基于轮询的高级在轨系统多路复用包时延分析

张 猛 熊华钢 赵洪博 夏 莹

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191) (沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110168)

摘 要: 目前的高级在轨系统(AOS, Advanced Orbiting Systems)多路复用研究主要以仿真为主,很少有文献给出专门的理论分析. 针对基于轮询的 AOS 多路复用包时延进行研究,通过采用排队论中非空竭限量服务的休假排队系统建立模型,并采用循环再生法进行分析,得到了多路复用包时延计算公式,并给出包时延的下限值. 仿真结果表明,在包到达率取值分别为 1,2,3 包/s,在各种不同的下行速率(范围 240 ~ 330 bit/s)之下,包时延的仿真值曲线均高于理论下限值曲线,从而论证了理论推导的正确性. 研究结果可以为工程设计提供一定的参考作用.

关 键 词: 轮询; 高级在轨系统; 多路复用; 包时延; 休假排队系统

中图分类号: TN 927

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)10-1399-06

Packet time delay of polling-based multiplexing in advanced orbiting systems

Zhang Meng Xiong Huagang Zhao Hongbo

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Xia Ying

(School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Most researches on multiplexing in advanced orbiting systems (AOS) were made by simulation, and few literatures got theoretical results. The packet time delay of polling-based multiplexing in AOS was studied. Mathematical model was established by using vacation queue system with non-exhaustive service, and it was analyzed through cycle regeneration method. A calculation formula of multiplexing packet time delay was derived, and the lower bound value was also obtained. Simulation results show that when the packet arrival rates are 1, 2, 3 packets per second and downlink rate ranges from 240 to 330 bit/s, simulation values of packet time delay are larger than the theoretical lower bound values, which proves the correctness of theoretical derivation. The results can provide reference for practical engineering design.

Key words: polling; advanced orbiting systems; multiplexing; packet time delay; vacation queue system

随着空间科学技术的不断发展,许多空间任务要求实现在航天器与地面站、航天器与航天器间双向传输多信源、多用户并且业务要求各不相同的信息[1-2]. 为此,空间数据系统咨询委员会(CCSDS, Consultative Committee for Space Data Systems)开发了高级在轨系统(AOS, Advanced Orbiting Systems)协议[3-5]. 为了在传输这些不同种类和特性的空间数据时,尽可能地提高空间数据信道的利用率,CCSDS AOS 协议采用包信道复用和虚拟信道复用两级多路复用机制实现多用户动态共享同一物理信道.

对于包信道复用,已经有文献给出理论研究

收稿日期: 2013-11-18; **网络出版时间**: 2014-06-10 09:27; **DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0661

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0661.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61101116); 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划资助项目(LJQ2012018)

作者简介: 张 猛(1979 -),男,江苏响水人,博士生,zhangmeng501@126.com.

结果. 文献[6]给出等时帧生成算法的各数据帧的 MPDU(Multiplexing Protocol Data Unit)复用效率均值的计算公式;文献[7]给出高效率帧生成算法的平均帧生成时间的计算公式,并提出一种自适应帧生成算法;文献[8]给出了自适应帧生成算法的平均包时延计算方法. 但是对于虚拟信道复用中调度算法的研究,目前大多仅限于算法的改进,并通过仿真实验进行分析[9-12],很少有文献给出严格的理论分析. 文献[13]讨论了 AOS 中基于静态优先级的虚拟信道调度算法中,优先级最高的虚拟信道在各时刻占用物理信道的概率,以及丢包率和虚拟信道缓存之间的关系.

本文对基于轮询的 AOS 多路复用包时延进行研究. 首先,通过排队论方法,建立非空竭服务的休假机制模型. 其次,使用循环再生法,求出队长的概率母函数表达式. 然后,根据 Little 公式,首次给出了两级多路复用的平均包时延理论计算公式,并给出下限数值. 本文通过搭建仿真模型证明了理论推导的正确性. 研究结果可以为工程设计提供一定的参考.

1 基于轮询的 AOS 多路复用模型

基于轮询的 AOS 多路复用模型如图 1 所示.

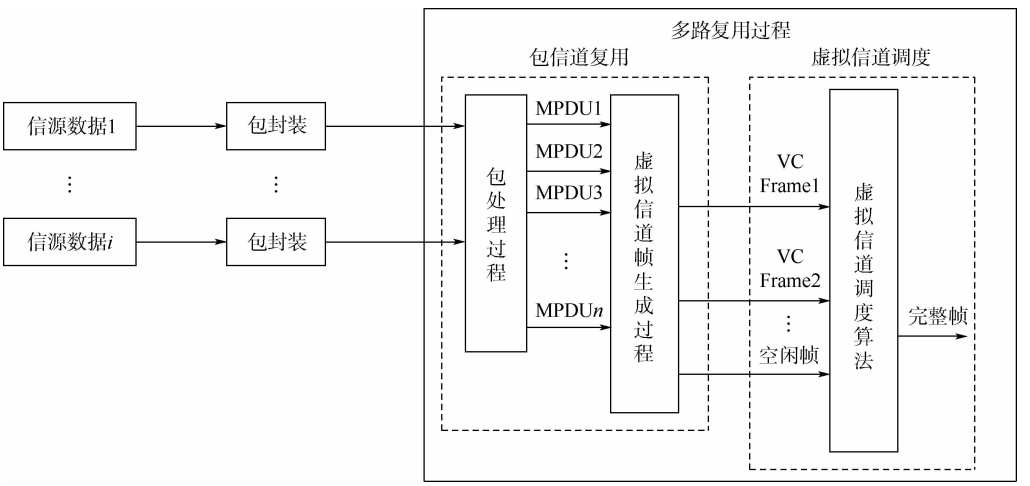

图 1 多路复用过程

Fig. 1 Process of multiplexing

设有 I 条虚拟信道(VC,Virtual Channel). 任取一条,VC 中数据包到达过程服从到达率为 λ 的泊松过程. 包复用过程采用高效率帧生成算法,当 MPDU 的包区被填满后才能生成一帧,每帧有 N 个数据包,因此,帧生成的时间即为第 N 个包到达时间,帧释放后即进入 VC 排队等待调度. 虚拟信道调度采用均匀时间片轮询方法,即对所有 VC,均匀分配时隙,轮到该 VC 的调度时隙时,若 VC 内有帧等待,则调用该 VC 缓存中当前第 1 个数据帧(N 个数据包);若 VC 内没有数据帧生成,则传送空帧.

任取一条 VC,设调度一帧时间为 Δt,调度完成后无论该 VC 内是否有数据包等待,都进入一个长度为 $V=(I-1)\Delta t$ 的休假期. 休假结束时,若该 VC 缓存内数据包数仍小于 N,则持续一个长度为 $V_0=I\Delta t$ 的休假;若数据包数大于等于 N,则该 VC 进入调度期. VC 状态转化如图 2 所示.

由图 2 可知,休假状态分为 V 和 V_0 两种,定义广义调度期 B 为每次调度后的休假 V 与前一个调度期 Δt 之和,值为 $(I-1)\Delta t+\Delta t=I\Delta t$. 则 VC 状态转化如图 3 所示.

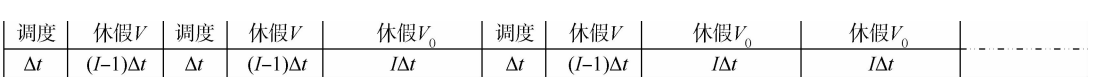

图 2 VC 状态转化图

Fig. 2 Change of VC

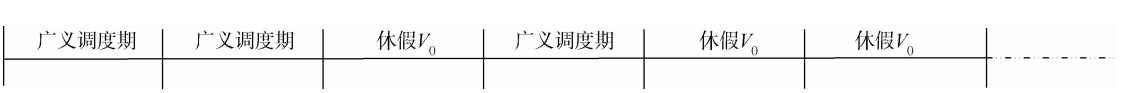

图 3 定义广义调度期的 VC 状态转化图

Fig. 3 Change of VC during generalized control

定义零调度期为两次连续休假之间的长度为 0 的调度期,在零调度期内有 0 个数据包被调度.定义大调度期为两个休假之间的若干个广义调度期之和.这样,任意两个大调度期之间都有一个长度为 V_0 的休假期.VC 状态转化如图 4 所示.

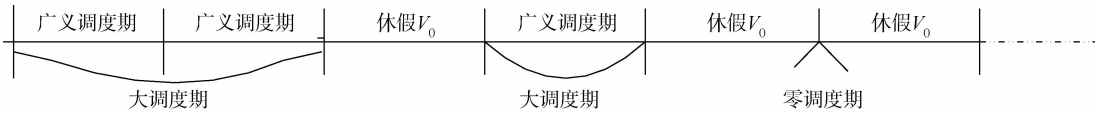

图 4　定义零调度期和大调度期的 VC 状态转化图

Fig. 4　Change of VC during little control and huge control

至此,VC 状态转化可以描述为:累积至 N 个数据包则开始一个大调度期,在一个大调度期中调度的数据包数是 N 的整数倍,直至 VC 缓存中的数据包数小于 N 个,则该 VC 进入长为 V_0 的休假;若休假结束,VC 缓存中数据包数仍不足 N,则进入一个零调度期,之后接续下一次休假;直至某次休假后 VC 缓存中数据包数大于等于 N,则启动下一个大调度期.

2　数据包时延的性能研究

任取一条 VC,其数据包时延 W_p 是指数据包从生成开始直至被调度的这一段时间.由排队论的 Little 公式[14]可知:

$$E(W_p)=\frac{1}{\lambda}E(L_p) \tag{1}$$

其中 L_p 为排队稳态队长.设 $L_p(z)$ 为 L_p 的概率母函数[15],则有

$$E(L_p)=L_p'(z)\mid_{z=1} \tag{2}$$

图 4 的 VC 状态转化可以看作是排队论中非空竭服务[14]的情形.由循环再生法可知,当系统达到平衡时,则有

$$L_p(z)=\frac{E\left(\sum_{n=1}^{\Phi}z^{L_n}\right)}{E(\Phi)} \tag{3}$$

其中 Φ 表示一个大调度期内调度的总数据包数,若此大调度区开始时 VC 缓存内数据包数 $Q_b<N$,则它为零调度期;若 $Q_b\geqslant N$,则此大调度期内调度 cN 个数据包,c 为构成此大调度期的广义调度期个数的均值.即有

$$\Phi=\begin{cases}0 & Q_b<N\\ cN & Q_b\geqslant N\end{cases} \tag{4}$$

而 L_n 表示该大调度期内第 n 个数据包调度完毕时该 VC 缓存中剩余的数据包数,则有

$$L_n=\begin{cases}0 & Q_b<N\\ Q_b+\sum_{k=1}^{n}A_k-n & Q_b\geqslant N\end{cases}$$
$$n=1,2,\cdots,cN \tag{5}$$

其中,A_k 表示调度第 k 个数据包期间内新到达的数据包数;z^{L_n} 表示关于 L_n 的 Z 变换.

将式(2)、式(3)代入式(1),可得

$$E(W_p)=\frac{1}{\lambda}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left(\frac{E\left(\sum_{n=1}^{\Phi}z^{L_n}\right)}{E(\Phi)}\right)\Bigg|_{z=1} \tag{6}$$

可见,要求出 $E(W_p)$,需要分别求出 $E(\Phi)$ 与 $E\left(\sum_{n=1}^{\Phi}z^{L_n}\right)$.

2.1　$E(\Phi)$的计算

由期望公式可知:

$$E(\Phi)=cN\sum_{k=N}^{\infty}q_k=$$
$$cN(q(1)-q_N(1)) \tag{7}$$

其中,q_k 为在系统达到平衡状态下,休假期结束并且有 k 个数据包在缓存内的概率;$q(z)=\sum_{k=0}^{\infty}q_kz^k$ 为 q_k 的概率母函数;$q_N(z)=\sum_{k=0}^{N-1}q_kz^k$ 为 q_k 的部分母函数.

令 h_k 为系统达到平衡状态下,大调度期结束并且有 k 个数据包在缓存内的概率,由全概率公式可知:

$$q_k=\sum_{j=0}^{\min(k,N-1)}q_jV_{k-j}+\sum_{j=0}^{\min(k,N-1)}h_jV_{k-j}$$
$$k=0,1,2,\cdots \tag{8}$$

$$h_k=\sum_{j=N}^{cN+k}q_ka_{k-j+cN}^{(cN)}$$
$$k=0,1,2,\cdots,N-1 \tag{9}$$

其中,$V_j=\int_0^{\infty}\frac{(\lambda t)^j}{j!}\mathrm{e}^{-\lambda t}\mathrm{d}V(t)$ 为该 VC 一个休假期内到达 j 个数据包的概率,$j\geqslant 0$,$V(t)$ 为休假时间 V_0 的分布函数;$a_j=\int_0^{\infty}\frac{(\lambda t)^j}{j!}\mathrm{e}^{-\lambda_i t}\mathrm{d}B(t)$,为该 VC 一个大调度期内到达 j 个数据包的概率,$j\geqslant 0$,$B(t)$ 为广义调度时间 B 的分布函数.

由式(8)可知,$q(z)$ 可以表示为

$$q(z)=\sum_{j=0}^{N-1}q_jz^j\sum_{k=j}^{\infty}V_{k-j}z^{k-j}+\sum_{j=0}^{N-1}h_jz^j\sum_{k=j}^{\infty}V_{k-j}z^{k-j}=$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} q_j z^j \cdot V^*(\lambda(1-z)) + \sum_{j=0}^{N-1} h_j z^j \cdot V^*(\lambda(1-z)) = [q_N(z) + H_N(z)]V^*(\lambda(1-z)) \quad (10)$$

其中，$H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k z^k$ 为 h_k 的概率母函数；$H_N(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k z^k$ 为 h_k 的部分母函数；$V^*(\lambda(1-z)) = \sum_{j=0}^{\infty} V_j z^j$ 为休假时间 V_0 的 Laplace-Stieltjes 变换(LST).

设 $B^*(\lambda(1-z)) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j z^j$ 为广义调度时间 B 的 LST，采用类似式(10)的方法，并注意到 $\sum_{k=0}^{\infty} a_j^{cN} z^j = [B^*(\lambda(1-z))]^{cN}$，可得

$$H(z) = \frac{q(z) - q_N(z)}{z^{cN}}[B^*(\lambda(1-z))]^{cN} \quad (11)$$

联合式(10)与式(11)进行求解，可得

$$q(z) = \frac{\{z^{cN} - [B^*(\lambda(1-z))]^{cN}\} \cdot q_N(z) \cdot V^*(\lambda(1-z))}{z^{cN} - V^*(\lambda(1-z)) \cdot [B^*(\lambda(1-z))]^{cN}} \quad (12)$$

$$H(z) = \{V^* \cdot [V^*(\lambda(1-z)) - 1] \cdot [B^*(\lambda(1-z))]^{cN} \cdot q_N(z)\} / \{z^{cN} - V^*(\lambda(1-z)) \cdot [B^*(\lambda(1-z))]^{cN}\} \quad (13)$$

在式(12)中，令 $z \to 1$，使用 L' Hospital 法则，可得

$$q(1) = \frac{N q_N(1)}{N - \lambda E(V)} \quad (14)$$

易知

$$q(1) = q(z)\big|_{z=1} = \sum_{k=0}^{\infty} q_k = 1 \quad (15)$$

联合式(14)、式(15)可得

$$q_N(1) = \frac{N - \lambda E(V)}{N} \quad (16)$$

将式(15)、式(16)代入式(7)，有

$$E(\Phi) = c\lambda E(V) \quad (17)$$

2.2 $E\left(\sum_{n=1}^{\Phi} z^{L_n}\right)$ 及 $L_p(z)$ 的求解

由式(4)和式(5)可知

$$E\left(\sum_{n=1}^{\Phi} z^{L_n}\right) = \sum_{k=N}^{\infty} q_k z^k \sum_{n=1}^{cN} z^{\sum_{i=1}^{n} A_i - n} \quad (18)$$

注意到 Z 变换与 LST 的关系，可得

$$E\left(\sum_{n=1}^{\Phi} z^{L_n}\right) = \sum_{k=N}^{\infty} q_k z^k \sum_{n=1}^{cN} \frac{[B^*(\lambda(1-z))]^n}{z^n} \quad (19)$$

将式(12)、式(13)代入式(19)可得

$$E\left(\sum_{n=1}^{\Phi} z^{L_n}\right) = \sum_{k=N}^{\infty} q_k z^k \cdot \frac{B^*(\lambda(1-z))}{z^{cN}} \cdot \frac{z^{cN} - [B^*(\lambda(1-z))]^{cN}}{z - B^*(\lambda(1-z))} = \{q_N(z)[V^*(\lambda(1-z)) - 1] \cdot [B^*(\lambda(1-z))] \cdot [z^{cN} - B^*(\lambda(1-z))]\} / [(z^{cN} - V^*(\lambda(1-z)) \cdot B^*(\lambda(1-z))^{cN})(z - B^*(\lambda(1-z)))] \quad (20)$$

将式(17)与式(20)代入式(3)，有

$$L_p(z) = \frac{(1-z)B^*(\lambda(1-z))}{c(B^*(\lambda(1-z)) - z)} \cdot \frac{1 - V^*(\lambda(1-z))}{\lambda E(V)(1-z)} \cdot \frac{q_N(z)[z^{cN} - (B^*(\lambda(1-z)))^{cN}]}{z^{cN} - V^*(\lambda(1-z)) \cdot (B^*(\lambda(1-z)))^{cN}} \quad (21)$$

其中 c 为平衡状态下大调度期中所含广义调度期个数的均值，即为经典 M/G/1 排队模型中的忙期长度[14]，故有

$$c = \frac{1}{1-\rho} \quad (22)$$

式中 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ 为交通强度，$\mu = \frac{N}{I\Delta t}$ 为调度率.

将式(21)代入式(2)，经计算可得

$$E(L_p) = \rho + \frac{q'_N(1)}{q_N(1)} + \frac{(N-1+\rho)(1+\rho)}{2(1-\rho)} + \frac{\lambda E(V^2)}{2E(V)} + [(1-\rho)\lambda^2 E(V^2) + 2\rho N\lambda E(V) + N\lambda^2 E(B^2) - N(N-1+\rho)(1+\rho)] / \{2(1-\rho)[N - \lambda E(V)]\} \quad (23)$$

2.3 复用时延与调度时延的计算与分析

将式(23)代入式(1)，得到包时延均值：

$$E(W_p) = \frac{q'_N(1)}{\lambda q_N(1)} + \frac{(N-1+\rho)(1+\rho)}{2\lambda(1-\rho)} + \frac{E(V^2)}{2E(V)} + [(1-\rho)\lambda^2 E(V^2) + 2\rho N\lambda E(V) + N\lambda^2 E(B^2) - N(N-1+\rho)(1+\rho)] / \{2(1-\rho)[N - \lambda E(V)]\} \quad (24)$$

其中

$$q'_N(1) = \sum_{k=1}^{N-1} k q_k \quad (25)$$

$q_k (k = 0, 1, \cdots, N-1)$ 是方程组(26)的解[14].

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{k=1}^{N-1} q_k (z_n^N - (B^*(\lambda(1-z)))^N) = 0 \\ &\sum_{k=0}^{\infty} q_k = 1 \end{aligned}\right\} \quad (26)$$

式中

$$z_n=\sum_{m=1}^{\infty}\exp\left(\frac{2\pi nmi}{m!}\cdot\frac{d^{m-1}}{dz^{m-1}}\{V^*(\lambda_i(1-z))\cdot(B^*(\lambda_i(1-z)))^N\}^{m/n}\right)\Bigg|_{z=0,n=0,1,\cdots,N-1} \tag{27}$$

由多路复用模型可知,复用包时延 W_p 可以分成包成帧时延 S_p 与调度时延 T_p 的和,即

$$W_p=S_p+T_p \tag{28}$$

高效率帧生成算法的包成帧时延均值为[7]

$$E(S_p)=\int_0^{\infty}t\frac{\lambda e^{-\lambda t}(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!}dt-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\int_0^{\infty}t\frac{\lambda e^{-\lambda t}(\lambda t)^{i-1}}{(i-1)!}dt \tag{29}$$

所以,调度时延 T_p 均值为

$$E(T_p)=\frac{E(B^2)}{2(1-\rho)}+\frac{E(V^2)}{2E(V)}+\frac{q'_N(1)}{\lambda q_N(1)}+\frac{(N-1+\rho)(1+\rho)}{2\lambda(1-\rho)}-\frac{E(B^2)}{2(1-\rho)}-E(S_p)+[(1-\rho)\lambda^2E(V^2)+2\rho N\lambda E(V)+N\lambda^2E(B^2)-N(N-1+\rho)(1+\rho)]/\{2(1-\rho)[N-\lambda E(V)]\} \tag{30}$$

调度时延均值的下限为

$$E(T_p)\geqslant\frac{E(B^2)}{2(1-\rho)}+\frac{E(V^2)}{2E(V)} \tag{31}$$

结合式(28)与式(31)易知,多路复用包时延均值下限为

$$E(W_p)\geqslant\frac{E(B^2)}{2(1-\rho)}+\frac{E(V^2)}{2E(V)}+E[S_p] \tag{32}$$

3　仿真结果

使用 MATLAB 进行仿真实验,比较理论值与仿真值. 计算复用包时延与调度时延的理论值时,虽然已做出闭合解,但是计算比较困难,为此,分别直接计算其下限值. 仿真参数设置如下:

1) 包到达率 λ 的值分别取 1,2,3 包/s;

2) 包长度 $l_p=20$ B;

3) 每帧的数据区长度为 $l_{mp}=100$ B,则有 $N=l_{mp}/l_p$,即一个帧最多可以有 5 个数据包;

4) 物理信道下行链路的传输速率的取值范围为 240 ~ 330 bit/s;

5) 仿真时间为 1 000 s.

图 5 ~ 图 7 分别给出了在不同 λ 下,各 VC 的多路复用包时延的仿真结果,其中 VC1 对应 λ = 1 包/s,依此类推. 可见,在不同的 λ 和不同的下行速率之下,复用包时延的仿真值曲线均高于理论下限值曲线,从而论证了理论推导的正确性.

图 8 ~ 图 10 分别给出了在不同 λ 下,各 VC 的调度时延的仿真结果. 从图中可以看出,在不同的 λ 和不同的下行速率之下,调度时延的仿真值曲线均高于理论下限值曲线,从而论证了理论推导的正确性.

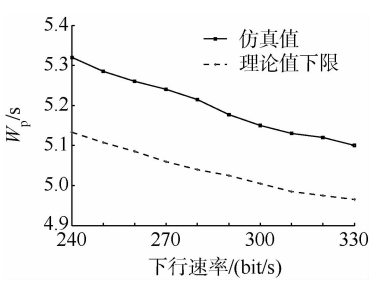

图 5　VC1 复用包时延

Fig. 5　Packet time delay of VC1

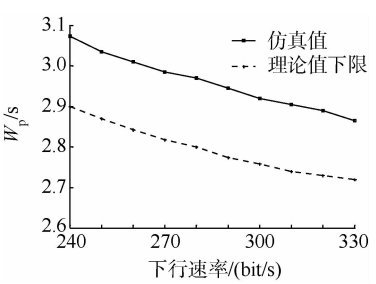

图 6　VC2 的复用包时延

Fig. 6　Packet time delay of VC2

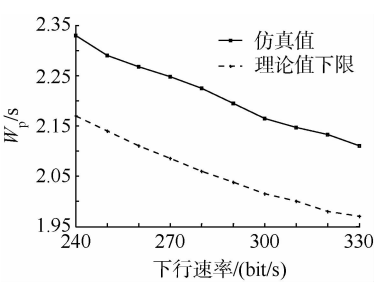

图 7　VC3 的复用包时延

Fig. 7　Packet time delay of VC3

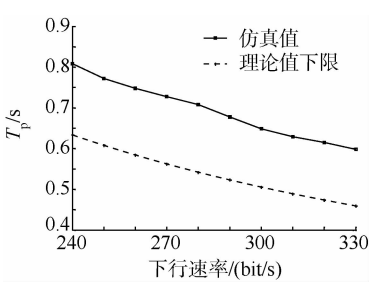

图 8　VC1 的调度时延

Fig. 8　Control time delay of VC1

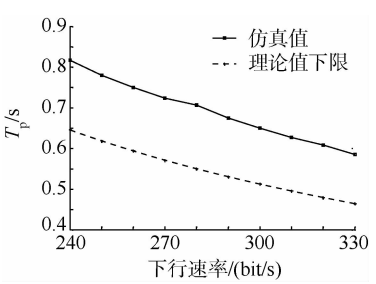

图 9　VC2 的调度时延

Fig. 9　Control time delay of VC2

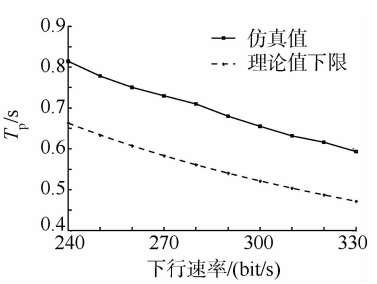

图 10　VC3 的调度时延

Fig. 10　Control time delay of VC3

4 结 论

1）本文针对 AOS 采用两级多路复用体制，帧生成模块采用高效率帧生成算法，虚拟信道调度模块采用基于时间片轮询调度算法，对系统的平均包时延性能进行研究，推导出多路复用包时延均值下限为 $E(W_p)=\frac{E(B^2)}{2(1-\rho)}+\frac{E(V^2)}{2E(V)}+E[S_p]$.

2）本文通过建立仿真模型，验证在不同的包到达率(1,2,3 包/s)和不同的下行速率(240 ~ 330 bit/s)之下，复用包时延和调度时延的仿真值曲线均高于理论下限值曲线.

参考文献（References）

[1] 公绪晓，白云飞. 利用高级在轨系统实现高速同异步混合复接[J]. 计算机工程与设计，2006，27(19)：3634 - 3637
Gong Xuxiao, Bai Yunfei. Implementation of synchronous and asynchronous high rate multiplexer using advanced orbiting systems[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(19): 3634 - 3637(in Chinese)

[2] 李芳，付前程，侯秀红. 利用高级在轨系统实现实时/非实时数据混合传输[J]. 网络安全技术与应用，2009(4)：69 - 70
Li Fang, Fu Qiancheng, Hou Xiuhong. Implementation of real time and non real time data mixed transmission using advanced orbiting systems[J]. Network Security Technology & Application, 2009(4): 69 - 70(in Chinese)

[3] CCSDS 701.0-B-3 Advanced orbiting systems, net works and data links: architectural specification[S]

[4] CCSDS 131.0-B-1 TM synchronization and channel coding[S]

[5] CCSDS 732.0-B-2 AOS space data link protocol[S]

[6] 赵运弢，潘成胜，田野，等. 基于 CCSDS 高级在轨系统的 MPDU 复用效率研究[J]. 宇航学报，2010，31(4)：1195 - 1199
Zhao Yuntao, Pan Chengsheng, Tian Ye, et al. Research on multiplexing efficiency of MPDU based on CCSDS advanced orbiting systems[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(4): 1195 - 1199 (in Chinese)

[7] 田野，潘成胜，张子敬，等. AOS 协议中自适应帧生成算法的研究[J]. 宇航学报，2011，32(5)：1171 - 1178
Tian Ye, Pan Chengsheng, Zhang Zijing, et al. Research on adaptive frame generation algorithm in AOS protocol[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(5): 1171 - 1178(in Chinese)

[8] 田野，张德育，谈振辉，等. 高级在轨系统中帧生成算法的包时延性能分析[J]. 高技术通讯，2011，21(11)：1121 - 1128
Tian Ye, Zhang Deyu, Tan Zhenhui, et al. Research on the packet time delay of frame generation algorithms in advanced orbiting systems[J]. Chinese High Technology Letters, 2011, 21(11): 1121 - 1128(in Chinese)

[9] 田野，那鑫，高晓玲，等. 具有广泛适用性的 AOS 虚拟信道调度算法[J]. 中国空间科学技术，2011，31(6)：50 - 56
Tian Ye, Na Xin, Gao Xiaoling, et al. A novel AOS virtual channels scheduling algorithm with broad applicability[J]. Chinese Space Science and Technology, 2011, 31(6): 50 - 56(in Chinese)

[10] 别玉霞，潘成胜，刘海燕，等. 基于 AOS 的 Hurst-优先级自适应 RED 与动态调度算法[J]. 通信学报，2012，33(10)：156 - 165
Bie Yuxia, Pan Chengsheng, Liu Haiyan, et al. Hurst and priority adaptive RED combined with dynamic scheduling algorithm based on AOS[J]. Journal on Communications, 2012, 33(10): 156 - 165(in Chinese)

[11] 王向晖，王同桓，李宁宁，等. 一种 AOS 遥测源包多路调度算法[J]. 航天器工程，2011，20(5)：83 - 87
Wang Xianghui, Wang Tonghuan, Li Ningning, et al. An efficient scheduling algorithm of multiplexing TM service based on the AOS[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(5): 83 - 87(in Chinese)

[12] 田野，那鑫，夏莹，等. AOS 自适应帧生成算法的性能分析与应用研究[J]. 宇航学报，2012，33(2)：242 - 248
Tian Ye, Na Xin, Xia Ying, et al. Research on the performance and application of adaptive frame generation algorithm in AOS protocol[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(2): 242 - 248 (in Chinese)

[13] Tian Y, Zhang Y Q, Zhang Z J. On the performance of priority-based virtual channels scheduling algorithm in packet telemetry system[J]. International Journal of Computer Networks and Information Security, 2011, 3(5): 46 - 53

[14] 田乃硕. 休假随机服务系统[M]. 北京：北京大学出版社，2001：114 - 132
Tian Naishuo. Vacation stochastic service system[M]. Beijing: Peiking University Press, 2001: 114 - 132(in Chinese)

[15] 李贤平. 概率论基础[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，2003：214 - 222
Li Xianping. Probability essentials[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003: 214 - 222(in Chinese)