

用于无线传感器网络的高能效分帧 MAC 协议

张佳薇¹, 陈 岩², 李明宝³

(1. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 武汉三江航天房地产开发有限公司, 湖北 武汉 430040;
3. 东北林业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 为进一步降低传感器节点闲置侦听导致的能量消耗, 改进 MAC (media access control) 协议, 提出了一种用于无线传感器网络的新型的节能的分帧 MAC (division-frame MAC, DF-MAC) 协议. DF-MAC 通过设置多个分帧使传感器节点的侦听时间缩短, 减少了与其它节点通信所需的能量. DF-MAC 有 2 个主要特点: 低占空比和低碰撞数. 在 DF-MAC 中碰撞数被降到最小程度, 节省了重发封包所需的能量. 仿真结果表明, 与现有的 MAC 协议相比, 能量消耗更低.

关键词: 低功耗; MAC 协议; 无线传感器网络

中图分类号: TP 393

文献标识码: A

文章编号: 1002-0411(2013)-01-0095-05

An Energy-Efficient Division-Frame MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

ZHANG Jiawei¹, CHEN Yan², LI Mingbao³

(1. College of Electromechanical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Sanjiang Space Estate Development Co. LTD, Wuhai 430040, China;
3. College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to decrease the energy consumption in idle listening of each sensor node and improve MAC (media access control) protocol, a novel energy-efficient division-frame MAC (DF-MAC) protocol is proposed for wireless sensor networks. DF-MAC allows sensor nodes to reduce their listening time by setting multiple division-frames, which will then reduce the energy consumption in communications with other nodes. DF-MAC has two main advantages, i.e. low duty cycle and small number of collisions. The minimization of collisions number in DF-MAC can save the energy required by retransmission of corrupted packets. Simulation results show that DF-MAC outweighs existing MAC protocols in the aspect of energy consumption.

Keywords: low energy consumption; MAC (media access control) protocol; wireless sensor network (WSN)

1 引言 (Introduction)

无线传感器网络是由部署在监测区域内的大量廉价微型传感器节点组成的, 通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统. 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息, 并发送给观察者^[1]. 大多数传感器的节点由电池驱动, 通常被部署在恶劣和远程的环境, 所以它们不能再充电. 因此, 如何提高能源效率是延长网络寿命的一个非常重要的问题.

无线传感器网络存在 4 种可能的能量浪费^[2]:

(1) 碰撞引起的数据重发; (2) 由于串音造成的节点接收并处理不必要的数据; (3) 空闲侦听; (4) 控制信息过多. 在 IEEE 802.11 中, 空闲时的功耗几乎和接收数据时一样, 这接近 WSN 总能量消耗的 30%^[3], 所以空闲侦听是能源浪费的主导因素. 在侦

听/睡眠周期方案中, 传感器节点周期性地关闭它们的无线电收发设备随之进入睡眠模式, 这将最大程度地减少空闲侦听. 帧长度 T_f 包括侦听和睡眠时间. 定义占空比为 T_{listen}/T_f , T_{listen} 是侦听时间的一个循环. 较低的占空比能节省更多的能量^[4]. S-MAC (sensor-MAC)^[5,6]、T-MAC (timeout-MAC)^[7,8] 和其它一些同样的 MAC 协议为了得到更高的能源效率都尽量减小占空比.

本文提出了一种改进的分帧 MAC (DF-MAC) 协议. 该协议通过减少闲置侦听的时间和碰撞数来实现比 S-MAC 和 T-MAC 更低的节点功耗. DF-MAC 是一个基于竞争的分布式 MAC 协议, 节点基于邻节点的无线电信号的强度来判断其是否处于工作状态. 同时, DF-MAC 是一种自组织 MAC 协议, 不需要设置中央节点控制其它节点.

2 能耗分析 (Energy consumption analysis)

如图 1 所示, 在 DF-MAC 中, 每一帧被分为 2 个阶段: 侦听和睡眠. 侦听期被进一步分为 N 个分帧. 节点被分配在分帧集之中, 每一个分帧中的每个节点遵循一个时间被错开的侦听/睡眠时间表. 因此, 节点在不同分帧的侦听周期是不重叠的. 在 DF-MAC 协议中, 节点只在其所在分帧被唤醒. 节点分配到哪个分帧是不受限制的. 根据部署, 每个节点会用随机均匀分配的方式随机地选择一个分帧. DF-MAC 采用分帧有 3 个主要的优点:

(1) 降低能量消耗. 在每个阶段, 侦听周期的缩短与分帧数成正比. 因此, 与 S-MAC 协议相比, DF-MAC 在侦听周期期间的能量损失降低了.

(2) 低平均流量. 在 DF-MAC 中与一个分帧有联系的节点数量是网络中节点总数的一小部分. 这样就使平均流量更小并且在一定程度上降低了碰撞的几率. 因此, 在 DF-MAC 中碰撞的几率降低, 从而节省了重新发送碰撞包和相关控制包所需的能量.

(3) 延长网络的使用寿命. 通过减少节点的能量消耗, 节点和网络的使用寿命也有所增加.

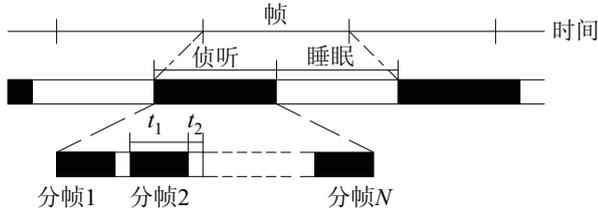


图 1 DF-MAC 设计概图

Fig.1 Design overview of DF-MAC

更短的侦听周期增大了节点在睡眠模式下生成数据包的概率. 这些数据包为即将到来的侦听周期中的数据作缓冲, 这将导致更长的数据包延迟. 然而, 由于延迟不是一个主要的设计因素, 在大多数传感器网络应用程序中这种影响是可以接受的.

本设计采用二进制指数退避算法^[9]. 分布式协调 (distributed coordination function, DCF) 是一种基于带冲突避免的载波侦听多路访问 (carrier sensor multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) 二进制指数退避算法的随机存取方案^[10]. 在 S-MAC 中, 节点利用同步控制包播送它们的时间表给其它节点. 本文采用同样的方式. 此外, 为了防止时钟漂移, 节点周期性地更新它们的时间表来交换同步控制包. 这个控制包是很短暂的, 并且它不仅具有该节点的编号还有接入分帧下一个侦听周期的时间.

3 参数设计 (Design parameters)

DF-MAC 协议设计参数的取值, 可以通过以下

符合它的设计规范和要求的计算方法来描述一个指定应用来获得:

步骤 1: 计算帧持续时间 T_f . 对于给定的最大响应时间延迟 T_R (由响应和报告事件的时间来决定) 来说, 帧持续时间 T_f 是有上限的:

$$T_f \leq T_R \quad (1)$$

T_f 也受所有分帧的总的侦听时间的限制:

$$T_f > t_1 \times N \quad (2)$$

其中, t_1 是一个分帧的侦听周期, 在步骤 2 中将会提及; N 是分帧的数量. 帧数量 N_f 的取值范围:

$$\frac{T_N}{T_R} \leq N_f < \frac{T_N}{t_1 \times N} \quad (3)$$

步骤 2: 计算每个分帧侦听周期 t_1 . 一个分帧的侦听周期的持续时间 t_1 是由电池容量 C (单位: mA·h) 和节点平均功耗 ρ 决定的:

$$\rho \times t_1 \times N_f \leq C \times v \quad (4)$$

其中 v 是电池的平均输出电压. 由式 (4) 可知, t_1 的取值范围为

$$t_1 \leq \frac{C \times v}{\rho \times N_f} \quad (5)$$

同时, t_1 受至少发送一个数据包所需时间的限制:

$$t_1 > \tau_t + \tau_p + 2\tau_d + W\tau_p \quad (6)$$

其中, τ_t 是数据包传输延迟, τ_p 是传播延迟, τ_d 是时钟漂移延迟, W 是最大时隐数 (窗口尺寸).

由式 (5) 和 (6) 可知, t_1 的取值范围为

$$\tau_t + \tau_p + 2\tau_d + W\tau_p < t_1 \leq \frac{C \times v}{\rho \times N_f} \quad (7)$$

步骤 3: 估计分帧数 N . 分帧数 N 是基于每个分帧在一个完整帧所产生的平均通信量得出的:

$$\lambda_{\text{avg}} = n \times \lambda \times T_f \quad (8)$$

那么, 总侦听时间应大于发送节点生成的全部包所需的时间:

$$N \times t_1 > \lambda_{\text{avg}} \times \left(\tau_t + \tau_p + 2\tau_d + \frac{W}{2} \tau_p \right) \quad (9)$$

因此, 从式 (9) 得到 N 的取值范围是:

$$N \geq \frac{\lambda_{\text{avg}} \times \left(\tau_t + \tau_p + 2\tau_d + \left(\frac{W}{2} \right) \tau_p \right)}{t_1} \quad (10)$$

此外, 分帧间保护时间 t_2 满足下列不等式:

$$t_2 > \tau_p + 2\tau_d \quad (11)$$

所以, N 的上限是:

$$N(t_1 + t_2) \leq T_f \quad (12)$$

因此, 由式 (10) ~ (12) 得到 N 的取值范围:

$$\frac{\lambda_{\text{avg}} \times (\tau_t + \tau_p + 2\tau_d + (W/2)\tau_p)}{t_1} \leq N \leq \frac{T_f}{t_1 + t_2} \quad (13)$$

应用中的其它参数和要求, 如节点延迟局限性和缓冲区大小, 也可以用来决定以上这些时序参数的值和指定部署多少个分帧, 以得到最好的性能.

4 仿真和结果 (Simulation and results)

采用的仿真环境是 Matlab 7.8.0. 对 DF-MAC 协议与 S-MAC 协议的性能进行模拟, 比较实验结果.

为了进行 DF-MAC 仿真, 作以下假定:

- (1) 节点产生的封包遵循泊松分布规律.
- (2) 时间被分为由侦听和睡眠周期组成的每一帧.
- (3) 每个节点的运行方式: 传输、侦听和睡眠.
- (4) 节点有无限大小的发射和接收缓冲区.
- (5) 所有 MAC 操作都是基于 IEEE 802.11.
- (6) 无线通信信道假定没有带宽约束.

无线收发器在传输、侦听和睡眠模式的能源消耗分别是 24.75 mW、13.5 mW 和 15 μ W^[2]. 无线收发器的数据传输率是 19.2 kb/s. 根据假设 4, 数据包不会丢失, 因为这些包最终都要被发送到目的地. 表 1 总结了数值仿真的参数值选择.

表 1 数值仿真的参数值选择

Tab.1 The parameter values chosen for numerical simulations

参数	数值	单位
到达间隔时间 T	2 ~ 11	s
接入分帧数量 N	1 ~ 10	
节点数量 n	100	
帧持续时间 T_f	1	s
分帧持续时间 t_1	0.3/ N	s
初始预留位数 W	8	
节点传输功率	24.75	mW
节点侦听功率	13.5	mW
节点睡眠功率	15	μ W
节点数据传输率	19.2	kb/s
平均数据包长度 α	38	bytes
仿真时间	200	s

4.1 整体能源消耗

图 2 是 S-MAC 和当 $N=3$ 时 DF-MAC 的节点平均能源消耗的比较. 这表明在通信拥堵, 即信息

到达间隔时间不超过 5 s 时, DF-MAC 消耗的能量比 S-MAC 的低 52%, 而且通信量少, 即信息到达间隔时间大于 5 s 时为 64%. 在 DF-MAC 中, 侦听周期短于 S-MAC, 这个结果体现在降低能量消耗上.

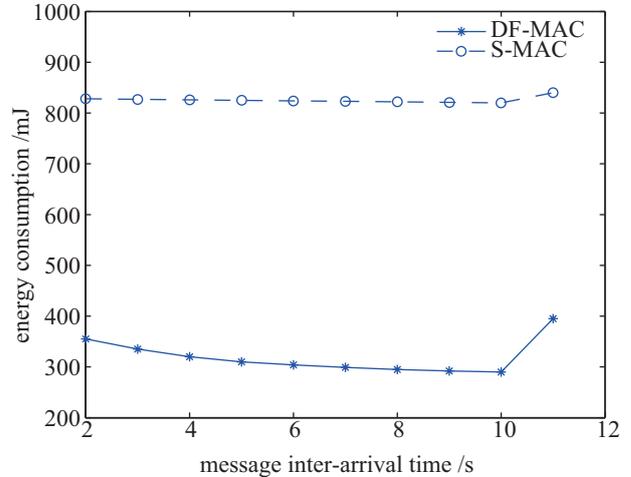


图 2 S-MAC 和 DF-MAC 当 $N=3$ 时每个节点的能耗
Fig.2 Energy consumption per node for S-MAC and DF-MAC when $N=3$

图 3 所示的是一个节点在整个仿真时间的总能耗, 随分帧数 N 的增加从 1 到 10 的变化. 通信量固定在 $\lambda = 0.2$ packet/s.

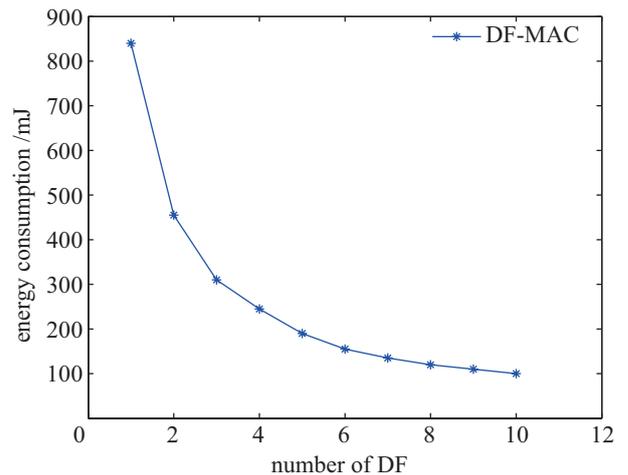


图 3 DF-MAC 每个节点的能耗随分帧数的增加的变化
Fig.3 Changes of energy consumption per node for DF-MAC with the increase of DF numbers

当 $N=5$ 时, 能源消耗迅速降低. 然而, 超过 5 个后节能效果就不显著了, 因为大部分数据包发送到其它分帧并且节点在不同时间表里要花更多的时间来唤醒.

4.2 平均封包延迟

由于在 DF-MAC 下节点有更多的睡眠, 所以数据包会遇到更多的延迟. 数据包被储存在节点发送

缓冲区,直到它被没有碰撞地成功发送,所以此延迟是一个数据包可能遭遇的潜在因素.此延迟由2部分所组成:

(1) 排队延迟,因为一个数据包可能送去另一个分帧或者在节点处于睡眠模式时它已经生成.

(2) 传输延迟.

因此,在 DF-MAC 中数据包将被推迟一帧的周期.如图4所示,DF-MAC 有比 S-MAC 和 IEEE 802.11 更长的延迟.

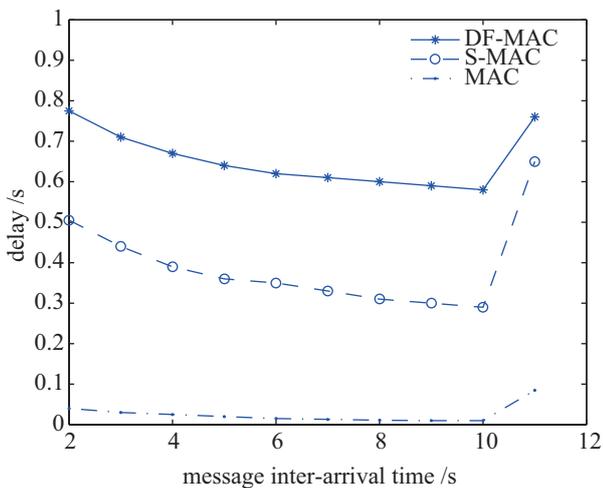


图4 IEEE 802.11、S-MAC 和 DF-MAC 当 $N=3$ 时发送所有数据包的平均延迟时间

Fig.4 Average delays for all packets sent for IEEE 802.11, S-MAC and DF-MAC when $N=3$

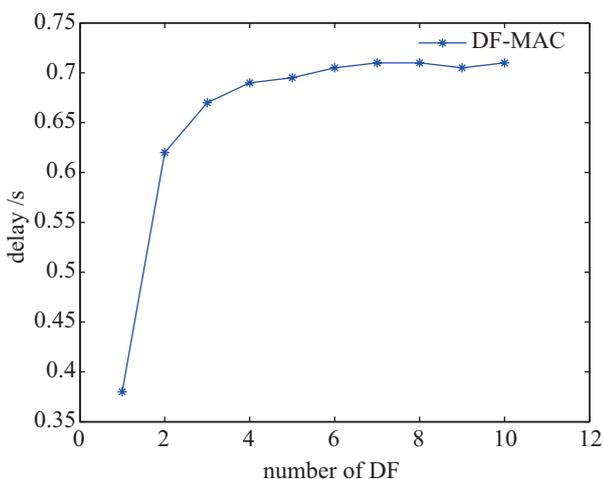


图5 DF-MAC 发送所有数据包的平均延迟时间随分帧数的增加的变化

Fig.5 Changes of average delay for all packets sent for DF-MAC with the increase of DF numbers

在本仿真中, S-MAC 每个节点睡眠模式时间固定在 70%,因为它有一个固定的占比.然而,在 DF-MAC 中占比相同时,节点睡眠时间为 90%.在仿真中 IEEE 802.11 没有睡眠模式,这使得延迟

最小.

图5所示为通信量固定在 $\lambda = 0.2$ packet/s 时增加更多个分帧的延迟效果.如果分帧数少于3,延迟将会迅速增加.但是,当添加更多的分帧时,数据包不会有更多的延迟,因为它们经常为下一个或第3个帧周期作缓冲.结果表明,DF-MAC 增加的延迟与分帧数不成正比.

4.3 碰撞数量

图6所示为 DF-MAC 通信量固定在 $\lambda = 0.2$ packet/s 时通过增加更多个分帧使碰撞数量大幅下降.然而,大约6个之后,碰撞数减少幅度将大大降低,因为每个分帧的数据包请求已经分布得很充分,碰撞已经被降低了.为了验证仿真结果,实验中增加了碰撞数.

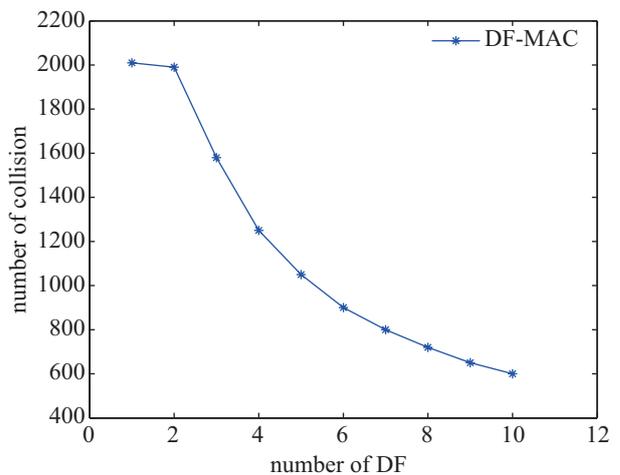


图6 DF-MAC 碰撞数随分帧数的增加的变化

Fig.6 Number of collisions for DF-MAC changes with the increase in the number of DF

5 结论 (Conclusion)

本文提出了一种改进的无线传感器网络 MAC 协议——DF-MAC. DF-MAC 将节点分布到 N 个分帧来减少空闲侦听的时间.节点的侦听时期在不同分帧是不重叠的.这将从空闲侦听和碰撞两方面来降低能耗,提高能源利用效率.结果表明,DF-MAC 在节约能源方面优于 S-MAC. DF-MAC 有极低的占比,在任何给定时间减低通信活动,并在假设的 DF-MAC 的特定参数下降低碰撞的概率.

本文的研究仅针对 WSN 节能问题提出 DF-MAC 协议,在节能的同时,如何提高无线传感器网络协议的普适性,是下一步的研究内容.在今后的研究中,对于如何保护整体网络的安全,避免网络采集的信息被盗取、修改,防范网络受到攻击等方面还需完善.

参考文献 (References)

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] 任丰源, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络 [J]. *软件学报*, 2003, 14(7): 1282-1291.
Ren F Y, Huang H N, Lin C. Wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [3] 余旭涛, 张在琛, 毕光国. 一种提高能量效率的 Ad Hoc 网络 MAC 层协议 [J]. *计算机学报*, 2006, 29(2): 256-266.
Yu X T, Zhang Z C, Bi G G. A MAC protocol for improving energy efficiency of Ad Hoc networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(2): 256-266.
- [4] 叶茂, 包志华. 无线传感器网络 S-MAC 协议的分析与改进 [J]. *现代计算机*, 2007(8): 52-54.
Ye M, Bao Z H. Analysis and improvement of S-MAC protocol of wireless sensor network[J]. *Modern Computer*, 2007(8): 52-54.
- [5] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 2004, 12(3): 493-506.
- [6] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//*Proceedings of the Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 1567-1576.
- [7] Van Dam T, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//*Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. New York, NJ, USA: ACM, 2003: 171-180.
- [8] Koutsakis P. On increasing energy conservation for wireless sensor networks[C]//*International Conference on Wireless and Mobile Communications*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4-14.
- [9] Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE 802.11 protocol: Design and performance evaluation of an adaptive back of mechanism[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(9): 1774-1786.
- [10] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.
- [11] 吴华佳, 赵晓鸥, 邱天爽, 等. 脉冲噪声环境下基于分数低阶循环相关的 MUSIC 算法 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(9): 2269-2272.
Wu H J, Zhao X O, Qiu T S, et al. A MUSIC algorithm based on the fractional lower order cyclic correlation in impulsive noise environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(9): 2269-2272.
- [12] 黄知涛, 王玮华, 姜文利, 等. 一种基于循环互相关的非相干源信号方向估计方法 [J]. *通信学报*, 2003, 24(2): 108-113.
Huang Z T, Wang W H, Jiang W L, et al. A cyclic cross-correlation based direction-of-arrival estimation approach[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2003, 24(2): 108-113.

(上接第 88 页)

作者简介:

狄小峰 (1979-), 女, 博士生. 研究领域为服务科学, 企业信息集成, 分布式本体建模.
郭剑锋 (1976-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域为信息管

作者简介:

张佳薇 (1975-), 女, 博士, 副教授. 研究领域为参数智能检测, 多传感器数据融合.
陈岩 (1985-), 男, 硕士生. 研究领域为无线传感器网络.
李明宝 (1969-), 男, 博士, 教授. 研究领域为分布式参数检测.

作者简介:

郭莹 (1975-), 女, 博士, 讲师. 研究领域为无线定位, 自适应滤波算法.
孟彩云 (1986-), 女, 硕士生. 研究领域为自适应滤波算法.

(上接第 94 页)

理, 知识工程和业务流程优化等.

范玉顺 (1962-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为企业建模与业务优化, 企业信息化规划与服务科学等.