

Multi-Radio 传感器网络信道分配算法的研究

纪守领, 李金宝, 郭龙江, 张德升, 惠 丽

(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)

摘 要: 为了减少通信冲突与信道干扰, 本文研究了 Multi-Radio Multi-Channel 传感器网络无冲突通信的信道数上界与 Radio 数上界, 在理论上证明了当网络的通信半径 $NCR > 3 \times Dis(P_K)$ 且 Sensor 节点规模大于 $2K + 1$ 时, 网络无冲突信道分配的信道数上界为 $\Delta(CG)$, 其中 K 为网络可采用的功率级数, $Dis(P_K)$ 为网络最大功率的通信半径, $\Delta(CG)$ 为网络信道冲突图的最大度. 在此上界基础上, 提出了一种信道分配算法, 该算法消除了数据通信时的冲突与干扰. 理论分析与实验结果表明: 本文提出的无冲突信道分配算法能够显著地改善传感器网络的通信效率, 提高网络的吞吐量.

关键词: 传感器网络; 路由; 信道分配

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 2A-117-06

Study on Channel Assignment Algorithm in Multi-Radio Sensor Networks

Ji Shou-ling, Li Jin-bao, Guo Long-jiang, Zhang De-sheng, Hui Li

(1. School of Computer Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China;
2. Key Laboratory of Database and Parallel Computing of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: For the sake of reducing communication conflicts and channel interference furthest, this paper studies the upper-bounds of channels and radios of conflict-free communication in Multi-Radio Multi-Channel sensor networks. We prove theoretically that when the networks communication radius $NCR > 3 \times Dis(P_K)$ and the Sensor Size of the networks is greater than $2K + 1$, the upper-bound of channels of conflict-free communication is $\Delta(CG)$, in which K is the power levels of the networks, $Dis(P_K)$ is the communication radius of the largest power P_K of the networks and $\Delta(CG)$ is the largest degree of the conflict graph of the networks. Based on the above upper-bound, a channel assignment algorithm is proposed. Theoretical analysis and experimental results indicate that the channel assignment algorithm this paper proposed can improve the communication efficiency of sensor networks significantly, and then increase the networks throughput.

Key words: sensor networks; routing; channel assignment

1 引言

基于 Single-Radio Single-Channel (SS) 传感器网络的通信协议, 由于网络本身的特性而具有较多限制. Single-Radio 只能进行半双工通信, 同时, 由于网络中所有节点使用同一信道通信, 对单一通信信道的竞争, 会使网络中冲突产生的概率大大增加, 从而导致系统吞吐量的降低. 为了改善 SS 传感器网络的通信协议的性能, 人们对基于 Single-Radio Multi-Channel (SM) 传感器网络的通信协议进行了研究^[1~3]. 基于 SM 的通信协议, 在一定程度上缓解了网络冲突和带宽限制等问题, 但却存在转换信道频繁和传输控制复杂等一系列新问题.

随着 Radio 硬件成本的下降, 目前已经研制出了具有多个 Radio 的传感器节点. Multi-Radio Multi-Channel (MM) 传感器网络虽然在一定程度上增加了网络部署成本, 但在较大程度上解决了 SM 转换信道频繁和传输控制复杂等问题, 而且节点利用多个 Radio 在同一时刻和多个节点进行通信, 将显著提高信道利用率, 降低传输时延和减少通信冲突等. MM 传感器网络通信协议的研究逐渐成为了国内外学者的研究热点.

目前, 对上述 SS、SM 和 MM 通信协议的研究, 大多集中于信道/Radio 的分配与调度问题, 很少考虑功率控制对传感器网络通信协议的影响. 这样既增加了通信干扰, 又浪费了网络的能量. 为了充分利用网络的特性, 不

收稿日期: 2009-07-10; 修回日期: 2009-11-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (No. 60803015); 中国博士后基金 (No. 20080430902); 黑龙江省科技计划 (No. QC09A109); 黑龙江省自然科学基金 (No. F200814); 黑龙江省博士后基金 (No. LRB08-021); 黑龙江省研究生创新科研项目 (No. YJSCX2009-019HLJ); 黑龙江省教育厅重点项目 (No. 1154Z1001); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目 (No. 11531276, No. 11541263); 哈尔滨市青年科技创新人才研究专项资金 (No. 2009RFQXG080)

同的节点可以根据通信需求,选择不同的发射功率进行通信,即研究采用混合功率的 MM 通信协议将具有十分重要的意义。

本文针对使用固定功率的 MM 传感器网络无法能源高效地满足网络通信要求这一问题,给出了一种混合功率路由算法.为了最大限度地避免通信时产生的冲突与干扰,本文重点分析了 MM 传感器网络无冲突通信的最小信道数上界与最小 Radio 数上界.基于上述上界,本文给出了一种信道分配算法。

2 相关工作

关于 SM 网络通信协议的研究已经取得了很多成果.G Zhou 等^[1]提出了一种基于时间同步的 SM 传感器网络 MAC 协议.文献[2]考虑了传感器网络的特性,提出了一种使用较少正交信道的多信道分配算法.D Starobinski 等^[3]提出了一种 SM 传感器网络中基于极值理论的数据分发策略.文献[4]提出了一种多信道无线 Mesh 网中跨层协议的设计方法。

对 MM 网络通信协议的研究,主要集中在无线 Mesh 网和无线 Ad Hoc 网.文献[5]提出了一种基于博弈论的无线网静态信道分配方法.K Xing 等^[6]提出了一种 Mesh 网中基于叠加码的信道分配策略,解决了广播/单播的信道分配问题.X Lin 等^[7]研究了 MM 无线 Ad Hoc 网中的信道分配与路由选择问题,提出了一种动态适应网络拓扑与负载变化的跨层协议.K. Kim 等^[8]给出了一种局部动态重配置算法.由于传感器网络与 Mesh 网或 Ad Hoc 网有着很大区别,因此,上述 Mesh 网或 Ad Hoc 网中的 MM 通信协议并不能很好地应用于传感器网络中。

对 MM 传感器网络通信协议的研究目前还处于起步阶段,文献[9]提出了一种基于 Multi-Radio 的虚拟 Sink 流量管理机制,可以缓解传感器网络中的“漏斗”现象.D Lymberopoulos 等^[10]利用一系列真实的 MM 传感器网的实验结果,研究了设计能量高效的传感器网络平台的瓶颈问题.对采用混合功率工作的 MM 传感器网络无冲突信道分配的 Channel 数及 Radio 数上界的研究,目前还很少^[11]。

3 MM 传感器网络的路由选择

本文研究具有如下特点的 MM 传感器网络:

(1)网络有一个 Sink 节点和若干 Sensor 节点.

(2)每个 Sensor 节点最多有 M 个 Radio,即对于节点 S ,其 Radio 数 $S_R \in \{1, 2, \dots, M\}$.

(3)每个 Radio 有 N 个正交信道, N 个正交信道组成的集合记为 $\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$.

(4)每个 Radio 可使用 K 级发射功率 $\{P_1, P_2, \dots,$

$P_K\}$ 进行通信,且 $P_1 < P_2 < \dots < P_K$. $Dis(P_i)$ 表示节点在功率 $P_i(1 \leq i \leq K)$ 下的通信半径, $E(P_i)$ 表示节点以功率 P_i 发送一个数据包消耗的能量。

定义 1 最优选择功率 (Optimal Choice Power, OCP).假设节点 S 以某级功率可以与节点 D 直接通信,则功率 $P_i(1 \leq i \leq K)$ 为 S 的最优选择功率,当且仅当 P_i 满足: $Dis(P_{i-1}) < Dis(S, D) \leq Dis(P_i)$. 记为 $OCP(S, D) = P_i$. 其中 $Dis(P_0) = 0$, $Dis(S, D)$ 为节点 S 和节点 D 的物理距离。

定义 2 相互干扰 (Mutual Interference, MI).给定两个链路 $l_i = (S_i, D_i)$ 和 $l_j = (S_j, D_j)$,其中 S_i, S_j 为源节点, D_i, D_j 为目的节点, l_i 的通信功率为 $P_i(1 \leq i \leq K)$, l_j 的通信功率为 $P_j(1 \leq j \leq K)$,则链路 l_i 和 l_j 相互干扰当且仅当: $Dis(S_i, S_j) \leq Dis(P_i)$ 或 $Dis(S_i, D_j) \leq Dis(P_i)$ 或 $Dis(S_j, S_i) \leq Dis(P_j)$ 或 $Dis(S_j, D_i) \leq Dis(P_j)$. 对网络中的任意两条链路 l_i 和 l_j ,如果 l_i 和 l_j 相互干扰,记为 $MI(l_i, l_j) = 1$,否则, $MI(l_i, l_j) = 0$.

为了尽可能地减小数据通信消耗的能量和减少通信干扰范围,本节给出一种 MM 传感器网络中基于最短路径的能量高效的混合功率路由算法。

对于一个由 R 个节点(包含一个 Sink 节点)组成的 MM 传感器网络,定义其代价矩阵为 $[COST_{i,j}]_{R \times R}$,如果节点 S_i 与节点 S_j 可以以某级功率直接通信,则 $COST_{i,j} = E(OCP(S_i, S_j))$; 否则, $COST_{i,j} = +\infty$. 利用上述代价矩阵,可以得出一种基于 Dijkstra 最短路径的混合功率路由算法 (Hybrid-Power Routing Algorithm, HPRA). HPRA 算法描述如算法 1 所示。

算法 1 HPRA

1. 计算代价矩阵 $[COST_{i,j}]_{R \times R}$;
2. 根据 Dijkstra 最短路径算法选择各节点向 Sink 传输数据的能量最优路径;
3. 各节点根据选择的路径,确定向下一跳传输数据的 OCP;

4 无冲突信道分配上界

4.1 冲突图

对于 MM 传感器网络,利用 HPRA 算法得出网络的路由后,就确定了网络的路由拓扑,即网络的拓扑图 (Topology Graph, TG). TG 是一个以 Sink 节点为根的树. 对 TG 经过边-点抽象可导出网络的信道冲突图 (Conflict Graph, CG). 该过程需要两步: (1) 将拓扑图中每一条链路 l_i 抽象为冲突图中的一个点 N_i ; (2) 对于任意两条链路 l_i 和 l_j ,其冲突图中对应点为 N_i 和 N_j ,如果 $MI(l_i, l_j) = 1$,那么 N_i 和 N_j 之间连一条边. 显然,信道冲突图一定是简单图. 如图 1(a) 为一个网络运行 HPRA 后

得到的拓扑图,其拓扑图导出的信道冲突图如图 1(b).

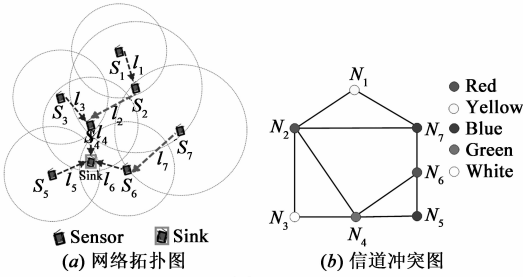


图1

4.2 理论基础

理论基础在 MM 传感器网络对应的信道冲突图中,对于任意两个顶点 N_i, N_j , 如果 N_i 和 N_j 之间有边相连, 就意味着这两条链路如果同时用同一信道进行通信, 将会产生冲突. 首先假设节点具有足够多的 Radio. 如果将 N 个正交信道看作 N 种不同颜色, 那么为信道冲突图中各顶点分配无冲突信道的问题就可抽象成着色问题. 确定着色最小色数的下界是 NP 完全问题. 但是, 对上述冲突图着色, 却可以估计出上界, 即网络中无冲突通信的信道上界. 对于任意信道冲突图 CG , 以 $X(CG)$ 表示对 CG 无冲突分配信道所需的最小信道数. 下述命题^[12]给出了对 CG 进行信道分配时的一个信道上界.

命题 1 对任意信道冲突图 CG , 均有 $X(CG) \leq \Delta(CG) + 1$. 其中, $\Delta(CG)$ 为图 CG 中最大的顶点度.

Brooks 定理^[12]指出, 命题 1 中等号只在 CG 是奇圈或完全图时成立. 如图 2(a) 中的奇圈, 至少用 3 个信道才能完成无冲突信道分配; 图 2(b) 中的完全图, $\Delta(CG)$ 为 4, 至少需 5 个信道才能完成无冲突信道分配. 对于非奇圈和完全图, 完全可以将命题 1 中的上界紧缩为 $\Delta(CG)$.

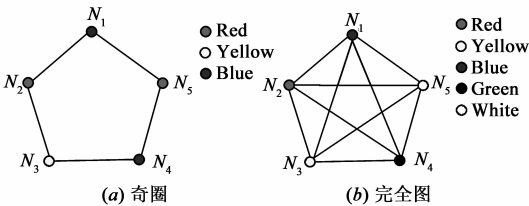


图2

4.3 信道的上界

通过上述论述可知, 对于冲突图 CG , 如果 CG 不是完全图或奇圈, 那么可至多用 $\Delta(CG)$ 个信道对 CG 进行无冲突信道分配.

定义 3 网络半径 (Networks Radius, NR), 网络通信半径 (Networks Communication Radius, NCR). 网络半径是指网络中数据传输的最大跳数; 网络通信半径是指 Sensor 节点与 Sink 节点的最大物理距离.

对于具有 K 级发射功率的 MM 传感器网络, 定理 1 给出了其拓扑图导出的冲突图不为完全图的充分条

件. 为了分析方便, 以下均假设网络是连通的.

定理 1 对任意使用 K 级发射功率的 MM 传感器网络, 如果网络的网络通信半径 $NCR > 3 \times Dis(P_K)$, $Dis(P_K)$ 为网络最大功率的通信半径, 那么, 由 HPRA 算法得到的该网络拓扑图的导出信道冲突图 CG 一定不是完全图.

证明 由网络通信半径的定义知, 在该网络中存在一个 Sensor 节点 S_i , 使得 $Dis(S_i, Sink) = NCR = (3 + d^*) \times Dis(P_K) > 3 \times Dis(P_K)$, 其中 d^* 为一正数. 设 S_i 对应的链路为 l_i , 且 l_i 对应的功率为 $P_i (1 \leq i \leq K)$, 现在只需再找一链路 l_j , 使得 $MI(l_i, l_j) = 0$. 令 S_j 为直接和 Sink 节点通信的且与 Sink 节点物理距离最小的 Sensor 节点, 设 S_j 对应的链路为 l_j , 且 l_j 对应的功率为 $P_j (1 \leq j \leq K)$. 那么, $Dis(S_i, S_j) \geq (3 + d^*) \times Dis(P_K) - Dis(P_j) \geq (3 + d^*) \times Dis(P_K) - Dis(P_K) = (2 + d^*) \times Dis(P_K)$. 又因为 S_i 是与 Sink 物理距离最远的节点, 而 S_j 为直接和 Sink 节点通信的且与 Sink 节点物理距离最近的 Sensor 节点, 所以 l_i 和 l_j 存在干扰的必要条件是 $Dis(S_i, S_j) \leq 2 \times Dis(P_K)$, 而此时 $Dis(S_i, S_j) \geq (2 + d^*) \times Dis(P_K) > 2 \times Dis(P_K)$, 因此 l_i 和 l_j 之间可以无干扰地同时使用相同的信道, 即信道冲突图 CG 不是完全图.

另一个影响信道分配上界的因素为奇圈. 为了更深入地研究奇圈产生的原因, 这里引入链的概念.

定义 4 链 (Chain). 链是指 MM 传感器网络中的一条路径, 该路径起始于某一节点 S , 终止于 Sink 节点, 且该路径上除 S 和 Sink 的节点度为 1 外, 其他所有中间节点的度均为 2. 如图 3 所示, 图中的 Inter-link 中所有节点的度也均为 2. 图 3 中所示网络中有且只有一条链, 称之为单链网络.

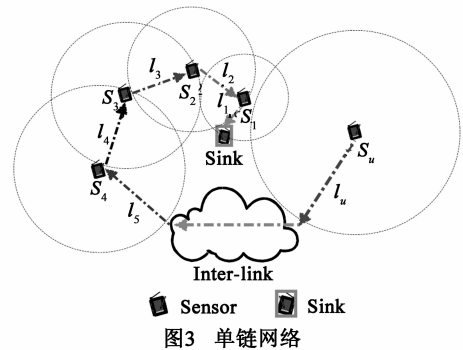


图3 单链网络

如果一个网络的信道冲突图是奇圈, 那么网络拓扑图中所有路径显然都必须链. 同时, 奇圈中的链具有下述引理 1、2 中的性质. 在以下讨论中, 均假设网络的节点规模大于 3.

引理 1 对任意使用 K 级发射功率工作的 MM 传感器网络, TG 是网络的拓扑图, $Chain = \{l_1 = (S_1, S_0), l_2 = (S_2, S_1), \dots, l_u = (S_u, S_{u-1})\}$ 是 TG 中的任意一条链, $S_0 = Sink$, 且链 Chain 中任一段链路 $l_i = (S_i, S_{i-1}) (1$

$\leq i \leq u$ 使用的功率为 $P(l_i)$, 如果 TG 导出的信道冲突图 CG 是奇圈, 那么有 $P(l_1) < P(l_2) < \dots < P(l_{u-2}) < P(l_{u-1})$, 且链 $Chain$ 的长度 $|Chain| \leq K + 1$.

证明 设 $l_{i+1} = (S_{i+1}, S_i)$, $l_i = (S_i, S_{i-1})$, $l_{i-1} = (S_{i-1}, S_{i-2})$ 是链 $Chain$ 中的 3 条连续的链路, 其中 $0 \leq i - 2 < i + 1 \leq u - 1$. 因为 CG 是奇圈, 那么链 $Chain$ 中的除首尾链路外的中间链路只和相邻的两条链路干扰 (因为奇圈中所有节点度均为 2), 且首尾链路除和直接相邻的链路干扰外, 还分别和其他一条不相邻的链路相互干扰. 因此有: $MI(l_{i+1}, l_i) = 1$, $MI(l_i, l_{i-1}) = 1$, $MI(l_{i-1}, l_{other}) = 1$, l_{other} 为 l_{i-1} 的下一跳链路或与其不相邻的链路. 此时, 如果 $P(l_{i-1}) \geq P(l_i)$, 那么 S_i 就处于 S_{i-1} 的通信范围之内, 此时, 当 S_{i-1} 向 S_{i-2} 发送数据时将干扰 S_{i+1} 与 S_i 的通信, 即有 $MI(l_{i+1}, l_{i-1}) = 1$. 那么, 在信道冲突图 CG 中, l_{i-1} 对应的顶点 N_{i-1} 将与 l_i 对应的顶点 N_i 、 l_{other} 对应的顶点 N_{other} 、 l_{i+1} 对应的顶点 N_{i+1} 均有边相连. 此时, 顶点 N_{i-1} 的度大于等于 3, 这与 CG 是奇圈矛盾. 因此, 必有 $P(l_{i-1}) < P(l_i)$. 即 $P(l_1) < P(l_2) < \dots < P(l_{u-2}) < P(l_{u-1})$.

又因为网络只有 K 级发射功率, 则 $u - 1$ 的最大值为 K , 即链 $Chain$ 的长度 $|Chain| \leq K + 1$.

引理 2 对任意 MM 传感器网络, TG 是网络的拓扑图, CG 是由 TG 导出的信道冲突图, CG 是奇圈仅当 TG 中有且只有两条链.

证明 对于引理 2, 只需证明单链网络以及多于两条链的网络其拓扑图, 不可能导出一个是奇圈的信道冲突图即可. 对于多于两条链的网络引理 2 显然成立. 现在只需证明图 4 所示的单链网络导出的信道冲突图 CG 不可能是奇圈.

设单链网络中的链 $Chain = \{ l_1 = (S_1, S_0), l_2 = (S_2, S_1), \dots, l_u = (S_u, S_{u-1}) \}$, $S_0 = Sink$, 那么, 链 $Chain$ 导出的信道冲突图是奇圈当且仅当: $MI(l_1, l_u) = 1$ 且 $MI(l_{i+1}, l_i) = 1$ 且 $MI(l_i, l_{i-1}) = 1$ 且 $MI(l_i, l_{other}) = 0$, 其中, $1 \leq i - 1 < i + 1 \leq u$, $l_{other} \neq l_{i+1}$ 且 $l_{other} \neq l_i$. 假设单链网络的信道冲突图 CG 是奇圈, 不失一般性, 设图 3 中的单链网络的冲突图即是奇圈, 那么有 $MI(l_1, l_u) = 1$. 根据相互冲突的定义, 有 $Dis(S_1, S_u) \leq Dis(P(l_1))$ 或 $Dis(S_1, S_{u-1}) \leq Dis(P(l_1))$ 或 $Dis(S_u, S_1) \leq Dis(P(l_u))$ 或 $Dis(S_u, Sink) \leq Dis(P(l_u))$. 根据 HPRA 算法的规则知, 在产生 Sensor 节点对应的路径时, 以能量最优作为选择标准, 于是, 若有 $Dis(S_u, S_1) \leq Dis(P(l_u))$ 或 $Dis(S_u, Sink) \leq Dis(P(l_u))$, 那么 S_u 产生的数据可以通过 S_1 转发至 $Sink$ 或直接传输至 $Sink$ 节点, 而不可能首先经过其他节点转发至 S_1 , 然后再传输至 $Sink$ 节点, 显然 $Dis(S_u, S_1) \leq Dis(P(l_u))$ 或 $Dis(S_u,$

$Sink) \leq Dis(P(l_u))$ 均不成立.

若 $Dis(S_1, S_u) \leq Dis(P(l_1))$ 或 $Dis(S_1, S_{u-1}) \leq Dis(P(l_1))$, 那么就意味着 $P(l_1) \geq P(l_u)$ 或 $P(l_1) \geq P(l_{u-1})$, 由引理 1 知, 对于可构成奇圈的单链有 $P(l_1) < P(l_2) < \dots < P(l_{u-2}) < P(l_{u-1})$, 所以 $P(l_1) \geq P(l_{u-1})$ 不成立; 若 $P(l_1) \geq P(l_u)$, 根据功率与能量的关系, 有 $E(P(l_1)) \geq E(P(l_u))$, $E(P(l_1)) < E(P(l_2)) < \dots < E(P(l_{u-1}))$, 而 S_u 向 $Sink$ 传输一个数据包需要消耗的发送能量为: $E(P(l_u)) + E(P(l_{u-1})) + \dots + E(P(l_2)) + E(P(l_1)) > 2 \times E(P(l_1)) \geq E(P(l_u)) + E(P(l_1))$. 于是, 若 S_u 选用的功率为 $P(l_1)$, 则传送一个数据包消耗的发送能量至多为 $2 \times E(P(l_1))$, 小于经过当前对应路径发送一个数据包消耗的能量. 而这与 HPRA 算法选择的路径为能量最优矛盾. 由上述分析可知, $Dis(S_1, S_u) \leq Dis(P(l_1))$ 或 $Dis(S_1, S_{u-1}) \leq Dis(P(l_1))$ 均不成立. 故单链网络的导出信道冲突图不可能是奇圈.

因此, 只有双链网络的信道冲突图可能为奇圈, 并且这种双链网络可以通过构造的方法获得.

然而, 当网络满足一定条件时, 网络中就不可能出现奇圈. 定理 2 给出了网络的拓扑图导出的冲突图不为奇圈的充分条件.

定理 2 对使用 K 级发射功率的 MM 传感器网络, 当网络的 Sensor 节点规模大于 $2K + 1$ 时, 网络的信道冲突图不是奇圈.

证明 由引理 2 可知, 如果一个网络的信道冲突图是奇圈, 那么该网络的拓扑图必然含有两条链. 又由引理 1 可知, 这样的链的最大长度为 $K + 1$. 同时, 又由于奇圈中必须含有奇数个顶点, 每个顶点对应一条链路, 每条链路在拓扑图中对应一个 Sensor 节点, 于是奇圈对应的网络节点规模至多为 $2K + 1$. 当网络的 Sensor 节点规模大于 $2K + 1$ 时, 网络的信道冲突图必不是奇圈.

通过上述分析与证明, 可以得出网络的信道规模上界为 $\Delta(CG)$ 的条件. 定理 3 给出了这些条件的形式化描述.

定理 3 对任意使用 K 级发射功率 $\{P_1, P_2, \dots, P_K\}$ 工作的 MM 传感器网络, 其中 $P_1 < P_2 < \dots < P_K$, CG 是其信道冲突图, 如果网络的网络通信半径 $NCR > 3 \times Dis(P_K)$ 且 Sensor 节点规模大于 $2K + 1$, 那么, 对该网络进行无冲突信道分配的信道界为 $\Delta(CG)$.

证明 由定理 1 和定理 2 可得证.

同时, 因为任一 Sensor 节点所关联的链路在 CG 中必然有边相连, 而该节点所需的 Radio 数也至多为和其相关联的链路数, 因此无冲突 Radio 分配的上界也为 $\Delta(CG)$.

4.4 信道分配

本节基于定理 3 的结论,给出一种信道分配算法——无冲突信道分配算法 (Conflict-Free Channel Assignment Algorithm, CFAA)。

CFAA 算法假设网络中共有 $\Delta(CG)$ 个正交信道,且网络满足网络通信半径 $NCR > 3 \times Dis(P_K)$, Sensor 节点规模大于 $2K + 1$. CFAA 算法描述如算法 2 所示,算法的正确性可以根据 Brooks 定理证明。

算法 2 CFAA

- 1: 将冲突图 CG 中顶点按度非递增排序,并记为 $S = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$;
- 2: while($S \neq NULL$)
- 3: 选择 S 中第一个顶点记为 N_i ;
- 4: if(N_i 未被分配信道)
- 5: 在不冲突的情况下为 N_i 分配一信道;
- 6: 为 N_i 未分配信道的邻居顶点无冲突分配信道;
- 7: 对 S 中任一顶点记为 N_j
- 8: if(N_j 所有的邻居节点已分配信道)
- 9: $S = S - N_j$;

5 实验与结果分析

本文通过实验分析了数据产生率、网络规模等参数对多 Radio 多信道混合功率传感器网络 (MMH)、单 Radio 多信道混合功率传感器网络 (SMH)、以及单 Radio 单信道最大功率传感器网络 (SSM) 性能的影响。

假设网络包含一个 Sink 节点和若干 Sensor 节点. Sensor 节点的初始能量为 1000 个单位,可使用 3 级功率工作. 对于每级功率 x ,其通信半径 $Dis(x) = KD \times (x - 1) + BD$,其传输一个数据包耗能为 $E(x) = KE \times x$,实验中 $KD = BD = KE = 1$. 节点接收一个数据包需要耗能 1 单位。

同时,实验假设每个节点的信道数为 $\Delta(CG)$,每个 Sensor 节点根据实际情况具有 $1 \sim \Delta(CG)$ 个 Radio, MMH 使用 ZCAA 算法完成信道分配,使用 HPRA 算法完成路由选择. SMH 网络具有足够的信道数,且使用 HPRA 算法完成路由选择. SSM 网络中只有一个 Radio 和 Channel,使用最大功率工作,使用最短路径算法完成路由. 以下分别用 MMH、SMH 和 SSM 来分别表示以上工作在相应协议下的三种网络,“-G”表示网络为网格拓扑结构,“-R”表示网络为随机拓扑结构. 以下每组实验均运行 20 次,实验结果为 20 次实验的平均结果。

5.1 数据产生率变化

本组实验研究数据产生率对 MMH、SMH 和 SSM 的影响. 数据产生率指网络单位时间内产生数据的速率,即单位时间内产生数据包的个数. 实验中,节点分布在 20×20 的区域,节点密度为 1。

图 4 给出了不同数据率下网络平均吞吐量的变化。

由于 MMH 中不存在通信冲突,其吞吐量显著高于 SMH 和 SSM. 当网络的数据产生率较低时,MMH 的吞吐量接近网络吞吐量的上限,而且随着数据率的增高,MMH 的吞吐量也获得了较大的增加. 而 SSM 由于冲突较大,所以吞吐量始终较低。

数据产生率对数据平均延迟的影响如图 5 所示. 从图中可以看出,随着数据产生率的变化,MMH 的数据延迟有所增加,

但仍然可以用较少的时间延迟完成数据转发任务. 而对于 SSM 和 SMH,其数据延迟开始虽稍有增加,但后来

快速下降,是因为随着网络的数据产生率增大,其网内冲突也迅速增大,此时大部分距离 Sink 较远的节点很难

将数据成功传输至 Sink 节点,因此表现为随着数据产生率的增加,其平均延迟反而降低。

5.2 网络规模变化

本组实验考察网络规模对网络性能的影响,这里以网络中的节点数量来衡量网络规模. 实验中,网络的节点密度为 1,数据产生率为 3。

5.2 网络规模变化

本组实验考察网络规模对网络性能的影响,这里以网络中的节点数量来衡量网络规模. 实验中,网络的节点密度为 1,数据产生率为 3。

图 6 给出了网络规模变化对网络平均吞吐量的影响. 对于 MMH,其平均吞吐量始终保持较高的水平. 而随着网络规模的扩大,SMH 由于冲突的减小,其吞吐量也显著增加. 网络规模变化对数据平均延迟的影响如图 7 所示. 随着网络规模的增

图 4 数据产生率对平均吞吐量的影响

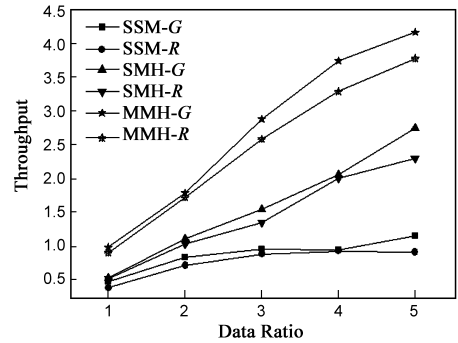


图 4 数据产生率对平均吞吐量的影响

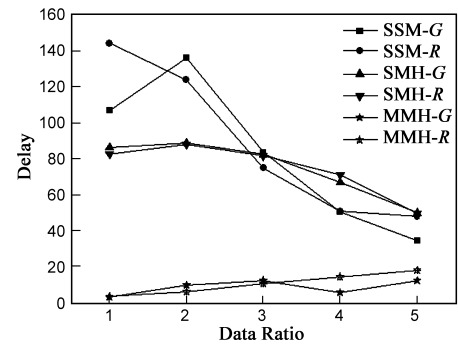


图 5 数据产生率对平均延迟的影响

其平均延迟反而降低。

5.2 网络规模变化

本组实验考察网络规模对网络性能的影响,这里以网络中的节点数量来衡量网络规模. 实验中,网络的节点密度为 1,数据产生率为 3。

图 6 给出了网络规模变化对网络平均吞吐量的影响. 对于 MMH,其平均吞吐量始终保持较高的水平. 而随着网络规模的扩大,SMH 由于冲突的减小,其吞吐量也显著增加. 网络规模变化对数据平均延迟的影响如图 7 所示. 随着网络规模的增

图 6 网络规模对平均吞吐量的影响

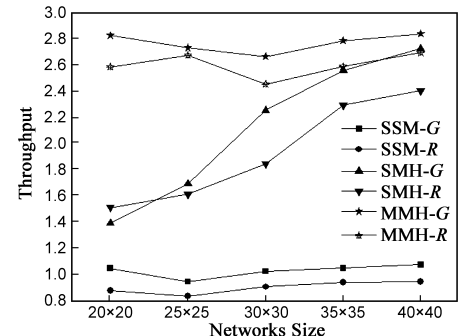


图 6 网络规模对平均吞吐量的影响

加,MMH对应的数据延迟稍有增加,是因为数据传输路径的平均长度增加的缘故.而对于SMH和SSM,由于造成其数据延迟

较大的主要原因是网内数据通信冲突太大,而网络规模的增加,同时整个网络的数据产生率保持不变,那么,

就意味着网络单位面积内产生的数据减少,即网内平均数据密度降低,因此也减少了网内数据通信冲突.于是,数据延迟总体表现呈下降趋势.

6 结论

本文首先给出了一种基于最短路径的混合功率路由算法.在该算法的基础上,本文重点研究了MM传感器网络进行无冲突通信的信道数上界与Radio数上界.基于上述上界,本文提出了一种信道分配算法.实验结果表明本文提出的无冲突信道分配算法,能够显著地改善传感器网络的通信效率.

参考文献:

- [1] G Zhou, C Huang, et al. MMSN: multi-frequency media access control for wireless sensor networks[A]. Proc of INFOCOM'06[C]. Washington: IEEE Press, 2006. 1 - 13.
- [2] Y Wu, JA Stankovic, et al. Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks[A]. Proc of INFOCOM'08[C]. Washington: IEEE Press, 2008. 1193 - 1201.
- [3] D Starobinski, W Xiao, et al. Near-optimal data dissemination policies for multi-channel, single radio wireless sensor networks[A]. Proc of INFOCOM'07[C]. Washington: IEEE Press, 2007. 955 - 963.
- [4] W H Tam, Y C Tseng. Joint multi-channel link layer and multi-path routing design for wireless mesh networks[A]. Proc of INFOCOM'07[C]. Washington: IEEE Press, 2007. 2081 - 2089.
- [5] M Felegyhazi, M Galaj, et al. Non-cooperative multi-radio channel allocation in wireless networks[A]. Proc of INFOCOM'07[C]. Washington: IEEE Press, 2007. 1442 - 1450.
- [6] K Xing, X Cheng, L Ma, et al. Superimposed code based channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[A]. Proc of MOBIKOM'07[C]. New York: ACM Press, 2007. 50 - 65.

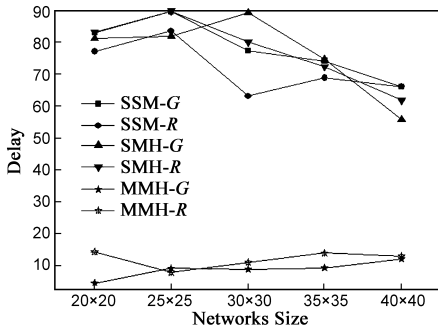
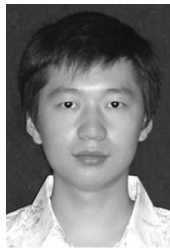


图7 网络规模对平均延迟的影响

- [7] X Lin, S Rasool. A distributed joint channel-assignment scheduling and routing algorithm for multi-channel ad hoc wireless networks[A]. Proc of INFOCOM'07[C]. Washington: IEEE Press, 2007. 1118 - 1126.
- [8] K Kim, K G. Shin. Self-healing multi-radio wireless mesh networks[A]. Proc of MOBIKOM'07[C]. New York: ACM Press, 2007. 326 - 329.
- [9] C Wan, Shane E Eisenman, et al. Siphon: overload traffic management using multi-radio virtual sinks[A]. Proc of SenSys'05[C]. New York: ACM Press, 2005. 116 - 129.
- [10] D Lymberopoulos, Nissanka B Priyantha, et al. Towards energy efficient design of multi-radio platforms for wireless sensor networks[A]. Proc of IPSN'08[C]. New York: ACM Press, 2008. 257 - 268.
- [11] Lin S, Zhang JB, et al. ATPC: adaptive transmission power control for wireless sensor networks[A]. Proc of Sensys'06[C]. New York: ACM Press, 2006. 223 - 236.
- [12] Douglas B. West. 李建中, 骆吉洲译. Introduction to Graph Theory(Second Edition)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 151 - 170.

作者简介:



纪守领 男, 1986年生于山东菏泽. 现为黑龙江大学计算机科学技术学院硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络和数据库.
E-mail: jishouling@gmail.com



李金宝(通信作者) 男, 1969年生于黑龙江庆安. 博士, 黑龙江大学计算机科学技术学院教授, 主要研究方向为无线传感器网络、数据库、移动计算和并行计算.
E-mail: jbli@hlju.edu.cn



郭龙江 男, 1973年生于河北丰台. 博士, 黑龙江大学计算机科学技术学院副教授, 主要研究方向为无线传感器网络、数据流上的数据挖掘技术.