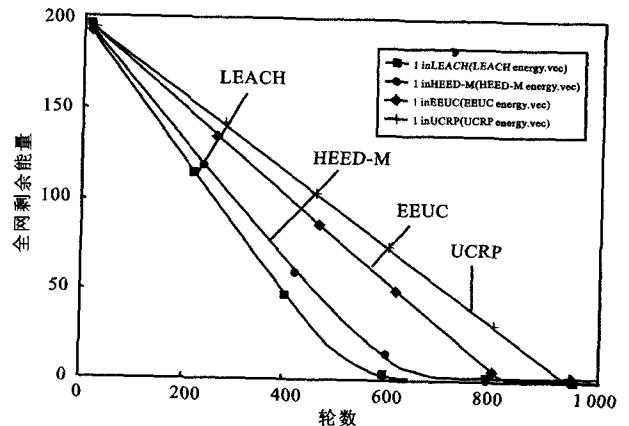


图4 全网能耗随生存时间变化图

时延来构建多跳路由等,以上改进在一定程度上减少与均衡了网络能耗。

5 结束语

由于均匀分簇路由协议易产生“热区”问题,本文提出一种新的非均匀分簇路由协议 UCRP。该协议根据剩余能量选择簇首,将网络划分为大小不均匀的簇;簇内根据簇范围采用不同的数据传输方式;簇间构建多跳路由时综合考虑节点能量比较、链路能耗与时延;并在能量有效的基础上增加了一定的安全性。仿真结果表明:UCRP 在一定程度上均衡了节点与簇首能耗,减少了网络能耗,延长了网络生存时间。

参考文献:

- [1] Heinemann W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1 (4): 660-670.
- [2] Lindsey S, Raghavendra C. PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems[C]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference '02. Big Sky, Montana: IEEE, 2002;1125-1130.
- [3] Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3 (4): 660-669.
- [4] 龚本灿, 李腊元, 蒋延耀, 等. 基于生成树的无线传感器网络分布式路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(11): 77-80.
- [5] Yin Cuisheng, Yang Guang, Yang Wu, et al. An energy efficient Routing Algorithm for wireless sensor Networks[C]// 2008 International Conference on Internet Computing in Science and Engineering. Harbin: IEEE, 2008;181-186.

7 结束语

文中实现了一种基于统计的数字后台校准方法,并在 14 bit 流水线 ADC 中对其校准电路进行了验证.该校准方法采用基于统计的误差测量方法,无需任何外部注入的校准信号,保证了 ADC 的输入范围.仿真结果表明校准后 ADC 的 SNR 为 76.9 dB, SFDR 为 73.9 dB,有效精度 ENOB 为 12.5 bit,分别比校准前提高了 21dB、22 dB、3.5 bit.因此,该算法可以有效降低输出非线性,提高了流水线 ADC 的精度.

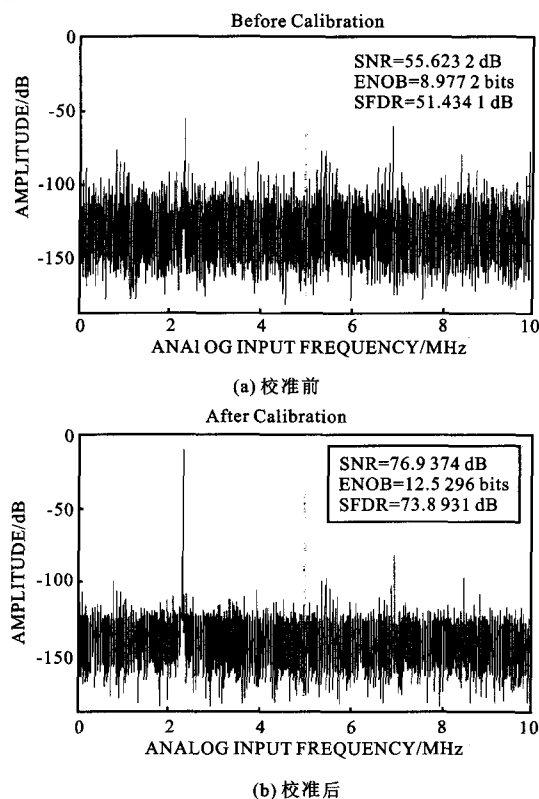


图 10 输出频谱分析

参考文献:

- [1] Sourja Ray, Song Bang Sup. A 13-b linear, 40-MS/s pipelined ADC with self-configured capacitor matching [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2007, 42(3): 463-474.
- [2] Ryu SeungTak, Ray Sourja, Song Bang-Sup, et al. A 14-bit linear capacitor self-trimming pipelined ADC [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2004, 39(11): 2046-2051.
- [3] Blecker E, McDonald T, Erdogan O, et al. Digital background calibration of an algorithmic analog-to-digital converter using a simplified queue [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2003, 38(6): 1489-1497.
- [4] Shu YunShiang, Song BangSup. A 15-bit Linear 20-MS/s Pipelined ADC Digitally Calibrated With Signal-Dependent Dithering [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2008, 43(2): 342-350.
- [5] 刘蒲霞, 路铁军, 王宗民. 16 位流水线 ADC 系统级建模及仿真 [J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(12): 120-124.
- [6] Roberto G Masssolini, Giovanni Cesura, Rinaldo Castello. A fully digital fast convergence algorithm for nonlinearity correction in multistage ADC [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 2006, 53(5): 389-393.
- [7] Karanicolas A, Lee H S, Bacrania K. A 15-b 1-msample/s digitally self-calibrated pipeline ADC [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 1993, 28(12): 1207-1215.

作者简介:

丁 洋 女, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为高速高精度流水线 ADC 的设计.

(上接第 68 页)

- [6] 叶嘉, 彭伟. Mint Route EE: 一种无线传感器网络能量有效的路由协议 [J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(9): 35-37.
- [7] Soro S, Heinzelman W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering [C]// Proceedings of the 5th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks. Denver, CO: IEEE, 2005.

- [8] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议 [J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.

作者简介:

樊爱京 男, (1970-), 副教授. 研究方向为计算机网络.