

WSNs 节点随机参数优化配置与性能分析

蒋文贤, 蔡惠娟

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 研究在不同的部署方式下,无线传感器网络(WSNs)节点可能存在的最优化性能参数配置. 针对随机分布的线性无线传感器节点部署方式,分析媒体访问控制协议和服务质量性能指标,提出业务负载计算模型和吞吐量计算模型. 通过实验建模,仿真分析不同配置下的网络负载、吞吐量、数据丢包率等统计量,验证了两个模型的正确性,并得出 WSNs 节点随机部署方式下的最优化网络性能参数配置.

**关键词:** 无线传感器网络; 性能优化; 节点部署; ON/OFF 模型; RTS/CTS 协议

**中图分类号:** TP 393                      **文献标志码:** A

节点部署是无线传感器网络应用的一个基本问题,决定着传感器监测物理空间的效果,进而影响传感器网络的服务质量<sup>[1]</sup>. 常见的节点部署方式可分为确定性部署与随机性部署两类<sup>[2]</sup>. 由于传感器节点具有固定性、低功耗、低运算能力、通信距离有限等特点<sup>[3]</sup>,在部署过程中还须考虑如传输功率、覆盖范围等问题,以保证节点的连接性和可靠性. 然而,网络节点部署方式和服务质量(quality of service, QoS)<sup>[4-5]</sup>,如数据丢包率、网络吞吐量、网络负载、端到端时延等性能,这两者任何一方面的变动,都会以牺牲另一方面的性能为代价,所以两者之间必然存在一个性能的折中点<sup>[6]</sup>. 针对保障 QoS 性能的应用场景,IEEE802.11 媒体访问控制(media access control, MAC)协议<sup>[7]</sup>通过请求发送/允许发送机制(request to send/clear to send, RTS/CTS)<sup>[8]</sup>,能提供高吞吐量、低数据、丢包率,且有较高的传输数据率,符合此特定的应用场景需求. 本文在文献[9]提出的移动自组织网络性能分析方法的基础上,利用 OPNET 对随机分布的线性节点部署方式下的无线传感器网络进行建模与仿真,提出了业务负载计算模型和吞吐量模型.

1 网络建模分析

网络仿真<sup>[10]</sup>可根据应用需求和评价指标设计网络模型,获取在不同网络参数和业务流量条件下的运行数据,通过仿真工具如 NS-2<sup>[11]</sup>,OPNET 等分析并验证网络设计方案,非常适合于无线传感器网络的研究.

1.1 网络协议开销

针对如何判断网络性能是否达到最优化,首先引入了协议开销的概念<sup>[8,12]</sup>. 业务总负载( $L_{tot}$ ),数据传输率( $\eta$ ),以及协议开销( $W$ )存在如下关系:当  $L_{tot} > \eta - W$  时,数据丢包率和端到端时延性能下降;当  $L_{tot} = \eta - W$  时,网络各种性能达到最优;当  $L_{tot} < \eta - W$  时,吞吐量性能未达到最优. 由此可见,当且仅当  $L_{tot} = \eta - W$  成立时,网络性能达到最优.

1.2 网络模型

网络由  $k$  个节点随机分布在一定的区域内,且在该区域内,节点间可以通过无线链路相互通信. 网络拓扑,如图 1 所示.

### 1.3 业务负载计算模型

业务负载是衡量网络 QoS 的重要指标. 根据上述的网络模型, 令  $k$  个节点  $n_0, n_1, \dots, n_{k-1}$  随机部署在网络区域中, 并在相关配置下进行通信. 实验采用 OPNET 提供的 ON/OFF 模型<sup>[12]</sup>,  $t_{\text{on}}$  表示平均 ON 的持续时间;  $t_{\text{off}}$  表示平均 OFF 的持续时间;  $L_{\text{avg}}$  为其数学模型的计算平均业务总负载, 其中: 令业务开始时间为  $t_B$ , 业务结束时间为  $t_E$ , 每个节点发送数据包的时间间隔服从指数分布, 其均值为  $\tau(s)$ , 且每个节点发送的数据包大小服从泊松分布, 均值为  $P(B)$ , 则平均业务总负载为

$$L_{\text{avg}} = \frac{t_{\text{on}} \times (t_E - t_B) \times P}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}} \times \tau}. \quad (1)$$

由于式(1)是基于 ON/OFF 数学模型下的平均业务总负载, 只考虑 ON/OFF 下的情况, 而未考虑节点个数、传输功率和信道带宽问题, 所以理论上的数值并不精确, 会比实际所得的大很多.

以下提出了业务总负载的新的计算方式, 即设任意节点  $i$  的业务负载为  $L(i)$ , 其计算式为

$$L(i) = \frac{t_{\text{on}} \times P \times 8}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}} \times \tau}, \quad (2)$$

节点通信所产生的业务总负载  $L_{\text{tot}}$  为

$$L_{\text{tot}} = \sum_{i=0}^{k-1} L(i). \quad (3)$$

$\eta$  为无线传感器网络的数据传输率即带宽的大小  $0.25 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ , 则式(2)~(3)考虑了节点数目和数据包大小, 与本实验模拟仿真的实验相一致. 在后续的实验仿真中, 将使用式(2)~(3)作为业务总负载的估算方式, 并与实际模拟所得的实验数据进行比较分析, 从而进一步验证公式的合理性.

### 1.4 吞吐量模型

定义变量  $S$  表示网络吞吐量. 由于本模型属于单跳的网络, 模型中的各个节点可以彼此监听到对方的无线通信; 同时, 无线传感器网络中虽使用 RTS/CTS 机制, 但数据碰撞完全可以避免且节点主要通过 ACK 确认数据传输成功与否.

在 RTS/CTS 下, 发送一个完整的数据包包括 MAC 头, RTS, CTS, ACK 以及数据包长度等. 因此, 再定义变量  $E[P_i]$  表示节点  $i$  传输的完整的数据包的长度, 则可得

$$E[P_i] = P + P_{\text{MAC}} + P_{\text{RTS}} + P_{\text{CTS/ACK}}. \quad (4)$$

式(4)中:  $P_{\text{MAC}}$  为 MAC 头数据大小;  $P_{\text{RTS}}$  为 RTS 数据大小;  $P_{\text{CTS/ACK}}$  为 CTS/ACK 数据大小之和.

网络的总单跳吞吐量与空间范围的再利用存在一定的关系. 对于给定无线传输范围, 空间的再利用与网络的物理范围成比例. 假设节点的密度  $\theta$  为均匀分布, 网络的物理区域大小为  $A(\text{m}^2)$ , 则  $A$  与节点总数  $k$  存在关系  $A = k/\theta$ . 因此, 网络的总单跳吞吐量  $S$  与网络区域成比例, 即

$$S = \alpha A = (\alpha k)/\theta. \quad (5)$$

式(5)中:  $\alpha \approx 0.25 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ .

假设每个节点产生的数据包数率为  $\lambda$ , 源节点到目的节点的物理传输距离  $d$ , 这意味着最小跳数下发送一个数据包需要  $d/r$ ,  $r$  为固定的无线传输范围. 因此, 总的单跳网络吞吐量需要发送和转发的数据包需服从下式

$$S > k \times \lambda \times d/r. \quad (6)$$

与式(5)结合, 则  $\alpha k/\theta > k\lambda d/r$ , 每个节点的可用吞吐量, 有上界. 即

$$\lambda < \alpha r/\delta d = \frac{S/k}{d/r}. \quad (7)$$

随着路径长度的增加, 每个节点用于产生数据包的可用带宽减少. 每个源节点初始化数据包并随机的选择目的节点, 且一个节点选择任意节点的概率相等, 节点  $Y$  选择距离  $x$  内的目标节点与以  $Y$  为中心, 以  $x$  为半径的圆内的节点数目成比例(假设  $Y$  是网络中心, 且无边界效应, 这样计算的期望路径长

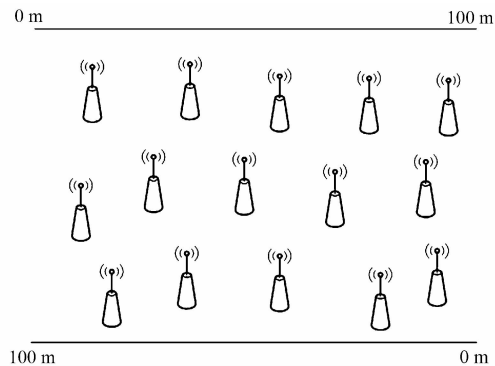


图1 无线传感器网络拓扑模型

Fig. 1 Wireless sensor network topology model

度会小些). 当节点密度为常量, 节点数目与半径为  $x$  的圆盘区域成比例, 即与  $x^2$  成比例. 这是种节点间在  $x$  距离单元内的非标准累积分布 (CDF), 其最大的距离为  $\sqrt{A}$ , 对 CDF 归一化可得概率密度分布 (PDF). 一个节点与位于  $x$  距离处的节点进行通信的概率为

$$p(x) = x / (\int_0^{\sqrt{A}} t dt).$$

(8)

随机通信下的期望路径长度  $d$  为

$$d = x / (\int_0^{\sqrt{A}} x p(x) dx) = 2\sqrt{A}/3.$$

(9)

传输损耗情况  $L_p$  为

$$L_p = \frac{\lambda}{4\pi d}.$$

(10)

令  $w$  表示传感器节点的传输功率,  $w$  与传感器节点的通信范围呈正相关, 则综上各因素的分析可得本模型的吞吐量  $S$  为

$$S = r \times w \times L_p \times \frac{k \times E[P_i] \times 8}{\eta \times \tau}.$$

(11)

1.5 业务配置

根据网络模型, 线性随机地部署 15 个传感器节点在  $A$  为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的区域内. 所有节点的传输速率均为  $0.25\text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ , 业务产生采用 ON/OFF 模型. 高层包在 MAC 层中启用了 RTS/CTS, 传输功率为  $0.035\text{ W}$ . 业务配置如表 1 所示. 表 1 中:  $n$  为移动节点个数;  $\tau_{\text{avg}}$  为包平均到达间隔;  $\eta$  为数据传输率;  $w$  为传输功率;  $t$  为仿真时间. 根据配置还可以通过式 (2)~(3) 计算业务总负载约为  $132\text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而实验收集的数据显示, 实验结果仅略低于  $L_{\text{tot}}$ , 而远低于  $L_{\text{avg}}$ , 可见  $L_{\text{tot}}$  的计算方式更适用于本实验模型.

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

仿真主要参数	具体配置	仿真主要参数	具体配置
$n/\text{个}$	15	$w/\text{W}$	0.035
$t_{\text{B}}/\text{s}$	Constant(5)	RTS 门限/B	128
$t_{\text{on}}/\text{s}$	100	拆分门限/B	256
$t_{\text{off}}/\text{s}$	0	CTS-to-self	Disabled
$\tau_{\text{avg}}/\text{s}$	Exponential(0, 1)	modulation	bpsk
$P/\text{B}$	Possion(110)	$t/\text{s}$	180
$\eta/\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$	0.25		

对于吞吐量  $S$ ,  $P$  为 110 B,  $P_{\text{MAC}}$  为 47 B,  $P_{\text{RTS}}$  为 40 B,  $P_{\text{CTS/ACK}}$  大小为 39 B, 因此  $E[P_i]$  为 236 B,  $r$  为 30m,  $\eta$  为  $0.25\text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ , 此处取  $d = 2\sqrt{A}/3$ . 将参数带入式 (11) 中, 可得到相应的吞吐量  $S$  为  $125\text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这一结果与实验数据十分接近.

2 仿真结果分析

2.1 仿真实验

实验仿真分析数据包大小 ( $P$ )、包到达间隔 ( $\tau$ ) 和节点数 ( $n$ ) 这 3 个网络参数的配置对网络性能的影响, 以及 3 个参数相互之间的关联性. 在实验过程中收集数据丢包率 ( $\eta$ )、端到端时延 ( $t_d$ )、业务总负载 ( $L_{\text{tot}}$ )、网络负载 ( $L_w$ )、平均吞吐量 ( $S_{\text{avg}}$ ) 等统计量.

- 1) 仿真实验 1. 当节点数目为 15, 包到达间隔为  $0.1\text{ s}$  时, 改变数据包大小, 仿真结果如表 2 所示.
- 2) 仿真实验 2. 节点数为 15, 数据包大小为 110 B 时, 改变包到达间隔, 仿真结果如表 3 所示.
- 3) 仿真实验 3. 数据包大小为 110 B, 包到达间隔  $0.1\text{ s}$  时, 改变节点数, 仿真结果如表 4 所示.
- 通过上述实验可得如下 4 点结论.
- 1) 业务总负载等于网络发送的数据量, 而平均吞吐量等于网络接收到的数据量.

- 2) 表 4 中,当包间隔为 0.1 s 时,数据丢包率为 0,但仿真实验所得的平均数据重传率却为  $57 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,说明在 RTS/CTS 机制的作用下,超出门限值的数据进行重传,保障了数据传输的可靠性.
- 3) 业务总负载等于网络负载与数据丢包率之和.
- 4) 数据包大小的增大、包间隔的减小和节点数目的增大,都会造成平均数据丢包率和端到端时延呈增长趋势,而网络负载和平均吞吐量逐渐增大,当且仅当平均数据包大小 110 B,包间隔 0.1 s,节点数目为 15 的配置下无线传感器网络性能达到最佳.

表 2 不同数据包大小下的实验仿真  
Tab. 2 Experimental simulation under different packet size

$P/\text{B}$	$\eta/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$t_d/\text{s}$	$L_{\text{tot}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_w/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_{\text{avg}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$
100	0	0.023 3	113.017	113.017	112.998
110	0	0.182 4	122.782	122.782	122.465
120	0.337	3.433 1	132.953	132.616	125.964
130	1.028	5.862 0	140.045	139.017	129.149

表 3 不同包到达间隔下的实验仿真  
Tab. 3 Experimental simulation under different packet interval

$t_a/\text{s}$	$\eta/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$t_d/\text{s}$	$L_{\text{tot}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_w/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_{\text{avg}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$
0.08	10.620	14.286 0	153.671	143.051	123.302
0.09	0.969	6.639 0	135.981	135.012	123.339
0.10	0	0.182 4	122.782	122.782	122.465
0.11	0	0.031 6	111.681	111.681	111.675

表 4 不同节点数目下的实验仿真  
Tab. 4 Experimental simulation under different number of nodes

$n/\text{个}$	$\eta/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$t_d/\text{s}$	$L_{\text{tot}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_w/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_{\text{avg}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$
14	0	0.0334	113.752	113.752	113.674
15	0	0.1824	122.782	122.782	122.465
16	0	3.929	129.533	129.533	122.707
17	1.028	7.405	136.775	135.747	122.309

2.2 业务负载分析

根据上述的实验数据,从业务负载角度对实验做进一步的分析,结果如表 5 所示.表 5 中: $L_{w,\text{avg}}$  为平均网络负载; $\eta_{i,\text{avg}}$  平均数据丢失率; $t_{d,\text{avg}}$  为平均端到端时延.

表 5 不同业务负载下的实验仿真分析  
Tab. 5 Experimental simulation analysis under different load

$P/\text{B}$	$L_{\text{tot}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_{\text{avg}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_{w,\text{avg}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_{\text{avg}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$\eta_{i,\text{avg}}/\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1}$	$t_{d,\text{avg}}/\text{s}$
100	120	113.017	113.017	112.998	0	0.023 3
110	132	122.782	122.782	122.465	0	0.182 4
120	144	132.953	132.616	125.964	0.337	3.433 1
130	156	140.045	139.017	140.045	1.028	5.862 0

通过对表 5 进行分析比较,可以得出以下 4 点结论.

- 1) 数据传输率为  $0.25 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$  的带宽配置下,网络最大网络负载为  $132.953 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大的吞吐量为  $125.964 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而随着业务总负载的加大,网络吞吐量也逐渐加大.当业务总负载达到  $122.782 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,网络各种性能指标基本达到最优.如果业务总负载持续增大,网络丢包率和端到端时延性能将大幅度增大,影响整个网络的性能.
- 2) 无线传感器网络的吞吐量性能在达到最优后开始趋于平稳,但数据丢包率和端到端时延等性能则开始急剧下降.这是因为负载过大,节点不能及时竞争到有限的信道资源,引起了高层数据包队列积压过多包,从而导致数据丢失.同时,由于包的积压使包在队列中等待服务的时间增大,造成包的端到端时延增大.
- 3) 实验中引入的 RTS/CTS 协议会话机制,可保障数据传输的可靠性,但是需要预留信道,从而消

耗了额外的带宽,这就加大了协议开销.在无线传感器的通信速率  $0.25\text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$  下,当负载满载时吞吐量约为  $123\text{ kbit}\cdot\text{s}^{-1}$ ,协议开销占  $127\text{ kbit}\cdot\text{s}^{-1}$ ,可见较低网络速率下的协议开销较大.

4) 平均业务总负载等于平均网络负载与平均数据丢包率之和,而且平均业务总负载总是略低于业务负载模型计算所得的值.同时,对于平均吞吐量,由于其只包含应用层部分的数据,因此总会略小于业务总负载.

2.3 最优化参数分析

通过实验统计,表 1 的仿真参数配置即为最优化状态下的配置.实验数据分析,如图 2~5 所示.其中: $t$  为仿真时间; $p$  为数据包大小; $t_w$  为网络时延.

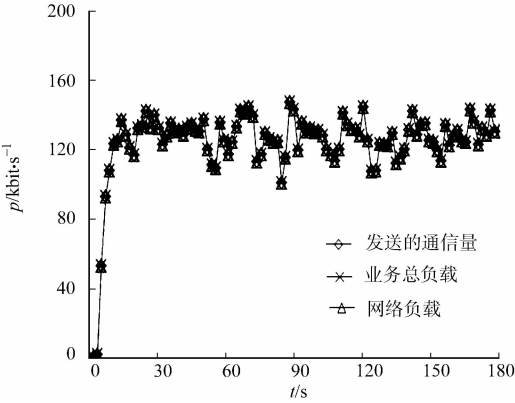


图 2 发送的通信量与不同负载间的比较  
Fig. 2 Comparison between packet send and different loads

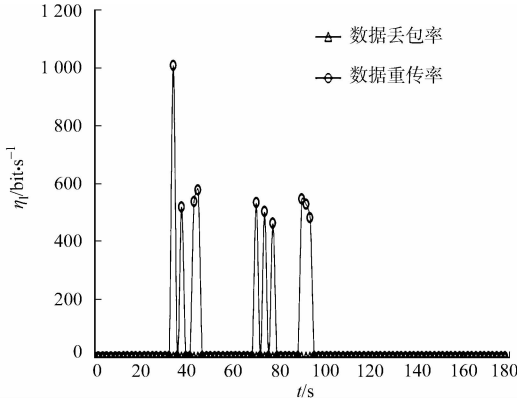


图 3 数据丢包率与数据重传率  
Fig. 3 Data dropped and retransmission

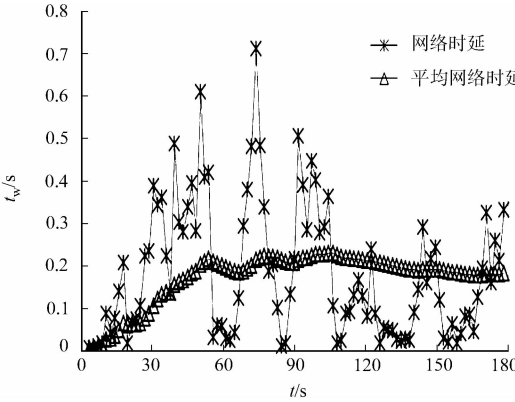


图 4 网络时延  
Fig. 4 Network delay

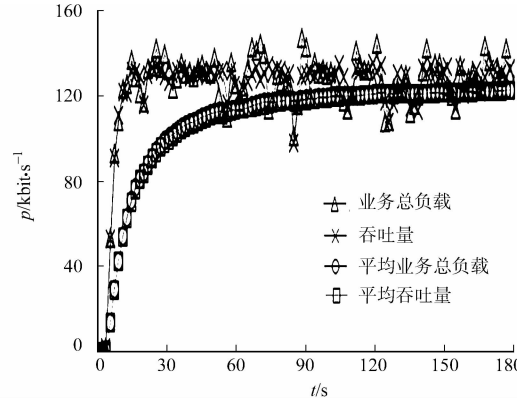


图 5 网络负载与吞吐量的比较  
Fig. 5 Comparison between network load and throughput

从图 4~5 可以得出如下 2 点结论.

1) 此配置下的业务总负载(与发送的总通信量相等)等于网络负载与数据丢包率之和,此时的数据丢包率为 0,且实验的数据结果与业务负载模型计算得出的业务总负载值十分接近,从而进一步验证了提出的业务负载计算模型的正确性.

2) 数据丢包率为 0,但数据重传率并不为 0,说明 RTS/CTS 机制提高了数据传输的可靠性.

由图 4 可知:此时的平均时延较小.而从图 5 可知:网络负载与吞吐量的均值基本一致,该配置下的网络性能已经达到最优.

3 结束语

提出一种业务负载计算模型和吞吐量模型,利用 OPNET 对在线性随机的节点部署情况下的无线传感器网络进行仿真实验.分析了 MAC 和 QoS 性能指标,并对相关统计量在不同配置下的数据进行

比较,最终得出无线传感器网络的最优化性能配置.实验结果显示:在最优化配置下,网络的性能达到最佳状态,这对于实际应用有着重要意义.能量消耗是无线传感器网络的另一个重要 QoS 指标,在未来的工作中,将重点分析这一性能,对不同配置下的能量消耗情况做更进一步的分析.

参考文献：

[1] KUNTZ R,GALLAIS A,NOEL T. Medium access control facing the reality of WSN deployments[J]. ACM SIG-COMM Computer Communication Review,2009,9(3):22-27.

[2] 俞靓,王志波,骆吉安,等. 面向移动目标追踪的无线传感器网络 QoS 指标体系设计[J]. 计算机学报,2009,32(3):442-459.

[3] 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.

[4] 罗俊,蒋铃鸽,何晨. 一种多跳无线传感器网络中基于 SMAC 协议的性能分析模型[J]. 中国科学:信息科学,2010,40(11):1464-1472.

[5] 徐磊,李晓辉,方红雨. 基于 OPNET 的 Ad Hoc 网络建模与仿真[J]. 计算机工程,2009,35(1):123-125.

[6] LAW A M,KELTON W D. 仿真建模与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2000:231-473.

[7] 林闯,曾荣飞,雷蕾,等. 超三代移动通信系统的 QoS 体系结构研究[J]. 软件学报,2008,19(1):81-93.

[8] 林闯,李寅,万剑雄. 计算机网络服务质量优化方法研究综述[J]. 计算机学报,2011,34(1):1-13.

[9] 宋军,金艳华,李姬源,等. IEEE802. 11 无线局域网 MAC 机制性能比较[J]. 计算机科学,2009,36(8):109-111.

[10] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2004:48-53.

[11] 陈敏,韦岗. IEEE802. 11 无线局域网 OPNET 建模与性能测试[J]. 计算机工程,2004,30(21):18-20.

WSNs Nodes Random Deployment Parameters Optimize  
Configuration and Performance Analysis

JIANG Wen-xian, CAI Hui-juan

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Under the different deployment, the nodes in the wireless sensor networks (WSNs) may exist an optimization performance parameter configuration. For the random distribution of the linear deployment of wireless sensor nodes, analyzed the media access control protocol and the quality and service performance indicators, proposed the network load calculation model and throughput calculation model. Through experiment modeling and simulating, analyzed the statistics (such as network load, throughput, data dropped etc.) under different configurations, verified the accuracy of both models, and then drawn the optimization parameters configuration under the WSN nodes deployed randomly.

**Keywords:** wireless sensor networks; optimized performance; node deployment; ON/OFF model; RTS/CTS protocol

(责任编辑：黄晓楠      英文审校：吴逢铁)