

节点信息感知的非均匀分簇路由算法

牛佳佩 程良伦

(广东工业大学自动化学院 广州 510006)

摘要 无线传感器网络中,簇头选举不合理将导致节点能量消耗过快,使其过早失效,网络过早结束生命周期。对此提出一种节点信息感知的非均匀分簇路由算法:充分考虑节点邻域基数、位置感知、剩余能量,通过非均匀分簇确定最优簇头;簇的形成阶段,节点加入距自己最近的簇,通信上采用簇内单跳、簇间单跳、多跳相结合的方式。仿真实验表明,该算法与 LEACH,CEBRCA 相比,在网络生命周期、能量利用率和数据发送方面都具有较好的性能。

关键词 无线传感器网络,邻域基数,剩余能量,能量均衡

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Sensor Information Aware Uneven Clustering Routing Algorithm (SIAUCR)

NIU Jia-pei CHENG Liang-lun

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract In Wireless Sensor Networks (WSN), cluster head election unreasonable will lead nodes consuming their energy quickly, the network end their life early. In this paper a sensor information aware uneven clustering routing algorithm (SIAUCR) is proposed where cluster heads are selected based on node's neighborhood cardinality, the distance from node to base station and the node's residual energy. In cluster formation stage; the node join the nearest cluster, transmission through single hop in the cluster single hop and multi-hop between cluster heads. Simulation results show that the SIAUCR algorithm is more effective in extending the network life, energy savings and transmission than LEACH, CEBCRA.

Keywords Wireless sensor networks, Neighborhood cardinality, Residual energy, Energy balancing

无线传感器网络是由大量低成本、低能耗的无线传感器节点组成的,它们被部署在指定的区域,通过自组织的方式形成多跳的无线网络,能够在人们无法接近的恶劣环境中正常工作^[1],WSN 技术已在多个领域得到广泛应用。节点携带能量有限且无法补给,计算、存储能力有限,能量利用决定着无线传感器网络的性能^[2]。所以,如何降低节点能耗,均衡网络能量消耗,延长无线网络生命周期一直是 WSN 研究的热点,而合理的路由算法是降低节点能量消耗,均衡网络能耗的关键。

1 相关工作

WSN 中路由协议可分为两类:平面路由和层次路由^[3]。层次路由通过分簇实现,簇包括簇头节点和成员节点,可以高效地融合并发送数据至基站。层次路由中把网络节点以簇为单元进行划分,并且周期地选举簇头。簇头通常要承担更为复杂的任务,如管理簇,从成员节点收集信息,数据融合,最终把数据发送到基站(BS)。其中 Heinzelman 等提出典型的 LEACH 算法定义了“轮”的概念,每轮由簇头选举阶段和稳定阶段构成,网络中的每个节点等概率地参与簇头选举,簇头随机选举产生。节点通过周期轮换方式来当选簇头以均衡网

络能耗^[4],但是若靠近基站能量较低的节点当选簇头,将会导致节点能量加速消耗,形成“热区”^[5]。Kuila P 等提出一种给予能量消耗均衡的 CEBCRA 算法,该算法分 3 个阶段:簇头选举、簇的建立、数据转发。簇头选举:节点根据剩余能量和节点分布密度来选举簇头;建立阶段:成员节点在自己通信距离内根据簇头消耗代价成本选择入簇;数据转发阶段:簇内数据单跳传输,簇间多跳传输,对于簇间路由,簇头计算自身通过不同路径到基站的能量消耗代价,然后选取能耗最优的中继簇头转发数据到基站,降低通信能量消耗^[6]。Syed Amjad Ali 等提出一种新型的建立静态/固定簇,通过统一量化能量值进行簇头轮换,在每个簇内实现能量均衡,从而达到整个网络能量的均衡消耗,实现延长网络生命周期的目的^[7]。Heinzelman 等提出的 LEACH-C 协议是一种集中式的分簇路由协议,在 LEACH-C 协议每个周期的开始阶段,所有节点把自己的位置信息和剩余能量值发往基站。基站在收到这些信息后,首先计算所有节点的平均能量值,把能量不低于平均能量值的节点作为候选节点。这种方式能够减少选举簇头时因通信而消耗的能量,从而有更多的剩余能量用于传输数据^[8]。Thuy Tran Vinh 等提出一种针对事件驱动 WSN 的多路径分簇路由算法——EMRP,其通过提供可靠的输出传输路径,均

本文受广东省重大科技专项(2009A080207008),广东省科技计划项目(2009B010800010)资助。

牛佳佩(1986—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:18664514382@163.com;程良伦(1965—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为智能与网络化系统、RFID 与传感器网络。

衡网络能量消耗和提高网络效率。此外,剩余能量作为主要参数可以动态地在两条路径之间切换。该算法性能好而且在形成的簇中成员节点和簇首节点间的平均距离短,因此簇内通讯的代价小;同时考虑了节点的剩余能量,能量低的节点成为簇首的可能性降低^[9]。Jia Yunjie 提出从能量和距离考虑,用均匀分布的分簇路由算法来平衡网络能耗^[10]。

上文提到的 LEACH、LEACH-C 等算法分别从节点距离基站距离、节点剩余能量进行统一分簇,而实际中节点随机、非均匀分布,因而统一分簇并不能有效解决簇头分布不合理原因造成的网络能耗不均衡问题。SIAUCR 算法分别从节点距离基站距离和节点剩余能量先决定节点邻域基数,然后再根据节点邻域基数、节点距离基站距离、节点剩余能量权重综合考虑最优簇头,节点加入距离自身最近的簇头所在簇两方面共同保证了簇划分和簇头选举更为合理优化,从而实现能量高效均衡,更好地解决网络寿命短的问题。

2 系统模型

2.1 网络模型

(1)节点部署在二维平面区域,基站 BS 固定位于该区域之外;

(2)所有节点同构,初始能量相同且可以接收到 BS 的广播信息;

(3)节点随机分布,每个节点 ID 唯一;

(4)网络中节点位置未知且无定位装置;

(5)节点发射功率固定,节点可根据接收到的邻域节点信号强度 RSSI 计算该节点距离发送节点的距离。

2.2 节点能耗模型

本文采用和文献^[11]相同的无线通信能耗网络模型。节点发送 k 位数据到距离为 d 的地方,能量消耗公式如下:

$$E_{Tx} = \begin{cases} k \times (E_{de} + \epsilon_{fs} \times d^2), & d < d_0 \\ k \times (E_{de} + \epsilon_{amp} \times d^2), & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收 k 位数据的能量消耗为:

$$E_{Rx}(k) = k \times E_{de} \quad (2)$$

式中, k 为传输数据包两进制的位数, d 为节点发送距离。当节点发送距离小于阈值 d_0 时,采用自由空间模式,功率放大系数为 ϵ_{fs} ; 否则,采用多路径衰减模式,功率放大系数为 ϵ_{amp} 。

$$d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs} / \epsilon_{amp}} \quad (3)$$

由式(1)、式(2)看出数据发送比接收耗费更多的能量,数据发送时能量消耗中距离所占比重较大,因此距离基站越远的节点发送数据时耗能越多。

3 SIAUCR 分簇算法

SIAUCR 算法由以下两部分组成:分簇准备阶段,簇的形成阶段。

3.1 分簇准备工作

这里先介绍本文将要提到的几个概念, S 表示网络中所有节点的集合。

邻域半径:首次进行分簇前,基站发出广播信息, S 内所有节点根据感知信号接收强度 RSSI 的值确定自身距离基站距离,这个距离为定值 L_{BS} 。然后根据节点 i 的剩余能量和距

离基站距离确定自身邻域半径。

$$R_i[E_r(i,r),L_{BS}(i)] = A \times L_{BS}(i) + B \times E_r(i,r) \quad (4)$$

式中, A, B 为传感器参数,根据簇的规模和节点性质决定, $R_i[E_r(i,r),L_{BS}(i)]$ 是节点邻域半径, $L_{BS}(i)$ 是节点 i 到基站距离,为固定值, $E_r(i,r)$ 为节点 i 第 r 轮时候的剩余能量值。

节点邻域:在 S 中, $L(i,j)$ 为节点 i, j 之间的距离,当 $L(i,j) < R_i[E_r(i,r),L_{BS}(i)]$, 节点 i 周围所有节点的集合 N_i 称为节点 i 的节点邻域。

邻域基数:节点 i 的节点邻域集合 N_i 节点的和 $\sum N_i$ 。

首次每个节点确定自己的邻域半径,基站发出广播,节点根据接受 RSSI 的值确定自身距离基站的距离 $L_{BS}(i)$ 。根据式(4)可以得到节点邻域,计算得到集合 N_i 中节点的和为邻域基数 $\sum N_i$ 。首次计算节点邻域,由于网络内节点初始能量相同,节点 i 邻域半径只和 $L_{BS}(i)$ 有关。非首次分簇,由于经历一轮消耗,各个节点能量剩余不同,所以邻域半径由 $L_{BS}(i)$ 和 $E_r(i,r)$ 共同决定。节点剩余能量越小,距离基站距离越近,邻域半径也越小;节点距离基站越远,剩余能量愈大,分簇半径也越大。通过不同的邻域半径确定不同位置和剩余能量节点的邻域基数,最终可以为选举更为合适的簇头做准备。

3.2 簇的形成

由于簇的规模不同,簇头距离基站距离以及需要收集转发簇内成员的信息量不同,同时需处理并转发其他簇头转发来的数据融合,导致每轮结束后各簇头能量消耗出现较大差异。合理选举簇头可以构建更为合适的簇,从而均衡网络每个簇的能量消耗,进而均衡整个网络的能量消耗。

簇头选举综合节点邻域基数、剩余能量、距离基站距离 3 个参数,权重最高的节点当选簇头。若不止一个节点满足,则选举 ID 较小者。权重公式为:

$$W(i) = \alpha \times \frac{\sum N_i}{\sum S} + \beta \times \frac{E_r(i,r)}{E_{ini}} + \gamma \times [1 - \frac{L_{BS}(i)}{d_{max}}] \quad (5)$$

$0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1, 0 < \gamma < 1, \alpha + \beta + \gamma = 1$

式中, $\sum N_i$ 为节点 i 的邻域基数, $\sum S$ 为传感器网络中节点总数; E_{ini} 为节点初始能量; d_{max} 为距离阈值。其中 α, β, γ 为权重因子,由具体网络规模和节点性质决定。

由式(5)看出,邻域基数越大,剩余能量越多,距离基站越近,选为簇头的概率越大。这里将节点邻域基数、剩余能量、距离基站距离综合考虑在内,在选举合理簇头的同时兼顾了节点分布情况和数据传输代价,通过一种综合权重的方式来获取更加优化的网络性能。

簇头被选举后,BS 发出广播信息 BS_Msg 对 S 内所有成员节点同步。簇头以固定的发射功率发出广播消息 CH_Msg,包含自己 ID 等信息,公布自己成为簇头。周边所有非簇头信息的节点接到 CH_Msg,根据 RSSI 值加入距自己最近的簇,并发送 Ack_JOIN 消息,表示应答簇头广播自己入簇。LEACH、CEBCRA 中若周围邻域基数较大且距离基站较远的节点当簇头,簇头接收周边节点信息量较大且发送距离远,每轮将会消耗较多的能量。SIAUCR 算法根据式(5)选举簇头,可避免 LEACH 算法中剩余能量较少节点当选簇头节点,加快失效的问题和 CEBCRA 算法选择离基站较远的节点当选簇头,簇头与基站通信能量消耗代价较大的问题。

节点被分为直接与簇头通信的普通节点集合 Com_

Node,簇头节点集合 CH、直接与基站通信的节点集合 BS_Node。这里满足 $S=CH \cup Com_Node \cup BS_Node$ 。

若同时不止一个簇头满足条件,则节点(图1节点E)加入簇头节点邻域基数较小的簇。对于一些位置特殊的节点BS_Node(图1节点A,B),它们距离基站的距离小于等于它们距离最优簇头的距离。这时节点A,B发送信息至簇头,再经簇头收集处理发至基站,显然不是最好的选择。这里规定若节点与基站距离不大于节点到最优簇头的距离,节点把数据直接发送至基站。

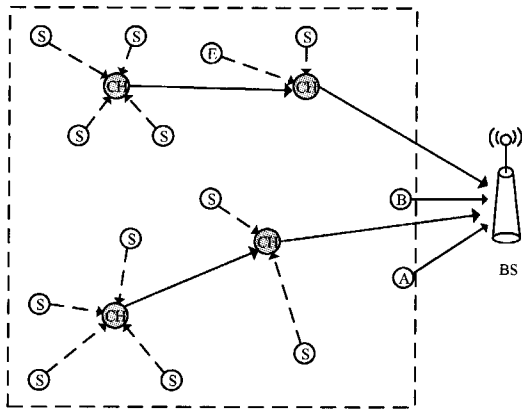


图1 节点通信模型

簇形成后,各个簇成员节点按照 TDMA 所分配的时隙,将数据打包以单跳的方式直接发送至簇头,避免了短距离内成员节点采取不合理的路径而消耗节点能量。每一轮中,成员节点只向簇头发送一次数据,避免了数据重复发送造成能量的不合理利用。每轮结束前成员节点除了发送自身采集的信息数据外,同时把节点剩余能量、ID 等信息也发送至簇头。由簇头进行数据融合后,根据能量发送代价最小的原则,将数据发送基站。基站根据节点 ID、距离基站距离和剩余能量为下一轮的分簇做准备。通过降低网络内成员节点与簇头和簇头与基站通信代价,实现了能量的高效利用,延长了网络生命周期。

在每轮结束后,网络节点根据自身剩余能量、距基站距离和周围邻域基数三者权重来重新选举簇头,避免规模较大簇内簇头能量过度消耗。

4 仿真分析

仿真实验中将 200 个节点随机分布在 $100m \times 100m$ 区域内,基站坐标为 (150, 50)。本文将 SIAUCR 与经典的 LEACH 和 CEBRCA 在 Matlab2010b 进行仿真对比分析。实验参数如表 1 所列。

表 1 实验参数

Parameter	Value
Initial Energy	0.5J
Data Aggregation Energy cost	50pj/bit
Packet size	500 bit
Eele	50 nj/bit
ϵ_{fs}	10 pj/bit/m ⁴
ϵ_{amp}	0.0013pj/bit/m ²
α, β, γ	0.4, 0.4, 0.2

LEACH,CEBRCA,SIAUCR 剩余能量总量、存活节点数随轮数变化的情况分别如图 2 和图 3 所示。

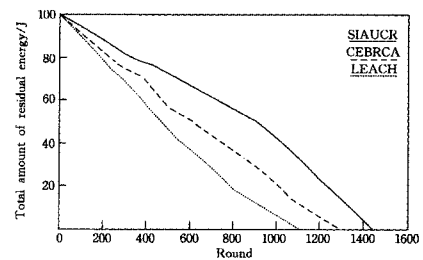


图 2 剩余能量总量与轮数关系

由图 2 显然地看出,在轮数相同情况下,SIAUCR 的剩余能量总量要高于 LEACH 和 CEBRCA,其中能量消耗为初始总能量一半时,LEACH、CEBRCA 运行轮数分别为 465、610,此时 SIAUCR 运行轮数为 860 轮。对比分析,可见 SIAUCR 对于整个网络能量利用率要高于 LEACH,CEBRCA。因为网络内能量消耗通信消耗占有比例较大,通信中发送信息能量消耗是主要部分,而发送能耗主要与节点的发送距离有关,这里考虑到了簇头周围的邻域基数,降低了整个网络内通信消耗,从而提高了网络能量利用率。

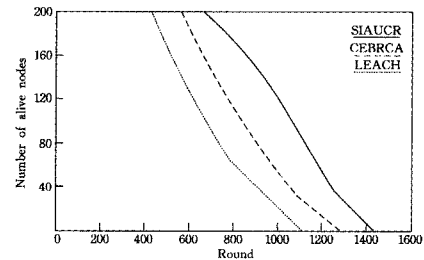


图 3 存活节点数目与轮数关系

首个节点死亡时,LEACH、CEBRCA 运行轮数为 438、561 轮,而 SIAUCR 运行轮数为 662 轮;此时,SIAUCR 运行轮数比 LEACH、CEBRCA 分别高出 50.8%、18%。半数节点死亡时,LEACH、CEBRCA、SIAUCR 运行轮数分别为 683、842、1060;此时,SIAUCR 比 LEACH,CEBRCA 分别高出 55.2%、25.9%。节点剩余总能量耗尽时或节点全部死亡时,SIAUCR 所经历轮数分别优于 LEACH、CEBRCA 30.9%、12.5%。明显看到 SIAUCR 网络节点能量利用效率更高,网络寿命、稳定性优于 LEACH 和 CEBRCA。

图 4 示出 3 种协议下,节点发送到基站数据总量与轮数的关系。明显看出 SIAUCR 在向基站发送数据时比 LEACH 和 CEBRCA 更为高效,保证了全网合理的簇头数量、簇的规模,从而提高了全网的数据吞吐量。

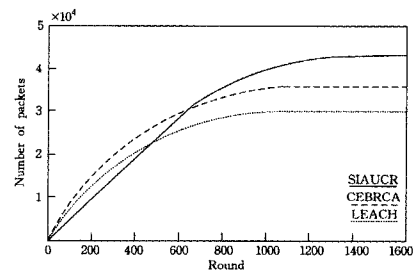


图 4 基站接收数据量与轮数关系

结束语 本文在对 LEACH 和 CEBRCA 等多种路由算法进行分析研究的基础上提出 SIAUCR 算法;综合考虑邻域基数、节能剩余能量、节点与基站距离因素选举簇头;节点加

(下转第 12 页)

某种能力,而编译出错误的代码;或者,错误地读取了/usr/lib/pkgconfig 目录的.pc 文件,从而错误地认为目标主机有某些软件包,从而导致运行时发生找不到动态链接库的错误;又比如,在配置时错误地读取了/usr/share/aclocal 中的文件,从而生成了错误的 configure 脚本。

一般情况下,编译器(build)具有比主机(host)更强的能力,环境污染会误导交叉编译器使用错误的编译方式,而这种错误会一直隐藏到运行时才得以发觉,因此危害较大。

“解决交叉编译环境的污染问题”和“适当利用宿主机现有的工具”二者之间是一个矛盾的关系。大型的构建系统自行设计了一套工具(fakeroot、sandbox 等),从根本上解决了环境污染的问题。但这样就完全不能利用宿主机现有的功能了,同时需要构建一个“完整而纯净的”交叉编译环境,对于某些小型的嵌入式应用,这一工作量反而超过了构建产品本身所需的工作量。

本文自行构建了较新版本的 pkg-config、automake、autoconf 和 libtool 等工具,同时在 SDK 目录中部署了宿主机版本的 glib 可执行文件(glib-compile-schema 也是一个编译工具),但对其它的工具包,比如 perl 语言环境、python 语言环境、CMake 编译工具等,由于较少涉及而忽略。

即使如此,有些软件包仍然需要在 configure 的时候在宿主机和目标机环境之间切换,这时,可以采取如下 3 种办法临时适应其具体需求:

(1) Hide/Restore Header。将/usr/include 和/usr/local/include 这些编译器预设路径临时隐藏。

(2) Hide/Restore Autoconf。将/usr/share/aclocal 等目录临时隐藏。

(3) Hide/Restore pkgconfig。将/usr/lib/pkgconfig 和/usr/share/pkgconfig 等目录临时隐藏。

结束语 本文设计了一个基于 Bash 的自制构建系统,展

示了深度定制操作系统的可能性。本文设计的构建系统具有实现机制易于学习掌握、支持增量调试与开发方便引入新增特性、支持按特性描述的配置项定义以支持不同硬件平台和不同的软件特性等特点,同时基于普遍支持的 bash 脚本环境具有最大的可适应性,并按产品名称为标识输出阶段性的研发成果。

目前,整个构建系统的实现框架已基本定型,编译方法模块也已经初具规模,基本实现了与硬件密切结合的 QT_QWS 及 Qt_X11 两类不同规格的自主定制的软件环境。未来的工作将可以不断引入新的软件包和新的功能,同时对已有的功能进行升级和修改,使得应用系统越来越完善。

参考文献

- [1] Rosli A N C, Shakaff A Y M, et al. Face reader for biometric identification using Single Board Computer and GNU/Linux[C]// International Conference on Robotics, Vision, Information, and Signal Processing, 2007, Penang, Malaysia, 2007
- [2] Adams B, Schutter K D, Tromp H, et al. The Evolution of the Linux Build System[C]// The Third International ERCIM Symposium on Software Evolution, 2007, 2007
- [3] Lauer M. Building Embedded Linux Distributions with BitBake and OpenEmbedded [C] // Proceedings of the Free and Open Source Software Developers' European Meeting (FOSDEM), Brussels, Belgium, Feb. 2005
- [4] Beekmans G. Linux From Scratch Version 6. 2[M]. onlineweblibrary. com, 2006
- [5] Angstrom Web Site[OL]. <http://www.angstrom-distribution.org/>, 2012
- [6] Yaghmour K, Masters J, Ben-Yossef G, et al. 构建嵌入式 LINUX 系统(第 2 版)[M]. Taiwan O R 公司, 译. 秦云川(改编), 中国电力出版社, 2011

(上接第 3 页)

人自己最近的簇,形成大小规模不等的簇;数据转发采用簇内单跳,簇间单跳、多跳相结合的方式,距离基站较近的特殊节点直接与基站通信。通过降低网络内通信来减少网络能量消耗,均衡网络开销。实验证明, SIAUCR 算法均衡了网络能耗,能量利用率、网络寿命要优于 LEACH、CEBRCA,同时数据发送效率也获得较好效果。

参考文献

- [1] Patel H, Pandya N. Study and Review of Routing protocols for wireless sensor networks[J]. International Journal of Engineering, 2013, 2(1)
- [2] Norouzi A, Babamir F S, Zaim A H. A novel energy efficient routing protocol in wireless sensor networks[J]. Wireless Sensor Network, 2011, 3(10): 341-350
- [3] Manap Z, Ali B M, Ng C K, et al. A Review on Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2013; 1-28
- [4] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000, IEEE, 2000, 2
- [5] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor

networks; communication, clustering and aggregation[J]. Ad hoc Networks, 2004, 2(1): 45-63

- [6] Kula P, Jana P K. An energy balanced distributed clustering and routing algorithm for Wireless Sensor Networks[C]// Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC), 2012 2nd IEEE International Conference on. IEEE, 2012; 220-225
- [7] Ali S A, Sevgi C. Energy Load Balancing for Fixed Clustering in Wireless Sensor Networks[C]// New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2012 5th International Conference on. IEEE, 2012; 1-5
- [8] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2002, 1(4): 660-670
- [9] Vinh T T, Quynh T N. EMRP: Energy-Aware Mesh Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]// Advanced Technologies for Communications (ATC), 2012 International Conference on. IEEE, 2012; 78-82
- [10] Jia Yun-jie, Liu Ming, et al. A clustering routing algorithm based on energy and distance in WSN[C]// Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2012 International Conference on. IEEE, 2012; 9-12
- [11] 蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1223-1232