

基于 AOS 的 Hurst-优先级自适应 RED 与动态调度算法

别玉霞^{1,2}, 潘成胜^{1,3}, 刘海燕^{2,3}, 王延春^{1,3}

(1. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 大连大学 信息工程学院, 辽宁 大连 116622;

3. 辽宁省通信网络与信息处理重点实验室, 辽宁 大连 116622)

摘 要: 为有效传输空间数据系统中多类型、大容量、突发性的数据, 基于高级在轨系统(AOS)虚拟信道复用技术, 提出了一种自相似参数 Hurst-优先级自适应的随机早检测(RED)与动态调度算法——HPRED-DS。该算法在队列管理中设计了基于 Hurst 参数与优先级的 2 级丢弃分组策略, 在虚拟信道调度中设计了 VIP/同步/异步混合的动态调度模式, 并将队列管理与虚拟信道调度有效结合起来。实验结果表明该算法在保持高处理效率和吞吐率的基础上, 稳定了队列长度, 降低了排队延时和延时抖动, 并能满足 AOS 中不同业务的传输要求。

关键词: 虚拟信道; 队列管理; Hurst; 优先级; 动态调度

中图分类号: V557+.1

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)10-0156-10

Hurst and priority adaptive RED combined with dynamic scheduling algorithm based on AOS

BIE Yu-xia^{1,2}, PAN Cheng-sheng^{1,3}, LIU Hai-yan^{2,3}, WANG Yan-chun^{1,3}

(1. School of Automatic, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Information and Engineering College, Dalian University, Dalian 116622, China;

3. Liaoning Province Key Laboratory of Communication Networks and Information Processing, Dalian 116622, China)

Abstract: In order to efficiently transmit different types of high-capacity and burst data, based on virtual channel multiplexing technology on advanced orbiting systems (AOS), a Hurst and priority adaptive random early detection (RED) combined with dynamic scheduling algorithm named HPRED-DS was proposed. In queue management state, the algorithm designed an adaptive two-level packet dropping strategy based on Hurst parameter and priority. In virtual channel scheduling state, a VIP, synchronous and asynchronous mixed virtual channels scheduling mode was designed. Meanwhile, the algorithm efficiently combined queue management and virtual channel scheduling. Experimental results show that on the basis of maintaining high treatment efficiency and throughput, the algorithm stabilizes queue length, reduces delay and delay jitter, can meet various services' transmitting requirement.

Key words: virtual channel; queue management; Hurst; priority; dynamic scheduling

收稿日期: 2011-09-21; 修回日期: 2012-05-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 重点基金资助项目 (2011AAXX04); 辽宁省教育厅科研资助项目 (2009A066); 辽宁省教育厅创新团队 (2009T004)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AAXX04) The Scientific Research Fund of Liaoning Province Education Department (2009A066); Innovative Research Team of Liaoning Province Education Department (2009T004)

1 引言

卫星通信网络正在与地面互联网融合, 利用卫星通信系统的大容量传输和广播特性提供互联网业务, 充分利用卫星网络的带宽分流地面互联网流量, 以缓解地面网络拥塞和带宽资源不足的问题^[1]。同时, 卫星通信网络可与作战指控系统、应急通信系统等结合, 形成融合陆、海、空、天的一体化网络。空间数据系统咨询委员会(CCSDS, consultative committee for space data systems)提出的高级在轨系统(AOS, advanced orbiting systems)^[2]适用于大型航天器, 传输的码速率范围宽, 业务种类多, 具有网络接入功能, 可与地面网互联实现空间多媒体通信, 已经成为空间数据系统设计的重要标准。AOS 能够统一组织星上数据流, 将文本、音频、视频、静态图像等多种类型的数据在一条物理信道上传输。为有效传输来自多个用户^[3,4]的重要性和实时性要求各不相同的大容量、高速率数据, AOS 中各虚拟信道(VC, virtual channel)^[5]以时分复用的方式高效地共享地一空、空一地或空一空信道。

研究表明, 地面互联网的业务流量普遍呈现出自相似性^[6], 并已得到广泛公认。国内外已有关于卫星网络业务自相似性的研究。文献[1]基于地面互联网自相似性的研究成果, 得到了如下结论: 地面网络的自相似业务经过信关站进入卫星链路后的业务流量仍具有自相似性, 自相似业务在卫星网络中汇聚和传播后的业务流量仍然是自相似的, 即业务的自相似性在卫星网络中普遍存在并能够传播。文献[7]通过建立包含低轨卫星网络、地面网络和信关站的网络模型, 仿真验证了低轨卫星网络中流量的自相似性。已有文献在研究宽带卫星通信网络时也采用了自相似业务模型^[8-10], 并研究了卫星通信网络中自相似业务流量的预测问题^[11-13]。文献[14]表明, 网络流量的自相似性不仅存在于互联网络中, 同时也存在于卫星网络中^[15]。网络内部数据流量的特性取决于传送的业务类型, 自相似性揭示了高速网络业务流量的一个普遍特性, 自相似性与业务发生的时间地点或信源编码方式无关, 并且无论网络的拓扑结构、用户数量、传输介质、协议类型等如何变化, 这种自相似性始终存在^[16]。

网络业务自相似性的一个突出表现为长时间的数据突发, 在此情况下, 星上路由节点的分组处理系统队列性能会受到较大影响, 依靠增加缓存容

量, 对系统性能的改善并不明显, 反而会增加延时; 同时, 不同用户的数据业务具有不同的重要性和传输实时性要求。为保证在突发情况下使重要数据得到及时传输, 且能有效地利用缓存资源, 需要基于 AOS 数据流的自相似性对网络性能的影响以及不同数据业务的传输需求, 设计一种合理的队列管理与虚拟信道调度算法。

为有效地进行拥塞控制, 中继卫星节点上的队列管理算法按照一定的规则对缓存资源进行分配, 通过一定的丢弃分组概率来提前通知数据源端调整发送速度。典型的队列管理算法有 RED^[17]以及改进算法 ARED^[18]、SRED^[19]、BLUE^[20]、文献[21~24]所提出的算法等, 这些队列管理算法是基于流量的短相关模型的, 没有考虑流量的自相似性, 不能有效解决突发业务的队列管理问题。文献[25]把流量的自相似参数引入到 RED 算法的丢弃概率中, 提高了队列长度的稳定性, 减少了丢弃分组率、排队时延和排队抖动。文献[26]提出了基于时间槽的自相似流量随机早检测, 在每个时间槽内计算一次丢弃分组概率, 大大降低了系统负担。文献[27]利用自相似业务流的可预测性, 采用经典控制理论中的预测 PI 控制器来进行队列管理, 保持队列稳定在期望的长度。上述算法能够较好地实现自相似流量下的队列管理, 但对所有分组公平丢弃, 不能满足 AOS 中多种类型业务的不同重要性。因此, 需要基于 AOS 的数据流量特性和业务重要性设计队列管理算法。

虚拟信道调度算法是按照一定的服务规则对各虚拟信道中的帧进行传输。虚拟信道调度方式主要有全同步方式、全异步方式和同步/异步混合方式^[28]。在全同步方式中, 各虚拟信道以固定的时隙占用物理信道, 信道利用率低, 且不利于处理突发性强的异步数据。在全异步方式中, 根据优先级决定各虚拟信道的传送, 可以灵活地处理异步数据, 但同步数据会产生排队延时, 且延时量会随其数据量的变化而变化, 从而出现延时抖动。单一的全同步方式和全异步方式不能满足 AOS 不同类型业务的传输要求。同步/异步混合方式把信道分成同步虚拟信道和异步虚拟信道 2 部分, 分配某些时隙传送同步数据, 其余时隙传送异步数据, 这种方式适合于业务类型较多的系统, 但不能保证某些重要性极强的数据的及时传输。因此, 可以基于同步/异步混合方式, 兼顾重要性极强的数据, 设计 3 级

复用方式。

在传统的研究中，队列管理和虚拟信道调度相互独立，缺乏相关性，不能有效地利用缓存和处理资源^[29]。本文针对 AOS 数据流及其业务特点，有效结合队列管理和虚拟信道调度，提出了 Hurst-优先级自适应 RED 与动态调度 (HPRED-DS, hurst and priority adaptive RED combined with dynamic scheduling) 算法。基于 HPRED-DS 算法，在粗粒度根据流量的自相似程度、在细粒度根据优先级自适应调整丢弃分组概率，并根据不同业务的传输要求进行 VIP/同步/异步混合的虚拟信道动态调度。实验结果表明，该算法可满足 AOS 不同数据流量特性和不同业务的传输需求，保证信道的合理高效利用。

2 AOS 队列管理与虚拟信道调度系统模型

作为卫星网络的一个中继节点，航天器的数据包括自身数据和来自网络中其他节点的数据，每个信源都可包含工程数据、音频数据、视频数据、有效载荷数据和延时回放数据。音频和视频数据传输实时性和等时性要求高，称为同步数据，工程数据、有效载荷和延时回放数据具有较强的突发性但等时性要求不高，称为异步数据。AOS 将共用同一条物理信道的数据以时分复用的方式在不同的虚拟信道中传输。由于每种数据业务的优先级不同，本文为每种数据业务分别分配一条虚拟信道，如图 1 所示。异步数据对传输等时性要求不高，采用异步传输模式，在异步虚拟信道中动态传输。同步数据具有很强的等时性与实时性要求，采用同步传输模

式，在专用的同步虚拟信道中传输，同步虚拟信道提供的固定时隙保证了固定的延时，可满足同步数据的等时性要求。此外，将数据源中某些重要性和实时性极强的同步和异步数据分离出来，称为 VIP 数据，VIP 数据可以包括航天器故障数据、重要的战场数据、应急数据（地震监测数据、抢险救灾数据、突发公共安全数据等），这类数据在总数据源中的比重随网络应用环境的不同而改变，但总体来说，比重相对较低。设置一条 VIP 虚拟信道专用于传送 VIP 数据，以保证此类业务的及时传输。

到达各虚拟信道的分组要先进入其相应的输入缓存队列，输入缓存采用最小分配共享方案，即根据各虚拟信道的平均业务量为每条虚拟信道分别预留一定的缓存，以保证其缓存的最小值。队列管理模块按照设计的队列管理算法确定每个分组进入输入缓存队列的概率。处理单元将各虚拟信道的分组复用成帧，并暂存于相应的处理器缓存中。虚拟信道调度模块根据设计的调度算法在每个时隙选择一条虚拟信道，从其处理器缓存中取帧并传输。

当缓存大小和系统利用率固定时，排队性能与流量的自相似程度有关，自相似程度可由 Hurst 参数 H 来刻画^[30]， H 值越大，自相似性越强。流量的自相似性会导致缓存溢出率高、延时长，自相似程度越高，突发性就越强，对队列性能造成的影响也越大^[31]。因此，队列管理算法要根据流量的自相似程度自适应调整，并要保证高优先级数据具有低丢弃概率。为合理利用处理资源，虚

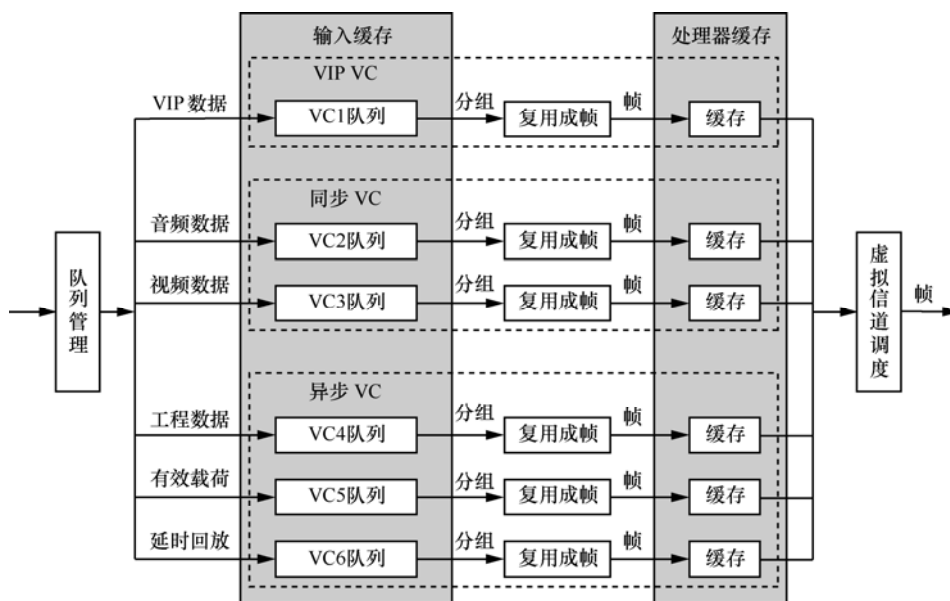


图 1 AOS 队列管理与虚拟信道调度模型

拟信道调度算法要兼顾 VIP 虚拟信道、同步虚拟信道和异步虚拟信道的传输特性，并与队列管理算法有效结合起来。

3 HPRED-DS 算法

3.1 HPRED 算法设计

队列管理算法 HPRED 采用基于 H 值与优先级的 2 级丢弃分组策略：每隔一定时间间隔 T (粗粒度)，根据流量的平均速率 m 、方差系数 a 和 H 值自适应调整下一时间间隔内分组的粗粒度丢弃概率 P_{b1} ， P_{b1} 对所有分组都是公平的。对到达的每个分组（细粒度），根据其优先级计算当前分组的细粒度丢弃概率 P_{b2} 。丢弃分组概率 P_b 由 2 级丢弃概率 P_{b1} 和 P_{b2} 决定。

1) 粗粒度丢弃概率

Norros 提出用如下的分形布朗运动模型来拟合自相似业务流^[32]

$$A_t = mt + \sqrt{am} B_t, t \geq 0 \quad (1)$$

其中， A_t 代表 t 时间内到达的业务流， $m > 0$ 为流量的平均输入速率， $a > 0$ 为方差系数， B_t 为具有 0 均值、方差 $\text{Var}[B_H(t)] = |t|^{2H}$ 和 $H \in (0.5, 1)$ 的标准分形布朗运动。当 $H=0.5$ 时， A_t 为无自相似性的布朗业务流。

将 A_t 输入一个服务速率为 $C(C > m)$ 的队列，根据 Reich's 公式^[32]可得到队列长度

$$X_t = \sup_{s \leq t} (A_t - A_s - C(t-s)) \quad (2)$$

其中， A_t 是时间参数为 t 的分形布朗业务流， $t, s \in (-\infty, +\infty)$ 。根据 Norros 的推导，得出队列长度超过 x 的概率为^[32]

$$P(X > x) \sim \exp(-K_1 x^{2-2H}) \quad (3)$$

其中，

$$K_1 = \frac{(C-m)^{2H}}{2(H^H(1-H)^{1-H})^2 am} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)，可以得到 $P(X > x)$ 与 x 的关系曲线如图 2 所示。

可以看出， $P(X > x)$ 与 x 的变化关系与 H 有关，随着 x 的增加， H 越大，曲线下降越缓慢，即对于自相似性强的业务流，增大缓存容量并不能有效地改善溢出。因此，应根据 $P(X > x)$ 的变化规律来设计粗粒度丢弃概率。

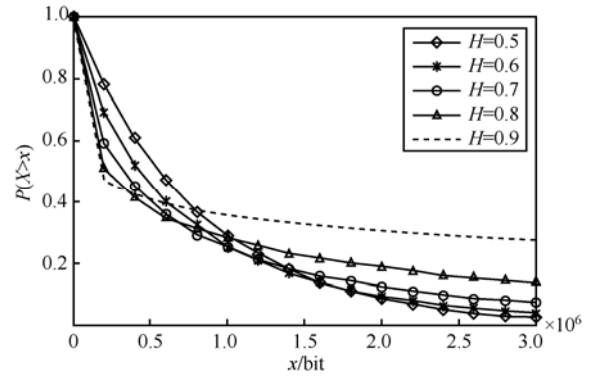


图 2 $P(X > x)$ 与 x 的关系曲线

设共享缓存区的最大队长阈值为 Q_{\max} 、最小队长阈值为 Q_{\min} 、平均队长长度为 Q_{avg} 。当 $Q_{\min} < Q_{\text{avg}} \leq Q_{\max}$ 时，设粗粒度丢弃概率为 P_{b1}' ，则 Q_{avg} 较小时，业务流的 H 值越大， P_{b1}' 应越小， Q_{avg} 较大时， H 值越大， P_{b1}' 应越大。 P_{b1}' 为

$$P_{b1}' = \left[1 - \exp(-K \cdot Q_{\text{avg}}^{2H-1}) \right] \cdot \left(\frac{Q_{\text{avg}} - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right)^{\text{lb}(2H+1)} \quad (5)$$

其中，

$$K = \frac{(C-m)^{3-2H}}{2[(1.5-H)^{1.5-H}(H-0.5)^{H-0.5}]^2 am} \quad (6)$$

P_{b1}' 与 x 的关系曲线如图 3 所示。可以看出， P_{b1}' 与 x 的关系较好地体现了 $P(X > x)$ 与 x 的变化规律， $H=0.5$ 时， P_{b1}' 与 x 为线性关系。

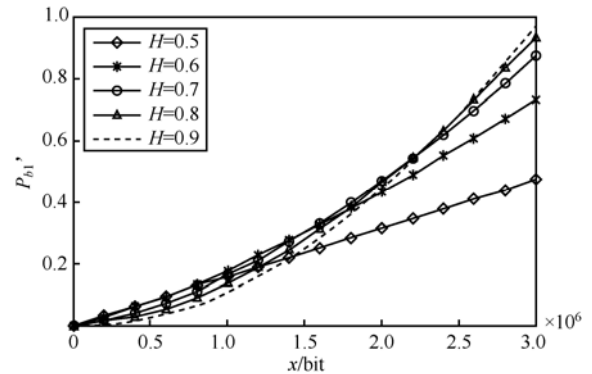


图 3 P_{b1}' 与 x 的关系曲线

基于以上分析，粗粒度丢弃概率为

$$P_{b1} = \begin{cases} 0, & Q_{\text{avg}} \leq Q_{\min} \\ P_{b1}', & Q_{\min} < Q_{\text{avg}} \leq Q_{\max} \\ 1, & Q_{\text{avg}} > Q_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

通过对前 j 个时间间隔内流量的测量，可计算 m 、 a 和 H 值。计算 m 的时间复杂度为 $O(j)$ ，计算

a 的时间复杂度为 $O(j)^{[26]}$, R/S 法估计 H 值的时间复杂度为 $O(j^2)^{[33]}$ 。每隔一定时间根据流量参数计算粗粒度丢弃概率 P_{b1} , 既可根据流量的自相似程度自适应调整丢弃分组概率, 又能避免在每个分组到达时分别计算 m 、 a 和 H 值, 降低了系统负担。

2) 细粒度丢弃概率

由于每种数据业务的优先级不同, 还应根据分组的优先级自适应调整丢弃分组概率。

为每条虚拟信道分配一个优先级, 同一条虚拟信道的分组具有相同的优先级。设共享缓存区的平均队列长度为 Q_{avg} 、最大队长阈值为 Q_{max} 、最小队长阈值为 Q_{min} , 第 i 条虚拟信道的优先级为 $p_r(i)$ 、平均队列长度为 $Q_{avg}(i)$ 、预留的缓存最小值为 $Q_{min}(i)$, 则进入当前虚拟信道分组的细粒度丢弃概率 P_{b2} 为

$$P_{b2} = \begin{cases} 0, & Q_{avg}(i) \leq Q_{min}(i) \text{ 或 } Q_{avg} \leq Q_{min} \\ P_{b2}', & Q_{avg}(i) > Q_{min}(i), Q_{min} < Q_{avg} \leq Q_{max} \\ P_{max}(i), & Q_{avg}(i) > Q_{min}(i), Q_{avg} > Q_{max} \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$P_{b2}' = \frac{\text{lb}[p_r(i) + 1] \cdot (Q_{avg} - Q_{min})}{k \cdot (Q_{max} - Q_{min})} P_{max}(i) \quad (9)$$

$$k = \text{lb}[\max(p_r(1), p_r(2), \dots, p_r(n)) + 1] \quad (10)$$

$P_{max}(i)$ 表示第 i 条虚拟信道的最大丢弃概率, $P_{max}(i)$ 与优先级有关, 优先级越高, $P_{max}(i)$ 越小, 如下式

$$P_{max}(i) = \text{lb} \left[1 + \frac{p_r(i)}{\max(p_r(1), p_r(2), \dots, p_r(n))} \right] \quad (11)$$

3) 分组丢弃概率

通过当前粗粒度 T 内的丢弃分组概率 P_{b1} 和当前分组的细粒度丢弃概率 P_{b2} , 可得到 HPRED 算法下的丢弃分组概率 P_b , P_b 为 P_{b1} 和 P_{b2} 的线性叠加

$$P_b = \alpha P_{b1} + \beta P_{b2} \quad (12)$$

其中, $\alpha + \beta = 1$ 。

3.2 DS 算法设计

为保证 VIP 数据的及时传输, 兼顾同步数据的等时性和异步数据的突发性, 虚拟信道调度采用 VIP/同步/异步混合的动态调度(DS)算法。将一个调度周期分为 N_t 个时隙, 分别分配给 VIP 虚拟信道、同步虚拟信道和异步虚拟信道, 且 3 个部分之间的边界是可以移动的。只要出现 VIP 数据, 则中断当

前传送的数据, 抢占后续时隙, 直到将 VIP 数据传送完毕。

设 VIP 虚拟信道、同步虚拟信道和异步虚拟信道的时隙数分别为 N_v 、 N_s 和 N_a , 若无空闲时隙, 则有

$$N_t = N_v + N_s + N_a \quad (13)$$

由于 VIP 数据要随到随传, 因此 N_v 是无法事先计算的, 但在每个调度周期都要实时计算并调整 N_s 与 N_a 。设同步虚拟信道的个数为 N_{syn} , 帧到达率为 F_{syn} ; 异步虚拟信道的个数为 N_{asyn} , 帧到达率为 F_{asyn} , 则 N_s 与 N_a 之比为

$$\frac{N_s}{N_a} = 2 \frac{N_{syn}}{N_{asyn}} \cdot \frac{F_{syn}}{F_{asyn}} \quad (14)$$

同步虚拟信道采用加权周期轮询调度策略。若分配给同步虚拟信道 VC2、VC3 的时隙数分别为 n_2 、 n_3 , 则在同一调度周期的同步时隙内, 对 VC2 和 VC3 的调度顺序为 $\underbrace{VC2, \dots, VC2}_{n_2 \text{ 个}}, \underbrace{VC3, \dots, VC3}_{n_3 \text{ 个}}$ 。

异步虚拟信道采用动态优先级调度策略。在每个异步时隙, 判断是否有超过最大延时的异步虚拟信道, 若有, 将其传送; 否则, 传送动态优先级最高的异步虚拟信道。各异步虚拟信道的动态优先级与紧迫度、待传的帧数和延时有关。

异步虚拟信道的紧迫度系数 E 由优先级决定, 设最低优先级异步虚拟信道的紧迫度系数为 E_{min} , 则次低优先级异步虚拟信道的紧迫度系数为 $E_{min} + 1$, 依次类推。

设第 i 条虚拟信道处理器缓存中的帧数为 $F_1(i)$, 帧长为 L_f , 分组长为 L_p , 则该虚拟信道中待传的帧数 $F(i)$ 为

$$F(i) = F_1(i) + Q_{avg}(i) \cdot \frac{L_p}{L_f} \quad (15)$$

在初始时隙, 延时基数 B 为

$$B = \begin{cases} 1, & F \geq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

在每个异步调度时隙结束, 对当前时隙未被传送的异步虚拟信道, 若 $F \geq 1$, 则 $B + 1 \rightarrow B$ 。

基于以上分析, 异步虚拟信道的动态优先级 D_p 为

$$D_p = E \cdot \text{lb}(F + 1) \cdot \text{lb}(B + 1) \quad (17)$$

3.3 HPRED-DS 算法流程

队列管理和虚拟信道调度是相辅相成的, 两者相互配合才能获得最优的控制效果。HPRED-DS 算法通过各虚拟信道的优先级和队列长度将 HPRED 算法和 DS 算法结合起来。HPRED 算法负责系统缓存资源的分配, DS 算法负责带宽资源的分配, 并可根据各虚拟信道的变化动态调整, 使它们相互影响。在对 HPRED 算法和 DS 算法设计的基础上, HPRED-DS 算法的步骤如下。

步骤 1 为同步虚拟信道和异步虚拟信道分配时隙; 定义各虚拟信道的优先级; 为各虚拟信道分配最小缓存; 定义共享缓存区的最大队长阈值和最小队长阈值; 设置粗粒度 T 。

步骤 2 判断当前时隙是否为 T 的整数倍, 若是, 转入步骤 3; 否则, 转入步骤 4。

步骤 3 估计前 j 个粗粒度内流量的均值 m 、标准差 a 及自相似参数 H ; 计算共享缓存区的平均队列长度 Q_{avg} ; 计算下一粗粒度 T 内分组的粗粒度丢弃概率 P_{b1} ; 转入步骤 4。

步骤 4 判断当前时隙内是否有分组到达, 若有, 转入步骤 5; 否则, 转入步骤 7。

步骤 5 计算各虚拟信道的平均队列长度 $Q_{avg}(i)$; 计算各分组的细粒度丢弃概率 P_{b2} ; 转入步骤 6。

步骤 6 由 P_{b1} 和 P_{b2} 计算各分组的丢弃概率 P_b ; 各分组以 $1-P_b$ 的概率进入相应虚拟信道的队列; 转入步骤 7。

步骤 7 计算 VIP 虚拟信道待传的帧数 F , 若 $F \geq 1$, 传输 VIP 虚拟信道, 下一时隙, 转入步骤 2; 否则, 转入步骤 8。

步骤 8 判断当前时隙是否同步时隙, 若是, 转入步骤 9; 否则, 转入步骤 12。

步骤 9 计算当前时隙对应的同步虚拟信道的 F , 若 $F \geq 1$, 转入步骤 10; 否则, 转入步骤 11。

步骤 10 传输当前时隙对应的同步虚拟信道, 下一时隙, 转入步骤 2。

步骤 11 计算其他同步虚拟信道的 F , 若 $F \geq 1$, 传输其他同步虚拟信道, 下一时隙, 转入步骤 2; 否则, 转入步骤 12。

步骤 12 计算异步虚拟信道的 F , 若 $F \geq 1$, 转入步骤 13; 否则, 转入步骤 14。

步骤 13 按照动态优先级调度策略选择一条异步虚拟信道并传输, 下一时隙, 转入步骤 2。

步骤 14 传输空帧, 下一时隙, 转入步骤 2。

HPRED-DS 算法以各虚拟信道的优先级和队列长度为纽带, 将 HPRED 算法和 DS 算法有机结合起来, 可满足 AOS 数据业务在不同自相似程度下、不同业务类型的传输要求, 优化系统的处理效率、队列长度和延时等性能。

4 仿真实验与分析

按图 1 所示的系统模型对 HPRED-DS 算法进行仿真实验, 并与 RED 队列管理-优先级虚拟信道调度(以下简称 RED-Priority)算法进行比较。参数设置为: $Q_{max}=200\text{packet}$, $Q_{min}=100\text{packet}$, 每帧封装的分组个数 $N=3$ 。各虚拟信道的平均分组到达率 (packet/s)、优先级和紧迫度系数如表 1 所示。

表 1 虚拟信道参数设置

虚拟信道	平均分组到达率	优先级	紧迫度系数
VC1	38	0	—
VC2	139	2	—
VC3	263	3	—
VC4	255	1	3
VC5	509	4	2
VC6	378	5	1

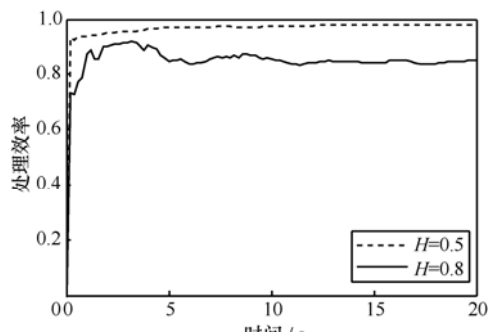
到达每条虚拟信道的数据为若干同类单数据源的叠加, 每种数据源按 ON/OFF 模型产生数据。当 ON 和 OFF 的持续时间长度服从指数分布时, 叠加业务流是短相关的, 不具有自相似性, $H=0.5$; 当 ON 和 OFF 的持续时间长度服从 Pareto 分布且形状参数 $1 < \alpha \leq 2$ 时, 叠加业务流具有自相似性, $H \in (0.5, 1)$ 。在 $H=0.5$ 和 $H=0.8$ 2 种流量下, 对算法的处理效率、队列长度和延时进行仿真。

1) 处理效率

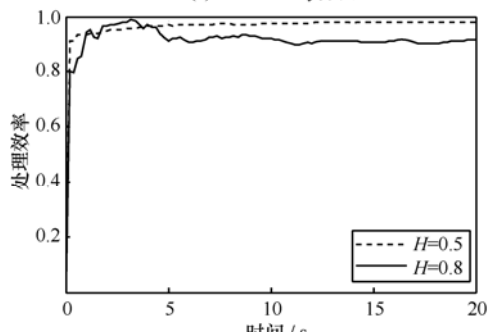
图 4 为在 RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下系统总的处理效率。

从图 4 中可以看出, $H=0.5$ 时, 在 RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下系统总的处理效率基本相同, 且趋于 1。 $H=0.8$ 时, RED-Priority 算法的处理效率为 0.7~0.9, HPRED-DS 算法的处理效率为 0.8~1。因此, 在自相似流量下, HPRED-DS 算法可提高处理效率, 从而提高系统的吞吐率。

图 5 为 $H=0.8$ 时, RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下各虚拟信道的处理效率。

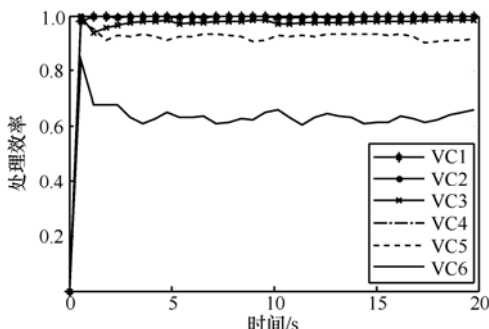


(a)RED-Priority算法

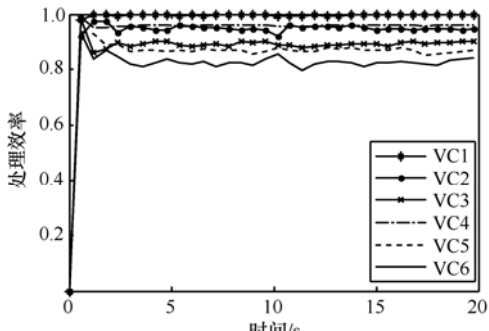


(b)HPRED-DS算法

图 4 系统总处理效率



(a)RED-Priority算法



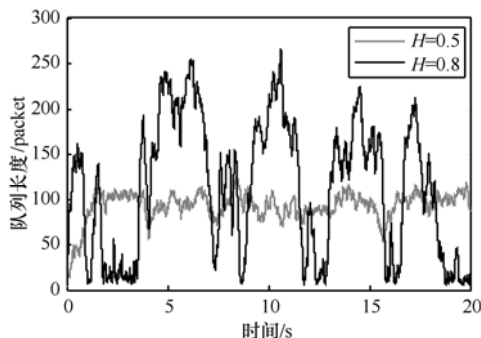
(b)HPRED-DS算法

图 5 各虚拟信道的处理效率(H=0.8)

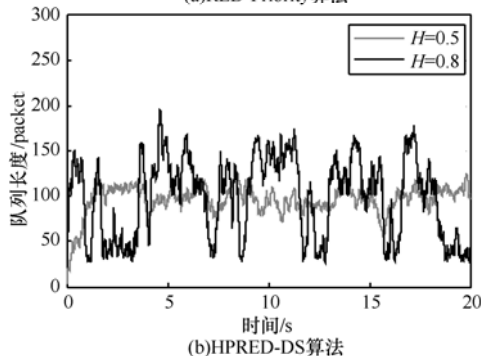
从图 5 中可以看出, $H=0.8$ 时, 与 RED-Priority 算法相比, HPRED-DS 算法在保证高优先级虚拟信道具有较高处理效率的同时, 适当降低部分次高优先级虚拟信道的处理效率, 避免了最低优先级虚拟信道处理效率的大幅度下降。

2) 队列长度

图 6 为在 RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下共享缓存区的队列长度。



(a)RED-Priority算法



(b)HPRED-DS算法

图 6 共享缓存区的队列长度

从图 6 中可以看出, $H=0.5$ 时, 在 RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下共享缓存区的队列长度基本相同, 队列长度稳定。 $H=0.8$ 时, RED-Priority 算法下的队列长度平均值为 114packet, 最大值为 266packet, 标准差为 75packet; HPRED-DS 算法下的队列长度平均值为 100packet, 最大值为 195packet, 标准差为 44packet, 即 HPRED-DS 算法比 RED-Priority 算法的队列长度平均值降低了 14packet, 最大值降低了 71packet, 标准差减少了 31packet。因此, 在自相似流量下, HPRED-DS 算法与 RED-Priority 算法的队列长度相差不大, 但 HPRED-DS 算法的队列长度稳定。

图 7 为 $H=0.8$ 时, RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下各虚拟信道的队列长度。

从图 7 中可以看出, $H=0.8$ 时, VIP 虚拟信道得到了及时传输, 即队列长度为 0, 同步虚拟信道具有较小的队列长度, 可保证同步数据的实时性。与 RED-Priority 算法相比, HPRED-DS 算法在保证高优先级虚拟信道具有较低队列长度的同时, 通过适当增加部分次高优先级虚拟信道的队列长度, 避免了最低优先级虚拟信道队列长度的大幅度波动。

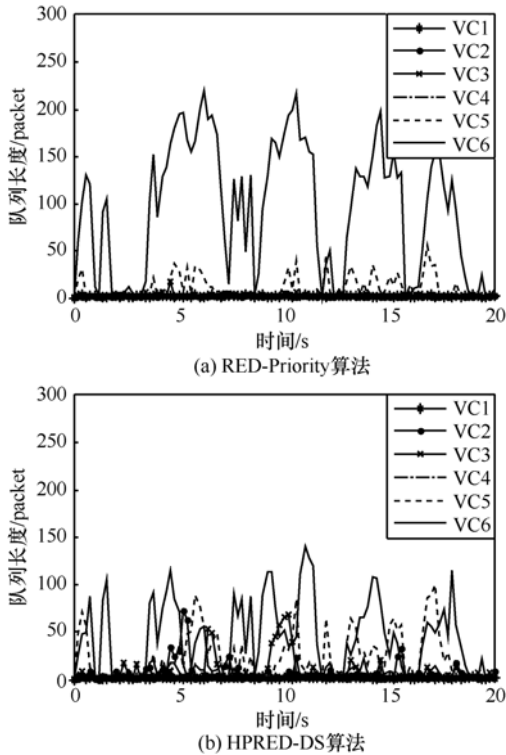


图 7 各虚拟信道的队列长度($H=0.8$)

3) 延时

图 8 为在 RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下的排队延时。

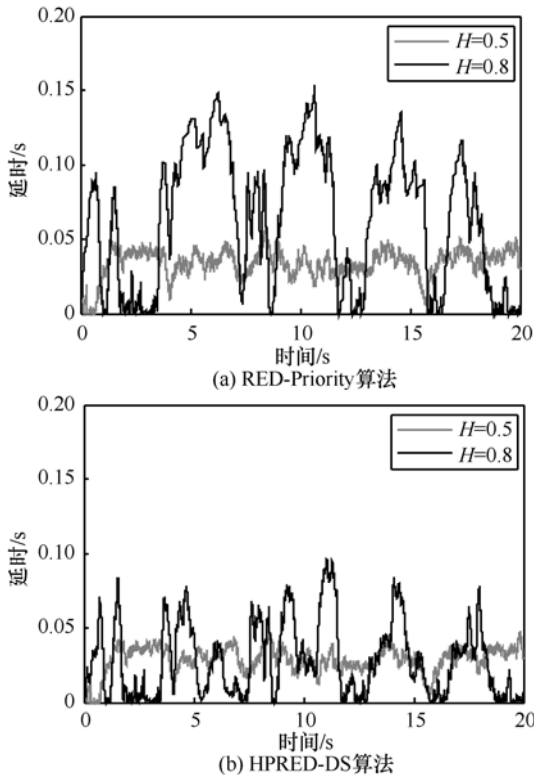


图 8 排队延时

从图 8 中可以看出， $H=0.5$ 时，RED-Priority 算法与 HPRED-DS 算法下排队延时基本相同，延时抖动较小。 $H=0.8$ 时，RED-Priority 算法下的排队延时平均值为 64ms，最大值为 154ms，标准差为 46ms；HPRED-DS 算法下的排队延时平均值为 28ms，最大值为 96ms，标准差为 25ms，即 HPRED-DS 算法比 RED-Priority 算法的排队延时平均值降低了 36ms，最大值降低了 58ms，标准差减少了 21ms。因此，在自相似流量下，HPRED-DS 算法比 RED-Priority 算法的排队延时和延时抖动小。

以上仿真实验结果表明，本文提出的 HPRED-DS 算法可保持较高的处理效率和吞吐率；采用基于 H 值的粗粒度丢弃，可在自相似流量下稳定队列长度，降低排队延时和延时抖动；采用基于优先级的细粒度丢弃，可降低高优先级数据的丢弃概率，提高重要数据的处理效率；基于 VIP/同步/异步混合的动态调度算法，可使某些极重要的数据得到及时传输，使同步虚拟信道具有较小的延时，并在保持高优先级虚拟信道性能的前提下，通过适当降低部分次高优先级虚拟信道的性能，来改善低优先级虚拟信道的性能，避免了把性能恶化全部压在最低优先级的虚拟信道上，具有较好的公平性。

5 结束语

本文通过分析 AOS 数据流量特性和不同业务的传输要求，设计了队列管理和虚拟信道调度相结合的 HPRED-DS 算法。队列管理算法采用粗粒度基于 H 值、细粒度基于优先级的 2 级丢弃分组策略，既能根据流量的自相似程度和业务重要性自适应调整丢弃分组概率，又能降低了系统负担。虚拟信道调度算法采用 VIP/同步/异步混合的动态调度模式，可兼顾 VIP 数据的重要性、同步数据的等时性和异步数据的突发性。实验结果表明，HPRED-DS 算法具有较好的处理效率、队列长度和延时性能，可满足 AOS 数据在不同自相似程度下、不同业务的传输要求。基于排队论模型的分析 and 优化调度问题，将在后续研究中继续深入。

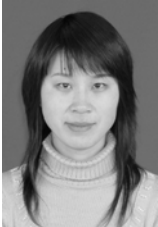
参考文献：

[1] 那振宇. 卫星互联网服务质量保障方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
 NA Z Y. Research on QoS Guarantee Methods in Satellite Internet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

- [2] CCSDS. Advanced Orbiting Systems, Networks and Data Links: Architectural Specification[S]. CCSDS 701.0-B-3, 2001.
- [3] CCSDS. Space Link Extension—Forward Space Packet Service Specification[S]. CCSDS 912.3-B-2, 2010.
- [4] CCSDS. Space Packet Protocol[S]. CCSDS 133.0-B-1, 2003.
- [5] CCSDS. AOS Space Data Link Protocol[S]. CCSDS 732.0-B-2, 2006.
- [6] LELAND W E, TAQQU M S, WILLINGER W, *et al.* On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1994, 2(1): 1-15.
- [7] NA Z Y, GAO Z H, GUO Q. Performance analysis of self-similar traffic in LEO satellite network[A]. *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*[C]. Hong Kong, China, 2007.19-22.
- [8] RYU B. Modeling and simulation of broadband satellite networks—part II: traffic modeling[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(7):48-56.
- [9] CHITI F, FANTACCI R, TARCHI D, *et al.* QoS provisioning in GEO satellite with onboard processing using predictor algorithms[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2005,12(5):21-27.
- [10] 李斗, 姬冰辉, 王峰等. 基于混沌预测的宽带 DVB-RCS 卫星接入信道动态分配方案研究[J]. *电子与信息学报*, 2008,30(3):607-611.
LI D, JI B H, WANG F, *et al.* The dynamic allocation of broadband DVB-RCS satellite access channel based on chaotic prediction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008,30(3): 607-611.
- [11] JIANG Z F, LI Y H, LEUNG V C M. A predictive demand assignment multiple access protocol for Internet access over broadband satellite networks[J]. *International Journal of Satellite Communication Network*, Wiley InterScience, 2003, 21: 451-467.
- [12] MITCHELL P D, GRACE D, TOZER T C. Burst targeted demand assignment multiple-access for broadband Internet service delivery over geostationary satellite[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(3): 546-558.
- [13] 陈剑, 闻英友, 赵大哲, 等. VBR 视频流量的小波包分解及其长时预测[J]. *通信学报*, 2008,29(6):34-42.
CHEN J, WEN Y Y, ZHAO D Z, *et al.* Long-term prediction for VBR video traffic based on wavelet packet decomposition[J]. *Journal on Communications*, 2008,29(6):34-42.
- [14] 张宾, 杨家海, 吴建平. Internet 流量模型分析与评述[J]. *软件学报*, 2011, 22(1):115-131.
ZHANG B, YANG J H, WU J P. Survey and analysis on the internet traffic model[J]. *Journal of Software*, 2011, 22(1):115-131.
- [15] ILOW J, LEUNG H. Self-Similar texture modeling using FARIMA processes with applications to satellite images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(5):792-797.
- [16] CROVELLA M E, BESTAVROS A. Self-similarity in World Wide Web traffic evidence and possible causes[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1997,5(6):835-846.
- [17] FLOYD S, JAEOBSON V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1993, 1(4): 397-413.
- [18] FLOYD S, GUMMADI R, SHENKER S. Adaptive RED: an algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management[R]. Technical Report, 2001.
- [19] VERMA R, IYER A, KARANDIKAR A. On tuning of RED parameters[EB/OL]. <http://www.ee.iitb.ernet.in/uma/~ncc2002/proc/NCC-2002/pdf/n093.pdf>.
- [20] CHRISTIANSEN M, JEFFAY K, OTT D. Tuning RED for Web traffic[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2001, 9(3): 249-269.
- [21] JAVAM H, ANALOUI M. SARED: stabilized ARED[A]. *Proceedings of International Conference on Communication Technology*[C]. Guilin, China, 2006.1-4.
- [22] WANG C, SOHRABY K, HOU T, *et al.* LRED:a robust and responsive AQM algorithm using packet loss ratio measurement[J]. *IEEE Transactions on Parallel And Distributed Systems*, 2007, 18(1): 29-43.
- [23] SUN J, ZUKERMAN M, PALANISWAMI M. Stabilizing RED using a fuzzy controller[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*[C]. Glasgow, Scotland, 2007. 266-271.
- [24] USHADEVI M B, MAHESH H M, RAVIKUMAR H M. Efficient fair queuing using adaptive RED algorithm for high speed networks[A]. *Proceedings of International Conference on Intelligent and Advanced Systems*[C]. Kuala Lumpur, Malaysia, 2007. 389-392.
- [25] 黄丽亚, 王锁萍. 基于自相似业务流的 Hurst 加权随机早检测算法[J]. *通信学报*, 2007, 28(4): 95-100.
HUANG L Y, WANG S P. Hurst weighted random early detection algorithm based on self-similar traffic input[J]. *Journal on Communications*, 2007, 28(4): 95-100.
- [26] 王晖, 季振洲, 孙彦东等. 基于时间槽的自相似流量随机早检测算法—SFRED[J]. *通信学报*, 2010, 31(10): 115-120.
WANG H, JI Z Z, SUN Y D, *et al.* Time slot-based RED algorithm on self-similar flows:SFRED[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(10): 115-120.
- [27] 吴清亮, 陶军, 姚婕. 一种基于预测 PI 控制器的自相似网络主动队列管理算法[J]. *电子学报*, 2006,34(5):938-943.
WU Q L, TAO J, YAO J. An active queue management algorithm based on predictable PI controller in self-similar network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006,34(5):938-943.
- [28] CCSDS. Advanced Orbiting Systems, Networks and Data Links: Summary of Concept, Rational and Performance[S]. CCSDS 700.0-G-3, November 1992.
- [29] CHO J W, CHO D H. Dynamic buffer management scheme based on rate estimation in packet-switched networks[J]. *Computer Networks*, 2002, 39(6): 2304-2309.

- [30] 石江涛, 王永纲, 戴雪龙等. 自相似网络业务流量的研究与实现[J]. 通信学报, 2005, 26(6): 112-117.
SHI J T, WANG Y G, DAI X L, *et al.* On study and implementation of self-similar network traffic[J]. Journal on Communications, 2005, 26(6): 112-117.
- [31] PARK K, WILLINGER W. Self Similar Network Traffic and Performance Evaluation[M]. New York: Wiley, 2000.
- [32] NORROS I. On the use of fractional brownian motion in the theory of connectionless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(6):953-962.
- [33] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[A]. IEEE INFOCOM 2001[C]. Anchorage, Alaska, USA, 2001. 1726-1734.

作者简介:



别玉霞 (1981-), 女, 山东潍坊人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为导航制导与控制、卫星通信等。



潘成胜 (1962-), 男, 江苏宜兴人, 大连大学教授, 南京理工大学博士生导师, 主要研究方向为网络协议等。



刘海燕 (1963-), 女, 黑龙江萝北人, 大连大学教授, 主要研究方向为卫星网络、信号处理等。



王延春 (1977-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为网络管理、资源优化等。

(上接第 155 页)

- [12] MAHIN T, ATOUSA H. Unequal power allocation for transmission of JPEG2000 images over wireless channels[A]. 2009 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'09)[C]. Honolulu, 2009. 3279-3284.
- [13] 肖嵩, 张方, 吴成柯. 基于小波 SPIHT 的联合信源信道编码新方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(3): 281-286.
XIAO S, ZHANG F, WU K C. A new method of joint channel coding based on SPIHT[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(3): 281-286.
- [14] RAMCHANDRAN K, VETTERLI M. Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense[J]. IEEE Trans Image Process, 1993, 2(4): 160-175.
- [15] YANG Y, XU C. A wavelet packet-based rate-distortion optimization algorithm for block partitioning image coding[J]. Sci China Ser F: Information Sciences, 2008, 51(8): 1036-1054.

作者简介:



陈俊宏 (1984-), 男, 湖南永州人, 哈尔滨工业大学深圳研究生院博士生, 主要研究方向为数字图像处理、信源信道联合编码、小波理论、人工智能神经网络等。



张钦宇 (1972-), 男, 江苏扬州人, 哈尔滨工业大学深圳研究生院电子与信息工程学院院长、教授, 主要研究方向为无线数据传输、移动通信、无线通信网、生物医学电子、人工智能神经网络等。