

基于定时模型的 VSAT 时隙 ALOHA 系统性能研究

郭 晓 张更新 牛大伟 张 磊 彭来献
(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘 要 在采用时隙 ALOHA 方式的 VSAT 卫星数据通信系统中,为数据帧分配保护时间是帧格式设计中的一项重要任务。利用系统的定时关系给出准同步时隙 ALOHA 系统数据帧无冲突接收的充要条件,在此基础上分析了保护时间、定时偏差对系统性能的影响,并给出了最佳保护系数的解析表达式。数值仿真结果表明:当定时偏差系数 $\beta \leq 0.5$ 时,存在着一个最优的保护系数 α_{opt} ,据此设定数据帧的保护时间可获得系统最大吞吐率;当定时偏差系数 $\beta > 0.5$ 时,增加数据帧的保护时间会减小系统吞吐率。

关键词 VSAT, 准同步, 时隙 ALOHA, 吞吐率

Performance Study of VSAT Slotted ALOHA System Based on Timing Model

GUO Xiao ZHANG Geng-xin NIU Da-wei ZHANG Lei PENG Lai-xian

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract In VSAT satellite communication system using slotted ALOHA method, assigning guard time is important for frame format design. In this paper, sufficient and necessary condition for collision-free receiving in quasi-synchronous ALOHA system was reduced from timing relation. Based on this conclusion, the joint effects of guard time and timing warp on system performance were analyzed and a scheme was proposed to calculate optimum guard coefficient. Numeric simulations show that when timing warp coefficient $\beta \leq 0.5$, there is a optimum guard coefficient α_{opt} , and using it a guard time achieving maximal throughput can be obtain. When timing warp coefficient $\beta > 0.5$, increasing frame guard time will decrease system throughput.

Keywords VSAT, Quasi-synchronous, Slotted ALOHA, Throughput

1 引言

基于 ALOHA 的随机接入方式是一种非常简单得多用户通信方式,被广泛应用于 VSAT 卫星数据通信系统等多种通信系统中^[1]。时隙 ALOHA 系统相对于纯 ALOHA 系统可以将信道利用率提高一倍,因此,实际的通信系统大多采用时隙 ALOHA 方式^[2,3]。

影响 ALOHA 系统稳定性和吞吐效率的主要因素是碰撞现象的发生。文献[4,5]基于非对称多包接收(MPR)模型研究了系统的稳定性,从而得到了多户系统稳定区域的详细特征。文献[6,7]基于离散马尔可夫链模型研究了系统性能,并给出了相应的优化策略。文献[8]则研究了 CDMA 扩频信道条件下时隙 ALOHA 系统的性能。虽然这些研究对系统性能进行了研究,但它们都假设定时是精确的或准精确的,在分析系统性能时没有考虑定时因素的影响。

然而在现实的 VSAT 系统中,由于定时器件的性能限制以及各地球站信号传播时延的不确定性,不可能做到全网时钟的精确同步,每个站点的定时都存在不同程度的随机偏差。

这样的系统称为准同步 ALOHA 系统。为了保证数据帧能够无碰撞地被接收,需要在数据帧的头部和尾部设置一定的保护时间,以避免时隙定时的不确定性引发的数据碰撞。

如图 1 所示,定时偏差导致两个时隙数据帧的发送时间有重叠,但由于保护时间的存在,不会引起有效载荷数据的碰撞,两个数据帧都可以被无冲突地接收。但若定时偏差导致有效载荷数据在发送时间上有重叠,则两个数据帧就会碰撞,导致数据发生冲突。因此,保护时间作为准同步 ALOHA 系统设计的重要参数,会对时隙 ALOHA 系统的性能和稳定性产生影响。如果保护时间设置过大,会挤占有效数据发送时间;如果保护时间设置过小,则会增加定时不稳定带来的数据帧碰撞。相对于精确定时系统,非精确定时的系统会对系统产生什么样的影响?如果给定系统的定时稳定度,如何设置保护时间才能获得最优的系统性能和稳定性?本文从定时模型的角度对这些问题进行分析,利用系统的定时关系给出准同步时隙 ALOHA 系统数据帧无冲突接收的充要条件,然后在此基础上给出系统性能的解析关系,最后利用数值仿真结果进行分析。

到稿日期:2012-01-14 返修日期:2012-05-17 本文受国家自然科学基金(60972062,61032004)资助。

郭 晓(1981—),男,博士生,助教,主要研究方向为卫星通信、无线数据网,E-mail:gosiua@163.com;张更新(1967—),教授,博士生导师,主要研究方向为卫星通信、无线数据网;牛大伟(1979—),男,讲师,主要研究方向为无线数据通信、光通信;张 磊(1972—),男,副教授,主要研究方向为计算机网络;彭来献(1978—),男,副教授,主要研究方向为宽带数据通信。

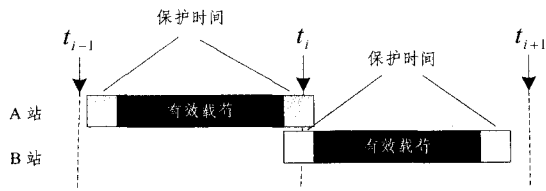


图1 利用保护时间避免数据帧冲突

2 时隙ALOHA系统定时模型

假定系统中总的用户数为 K , 数据帧的到达速率为参数 λ 的泊松过程。系统已使用某种同步方法, 使得各站保持准同步关系, 即各站跟系统绝对时间有一个随机偏差 Δt 。为对抗这种随机偏差, 每个站在发送分组的时候在分组的头尾增加一定的保护时间。假定系统的时隙长度为 T_0 , 且恰好等于有效数据时间 T_d 和保护时间 T_{guard} 之和, T_{guard} 包括头部保护时间 T_{guard1} 和尾部保护时间 T_{guard2} , 即满足

$$T_0 = T_d + T_{guard} \quad (1)$$

$$T_{guard} = T_{guard1} + T_{guard2}$$

在此系统中, 数据帧的发送过程如图2所示。

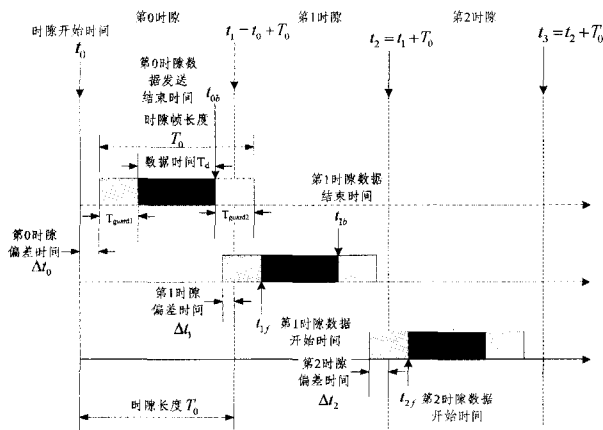


图2 准时隙ALOHA系统报文发送过程

规定在图2的时间轴上, 滞后时间偏差为正, 超前时间偏差为负, 其中, t_{1f} 和 t_{1b} 为1号时隙数据帧中的数据部分的开始时刻和结束时刻。由于在第0和第2时隙可能有多个数据帧被发送, 故 t_{0b} 为0号时隙中可能发送报文的时间偏差最大偏差时间, t_{2f} 为2号时隙中时间偏差最小的偏差时间。

引理1 在准同步时隙ALOHA系统中, 对于给定的时隙, 时钟偏差不会引起数据冲突的充要条件为:

$$\begin{cases} \Delta t_1 - \Delta t_0 \geq -T_{guard} \\ \Delta t_2 - \Delta t_1 \geq -T_{guard} \end{cases} \quad (2)$$

式中, Δt_1 为当前时隙报文相对于绝对时间的随机偏差, Δt_0 为前一个时隙内可能发送的报文的最大的时间偏差, Δt_2 为后一个时隙内可能发送报文的最小时间偏差, T_{guard} 为时隙内总的保护时间。

证明: 考察第1时隙中发送的报文, 要使此报文能够无冲突接收, 除了当前时隙有且只有一个报文发送之外, 还必须使得此报文的数据部分和其他时隙报文的数据部分在接收时间上无重叠, 即满足

$$t_{1f} \geq t_{0b} \text{ 且 } t_{1b} \leq t_{2f} \quad (3)$$

显然, 当且仅当式(3)成立, 在第1时隙发送的报文不会因为定时的偏差而引起发送数据的冲突。由图2可得如下关

系:

$$t_{0b} = t_0 + \Delta t_0 + T_{guard1} + T_d$$

$$t_{1f} = t_1 + \Delta t_1 + T_{guard1} = t_0 + T_0 + \Delta t_1 + T_{guard1} \quad (4)$$

$$t_{1b} = t_{1f} + T_d = t_0 + T_0 + \Delta t_1 + T_{guard1} + T_d$$

$$t_{2f} = t_2 + \Delta t_2 + T_{guard1} = t_0 + 2T_0 + \Delta t_2 + T_{guard1}$$

结合式(2)、式(3)等价于

$$\begin{cases} \Delta t_1 - \Delta t_0 \geq -T_{guard} \\ \Delta t_2 - \Delta t_1 \geq -T_{guard} \end{cases} \quad (5)$$

经考察, 除了系统起始时隙和结束时隙, 其它时隙情况也如此。对于一个运行时间相当长的系统, 起始时隙和结束时隙对系统的影响可以忽略, 由此, 本引理得证。

3 准同步时隙ALOHA系统性能分析

3.1 准同步时隙ALOHA系统的吞吐量

在网络中存在大量用户, 即 $K \rightarrow \infty$ 时, 时隙ALOHA系统中各站点发送到信道中的报文可以看作服从泊松分布。这里使用两个归一化参数来描述系统:

(1) 吞吐量 S , 即在单位时间 T_0 内无冲突发送的平均数据帧数。显然, $0 \leq S \leq 1$ 。 $S=0$ 表示所有发送到信道上的数据帧都因为冲突损失了, $S=1$ 表示报文一个接一个地发送, 没有数据冲突。

(2) 网络负载 λ , 即 T_0 时间内平均发送的数据帧个数。由于存在多个发送用户, λ 可以远远大于1。

在系统稳定状态下, 吞吐量 S 与网络负载 λ 的关系为:

$$S = \lambda \cdot P\{\text{发送成功}\} \quad (6)$$

在精确定时的时隙ALOHA系统中, $S = \lambda e^{-\lambda}$, 即发送成功的概率为当前有且仅有一个数据帧被发送的概率 $e^{-\lambda}$ 。 S 的最大值约为0.368。

在准同步ALOHA系统中, 一个报文要想成功发送, 须要在当前时隙内有且只有一个报文发送, 且满足引理1给出的充要条件。因此, 准同步时隙ALOHA系统的吞吐量为:

$$S = P\{\Delta t_1 - \Delta t_0 \geq -T_{guard} \text{ 且 } \Delta t_2 - \Delta t_1 \geq -T_{guard}\} \quad (7)$$

且当前时隙仅发送一个帧

可得引理2。

引理2 准同步时隙ALOHA系统的归一化吞吐量为

$$S = \lambda e^{-\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} F_0(\tau + T_{guard}) [1 - F_2(\tau - T_{guard})] dF_1(\tau) \quad (8)$$

式中, $F_0(\cdot)$ 为 Δt_0 的分布函数, $F_1(\cdot)$ 为 Δt_1 的分布函数, $F_2(\cdot)$ 为 Δt_2 的分布函数。

在一个较长的系统运行时间内, 可以假定系统中所有用户的定时偏差服从统一的分布函数 $F(\cdot)$ 。由于 $\Delta t_0, \Delta t_2$ 分别为时隙中所有可能发送报文定时偏差的最大值和最小值, 可得:

$$F_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} P(k) F^k(x) \quad (9)$$

$$F_2(x) = 1 - \sum_{k=0}^{\infty} P(k) (1 - F(x))^k$$

其中, $P(k)$ 为一个时隙内 k 个报文到达的概率, 即

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (10)$$

$F_1(\cdot)$ 即为 $F(\cdot)$ 。综合引理2和式(8)、式(9)可得以下定理。

定理 1 在准同步 ALOHA 系统中,若所有站点的定时偏差服从独立同分布 $F(\cdot)$,且在数据帧首尾附加保护时间 T_{guard} ,则系统的归一化吞吐率为:

$$S = \lambda e^{-2\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\lambda(F(\tau+T_{guard})-F(\tau-T_{guard}))} dF(\tau) \quad (11)$$

从式(10)可以看出,相对于精确同步 ALOHA 系统,准同步 ALOHA 系统的归一化吞吐率不仅受网络负载 λ 的影响,还受保护时间 T_{guard} 和定时偏差分布函数 $F(\cdot)$ 的影响。

3.2 保护时间大小与系统吞吐率

定理 1 虽然将保护时间 T_{guard} 和定时偏差分布函数 $F(\cdot)$ 两个因素作为参数引入到了系统分析中,但不能直观反映这两个因素是如何影响系统性能的。为了定量分析,假定随机定时误差 Δt 服从 $[-\Gamma_0, \Gamma_0]$ 内的均匀分布^[9], Γ_0 为最大绝对定时偏差。即 $F(\cdot)$ 为均匀分布函数:

$$F(\Delta t) = \begin{cases} 0, & \Delta t < -\Gamma_0 \\ \frac{\Delta t + \Gamma_0}{2\Gamma_0}, & -\Gamma_0 \leq \Delta t < \Gamma_0 \\ 1, & \Delta t \geq \Gamma_0 \end{cases} \quad (12)$$

定义保护系数 $\alpha = \frac{T_{guard}}{\Gamma_0}$,即保护时间和最大定时偏差的

比值,这个参数可直观反映保护时间和定时偏差之间的关系。由图 2 可知,若保护时间大于两倍,等于最大定时偏差,已经能够完全避免由于定时偏差引起的数据碰撞,故取 $0 \leq \alpha \leq 2$ 。

定义偏差系数 $\beta = \frac{\Gamma_0}{T_0}$, $0 \leq \beta$,即定时最大偏差与隙大小的比例,可反映系统定时不准确的程度。

定理 1 的吞吐率是以帧为单位来计算的,并没有考虑插入保护时间带来的效率损失。为了说明以数据为单位的效率问题,定义有效数据吞吐率为:

$$S_{data} = S \cdot \text{载荷率} = S \cdot (1 - \frac{T_g}{T_0}) \quad (13)$$

即从成功发送的数据帧中去除保护时间的开销。在定理 1 中引入式(11)、式(12)得以下推论。

推论 1 在准同步 ALOHA 系统中,若所有站点的定时偏差服从均匀分布,且根据最大绝对偏差 Γ_0 在数据帧首尾附加保护时间 $\alpha \cdot \Gamma_0$,则系统的有效数据吞吐率为:

$$S_{data}(\lambda, \alpha, \beta) = \begin{cases} (1-\alpha\beta)e^{\frac{1}{2}(-4+\alpha)\lambda}(-2+e^{\frac{\alpha\beta}{2}(2+\lambda-\alpha\lambda)}), & 0 \leq \alpha \leq 1 \\ (1-\alpha\beta)e^{-2\lambda}(-2e^{\frac{\alpha\beta}{2}}+e^{\lambda}(2+(-1+\alpha)\lambda)), & 1 \leq \alpha \leq 2 \end{cases} \quad (14)$$

由推论 1 可知,系统吞吐率 S_{data} 不仅与网络负载 λ 有关,还与保护系数 α 和偏差系数 β 有关。在给定的系统定时偏差系数 β 时,系统能获得的最大吞吐率、最优保护系数分别为:

$$\begin{aligned} S_{opt} &= \max_{\lambda, \alpha} S_{data}(\lambda, \alpha, \beta) \quad \text{s. t. } \lambda \geq 0, 0 \leq \alpha \leq 2 \\ \alpha_{opt} &= \operatorname{argmax}_{0 \leq \alpha \leq 2} S_{data}(\lambda, \alpha, \beta) \quad \text{s. t. } \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

4 数值仿真结果分析

为了得到直观结果,分 3 种典型情况进行讨论。

(1) 令 $\beta=1/2$,即时钟定时误差的最大绝对偏差不超过半个时隙的范围。这是一种系统定时比较恶劣的情况。数值仿真结果如图 3 所示。

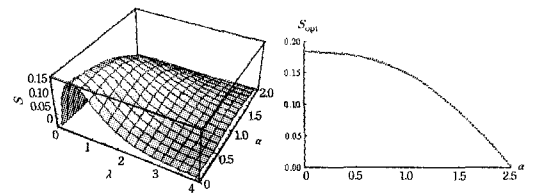


图 3 $\beta=1/2$ 时系统吞吐率

可见,在此种情况下要想获得最大的吞吐率,保护系数 $\alpha_{opt} \rightarrow 0$,此时系统能够获得最大吞吐率 $S_{opt} \rightarrow 0.18$,与纯 ALOHA 系统相当。随着保护系数 α 的增大,系统能获得的最大吞吐率会下降,但系统的不稳定区(即系统负载超过能够获得最大吞吐率的区域,当系统进入不稳定区后,可能会因为用户的重发行为迅速导致系统不可用)会后移,即系统稳定性增强。也就是说,在系统定时精度很差的情况下,增加保护时间会减小系统能获得的最大吞吐率,但是可以后移不稳定区,即提高系统的稳定性。

(2) 令 $\beta=1/4$,即时钟定时误差的最大绝对偏差不超过 $1/4$ 个时隙的范围。这是一种次恶劣的情况。数值结果如图 4 所示。

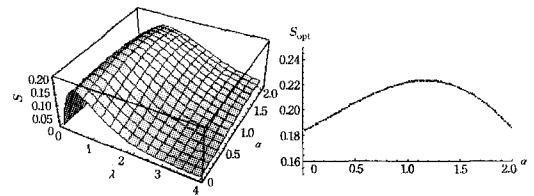


图 4 $\beta=1/4$ 时系统吞吐率

从图 4 可以看出,随着保护系数 α 的增大,系统的吞吐率和稳定性都会显著增加,增大保护时间能够有效避免定时误差带来的数据碰撞。保护系数同样存在着一个最优值 $\alpha_{opt} \rightarrow 1.2$,即保护时间取值比最大绝对定时误差稍高时,有着较高的系统性能 $S_{opt} \rightarrow 0.23$ 。但进一步增大保护时间则会降低系统的吞吐率,亦即系统性能会下降。也就是说,在定时精度不是很恶劣的情况下,适当调整保护系数 α 可以取得系统最大的吞吐率。

(3) 令 $\beta=1/8$,即时钟定时误差的最大绝对偏差不超过 $1/8$ 个时隙的范围。这是一种定时精度比较高的系统。数值结果如图 5 所示。

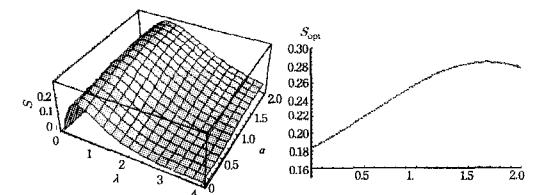


图 5 $\beta=1/8$ 时系统吞吐率

随着 α 的增大,系统的吞吐率会显著增加。保护系数同样存在着一个最优值 $\alpha_{opt} \rightarrow 1.7$,即保护时间取值接近最大绝对定时误差两倍时,系统能获得的最大吞吐率 $S_{opt} \rightarrow 0.28$ 。但相对于 $\beta=1/4$ 时,系统需要更大的保护系数,能够获得的最大吞吐率也进一步增大。

通过对以上 3 种情况数值仿真分析,可以得出如下结论:

(下转第 92 页)

4.3 实验结果

本文实现了基于 libsvm^[6] 软件包的“freegate 破网流量分类系统”，以较好地完成对样本的实时采集、特征提取、模型训练和对混杂流量的分类。实验采用普通 PC 机，操作系统为 Windows XP Professional (sp3)，CPU 为 Intel Pentium 1.6GHz，内存为 1G。训练和测试结果如表 2 所列，其中参数 c 为错分样本的惩罚因子， g 为核函数的控制因子。

表 2 部分不同参数对应的检测结果

c	g	准确率/%
1	1	98.636
1	2	99.545
10	1	99.710
15	6	99.752
15	8	99.834
15	16	99.421
20	18	98.884
100	100	96.157
200	400	90.124

分类效果最佳的一组数据为：参数 $c=15, g=8$ ，检测准确率为 99.8347%，误报率为 0.1653%。可见使用此方法达到了较好的分类效果。

结束语 破网行为具有隐蔽性强、破解难、更新快等性质，存在着很大的安全隐患。前期工作多从逆向工程和服务器 IP 封堵两个角度进行研究。本文从另一角度“流量分类”

进行了初步探索。通过分析具有代表性的破网软件 freegate 的运行机制，提取其破网流量特征，最后使用 SVM 分类方法进行训练和预测。实验结果表明，此方法可以很好地检测出多种混杂流量中的破网行为，并且对训练数据集的依赖程度较低。如何提高此方法检测的实时性并将其部署到真实网络环境中进一步检验是下一步的主要工作。

参考文献

- [1] 周正. 一种追查加密代理数据包的有效方法[J]. 计算机工程, 2007, 33: 142-144
- [2] 陈帆. FreeGate 软件的逆向分析技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008; 369-373
- [3] 张学工. 关于统计学习理论与向量机[J]. 清华大学自动化学报 2000, 26: 32-42
- [4] 林森. 基于支持向量机的流量分类方法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25: 2488-2490
- [5] Wang Rui. Solving the apple classification problem of P 2 P traffic via optimized support vector machines[C]//Proc of Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Los Alanitos; IEEE Computer Society, Vol 2, 2006; 534-539
- [6] 邹啸, 魏延, 吴瑕. 基于混合核函数的支持向量机[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2011, 25(10): 66-70

(上接第 64 页)

对于准同步 ALOHA 系统，确实存在一个最优的保护系数，而这个最优保护系数与系统的定时稳定度紧密相关。为了进一步分析这个关系，我们对式(14)进行数值仿真，如图 6 所示。

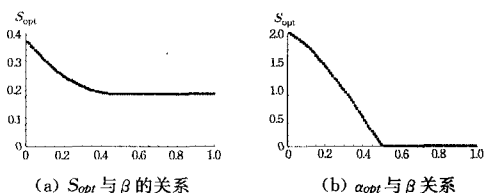


图 6 β 对最优系统参数的影响

可见，若偏差系数 $\beta > 0.5$ ，没有必要对时隙设置保护时间，增加数据帧的保护时间不能提升系统性能。若偏差系数 $\beta < 0.5$ ，合理选择最优保护系数 α_{opt} 可以提高系统性能。随着 β 的减小，即系统同步精度的提高，应增大保护系数以获得最优的系统性能，也就是在定时越精确的系统中，保护时间的相对值应该越大。

结束语 本文在对采用准同步时隙 ALOHA 方式的 VSAT 卫星通信系统进行建模的基础上，利用定时模型对系统的性能进行了仿真分析，并对最佳保护时隙的设置进行了分析研究。数值仿真结果表明，在准同步时隙 ALOHA 系统中，定时稳定度对系统吞吐率有着显著的影响，并存在着一个最优的保护系数用以获得最优的系统性能，而这个最优值与系统最大定时偏差有着对应关系。在系统定时精度比较恶劣的情况下，增加保护时间不能优化系统的吞吐率，但是可以提高系统的稳定性；在定时精度较高的系统中，优化选择的保护时间可以获得优化的系统性能。随着系统同步精度的提高，应增大保护系数以获得最优的系统性能。本文得出的定理 1

可以作为选择最优保护系数的有力工具。

参考文献

- [1] Abramson N. Fundamentals of packet multiple access for satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1992, 10(2): 309-316
- [2] Pratt T, Bostian C, Allnut J. Satellite Communication (2nd press)[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005
- [3] 李莉. HFC 上行信道多重码预约 Slotted ALOHA 随机多址接入的性能分析[J]. 计算机科学, 2002, 29(9): 96-98
- [4] Wang H, Li T. Stability analysis of hybrid ALOHA[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, 47
- [5] Naware V, Mergen G, Tong L. Stability and delay of finite-user slotted ALOHA with multipacket reception[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(7): 2636-2656
- [6] Ma R T B, Misra V, Rubenstein D. An Analysis of Generalized Slotted-Aloha Protocols [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(3): 936-949
- [7] Stamatiou K, Haenggi M. Random-Access Poisson Networks: Stability and Delay[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(11): 1035-1037
- [8] Shao J, Yin K, Liang X. Performance Evaluation of the Non-Zero Propagation Delay ACK-ALOHA-CDMA Channels [C] // 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom'09). Dalian, China, 2009; 1-3
- [9] Ahn J, Syed A, Krishnamachari B, et al. Design and analysis of a propagation delay tolerant ALOHA protocol for underwater networks[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(5): 752-766
- [10] 杨琦, 石江宏, 陈辉煌. 分布式时隙同步抗时钟频率不一致性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(05)