

基于自适应转发的大数据通信带宽 时延感知拥塞控制技术

李根

(广东工商职业技术大学 人工智能与大数据学院, 广东 肇庆 526020)

摘要: 大数据通信带宽时延会导致通信拥塞故障, 影响通信网络的正常运行, 为此提出基于自适应转发的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术; 根据通信网络的组成结构和通信原理, 构建大数据通信网络模型; 在该模型下, 采集大数据通信带宽时延, 通过特征提取与匹配, 感知当前通信网络的拥塞状态; 针对处于拥塞状态的通信信道, 在考虑通信带宽的情况下, 计算拥塞控制量, 利用自适应转发技术调度并分配通信带宽, 在差分流传输控制协议的支持下, 实现大数据通信带宽时延感知拥塞控制; 通过拥塞控制效果测试实验得出结论: 与传统拥塞控制技术相比, 在优化设计技术的控制作用下, 移动通信网络的吞吐量有所增加, 带宽时延降低了 149.3 ms, 同时通信误码率降低了 0.037%, 即优化设计技术在拥塞控制效果方面具有明显优势。

关键词: 自适应转发; 大数据; 通信时延; 通信带宽; 拥塞控制

Bandwidth Delay Aware Congestion Control Technology for Big Data Communication Based on Adaptive Forwarding

LI Gen

(School of Artificial Intelligence and Big Data, Guangdong University of Technology and Commerce,
Zhaoqing 526020, China)

Abstract: The bandwidth delay of big data communication will lead to communication congestion failure and affect the normal operation of communication networks. Therefore, a bandwidth delay sensing congestion control technology of the big data communication based on adaptive forwarding is proposed. A big data communication network model is built by the composition structure and communication principle of communication networks. In this model, the bandwidth delay of the big data communication is collected, and the congestion status of the current communication network is sensed through the feature extraction and matching. For the communication channel in congestion state, the congestion control volume is calculated under the condition of the communication bandwidth, and the communication bandwidth is scheduled and allocated by using an adaptive forwarding technology. With the support of differential flow transmission control protocol, the big data communication bandwidth delay-aware congestion control is realized. Through the congestion control effect test experiment, the results show that compared with traditional congestion control technologies, under the control of the optimization design technology, the throughput of mobile communication network has increased, the bandwidth delay has decreased by 149.3 ms, and the communication error rate by 0.037%, that is, the optimization design technology has obvious advantages in congestion control effect.

Keywords: adaptive forwarding; big data; communication delay; communication bandwidth; congestion control

0 引言

大数据通信是通信技术按照传送介质的不同, 可以分为有线和无线两种, 这些方法都是把数据终端和电脑连接在一起, 从而实现软件、硬件、信息资源的共享。大数据通信环境需要传输大量的通信信息, 当传输的通信信息量高于信道带宽时, 通信网络就会出现拥塞现象^[1]。拥塞是指数据包达到一定数量的时候, 由于数据包的容量太大, 无法及时地进行数据包的处理, 从而造成整个网络的性能降低, 严重的话, 会造成网络的通信中断, 即出现死锁

现象。

为了降低拥塞对通信任务产生的负面影响, 以最快速度将通信程序恢复至正常状态, 相关学者对大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术做出了研究。文献 [2] 提出基于 WSNs 的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术, 以传输延迟和错误率作为约束条件, 以网络带宽利用率最大值为目标函数, 构建了多个优先级带宽的预测模型。基于带宽的预报, 通讯网络会对不同的优先级的带宽资源进行分配。文献 [3] 提出基于链路容量的大数据通信带宽时延感知拥

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-03-02。

基金项目: 广东省普通高校重点科研平台和项目(2021ZDZX4070)。

作者简介: 李根(1981-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 李根. 基于自适应转发的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 192-197.

塞控制技术，根据反馈调整拥塞的概念，采用 M/M/1 缓冲排队模式调整接收端的缓冲区排队，调整传输端口的吞吐量，从而达到多通道的协同拥塞控制。文献 [4] 提出基于贪婪随机自适应搜索的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术，引入了全局时间触发机制，以端对端延时的最小值为目标函数，应用贪婪随机自适应搜索算法，在保证时序控制的情况下，利用路由规划和调度时刻表规划减少了对终端对端的延时的流量约束。文献 [5] 提出基于延迟感知优先级接入分类的通信数据拥塞控制技术，其中具有较少剩余延迟预算的分组的大规模机器型通信设备在接入类别禁止中被赋予更高的优先级。还提出了一种增强学习 (RL) 辅助框架，称为 DPAC-RL，用于延迟感知优先级接入分类模型参数的在线学习。确保接入延迟在延迟预算内。

根据有无反馈的情况，拥塞控制机制可以划分为开环和闭环两类。开环控制是一种以防止网络陷入阻塞、保持高吞吐速率的主动防范机制。开环控制中的拥塞处理采用了预分配、定额控制、数据丢弃等静态资源分配策略。闭环控制是一种被动的恢复机制，它采用了一种基于阻塞释放/减轻的方法，在此基础上，源端能够根据数据包的损失判断出拥塞，并采取相应的控制措施，从而使网络从阻塞状态中恢复。现有的拥塞控制技术主要以 WSNs、链路容量以及贪婪随机自适应搜索作为技术支持，根据通信拥塞状态下产生的带宽时延现象，感知当前的拥塞状态，并根据状态感知结果制定相应的拥塞控制方案，从而完成控制任务。由于上述方法未考虑网络流量的波动性，存在控制效果不佳的问题，主要体现在拥塞程度缓解不明显、通信速度慢、通信吞吐量低等方面，为此引入自适应转发算法。

自适应转发算法主要是根据通信网络的实际运行状态，实现传输信息的批量转发，将自适应转发算法应用到大数据通信带宽时延感知拥塞控制过程中，以期能够提升通信网络的拥塞控制效果。

1 大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术设计

优化设计大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术的主要运行原理是：根据通信带宽时延数据，判断当前通信环境是否处于拥塞状态，针对存在拥塞现象的通信环境，计算拥塞控制量，采用自适应转发技术对拥塞控制量进行调度与分配，在带宽调度协议的支持下，实现大数据通信带宽时延感知拥塞控制任务。

1.1 大数据通信网络模型构建

从连接结构上来看，大数据通信网络的组成结构如图 1 所示。

由图 1 可知，通信网络包含发送端、接收端以及传输信道 3 个组成部分，在实际的通信过程中，通信信号从发送端发出经过复杂的传播环境传送到移动接收端，需要经历多次反射、折射等多种传播途径，产生一系列不同幅度、延时、到达角的波形和直射信号，形成一个复合接收信号。在第 i 个大数据通信任务中，接收端实际接收到的通信信号可以表示为：

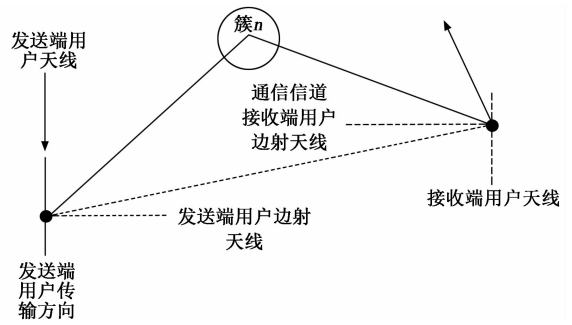


图 1 大数据通信网络模型连接结构图

$$x = \sqrt{\frac{P\beta_s}{M}} \left(\sqrt{Z_j} \exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_j \sin(\theta_j)\right) \times \sqrt{Z_f} \exp([d_f \sin(\theta_f) + \omega]) \right) \quad (1)$$

公式 (1) 中， P 为通信信道的传输功率， β_s 为通信衰落， M 为传输信道的数量， Z_j 和 Z_f 分别为接收端和发送端的天线增益， d_j 和 d_f 分别为接收端与发送端每个天线阵列之间的距离， λ 为载波波长， θ_j 和 θ_f 分别表示的是通信信号的接收与发送角度， φ 为相位。传播环境对通信信号造成一定程度的干扰和失真，并引起接收信号的功率的变化，导致信号的衰落。大数据通信网络模型中的所有节点均可被当做是发送端和接收端，通信信号的实时传输结果能够自动存储在接收终端。

1.2 大数据通信带宽时延采集

带宽是单位时间能通过链路的数据量，而带宽时延指的是链路通信数据传输任务的延迟执行时间，带宽时延可以分为两个部分，一个是通信任务执行滞后，另一个是通信执行速度降低，而通信带宽时延是通信网络拥塞的直接体现。带宽时延的产生原理如图 2 所示。

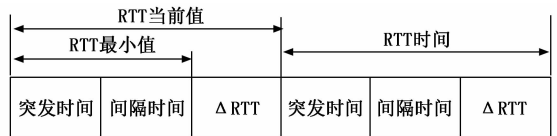


图 2 通信带宽时延产生原理图

通过对带宽时延数据的采集与分析，为通信网络的拥塞状态检测提供参考。图 3 表示的是大数据通信带宽时延参数的采集流程。

按照图 3 表示流程采集到的通信带宽时延参数采集结果可以表示为：

$$t_{\text{bandwidth}} = (t_{\text{receive}} - t_{\text{send}}) - T_0 \quad (2)$$

公式 (2) 中，变量 t_{send} 和 t_{receive} 分别表示通信信号的发送时间和接收时间， T_0 为通信任务的理论执行时间。利用公式 (2) 可以得出任意时刻通信信道的带宽时延参数采集结果，对公式 (2) 中的参数进行实时更新，即可得出大数据通信带宽时延参数的实时采集结果。

1.3 大数据通信拥塞状态感知

采用特征匹配的方式判定当前大数据通信网络的拥塞

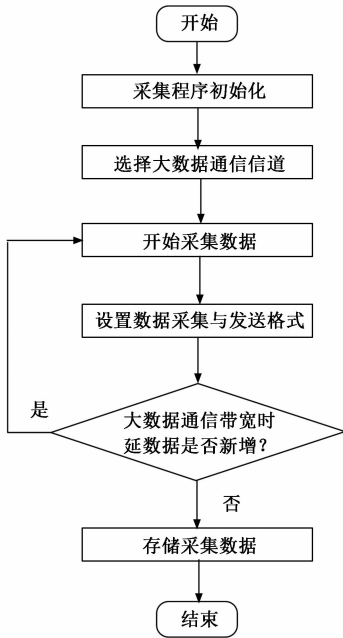


图 3 大数据通信带宽时延采集流程图

状态，设置拥塞状态下大数据通信网络的带宽时延标准特征为 γ_{standard} 。以实时采集的大数据通信带宽时延数据为研究对象，带宽时延特征的提取过程可以量化表示为：

$$\begin{cases} \gamma_{\text{age}} = \frac{\sum t_{\text{bandwidth}}}{n_i} \\ \gamma_{\text{skewness}} = \frac{E[(t - \mu(t))^3]}{(E[(t - \mu(t))^2])^{3/2}} \\ \gamma_{\text{peak}} = \frac{E[(t - \mu(t))^4]}{(E[(t - \mu(t))^2])^2} \end{cases} \quad (3)$$

公式 (3) 中，变量 n_i 表示带宽时延数据的采集数量， t 和 $\mu(t)$ 分别对应的是带宽时延数据集及其方差， $E()$ 为期望值求解函数，提取结果 γ_{age} 、 γ_{skewness} 和 γ_{peak} 分别为大数据通信环境的平均带宽时延、时延偏度和时延峰值^[6]。考虑通信带宽时延特征的重要程度，对提取特征进行融合处理，处理结果如下：

$$\gamma_{\text{fuse}} = \sum_{i=1}^{n_i} \gamma_i \cdot \omega_i \quad (4)$$

公式 (4) 中， ω_i 为带宽时延特征的权重值。在此基础上，对当前大数据通信带宽时延提取特征与设置的实验特征进行匹配，匹配结果如下：

$$\delta = \frac{\gamma_{\text{fuse}} \times \gamma_{\text{standard}}}{\|\gamma_{\text{fuse}}\| \times \|\gamma_{\text{standard}}\|} \quad (5)$$

将公式 (4) 的计算结果与设置的拥塞标准时延特征代入到公式 (5) 中，即可得出通信拥塞特征匹配系数的计算结果，若计算得出 δ 的值高于阈值 δ_0 ，则说明当前大数据通信网络处于拥塞状态，否则认为通信网络处于正常运行状态，由此完成大数据通信网络拥塞状态的感知与识别^[7]。

1.4 计算通信带宽时延感知拥塞控制量

通信带宽时延感知拥塞的控制量就是当前信道环境中

实际传输数据与信道带宽之间的差值，根据对通信数据的实时感知，可以确定当前信道的实际传输数据量，将其标记为 $W(t)$ 。在拥塞状态下，通信信道带宽的估算值为：

$$B = \frac{l_{i+1} - l_i}{(t_{i+1} - t_i) \times n_{\text{message}} + \frac{\Delta RTT}{n_{\text{message}}}} \quad (6)$$

公式 (6) 中，变量 l_i 和 l_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次通信的传输信息长度， t_i 和 t_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 次通信的传输时间， n_{message} 为通信周期内被确认的通信报文数量， ΔRTT 为 RTT 测量值与最小值的差值^[8]。那么在拥塞状态下，通信带宽时延感知拥塞控制量的计算公式如下：

$$\Delta \zeta = W(t) - B \quad (7)$$

对公式 (6) 和公式 (7) 进行联立处理，即可得出通信带宽时延感知拥塞控制量的计算结果^[9]。由于通信环境处于动态运行的状态，因此在实际计算过程中需要对变量 $W(t)$ 进行更新，且拥塞控制程序以拥塞状态作为启动条件，因此变量 $W(t)$ 的值始终大于信道带宽，因此计算得出的拥塞控制量始终为正值。

1.5 利用自适应转发技术调度并分配通信带宽

大数据通信拥塞控制量的自适应转发包含两个阶段，第一阶段为信息传递，第二阶段为转发控制。在传输时，把大量信息拷贝到网络上。在转发控制过程中，通过分析各节点的能力，可以对各节点的转发过程进行动态调整，从而实现对各节点间的数据转发调整的自适应控制^[10]。

通过对节点能力状态的不同，对效用值的阈值进行调整，实现对不同节点能力状态的节点间的转发条件进行自适应控制，因此在执行自适应转发任务之前，首先要衡量通讯网络中的节点容量。根据节点的能级状态来说明该节点向该目标节点传送消息的能力，并根据该节点的移动特性和其状态，采用该节点的剩余能量比和连接变化率来表达该节点的能力状态，并将其特征值表达如下：

$$\begin{cases} Q_i = \frac{Q_{\text{cur}}}{Q_{\text{total}}} \\ h_i(t) = \frac{|M(t-1) \cup M(t)| - |M(t-1) \cap M(t)|}{|M(t-1) \cup M(t)|} \end{cases} \quad (8)$$

公式 (8) 中， Q_{cur} 和 Q_{total} 分别为当前能量和总能量， $M(t)$ 为节点 i 在 t 时段内的邻居节点集合^[11]。根据公式 (8) 得出的节点能力状况的度量结果，以此控制不同节点能力状况节点之间的转发条件。通信数据的自适应转发过程如图 4 所示。

当 A 节点携带报文 m 的 Y_A 个副本与节点 B 相遇，产生一个交换概要向量，包含报文包的信息以及节点本身的信息，例如剩余能量、邻居变化率等^[12]。如果 B 为报文 m 的目的节点，A 向 B 发送报文 m 拷贝，放弃剩余的数据拷贝，本次传输结束；如果 B 不是报文 m 的靶点，那么根据 TP-ASW 机制，A 对 B 节点进行计算，并判定 B 节点的功率是否比 A 节点功率和 AB 通道的总和高，如果满足，则可以由节点 A 来计算向 B 传送的报文分组数目可以表示为：

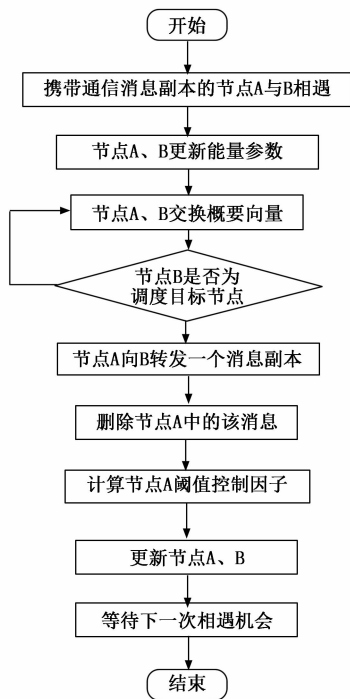


图 4 拥塞通信数据自适应转发流程图

$$Y_{forward} = P_B \times Y_A \quad (9)$$

公式 (9) 中, P_B 为节点 B 的功率。那么节点 A 原始报文数量与 $Y_{forward}$ 的差值即为节点 A 自身保留的报文数量, 将保留报文数与计算的拥塞控制量进行比对, 若保留报文数不高于拥塞控制量, 需要重复上述流程重复执行自适应转发程序, 直至节点 A 中剩余拥塞数据量为 0 为至^[13]。按照上述方式, 对处于拥塞状态的通信数据进行分配调度, 调度量与拥塞控制量相等。

1.6 实现大数据通信带宽时延感知拥塞控制

为支持大数据通信带宽时延感知拥塞控制程序的正常运行, 设置差分流传输控制协议作为支持, 差分流传输控制协议使用了主动排队管理机制, 通过显式的拥塞通知机制来实现对 TCP 流的分级^[14]。在网络出现拥塞时, 采用了更大规模的拥塞退避法, 降低了其他 TCP 数据流的传输性能。该方法通过对 TCP 流的不同传输要求进行区别, 在大流量的情况下, 可以更好地调整其拥塞窗口, 以降低数据流的发送速度, 并降低数据流的高延迟^[15]。该协议包括流分类机制、拥塞信息传递机制、拥塞后退机制三大模块。图 5 为差分流传输控制协议的工作原理。



图 5 通信带宽时延感知拥塞控制协议工作原理图

在 ACK 报文到达发送者的时候, 差分转移控制协议会对在 ECN 机制下的网络交换机队列长度超出门限的情况

下, 对 ACK 分组进行计数。在传输端保持一个参数, 以评估被标记的分组在多大程度上的拥塞, 而 α 则根据前一窗口中被标记的 ACK 分组的比率来进行更新。参数 α 的改变和改变的程度表示了网络中的拥塞和阻塞的严重程度^[16]。在没有拥塞的情况下, 利用信道时延感知拥塞控制协议, 增加 TCP 拥塞窗口。在网络出现拥塞时, 根据流分类判断机制, TCP 流会改变拥塞窗口。流分类判断机制是根据诸如 Socket 缓存、流持续时间和累计发送的数据量来对 TCP 流进行分类, 参数 α 和 ζ 的更新过程如下:

$$\begin{cases} \alpha_{new} = (1 - \kappa_{smooth}) \times \alpha_{old} + \kappa_{smooth} \times \sigma \\ \zeta_{new} = \frac{W}{\max(W_{server})} \end{cases} \quad (10)$$

公式 (10) 中, κ_{smooth} 为加权平滑系数, σ 为上一个拥塞窗口数据中被标记数据包的比例系数, W 和 W_{server} 分别为接收端服务器链路和服务器当前并存的大流数量^[17]。计算得出的参数 ζ 是指大流与接收端链路之间的复用度, 而在参数 α 和参数 ζ 的影响下, 根据网络拥塞程度和流对接收端链路的可重用度来进行流量调整^[18]。在通信带宽时延感知拥塞控制协议的支持下, 以通信带宽时延感知拥塞控制量的计算结果为处理目标, 利用自适应转发技术, 通过慢启动和拥塞避免两个步骤, 实现大数据通信带宽时延感知的拥塞控制任务。

2 拥塞控制效果测试实验分析

以测试优化设计的基于自适应转发的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术 (本文方法) 的拥塞控制效果为目的, 以对比实验的形式设计测试实验。实验设置的对比控制技术包括: 基于 WSNs 的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术 (文献 [2] 方法)、基于链路容量的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术 (文献 [3] 方法) 以及基于贪婪随机自适应搜索的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术 (文献 [4] 方法), 为保证实验变量的唯一性, 实验中运行的测试拥塞控制技术与对比拥塞控制技术均处于相同的实验环境, 且处理的通信对象一致。

2.1 大数据通信环境搭建

此次实验选择某移动通信环境作为研究背景, 该通信网络由 23 个节点组成, 其中移动通信节点 16 个, 路由节点 7 个。大数据通信环境的拓扑结构如图 6 所示。

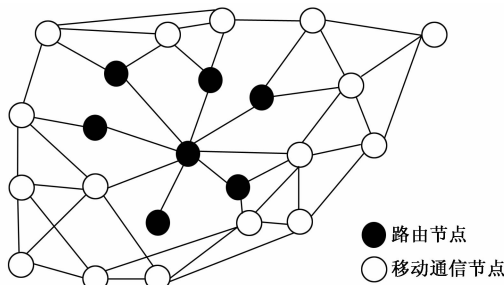


图 6 大数据通信环境拓扑结构图

图 6 中路由节点均为固定节点, 通信节点为移动节点,

通信环境中的移动节点与路由节点、任意两个移动节点之间能够形成通信链路,在初始状态下所有通信链路的带宽均为 80 Mbit/s,链路占用空间为 0 Mbit/s。图 5 中移动通信节点的通信半径为 5 m,移动速度为 3 m/s。信道采用 TwoRayGround 的传输模式,IEEE802.11DCF 是 MAC 层,最小竞争窗是 31,最大竞争窗是 1 023;队列管理方式采用尾部丢弃策略。设定逻辑链路的层次,分别设置了逻辑链路控制层及链路带宽^[19]。物理层设定为 914 MHz, DSSS 模式,其他设定为 NS-2^[20]。在开始实验之前,对大数据通信环境中的所有节点和链路进行调试处理,调试过程为:编写通信程序,确定通信任务的发送端、接收端与传输信道,将通信程序添加到搭建的大数据通信环境中,记录通信数据,判断通信数据是否能够被接收端成功接收,在确定通信环境中所有节点均处于正常通信状态的情况下,执行实验的下一步操作。

2.2 通信数据样本设置

收集多个移动通信用户近 6 个月的通信数据作为通信数据样本,按照公式 (11) 表示方式,对初始收集的通信数据样本进行归一化处理。

$$x_g = \frac{\max(X_{com}) - X_{com}}{\max(X_{com}) - \min(X_{com})} \quad (11)$$

公式 (11) 中, X_{com} 为初始采集的通信数据集合。通过公式 (11) 的处理,保证不会因通信数据格式给实验结果产生影响。通过样本统计,实验准备的通信数据样本量共 19 800 MB。

2.3 通信带宽时延感知拥塞状态设定

通过设置通信环境中各个信道的数据传输量,实现对通信带宽时延感知拥塞状态的设定,并记录各信道链路时延。通信带宽时延感知拥塞状态的设定情况如表 1 所示。

表 1 通信带宽时延感知拥塞状态设置表

实验组别	拥塞节点/信道	通信数据量/MB	拥塞等级	带宽时延/ms
1	节点 06	984	II	10
2	信道 07~11	1 253	I	13
3	节点 12	1 028	II	12
4	节点 04	895	III	8
5	信道 01~09	1 341	I	15
6	信道 08~06	1 186	II	12
7	信道 04~10	1 393	I	15
8	节点 13	972	II	10

表 1 中拥塞等级 I 表示拥塞程度最严重,在实验组别的切换过程中,需要将通信节点和通信信道恢复至初始状态,最大程度的降低实验组别之间产生的通信影响。

2.4 拥塞控制效果测试实验过程

在布设的拥塞状态的通信环境下,利用编程工具对优化设计的基于自适应转发的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术和对比的拥塞控制技术进行开发,通过数据采集、状态感知、带宽分配调度等步骤,实现对通信环境的拥塞

控制。其中优化设计技术的执行结果,如图 7 所示。

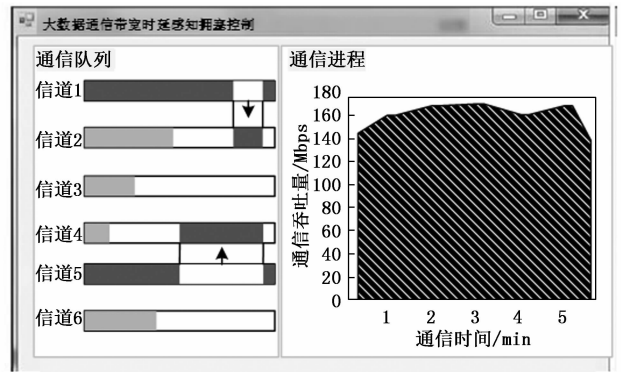


图 7 大数据通信带宽时延感知拥塞控制运行界面

按照上述方式可以得出对比控制技术得出的输出结果。在拥塞控制技术执行后统计通信环境 24 小时内的通信数据,以此作为判断 4 种技术拥塞控制效果的数据基础。

2.5 拥塞控制效果量化测试指标

此次实验主要通过通信性能来反映技术的拥塞控制效果,设置吞吐量、带宽时延和误码率作为通信性能的量化测试指标,其中吞吐量和带宽时延指标的数值结果为:

$$\begin{cases} \vartheta = \frac{N_{Concurrency}}{t_{response}} \\ \Delta t = t_{receive} - t_{send} \end{cases} \quad (12)$$

公式 (12) 中, $N_{Concurrency}$ 表示的是通信网络的并发数, $t_{response}$ 为通信任务的响应时间, t_{send} 和 $t_{receive}$ 对应的是通信数据的发送时间和接收时间。另外误码率指标的计算公式如下:

$$\eta_{err} = \left(1 - \frac{N_{suc}}{N_{send}}\right) \times 100\% \quad (13)$$

公式 (13) 中,变量 N_{suc} 和 N_{send} 分别表示通信网络中接收正确的数据量和发送的通信数据总量。最终计算出指标 ϑ 越大、 Δt 和 η_{err} 越小证明对应大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术的拥塞控制效果越优。

2.6 拥塞控制效果测试结果与分析

在大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术的运行过程中,实时统计通信网络的实时运行参数,根据公式 (12) 的获得吞吐量和带宽时延的测试结果,如图 8 所示。

从图 8 中可以直观看出,与传统拥塞控制技术相比,本文方法通信环境的吞吐量得到明显上升,同时带宽时延得到有效控制。通过数据读取与计算,可以得出文献 [2] 方法、文献 [3] 方法、文献 [4] 方法的通信吞吐量的平均值分别为 100.3 Mbps、104.5 Mbps 以及 105.2 Mbps,而本文方法的实际通信吞吐量平均值为 163.5 Mbps。从带宽时延方面来看,文献 [2] 方法、文献 [3] 方法、文献 [4] 方法的平均值分别为 225.7 ms、225.2 ms 和 148.9 ms,而本文方法的平均带宽时延为 50.6 ms,由此可见,本文方法的通信环境具有更高的通信性能。在通信接收端捕获接收数据,通过与发送数据的比对,得出反映通信环境误码率的测试结果,如表 2 所示。

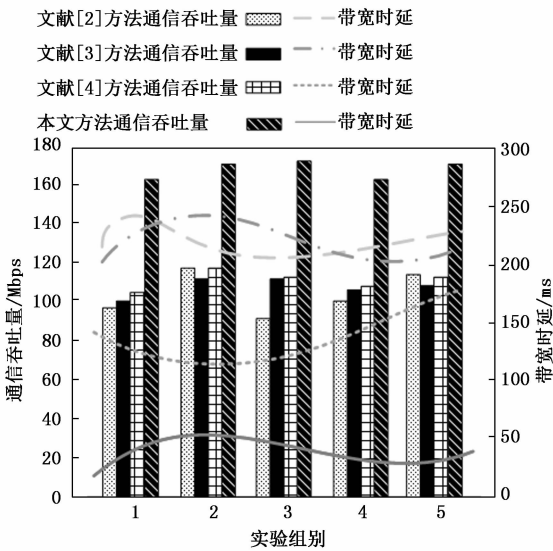


图 8 拥塞控制技术下通信吞吐量与带宽时延的测试结果

表 2 通信误码率测试数据表

实验组别	发送端实际发送通信数据量/MB	文献[2]方法的正确接收数据量/MB	文献[3]方法的正确接收数据量/MB	文献[4]方法的正确接收数据量/MB	本文方法的正确接收数据量/MB
1	2 475	2 473.3	2 473.7	2 474.4	2 474.9
2	2 475	2 474.4	2 474.6	2 474.6	2 474.8
3	2 475	2 473.1	2 474.5	2 474.5	2 474.9
4	2 475	2 473.1	2 473.2	2 474.1	2 475.0
5	2 475	2 473.3	2 473.4	2 474.5	2 475.0
6	2 475	2 473.6	2 474.5	2 474.3	2 474.9
7	2 475	2 473.6	2 473.7	2 474.2	2 474.8
8	2 475	2 474.1	2 474.3	2 474.5	2 475.0

将表 2 数据代入到公式 (13) 中，计算得出文献 [2] 方法、文献 [3] 方法、文献 [4] 方法的平均通信误码率分别为 0.058%、0.041 和 0.025%，而本文方法的通信环境的实际误码率为 0.004%。本文方法的通信误码率最小，表明拥塞控制效果较好。

3 结束语

拥塞是通信网络常见的故障类型，传输数据过多、通信程序运行中断都可能导致通信网络产生拥塞现象。以保证通信网络运行的稳定性与安全性为目的，提出基于自适应转发的大数据通信带宽时延感知拥塞控制技术。从实验结果中可以看出，优化设计拥塞控制技术能够将通信网络的运行性能控制在更高水平上，优化设计拥塞控制技术应用下通信吞吐量较大，通信时延及通信误码率较小，由此证明优化设计技术具有良好的拥塞控制效果，应用该技术可以提升网络通信的可靠性。

参考文献：

[1] 曲大鹏, 张建坤, 吕国鑫, 等. 命名数据网络中带宽时延感知

的拥塞控制机制 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16 (5): 1076 - 1086.

[2] 如 举, 葛 瑜, 孙 伟, 等. 基于 WSNs 的智能配电网通信数据传输带宽的优化分配策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (23): 88 - 95.

[3] 王 竹, 袁青云, 郝凡凡, 等. 基于链路容量的多路径拥塞控制算法 [J]. 通信学报, 2020, 41 (5): 59 - 71.

[4] 郑 重, 何 锋, 李浩若, 等. 基于贪婪随机自适应搜索法的 TTE 通信调度算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47 (11): 2268 - 2276.

[5] CHOWDHURY M R, DE S. Delay-aware priority access classification for massive machine-type communication [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70 (12): 13238 - 13254.

[6] 支 娜, 丁 可, 黄庆辉, 等. 一种无需高带宽通信线路的高精度自主均流控制策略 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (16): 3375 - 3385.

[7] 徐志威, 毕美华, 季晨阳, 等. 支持多业务共存的 Xhaul 网络低时延带宽分配算法 [J]. 光通信技术, 2022, 46 (5): 15 - 19.

[8] 赵静静, 衷璐洁. 基于排队时延主动探测的多路传输拥塞控制 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (3): 628 - 635

[9] 潘婉苏, 李晓风, 谭海波, 等. BBR 拥塞控制算法的 RTT 公平性优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (11): 38 - 46.

[10] 史建超, 谢志远, 胡正伟, 等. 多跳中继宽带电力线通信网络中的 OFDM 跨层资源分配 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (5): 58 - 66.

[11] 杨 挺, 何子阳, 孙兆帅, 等. 面向并发多业务的宽带电力线载波通信跨层资源分配算法研究 [J]. 电网技术, 2021, 45 (8): 3257 - 3267.

[12] 王 清, 荆 臻, 李琼琮, 等. 宽带电力线载波通信物理层资源分配新算法 [J]. 电测与仪表, 2021, 58 (7): 124 - 129.

[13] 张人杰, 胡 超, 刘 威. 空间延迟容忍网络中多链路数据拥塞控制算法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2020, 50 (4): 1472 - 1477.

[14] 魏绍亮, 张 帅, 程奉玉, 等. 低压电力线通信带宽自适应分配策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (21): 123 - 131.

[15] 杨美艳. 基于数据驱动的无线传感器网络拥塞控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44 (5): 570 - 574.

[16] 唐 伦, 魏延南, 谭 颀, 等. H-CRAN 网络下联合拥塞控制和资源分配的网络切片动态资源调度策略 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (5): 1244 - 1252.

[17] 林 霄, 张 佳, 岳胜男, 等. 基于 TS-MLG 的网络状态融合调度方法 [J]. 光通信技术, 2020, 44 (9): 52 - 57.

[18] 李俊娥, 陆秋余, 刘 剑, 等. 智能变电站通信业务优先级及其队列调度方法 [J]. 通信学报, 2021, 42 (7): 25 - 40.

[19] 柯文龙, 王 勇, 叶 苗, 等. Ceph 云存储网络中一种业务优先级区分的多播流调度方法 [J]. 通信学报, 2020, 41 (11): 40 - 51.

[20] 冉金鹏, 王 翔, 赵尚弘. 基于 SDN 的航空通信服务调度关键问题分析 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46 (9): 1 - 6.