

基于能量均衡的 ZigBee 路由优化算法

朱尚聪,吕红芳,吉书瑶

(上海电机学院 电气学院,上海 201306)

摘 要: 针对 ZigBee 现有路由协议存在节点能耗不均、易造成网络分割死亡的问题,提出了一种能量均衡的 ZigBee 路由算法,该算法对 ZBR 路由算法进行改进.改进后的算法考虑了对低能量节点的保护,控制了 RREQ 分组传递方向,减少数据泛洪,同时在路由发现时建立了多条路径,若主路径发送失败,即可直接切换到备用路径,降低延时同时减少能耗.仿真表明,改进后的路由算法能减少网络总体能耗,平衡节点能量,最大化网络寿命.

关键词: ZigBee; 能量均衡; 路由算法; 优化

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)04-0140-04

An Improved Zig Bee Routing Algorithm Based on Energy Balance

ZHU Shang-cong, LV Hong-fang, JI Shu-yao

(College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to solve the problem that the existing routing protocols in ZigBee have unequal node energy consumption and easy to cause the network to divide and die, an energy balanced ZigBee routing algorithm is proposed. The algorithm improves the ZBR routing algorithm. The improved algorithm takes into account the protection of the low energy of the node, control the direction of RREQ packet transmission, reduce data flooding, and at the same time build more than one path in the route discovery phase. If the primary path fails, it can switch directly to the backup path to reduce delay and reduce energy consumption. The simulation results show that the improved routing algorithm can effectively reduce the network energy consumption, balance the node energy and prolong the network lifetime.

Key words: ZigBee; energy balance; routing algorithm; optimization

1 引言

目前,随着物联网技术的发展,ZigBee 网络作为其中低成本、低功耗、容量大、可靠性高的无线通信技术,也得到了广泛的推广.而 ZigBee 节点能量有限,因此 ZigBee 路由优化的重点就是平衡节点能量,最大化网络寿命.文献[1-4]在 ZigBee 簇树协议的基础上引入了邻居表,同时对节点能量进行分级,以在均衡节点能量的同时减少不必要的能耗;文献[5-7]对 AODVjr 协议进行优化,减少了 RREQ 数据的传递,也减少了能耗;文献[8]通过对节点进行分簇,使节点在簇内使用簇树算法,在簇间使用 AODVjr 算法,控制 RREQ 分组传递方向,降低能

量消耗;文献[9]考虑整个网络能量消耗,同时定义节点权值,建立分簇机制,避免了不必要能量消耗和死亡.

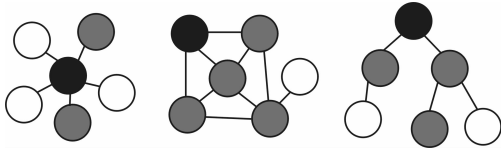
本文在 ZBR 路由的基础上加以优化,减少不必要的路由消耗,同时建立多条路径,方便主路径故障时切换,避免了寻路时多余的能量消耗.

2 ZigBee 网络描述

ZigBee 网络共有三种的网络拓扑结构,见图 1.

在星型结构中,节点可以直接与中心节点通讯,数据传输到达中心节点的速度很快,但是星型网络的覆盖范围很小;网状结构中源节点的数据可以有

多条数据传输到目的节点中,网络可覆盖的范围也



(a)星型网络 (b)网状网络 (c)树状网络

图1 ZigBee 网络的三种拓扑结构

较大;树状结构可以采用簇树路由的方式,适合节点多的网络,有很好的扩展性。

2.1 ZigBee 网络的地址分配机制

ZigBee 节点可分为全功能设备(Full Functional Device)和精简功能设备(Reduced Function Device),其详细的结构和功能分类可见文献[10]。

ZigBee 网络采用的是节点地址预先分配的方法,整个网络由中心节点负责构建,整个网络的地址分配是由网络构建参数决定,当有节点申请要进入网络时,该节点必须和网络中的 FFD 形成通讯,若该 FFD 在网络参数允许范围内可以接受其为子节点,此时这两个节点就关联了父子关系,此时,父节点就会给予子节点网络中一个独一无二的 16 位网络地址,同时向子节点发出关联消息,子节点收到这条关联消息后,节点即进入了网络。假定参数: C_m 为父节点所允许最多的可关联的子节点数, R_m 为可关联子节点数的最多路由节点数, L_m 为网络允许的最大的深度,则可根据公式确定网络深度为 d 的父节点可分配子节点之间的偏移量 $C_{\text{skip}}(d)$ 为

$$C_{\text{skip}}(d) = \begin{cases} 1 + C_m \times (L_m - d - 1) & R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \times R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

若 RFD 节点通过网络地址为 A_p 的父节点加入网络,则父节点为第 k 个加入网络的新节点分配的网络地址 A 为

$$A_k = A_p + C_{\text{skip}}(d) * R_m + k \\ 1 \leq k \leq (C_m - R_m) \quad (2)$$

若 FFD 节点通过网络地址为 A_p 的父节点加入网络,则父节点为第 n 个加入新节点分配的网络地址为

$$A_n = A_p + C_{\text{skip}}(d) * (n - 1) + 1 \quad (3)$$

若网络中有节点想要脱离这个网络,那么节点要向自己的父节点发送脱离网络的请求,在收到父节点的解除应答后,节点即已成功脱离了网络,若发出脱离网络请求的节点有子节点,则该节点需先与自身的子节点解除关联,再与网络解除关联。

2.2 簇树路由算法

在该算法中,节点是依据目的节点的网络地址

决定下一跳传输的节点,数据只能在父子之间传播。若网络地址为 A ,深度为 d 的 FFD 节点要将数据传输给网络地址为 D 的目的节点,则该 FFD 节点首先判断目的节点是不是自己的后代节点:

$$A < D < A + C_{\text{skip}}(d - 1) \quad (4)$$

若满足式(4),那么表明目的节点是源节点的后裔节点,则节点将数据转发给他的子节点 N ,根据式(5)最终将数据转发给目的节点中。

$$N = \begin{cases} D, D > A + R_m C_{\text{skip}}(d) \\ A + 1 + \left\lceil \frac{D - (A + 1)}{C_{\text{skip}}(d)} \right\rceil C_{\text{skip}}(d) \end{cases} \quad (5)$$

若目的节点不是源节点的后裔节点,则源节点将数据传输给其父节点,再根据式(4)判断目的节点是不是该父节点的后裔节点。

2.3 AODVjr 路由算法

AODVjr 算法是 AODV 算法的简化,相比 AODV 算法,AODVjr 主要有以下不同:在 AODVjr 算法中,只有目的节点允许延反方向路径回复 RREP,中间节点不可;同时舍弃了 HELLO 消息,由目的节点向源节点发送 KEEP_ALIVE 来维持路由。AODVjr 算法虽然相比 AODV 算法节省了大量能量,但 RREQ 洪泛依然严重,且所选出的路径往往节点能量不均,易出现节点能量耗尽的情况,造成网络分割。

2.4 ZBR 路由算法

ZBR (ZigBee Routing) 结合了簇树路由和 AODVjr 路由的优点,将路由节点分为 $RN+$ 和 $RN-$ 两类, $RN+$ 节点可使用簇树和 AODVjr 两种路由方式,而 $RN-$ 只可使用簇树路由。当源节点与目的节点是祖先节点和后裔节点的关系时,采用簇树路由,若不是则采用 AODVjr 路由传输数据。

3 改进算法的提出

本文在 ZBR 算法的路由发现发起前优先使用基于邻居表的簇树路由,寻找中间节点转发数据;同时在路由发现发起时,控制 RREQ 数据的传递方向,避免能量低于阈值的节点传递数据,建立多条路径,在主路径传输失败时,转到备用路径传输。

首先我们设置节点能量阈值: E_{warning}

$$E_{\text{warning}} = 0.25^n E_{\text{init}} \quad (6)$$

式中, E_{init} 表示节点的初始能量; n 的初始值为 1,当低于能量阈值的节点数目超过总节点数目的 50% 时,则 n 值加一。

由式(6)可知,所设置的节点能量阈值随着 $\frac{N(E < E_{\text{warning}})}{N} > 50\%$ 的次数变化而变化。当第一

次出现 $\frac{N(E < E_{\text{warning}})}{N} > 50\%$ 时, n 的值变为 2, 此时 E_{warning} 变大, 则 $N(E < E_{\text{warning}})$ 变小, $\frac{N(E < E_{\text{warning}})}{N}$ 就变小, 随着网络运行时间的推移, $N(E < E_{\text{warning}})$ 越来越多, $\frac{N(E < E_{\text{warning}})}{N}$ 越大, 直到超过 50%, n 则变为 3, 以此循环. 由此可见节点能量阈值随着时间的推移而变小, 符合运行时的实际情况.

3.1 基于邻居表的簇树路由

如果目的节点和源节点或者源节点的一跳邻居表中的节点存在父子关系时, 使用基于邻居表的簇树路由能够找到最佳的路径, 比起直接使用 AODVjr 路由, 可以大大减少不必要的路由消耗. 设源节点 S , 目的节点 D , 路由流程如下所示.

- (1) S 查找邻居表, 若 D 在 S 的一跳邻居表中, 直接发送, 若不是, 转向步骤(2);
- (2) 结合 2.2 节所示, 若 D 是 S 的邻居节点的后裔节点, 发送给对应节点, 若不是, 转向步骤(3);
- (3) 结合式(3) 与式(5), 若 D 是 S 的一跳邻居表节点的父辈节点, 发送给对应节点, 若不是, 转向步骤(4);
- (4) 结合式(4), 若 D 是 S 的后裔节点, 那么依据式(5) 选择节点发送, 若不是, 转向步骤(5);
- (5) 结合式(3) 与式(5), 若 D 是 S 节点的父辈节点, 则传输数据给父节点, 若不是, 转向步骤(6)
- (6) 此时, 依据邻居表的簇树路由失败, 执行改进后的 AODVjr 路由.

需注意的是, 在使用基于邻居表的簇树路由时, 若发现下一跳节点的能量值低于节点能量阈值时, 则该节点也立刻执行改进后的 AODVjr 路由.

3.2 改进的 AODVjr 路由

由于在路由发现前, 执行了基于邻居表的簇树路由, 所以可以确定, 目的节点和发起路由寻找的节点不是父子关系, 所以其子孙节点不转发 RREQ 分组.

同时对 RREQ 分组的转发次数进行限制, 我们知道在传统的簇树路由中, S 到 D 的跳数可以定义为

$$HOP_{\max} = |d_s - d_f| + |d_D - d_f| \tag{7}$$

式中, d_s 表示源节点深度; d_f 表示源节点与目的节点的最大深度公共父节点的深度; d_D 表示目的节点的深度. 所以我们限制 RREQ 数据分组的转发次数要小于等于传统簇树的路由跳数 $HOP_{\max}$.

同时为了平衡网络能量, 能量低于阈值 E_{warning} 的节点也不会转发 RREQ 分组.

具体过程如下: S 发起 RREQ 寻找路径, 中间节点收到进行转发, 若有重复则丢弃, D 收到多个 RREQ 后, 若 RREQ 来自于 S 的不同邻居节点, 一一回复 RREP. 这样就可以保证, 在路由发现中, 会存在多条从 S 到 D 的路径, 但由于 S 的每个邻居节点只转发一次 RREQ, 所以每个中间节点都只能形成唯一的一条从 S 到 D 的路径.

由于 D 回复了多个 RREP, 形成了多条从 S 到 D 的路径, S 保留这些路径作为备选, 并且在这些路径中选择跳数最少的路径为主路径.

在路由跳数上, 可以分为两部分, 即使用改进的簇树路由时的跳数和 RREP 所经过的跳数, 其中使用改进的簇树路由时的跳数可以依靠 D 的深度和转发节点的深度计算出, 并且将这个值作为 RREP 的起始跳数值 HOP, 在 RREP 传输时, 每次经过一个节点, 则 HOP 的值就加 1, 则在 HOP 随着 RREP 返回到源节点时, HOP 的值就是这条路径的节点跳数.

在这过程中, S 会设定一个定时器, 只有 RREP 在定时器时间内返回 S , 才被接收, 否则丢弃. 在接收到多个 RREP 后, S 根据 RREP 中的信息进行路由表更新. S 会在返回的多条路径中选择 HOP 最小的路径为路由主路径, 同时选择另外一条跳数较少的路径为备用路径. 在数据传输时, 当主路径传输失败, 则直接切换到备用路径, 并在路由表中删除原主路径, 不用发起路由请求, 而在备用路径也传输失败时, 此时, 就重新发起路由请求.

在新提出的优化算法中, 我们主要有以下改进: (1) 充分利用了节点所维护的邻居表和簇树的路由方式, 减少很多额外的路由开销; (2) 限制 RREQ 数据分组的广播, 避免全网的 RREQ 分组洪泛, 使 RREQ 在限制的范围内广播寻径, 同时避免低能量的节点转发 RREQ, 以平衡全网的节点能量; (3) 目的节点回复多个 RREP, 建立多条节点不相交的路径, 从中选择跳数最少的主路径和备用路径, 主路径失效时切换到备用路径.

改进后算法的 RREQ、RREP 数据流程图参见图 2 和图 3.

4 仿真与分析

在仿真中, 我们将本文改进算法与原算法在相同工作环境下进行对比, 主要比较了相同时间内的节点的总能耗和死亡节点的个数.

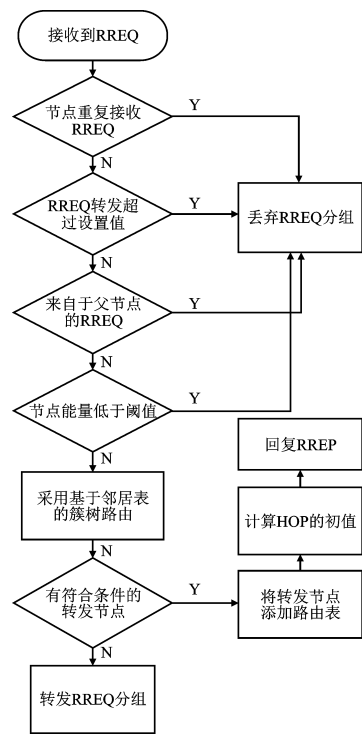


图 2 改进后算法的 RREQ 数据流程图

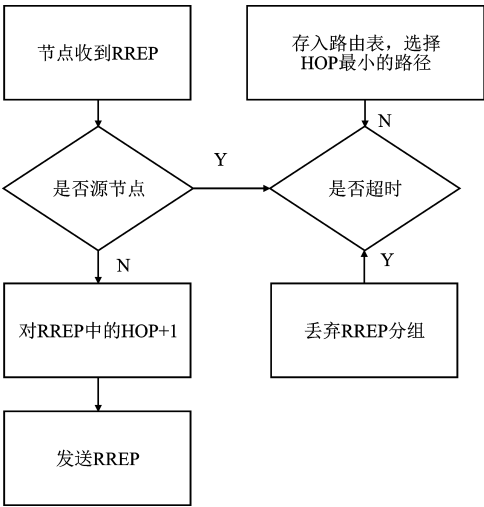


图 3 改进后算法的 RREP 数据流程图

我们设置相同的仿真环境:在 100 m×100 m 的网络覆盖范围内,设置 100 个节点,每个节点的初始能量都为 2 000 J,通信半径是 10 m. 设置 ZigBee 网络参数: $C_m=4,R_m=3,L_m=6$,数据信息大小为 128 bit,控制信息大小为 64 bit. 仿真结果如图 4 所示.

从图 4 中可以看出,原算法在大约 450 s 时出现了节点死亡的现象,而改进后的算法延时到了约 650 s 且在运行 1 000 s 后,原算法死亡了约 97 个节点,而改进后算法死亡约 71 个,大大延长了网络的寿命.

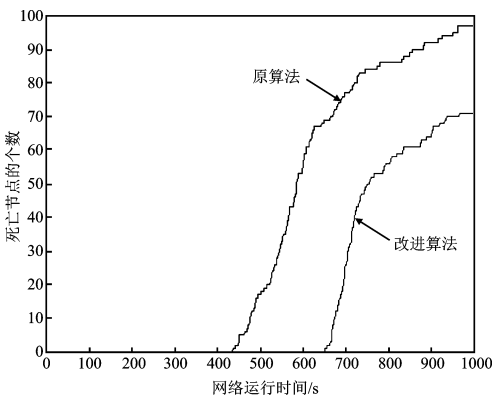


图 4 死亡节点个数

如图 5 所示,在网络运行的 30 s 内,改进算法的增长速度要比原算法慢.

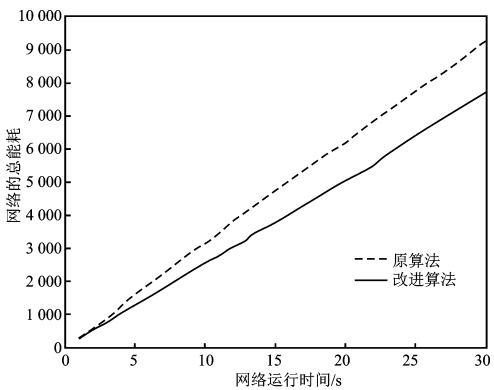


图 5 网络总能耗

综上所述,在考虑节点能量和 RREQ 数据传播的同时,考虑建立备用路径,可以减少很多额外的路由开销,而且,在路由发现时,充分考虑了对低能量节点的保护,使网络总能耗显著降低,均衡了节点能量,同时延长了网络的寿命.

5 结束语

本文针对原 ZigBee 路由算法中出现的的不足,提出了算法的改进方案. 新的算法是以最大化网络生存时间和均衡节点能量为目的,通过结合基于邻居表的簇树路由,动态更新节点能量阈值,同时考虑控制 RREQ 分组传播方向等方式,改进了原有的路由算法. 仿真表明,新的算法确实可以延长网络寿命,减少总能耗,而且均衡了节点能量,优化了网络的节点能量消耗.

参考文献:

[1] 白乐强,王玉涛,孙晶晶. 基于邻居表的能量均衡 ZigBee 树路由由改进算法[J]. 计算机工程与设计,2015,36(12):3204-3208.

- [11] Goiffon V, Estribeau M, Marcelot O, et al. Radiation effects in pinned photodiode cmos image sensors: Pixel performance degradation due to total ionizing dose[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 2878-2887.
- [12] Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U. The stopping and range of ions in solids[C]//PC Version Developed. Yorktown, NY. Oxford, U.K.: Pergamon.
- [13] Srour J R, Marshall C J, Marshall P W. Review of displacement damage effects in silicon devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 653-670.
- [14] Hopkinson G. Displacement damage analysis and characterization of effects on devices [C]//Space Radiation Environment and its Effects on Spacecraft Components and Systems. Toulouse: Cepadues, 2004.
- [15] Hopkinson G R, Dale C J, Marshall P W. Proton effects in charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 614-627.
- [16] Beaumel M, Herve D, Aken D Van. Cobalt-60, proton and electron irradiation of a radiation-hardened active pixel sensor[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(4): 2056-2065.
- [17] Gilard O, Boatella-Polo C, Dolado-Perez J C, et al. Corot satellite: Analysis of the in-orbit dark current degradation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(3): 1644-1653.

作者简介:

郑然男, (1981-), 博士, 副教授. 研究方向为模拟与混合信号集成电路设计、集成电路辐射效应, 低噪声图像传感器设计等. E-mail: zhengran@nwpu.edu.cn.

刘超男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为图像传感器辐射效应建模.

刘晗女, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为图像传感器.

(上接第 143 页)

- [2] 白乐强, 孙晶晶, 杨晰. 基于邻居表的 ZigBee 网络树路由改进算法[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(5): 1156-1160.
- [3] 周鑫, 林勇. 一种基于 ZigBee 树状路由协议的改进算法 ATSPF[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(11): 8722-8729.
- [4] Taehong Kim, Seong Hoon Kim, Jinyoung Yang, et al. Neighbor table based shortcut tree routing in ZigBee wireless networks[J]. IEEE transactions on parallel and distributed systems, 2014, 25(3): 706-716.
- [5] Zijng Lin, Max Q H Meng, Huawei Liang. A route discovery method based on limited flooding in ZigBee networks[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008. United States: IEEE, 2008: 3039-3044.
- [6] 谢川. 基于 ZigBee 的 AODVjr 算法研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(5): 87-89.
- [7] 杜力凯, 张灵, 陈云华. 一种改进的 ZigBee 路由优化算法[J]. 计算机科学, 2015, 32(5): 153-168.
- [8] 钱志鸿, 朱爽, 王雪. 基于分簇机制的 ZigBee 混合路由能量优化算法[J]. 计算机学报, 2013, 18(3): 485-493.
- [9] 李岩, 袁安娜, 柳培新, 等. 一种改进的 ZigBee 网络能量均衡簇树路由算法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 53(10): 50-60.
- [10] 谈佳. ZigBee 网络节能方案[D]. 广州: 华南理工大学出版社, 2011.

作者简介:

朱尚聪男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络. E-mail: 276941535@qq.com.

吕红芳女, (1978-), 副教授、硕士生导师. 研究方向为无线传感器网络和现代工业控制技术.

吉书瑶女, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络.