

## 基于链路自适应的无线通信跨层协议优化方法

赵艳玲

乐山职业技术学院, 四川 乐山 614000

**摘要:** 为了解决传统网络分层结构下层与层之间无法信息共享和非最优化性能等问题, 通过建立链路自适应模型和跨层协议优化策略, 分析对比基于链路自适应的跨层协议较传统分层网络结构的网络性能。本文设计了一种无线网络环境下基于链路自适应的跨层协议优化方法。在 OPENT Modeler 中实现跨层协议模型并构建仿真场景, 完成了优化方法的测试验证。结果表明: 基于链路自适应的跨层协议较传统分层协议在平均带宽利用率方面提高了 11.6%; 在传输延时方面, 减少 29.2%; 在网络吞吐量方面, 增加 17.3%。总之, 该方法优于传统的分层协议。

**关键词:** 无线通信; 跨层协议; 链路自适应

**中图分类号:** O233

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2015)03-0434-06

## Optimization Method for Cross-layer Protocol of Wireless Network Based on Link Adaptation

ZHAO Yan-ling

Leshan Vocational & Technical College, Leshan 614000, China

**Abstract:** In order to solve the problem of the information non-sharing and the non-optimization performance among layers in the traditional hierarchical network structure, this paper designed a cross-layer protocol optimization method in wireless network environment based on link adaptation by way of establishing the link adaptation model and cross-layer protocol optimization strategy, analyzing and contrasting the performance between the cross-layer protocol based on link adaptation and the traditional hierarchical network structure. This method was realized in OPENT Modeler, built and validated in the simulative scene. The results showed that the average band utilization of cross-layer optimization method based on link adaptation was improved by 11.6% compared to traditional network hierarchical structure. In the aspect of time delay, transmission delay of cross-layer optimization method based on link adaptation was reduced by 29.2%, the proposed cross-layer method improves network throughput by 17.3%. In a word, the method of cross-layer optimization was better than the traditional one.

**Keywords:** Wireless network; cross-layer protocol; link adaptation

无线通信跨层设计概念自提出以来, 便迅速引起了学术界和工业界的关注, 并逐渐成为未来通信网络标准中的重要组成部分。许多专家学者对跨层协议做了比较深入的研究。明尼苏达大学的 Q.Liu 等联合考虑了物理层的 AMC 技术和数据链路层的 ARQ (Automatic Repeat-Request, 自动重传技术) 技术, 提出了跨层设计方法为启发式方法。在该方法中, 物理层和数据链路层相结合, 在满足数据链路层的服务质量需求的前提下, 动态调节编码调制模式和最大重传次数, 使之在适应多变的无线通信信道条件下, 提高系统频谱效率<sup>[1]</sup>。普林斯顿大学的 M.Chiang 对跨层算法归纳出一种基于优化理论的跨层设计算法, 其核心思想是将无线网络按照分解的子问题进行分层设计, 而各层之间通过价格因子进行关联, 从而保证协议层次在相对独立的前提下最优化网络整体性能<sup>[2]</sup>。Z. Ji 等从博弈理论的角度概述了在异构网络环境下进行动态频谱分配的关键问题及其可能解决的方案, 并重点研究了网络用户行为、分布式频谱资源管理, 以及策略的最优性等三方面问题, 并取得了较好的效果<sup>[3]</sup>。王罗等提出一种基于跨层优化的低延迟无线传感器网络 MAC 协议, 该协议采用了具有跨层优化思想的自适应侦听机制。此自适应侦听机制中, 节点根据路径信息来决定是否进行自适应侦听。通过数值分析, 基于跨层优化的低延迟无线传感器网络 MAC 协议在保证能量有限性的同时降低了延迟<sup>[4]</sup>。魏异芬等提出一种基于路由信息的组通讯跨层优化协议 HCLP (Hierarchical Cross Layer Protocol)。该协议结合了节点能力和节点间距离两个因素, 从而构建了由超级节点和普通叶子节点组成的应用层覆盖网。超级节点间采用 Gossip 机制, 而超级节点与普通叶子节点之间则采用单播方

**收稿日期:** 2014-04-12

**修回日期:** 2014-04-18

**基金项目:** 乐山市科技局自然科学基金项目资助(14GZD232)

**作者简介:** 赵艳玲(1971-),女,四川巴中人,硕士,副教授,研究方向:计算机、物联网、自动化控制等. E-mail:waterjie\_050@163.com

式进行数据传输，同时周期性地调整网络拓扑结构。其仿真数据也验证了 HCLP 的高可靠、低开销性能<sup>[5]</sup>。D.Wu 提出了一个 QoS 的链路层信道模型，即有效容量模型，在有效容量模型中，基于传输效率、延时限制、时延违约概率三元参数分析无线网络的服务质量保证问题<sup>[6]</sup>。同时，X. Zhang 等基于此理论分析了多种网络架构下，提出了多种保证时延 QoS 的最优功率分配策略<sup>[7]</sup>。刘洋等提出了一种基于空分复用的无线 Ad Hoc 信道接入协议，通过在竞争时隙交换节点间握手信息，使通信节点可以以空分复用的形式进行并行传输。同时构建跨层分析网络性能分析模型，对此协议进行分析。数学计算及仿真结果均表明，提出的跨层优化协议能够在不增加节点占用带宽的前提下有效地提高网络吞吐率<sup>[8]</sup>。梅素平等研究了多种用于 Ad hoc 网络的能量控制算法，给出了跨层设计方法的定义，研究和讨论了两种典型的 Ad hoc 网络跨层协议设计方法。对 Ad hoc 网络中多种能量控制算法进行了分类、描述、分析比较和评价，在此基础上，指出了基于跨层设计的 Ad hoc 网络能量控制算法存在的问题和进一步的研究方向<sup>[9]</sup>。

本文在研究学习了相关的跨层协议的理论基础上，针对无线通信网络中有限带宽的网络资源利用率低等问题，设计了基于链路自适应的跨层协议优化算法，协调物理层和数据链路层，旨在提高网络的吞吐量和传输延时，并设计了基于 OPENT Modeler 的仿真场景，对提出的基于链路自适应的跨层优化设计方法进行测试验证。

## 1 基于链路自适应的跨层协议优化方法

### 1.1 链路自适应技术

跨层自适应技术可以使得传输方案的效率与实际信道状态保持动态匹配，其在保证一定传输质量的前提下，最大限度地利用信道条件，提高频带利用率。

在时域，链路自适应技术通常被称为自适应编码调制（AMC, Adaptive Modulation and Coding），即对于给定的系统 QoS 要求，根据信道状态动态调整调制方式、编码方式等时域参数。随着多天线系统及正交频分复用技术的应用，链路自适应与空间分集技术以及频率分集技术结合，从一维扩展到二维甚至多维，即动态调整包括时域、频域、空域在内的各种传输参数以适应无线信道的变化，为链路自适应技术提供更加广阔的发展空间。链路自适应技术还涵盖了自动请求重传技术 ARQ（Automatic Repeat Request），尤其是将信道编码和 ARQ 结合的混合 ARQ 技术（HARQ, Hybrid Automatic Repeat Request）。

### 1.2 链路自适应模型构建

在通信协议的物理层，有多个编码调制模式（MCS, Modulation and Coding Scheme）可供选择，链路自适应模型如图 1 所示。首先，接收端估计信道状态信息，并通过反馈环路反馈给发送端，发送端根据接收到的信道状态信息选择下次传输的编码调制模式，即自适应编码调制。在数据链路层，采用重传 ARQ 协议进行重传，当接收端检测到错误包时，通过反馈信道发送重传请求。

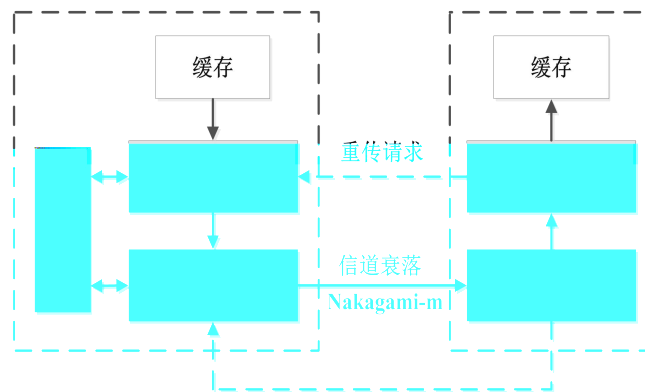


图 1 链路自适应跨层协议模型

Fig.2 The model of cross-layer protocol based on link adaptation

采用通用的 Nakagami-m 信道模型来描述瞬间信噪比 $\gamma$ ，其概率密度函数为：

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\gamma^m \Gamma(m)} \exp(-\frac{m\gamma}{\gamma}) \tag{1}$$

由于在物理层采用自适应的编码调制技术，首先将信噪比划分为  $N+1$  个区间，为编码方式的种类，区间门限值为  $\gamma_n, n=0,1,2,\dots,N$ ，当  $\gamma_n \leq \gamma < \gamma_{n+1}$  时 ( $\gamma_0=0, \gamma_{N+1}=+\infty$ )，选择编码方式 MCS- $n$  作为发送下帧时采用的编码调制模式。首先需要确定信噪比的门限值，可采用误包率准则，若信道编码采用卷积码，其误包率与信噪比的关系为：

$$PER_n(\gamma) = \begin{cases} 1, & 0 < \gamma < \gamma_{pn} \\ a_n \exp(-b_n \gamma), & \gamma \geq \gamma_{pn} \end{cases} \tag{2}$$

在数据链路层采用选择重传 HARQ 机制，设定最大重传次数为  $Nr$ ，那么对于给定的链路层误包率  $PER_{link}$ ，相应的转换为物理层误包率为  $P_{target}$ ：

$$P_{target} = PER_{link}^{1/(N_r+1)} \tag{3}$$

根据给定的  $P_{target}$ ，由下式计算门限值。

$$\gamma_n = \frac{1}{g_n} \ln(\frac{a_n}{P_{target}}), n = 0, 1, 2, \dots, N \tag{4}$$

$$\gamma_{N+1} = +\infty$$

衡量系统优越性的重要指标之一是平均频带利用率，下面分析、验证基于链路自适应的跨层协议在平均频带利用率方面的性能。

假设发送原始包与发送重传包时的信道衰落系数是相互独立的。 $N$  个传输模式中采用传输模式  $n$  的概率为：

$$P_r(n) = \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma = \frac{\Gamma(m, \frac{m\gamma_n}{\gamma}) - \Gamma(m, \frac{m\gamma_{n+1}}{\gamma})}{\Gamma(m)} \tag{5}$$

其中， $\Gamma(m, x) = \int_x^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$ ，令  $PER_n(\gamma)$  表示传输模式  $n$  的误包率，则模式  $n$  的平均误包率为：

$$\overline{PER}_n = \frac{1}{P_r(n)} \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} PER_n(\gamma) p_\gamma(\gamma) d\gamma \tag{6}$$

在物理层，采用自适应编码调制之后系统的平均误包率为：

$$\overline{PER} = \frac{\sum_{n=1}^N R_n P_r(n) \overline{PER}_n}{\sum_{n=1}^N R_n P_r(n)} \tag{7}$$

令  $p = \overline{PER}$ ，则每个包的平均传输次数如下：

$$\overline{N}(p, N_r) = 1 + p + p^2 + \dots + p^{N_r} = \frac{1 - p^{N_r+1}}{1 - p} \tag{8}$$

当  $\overline{N}(p, N_r) = 1$ ，对应只采用 AMC 的情况。不考虑重传，即只采用自适应编码调制时，物理层的平均频带利用率为：

$$\overline{S}_{e, physical} = \sum_{n=1}^N R_n P_r(n) \tag{9}$$

采用 ARQ 时，每个包传输  $\overline{N}(p, N_r)$  次，因此系统的总频带利用率为：

$$\overline{S}_e(N_r) = \frac{\overline{S}_{e, physical}}{\overline{N}(p, N_r)} = \frac{1}{\overline{N}(p, N_r)} \sum_{n=1}^N R_n P_r(n) \tag{10}$$

假设总共有 5 种编码方式, 而且各种概率模式都按缺省值计算, 通过计算分析, 采用链路自适应技术与正常分层技术的频带利用率随信噪比关系图 2 所示。从图 2 可以看出, 采用链路自适应技术后, 无线通信系统具有较高的频带利用率, 而且, 随着信噪比的增大, 频带利用率增加, 这种趋势是必然的。从仿真结果统计, 频带利用率增幅较传统的网络分层结构在 11.6%左右, 这从数学模型方面对链路自适应跨层理论的实现提供了依据和支持。

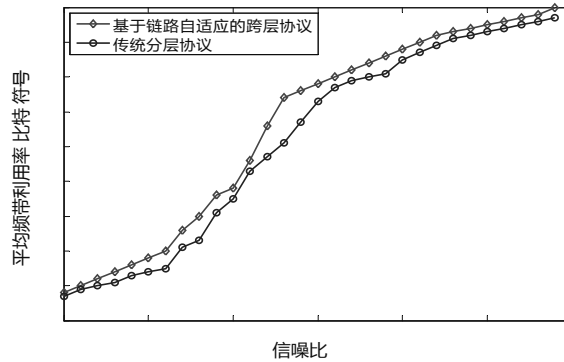


图 2 基于链路自适应的跨层协议平均频带利用率结果

Fig.2 Average band utilization results of cross-layer protocol based on link adaptation

### 1.3 跨层协议优化方法描述

由于无线通信系统能够容忍的延时是有限的, 因此必须限制信息数据包的最大传输次数  $N_r$ , 另一方面, 在数据链路层预先设置系统容许的误包率  $P_{target}$ 。在本优化方法中, 设置  $P_{target}=0.01$ ,  $N_r=1,2,3,4$ 。本文设计同时满足数据链路层的误包率和最大传输次数要求的自适应编码调制和混合自动请求重传方案。具体步骤如下:

Step 1: 使用 Type-I HARQ 技术。当接收到的信息数据包发生错误时, 接收方采用信道解码来纠正错误信息。如果数据包包含的错误图样在信道编码的纠错能力范围之内, 存在错误的数据包能够被正确译码, 然后将正确译码后的信息传递给上层协议; 如果存在的错误超出了信道编码可接受的纠错范围, 则译码失败。接收方丢弃该数据包, 并向发送方发出重传请求, 直至数据信息包被正确译码, 或者重传请求已经达到最大允许的重传次数。

Step 2: 通过仿真得到 Type-I HARQ 物理层的误包率曲线, 然后使用 (2) 式拟合物理层实际误差曲线。式中,  $n$  是用于表示不同自适应编码调制模式的模式标号,  $\gamma$  是信噪比, 而且  $a_n$ ,  $g_n$  和  $\gamma_{pn}$  依赖于不同的自适应编码调制方式, 但此方法只适用于拟合卷积码编码的信息数据包的误包率曲线。

Step 3: 传输处理过程。1064 比特的信息加上 16 bits 的循环冗余校验码之后, 经过 1/2 码率的卷积码进行信道编码操作, 生成 2160 bits 的信道编码信息。然后根据目前的信道状况选择合适的自适应编码调制方案。Type-I HARQ 调制方案如表 1 所示。信道编码信息通过删除矩阵剔除冗余信息之后, 生成码率为 1/2, 3/4, 9/16 的信道编码比特, 经过调制后送入无线信道。如果接收端译码失败, 则启动重传机制。

表 1 Type-I HARQ 调制模式及误包率曲线参数

Table 1 Modulation mode and packet error rate curve parameters of Type-I HARQ

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
调制方式	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
码率	1/2	1/2	9/16	3/4
$a_{0,n}$	1525.9	424.06	126.88	60.556
$g_{0,n}$	6.0354	2.6532	0.4446	0.0553
$a_{1,n}$	967.21	163.34	99.5411	172.666
$g_{1,n}$	6.1297	1.5291	0.4986	0.1242
$a_{2,n}$	367.95	401.49	178.966	56.311
$g_{2,n}$	6.0208	3.1401	0.5944	0.1485
$a_{3,n}$	18.1425	1807.2	207.570	40.7133
$g_{3,n}$	4.8222	3.9224	0.6092	0.1412

## 2 仿真实现及分析

为了验证本文设计的基于链路自适应的无线通信跨层协议优化方法在无线移动自组织网络中的应用效果，在OPNET Modeler中完成跨层协议模型的修改和仿真场景的构建，对比与传统的分层结构下的通信性能区别，验证跨层协议的可行性。

### 2.1 模型实现及仿真环境的搭建

OPNET Modeler的建模思路是以事件调度为基础，结合进程交互以便于处理，其既保留了事件调度的事件列表、时间推进方式，又保留了进程概念与实际系统最接近的部分，即进程是成分的活动、事件按实践先后顺序的组合，使得通信建模在OPNET Modeler中得以实现<sup>[10,11]</sup>。

本文提出的跨层自适应模型是在OPNET Modeler软件提供的MANET（Mobile Ad Hoc Network）节点模型的基础上完成的，其节点模型如图3所示。跨层协议主要修改位于MAC层的自动请求重传功能和位于物理层的自适应编码调制功能，使两层的信息形成反馈回路，完成自适应调节。

构建一个1000 m<sup>2</sup>范围的仿真场景，如图4，拥有若干无线通信节点，根据表2设置参数进行两次仿真过程，分别采用跨层协议和传统通信模型，然后统计吞吐量及传输延时等网络性能，用于后续分析验证。

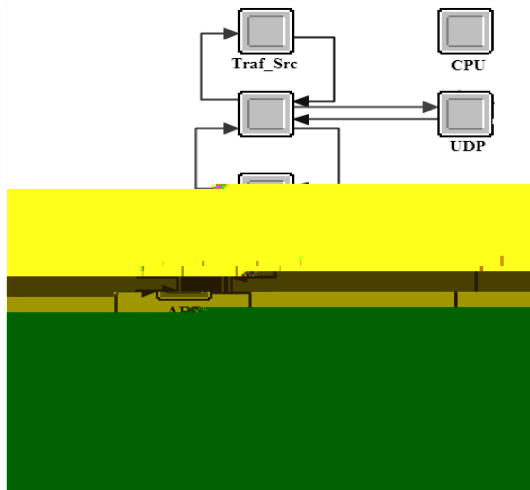


图3 无线跨层协议实现模型

Fig.3 Wireless cross-layer protocol implementation model

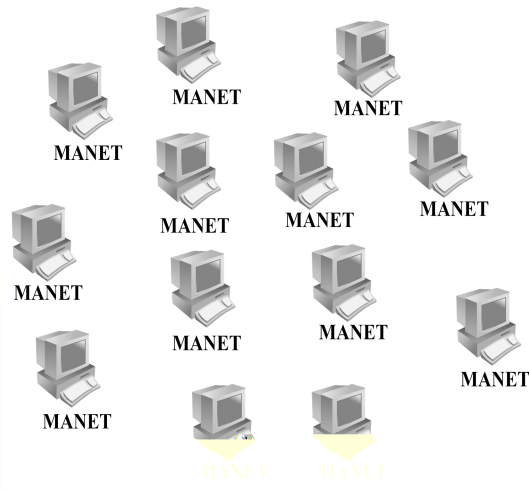


图4 跨层协议仿真场景

Fig.4 Simulation scene of cross-layer protocol

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter sets

设置 Set	参数 Parameter
仿真场景大小	1000 m <sup>2</sup>
仿真时间	10 min
节点移动模型	定点移动模型
信道类型	Wireless channel
信道带宽	10 MHz
工作频率	2.4 GHz
路由类型	AODV
MAC 协议	IEEE 802.11b

### 2.2 跨层优化方法的测试验证

传输延时和丢包率是反映网络状况的最基本的指标。传输延时决定了数据信息的实时性，定义为信息包接收与发送之间的时间差；而吞吐量决定了网络所完成通信任务的效率，定义为单位时间内系统成功接收的数据量大小。在完成了上述的仿真过程后，论文统计了10 min内的传输延时和吞吐量，分别如图5和图6中显示。

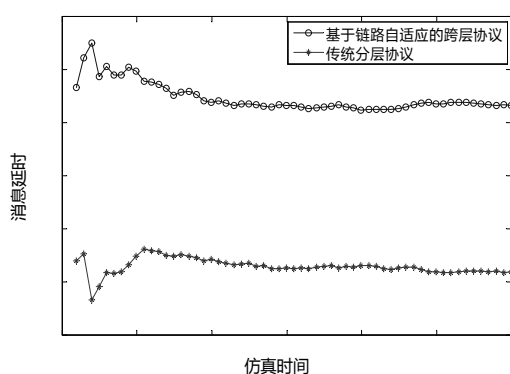


图5 传输延时仿真结果

Fig.5 Simulation results of transmission delay

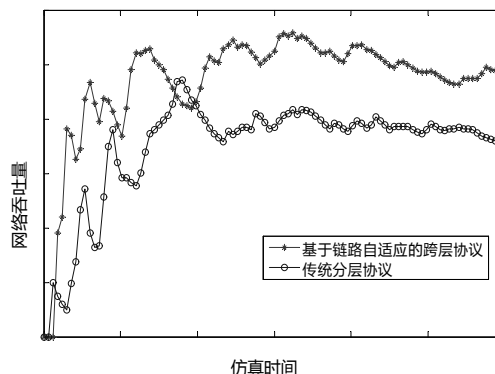


图6 网络吞吐量仿真结果

Fig.6 Simulation results of network throughput

从上述结果可以看出, 基于链路自适应的跨层优化协议在传输延时和网络吞吐量方面, 较传统的分层协议都有所改善。传输延时减少了29.2%, 网络吞吐量增加了17.3%。网络性能改善的根本原因是, 无线网络产生拥堵时或者通信需求较大时, 基于链路自适应的跨层优化协议会根据当前重传次数自适应的调整物理层编码, 加快了网络正确译码的概率; 参与通信的节点正确的估计了当前网络状况, 通过合适的编码进行数据包的发送也减少了信息的重传次数, 使误包率和网络的平均频带利用率效果有所提升, 从而使无线网络的整体性能得到改善。

### 3 结论

本文通过分析传统的无线网络分层结构的特点及弊端, 学习相关跨层理论, 设计了一种基于链路自适应的无线通信跨层协议优化方法, 该方法主要应用在物理层及数据链路层。通过结合物理层的自适应编码技术和数据链路层的混合自动重传技术, 使分层的协议通过多层间的反馈而形成跨层协议体系。通过构建链路自适应跨层协议模型, 同时计算验证其平均频带利用率, 发现与传统的分层结构相比, 其平均频带利用率相对有所提高。为了验证本文设计的跨层协议在无线通信系统中的实际应用效果, 作者在OPENT Modeler中设计了具有若干无线通信节点的仿真场景, 经过测试, 基于链路自适应的无线通信跨层协议优化方法在吞吐量和传输延时方面等网络性能都有所提高, 也验证了该优化协议的可行性。

本论文也为存在一定的不足, 例如, 此跨层协议优化方法只适用于网络状况起伏变化不明显的情况, 自适应程度有所局限等。同时, 作者也会在今后的研究工作中, 学习研究更加准确且具有应用价值的无线网络跨层协议优化方法, 为解决无线网络拥堵等问题贡献更多的科研成果。

### 参考文献

- [1] Liu Q, Zhou S, Giannakis GB. Cross-Layer Combining of Adaptive Modulation and Coding with Truncated ARQ over Wireless Links [J]. IEEE Transaction on Wireless communication, 2004,3:1746-1755
- [2] Chang M, Low SH, Calderbank AR, *et al.* Layering as Optimization Decomposition: A Mathematical Theory of Network Architectures [J]. Proceedings of the IEEE, 2007,95(1):255-312
- [3] Zhu J, Ray Liu KJ. Dynamic Spectrum Sharing: A Game Theoretical Overview[J]. IEEE Communications Magazine, 2007,45:88-94
- [4] 王 罗,李 云,刘占军,等.一种基于跨层优化的低延迟无线传感器网络 MAC 协议[J].重庆邮电大学学报,2007,19(5):622-626
- [5] 魏异芬,谢高岗,李忠诚.一种基于跨层优化的 MANET 层次化组通讯协议[J].系统仿真学报,2008,20(10):2589-2595
- [6] Wu D, Negi R. Effective capacity:A Wireless Link Model for Support of Quality of Service Assurance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004,53(5):1547-1557
- [7] Tang Jia, Zhang Xi. Cross-Layer Modeling for Quantity of Service Guarantees over Wireless Links [J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2007,6(12):4504-4512
- [8] 刘 洋,詹宜巨,蔡庆玲.一种基于空分复用的无线自组网接入层协议及其跨层分析模型[J].信息与控制, 2011,40(1):105-114
- [9] 梅素平,薛小平,温德龙,等.基于跨层设计的 Ad Hoc 网络能量控制算法研究[J].计算机应用研究,2009,26(12):4418-4422
- [10] 张永生.基于 OPNET 的 Ad Hoc 军事通信网络的仿真[D].西安:西安电子科技大学,2007
- [11] 蔡伯根,王丛丛,上官伟,等.车路协同系统信息交互仿真方法[J].交通运输工程学报,2014,14(3):111-119