

Multi-Radio Multi-Channel 无线传感器网络中信道分配和路由策略*

倪林雨^{1,2}, 李金宝^{1,2}

¹(黑龙江大学 计算机科学技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

²(黑龙江省数据库与并行计算重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

通讯作者: 李金宝, E-mail: jbli@hlju.edu.cn

摘要: 针对无线传感器网络中传输时延长、传输冲突大和吞吐量低等问题, 提出了一种在 Multi-Radio Multi-Channel 无线传感器网络中信道分配和路由策略. 该策略动态地建立 k 元 n 立方体拓扑结构, 使用优化的静态信道分配算法提高节点的吞吐量, 使用维序寻径的路由算法减少传输冲突. 该方法适用于网络节点稠密、节点相互之间通信冲突大的情况, 并且在单跳和多跳的网络环境下均适用. 实验结果表明, 基于 k 元 n 立方体这一拓扑结构的信道分配和路由策略与传统方法相比, 有效地减少了端到端时延, 降低了网络冲突, 减少了节点能量消耗, 延长了网络寿命, 提高了网络吞吐量.

关键词: 无线传感器网络; k 元 n 立方体; Multi-Radio Multi-Channel 网络; 信道分配; 路由

中文引用格式: 倪林雨, 李金宝. Multi-Radio Multi-Channel 无线传感器网络中信道分配和路由策略. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (1)): 103-112. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14012.htm>

英文引用格式: Ni LY, Li JB. Channel allocation and routing strategy in Multi-Radio Multi-Channel wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 103-112 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14012.htm>

Channel Allocation and Routing Strategy in Multi-Radio Multi-Channel Wireless Sensor Networks

NI Lin-Yu^{1,2}, LI Jin-Bao^{1,2}

¹(School of Computer Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

²(Key Laboratory of Database and Parallel Computing of Heilongjiang Province, Harbin 150080, China)

Corresponding author: LI Jin-Bao, E-mail: jbli@hlju.edu.cn

Abstract: To address the problems of transmission delay, transmission conflicts and low throughput in Wireless sensor networks, this paper proposes a channel allocation and routing strategy in Multi-Radio Multi-Channel Networks. The strategy is to dynamically establish a k -ary n -cube topology. It not only uses the optimal static channel allocation algorithm to improve the throughput of nodes but also employs the dimension order routing algorithm to reduce transmission conflicts. This method is suitable for the network of density nodes with many communication conflicts. It can also be used in both single hop and multi hop network environment. The experiment results show that compared with traditional methods, the channel allocation and routing strategy based on the k -ary n -cube topology can effectively reduce end to end delay, network conflicts and energy consumption, prolong the network lifetime and increase the throughput of network.

Key words: wireless sensor network; k -ary n -cube; Multi-Radio Multi-Channel network; channel allocation; routing

无线传感器网络目前已经在国防军事、环境监测和预报、医疗状况监控、目标跟踪和检测、森林火灾监控等众多领域得到了广泛应用^[1]. 无线传感器网络具有通信带宽有限、电池容量受限和通信冲突较大等特点.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61370222, 61070193, 61300225); 黑龙江省自然科学基金(F201324, F201225); 黑龙江省高校科技创新团队建设计划(2013TD012)

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

因此,如何有效地减少冗余传输、通信冲突、传输时延,提高网络吞吐量是无线传感器网络研究的重点问题^[2].

随着硬件成本的降低,使得每个传感器节点可以装配多个 Radio,每个 Radio 可以工作在不同的信道上.基于 Multi-Radio 的通信协议在提高网络吞吐量、减少传输时延和降低信道冲突等方面均有所提高.由此,本文采用了 Multi-Radio Multi-Channel 网络.

网络结构的好坏会影响到网络的整体性能,而 k 元 n 立方体^[3,4]因其良好的结构特性,被应用在并行计算机上.由此,本文将 k 元 n 立方体结构应用到无线传感器网络中,即充分利用了这一拓扑结构的优点.

在 Multi-Radio Multi-Channel 网络中需要考虑信道分配问题.因此,在 k 元 n 立方体结构上,提出了一种优化的静态信道分配算法.为了进一步减少通信冲突,结合网络结构给出了一个路由策略.

本文的主要研究工作是将无线传感器网络构建成 k 元 n 立方体拓扑结构^[5,6];接下来,在 k 元 n 立方体结构上使用 Multi-Radio Multi-Channel 节点进行信道分配;再给出路由策略,按照立方体维序寻径的方法进行路由.最后利用 OPNET 软件进行仿真实验,对实验结果的分析表明,本文提出的基于 k 元 n 立方体网络结构的信道分配和路由策略与传统方法相比,极大地减少了传输中的冲突,降低了端到端的时延,增加了网络吞吐量.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节给出系统模型及问题定义.第 3 节阐述立方体拓扑结构建立.第 4 节阐述信道分配策略.第 5 节阐述路由策略.第 6 节阐述实验与性能评估.第 7 节给出本文的结论.

1 相关工作

部署 Multi-Radio Multi-Channel 网络可以提高无线传感器网络吞吐量、减少传输冲突、减少时延和节约节点能量消耗,但随之而来的就是信道分配和路由问题.文献[7]给出了联合信道分配和路由的策略,提出干扰限制,并且考虑到网络中信道的个数和每个节点可用 Radio 的数量,但其缺点是代价过大,仅适用于具有基站等固定基础设施的网络.文献[8]提出了一种分布式联合信道分配和路由的算法,使用了一个干扰模型来定义链路的干扰度,也即这些链路子集的最大基数,这样,在这些子集中任意两个链路便互不干扰.但它需要整个网络的全局信息来得到最大非干扰的链路子集,而这是不实际的.文献[9]针对停车场模型中网络冲突较大的问题,给出了一个信道分配算法 HINT-3 及路由调度策略,算法具有较大的吞吐量,但该策略只适用于单跳网络.

在路由算法中,泛洪法 FLOOD^[10,11]是当节点收到数据信息就转发给它的邻居节点,但是这种算法的缺点较为明显,数据冗余转发,增加了节点的能量消耗和传输冲突.基于概率的泛洪算法 PB 是节点在收到数据后以 p 概率进行转发数据,它可以在一定程度上减少冗余转发,但也存在和泛洪法同样的问题.文献[12]中的 SPIN 算法是当节点收集到数据作为源节点广播消息 ADV 给邻居节点,接收到 ADV 且对数据感兴趣的节点发送请求消息 REQ,源节点向请求节点发送数据,接收到数据的节点再向它的相邻节点广播消息 ADV,如此重复下去.但 SPIN 的缺点是,当产生或接收到数据的节点的所有邻居节点都对数据不感兴趣时,将导致数据不能继续转发.文献[5]将社会特征看成超立方体节点,利用超立方体结构性质,给出了一种多路径路由方法,但只适用于基于社会特征的延迟容忍网络.文献[6]给出的 BlueCube 算法使用蓝牙设备构建超立方体拓扑结构,该协议使设备易于建立不相交的路由路径,实现了在无线环境下的并行与分布式计算.但该算法使用 2 元超立方体结构,容纳的设备数量少,不适用于无线传感器网络中节点规模较大的情形.

针对上述问题,本文提出基于 k 元 n 立方体这一拓扑结构的信道分配和路由策略以降低网络冲突,减少传输时延,提高网络吞吐量.

2 系统模型及问题定义

本节首先介绍 k 元 n 立方体结构的网络模型,接下来给出问题定义.

2.1 k 元 n 立方体

k 元 n 立方体结构在并行计算机上得到应用,例如:iPSC,nCube 和 CM-2 系统中都使用了这一拓扑结构.其优点是具有错误容忍性、空间立体结构直径短、传输跳数少、延迟较低、冲突较少、吞吐量较大^[4].本文将 k

元 n 立方体结构应用到无线传感器网络中,将传感器节点看成立方体节点,充分利用这一拓扑结构的优点,以提高无线传感器网络的整体性能.

在 k 元 n 立方体中,参数 k 是沿着每个方向的节点数, n 是立方体的维数.例如,如图 1 所示,圆点视为网络节点,数字串表示节点编号,沿着向上方向从节点 000 到 001 再到 002 有 3 个节点,即 $k=3$;从节点 000 到 001 再到 002 为一个方向,从节点 000 到 010 再到 020 为另一方向,从节点 000 到 100 再到 200 为第 3 个方向,即维数 $n=3$. k,n 这两个参数与网络中节点总数 N 的关系为 $N=k^n$. k 元 n 立方体的每个节点可以用一个 n 位(n 维的序列)来唯一标识.一个节点 A 的地址可以表示为 $v_0 v_1 v_2 \dots v_{n-1}$,其中 v_i 代表第 i 维节点的位置,并且 $0 \leq v_i \leq k-1$,即节点 A 的编号地址由一个 n (立方体维数 n)位数字串构成,并且每一位上的数字在 $[0, k-1]$ (k 元)之间.

定义 1. 节点 A 和 B 的距离定义为 $H(A,B)=|a_0-b_0|+|a_1-b_1|+\dots+|a_{n-1}-b_{n-1}|$,其中, a,b 表示在某一维上的数值, $0 \leq a,b \leq k-1$.

定义 2. k 元 n 立方体中两个节点 A 和 B ,当距离 $H(A,B)=1$ 时, A 和 B 是邻居.

如图 1 所示,3 元 3 立方体中节点 $V=000$ 的邻居是 $V_1=001, V_2=010, V_3=100$.

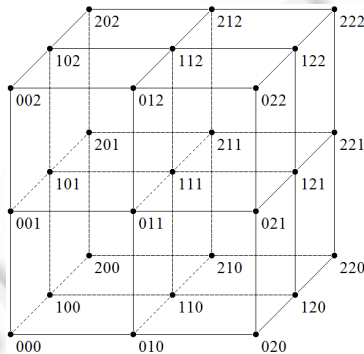


Fig.1 3-ary 3-cube

图 1 3 元 3 立方体

2.2 问题定义

定义 3. 两个节点 V_1 和 V_2 存在传输冲突,当它们都使用相同的信道,且同时向同一节点 V_3 发送数据.

如图 2 所示,节点 $V_1=001, V_2=010, V_3=011$,它们都使用相同的信道,根据 $H(A,B)$ 距离定义, V_1 与 V_3 为邻居, V_2 与 V_3 为邻居, V_1 向 V_3 发送数据的同时, V_2 向 V_3 发送数据,就会遇到冲突.由于冲突导致数据丢失,需要数据重传,即消耗了节点的能量,又增加了网络传输时延.因此,本文的目标是通过有效的路由策略来尽量减少传输冲突.

定义 4. 多个节点之间存在干扰,当这些节点在相同的通信范围内,并且它们使用同一个信道.

如图 3 所示,节点 0~节点 2 都在一个通信范围内且它们共用一个相同信道,它们之间存在干扰,因为一个节点传输数据时,其他节点必须等待,否则就会遇到冲突.因此,本文的目标是通过有效的信道分配策略来减少节点之间的干扰.例如:节点 0、1 使用信道 1 通信,节点 1、2 使用信道 2 通信,节点 0、2 使用信道 3 通信,那么它们之间就不存干扰问题.



Fig.2 Nodes conflicts

图 2 节点冲突

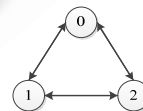


Fig.3 Nodes interference

图 3 节点干扰

定义 5. 在 k 元 n 立方体中,节点编号有 n 位,有 k 个节点的 $n-1$ 位编号都相同,只有 1 位各不相同,即这 k 个节点在这一位上数字为 $0, 1, \dots, k-1$,这些节点就构成一组,称为 k 元组.如图 1 所示,3 元 3 立方体中节点 000,001,002,它们只有 1 位各不相同,这 3 个节点在这一位上的数字为 $0, 1, 2$,它们构成一个 3 元组.

3 立方体拓扑结构建立

本节讲述如何将无线传感器网络构建立方体拓扑结构的网络.以 k 元 3 立方体为例,提出拓扑建立的算法,并给出拓扑建立的具体实例.本节的算法构建了 k 元 n 立方体结构,这样可以在无线传感器网络中充分利用其结构的优点,进行维序寻径来减少传输跳数、降低时延、减少冲突、增加吞吐量.

3.1 拓扑结构初始建立

开始网络中所有节点在一个信道上,确保相邻节点能够正常通信,当有孤立节点(与其他节点都不连通)时,可扩大 Radio 功率以增加通信范围使其连通.在拓扑结构建立时,随机地从一个节点开始,这一节点作为发送节点,发送建立拓扑结构的数据包,邻居接收节点收到后,返回 ACK,发送节点根据接收到的 ACK 选择一个最近的邻居节点进行连接,自身修改节点编号,并且通知要连接的邻居节点修改编号.刚刚连接上的邻居节点作为发送节点,重复之前的操作,并且一旦有 k 个节点连接在一起即形成 k 元组,这 k 个节点自身编号增加 1 位,且增加位数值相同;或者由 k 个组形成,这 k 个组中所有节点自身编号增加 1 位.通过一步一步增加网络中的节点,最终扩展到全网所有节点,完成网络的初始建立,如表 1 及图 4 所示.

Table 1 Initial establishment of 3-ary 3-cube topology

表 1 3 元 3 立方体拓扑结构初始建立

序号	3 元组	3 元组	3 元组
1	0-1-2		
2	00-01-02	0-1-2	
3	00-01-02	10-11-12	0-1-2
4	00-01-02	10-11-12	20-21-22
5	000-001-002	010-011-012	020-021-022
6	...		
7	100-101-102	110-111-112	120-121-122
8	...		
9	200-201-202	210-211-212	220-221-222

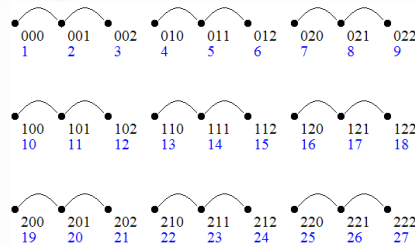


Fig.4 Initial establishment of 3-ary 3-cube topology

图 4 3 元 3 立方体拓扑结构初始建立过程

算法 1 是分布式算法,在每个节点上单独执行,运行算法 1 完成 k 元 3 立方体的初始建立.下面说明算法 1 所用到的参数, ID 为节点编号数组,其长度为 $n(n$ 维),PID 数组存储其父亲节点(发送节点)的 ID 值,即节点接收到的 ID 值.例如 3 立方体,那么数组长度为 3,初始所有节点的 ID 数组每位赋值 -1,即 $ID[0]=-1, ID[1]=-1, ID[2]=-1$.起始节点 $ID[0]=0, ID[1]=-1, ID[2]=-1$, ID 发送给邻居节点.算法利用 ID 对节点进行编号,如图 4 所示为初始建立 k 元 3 立方体拓扑结构.算法 1~2 步,对应表 1 中序号 1 第 1 列、序号 2 第 2 列、序号 3 第 3 列等,即节点编号只有 1 位时的操作.算法 3~6 步,对应表 1 中序号 2 第 1 列、序号 3 第 2 列、序号 4 第 3 列等,即节点编号有 2 位时的操作.算法 7~10 步,对应表 1 中序号 5、7、9 等,即节点编号有 3 位时的操作.序号 6、8 与序号 1~4 内容完全相同.算法 11~12 步,完成 k 元 3 立方体的初始建立.

算法 1. k 元 3 立方体拓扑结构初始建立算法.

输入:PID 数组, k 元.

1. if(PID[0]< $k-1$)

2. ID[0]=PID[0]+1, ID 发送给邻居节点;
3. else if(PID[0]==k-1)
4. if(PID[1]<k-1)
5. 通知父亲节点扩展第 2 位,
PID[1]=PID[1]+1;
6. ID[0]=0, ID[1]=PID[1],
发送给邻居节点;
7. else if(PID[1]==k-1)
8. if(PID[2]<k-1)
9. 通知父亲节点扩展最高位,
PID[2]=PID[2]+1;
10. ID[0]=0, ID[1]=-1, ID[2]=PID[2],
ID 发送给邻居节点;
11. if(PID[2]==k-1)
12. 结束拓扑结构的初始建立;

下面分析算法 1 的时间复杂度. 每个节点执行该算法的时间复杂度为 $O(1)$, 整个网络有 k^3 个节点, 因而全网节点拓扑结构初始建立的时间复杂度为 $O(k^3)$.

下面给出具体的实例. 表 1 为 3 元 3 立方体拓扑结构初始建立表.

3 元 3 立方体拓扑结构初始建立表, 其中的数字串代表节点编号, 横线代表它们之间有连接. 开始有一个节点, 自身编号为 0, 它连接其邻居节点使其编号为 1, 编号为 1 的节点再连接邻居节点使其编号为 2, 即算法的步骤 2, 这时编号 0、1、2 达到 3 元, 形成一组, 每个节点的编号增加一位, 修改成 00、01、02, 即算法的步骤 3~步骤 6. 接着, 再新形成 3 元组 0、1、2, 因为之前的第 2 位数字 0 已经被前一组占用了, 所以这一组每个节点的编号增加 1 位, 修改成 10、11、12. 继续扩展形成 3 组, 分别为 00、01、02 一组, 10、11、12 一组, 20、21、22 一组, 这 3 组形成一个大组, 使它们的编号都增加 1 位, 修改成为 000、001、002 一组, 010、011、012 一组, 020、021、022 一组, 即算法的步骤 7~步骤 10. 这样编号, 当位数达到 3 时不再继续增加位数. 最后形成 9 个组, 分别是表 1 中第 5、7、9 行中的 9 组, 这样即完成了立方体拓扑结构的初始建立, 如图 4 所示.

3.2 拓扑结构完整建立

初始网络建立之后, 将节点分成不同的组, 接下来再将未建立连接的相邻节点连接形成最终完整的 k 元 n 立方体拓扑结构. 假设节点 A, B 的距离 $H(A, B)=1$, 但它们在算法 1 执行后没有连接, 此时将它们连接起来. 每个节点都需要执行算法 2, 并且按照节点编号顺序进行. ID_2 是与 ID_1 能够进行通信的节点. 27 个节点建立的 3 元 3 立方体结构如图 5 所示, 图 5 对应图 1 的 3 元 3 立方体的立体图. 节点下面第 1 行的 3 位数字为节点编码, 第 2 行数字为节点索引. 算法 2 中第 1 步, 使节点编号按位比较, 当满足第 2, 3 步中 $ID_1[i]-1 \geq 0$ 或者 $ID_1[i]+1 \leq k-1$ 其中之一, 并且 $H(ID_1, ID_2)=1$ 时 (由定义 2, 编号为 ID_1 和 ID_2 的节点为邻居), 两个节点建立连接互为邻居.

算法 2. k 元 n 立方体拓扑结构最终建立算法.

输入: ID_1 (节点编号数组), ID_2 (与 ID_1 能够进行通信的节点).

1. for ($i=0; i < n; i++$)
2. if ($ID_1[i]-1 \geq 0$ && ID_1 与 ID_2 未建立过连接 && $H(ID_1, ID_2)=1$)
ID₁ 与 ID₂ 节点建立连接, 双方记录已经建立连接, 互为邻居;

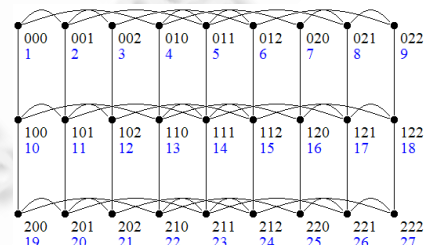


Fig.5 27 nodes establish 3-ary 3-cube
图 5 27 个节点建立的 3 元 3 立方体

3. if($ID_1[i]+1 \leq k-1$ && ID_1 与 ID_2 未建立过连接 && $H(ID_1, ID_2)=1$)

ID_1 与 ID_2 节点建立连接, 双方记录已经建立连接, 互为邻居;

算法 2 的时间复杂度为 $O(n)$, 整个网络有 k^n 个节点, 因而全网节点执行算法 2 的总时间复杂度为 $O(nk^n)$.

综合算法 1 的时间复杂度为 $O(k^n)$, 算法 2 的时间复杂度为 $O(nk^n)$, 由于本文的 n 值取常数, 所以最终构建网络拓扑的时间复杂度为 $O(k^n)$. 例如, 当 $n=3$ 时, 时间复杂度为 $O(k^3)$.

4 信道分配策略

4.1 信道分配算法

在阐述信道分配算法之前首先说明节点编号和节点索引的转换. 节点编号用一个数字串表示, 对于 k 元 3 立方体, 数字串的长度有 3 位, 每位上的数值大于等于 0 小于等于 $k-1$.

对于节点编号转换成节点索引的公式为 $nodeIndex = ID[2] \times k^2 + ID[1] \times k + ID[0] + 1$.

$nodeIndex$ 为节点索引, $ID[0]$ 为编号最低位, $ID[2]$ 为编号最高位.

表 2 是 3 元 3 立方体的节点索引与节点编号对应关系的实例, 左侧数为节点索引, 右侧数字串为节点编号.

Table 2 Corresponding relationship of node index and node number

表 2 节点索引与节点编号对应关系

1:000	2:001	3:002	4:010	5:011	6:012	7:020	8:021	9:022
10:100	11:101	12:102	13:110	14:111	15:112	16:120	17:121	18:122
19:200	20:201	21:202	22:210	23:211	24:212	25:220	26:221	27:222

在 k 元 3 立方体(3 维)的网络中, 每个节点有 3 个 Radio, 每个 Radio 对应于 1 个信道, 即每个节点有 3 个信道, 每个信道对应 1 维. 用 N 表示整个网络中节点个数, 那么 $N=k^3$, 每一组里包含 k 个节点且分配 1 个信道, 对于每一维形成 $k^3-1=k^2$ 组, 每一维有 k^2 个信道, 这样的分配会形成 $3k^2$ 个组, 分配的信道总数为 $3k^2$ 个.

三维情况下, 固定一维 $a, 1 \leq a \leq 3$, 即 a 的取值为 1, 2, 3. 对于整数 i 和 j , 使 $1 \leq i \leq k^{3-a}, 1 \leq j \leq k^{a-1}$. 在第 a 维第 $(i-1)k^{a-1}+j$ 组中包含以下节点: $(i-1)k^a+j, (i-1)k^a+j+k^{a-1}, (i-1)k^a+j+2k^{a-1}, (i-1)k^a+j+3k^{a-1}, \dots, (i-1)k^a+j+(k-1)k^{a-1}$.

这样的定义确保每个组包含 k 个节点, 每一维有 $\sum_{i=1}^{k^{3-a}} \sum_{j=1}^{k^{a-1}} 1 = k^2$ 个组.

KN-M 算法中每个节点需要一个存储信道的数组 `channels` 且其长度为 3, 这个数组索引值表示第几个 Radio. `channelIndex` 表示信道索引.

算法 3. k 元 3 立方体拓扑结构的信道分配算法(KN-M 算法).

输入: k 元;

输出: 每一个信道中包含的节点 ID.

1. `channelIndex=1;`
2. `for(a=1; a ≤ 3; a++)`
3. `for(i=1; i ≤ k3-a; i++)`
4. `for(j=1; j ≤ ka-1; j++)`
5. `channelIndex` 存入节点 $(i-1)k^a+j, (i-1)k^a+j+k^{a-1}, \dots, (i-1)k^a+j+(k-1)k^{a-1}$ 的 `channels` 数组中;
6. `channelIndex++;`

下面分析 KN-M 算法的时间复杂度. 共有 3 层循环, 其中第 1 层时间复杂度为 $O(1)$, 第 2、3 层共有 k^2 个信道, 所以时间复杂度为 $O(k^2)$, 即算法总的时间复杂度为 $O(k^2)$.

KN-M 算法将节点分成 $3k^2$ 个组, 每组有 k 个节点, 只有组内节点才会存在相互干扰, 那么每个节点的吞吐量 $\geq 1/k$.

定理 1. 对于 $k=N^{1/3}$, KN-M 算法在使用 $3k^2=3N^{2/3}$ 个信道时, 每个节点的吞吐量至少为 $1/N^{1/3}$.

证明: 文献[9]中 HINT-T 算法中采用的信道分配策略是在单跳(即所有节点在一跳通信范围内)的网络中进行通信, 而 KN-M 算法适用于单跳和多跳(即所有节点不在一跳通信范围内)的网络通信, 这样, HINT-T 算法中组

内有 k 个节点,都在单跳的范围内,且使用相同的信道,那么节点的吞吐量为 $1/k=1/N^{1/3}$,而本文在组内有 k 个节点时,由于它们在单跳或多跳的范围内,这样组内的冲突小于等于单跳的组内冲突.因此,在 KN-M 算法中,当使用 $3k=3N^{2/3}$ 个信道时,每个节点的吞吐量大于等于 $1/k$,即每个节点的吞吐量至少为 $1/N^{1/3}$. \square

4.2 信道分配举例

根据算法 3 得到表 3,其中每个格上面数字为信道索引,下面为 3 个节点索引.每个节点有 3 个 Radio,每个 Radio 对应于 1 个信道.例如:节点 1 的第 1 个 Radio 使用信道 1,节点 1 的第 2 个 Radio 使用信道 10,节点 1 的第 3 个 Radio 使用信道 19.第 1 维使用信道 1 的节点为 1、2、3,使用信道 2 的节点为 4、5、6,使用信道 3 的节点为 7、8、9,依次类推,使用信道 9 的节点为 25、26、27.这样,这个信道分配表共有 27 个信道,每个格中的节点都使用相同的信道.即 3 元 3 立方体使用 27 个信道,其优点是可以有效减少通信冲突、减少传输时延、提高网络吞吐量.

Table 3 Channel assignment in 3-ary 3-cube topology

表 3 3 元 3 立方体拓扑结构的信道分配

1 维	1 Radio	1 1,2,3	2 4,5,6	3 7,8,9	4 10,11,12	5 13,14,15	6 16,17,18	7 19,20,21	8 22,23,24	9 25,26,27
2 维	2 Radio	10 1,4, 7	11 2, 5, 8	12 3,6,9	13 10,13,16	14 11,14,17	15 12,15,18	16 19,22,25	17 20,23,26	18 21,24,27
3 维	3 Radio	19 1,10,19	20 2,11,20	21 3,12,21	22 4,13,22	23 5,14,23	24 6,15,24	25 7,16,25	26 8,17,26	27 9,18,27

5 路由策略

本文的路由策略是在信道分配完成的基础上采取按照维序寻径的方式^[4]进行路由,首先从节点编号最低位(即最低维)开始路由,经过至多 $k-1$ 步路由使其最低位数值与目的节点编号最低位一致,再从节点编号高一位(即更高一维)继续同样的路由,这样直到节点编号最高位(即最高维)路由结束则完成一次从源节点到目的节点的路由.在路由的每一步,节点根据路由到的维数,在 channels 数组中选择相应的信道进行通信.通过这样的路由策略可以减少传输时延,并且能够降低传输冲突.

下面给出算法 4 点到点的路由算法.

算法 4. k 元 n 立方体拓扑结构的点到点路由.

输入:源节点 ID_1 和目的节点 ID_2 .

1. for($i=0; i<n; i++$)
2. while($|ID_1[i]-ID_2[i]|!=0$)
3. if($ID_1[i]>ID_2[i]$)
4. 使用信道 $channels_1[i]$, $ID_1[i]--$,
 路由到下一个节点;
5. else
6. 使用信道 $channels_1[i]$, $ID_1[i]++$,
 路由到下一个节点;

例如:源节点 000(节点索引 1)到目的节点 111(节点索引 14),信道的选择参照信道分配表 3,那么按照算法 4 的第 2~6 步,使用信道 1,从节点 000 传输到节点 001;再使用信道 11,从节点 001 传输到节点 011(节点索引 5);最后使用信道 23,从节点 011 传输到节点 111;完成一次点到点路由.下面分析算法 4 的时间复杂度.共有 2 层循环,其中第 1 层时间复杂度为 $O(n)$,第 2 层时间复杂度为 $O(k)$,所以时间复杂度为 $O(kn)$.

定理 2. 网络中两个节点对之间的路由最多需要 $n \times (k-1)$ 步到达.

证明:按照算法 4 维序寻径的路由策略,先使数据包传输到达最低维,接下来再到达更高维,依次按维传输,当到达最高维时,路由完成,到达目的节点.因为 k 元 n 立方体中,每一维上两个节点编号最多差 $k-1$,也就是说,

这一维上至多需要 $k-1$ 步到达,一共有 n 维,所以网络中两个节点对之间的路由最多需要 $n \times (k-1)$ 步。□

如图 1 所示,3 元 3 立方体中从编号为 000 的节点到编号为 222 的节点最多需要 $3 \times (3-1) = 6$ 步,分别是从 000 到 001,001 到 002,002 到 012,012 到 022,022 到 122,122 到 222 这 6 步.换一个节点 010 到节点 111 的例子,从 010 到 011,011 到 111,2 步即完成此次路由。

6 仿真实验与性能评估

使用 OPNET 仿真平台进行模拟实验,并对实验结果进行性能评估。

6.1 OPNET 仿真实验

本文使用 OPNET 仿真软件进行实验^[13],仿真实验在 $200 \times 200 \text{m}^2$ 的区域内进行,每个传感器节点有 3 个 Radio.运用算法 1 和算法 2 来构建 k 元 n 立方体拓扑,其中, $k=2,3,4,5,6,7$ 分别对应 8,27,64,125,216,343($N=k^n$) 个节点进行仿真实验.KN-S 算法在 Single-Radio Single-Channel 的网络中,使用 k 元 n 立方体空间立体结构布置,信道分配和路由算法与 KN-M 算法相同.KN-M 和 KN-S 算法统称为 KN 算法。

信道分配的对比策略有 HINT-3,RING 和 GRID^[9],其中 RING 策略中节点的最大吞吐量为 $O(1/N)$,GRID 策略中节点的最大吞吐量为 $O(1/N^{1/2})$, N 为网络中节点总数.本文的 KN-M 算法与 HINT-3 算法相似,但 KN-M 在单跳和多跳的网络中均适应.路由策略的对比算法有 Flood 泛洪算法、SPIN 算法和基于概率的泛洪算法 PB,且 PB 算法采取 0.8 的概率转发。

6.2 性能评估

无线传感器网络的性能指标主要是端到端的时延、传感器节点的能量消耗、吞吐量和网络的冲突率等。

在信道分配策略的比较中,首先对网络传输的冲突率进行比较,实验进行了 10 000 次的模拟,网络中的节点个数为 27 个.如图 6 所示, x 轴为有数据包发送的节点占所有节点的百分比, y 轴为网络传输中的冲突率,RING 和 GRID 的信道分配方式,因为组内冲突较大,网络冲突率较大,而算法 HINT 和本文中的 KN-M 算法,每个节点的冲突较少,降低了传输冲突的可能性.KN-M 算法的冲突率比 HINT 算法的冲突率略小.此实验结果说明,KN-M 算法有效地减少了节点干扰,降低了网络冲突率。

图 7 比较了每个节点的最大吞吐量,假设网络中节点的最大流量为 100 个数据包每秒.分别在 8,27,64,125,216,343 个节点下进行仿真实验.RING 和 GRID 的信道分配方式,传输冲突率较大,因此影响了每个节点的吞吐量.而算法 HINT 和本文中的 KN-M 算法,传输冲突率较小,每个节点的吞吐量较大.KN-M 算法在单跳和多跳的网络中均适应,比 HINT 算法吞吐量大些。

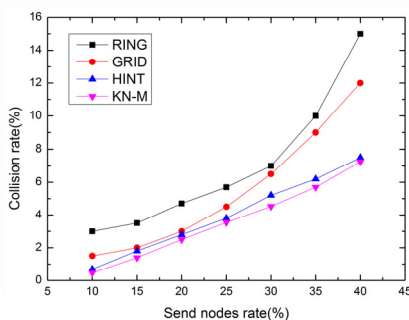


Fig.6 Collision rate

图 6 冲突率

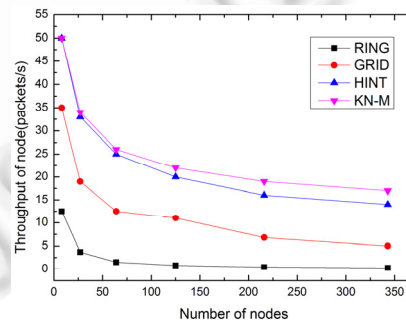


Fig.7 Throughput of node

图 7 节点吞吐量

在路由策略的比较中,网络中的 $k=2,3,4,5,6,7$ 分别对应 8,27,64,125,216,343 个节点进行仿真实验.首先对比 KN 算法与 SPIN、FLOOD 和 PB 算法的吞吐量,分别在多跳和单跳的网络中作比较。

图 8 为多跳网络中吞吐量的比较.在多跳的网络中吞吐量即平均每个时间步可以传输的数据包数.KN 算法

与 SPIN, FLOOD 和 PB 算法相比,在相同节点数量的情况下,因为采用了 Multi-Channel,数据包可以并行传输,吞吐量有着显著的提高.而 KN-S 算法虽然使用了维序寻径的路由策略,但在 Single-Radio Single-Channel 的网络中,发生冲突的可能性较大,所以 KN-S 的吞吐量比 KN-M 的吞吐量要小.

图 9 为单跳网络中吞吐量的比较.由于单跳网络所有节点彼此都在通信范围之内,因此冲突非常大.在不采用多信道的情况下, FLOOD, PB 和 SPIN 算法节点吞吐量较小,尤其在网络规模大、节点稠密时,没有进行信道分配,网络冲突较大,节点吞吐量几乎为 0.而对于 KN-M 算法,节点使用多信道进行通信,吞吐量较大,且随网络规模的扩大,吞吐量下降缓慢. KN-S 算法只适应于多跳网络,因此不作比较.

其次,在多跳网络中对比最大端到端时延,即传输跳数的比较.如图 10 所示, KN 算法与另外 3 种算法相比,最大传输跳数明显减少,即最大端到端时延明显降低.因为 KN 算法使用的是 k 元 n 立方体网络拓扑结构,任意两个节点之间的路由最多需要 $n \times (k-1)$ 步. KN-M 与 KN-S 相比,跳数上没有差别,因为都使用相同的网络拓扑和路由算法.

接下来,在多跳网络中对比平均端到端时延,即进行节点平均传输跳数的比较.如图 11 所示, KN 算法与另外 3 种算法在相同节点数量的情况下,平均端到端时延明显降低.因为 KN 算法使用的是 k 元 n 立方体网络拓扑结构. SPIN 比 FLOOD 和 PB 算法平均时延要少,因为 SPIN 算法一定程度地解决了内爆和重叠问题.

最后对比能量消耗,即进行传输次数的比较.如图 12 所示, KN 算法与 SPIN, FLOOD 和 PB 算法相比,节点传输次数明显减少,节点能量消耗明显降低.因为 KN 算法按顺序发送数据,形成广播树,每个节点只发送一次数据,传输的冗余较少,所以节点的传输次数明显地比其他 3 种算法要少. SPIN 相比 FLOOD 和 PB 算法,其传输次数少很多,因为 SPIN 算法一定程度地解决了重叠问题.

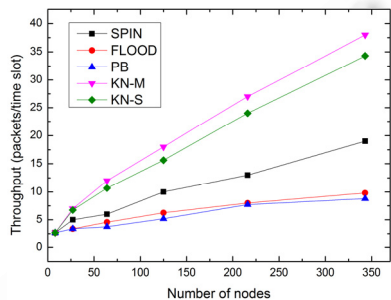


Fig.8 Throughput

图 8 吞吐量

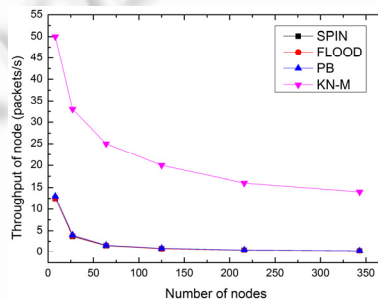


Fig.9 Throughput of node

图 9 节点吞吐量

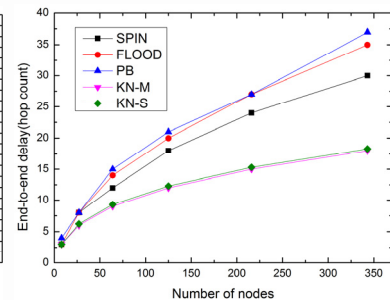


Fig.10 Max end-to-end delay

图 10 最大端到端时延

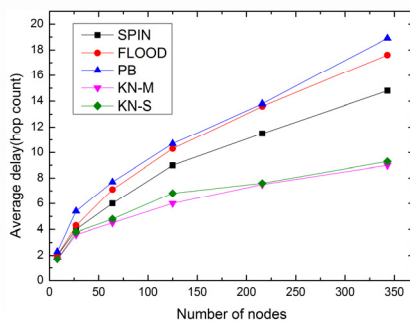


Fig.11 Average end-to-end delay

图 11 平均端到端时延

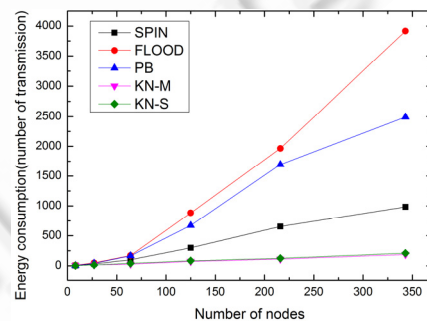


Fig.12 Energy consumption of nodes

图 12 节点能量消耗

7 结 论

本文针对无线传感器网络中通信冲突较大、传输时延长、吞吐量较低的问题,将 k 元 n 立方体结构应用到

无线传感器网络中,充分利用这一拓扑结构的优点,提出了一种在 Multi-Radio Multi-Channel 无线传感器网络中基于 k 元 n 立方体拓扑结构的信道分配和路由策略.实验结果表明,该策略与传统方法相比,能够减少传输时延,降低网络冲突,减少节点能量消耗,延长整个网络寿命,提高吞吐量.本文所提策略的优点是在节点密度大、传输冲突较高的情况下,仍具有良好的网络性能.

References:

- [1] Li JZ, Gao H. Survey on sensor network research. Journal of Computer Research and Development, 2008,45(1):1–15 (in Chinese with English abstract).
- [2] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. IEEE, 2002. 1567–1576. [doi: 10.1109/IAW.2006.1652109]
- [3] Saad Y, Schultz MH. Topological properties of hypercubes. IEEE Trans. on Computers, 1988,37(7):867–872. [doi: 10.1109/12.2234]
- [4] Hwang K. Advanced Computer Architecture. Beijing: Tsinghua University, 1995. 67–70 (in Chinese).
- [5] Wu J, Wang YS. Social feature-based multi-path routing in delay tolerant networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. IEEE, 2012. 1368–1376. [doi: 10.1109/INFCOM.2012.6195500]
- [6] Chang CT, Chang CY, Sheu JP. Bluecube: Constructing a hypercube parallel computing and communication environment over bluetooth radio system. In: Proc. of the 2003 Int'l Conf. on Parallel Processing. IEEE, 2003. 447–454. [doi: 10.1109/ICPP.2003.1240609]
- [7] Alicherry M, Bhatia R, Li LE. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. In: Proc. of the 11th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. ACM, 2005. 58–72. [doi: 10.1145/1080829.1080836]
- [8] Lin XJ, Rasool S. A distributed joint channel assignment scheduling and routing algorithm for multi-channel ad hoc wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. IEEE, 2007. 1118–1126. [doi: 10.1109/INFCOM.2007.134]
- [9] Urgaonkar R, Ramanathan R, Redi J, Tetteh WN. Channel assignment in dense MC-MR wireless networks: Scaling laws and algorithms. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. IEEE, 2013. 2607–2615. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6567068]
- [10] Tseng YC, Ni SY, Chen YS, Sheu JP. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. Wireless Networks, 2002, 8(2-3):153–167. [doi: 10.1023/A:1013763825347]
- [11] Cheng L, Gu Y, He T, Niu JW. Dynamic switching-based reliable flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. IEEE, 2013. 1393–1401. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566933]
- [12] Kulik J, Heinzelman W, Balakrishnan H. Negotiation-Based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2002,8(2-3):169–185. [doi: 10.1023/A:1013715909417]
- [13] OPNET Modeler. <http://www.opnet.com/>

附中文参考文献:

- [1] 李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展.计算机研究与发展,2008,45(1):1–15.
- [4] Hwang K.高等计算机系统结构.北京:清华大学出版社,1995.67–70.



倪林雨(1990—),男,黑龙江庆安人,硕士生,CCF 学生会员,主要研究领域为无线传感器网络.
E-mail: 1208847555@qq.com



李金宝(1969—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,移动社会网,大数据计算.
E-mail: jbli@hlju.edu.cn