

传感器网络中基于平均剩余能量的 数据汇聚节点选择算法*

赵峰, 韦恺, 陈宏滨

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对如何根据变动的网关节点在网络内部选择合适的的数据汇聚节点以传输采集的数据这一问题, 综合考虑节点剩余能量和距离因素, 提出了一种基于平均剩余能量的数据汇聚节点选择算法, 以均衡节点能耗、延长网络生命周期。与基于最大剩余能量的数据汇聚节点选择算法比较, 证明该算法能够在保持相近生命周期的情况下大大减少计算量, 更适用于资源有限的传感器网络。

关键词: 无线传感器网络; 网络结构改变; 数据汇聚; 剩余能量; 网络生命周期

中图分类号: TN914

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-3096-02

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.077

Data aggregation node election algorithm based on average residual energy for wireless sensor networks

ZHAO Feng, WEI Kai, CHEN Hong-bin

(School of Information & Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To deal with the problem of electing data aggregation nodes in a sensor network to transfer the collected data when the gateway node changes, this paper considered the residual energy of nodes and distances, and proposed an average residual energy-based data aggregation node election algorithm, in order to balance energy consumption and extend network lifetime. Through the comparison with the maximum residual energy-based election algorithm, the results show that the proposed algorithm can greatly reduce the computational cost while maintaining comparable network lifetime, make it more suitable for resource-limited sensor networks.

Key words: wireless sensor networks; network topology change; data aggregation; residual energy; network lifetime

无线传感器网络由于其低成本、低功耗、大覆盖面积的特点,被广泛应用于各个领域之中^[1]。根据无线传感器网络执行任务的不同,需要通过不同类型的数据转发网络来建立与有线核心网络的连接。而数据转发网络的不同,对应的网关节点也会不同。如何根据变化的网关节点来自动选择合适的的数据汇聚节点以传输传感器节点采集的数据就成为了一个亟待解决的问题。

事实上,由于无线传感器网络自身的特点,网络结构经常改变,对应的数据汇聚节点的选择也十分频繁。国内外相关的研究侧重于簇头选择和数据汇聚两个方面。在簇头选择算法研究方向中,根据文献[2]中对现有的无线传感器网络簇头算法作出的分析归纳可以发现,现有的算法大都考虑到无线传感器网络大面积、高密度的部署方式的特点,从平衡网络传输负载的角度出发,以剩余能量作为主要参数选择簇头以实现网络的能量均衡,例如经典的 HEED 算法^[3]和 LEACH 算法^[4]。文献[5,6]则分别从能量效率和能量分布方面提出了网络的分簇算法。在数据汇聚方面,基于节点分布位置的数据汇聚成为研究的热点,文献[7]中对无线传感器网络中的数据融合研究进行了综述;文献[8]提出了一种基于空间相关性的数据汇聚算法;文献[9]中考虑了基于移动网关的数据汇聚算法。这些

算法在网络能耗均衡和最适数据传输路径的选择上考虑得很多,但对算法本身的计算量消耗却考虑得很少。事实上,考虑到汇聚节点的选择需要综合节点距离和节点剩余能量两方面的因素,在节点数量很大且网络结构变化频繁时算法的计算量也是十分可观的。巨大的计算量一方面会增加系统负荷、节点能耗,另一方面也受限于传感器节点的计算能力,因此,一种有效且简单的数据汇聚节点选择算法是必需的。

1 汇聚节点选择算法

1.1 基于最大剩余能量的数据汇聚节点选择算法

根据文献[4]中提出的无线节点传输能量损耗模型可知,节点的传输消耗与传输距离 d 和传输数据量 l 有关,且传输消耗可以通过以下公式计算:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4 & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: E_{elec} 取决于传输数据的编码方式、调制方式和滤波模式,根据实验测定可得出其值为 50 nJ/bit; $\epsilon_{fs}d^2$ 和 $\epsilon_{mp}d^4$ 表示节点的传输距离损耗,当 $d < d_0$ 时认为传输中只存在自由空间损

收稿日期: 2011-12-16; 修回日期: 2012-01-16 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172055, 61162008); 广西自然科学基金资助项目(2011GXNSFB018072); 广西教育厅科研项目(201012MS080)

作者简介: 赵峰(1974-),男,山东日照人,研究员,博士,主要研究方向为无线通信技术; 韦恺(1985-),男,广西浦北人,硕士,主要研究方向为传感器网络数据转发技术; 陈宏滨(1981-),男,湖南邵阳人,副教授,博士,主要研究方向为传感器网络和认知无线电(chbscut@guet.edu.cn)。

耗,传输损耗和距离的平方成正比,当 $d > d_0$ 时,考虑到传输过程中的多径损耗,传输损耗和距离的四次方成正比,其中自由空间损耗系数和多径损耗系数分别为: $\epsilon_{fs} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$ 、 $\epsilon_{mp} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$ 。

根据式(1)可知,当传输数据量 l 固定时,节点的传输损耗只与传输的路径有关。因此当网关节点选定后,数据汇聚节点的传输消耗就只与节点的位置有关。按照之前的分析,结合节点能耗平衡的要求,可以得出一种基于最大剩余能量的数据汇聚节点选择算法。该算法的主要思想是:通过预计算各个簇内所有节点完成任务后的剩余能量的大小,选择剩余能量最大的节点作为该簇的数据汇聚节点。由于数据汇聚节点到网关节点的距离会影响到节点的传输消耗,因此剩余能量最多就意味着该节点的自身剩余能量和任务传输消耗是最平衡的,通过选择该节点就可以保证网络能耗达到最优的平衡,从而延长网络的生命周期。

基于最大剩余能量的数据汇聚节点选择算法的步骤如下:

a) 根据分簇计算网关节点通信范围内的节点到网关节点的距离;

b) 根据式(1)预计算范围内节点的能量消耗,得出完成任务时的节点剩余能量;

c) 根据剩余能量进行排序,选择每簇内剩余能量最大的节点作为数据汇聚节点;

d) 计算并更新数据传输节点的剩余能量。

根据以上步骤可以计算出算法所需的计算量,当 n 个节点完成 m 次任务时有:

a) 节点到网关节点距离为 $n \times m$ 次;

b) 节点剩余能量的预计算为 $n \times m$ 次。

总计算量为 $2(n \times m)$ 次,可见当节点数目很多,即 n 很大时,计算量将变得不可忽视。

1.2 基于平均剩余能量的数据汇聚节点选择算法

考虑到最大剩余能量选择算法的计算量问题,结合能耗均衡的要求,本文提出一种基于平均剩余能量的数据汇聚节点选择算法。该算法的主要思想是当节点的能量足够时,就选择各个簇内距离网关节点最近的节点作为数据汇聚节点;当节点能量较少时,考虑到仅从距离选择无法保证节点能量足够完成任务,因此当剩余能量百分比小于20%时,算法按照最大剩余能量法选择能量消耗最均衡的节点作为数据汇聚节点。为了保证节点能耗的均衡性,算法仅选择剩余能量大于平均能量的节点参加到网关节点距离的排序。这样就可以使之前因被选为汇聚节点而导致剩余能量小于平均能量的节点排除在新任务的待选汇聚节点之外,从而实现能耗的均衡。

基于节点平均剩余能量的数据汇聚节点选择算法步骤如下:

a) 分别计算各簇内网关节点通信范围内节点的平均剩余能量;

b) 根据平均剩余能量选择剩余能量大于平均值的节点参加距离排序,选择距离网关节点最近的作为数据汇聚节点;

c) 计算数据汇聚节点的任务传输消耗并更新节点的剩余能量。

根据以上的步骤可以计算出基于平均剩余能量的数据汇聚节点算法的计算量。考虑到剩余能量小于20%时采用的是最大剩余能量算法,因此计算量的计算要分成两部分来进行, n 节点完成 m 次任务后的主要算法计算量如下:

a) 计算节点的平均能量为 $1 \times m$ 次。

b) 计算大于平均剩余能量的节点到网关节点的距离为 $p \times m \times n \times 80\% + m \times n \times 20\%$ 。其中 $p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i$ 表示每次参加距离排序节点数量和总节点数量的百分比的平均值,该值与节点的分布和密度有关,根据实验测定 p 的值变化范围约在0.2~0.6之间,节点密度越大该值越小。

c) 计算数据传输节点的任务传输消耗为 $1 \times m \times 80\% + n \times m \times 20\%$,总的计算量为 $(0.8p + 0.4)m \times n + 1.8m$ 。

计算量和最大剩余能量算法进行比较有(当 n 很大时):

$$\frac{\text{最大剩余能量}}{\text{平均剩余能量}} = \frac{(80\% + 20\%)(2mn)}{m + 80\%(p \times mn + m \times 1) + 20\% \times 2nm} = \frac{2mn}{(0.8p + 0.4)mn + 1.8m} \approx \frac{2}{0.8p + 0.4} \quad (2)$$

可见最大剩余能量选择算法的计算量约为平均剩余能量算法的2.27~3.57倍。

2 仿真及结果分析

本文利用MATLAB工具对两种算法进行仿真,仿真用到的节点分布模型如图1所示。设定在 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的平面区域内均匀分布500个节点,每个节点具有1 J的初始能量,将区域中心半径为50 m的圆内的节点设为簇内节点,其余外部节点为可能的网关节点。每次任务中系统将从外部可能的网关节点中随机地选出一个节点作为该次任务的网关节点(图1中黑色方块),然后根据该网关节点的通信范围,在簇内通过算法选择出与之通信的数据汇聚节点(黑色三角形和黑色圆形)。假设每次任务数据汇聚节点传输500 kbit数据,参考距离 d_0 设为50 m,则根据式(1)可知最大传输消耗为

$$500 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-9} + 500 \times 10^3 \times 0.0013 \times 10^{-12} \times 100^4 = 0.09 \text{ J} \quad (3)$$

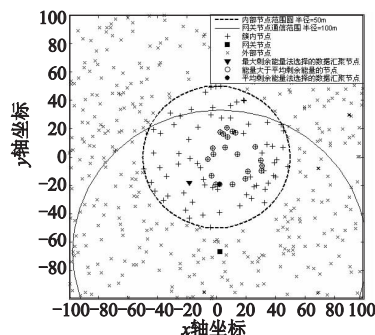


图1 仿真节点分布模型

仿真以节点无法完成任务作为网络生命周期结束的标志,通过对比采用不同的数据汇聚节点选择算法时簇内节点完成任务的次数(生命周期)就可以得到算法的性能结果,仿真中使用的任务流程如图2所示。

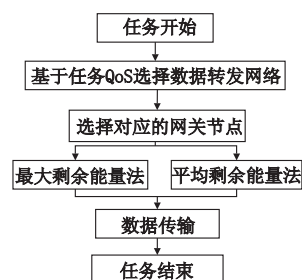


图2 无线传感器网络的任务流程

为了体现算法综合考虑距离和剩余能量 (下转第3102页)

延均值要远低于 TDMA 协议和 IEEE 802.11b 协议。

从仿真结果可以得出以下结论:

a) 对于时延要求为毫秒级 ($<5\text{ms}$) 的实时性业务, 与 TDMA 协议相比, Turbo_MAC 通过牺牲稍许分组成功传输概率和系统吞吐量为代价, 提供了更为严格的时延要求;

b) Turbo_MAC 协议的分组成功传输概率、系统吞吐量、分组端到端时延均值的数学表达式能够近似准确地反映系统的各项性能。

6 结束语

根据航空通信中实时性业务对时延的特殊要求, 以及传播时延不可忽略的属性, 提出一种基于 Turbo_MAC 编码的信道接入协议; 通过排队模型、组合理论和离散 Laplace 变换得到分组成功传输概率、系统吞吐量和分组端到端时延均值的数学表达式; 最后通过仿真验证了数学表达式的近似正确性, 以及 Turbo_MAC 协议在时延性能方面的优势。

参考文献:

- [1] COLLINS R. Tactical targeting network technology (TTNT) communicating at the speed of battle[EB/OL]. (2006-04-26) [2010-10-15]. <http://www.rockwellcollins.com/content/pdf/pdf.7501.pdf>.
- [2] FATEH B, GOVINDARASU M. Energy-aware adaptive MAC protocol for real-time sensor networks[C]//Proc of International Conference on Communications. [S.l.]: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [3] ROBERT J F, CARLEN R W, SCOTT J Z, et al. Tactical targeting network technology small form factor user system: USA,

US7970947B1[P]. 2011-07-28.

- [4] 骆光明, 杨斌, 邱致和, 等. 数据链——信息系统连接武器系统的捷径[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [5] IEEE 802.11-2011, wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. 2011.
- [6] LIN J S, FENG Kai-ten. QoS-based adaptive contention/reservation medium access control for wireless local area networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2011, 10(12): 1785-1803.
- [7] LI Fang-min, MA Xiao-lin, HU Fei, et al. Synchronization-based multi-channel multi-interface medium access scheme in Ad hoc network[J]. IET Communications, 2011, 5(14): 2082-2090.
- [8] HANZO L, LIEW T, YEAP B, et al. Turbo coding, turbo equalization and space-time coding: exit-chart-aided near-capacity designs for wireless channels[M]. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2011: 385-463.
- [9] CHEN Hong-yuan. Revisit of the Markov model of IEEE 802.11 DCF for an error-prone channel[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(12): 1278-1280.
- [10] ZHAO Q L, TSANG D H K, SAKURAI T. Modeling nonsaturated IEEE 802.11 DCF networks utilizing an arbitrary buffer size[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2011, 10(9): 1248-1263.
- [11] KLIASOVICH D, GOMES P H, GRANELLI F, et al. Queue management mechanism for 802.11 base stations[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(7): 827-730.
- [12] KUMAR A, ALTMAN E, MIORANDI D, et al. New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2007, 15(3): 588-601.
- [13] 周炜. 组合数学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

(上接第 3097 页) 的优势, 仿真中还同时给出了一种单纯考虑节点当前剩余能量的数据汇聚节点选择算法作为参照。从仿真结果中可以看出, 最大剩余能量算法和平均剩余能量算法对应的生命周期十分接近, 两者的差距经计算约为 3.78%, 对应的 p 的值约为 0.348 8, 可根据式(3) 计算出算法的计算量比例约为 2.38 倍。考虑不同的节点分布和密度情况, 平均剩余能量算法和最大剩余能量算法对应的生命周期接近, 仅低 3% ~ 5%, 但能换来计算量的大幅减少, 这对计算能力有限的无线传感器节点而言还是十分有意义的。通过和单纯考虑剩余能量的算法对比可以看出, 单纯考虑剩余能量的算法在生命周期方面都有很大的提高。同时, 从仿真结束时节点的能量分布的比较也可以看出两种算法都可以达到节点能量的平衡消耗, 满足了能量均衡的需求。仿真结果如图 3、4 所示。

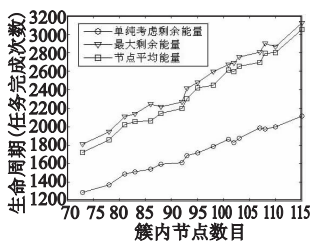


图3 算法对应的网络生命周期对比

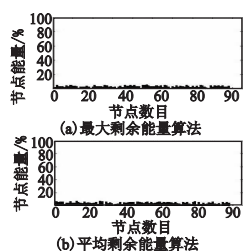


图4 节点剩余能量分布

3 结束语

本文根据不同任务对应的网关节点变化, 提出了一种基于平均剩余能量的数据汇聚节点选择算法。仿真证明该算法与基于最大剩余能量的数据汇聚节点选择算法相比, 其具有对应的生命周期接近但计算量大幅减小的优点, 可以在保证节点能

耗均衡、延长网络生命周期的同时, 用约 3% ~ 5% 的生命周期损失换取计算量的大大减少, 这对资源有限的传感器网络而言是十分有利的。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] YOUNIS O, KRUNZ M, RAMASUBRAMANIAN S. Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges[J]. IEEE Network, 2006, 20(3): 20-25.
- [3] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.
- [4] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [5] 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.
- [6] 岳海兵, 葛洪伟. 基于能量分布的异构传感器网络分簇算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(1): 118-120.
- [7] 陈正宇, 杨庚, 陈蕾, 等. 无线传感器网络数据融合研究综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1601-1604.
- [8] MA Y, GUO Y, TIAN X, et al. Distributed clustering-based aggregation algorithm for spatial correlated sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 11(3): 641-648.
- [9] ANGOVE P, O'GRADY M, HAYES J, et al. A mobile gateway for remote interaction with wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3309-3310.