

一种基于负载均衡的无线传感器网络收集树算法

李雪松^{1,2}, 史浩山¹, 唐 剑^{1,2}

(1.西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2.空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要:主要研究了大规模无线传感器网络的多跳树状路由协议,提出了一个基于 heuristic 算法建立近于全域平衡的资料收集树算法(Balance Convergecast Tree, BCT)该算法能降低资料堆积程度,减少资料收集时间并延长网络断裂的发生时间,同时在该算法中增加一个节点同步传输程度的频道分配机制,使得树上的节点以最少的通信时隙与有限的码字来组合配置通信频道作为资料传递时使用,提高同步传输程度,减少资料停留在节点中的时间,使整个网络中资料收集速度更快速。仿真结果显示该算法能更快速的收集网络上的资料并延长网络运行时间,同时证明了负载均衡的树能大大提高树状结构收集资料的运行效率。

关键词:无线传感器网络(WSN);路由;BCT

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.013

中图分类号: TP212; TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0059-05

微型智能传感器网络是当前国际上倍受关注的、由多学科高度交叉的新兴前沿研究热点领域^[1-2]。传感器网络在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等许多领域都有重要的科研价值和实用价值^[3-4]。

无线传感器节点的通信距离有限,一般在 10 m-100 m 范围内。节点只能与其射频覆盖范围内的邻居节点直接通信,如果希望访问射频覆盖范围外的节点,必须采用多跳路由来实现^[5]。传感器节点通常由电池供电,如何有效降低电池消耗,尽量延长节点的生命周期是任何路由协议首要考虑的因素。

无线传感器网络中,由于传感器网络节点没有一个全球唯一的 ID,传感器节点间的传输方式主要是以广播为主,若是使用 CSMA/CA 的机制,将使得资料在传输时浪费多余的资源,浪费更多的电源与频宽在传输权的竞争上^[7],文献[7]与文献[8]使用 TDMA 技术来区分与分配每个传输连线所使用的频道,以避免资料碰撞的发生并让节点在传输与接收的时隙之外将无线电收发器关闭,减少不必要的能量消耗。

在树状结构上使用 TDMA 机制来传输资料时,除了树的深度会影响资料收集速度外,节点负载是否平衡也是一个重要的影响因素。当负载不平衡时,资料收集的瓶颈会发生在负载最大的节点上,资料收集的时间会因此无法降低。一个负载均衡的树能有效降低资料收集时间^[8]。

1 负载均衡树状路由

1.1 负载均衡树

传感器网络中的数据大多都是从多个源节点传递到一个汇聚节点(sink)。一个通常的方法就是在多个

* 收稿日期:2008-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60472074)

作者简介:李雪松(1971-),男,河北乐亭人,讲师,博士生,主要从事数据通信、无线传感器网络研究;

E-mail:lixuesong@ewpu.edu.cn

史浩山(1946-),男,河南开封人,教授,博士生导师,主要从事数据通信研究。

源节点和汇聚节点之间按照一个规则构建以一个路由树,再以子节点传资料给父节点的方式,将资料逐步收集传递到汇聚节点^[6]。

如图1所示,Sink为汇聚节点,第1层节点的集合 $L_1 = P_i, i = (1, 2, \dots, n)$ 第2层节点的集合 $L_2 = C_j, j = 1 \text{ to } m$, 设 $W(a)$ 为节点 a 的资料负载量,虚线表示节点之间的可能信号连接,建立树状结构时,每个第2层节点,建立树状结构时只能选择一个第1层节点建立资料传送连接。令与 $P_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ 建立资料通信连线的第2层节点集合为 $D(P_i)$, 则第1层接口的资料负载为 $W(P_i) = \sum W(C_j), C_j \in D(P_i)$ 。

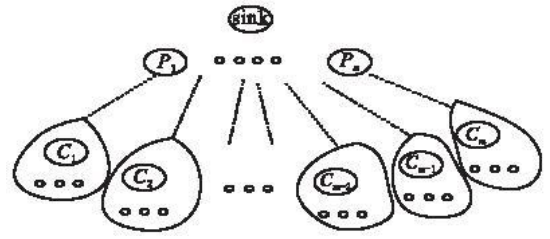


图1 简化的树状结构

Fig.1 Simplify the tree structure

如果对所有的 $P_i \in L_1$, 我们能对 $W(P_i) = \sum_{j=1}^m W(C_j) / n$, 则可以说这是一个第1层节点负载完全平衡的树。若是无法使得负载完全平衡,我们可用第1层各节点资料负载的标准差来评价负载平衡的程度,标准差越低,则表示资料负载越平衡。

如何让树状结构的第1层节点的资料负载能平衡时,我们试着寻找最优解。设第1层节点有2个 P_1, P_2 , 第2层节点有 m 个,每个第2层节点都可能与 P_1, P_2 其中一个连接。我们要找的就是可以让 $W(P_1) = W(P_2)$ 的算法。这个特殊例子可以归结为一个 Partition Problem 的 NP-COMLETE 问题^[9-10]。也即是网络中的第2层节点的负载平均分摊到2个第1层节点上与 Partition Problem 是相同的问题。

1.2 同步传送与频道复用

树状结构建立好之后,接着配置每一个节点对其父节点作通信时所使用的频道。一个好的频道分配机制也有助于加快汇集点收集资料的速度,通信频道是由通信时隙 $S(i)$ 与通信码 $CC(i)$ 组成。

图2为退化成链的树状结构,最左边的点为 sink 点。节点的数字为节点传资料至其上层父节点所用的时隙编号。图2中 a 的时隙配置方式,最上层节点一次要传输的资料量为9,因此时隙长度为9,总资料收集时间为总时隙数乘以时隙长度即 $9 \times 9 = 81$ 单位时间。图2中 b 的时隙配置方式,最上层节点一次要传输的资料量为3,因此时隙长度为3。总资料收集时间为总时隙数乘以时隙长度,即 $9 \times 3 = 27$ 单位时间。我们可以看到图2中 b 的配置方式能减低资料在节点内的等待时间,也能减少第1层节点一次传输的资料量,缩短时隙的长度。

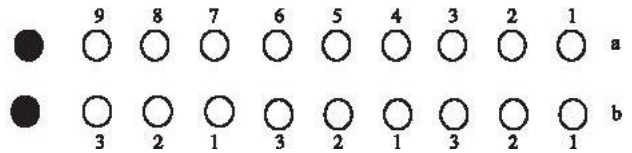


图2 时隙配置方式的影响

Fig.2 Timeslot allocation

2 BCT 算法设计

2.1 建立树状结构

本算法建立负载平衡树的基本精神在于尽量让同一层中每一个节点的负载都相同。我们让资料负载较大的下层节点优先连接到负载较小的上层节点。无线传感器网络可以用一个无向赋权图来表示: $G = (V, E)$ 。

我们建立树状结构的基本规则是先在下层节点中选择一个节点 j , 其选取规则为:

- 1) 先选择资料负载 $W(j)$ 最大的节点;
- 2) 若资料负载相同,选 $NPN(j)$ 最小的节点;
- 3) 若 $NPN(j)$ 仍相同,则随机选择其一;

节点 j 选择好后,再选择一个节点 $i \in PN(j)$ 当作 j 的父节点 $P(i)$ 。节点 i 的选择规则为:

- 1) 先选择 $W(i)$ 最小;
- 2) 若 $W(i)$ 相同,选 $FND(i)$ 最小的;
- 3) 若 $FND(i)$ 仍相同,则随机选择其一。

我们发现,当第2层节点的负载平衡时,对第1层节点会有较低的资料负载标准差。因此我们知道若是

要降低第 N 层节点的资料负载标准差,我们要先降低第 $N+1$ 层节点的资料负载标准差。所以我们的算法从距离 sink 点最远的节点开始,向 sink 点建立上去。

2.2 通信频道的配置

在配置节点 i 对其父节点的通信频道时,为了避免无线信号发生干扰,配置的原则有 3 个必须遵守的限制,其中频道组为通信时隙和通信码的组合:

1) $\forall i \forall j \in C(i) \forall k \in C(i) - \{j\} : S(i) \neq S(j) \wedge S(j) \neq S(k)$, 节点 i 与其子节点不得使用相同的通信时隙;

2) $\forall i \forall j \in P(i) \forall k \in C(i) : S(j) \neq S(k) \vee CC(j) \neq CC(k)$, 节点 i 的子节点们与节点 i 的父节点不得使用同一对频道组;

3) $\forall i \forall j \in IP(i) \forall k \in C(i) : S(j) \neq S(k) \vee CC(j) \neq CC(k)$, 节点 i 不得与节点 i 的父节点外的上游节点的子节点们使用相同的频道组。

频道分配原则:①时隙编号由大到小顺序配置;②参考 $P(i)$ 的频道使用情况为 i 配置频道;③节点 i 先为 W 最大的子节点配置频道;④通信码以无干扰且编号小的优先配置;⑤slot-cycle 可放大到足够分配所有下层节点为止。

以文献[8]的网络拓扑为例。表 2 为在这两棵树中进行一次资料收集所耗费的成本。我们发现本算法收集网络资料的时间较文献[8]中 CCA 算法短很多, L_1 节点所传递的最大总资料量也较低。

3 算法仿真和性能分析

本算法 BCT 与文献[7]中 CTCCA 算法和文献[8]中 CCA 算法以收集一次网络上所有节点资料的情况进行比较,模拟环境如表 3 所示。

图 3 为 3 个算法所得的树状结构在第 1 层节点的负载平均差。以 BCT 算法最低,其次是 CCA,最高是 CTCCAA。这表明 BCT 算法建立的树状结构能有效分散第 1 层节点的资料负载量,也平均分散每个第 1 层节点的能量消耗。

图 4 所示为网络收集一次资料时,第 1 层节点中最多传输资料总包数。此数值与网络的寿命成反比。数值代表了收集一次资料后,所有 L_1 节点中能量消耗最多的节点的消耗值,数值越高,表示网络的能量消耗越不平衡,会很快耗尽负载最重的 L_1 节点的能量造成网络断裂。实验结果显示此数值 BCT 算法最少,其次 CCA。这表示 BCT 算法所建立的树状结构能有效推迟网络断裂的时间。

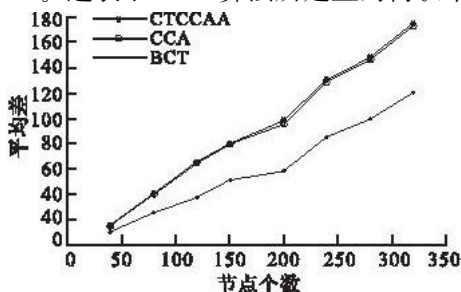


图 3 第 1 层节点负载平均差
Fig.3 First node energy ratio

表 1 参数定义
Tab.1 Parameters of the definition

参数	定义
$W(i)$	节点 i 负责传输给父节点的资料量
$PN(i)$	可连接 i 的上层节点集合
$NPN(i)$	$ PN(i) $
$P(i)$	i 的父节点
$C(i)$	i 的子节点集合
$FDN(i)$	i 的下层未加入树的邻居节点个数
$IP(i)$	$PN(i) - P(i)$
$S(i)$	i 传输资料给 $P(i)$ 所使用的时隙
$CC(i)$	i 传输资料给 $P(i)$ 所使用的码字
$SC(i)$	i 的起始时隙循环

表 2 收集成本比较
Tab.2 The collection of cost comparison

	BCT	CCA
$\max(TDS(i)), i \in L_1$	5	8
max-slot	5	5
$\max(DS(i)), i \in L_1$	3	8
总消耗时隙数	8	5
总消耗单位时间	$3 \times 8 = 24$	$8 \times 5 = 40$

表 3 模拟环境设定
Tab.3 Simulated environment settings

节点个数	40 个—320 个
实验次数	各 50 个树取平均
网络密度	0.8 节点/单位长度 ²
传输半径	2
CDMA 码数目	3
Initial slot-cycle	Max(7, L_1 节点个数)
slot-increment	1

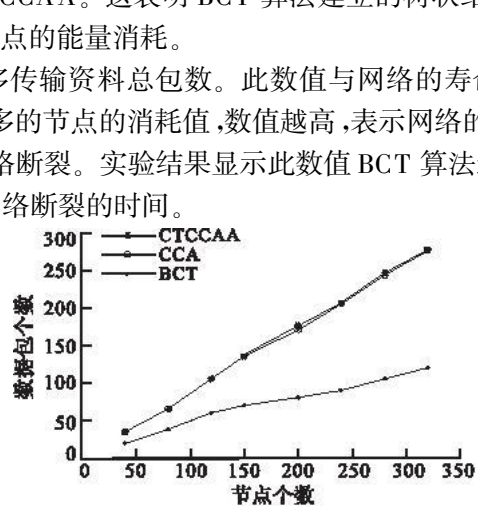


图 4 第 1 层节点传输数据包最大值
Fig.4 The maximum packet of first node

图5为网络收集资料时间,结果表明BCT算法花费时间最短,而CTCCAA最长。

图6为网络收集到第1次资料时的反应时间,结果表明,由于本算法使用了频道复用方法,靠近树根端的节点可以更快地向汇聚节点传输资料,因此有较短的反应时间。

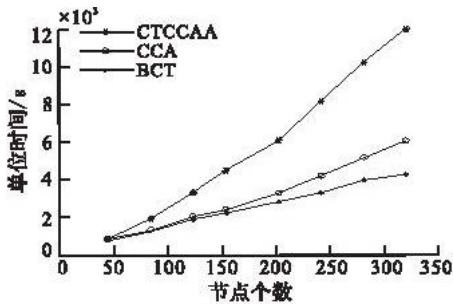


图5 平均资料收集时间

Fig.5 Total time

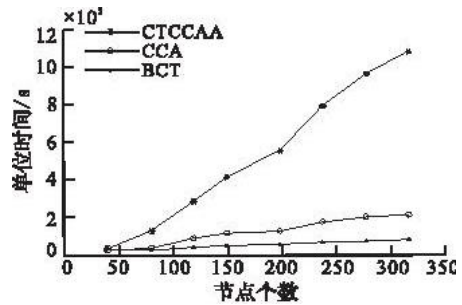


图6 网络平均相应时间

Fig.6 Average response time

4 结束语

本文提出了一种有效降低资料收集时间与延长网络寿命的算法。通过建立一个负载平衡的树,降低资料传输时隙长度,来延长发生网络断裂的时间,时隙复用则增加了同步传输的机会。实验结果显示该算法能更快速的收集网络上的资料并延长网络运行时间,同时证明了负载平衡的树能大大提高树状结构收集资料的运行效率。

参考文献:

- [1] 任丰原,黄海宁,林 闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1282—1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2003,14(7): 1282—1291. (in Chinese)
- [2] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,14(10):1717—1727.
LI Jianzhong, LI Jinbao, SHI Shengfei. Concepts, Issues and Advance of Sensor Networks and Data Management of Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2003,14(10):1717—1727. (in Chinese)
- [3] Akyildiz L F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102—114.
- [4] Chong CheeYee, Kumar Spikanta P. Sensor Networks: Evolution, Opportunities and Challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8):1247—1256.
- [5] Praveen Rentala, Ravi Musunnuri, Shashidhar Gandham, et al. Survey on Sensor Networks[D]. Dallas: University of Texas, 2001.
- [6] Ye Fan, Chen Alvin, Lu Songwu, et al. Scalable Solution to Minimum Cost forwarding in Large Sensor Networks[C]// Proceedings 10th International Conference on Computer Communications and Networks. Scottsdale: [s. n.], 2001:304.
- [7] Annamalai V, Gupta S K S, Schwiebert L. On Tree-based Convergecasting in Wireless Sensor Networks[C]//IEEE Wireless Commun and Networking Conference(WCNC). New Orleans: IEEE Press, 2003:1942—1947.
- [8] Upadhyayula S, Annamalai V, Gupta S K S. A Low-latency and Energy-efficient Algorithm for Convergecast in Wireless Sensor Networks[C]//Proceeding of Global Telecommunications Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2003.
- [9] Garey Michael. R, Johnson David S. A Guide to the Theory of NP-Completeness[M]. [S. l.]: Computers and Intractability, 1979.
- [10] Cheng Xiuzhen, Narahari B, Simha R, et al. Strong Minimum Energy Topology in Wireless Sensor and Intractability Networks: NP-completeness and Heuristics[D]. Washington DC: George Washington University, 2003.

(编辑:徐楠楠)

Research on Balance Convergecast Tree Protocol for Wireless Sensor Network

LI Xue-song^{1,2}, SHI Hao-shan¹, TANG Jian^{1,2}

(1. College of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: This paper is about a research on hop routing tree protocols in a large wireless sensors network. We propose a balance convergecast tree algorithm (BCT) based on heuristic algorithm. The BCT combined with channel multiplexing can be used to save time efficiently on collecting data. It can help decrease the degree of data accumulation, save data collecting time and delay the time of the network interruption. This method includes a channel allocation system for raising degree of transmission node synchronization that can enable node to combine and allocate communication channels to transmit data with the shortest communication timeslot and limited code. The use of BCT can improve the level of synchronous transmission and accelerate the material collecting speed on network by saving material pausing time on node. The simulation results show that the use of BCT can collect data more rapidly and also prolong system's lifetime, meanwhile prove that the load balancing tree can greatly enhance the convergecast tree working efficiency for collecting data.

Key words: wireless sensor networks; routing; balance convergecast tree

大学学报第二届编辑委员会工作会议圆满召开

2009年9月22日下午,大学学报第二届编辑委员会工作会议在我校图书馆国际学术报告厅圆满召开。学报编委会主任李学忠校长,副主任杨晓铁副校长、科研部付全喜部长出席了会议。会议由科研部康强副部长主持。会议确定由编委会主任、副主任负责学报整体建设,编委会委员均由教授担任,主要参与评审稿件、审读期刊等,并邀请特约院士加入编委。会议产生了新一届编委,名单如下:

主任:李学忠

副主任:杨晓铁 付全喜

特约院士编委:

毛二可 卢锡城 刘大响 杜祥琬 李明 李鸿志

钟山 张光义 张履谦 陆建勋 陈一坚 郑南宁

郑颖人 钟群鹏 侯洵 保铮 凌永顺 顾诵芬

钱七虎 徐滨士 黄先祥

委员:

王星 王光明 方洋旺 冯有前 毕笃彦 刘进忙

许金余 孙秀霞 李军 李应红 李炳杰 肖明清

吴德伟 何立明 张群 张永顺 屈绍波 孟相如

赵尚弘 姚宏 姚佩阳 夏靖波 郭英 黄长强

黄国策 曹祥玉 谢寿生 雷英杰 雷虎民 蔡理

(本刊编辑部)