

无线局域网 MAC 机制对 TCP 性能的影响分析

宋 军¹ 金艳华¹ 李媛源² 李 霖¹

(重庆交通大学信息科学与工程学院 重庆 400074)¹ (重庆邮电大学科学技术处 重庆 400065)²

摘 要 通过分析和比较 IEEE802.11 无线局域网分别采用 3 种典型 MAC 机制时的 TCP 性能,深入研究了 MAC 机制对无线局域网中 TCP 性能的影响。仿真结果表明,由 MAC 机制所决定的信道冲突率、MAC 帧丢失率、MAC 帧传输时延抖动幅度和频率、网络吞吐量和公平性将直接影响无线局域网中 TCP 的吞吐量、公平性和稳定性。

关键词 无线局域网,媒体访问控制,TCP 吞吐量,TCP 公平性

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Analysis for the Effect of Wireless LAN MAC Mechanism on TCP Performance

SONG Jun¹ JIN Yan-hua¹ LI Yuan-yuan² LI Lin¹

(College of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)¹

(Scientific Research Office, Chongqing University of Post and Telecommunication, Chongqing 400065, China)²

Abstract Thoroughly researched the effect of MAC mechanism on performance of TCP in WLAN by analyzing and comparing on the TCP performance under three typical MAC mechanism used by IEEE802.11 WLAN. Simulation results indicate, the channel collision ratio, MAC frame lost ratio, MAC frame transmission delay jitter amplitude and frequency, network throughput and fairness which are determined by the MAC mechanism, will impact directly on the throughput, fairness and stability of TCP in WLAN.

Keywords Wireless LAN, Media access control, TCP throughput, TCP fairness

随着笔记本电脑、掌上电脑等移动终端的普及,无线局域网以其接入灵活、架构和扩展方便等优点得到了迅速发展。基于 IEEE802.11 系列标准^[1,2]的无线局域网在使网络用户摆脱网线束缚的同时,在企业、家庭、酒店、机场等热点地区向移动用户提供高速数据传输。IEEE802.11 无线局域网的媒体访问控制(Media Access Control, MAC)机制采用基于竞争的分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)。研究表明,在网络规模较大时,信道冲突将快速上升,站点频繁退避,导致网络性能明显恶化。为此,国内外学者从参数优化、参数动态调整、冲突分解算法、竞争窗口调节机制等方面对 DCF 进行了大量改进^[3-7],以提高无线局域网的网络性能。TCP^[8]是当前因特网广泛采用的可靠传输协议,其性能将直接影响各种数据业务的质量。TCP 最初主要针对有线网络的数据传输而设计,无线局域网固有的信道质量差、基于竞争的 MAC 机制、隐藏终端、暴露终端等特点,使 TCP 性能受到严重影响。虽然对 TCP 进行了大量改进^[9-11],以提高 TCP 在无线局域网中的性能,但并未改变无线局域网对 TCP 性能的影响。

无线局域网 MAC 机制是影响 TCP 性能的主要因素之一,大量 MAC 机制改进方案主要以提高信道利用率和网络

性能为目标,并非专门针对提高 TCP 性能而设计。因此,深入研究 DCF 及其典型改进方案如何影响 TCP 性能,对进一步改进无线局域网 MAC 机制,减小或消除 MAC 机制对 TCP 性能的影响,以及大规模利用无线局域网开展因特网数据业务具有重要意义。

1 IEEE802.11 DCF

DCF 是 IEEE802.11 无线局域网最基本的 MAC 机制。当站点需要发送数据时,首先监测信道是否空闲;如果信道持续空闲时间达到 DIFS,站点开始发送数据;如果信道忙,站点继续监测信道;当信道由忙变为空闲且持续空闲时间达到 DIFS 时,站点随机地选择一个退避时间进行退避,直到退避时间结束,站点开始发送数据。退避时间 BackoffTime 由式(1)确定:

$$BackoffTime = Random(0, CW-1) \times SlotTime \quad (1)$$

其中, $Random(a, b)$ 表示 a 到 b 之间的一个随机数,其概率服从 $[a, b]$ 上的均匀分布; CW 为站点当前的竞争窗口尺寸,取值介于竞争窗口初始值 CW_{min} 与竞争窗口最大值 CW_{max} 之间; $SlotTime$ 为 IEEE802.11 标准规定的一个时隙占用的时间。

到稿日期:2008-11-15 本文受重庆市科技攻关项目(CSTC2008AC2075),重庆市自然科学基金(CSTC2007BB6419),重庆市教委科技研究项目(KJ080425)资助。

宋 军(1971-),男,博士,副教授,研究方向为宽带网络技术、嵌入式系统, E-mail: songjun_cq@163.com; 金艳华(1984-),男,硕士研究生,研究方向为无线网络技术; 李媛源(1980-),女,留英硕士,助理研究员,研究方向为通信与计算机网络技术; 李 霖(1962-),男,高级工程师,研究方向为计算机网络技术。

目的站点若正确接收数据,在时间间隔 SIFS 后,向源站点发送 ACK 确认帧。源站点收到 ACK 确认帧后,将其竞争窗口 CW 恢复为初始值 CW_{\min} ,准备发送新的数据。为了避免单个站点长时间占用信道,站点在两次连续的数据发送之间也需要进行随机退避。

多个站点在同一个时刻接入信道会产生冲突,数据在传输过程中遭到破坏,所有冲突站点将无法收到 ACK 确认帧。此时,冲突站点将根据各自连续冲突的次数和式(2)增大自己的竞争窗口:

$$CW' = 2^m (CW_{\min} + 1) - 1 \quad (2)$$

其中, m 为站点连续冲突的次数。

站点取增大后的竞争窗口值 CW' 与竞争窗口最大值 CW_{\max} 二者中的较小值作为当前竞争窗口值 CW ,即 $CW = \min(CW_{\max}, CW')$,并根据当前竞争窗口值 CW 和式(1)确定新一轮退避时间。退避结束后,站点将重新发送数据。

IEEE802.11 标准还允许站点采用 RTS/CTS 方式对信道进行预约,以克服隐藏终端问题,并将冲突限制在较短的 RTS/CTS 帧交换过程中,减少因冲突浪费的带宽资源。

2 DCF 改进方案

2.1 快速冲突分解

快速冲突分解(Fast Collision Resolution, FCR)采用远大于 IEEE802.11 标准规定的竞争窗口最大值 CW_{\max} ,且同时增大冲突站点、退避站点的竞争窗口,以快速降低冲突的概率,减小平均冲突次数;采用远小于标准规定的竞争窗口初始值 CW_{\min} ,且站点在探测到给定数量的连续空闲时隙后,按指数方式迅速减少退避时间,以减小因退避而浪费的平均空闲时隙数。其工作步骤描述如下:

(1) 竞争窗口初始值和最大值调整:FCR 的竞争窗口初始值 CW_{\min} 和竞争窗口最大值 CW_{\max} 通常采用[3, 2047],远小于和大于 IEEE802.11 标准规定的[31, 1023]。

(2) 竞争窗口动态调整:FCR 在发生冲突和数据发送成功时进行的竞争窗口调整与 DCF 相同,并新增了信道由闲变忙时站点进行竞争窗口调整的功能。当站点在退避过程中监测到一个新的信道忙周期时(无论这个信道忙周期是因为冲突还是其他站点正确传输所引起),站点将自己的竞争窗口值增大 1 倍,取增大 1 倍后的竞争窗口值与竞争窗口最大值 CW_{\max} 二者中的较小值作为当前竞争窗口值。

(3) 退避时间动态调整:站点在退避过程中对信道进行监测,每监测到一个空闲时隙,将退避定时器的值减 1;当站点监测到 $(CW_{\min} + 1) \times 2 - 1$ 个连续空闲时隙后,如果继续监测到连续空闲时隙,则每监测到一个空闲时隙,将退避时间减半,直至退避时间为零,结束退避。

2.3 新型自适应 DCF

新型自适应 DCF(New Self-Adaptive DCF, NSAD)通过站点实时监测网络负载情况并动态调整初始竞争窗口,以减少冲突和频繁退避,从而提高网络性能。其工作步骤如下:

首先,每个站点在数据发送过程中,独立地实时监测和统计信道冲突时间 t_{coll} 和信道空闲时间 t_{free} 。

其次,站点每成功传输一个数据帧后,按式(5)和式(6)计算出信道平均冲突时间 $t_{\text{coll_avg}}$ 和信道平均空闲时间 $t_{\text{free_avg}}$,并按式(7)计算出实时网络负载 L :

$$t_{\text{coll_avg}} = \lambda * t_{\text{coll_avg}} + (1 - \lambda) * t_{\text{coll}} \quad (5)$$

$$t_{\text{free_avg}} = \lambda * t_{\text{free_avg}} + (1 - \lambda) * t_{\text{free}} \quad (6)$$

$$L = t_{\text{coll_avg}} / t_{\text{free_avg}} \quad (7)$$

其中, λ 为平滑随机抖动参数,取值 0.925。

最后,站点根据实时网络负载 L 与理论最优网络负载 l_{opt} 的比较结果,调整初始竞争窗口值:

当 $L > l_{\text{opt}} + \sigma$ 时,站点将初始竞争窗口值减少一倍, $CW_{\min} = (CW_{\min} + 1) / 2 - 1$ 。

当 $L < l_{\text{opt}} - \sigma$ 时,站点将初始竞争窗口值增大一倍, $CW_{\min} = (CW_{\min} + 1) * 2 - 1$ 。

当 $l_{\text{opt}} - \sigma < L < l_{\text{opt}} + \sigma$ 时,站点的初始竞争窗口值保持不变。

其中, σ 为触发初始竞争窗口值调节的门限值,取值 0.3。

3 TCP 性能分析

3.1 仿真参数设置

本节利用 ns-2 网络仿真平台对无线局域网 MAC 层分别采用 DCF, FCR 和 NSAD 时的 TCP 性能进行分析和比较,仿真实验的网络拓扑结构如图 1 所示。

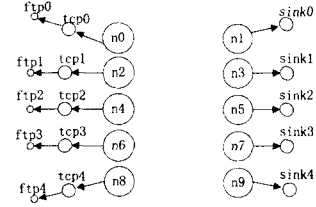


图 1 网络拓扑结构

网络中的站点数量分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60, 每个站点的发射范围为 250 米,所有站点均能相互覆盖,链路带宽为 1Mbps,路由协议为 DSDV,传输层采用 TCP-Reno, TCP 慢启动门限 $ssthresh$ 初始值为 20, TCP 接收端通告窗口 $awnd$ 为 20, TCP 报文长度为 1000Bytes,应用层为 FTP 数据流,每个站点只有 1 条 TCP 连接,仿真时间为 500s。MAC 层竞争窗口参数如表 1 所列,其它参数采用 IEEE802.11 标准规定值。为分析 MAC 机制对 TCP 性能的影响,仿真实验中物理层采用理想信道,即站点不会因信道干扰而丢帧。

表 1 MAC 层竞争窗口参数

MAC 机制	DCF	FCR	NSAD
CW_{\min}	31	3	31(动态调整)
CW_{\max}	1023	2047	1023

3.2 TCP 数据发送过程分析

图 2 给出了无线局域网采用不同 MAC 机制时的 TCP 数据包发送过程和拥塞窗口变化过程。比较 3 种 MAC 机制的 TCP 拥塞窗口变化过程可以看出,在 500 秒的仿真实验中,DCF, FCR 和 NSAD 的 TCP 拥塞窗口分别减小了 13, 9 和 3 次,DCF 的 TCP 拥塞窗口减小最频繁,NSAD 的 TCP 拥塞窗口减小的次数最少,虽然 FCR 的 TCP 拥塞窗口减小次数少于 DCF,但其 TCP 拥塞窗口通常直接减小为 1,即 TCP 发送端返回到慢启动阶段。TCP 拥塞窗口减小是因为数据包在传输过程中丢失而引起的,由于仿真实验中物理层采用理想信道,且无中间转发节点,导致 TCP 拥塞窗口减小的原因主要是信道冲突丢帧导致 TCP 数据包丢失、MAC 层传输

时延过大导致数据传输超时。

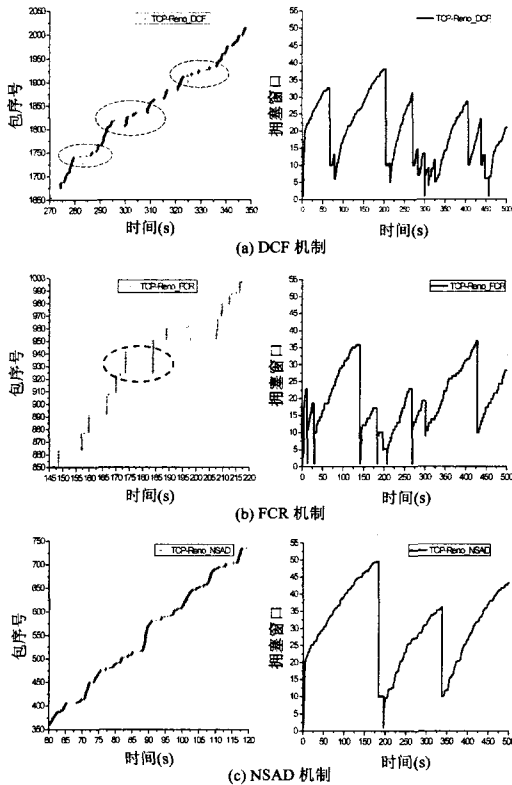


图2 不同 MAC 机制的 TCP 数据包发送和拥塞窗口变化过程

从图 2(a)可以看出,无线局域网 MAC 层采用 DCF 时, TCP 在数据发送过程中经常丢包和重传数据包,导致 TCP 发送端拥塞窗口频繁减小。出现这种情况的原因是,在网络规模较大、网络负载较重时,DCF 使无线局域网的信道冲突快速上升,单个站点连续冲突的次数不断增加,致使 MAC 层频繁丢帧,导致 TCP 发送端因数据包丢失而不断减小拥塞窗口和慢启动门限值。特别是在 295 秒至 300 秒期间,由于信道冲突过于激烈,多个 TCP 包连续被 MAC 层丢弃, TCP 发送端长时间未接收到 ACK 确认包,引发数据传输超时,拥塞窗口减小为 1,重新进入慢启动阶段。

从图 2(b)可以看出,无线局域网 MAC 层采用 FCR 时, TCP 每次均在很短时间内发送大量数据包,但两次数据发送却相隔较长时间,造成 TCP 瞬时吞吐量大幅波动、稳定性差。当两次数据发送的时间间隔过大时,大量已正确传输的数据包超时重传, TCP 发送端的拥塞窗口减小为 1,重新进入慢启动状态, TCP 的吞吐量迅速下降。出现上述现象的原因是, FCR 虽然能够迅速分解信道冲突,减少因站点连续冲突造成丢帧和 TCP 数据包丢失而引起 TCP 拥塞窗口减小,但 FCR 却使成功发送数据的站点更容易抢占信道,并长时间占用信道发送大量数据,严重影响其他站点 TCP 流的数据传输。因此,FCR 的 TCP 拥塞窗口频繁地因传输超时而减小至 1。此外, TCP 瞬时吞吐量较大时, TCP 发送端站点长时间占用信道必然导致 TCP 接收端站点无法传输 ACK 包, TCP 发送端同样也会因为接收不到 ACK 包而传输超时,将拥塞窗口减小至 1,并导致大量已被正确接收的 TCP 数据包重传。例如,在 175 秒至 185 秒期间, TCP 接收端站点无法抢占信道传输 ACK 包, TCP 发送端在 185 秒因传输超时将此于 175 秒发送的数据包全部重传,浪费无线信道宝贵的带宽资源。

从图 2(c)可以看出,无线局域网 MAC 层采用 NSAD 时, TCP 数据包发送平稳、时间间隔较小, TCP 发送端的拥塞窗口在较长时间内大于接收端通告窗口,使 TCP 能够持续以最大吞吐量稳定地传输数据包。这是由于 NSAD 通过站点实时监测网络负载并动态调整初始竞争窗口,减少了信道冲突和由此引起的数据包丢失,保证了 TCP 拥塞窗口的平稳增长。此外,站点成功传输数据后以实时网络负载所确定的竞争窗口而不是以最小竞争窗口随机选择退避时间,有效避免了单个站点长时间占用信道而引起其他站点 TCP 数据包传输的不稳定。但 TCP 数据包发送速度和拥塞窗口增长速度均较慢,不利于有效利用网络带宽资源。

通过上述分析可知,从 MAC 层角度提高无线局域网中 TCP 吞吐量、保持 TCP 吞吐量稳定性,首先必须有效减少信道冲突;其次需要对信道冲突进行快速分解,防止单个站点连续遭遇冲突而引发 MAC 层丢帧和 TCP 包丢失,避免 TCP 发送端因不必要的拥塞控制而减小吞吐量;此外,还需减小站点 MAC 层数据传输的时延抖动幅度和频率,防止 TCP 发送端频繁返回慢启动状态而使 TCP 吞吐量锐减,保持 TCP 吞吐量的稳定。

3.3 TCP 吞吐量比较

无线局域网采用不同 MAC 机制时的网络吞吐量和 TCP 吞吐量如图 3 所示。从总体上看,由 MAC 机制所确定的网络吞吐量对 TCP 的吞吐量影响较大,在 3 种 MAC 机制中, DCF 的网络吞吐量最小,其 TCP 吞吐量也最小。但是,网络吞吐量并不是决定 TCP 吞吐量的唯一因素,3 种 MAC 机制中, FCR 的网络吞吐量最大,其 TCP 吞吐量却小于 NSAD 的 TCP 吞吐量。如前所述,造成这种情况的原因是 FCR 的 TCP 接收端站点无法抢占信道传输 ACK 包,导致大量已正确传输的 TCP 数据包重传,浪费了部分网络吞吐量。因此,在设计和改进无线局域网 MAC 机制时,不仅要提高网络吞吐量和信道利用率,还应考虑如何保证 ACK 包的稳定传输。

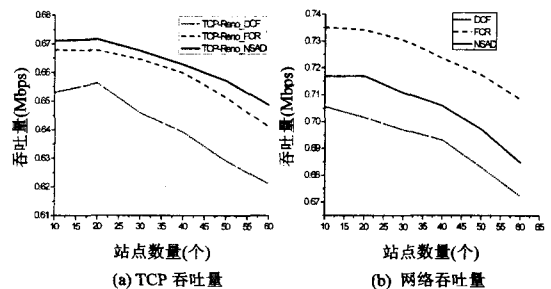


图3 TCP 与 MAC 层的吞吐量对比图

3.4 TCP 公平性比较

图 4(a)给出了无线局域网 MAC 层分别采用 DCF, FCR 和 NSAD 时的 TCP 公平性指数。公平性指数用于定量评价网络中各 TCP 连接吞吐量的公平性,其定义如下:

$$FI = \frac{(\sum_i \frac{T_i}{\phi_i})^2}{N * \sum_i (\frac{T_i}{\phi_i})^2} \quad (8)$$

其中, N 是 TCP 流的数量, T_i 和 ϕ_i 分别为 TCP 流 i ($i=1, 2, \dots, N$) 的吞吐量和权重。当所有 TCP 流具有相同权重时, $FI \leq 1$ 。 FI 值越接近于 1, 各个 TCP 流越公平地共享无线信道; $FI=1$ 时, 各 TCP 流完全公平; $FI=1/N$ 时, 各个 TCP 流

绝对不公平。

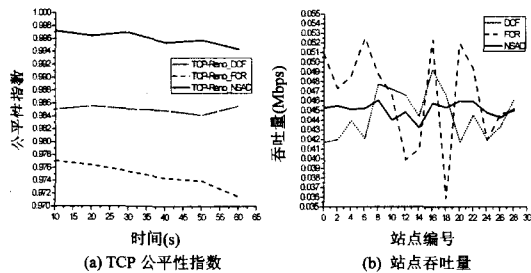


图4 TCP与MAC层的公平性对比图

由图4(a)可知,无线局域网MAC层采用FCR时,TCP的公平性最差,各个站点的TCP流吞吐量不平衡,这是因为FCR使无线信道带宽在各个站点的分配不公平。如图4(b)所示,无线局域网MAC层采用FCR时,6号、16号和20号站点的吞吐量远大于12号、18号和24号站点的吞吐量,必然导致6号、16号和20号站点的TCP吞吐量大于12号、18号和24号站点的TCP吞吐量。根据FCR的工作原理可知,FCR使成功发送数据的站点保持很小的竞争窗口值,再次抢占信道的概率大,而其它站点则维持较大的竞争窗口值,抢占信道的概率小,造成某些站点占用较多的信道带宽资源,而引起不公平。无线局域网MAC层采用NSAD时,各站点吞吐量基本维持在0.0445Mbps左右,各站点较公平地占用信道带宽资源,保证了TCP较好的公平性。因此,MAC机制的公平性将直接影响无线局域网中TCP的公平性。

结束语 IEEE802.11无线局域网MAC层分别为DCF、FCR和NSAD3种机制时的TCP性能仿真实验结果表明,由MAC机制所决定的信道冲突率、单站点连续冲突率、MAC帧丢失率、MAC帧传输时延抖动幅度和频率、网络吞吐量和公平性将直接影响无线局域网中TCP的吞吐量、公平性和稳定性。因此,在设计或改进无线局域网MAC机制时,不仅以提高网络吞吐量与信道利用率为目标,还应重视网络帧丢失率、时延抖动、公平性等性能的改善,减小MAC机制对TCP

性能的影响。

参考文献

- [1] IEEE Std. 802. 11, 1999 Edition, PartII; IEEE 802. 11 Wireless LAN medium access control (MAC) and physical (PHY) layer specifications[S], 1999
- [2] IEEE802. 11e/D13. 0. Draft supplement to part 11 : wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications;Medium access control (MAC) enhancements for quality of service (QoS) [S], January 2005
- [3] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802. 11 distributed coordination function[J]. IEEE JSAC, 2000, 18(3)
- [4] Cali F, Conti M, Gregori E. Dynamic Tuning of the IEEE 802. 11 protocol to achieve a theoretical throughput limit [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(6): 785-799
- [5] Ramaiyan V, Kumar A. Fixed point analysis of single cell IEEE 802. 11e WLANs: Uniqueness, multistability and throughput differentiation[C]//Proc. of ACM SIGMETRICS. June 2005
- [6] 彭泳,程时端. 一种自适应无线局域网协议[J]. 软件学报, 2004, 4: 604-615
- [7] Younggoo K, Yugang F, Haniph L. A Novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs[C]//Proc. of INFOCOM2003. July 2003
- [8] Paxson V, Allman M, Stevens W. TCP Congestion Control[S]. RFC 2581, 1999
- [9] Xiang C, Hongqiang Z, Jianfeng W, et al. A Survey on Improving TCP Performance over Wireless Networks[J]. Network Theory and Applications, 2005, 16(5): 657-695
- [10] Jiwei C, Mario G, Yengzhong L, et al. TCP with delayed ack for wireless networks[J]. Adhoc Networks, 2008, 6(7): 1098-1116
- [11] Qian W, Mingwei G, Williamson C. TCP fairness issues in IEEE 802. 11 wireless LANs[J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2150-2161

(上接第98页)

$2M+2\Phi$, 当 $a=1$ 时, 算法需要 $4kC$ 或 2Φ , 其要优于逐次 3 倍点。在此基础上, 给出一种变长滑动窗口 $wrNAF$ 标量乘算法, 其可有效降低 3 倍点的计算量。优化 $GF(3^m)$ -ECC 核心标量乘法运算的性能是需要作进一步研究的课题。

参考文献

- [1] Menezes A J. Elliptic Curve Public Key Cryptosystems [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1993
- [2] Barbosa M, Moss A, Page D. Compiler assisted elliptic curve cryptography[EB/OL]. Cryptology ePrint Archive, 2007/053. <http://eprint.iacr.org/2007/081>, 2007
- [3] Ahmadi O, Hankerson D, Menezes A. Software implementation of arithmetic in F_3^m [C]//International Workshop on the Arithmetic of Finite Fields (WAIFI 2007). Berlin: Springer-Verlag, 2007: 85-102
- [4] Bertoni G, Guajardo J, Kumar S, et al. Efficient $GF(p^m)$ arithmetic architectures for cryptographic applications[C]// CT-

RSA2003. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 158-175

- [5] Smart N P, Westwood E J. Point multiplication on ordinary elliptic curves over fields of characteristic three[J]. Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing, 2003, 13(6): 485-497
- [6] Negre C. Scalar multiplication on elliptic curves defined over fields of small odd characteristic[C]// INDOCRYPT 2005. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 389-402
- [7] Kim K H, Kim S I, Choe J S. New fast algorithms for arithmetic on elliptic curves over finite fields of characteristic three[EB/OL]. Cryptology ePrint Archive. Technical Report 2007/179. <http://eprint.iacr.org/2007/179>, 2007
- [8] Takagi T, Yen S M, Wu B C. Radix-r non-adjacent form[C]//7th Information Security Conference, ISC 2004. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 99-110
- [9] Han D G, Takagi T. Some Analysis of Radix-r Representations [EB/OL]. Cryptology ePrint Archive. Technical Report 2005/402. <http://eprint.iacr.org/2005/402>, 2005