

远程 NCS 的 QoS 调度策略研究

邬春学 郭贤辉

(上海理工大学计算机与电气工程学院 上海 200093)

摘要 由于 Internet 只提供尽力而为服务,其随机、不确定的延时,不能保证基于 Internet 的远程 NCS 实时性等 QoS 要求,使得控制系统的稳定性很差。在 IP 网传统分布式 QoS 路由策略的基础上,提出一种基于数据优先级机制和指令推测技术的远程 NCS 的 QoS 调度策略。通过 NS2 仿真实验表明,在网络负载不过大时,该 QoS 调度策略能有效保证远程 NCS 的系统延时,有助于提高网络的带宽接纳率和控制系统的可靠性。

关键词 网络控制系统,调度策略,QoS 约束,优先级,指令推测,NS2 仿真

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Research on QoS Scheduling Strategies for Remote NCS

WU Chun-xue GUO Xian-hui

(School of Computer and Electrical Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract As Internet only provides best effort service, its random and uncertain delay can not guarantee QoS requirements, such as real-time performance, for remote networked control systems based on Internet, making the stability performance of control systems poor. On the basis of the traditional distributed QoS routing strategies for IP-network, we put forward an QoS scheduling strategy, based on data priority mechanism and instruction speculate technology, for remote NCS. It was illustrated through the NS2 simulation experiments that the proposed QoS scheduling strategy can guarantee the delay of remote NCS effectively when the network is not overloaded. It is helpful to improve network bandwidth acceptance rate and the reliability of control systems.

Keywords Networked control system(NCS), Scheduling strategy, QoS constraints, Priority, Instruction speculation, NS2 simulation

1 引言

目前,有关网络控制系统(Networked Control System, NCS)的研究已有不少进展,但大多数是基于工业现场总线的 NCS。随着 Internet 的普及、控制系统规模的扩大和远程控制策略的完善,基于 Internet 的远程 NCS(其分布式逻辑结构如图 1 所示)可以有效实现控制系统网络在地域上的自由分布、克服工业网络的弊端、降低控制网络的建设与维护成本和提高已有设备的利用效率。

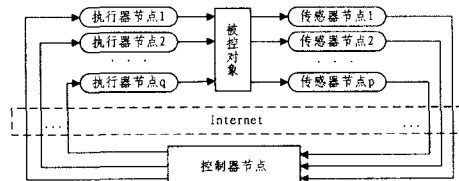


图 1 远程网络控制系统结构图

但是,目前对基于 Internet 的远程 NCS 的研究比较少^[1],尚处于实验阶段^[2,3]。主要原因是 NCS 对网络的延时、

丢包等参数非常敏感,而 Internet 网络环境复杂,最初被设计为只提供尽力而为服务,并未提供延时、丢包、抖动、带宽利用率、可靠性等 QoS 参数指标保证,其延时和抖动都较大,难以满足控制系统的实时性等 QoS 要求。

本文在 IP 网传统分布式 QoS 路由策略的基础上,研究 Internet 广域网环境下的远程 NCS 的 QoS 调度策略问题,该调度策略基于数据优先级机制和指令推测技术,在网络负载不过大时,能有效保证远程 NCS 的系统延时,有助于提高网络的带宽接纳率和控制系统的可靠性。

2 远程 NCS 的数据类型和时延分析

2.1 数据类型分析

基于 Internet 的远程 NCS 的数据信息主要包括非周期性硬实时数据、周期性硬实时数据、非周期性软实时数据、周期性软实时数据和公用网数据。其中,非周期性硬实时数据主要指突发性数据,信息量少,但对时间要求苛刻,如报警信号、操作指令信号等;周期性硬实时数据主要指各传感器的采样信号和各控制器输出的控制信号;非周期性软实时数据主

到稿日期:2008-06-25 本文受国家自然科学基金项目(60573142),湖北省自然科学基金项目(2004ABA076),湖北省教育基金重点项目(2004D003, D200512002)和科学研究计划技术创新基金项目(J200512001)资助。

邬春学(1964-),男,博士,教授,主要研究方向为网络控制系统、骨干网技术等, E-mail: surferboy@126.com;郭贤辉(1982-),男,硕士生,主要研究方向为网络控制系统等。

要指现场监控的音视频数据,信息量较大,对带宽的占用率较高;周期性软实时数据主要指 NCS 系统中的历史数据,供系统以后做数据分析、备份用途,这类数据对时限要求不严格,在网络拥塞情况下,可以丢弃部分信息;公用网数据是指除 NCS 系统外的所有 Internet 上的数据。

2.2 时延分析

基于 Internet 的远程 NCS 的时延主要由源端处理时延、网络时延和目标端处理时延 3 部分组成^[4]。其中,源端处理时延由数据采集、数据打包,以及把数据包放到物理线路之前在队列中的等待时间所构成。目标端处理时延是指解析数据包恢复原始数据格式,并把数据提交给应用层的时间。网络时延主要包括物理线路的传播时延、队列时延、路由器的处理时延和输出队列时延,其中,中间路由器数据处理时延的和是系统时延的主要组成部分。由于网络负载的变化多发生在中间路由器上,变动的主要因素为中间路由器数据处理时延总和,因此,控制系统网络时延及其不确定性主要决定于数据所经过的跳数以及在每一跳上所花费的时间。

3 远程 NCS 的 QoS 调度策略

3.1 数据类型优先级分配策略

IEEE802.1p/Q 协议在 OSI 模型的 MAC 层采用优先级对数据信息进行分类,在数据帧的头部信息中增加 4 个字节,其中有 3 位用于标明帧的优先级,可以实现 8 级优先级。对于网络中间节点路由器,不仅能够识别数据帧的优先级标志,而且根据优先级对输出端口设置多个缓冲区队列,数据帧根据优先级被放入相应的队列,优先级高的队列优先发送,在同一个优先级队列中的数据帧则按先到先发的顺序进行发送。

根据这种优先级分类机制,本文将远程 NCS 中的 5 类数据(非周期性硬实时数据、周期性硬实时数据、非周期软实时数据、周期性软实时数据、公用网数据)划分优先级,其优先级次序依次降低。为了防止低优先级的数据得不到网络调度服务,即避免“队列饥荒”现象,采用低延迟排队 LLQ 调度机制,即在保证高优先级数据先服务的前提下,兼顾其他不同优先级数据的公平调度。

3.2 路由策略

根据文献[5]的路由策略思想,扩展数据在网络中间节点路由的探测包(probe)结构,增加 2 个新字段: $D(p)$ 和 $B(p)$ 。定义如下:

(1) $D(i, j)$ 为路径 $p=(s, i, j, \dots, k, d)$ 上链路 $link(i, j)$ 的一个时延尺度,设 $D(p)=D(s, i)+D(i, j)+\dots+D(k, d)$;

(2) $B(i, j)$ 为路径 $p=(s, i, j, \dots, k, d)$ 上链路 $link(i, j)$ 的一个带宽尺度,设

$B(p)=\min\{B(s, i), B(i, j), \dots, B(k, d)\}$,其中 $D(p)$ 为时延的累计值, $B(p)$ 为路径的最小可用带宽。当一个探测包经过链路 $link(i, j)$ 后,按式(1)修改 $D(p)$ 和 $B(p)$ 值。

$$D(p)=D(p)+D(i, j), B(p)=\min\{B(p), B(i, j)\} \quad (1)$$

设网络 $G=(E, V)$, E 为边(链路)的集合, V 为中间节点(路由器)的集合。对任意中间节点 $i \in V$, 经过节点 i 的探测包以 $Probe_i$ 表示, 当一个 $Probe_i$ 到达后, 按路由 QoS 测试转发条件式(2)进行路由 QoS 测试并进行有效转发。

$$Bandwidth(i, j) \geq QoSB \wedge D(p) + D(i, j) + Prop(link$$

$$(i, j)) \leq QoSD \quad (2)$$

其中节点 j 为节点 i 的邻居节点, $Bandwidth(i, j)$ 为链路 $link(i, j)$ 的可用带宽, $QoSB$ 为请求的带宽约束, $Prop(link(i, j))$ 为链路 $link(i, j)$ 的传播延迟, $QoSD$ 为请求的连接时延约束(端到端延上限)。

3.3 路径决策机制

在目的节点 D 收到第一个 Probe 后, 开启定时以接收更多可行的 Probe, 然后使用以下的决策机制来选择最佳路径。设到达 D 的候选探测包为 $Probe_D$, 用户的带宽请求最大值为 B_{max} , 定义一个路径决策函数:

$$SelectPath(Probe_D) = \begin{cases} 1, & A > B_{max} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (3)$$

其中 A 是到达 D 的可行路径的最小可用带宽, 定义在 Probe 中的 $B(p)$ 字段。当源节点 S 发起数据传输连接请求时, 指定探测包的延上限 $QoSD$ 和 $B(p)$, 这里 $B(p)$ 为网络初始的最大带宽。当中间节点 i 收到一个探测包 $Probe_i$ 后, 使用式(2)对转发端口进行路由 QoS 测试, 如果通过转发测试, 按式(1)修改 $Probe_i$ 中的 $D(p)$ 字段和 $B(p)$ 字段, 完成后根据此 $Probe_i$ 的优先级将其放入输出端口相应的缓冲区队列, 等待转发。如果测试失败, 将不转发并丢弃此 $Probe_i$, 同时启用指令推测技术, 转入相应的控制处理, 具体的指令推测策略在 3.4 节给出。当第一个 $Probe_i$ 到达目的节点 D 后, 启用定时机制, 定时值 $Ld=QoSD-D(p)$, 其中 $D(p)$ 为第一个 $Probe_i$ 到达时花费的延迟。在定时内继续接收其他的 Probe, 完成定时后使用路径决策函数式(3)来选择最佳路径, 即当 $SelectPath(Probe_D)$ 值为 1 时, 表明链路可以接收任何带宽请求, 网络处于轻负荷状态, 不存在资源浪费现象, 则在保证 NCS 系统时延要求的基础上, 尽量选择能更多接纳网络请求的路径来传输数据, 以提高网络的利用率; 当 $SelectPath(Probe_D)$ 值为 0 时, 表明网络处于重负荷状态, 为了避免网络拥塞造成时延增大及丢包现象, 结合文献[6]的策略, 主动放弃低优先级数据的请求连接, 保证高优先级数据的优先实时传输, 以保证远程 NCS 系统的稳定性。完成最佳路径选择后, 沿选定路径向源节点 S 发送确认包, 并沿路预留资源, 当确认到达 S 后连接建立完成, 进行数据传输。

3.4 指令推测技术

在网络处于拥塞状态、路由 QoS 测试失败时, 会造成远程 NCS 的大时延、丢包等现象, 超过时限要求的大时延数据即使到达控制器、执行器节点, 对 NCS 来说, 也是无用数据。故在这种情况下为了保证 NCS 系统的稳定性与安全性, 控制器必须快速做出正确决策, 将控制信号及时发送到执行器端。本节利用指令推测技术来解决此问题, 具体策略如下:

在控制器端另外设置一个缓冲队列, 将传感器发来的采样信号按时间顺序入队, 假设控制器队列允许记录的数据为十个, 当第十一个采样信号到达时, 抛弃第一个采样信号, 后面的采样信号位置依次向前, 第十一个信号存入第十个位置, 依次类推。在网络处于拥塞状态、路由 QoS 测试失败等情况下, 控制器节点在向传感器节点发送重传命令的同时, 根据缓冲队列中所记录的数据, 运用最小二乘法对这些数据进行曲线拟合, 剔除误差较大的或明显不正确的数据。控制器节点根据拟合曲线, 推断出下一个时刻传感器可能会传来的信号, 并做出决策, 将控制信号发送到执行器端。图 2 为一个温度

网络控制系统的曲线拟合例子。

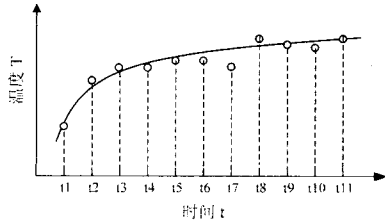


图2 温度网络控制系统的曲线拟合例子

在图2中的 t_{11} 时刻,由于网络负载过大,出现大时延或丢包等现象,控制器节点根据缓冲队列中记录的之前传感器传来的温度数据进行分析判断,推测出 t_{11} 时刻可能的温度,并做出决策,将相应的控制信号发送到执行器端。

4 实验仿真

利用 NS2 对本文提出的 QoS 调度策略进行实验仿真,网络拓扑由计算机自动随机生成,节点数为 1000,每条链路为 155Mb/s 的双工线路,为了排除实际 IP 网络不确定因素的干扰及其复杂性,作如下假设,简化实验:

- (1) 远程 NCS 由一个传感器节点、控制器节点、执行器节点和网络构成单回路;
- (2) 传感器节点时间驱动,控制器节点和执行器节点事件驱动;
- (3) 不考虑 NCS 中的音视频数据;
- (4) 不考虑 NCS 中各节点增加缓冲队列后额外所增加的存储开销。

在以下仿真图中出现的标号: FloodingSA 表示 IP 网传统的 QoS 调度策略, IFloodingSA 表示文献[5]所对应的调度策略,它是对 FloodingSA 策略在时延和网络接纳率方面的改进, QoSSA 表示本文所提出的 QoS 调度策略。

4.1 网络带宽接纳率

图3反映了3种调度策略在不同网络负载下的网络带宽接纳率情况。网络带宽接纳率是指网络所接纳的总带宽需求与用户向网络所提交的总带宽请求之比。在网络处于轻负载时,3种策略的带宽接纳率大致相当。当网络处于重负荷时, FloodingSA 策略采用单纯的洪泛转发,通过探测间的盲目竞争来发现一条路径,带宽接纳率明显下降,从而降低了网络的利用率; IFloodingSA 策略采用目的节点定时机制,从请求路径中选择 $B(p)$ 最小的探测包,从而提高了网络的带宽接纳率; QoSSA 策略也是采用节点定时机制,并基于 NCS 的数据优先级对数据进行更合理的调度,在这点上是对 IFloodingSA 策略的改进,有效提高了网络的带宽接纳率。

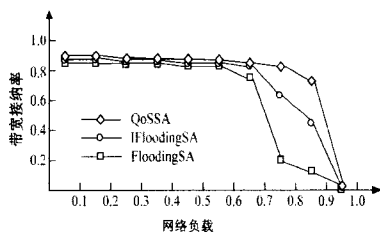


图3 带宽接纳率

4.2 时延

图4反映了3种调度策略在不同网络负载下的时延情况。由于 FloodingSA 策略采用探测间相互竞争机制,时延最小的探测包总是最先到达目的节点,故时延较小且变化不太大。IFloodingSA 策略在网络负载较轻时,使用时延尺度的决策机制,

其时延和 FloodingSA 策略相当,当网络负载变大后, IFloodingSA 策略采用带宽尺度的决策机制来提高带宽接纳率,增加了时延。 QoSSA 策略在 IFloodingSA 策略基础上,当网络处于轻负载时,采用优先级策略来保证远程 NCS 高优先级数据的时延;当网络处于重负载时,采用指令推测技术来保证远程 NCS 的时延要求和稳定性,其性能优于 IFloodingSA 策略。

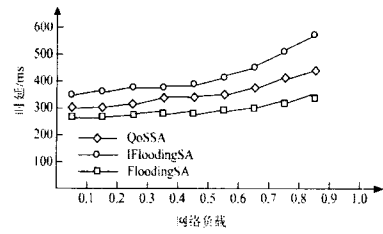


图4 时延

4.3 QoS 满意率(QSR)

由于 IP 网络拥塞的不确定性,因此并不一定能确保在源节点和目标节点间提供一条满足远程 NCS 系统 QoS 性能要求的路径。本文考虑远程 NCS 系统 QoS 满意率的问题,将其定义为满足 QoS 要求的路径数与路由的请求数之比。图5反映了3种调度策略在不同网络负载下的 QoS 满意率情况。从 QSR 比较图可以看出,本文提出的 QoSSA 策略在很大程度上改善了 QSR。但随着网络负载的增加, QSR 也相应减少,主要是因为当几乎所有的链路都超载时,要找到满足要求的路径的可能性也相应减少。

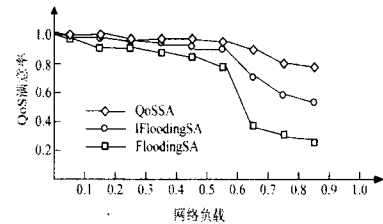


图5 QoS 满意率

结束语 由于 Internet 的复杂性,使得基于 Internet 的远程 NCS 的 QoS 性能不能得到很好的保证,以至于目前这方面的研究并不多。本文在 IP 网传统分布式 QoS 路由策略的基础上,提出一种基于数据优先级机制和指令推测技术的远程 NCS 的 QoS 调度策略。通过 NS2 仿真实验表明,在网络负载不过大时,该 QoS 调度策略能有效保证远程 NCS 的系统时延,有助于提高网络的带宽接纳率和控制系统的可靠性。仿真实验中做了不少假设及未考虑网络的实际复杂性,而这些不确定因素都会影响实际远程 NCS 的系统性能,今后有待进一步研究。

参考文献

- [1] Kuk - Hyun H, Yong - Jae K. Internet Control of Personal Robot Between KAIST and UC Davis[C]//Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robot Automat. Washington DC, 2002
- [2] Yang SH, Chen X, Alty JL. Design Issues and Implementation of Internetbased Process Control Systems[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(6): 709-720
- [3] Oversireet JW, Tzes A. An Internetbased Real - time Control Engineering laboratory [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(5): 19-34

- [4] 邬春学, 韩文冬. 基于 Internet 的网络控制系统端到端时延分析[J]. 计算机工程, 2007, 33(22): 158-160
- [5] 胡迎松, 高国强. 改进的分布式 QoS 路由算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(22): 127-129
- [6] Deb S S, Woodward M E. A Delay-constrained QoS Routing Algorithm Based on Fano's Method[C]//Proceedings of International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, 2006

(上接第 11 页)

来怎样的影响,是值得关注与研究的问题。在新协议设计之初,需要在实践中认真考察这些因素。

(6) 跨层的协议设计不利于通用型的网络。而传感器网络的特点,恰恰是专网专用,在同一个网络上应用的类型和数量都极其有限。因此,采用跨层设计的协议,将更有助于整个系统的优化。传输层与应用层、MAC 层以及路由层的紧密结合,不仅是一种必要,也是一种趋势。数据的采集、处理和传输本身是一个不可分割的整体,如果忽略其他层的信息反馈,单独依靠传输层进行拥塞处理和传输控制,在精确性上将难以保证,实施的效果也难以达到最优。

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114
- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [3] Wang C G, Sohraby K, Li B, et al. A survey of transport protocols for wireless sensor networks[J]. IEEE Network Magazine, 2006, 20(3): 34-40
- [4] 冯彦君, 孙利民, 钱华林, 等. MANET 中 TCP 改进研究综述[J]. 软件学报, 2005, 16(3): 434-444
- [5] Lindsey S, Raghavendra C, Sivalingam K. Data gathering in sensor networks using the energy-delay metric[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, Special Issue on Mobile Computing, 2006, 13(9): 293-306
- [6] Ahn G S, Miluzzo E, Campbell A T, et al. Funneling-MAC: A Localized sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks[C]//Proc. of the 4th ACM Conf on Embedded Network Sensor Systems. New York, ACM Press, 2006: 293-306
- [7] Iyer Y G, Gandham S, Venkatesan S. STCP: A Generic Transport Layer Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//IEEE ICCN 2005. San Diego, CA, Oct. 2005
- [8] Hull B, Jamieson K, Balakrishnan H. Mitigating congestion in wireless sensor networks[C]//Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004: 134-147
- [9] Wan C, Eisenman S, Campbell A. CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks[C]//Proc. of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles: ACM Press, 2003: 266-279
- [10] Hu Yueming, Xue Yueju, Li Bo, et al. SenTCP: A hop-by-hop congestion control protocol for wireless sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2005. Miami, USA, 2005
- [11] Wang C G, Sohraby K, Lawrence V, et al. Priority-based congestion control in wireless sensor networks[C]//Proc. of the IEEE International Conf. on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC). Taichung: IEEE Press, 2006: 22-31
- [12] Wan Y C, Eisenman S B, Campbell A T, et al. Siphon: Overload traffic management using multi-radio virtual sinks in sensor networks[C]//Proc. of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). San Diego: ACM Press, 2005: 116-129
- [13] Sankarasubramaniam Y, Akan O B, Akyildiz I. ESRT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks[M]. IEEE MobiHoc 2004. Annapolis: ACM Press, 2003: 177-188
- [14] Zhou Y F, Lyu M R. PORT: a price-oriented reliable transport protocol for wireless sensor networks[C]//Proc. of the 16th IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE). Chicago: IEEE Press, 2005: 117-126
- [15] Tan K, Jiang F, Zhang Q, et al. Congestion Control in Multi-hop Wireless Networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2006
- [16] Paek J, Govindan R. RCRT: Rate-Controlled Reliable Transport for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. ACM Sensys' 07. Sydney, Australia, Nov. 2007
- [17] Karenos K, Kalogeraki V, Krishnamurthy S V. Cluster-based congestion control for supporting multiple classes of traffic in sensor networks[C]//The 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors(EmNetSII). Sydney, 2005
- [18] Rangwala S, Gummadi R, Govindan R, et al. Interference-aware fair rate control in wireless sensor networks[C]//Proc. of the ACM SIGCOMM Symp. on Network Architectures and Protocols. Pisa: ACM Press, 2006: 63-74
- [19] Kang J, Zhang Y Y, Nath B, et al. Adaptive resource control scheme to alleviate congestion in sensor networks[C]//Proc. of 1st Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks (BASENETS). San Jose: IEEE Press, 2004
- [20] Kumar R, Rowaihy H, Cao G H, et al. Congestion aware routing in sensor networks[R]. PSU 2006. http://nsrc.cse.psu.edu/tech_report/NAS-TR-0036-2006.pdf
- [21] Popa L, Raiciu C, Stoica I, et al. Reducing congestion effects in wireless networks by multipath routing[C]//Proc. of the 14th IEEE International Conf. on Network Protocols (ICNP), Santa Barbara: IEEE Press, 2006: 96-105
- [22] Ee CT, Bajcsy R. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks[C]//Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004: 148-161
- [23] Kim S, et al. Flush: A Reliable Bulk Transport Protocol for Multihop Wireless Networks[C]//Proc. ACM Sensys' 07. Sydney, Australia, Nov. 2007
- [24] Chen S G, Yang N. Congestion avoidance based on lightweight buffer management in sensor networks[J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(9): 934-946
- [25] Yedavalli K. Using wireless advantage for congestion control in wireless sensor networks[R]. CENG-2005-13. University of Southern California, 2005
- [26] Hull B, Jamieson K, Balakrishnan H. Bandwidth management in wireless sensor networks[C]//Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2004: 148-161
- [27] Scheuermann B, Lochert C, Mauve M. Implicit hop-by-hop congestion control in wireless multihop networks[J]. Elsevier Ad Hoc Networks, 2008, 6(2): 260-286