

基于网络分割的无线传感器网络多信道 MAC 协议

程宾¹, 慈林林^{1,2}, 田成平¹, 杨明华³

(1. 北京理工大学 计算机学院, 北京 100081; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085;
3. 北京工商大学 计算机与信息工程学院, 北京 100048)

摘 要: 无线传感器网络中, 可用正交信道数目较少和噪声干扰问题制约着多信道 MAC 协议性能的提升, 结合数据采集应用的特点, 提出一种基于网络分割的多信道 MAC 协议。在最小化网络总干扰值的基础上, 网络分割引入碰撞因子进一步优化子树结构、降低树内干扰。并利用基于图着色理论的分配策略为每棵子树分配一条高质量信道。仿真实验结果表明, 该协议显著提高了网络吞吐量, 并且大幅降低了传输延迟和分组丢失率。

关键词: 无线传感器网络; MAC; 多信道; 网络分割

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)Z2-0165-07

Multi-channel MAC protocol based on network partitioning for wireless sensor networks

CHENG Bin¹, CI Lin-lin^{1,2}, TIAN Cheng-ping¹, YANG Ming-hua³

(1. School of Computer Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China;

3. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The limited amount of available orthogonal channels and noise interference are two major issues to constrain performances of multi-channel MAC protocols in wireless sensor networks (WSN). In conjunction with features of data gathering networks, a partitioning-based multi-channel MAC protocol was designed. Initially it partitioned network into several sub-trees with lower collision factor, without increasing the total value of interference around the whole network. Furthermore, it adopted a coarse-grained channel assignment strategy on basis of graph coloring theory, in order to ensure each sub-tree work on a relative optimal channel. Simulation results show that the proposed MAC protocol can significantly improve throughput and reduce end-to-end latency and packet loss.

Key words: wireless sensor networks; media access control; multi-channel; network partition

1 引言

无线传感器网络作为一种新兴网络通信技术, 广泛应用于社会生产生活各个领域, 例如, 战场侦察、环境监测、电力系统监测、交通管理以及医疗救护等。图 1 给出近几年的一种网络应用——空中 WSN 的架构。为了更好地适应不同应用场景, 大量旨在提高 WSN 性能的介质访问控制协议、路由

协议和传输协议相继被提出。

介质访问控制协议 (MAC, medium access control) 位于无线传感器网络协议栈的靠近底层的部分, 负责为 WSN 中各节点分配无线媒介资源, MAC 协议性能的优劣直接影响着网络整体性能, 是 WSN 领域的研究热点之一。通常, 将 WSN 部署在无人值守的区域, 传感器节点能量有限且难以补充, 所以延长网络生命周期成为 MAC 协议设计

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61063042); 中国博士后科学基金资助项目 (201104753); 北京市自然科学基金资助项目 (4132025)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61063042); China Postdoctoral Science Foundation Project (201104753); The Natural Science Foundation of Beijing (4132025)

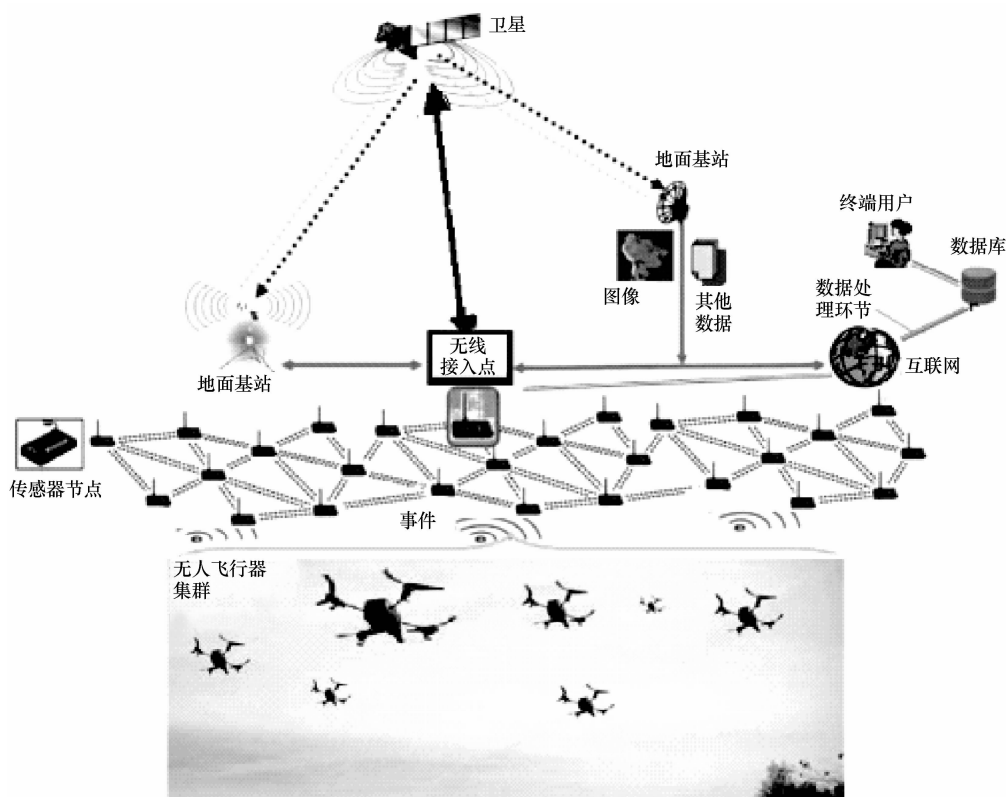


图 1 空中无线传感器网络

的首要目标。

研究人员提出了 S-MAC^[1]、T-MAC^[2]、B-MAC^[3] 以及 PW-MAC^[4] 等单信道 MAC 协议，均采用周期性休眠的低占空比技术来提高能量利用效率，但是，控制分组和数据分组共享同一信道，信道利用率较低^[5-7]；在大规模密集型网络中，干扰碰撞问题更加突出^[8]。此外，周围环境中同质网络如 802.11 网络、Zigbee 网络存在造成的信号干扰，使传输可靠性进一步下降。

随着适用于 WSN 且支持多频服务无线通信模块的面世，通信协议设计中引入多信道技术成为大势所趋。提出了一种基于网络分割的多信道 MAC 协议 (ND-MAC, division-based MAC protocol for wireless sensor networks) 来解决可用信道不足以及网内干扰问题。

2 相关工作

针对单一信道 MAC 协议的局限性，例如，信道利用率低下、抗干扰能力差以及吞吐量较低等问题，越来越多的科研工作者把目光转向多信道 MAC 协议的研究。

MMSN^[9]、TMMAC^[10] 和 MCMAC^[11] 作为 WSN

专用多信道 MAC 协议，其共同点是两跳范围内的邻节点占用不同的信道，消除信道间潜在干扰，实现并行传输。称之为节点级多信道 MAC 协议。

文献[12~16]中将多信道技术应用于配置有 Wi-Fi 无线收发器的 ad hoc 网络，吞吐量大幅提升，由于 ad hoc 网络不考虑能耗问题，节点一直都处于唤醒状态，所以不适用于 WSN。其中，文献[12]提出一种粗粒度信道分配策略来缓解可用信道数目少的问题，但是未考虑节点加入子树之后真实干扰值的变化，导致生成的子树并非最优；将网络分割成可用信道数目的子树，在大型密集型网络中，抑或存在外界未知的无线信号干扰的情况下，协议自适应性较弱。

EM-MAC^[17] 提出一种接收方发起的基于预测机制的快速汇聚多信道 MAC 协议。每个节点利用伪随机函数独立选择自己的工作时间和信道调度表。该协议将网络负载分配到不同信道，降低了数据碰撞发生概率。

文献[18]提出了一种适用于 ad hoc 网络的基于单元格的 MAC 协议，粗粒度信道分配机制将信道指定给相连的网络单元。文献[19]为了实现信道间负载均衡提出一种信道动态筛选策略。

相比于单一信道协议，多信道协议的各方面性能有了大幅提高，但仍存在以下几个问题：1)可用信道数目少，大规模密集型网络中尤为突出；2)节点需要严格的时间同步；3)无线电设备状态的频繁切换；4)频繁切换信道；5)抗干扰能力较差。

3 ND-MAC 协议

3.1 协议框架

ND-MAC 协议由 4 个功能模块组成，如图 2 所示，分别标记为信道探测模块(CD, channel detection)、最优树构建模块(CAOT, construction of approximating optimum tree)、信道分配模块(CA, channel assignment)、数据传输模块(DT, data transmission)。

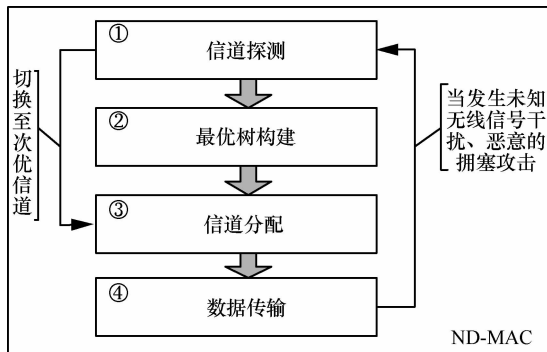


图 2 ND-MAC 协议框架

3.2 网络分割算法设计

3.2.1 模型与问题定义

因为，干扰发生在接收一方，所以在网络分割过程中采用以接收方为中心的干扰值定义^[20,21]。网络分割完成后，不同信道的树间无干扰，所以，干扰值也

要进行更新；网络拓扑结构的静态特征，促使引入碰撞因子来优化网络分割后得到的子树的拓扑结构，采用局部搜索策略对节点之间的拓扑结构进行重新优化组合，降低了树内的最大碰撞因子值。

自身原因或外界环境的影响都会导致节点所维护的干扰集合发生变化。所以，采用保守的计算方法——用干扰半径 I_v 取代通信半径 R ，建立干扰模型^[21]。 $L_v=(1+a) \times R$, $a>0$ ，与仅考虑感知半径 R 范围内节点的干扰影响相比，该干扰模型最大限度地考虑了周边节点对于节点 n 的干扰影响。

节点用四元组 (u_n, s_n, l_n, b_n) 表示，其中，参数 u 表示节点干扰值； s 代表网络分割后的节点的碰撞因子； l_n 代表节点 n 所在层数/深度，例如，基站节点 r 所在层记为 $l_r=0$ ； b_n 作为判断节点是否处在子树交叉覆盖区域，它的值等于遍历过该节点的子树数量。

定义 1 (节点的干扰值)节点的干扰值为指定的干扰范围内，与其同属一棵子树的节点的数目。节点 n 的干扰值计算公式为

$$\text{int}(n)=|N(n)| \quad (1)$$

$$N(n)=\{v|v \in D(n, I_n) \cap (C_v=C_n)\} \quad (2)$$

其中， $D(n, I_n)$ 代表以 n 为圆心，半径为 I_n 的圆， C_v 和 C_n 分别表示节点 v 和节点 n 使用的信道。

定义 2 (节点的碰撞因子)一跳范围内，与该节点属同一棵树并且以其为通往基站方向传输路径的下一跳的所有节点的数目。任一节点 n 的碰撞因子计算公式为

$$\text{col}(n)=|N(n)| \quad (3)$$

$$N(n)=\{v|v \in D(n, I_n) \cap (C_v=C_n) \cap (l_v>l_n)\} \quad (4)$$

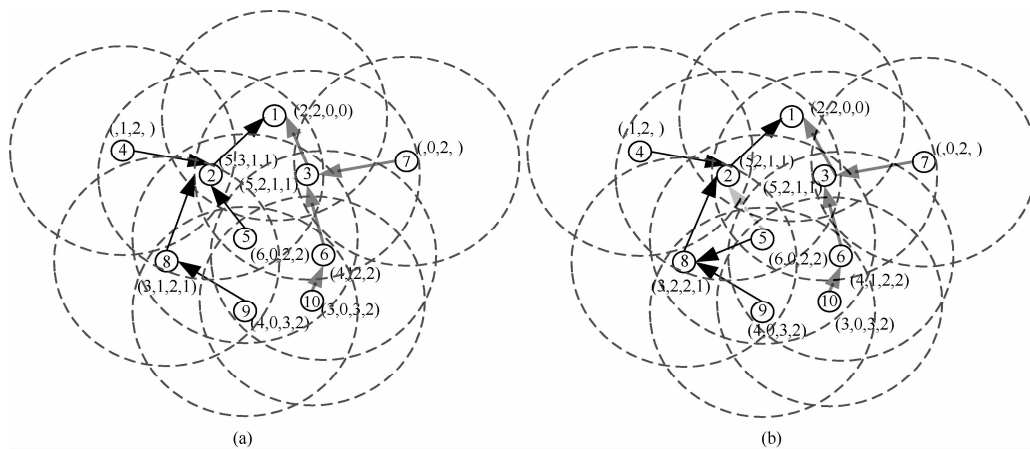


图 3 碰撞因子引入前后，网络拓扑变化

定义 3 (子树的干扰值&碰撞因子)子树 T 的干扰值为该子树中所有节点干扰值的最大值, 计算公式为

$$\text{int}(T) = \max \{ \text{int}(n) \} \quad (5)$$

子树 T 的碰撞因子等于树内节点碰撞因子的最大值, 如式(6)所示。

$$\text{col}(T) = \max \{ \text{col}(n) | n \in T \} \quad (6)$$

3.2.2 NND 算法流程

优化分割属于 NP 完全问题, 不存在确定的算法公式以供使用, 所以 NND 算法在网络初始化阶段采用启发式广度优先搜索算法, 得到每个节点到基站节点的最短路径。

从基站节点开始, 自上而下对整个网络执行广度优先搜索得到一棵源于基站节点的树, 同时得到每个节点的四元组 (u_n, s_n, l_n, b_n) 。参数 u 和 s 的值在网络分割前根据定义 1 计算获得。任意节点 n 一跳范围内的所有节点集合为 S_n 。

NND 算法主要解决子树交叉位置节点的归属问题, 算法流程如下。

Step1 已知节点 n (基站节点除外) 的四元组为 (u_n, s_n, l_n, b_n) 。如果 $b_n > 1$, 表示节点 n 处于树 T_j 和树 T_i 的交叉区域。此时, 两子树树内节点总数为 $|V_i| = |\{v | (v \in T_i) \cap (l_v \leq l_n)\}|$ 和 $|V_j| = |\{v | (v \in T_j) \cap (l_v \leq l_n)\}|$ 。

如果 $|V_j| < |V_i|$, 节点 n 加入树 j ;

如果 $|V_j| > |V_i|$, 节点 n 加入树 i ;

如果 $|V_j| = |V_i|$, 则转入 Step2。

Step2 分别计算节点 n 加入 T_i 和 T_j 后, 总干扰值为 A 和 B 。

当 $A < B$ 时, 节点 n 划入 T_i ;

当 $A > B$ 时, 节点 n 划入 T_j ;

当 $A = B$ 时, 节点 n 划入广度优先搜索过程中第一个访问该节点的子树。

Step3 获取节点 n 在该树中一跳范围内的节点集合。如果只有一个邻节点, 选该节点为父节点; 当 2 个或 2 个以上邻节点时, 在不增加树的深度值的前提下, 优先选择碰撞因子小的节点作为父节点; 如果节点碰撞因子数值相等, 则优先考虑深度最大的节点。

Step4 如果还存在 $b_n > 1$ 的节点, 则跳转到 Step1, 否则算法结束。

举例说明, 图 3(b)中浅色箭头代表 NND 算法

在最小化碰撞因子标准下进行的子树优化。节点 5、6、8、9、10 的四元组中参数 b 的值均大于 1。节点 5 处于网络的第二层, 左右 2 棵树从基站节点到第二层节点数目相同且相邻节点中分别位于 2 棵树中的数目也一样多都是 3 个。左边子树首选遍历到该节点, 现有节点 2、8、9 可选; 如果选择 2, 则碰撞因子值从 2 增加到 3, 选择 8 的树内碰撞因子仍然保持为 2; 选择节点 9, 则子树深度增加, 所以, 最终选择节点 8。

3.3 基于图着色的信道分配算法

定义 4 给定一个无向图 $G=(V,E)$, 其中 V 为顶点集合, E 为边集合。图着色问题转化为将集合 V 划分为 k 个不包含任何边的独立子集合。

着色问题主要用来计算最小的 k 值。用信道数目代表着色问题中的颜色组。已知 k 个颜色组值, 反向利用图着色理论。

在信道分配时, 首先要通过链路质量采样^[1]来获取 k 个可用信道的集合 CH 。基站节点一跳范围内的所有节点集合记为 S_r 。采用邻居发现策略^[1]来实现通信范围内邻节点的发现。

信道分配算法流程如下。

Step1 如果 $S_r \neq null$, 集合 S_r 中任取一个节点 n 。为了很好地解决干扰导致的传输质量下降问题, 通过链路质量采样技术为节点 n 分配一个信道集合 CH_n , 其中, $|CH_n| = \theta, \theta \leq k$, 且 CH_n 按照信道质量高低从大到小的顺序排列, 节点选择最优信道。

Step2 $CH = CH - CH_n, S_r = S_r - \{n\}$ 。

Step3 节点 n 的通信半径 R_n 范围内的所有四元组中成员变量 $l \neq 0$ 的节点集合为 S_n 其中 n 的邻节点集合为 $S_n = S_r \cap S_n$ 。

Step4 如果 $S_n \neq null$, 则从中随机选取一个节点 g , 通过链路质量采样从 CH 选择 $l \neq 0, CH_g = \theta$, 且信道集合中按照传输质量从大到小排列, 节点 n 选用 y , 节点 g 选择信道 x , 需同时满足 $x \in CH_g, y \in CH_n$ 且 x 和 y 互不干扰。

Step5 $CH = CH - CH_g$, 且 $S_r = S_r - \{g\}$ 。

Step6 重复执行步骤 Step4~Step6, 直到 $S_n = null$ 。

Step7 重复执行步骤 Step1~Step7, 直到 $S_r = null$ 时, 信道初次分配结束, 转入动态调整阶段 Step8。

Step8 设置一个动态调整时间周期 T , 即集合 S_r 中节点代表的各子树每隔时间 T (为了降低开销, 调整周期一般为数十分钟左右) 需进行一次链路质

量采样，以便及时应对恶意干扰。

Step9 循环执行 Step1~Step9。

4 实验与仿真结果

选用 GloMoSim 平台运行 ND-MAC, 250 节点随机部署在 200 m×200 m 区域内, 信道动态调整周期 T 设置为 30 min; 节点通信半径大小变化范围为 10 m~35 m, 干扰半径是通讯半径的 1.5 倍 (CC 2420 无线收发器常用干扰模型)。同时在 MAC 层使用的具有确认-重传机制的 CSMA 信道接入方式。

下面 2 组实验来验证 ND-MAC 协议的性能, 如吞吐量、延迟、数据分组传输成功率以及功耗。不考虑时钟漂移和系统延迟等方面造成的时间差错^[15]对于性能的影响。

第一组, 测试不同节点密度下的网络性能, 试验中网络里有 50 个多对一的固定码率数据流。数据传输速率为每秒钟 40 个数据分组, 设置 90% 的置信区间。

如图 4 所示, ND-MAC 性能全面超过了 TMCP 协议: 1) 通过 NND 算法对网络进行精细分割, 生成的子树结构树内干扰值相比 TMCP 协议更低, 减少了潜在的传输过程的无线干扰且网络负荷更均衡, 大幅提高吞吐量; 2) 碰撞因子的引入, 树内发生碰撞的概率大大降低。负载均衡使数据分组传输率和延迟性能都大大提高。

第二组, 测试不同网络负荷下的 ND-MAC 性能。从图 5 中可以看出 ND-MAC 各方面性都要优于 TMCP 协议, 特别在网络负荷较高的情况下。当固定码率数据流 15 (packets/s) 时, 图 5(a) 中 4 信道 ND-MAC 的吞吐量是 TMCP 的 1.4 倍, 而图 6(c) 中显示传输延迟时间仅仅为 4 信道 TMCP 的 85%。此外, 图 5(b) 中 TMCP 的数据分组传输成功率从 97.6% 下降到 94.3%, 而 ND-MAC 传输成功率基本上维持 1% 的波动范围以内。因为 ND-MAC 引入碰撞因子对子树进行优化, 使每棵树内的碰撞因子进一步减少。

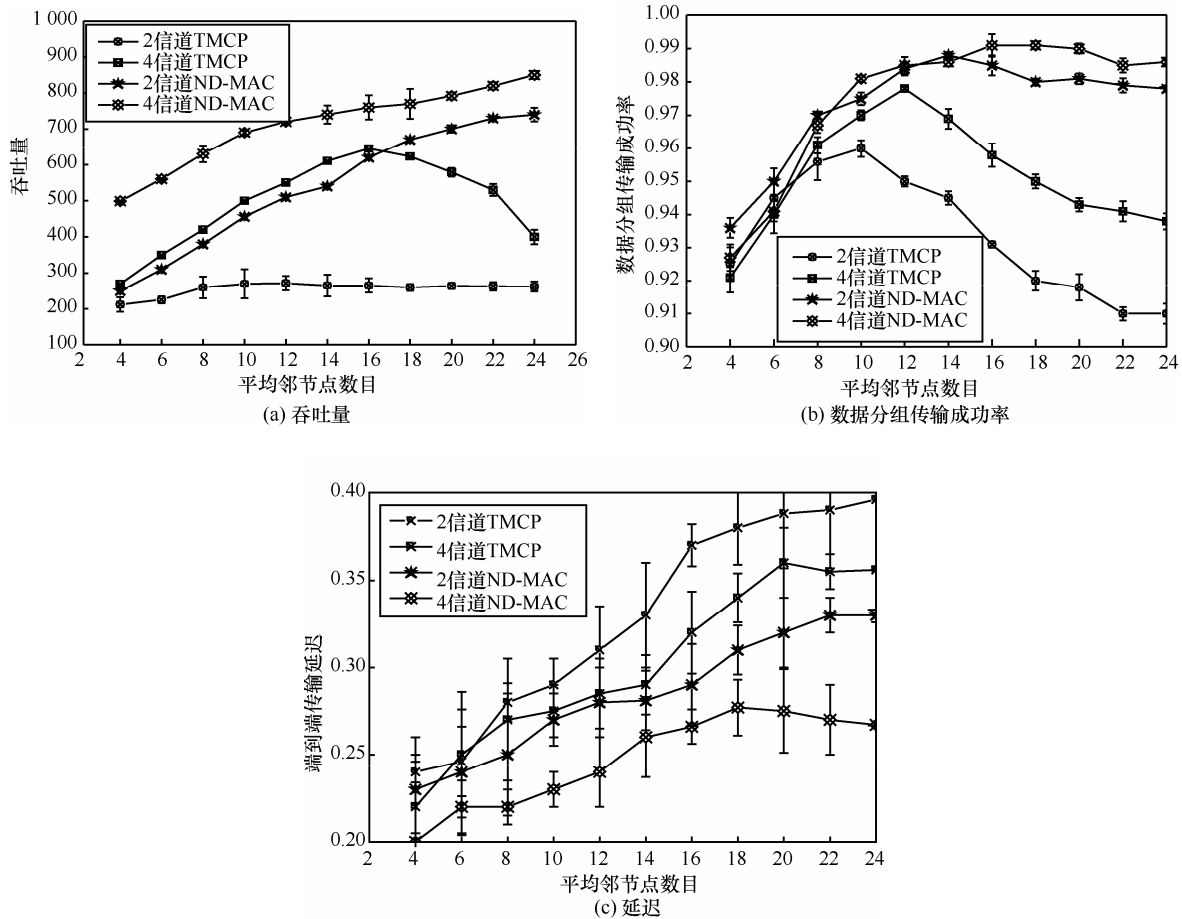


图 4 节点密度变化时, 协议性能对比

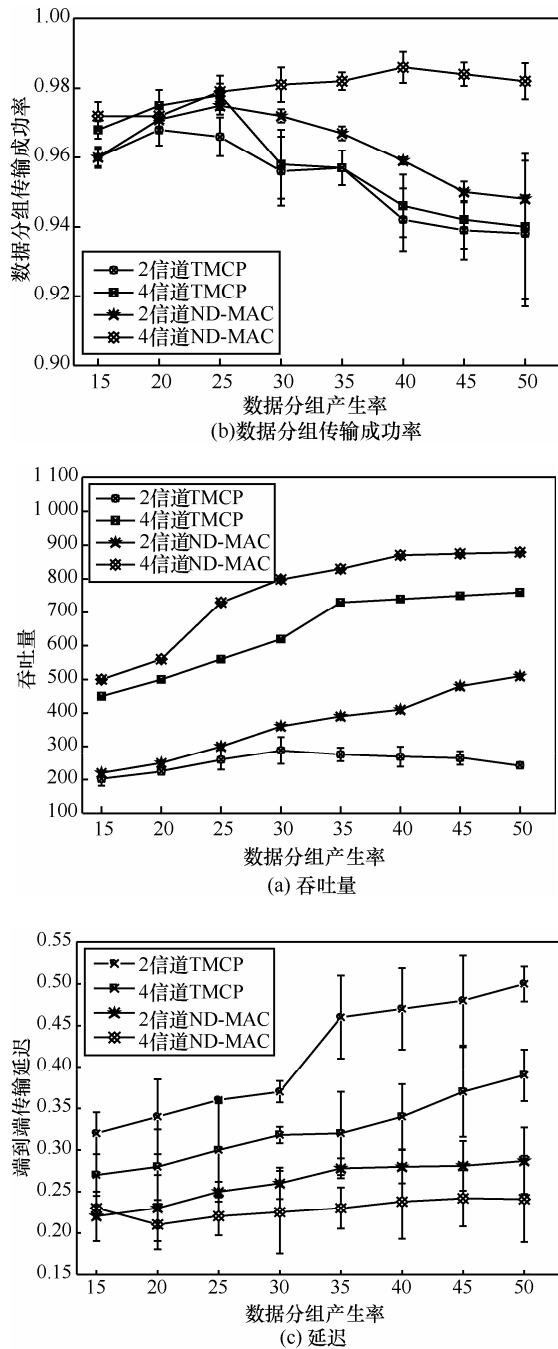


图 5 网络负荷变化时协议性能对比

5 结束语

提出一种适用于大规模无线传感器网络的基于网络分割的多信道 MAC 协议。贴合数据采集型无线传感器网络应用的特点，不仅最小化网络总干扰值，引入碰撞因子优化调整子树拓扑结构，而且降低了子树内的数据碰撞。粗粒度自适应信道分配策略也很好解决了可用信道较少以及干扰问题。

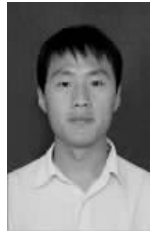
参考文献:

- [1] WEI Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. New York, USA, 2002.1567-1576.
- [2] VANDAM T, LANGEMDOEN K. An adaptive energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. CA, 2003. 171-180
- [3] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 2nd ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems[C]. Baltimore, Maryland, USA, 2004.95-107.
- [4] TANG L, SUN YJ, OMER G, *et al.* PW-MAC: an energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications[C]. Shanghai, China, 2011.1305-1313.
- [5] 李建中, 高宏.无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1):1-15.
- LI J Z, GAO H. Survey on sensor network research[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1):1-15.
- [6] 蹇强, 龚正虎, 朱培栋. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展[J]. 软件学报, 2008, 19(2): 389-403.
- JIAN Q, GONG Z H, ZHU P D. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2008, 19(2): 389-403.
- [7] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 114-124.
- MA Z C, SUN Y N, MEI T. Survey on wireless sensors network[J]. Journal on Communications, 2004, 25(4):114-124.
- [8] CHIEH-JAN M, NISSANKA B, LIU J,*et al.* Surviving Wi-Fi interference in low power ZigBee networks[A]. Proceedings of the 18th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems[C]. Zurich, Switzerland, 2010. 309-322.
- [9] ZHOU G, HUANG C D, YAN T, *et al.* MMSN: multi-frequency media access control for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications[C]. Barcelona, SPAIN, 2006. 1-13.
- [10] ZHANG J B, HUANG C D, SANG H, *et al.* TMMAC: an energy efficient multi-channel mac protocol for ad hoc networks[A]. Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications[C]. CA, USA, 2007. 3554-3561.
- [11] CHEN X, HAN P, HE Q S, *et al.* A multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Computer and Information Technology[C]. Seoul, South Korea, 2006.224-228.
- [12] WU Y F, JOHN A, HE T, *et al.* Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications[C]. Moscow, Russia, 2008.1193-1201.
- [13] PARAMVIR B, RANVEER C, JOHN D. SSCH: slotted seeded chan-

nel hopping for capacity improvement[A]. IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Philadelphia, USA, 2004.216-230.

- [14] HOI SHEUNG W S, JEAN W, JEONGHOON M. McMAC: a parallel rendezvous multi-channel MAC protocol[A]. Proceedings of the 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. HongKong, China, 2007. 334-339.
- [15] TZAMALOUKAS A, GARCIA L A. A receiver-initiated collision-avoidance protocol for multi-channel networks[A]. Proceedings of the Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. Anchorage, Alaska, 2001.189-198.
- [16] CHEN X, HAN P, HE Q S, *et al.* A multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Computer and Information Technology[C]. Seoul, South Korea, 2006. 224-228.
- [17] TANG L, SUN Y J, OMER G, *et al.* EM-MAC: a dynamic multichannel energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 12th ACM international symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. Paris, France, 2011.16-19.
- [18] RAMANUJA V, SANDEEP K, SRIRAM L. Component based channel assignment in single radio, multi-channel ad hoc networks[A]. Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. California, USA, 2006. 378-389.
- [19] HIEU K L, DAN H, TAREK A. A control theory approach to throughput optimization in multi-channel collection sensor networks[A]. Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks[C]. CA, USA, 2007.31-40.
- [20] MARTIN B, PASCAL V R, ROBERT W, *et al.* Does topology control reduce interference?[A]. Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. Tokyo, Japan, 2004. 9-19.
- [21] ZHOU G, HE T, STANKOVIC A, *et al.* RID: radio interference detection in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. Miami, USA, 2005.891-901.

作者简介:



程宾 (1985-), 男, 山东聊城人, 北京理工大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络、移动计算。



慈林林 (1950-), 男, 安徽桐城人, 北京理工大学博士生导师, 主要研究方向为移动计算、人工智能。



田成平 (1985-), 男, 甘肃庆阳人, 北京理工大学博士生, 主要研究方向为移动车载网、移动计算。



杨明华 (1977-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士后, 主要研究方向为移动计算技术、可信计算技术。