

WLAN Mesh 网络多信道速率自适应 MAC 协议

李科艳¹, 雷磊¹, 罗诚¹, 董涛²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016; 2. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘 要: 针对多种传输速率的链路共存于同一信道时引发的性能瓶颈, 以及单接口多信道网络中接收端忙的问题, 在 DCF 协议的框架内提出一种适用于 WLAN Mesh 网络的分布式多信道速率自适应媒体接入控制 (MAC) 协议。该协议允许发送节点的邻居节点通过协作应答的方式告知相应接收节点所处信道, 接收节点根据当前信道质量合理选择传输速率和传输信道反馈给发送节点。通过上述机制, 将不同传输速率的链路分配在不同的信道上。仿真结果证明, 该协议能避免不同传输速率链路之间的相互干扰, 解决接收端忙问题。与现有典型多信道速率自适应 MAC 协议相比, 能有效提高网络的总吞吐量。

关键词: WLAN Mesh 网络; 媒体接入控制协议; 多信道; 速率自适应; 信号干扰

中文引用格式: 李科艳, 雷磊, 罗诚, 等. WLAN Mesh 网络多信道速率自适应 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2014, 40(11): 26-30.

英文引用格式: Li Keyan, Lei Lei, Luo Cheng, et al. Multi-channel Rate Adaptive MAC Protocol for WLAN Mesh Network[J]. Computer Engineering, 2014, 40(11): 26-30.

Multi-channel Rate Adaptive MAC Protocol for WLAN Mesh Network

LI Keyan¹, LEI Lei¹, LUO Cheng¹, DONG Tao²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

[Abstract] This paper gives a detailed analysis of the performance anomaly when multiple links using different transmission rates share a common wireless channel, and the missing receiver problem in single-radio multi-channel networks. Furthermore, a Multi-channel Rate Adaptive (MCRA) Media Access Control (MAC) protocol is proposed for WLAN Mesh network. The neighboring nodes can cooperatively inform the transmitter of the channel used by the receiver in the proposed protocol. Besides, the receiver can choose the feasible transmission rate and channel and send back them to the transmitter. Simulation results show that the proposed protocol can eliminate the interference between the links using different transmission rates, and effectively solve the missing receiver problem, thus significantly improve the overall performance of the network. The proposed protocol can significantly improve the total throughput of the network compared with the existing representative protocol.

[Key words] WLAN Mesh network; Media Access Control (MAC) protocol; multi-channel; rate adaptive; signal interference

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2014.11.005

1 概述

IEEE 802.11 协议^[1]是无线网络领域较早的标准协议, 其媒体接入控制 (Media Access Control, MAC) 层定义的 DCF (Distributed Coordination Function) 协议为 WLAN Mesh^[2]网络的基本信道接

入协议, 该协议通过物理和虚拟载波检测机制来避免节点之间冲突的发生, 要求各节点采用统一的传输速率进行数据分组的交互。

近年来, 802.11 协议体系逐渐在物理层增加了对多种传输速率的支持。例如 IEEE 802.11b 协议^[3]允许 4 种传输速率, IEEE 802.11a 协议^[4]支持

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61100195, 61301103); 南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金资助项目 (kfj120113); 中国航天科技集团公司卫星应用研究院创新基金资助项目 (2014_CXJJ-TX_09)。

作者简介: 李科艳 (1988 -), 女, 硕士, 主研方向: 无线通信网络; 雷磊 (通讯作者), 副教授、博士; 罗诚, 硕士; 董涛, 研究员、博士。

收稿日期: 2013-08-21 **修回日期:** 2013-10-10 **E-mail:** leilei@nuaa.edu.cn

8种传输速率。以IEEE 802.11 DCF协议为基础,文献[5]提出的RBAR(Receiver-based AutoRate)协议允许接收节点根据接收RTS帧时的信号强度和信噪比情况动态选择随后的Data/ACK帧交互过程的传输速率,并将所选择的传输速率值反馈给发送节点。仿真实验证明了多速率MAC协议与单速率MAC协议相比在性能上的优越性。然而,越来越多的学者指出^[6-10],在多速率网络中,占用信道的低速率链路需要更长时间完成数据传输,极大限制了高速率链路传输优势。为解决该问题,研究人员尝试将多信道技术引入多速率网络。

多速率多信道(Multi-rate Multi-channel, MRMC)协议^[8]是最早提出的多信道多速率信道接入协议之一。该协议将除无线接入点之外的其余不同速率的节点分离在不同的信道上,避免了同一信道上存在多种传输速率链路的情况。然而,MRMC协议要求中心无线接入点拥有与无线信道数相等的网络接口数,且协议的运行依赖中心接入点的支持,因而无法适用于分布式的网络架构。DR-CA(Data Rate adaptive Channel Assignment)算法^[9]要求网络中每个节点保存所有链路的传输速率信息,为最小化不同传输速率的链路之间的相互干扰,DR-CA算法将具有相同或相当传输速率的链路分配在同一信道,并使得每个信道上的所有链路的传输速率总和大致相等。与已有方案相比,DR-CA算法能获得更好的性能。针对无线网络接入业务设计的RB-CA(Rate-based Channel Assignment)算法^[10]通过,选择合适的中继节点,构建由多条相同传输速率的链路组成的HMPs(High-rate Multi-channel Paths),使得网络接入业务能同时在不同的信道上进行传输,大大提高了网络的性能。然而,RB-CA算法和DR-CA算法都要求网络中各节点均配备多个网络接口卡,因而2个算法在实际应用时需要额外的硬件开销。

本文针对多种传输速率的链路共存于同一信道时对网络性能的影响,以及多信道环境中的接收端忙问题进行了详细分析,提出一种适用于WLAN Mesh网络的分布式多信道速率自适应(Multi-channel Rate Adaptive, MCRA)接入协议,并结合仿真实验证明该协议的有效性。

2 相关问题分析

2.1 多速率单信道瓶颈问题

在IEEE 802.11 DCF协议基础上,研究人员提出了一些多速率信道接入协议。然而,该类协议在应用于单信道环境时普遍存在瓶颈。在图1所示网络拓扑中,每条链路上业务负载均配置为11 Mb/s。图1(a)中2条链路传输速率均设定为

11 Mb/s,图1(b)中节点0和节点1组成的链路传输速率设为2 Mb/s,节点2和节点3组成的链路传输速率设为11 Mb/s。在100 s仿真时间中,节点2和节点3在仿真开始时即建立业务并传输数据至仿真结束,节点0和节点1上的业务在第50 s开始建立至仿真结束。

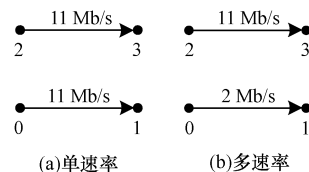


图1 单信道单/多速率链路场景

图2给出了单速率链路和多速率链路在单信道环境下网络总吞吐量性能随仿真时间的变化趋势。在网络仅存在相同传输速率的多条业务时,新业务流的加入促成了网络总吞吐量一定程度的增加。然而,当多种传输速率的链路共存于同一信道时,低速率链路上业务的加入会导致整个网络总吞吐量急剧下降。

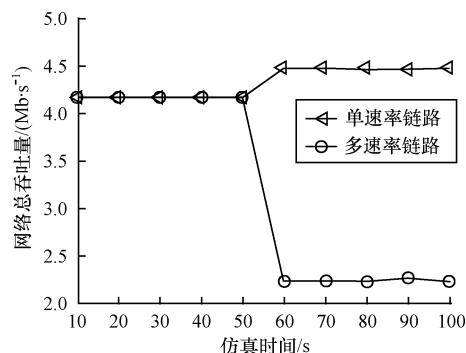


图2 单信道环境下的链路吞吐量比较

2.2 多信道网络中的接收端忙问题

在单接口多信道网络中,节点通过动态切换信道的方式利用多信道,收发节点常常由于处在不同信道上而无法顺利地进行信道预约。在图3中,节点1和节点2当前正在信道1上进行数据传输,信道0上的节点0则认为当前信道空闲。当节点0需要向节点1传输数据时,其发送的RTS帧始终无法被节点1应答。即使节点1完成了与节点2之间的数据传输,处于信道1上的节点1仍然无法接收节点0重新发送的RTS帧,造成节点0的RTS帧多次重传失败。

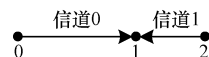


图3 接收端忙场景

3 MCRA协议描述

在上述分析的基础上,本文提出了一种适用于WLAN Mesh网络的多信道多速率信道接入协议

(MCRA)。假定网络中存在 4 个互不重叠的对等信道 0,1,2 和 3,它们对应的信道速率分别为 1 Mb/s, 2 Mb/s,5.5 Mb/s 和 11 Mb/s,要求网络中每个节点保存有一致的(传输速率、信道编号)对应表。MCRA 协议仅要求网络中各节点配备单个网络接口卡和单个半双工收发信机,允许节点在不同信道间动态切换。在 DCF 协议的 2 种载波检测机制的框架内,以 RTS/CTS/Data/ACK 四相握手过程为基础,MCRA 协议引入以下机制。

(1) 基于接收信号强度的动态信道切换

MCRA 协议首先对 RTS 和 CTS 控制帧的格式进行修改,如图 4 所示,将 RTS 帧中原有的指示信道预约时间长度的 Duration 字段替换为表示数据分组比特数的 BitsofData 字段,CTS 帧中的 Duration 字段则替换为 BitsofData 字段和所选择的传输速率 Rate 字段。

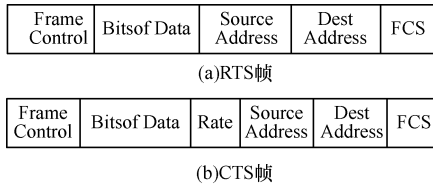


图 4 修改后的 RTS 帧和 CTS 帧格式

当发送节点发送的 RTS 帧到达对应接收节点时,接收节点根据当前信道的信噪比和 RTS 帧接收信号强度确定随后 Data/ACK 帧交互过程中的传输速率。具体的,若按照朗讯公司制造的 Orinoco 系列无线网卡^[11]的标准设计发射机和接收机模型及性能参数,假定发射机发射功率为 3 dBm,采用双线地面反射(Two-Ray)的信道传播模型的条件下,节点传输速率的选择可参照表 1 所示的信噪比门限和接收门限与传输速率之间的关系进行。

表 1 物理层多速率传输相关参数

信道编号	传输速率 /(Mb·s ⁻¹)	接收门限 /dBm	信噪比 门限	有效传输 距离/m
0	1.0	-94	1.76	400
1	2.0	-91	4.55	335
2	5.5	-87	8.00	265
3	11.0	-83	12.30	198

接收节点将选择的速率值写入 CTS 帧中的 Rate 字段,若所选择的传输速率与当前信道的传输速率不一致,节点通过查找保存的(传输速率,信道编号)对应表确定该传输速率所对应的信道,待 CTS 帧发送结束后该接收节点将切换到指定信道等待接收数据帧。发送节点依据收到的 CTS 帧内的 Rate 字段,通过查找(传输速率,信道编号)对应表确定该传输速率对应的信道,若判断接收节点选择的信道

与当前信道不一致,则该发送节点将切换到对应信道。

(2) 引入信道切换通告帧 CSA

当发送节点依据收到的 CTS 帧中的信息得知需要切换到其他信道时,在进行信道切换之前该发送节点将在当前信道上广播一个信道切换通告帧 CSA。CSA 帧中包含发送节点地址 SourceAddress、数据分组比特数 BitsofData 和发送 Data 帧将使用的传输速率 Rate 等信息。CSA 帧发送结束后,发送节点将立即切换到指定信道并尝试发送 Data 帧。

(3) 维护邻居节点信道对应表

MCRA 协议要求网络中每个节点维护一张三维的邻居节点信道对应表,该表的每个表项保存有 3 个数据域,分别为对应信道编号 chID、邻居节点地址 NhID 和该节点的信道释放时刻值 T_{rv} 。节点侦听到其他节点发送的 RTS/CTS/CSA/Data 帧时将建立或更新对应节点的信道对应表项(chID, NhID, T_{rv})。MCRA 协议中节点的信道释放时刻值获取与更新过程按以下步骤进行:

1) 节点侦听到邻居节点发送的 RTS 帧时,将当前信道上 RTS 帧的发送节点的信道释放时刻值设置为:

$$T_{rv_R} = currentTime + \left(\frac{L_{CTS}}{Rate_C} + t_{Phdr} \right) + 2 \times SIFS + \sigma \quad (1)$$

其中,currentTime 为当前时刻值; L_{CTS} 为 CTS 帧的比特数; $Rate_C$ 为当前信道的传输速率; t_{Phdr} 为物理层头部的传输时间; $SIFS$ 为帧间间隔时间; σ 为物理层定义的时隙长度。

2) 节点侦听到邻居节点发送的 CTS 帧时,当前信道上 CTS 帧的发送节点的信道释放时刻值设置如下:

$$T_{rv_C} = \begin{cases} currentTime + \left(\frac{BitsofData}{Rate_C} + \frac{L_{ACK}}{Rate_C} + 2 \times t_{Phdr} \right) + 2 \times SIFS & Rate = Rate_C \\ currentTime + t_{cs} + SIFS + \sigma & Rate \neq Rate_C \end{cases} \quad (2)$$

其中,BitsofData 为 CTS 帧中携带的数据分组比特数; L_{ACK} 为 ACK 帧的比特数; t_{cs} 为信道切换时延。当 Rate 与 Rate_C 不一致时,CTS 侦听节点还需设置传输速率 Rate 所对应信道上 CTS 帧发送节点的信道释放时刻值:

$$T_{rv_D} = currentTime + \left(\frac{L_{ACK}}{Rate_C} + t_{Phdr} \right) + SIFS \quad (3)$$

其中, L_{CSA} 为 CSA 帧的比特数。

3) 节点侦听到邻居节点发送的 CSA 帧时,将当前信道上 CSA 帧发送节点的信道释放时刻值设

置为:

$$T_{rv_CSA} = currentTime + t_{cs} + \sigma \quad (4)$$

并将 *Rate* 字段值所对应信道上 CSA 帧发送节点的信道释放时刻值设置为:

$$T_{rv_CSA} = currentTime + t_{cs} + \left(\frac{BitsofData}{Rate} + \frac{L_{ACK}}{Rate} + 2 \times t_{Phdr} \right) + 2 \times SIFS \quad (5)$$

4) 节点侦听到邻居节点发送的 *Data* 帧时,将设置当前信道上 *Data* 帧发送节点的信道释放时刻值:

$$T_{rv_D} = currentTime + \left(\frac{L_{ACK}}{Rate_C} + t_{Phdr} \right) + SIFS \quad (6)$$

一方面,发送节点可以通过查找其维护的邻居节点信道对应表中当前信道编号的各表项中 T_{rv} 字段的最大值获知当前信道将持续忙的时间,退避等待从而避免冲突,实现虚拟载波检测;另一方面,各节点还可根据邻居节点信道对应表中的信息获知特定节点的当前所处信道,协助发送节点解决多信道环境下的接收端忙问题。

4 仿真与结果分析

本文在 GloMoSim^[12] 仿真环境中实现了所提出的 MCRA 协议,各协议参数如表 2 所示,MCRA 协议中不同信道上信号的有效传输距离参见表 1。仿真将 MCRA 协议与经典的单信道速率自适应协议 RBAR 进行了比较。本文主要进行 2 种网络拓扑中的仿真实验。

表 2 MCRA 协议参数

参数名	参数值
SEARCH/AID 帧大小/bit	160
REPLY 帧大小/bit	128
RTS/CTS/ACK 帧大小/bit	160
CSA 帧/MAC 帧头大小/bit	192
节点发送功率/dBm	3
物理层头部传输时间/ μ s	192
时隙长度/ μ s	20
SIFS/ μ s	10
DIFS/ μ s	50
信道切换时延/ μ s	224

4.1 给定链状拓扑

本文考虑图 5 所示的链状拓扑,实验中按图中箭头所示方向建立 2 条负载量均为 8 Mb/s 的恒定比特率(CBR)业务,数据分组大小为 1 024 Byte。1 $\rightarrow$ 0 上的 CBR 业务从仿真开始时建立持续到结束,2 $\rightarrow$ 3 上的 CBR 业务则在第 40 s 开始建立持续到结

束。根据表 1 所示参数,在完成一次 RTS/CTS 控制帧交互后,1 $\rightarrow$ 0 上的 CBR 业务会选择 5.5 Mb/s 的速率进行随后的数据传输,2 $\rightarrow$ 3 上的 CBR 业务则会选择 2 Mb/s 的速率进行数据传输。而第 40 s 后,低速率业务的加入大大占用了同一信道上的高速率业务进行数据传输的机会,导致高速率业务吞吐量的显著下降。与 RBAR 协议的表现不同,2 $\rightarrow$ 3 上的低速率业务加入后,MCRA 协议中 1 $\rightarrow$ 0 上的高速率业务的吞吐量并未受到影响。此外,与 RBAR 协议相比,MCRA 协议中新加入的低速率业务能获得稳定的更高的吞吐量。根据图 5 给定链状拓扑的仿真结果如图 6 所示。

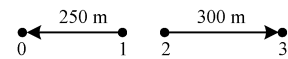


图 5 给定链状拓扑

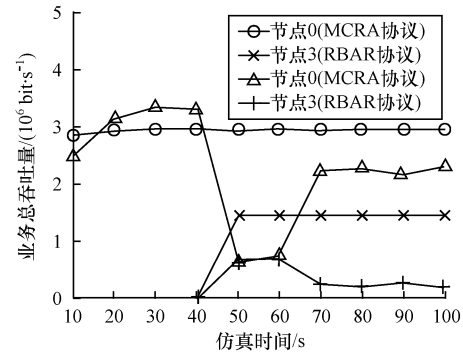


图 6 给定链状拓扑的仿真结果

4.2 随机格状拓扑

本文随后在随机格状网络拓扑中进行了仿真实验。考虑边长为 900 m 的正方形区域,均匀划分为 36 个网格,每个网格内随机放置一个节点。从仿真开始起,在 36 个节点中随机建立 5 个发送端和接收端均不相同的 CBR 业务,其中每条 CBR 流的发送节点均在其 400 m 范围内随机选择一个节点作为其业务接收节点。

不同的业务负载条件下,图 7 给出了采用 MCRA 协议和 RBAR 协议时网络总吞吐量的比较结果。

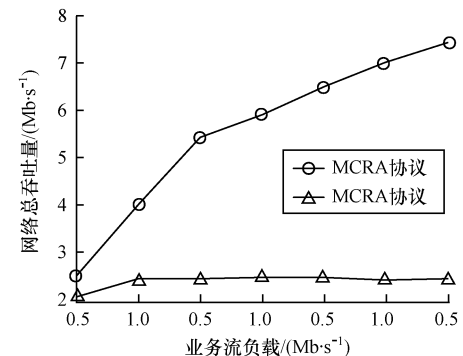


图 7 不同负载条件下的网络总吞吐量

可以看出,当每条业务的负载量增大到 1 Mb/s 时,RBAR 协议的总吞吐量随业务流负载的增加保持不变。当节点 MAC 层使用 MCRA 协议时,多信道技术的引入大大提高了网络的容量,增加了业务流进行数据传输的机会。因此,随着网络负载的增加,MCRA 协议获得的网络总吞吐量不断增大,且始终远远高于 RBAR 协议获得的吞吐量值。

5 结束语

本文对现有多速率信道接入协议应用于单信道环境时产生的问题,以及多信道网络中普遍存在的接收端忙问题进行详细分析。在上述分析的基础上,提出了一种支持多信道的速率自适应信道接入协议,并通过不同网络拓扑中的仿真实验证明了该协议的有效性。下一步将研究多信道速率自适应条件下的 MAC 协议饱和吞吐量建模方法。

参考文献

- [1] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. IEEE Standard 802.11-1999 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. 1999.
- [2] 马卓,马建峰,曾勇,等. 通用可组合安全的 WLAN Mesh 网络可信接入认证协议[J]. 通信学报, 2008,29(10):126-134.
- [3] Mahasukhon P, Sharif H, Hempel M, et al. IEEE 802.11b Based Ad Hoc Networking and Its Performance in Mobile Channels[J]. IET Communications, 2009,3(5):689-699.
- [4] Qiao D, Choi S, Shin K G. Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2002,1(4):278-292.
- [5] Holland G, Vaidya N, Bahl P. A Rate-adaptive MAC Protocol for Multi-hop Wireless Networks [C]//Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Wuhan, China: [s. n.], 2001:236-251.
- [6] Heusse M, Rousseau F, Berger-Sabbatel G, et al. Performance Anomaly of 802.11b [C]//Proceedings of INFOCOM'03. [S. l.]: IEEE Press, 2003:836-843.
- [7] 邹仕洪, 邬海涛, 彭泳, 等. 一种提高多速率 WLAN 公平性的 MAC 协议[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(8):8-13.
- [8] Kuang T, Wu Q, Williamson C. MRMC: A Multi-rate Multi-channel MAC Protocol for Multi-radio Wireless LANs [C]//Proceedings of WNCNCS'05. Philadelphia, USA: [s. n.], 2005:263-272.
- [9] Niranjana N, Pandey S, Ganz A. Design and Evaluation of Multichannel Multirate Wireless Networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2006,11(5):697-709.
- [10] Kim S H, Suh Y J. A Distributed Channel Assignment Protocol for Rate Separation in Wireless Mesh Networks [J]. Computer Communications, 2010,33(11):1281-1295.
- [11] Lundgren H, Lundberg D, Nielsen J, et al. A Large-scale Testbed for Reproducible Ad Hoc Protocol Evaluations [C]//Proceedings of WCNC'02. Orlando, USA: [s. n.], 2002:412-418.
- [12] Bajaj L, Takai M, Ahuja R, et al. GloMoSim: A Scalable Network Simulation Environment [R]. Los Angeles Computer Science Department, University of California, Los Angeles, Technical Report:990027, 1999.

编辑 金胡考

(上接第 25 页)

参考文献

- [1] 郭晓丛, 向菲, 刘伟. 一种基于多混沌映射的图像加密算法[J]. 计算机工程, 2012,38(20):93-96.
- [2] 任洪娥, 戴琳琳, 张健. 基于位平面变换的数字图像加密算法[J]. 计算机工程, 2013,39(6):185-189.
- [3] 赵芳玲, 马文涛. 一种图像混合加密算法仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012,29(5):278-282.
- [4] 严伟峰, 方建安, 王云涛, 等. 基于耦合混沌映射的彩色图像加密算法[J]. 微计算机信息, 2010,26(7):49-51.
- [5] Chen Guanrong, Mao Yaobin, Chui C K. A Symmetric Image Encryption Scheme Based on 3D Chaotic Cat Maps [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2004,21(3):749-761.
- [6] Lian Shiguo, Sun Jinsheng, Wang Zhiqian. A Block Cipher Based on a Suitable Use of the Chaotic Standard Map [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005,26(1):117-129.
- [7] Jin Jun. An Image Encryption Based on Elementary Cellular Automata [J]. Optimum Precision Engineering, 2012,50(12):1836-1843.
- [8] Koljonen J. An Image Encryption Algorithm Based on Hybrid Genetic Algorithm [J]. Physics Letters A, 2012, 66(23):1806-1816.
- [9] Tan Zoujun, Hou Dejie. Improve Accuracy of Laser Beam Width Measurement Using a Genetic Algorithm [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009,47:1091-1096.
- [10] Zhang Guoji, Liu Qing. A Novel Image Encryption Method Based on Total Shuffling Scheme [J]. Optics Communications, 2011,284(12):2775-2780.
- [11] Wang Y, Wong K W, Liao X, et al. A New Chaos-based Fast Image Encryption Algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2011,11(1):514-522.
- [12] The USC-SIPI Image Database [EB/OL]. [2013-11-30]. <http://sipi.usc.edu/database/database.php>.
- [13] Li Li, El-Latif A A A, Niu Xianmu. Elliptic Curve ElGamal Based Homomorphic Image Encryption Scheme for Sharing Secret Images [J]. Signal Process, 2012, 38(92):1069-1078.

编辑 金胡考