

# 铁路时间同步网延迟不对称补偿方案

张友鹏<sup>1\*</sup>, 曹建荣<sup>1\*\*</sup>, 兰丽<sup>2,3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

<sup>2</sup>兰州交通大学电子信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

<sup>3</sup>兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 针对铁路时间同步网中上下行链路延迟不一致的问题, 提出一种基于改进实时计算数据包排队延迟 (ERTCQD) 算法的补偿方案。该方案以传输链路时延为依据, 得到铁路时间同步网时钟模型; 考虑实时计算数据包排队延迟算法中时钟频差计算参数难以获得且时钟频差会导致延迟随时间线性偏移, 通过计算线性时钟频差改进该计算方法, 并通过求解排队延迟最小数据包估算出排队延迟, 最后将该排队延迟引入时钟模型, 得到一种新的时钟偏差估计方式, 并以此改善延迟不对称导致的对时精度下降问题。研究表明: ERTCQD 算法的精度更高, 平均误差为 0.22 ms, 基于该方案的补偿效果良好, 相比于补偿前, 该方案将时钟偏差误差降低了 73.2%, 链路延迟不对称则降低 94.2%。该方案明显提升对时精度, 为解决铁路时间同步网延迟不对称提供参考。

**关键词** 光通信; 铁路时间同步网; 改进实时计算数据包排队延迟算法; 延迟不对称补偿; 排队延迟

中图分类号 U 285.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0706003

## Delay Asymmetry Compensation Scheme of Railway Time Synchronization Network

Zhang Youpeng<sup>1\*</sup>, Cao Jianrong<sup>1\*\*</sup>, Lan Li<sup>2,3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Automatic & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;*

<sup>2</sup>*School of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;*

<sup>3</sup>*Key Laboratory of Opt-Electronic Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China*

**Abstract** Aiming at the problem of inconsistent delay of the uplink and downlink in a railway time synchronization network, a compensation scheme based on the enhanced algorithm for real-time calculation of data package queuing delay (ERTCQD) is proposed in this work. First, based on the transmission link delay, the clock model of a railway time synchronization network is obtained. Second, considering that the calculation parameters of clock frequency difference in the real-time calculation algorithm of data package queuing delay are difficult to obtain and the clock frequency difference will lead to linear shift of delay with time, the calculation method is improved by calculating the linear clock frequency difference, and the queuing delay is estimated by solving the queuing delay minimum data package. Finally, the queuing delay is introduced into the clock model, and a new clock offset estimation method is

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-08-23; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题资助项目(2015X007-H)、光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学)开放课题(KFKT2018-12)、甘肃省科技计划资助项目(20JR10RA218)

\*E-mail: zhangyoupengypz@126.com; \*\*E-mail: caojianrong@163.com; \*\*\*E-mail: 1249427470@qq.com

obtained, which can improve the time accuracy degradation caused by delay asymmetry. The results show that: the ERTCQD algorithm has higher accuracy, and the average error is 0.22 ms. The compensation effect of this scheme is good. Compared with results before compensation, the clock offset error is reduced by 73.2%, and the link delay asymmetry is reduced by 94.2%. The proposed scheme significantly improves the timing accuracy and provides a new reference for solving the delay asymmetry of the railway time synchronization network.

**Key words** optical communications; railway time synchronization network; enhanced algorithm for real-time calculation of data package queuing delay; delay asymmetry compensation; queuing delay

**OCIS codes** 060.4250; 060.4256

## 1 引言

铁路时间同步网是铁路通信网络的支撑网络之一,为铁路运输设备提供统一标准的时间,保证了铁路运输的安全与高效<sup>[1-3]</sup>。铁路时间同步网采用网络时间协议(NTP)作为其对时协议<sup>[4]</sup>,由传输网与数据通信网完成通信传输。然而,承载铁路时间同步网信息传输的传输网与数据通信网内流量复杂多样<sup>[5]</sup>,容易积累大量的排队延迟,使得前向主从与反向从主方向的延迟很难达到平衡,引起时钟同步性能的下降<sup>[6]</sup>,从而影响甚至威胁到行车安全。因此,如何提升不对称条件下的同步性能成为近些年来研究热点。目前研究中主要有两种处理不对称时延的方法,一种是修正法,另一种是估计法<sup>[7]</sup>。修正法是通过确定不对称时延后纠正时钟,估计法则是通过统计学的方法假设时延服从某种特定的概率分布,以获得时钟参数。文献[8]在假设网络传输过程中前向与后向物理链路的时延相等的基础上,提出用排队导致的不对称补偿算法(QIACA)估计出排队延迟偏移,以对时钟偏差进行补偿;文献[9]在对链路延迟进行分析后,提出了改进的时钟偏差计算方法;文献[10]利用混合高斯随机变量逼近随机排队延迟的概率密度函数,并提出一种鲁棒的迭代时钟频差和偏差估计方案;文献[11]提出最小排队转发时延估计算法,通过对链路时延的堆栈式比较,筛选出未受阻塞的幸运报文进行时钟偏差估计,以提高同步精度;文献[12]提出利用期望最大化算法来识别非对称主从通信路径,去除这些路径信息后,使用最优向量位置参数估计器来估计时钟偏差。

上述文献中,文献[10-12]均采用估计法对引起不对称的时延进行处理,相比于文献[8-9]采取的修正法,估计法需要大量的样本统计,占用相当多的资源,会进一步降低时钟同步性能。修正法存在的问题是需要对时延进行精确估计。针对这一问题,

文献[13]采用实时计算数据包排队延迟(RTCQD)算法对随机排队延迟进行估计,该算法不需要大量的样本,且方法简单。若在此基础上完成不对称条件下的延迟补偿,显然能够满足在占用少量资源的同时提升精度这一要求,但是实际通信过程中很难同时准确获得主从时钟的时间,使得这一算法仍有提升的余地。因此,本文提出基于改进实时计算数据包排队延迟(ERTCQD)算法的不对称补偿方案,以对引起延迟不对称的排队延迟进行估计补偿。本文首先对铁路时间同步网传输链路的时延进行分析,并得到了铁路时间同步网的时钟模型;然后根据该时钟模型、利用ERTCQD算法、通过确定排队延迟最小数据包和时钟频差估计排队延迟;最后将估计出的排队延迟引入协议的时钟偏差估计中,得出一种新的时钟偏差估计方案,以解决由排队延迟造成的精度下降与收发双向延迟不对称的问题,从而提升铁路时间同步网的对时精度。

## 2 铁路时间同步网时钟模型

铁路时间同步网采用以NTP为主的对时方案,该方案假设上下行物理链路延迟一致,然而由于承载铁路时间同步网信息交换的传输网与数据通信网中的延迟并不单一,该方案所支持的对时时钟模型已经不能准确反映出实际传输的状况,因此有必要对于对时数据包传输过程的时延进行分析,从而得出更能反映实际状态的时钟模型。

### 2.1 时延分析

时间同步网的对时方案需要按照点对点的形式传送信息<sup>[14]</sup>,因此可以将铁路时间同步网简化为仅有主节点和从节点的链路来分析其时延的分布情况,再结合铁路系统中数据通信网或者传输网中的信息传送情况,得到如图1所示的点对点的单条链路模型。

由图1可知,主节点向链路中发出同步信息包,该包经过路由器1的排队转发,被传送至数据通信

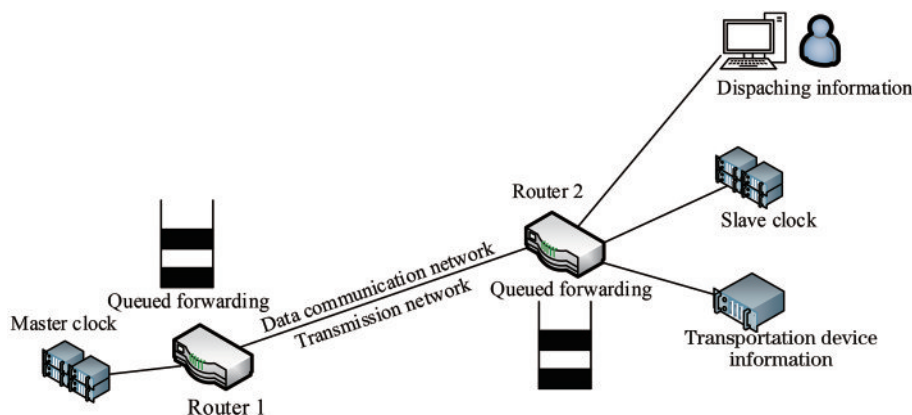


图 1 简化后的链路模型

Fig. 1 Simplified link model

网或者传输网中,最终由从节点接收。此外,链路中还会存在由铁路局或车站发送的调度信息和运输设备信息。

定时数据包由主时钟发送至从时钟时会经历如表 1 所示的时延,即经历了传输时延、传播时延和排队时延。传输时延即将数据包从时间服务器完整地传输到链路上所占用的时间;排队时延是指数据包经过路由器的分组转发经历的时间;传播时延是指数据包在发送端与接收端链路上占用的时间<sup>[15]</sup>。

表 1 单链路时钟经历的时延

Table 1 Time delay of single link clock

Transmission path	Delay type
From master clock to router 1	Transmission delay
From router 1 to transmission link	Queuing delay
From transmission link to router 2	Propagation delay
From router 2 to transmission link	Queuing delay
From transmission link to slave clock	Propagation delay

排队延迟的随机性较大,因此上述时延又可以根据时延大小的变化特性分为固定延迟和随机延迟,并据此得出时钟模型。

### 2.2 时钟模型

根据 2.1 节的时延分析可得出,定时过程中主要存在固定延迟和随机延迟,固定延迟用  $d$  表示,随机延迟主要为排队延迟,用  $q$  表示,因此可以得出如图 2 所示的时钟同步模型。

用基于同步问题定义的广义偏移方程<sup>[8]</sup>来描述主从时钟节点间的瞬时时间关系,令服务器的时间为  $S(t)$ ,而客户端的时间为  $C(t)$ ,得到

$$S(t)=[1+\alpha(n)]C(t)+\theta(n), \quad (1)$$

式中: $\alpha(n)$ 表示第  $n$  轮主从同步过程对应的歪斜系数; $\theta(n)$ 表示时间偏差。根据图 2 的时钟同步模型,

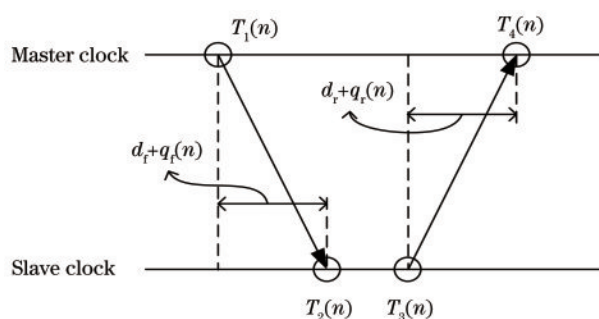


图 2 时钟同步模型

Fig. 2 Clock synchronization model

在第  $n$  轮主从同步过程中,主时钟发送一条时间戳为  $T_1(n) \in S(t)$  的同步消息,信息到达从时钟的时间戳为  $T_2(n) \in C(t)$ ,经历一个固定的物理链路延迟  $d_r$  与随机的排队延迟  $q_r$ ,将(1)式沿用至主从时钟报文交换的通信链路上,并根据图 2 时钟模型拓展得到

$$T_1(n) + d_r + q_r = [1 + \alpha(n)]T_2(n) + \theta(n). \quad (2)$$

接收到主时钟发送的消息后,从时钟向主时钟发送应答消息并记录本地时间  $T_3(n) \in S(t)$ ,同样经历固定延迟  $d_r$  与随机的排队延迟  $q_r$ ,并以  $T_4(n) \in S(t)$  时刻到达主时钟,得到

$$T_4(n) - d_r - q_r = [1 + \alpha(n)]T_3(n) + \theta(n). \quad (3)$$

报文交换结束时,从时钟记录  $T_1(n)$ 、 $T_2(n)$ 、 $T_3(n)$ 、 $T_4(n)$  这 4 个时间戳。在同步过程中,尽管往返路径可能会经过不同路由的分组转发,但是由于电磁波在电缆或者光缆中的传播速度近似于光速的  $2/3$ ,双向链路的传播时延造成的不对称可以忽略不计<sup>[16]</sup>, $d_r = d_r$ ,因此可以得到该时钟模型下的时钟偏差计算公式为

$$\theta(n) = \frac{1}{2} \{ T_1(n) + T_4(n) - [1 + \alpha(n)] [ T_2(n) + T_3(n) ] \} + \frac{1}{2} (q_r - q_l). \quad (4)$$

### 3 ERTCQD 算法的延迟补偿

#### 3.1 RTCQD 算法简介

为测量互联网中导致网络不对称和网络拥塞的排队延迟,文献[13]提出使用 RTCQD 算法以对排队延迟进行估测。该方法考虑时钟频差(即主从时钟速率差值)对于排队延迟的影响,相对于采用大量样本进行估计预测的方法,该方法不仅占用的资源少、处理速度快,更兼具精度上的优势。

消息通信过程中,单向链路时延中不存在由突发背景流量导致的排队等候时间对应最小时延,该类数据包为排队延迟最小的数据包  $P_{\min}$  [17-18]。通过抓取排队延迟最小的数据包可以推测出数据包的理论到达时间 [12],结合时钟频差可得数据包实际到达时间和理论到达时间的差值即为排队延时。

RTCQD 算法的核心算式为

$$Q_r = T_2(i) - \sum_{k=s_{\min}}^{i-1} \{ \beta(k) [ T_1(k+1) - T_1(k) ] \} - T_{2\min}^r, \quad (5)$$

$$Q_l = T_4(i) - \sum_{k=s_{\min}}^{i-1} \left[ \frac{T_3(i+1) - T_3(i)}{\beta(k)} \right] - T_{4\min}^r, \quad (6)$$

式中:  $s_{\min}$  为出现排队延迟最小数据包的轮数;  $\beta(k)$  为时钟频差;  $Q_r$ 、 $Q_l$  分别为上、下行链路的排队延迟的值;  $T_{2\min}^r$  为理论上到达从时钟的时刻;  $T_{4\min}^r$  为理论上接收到从时钟发送的数据包的时刻;  $i$  表示从时钟向主时钟发起第  $i$  轮对时请求;  $k$  为从出现排队延迟最小数据包开始对时的轮数。因此,要实时计算出第  $i$  轮对时数据包的排队延迟,就要找到一个窗口时间内的排队延迟最小数据包  $P_{\min}$  和时钟频差  $\beta(k)$ 。

##### 3.1.1 $P_{\min}$ 计算方法设计与实现

算法假设在同步过程中时钟歪斜系数  $\alpha$  与时钟偏差值  $\theta$  不会发生变化,对(2)、(3)式进行差分,得到

$$\Delta T_1(n) + d_l(n) - d_l(n-1) = [1 + \alpha(n)] \Delta T_2(n), \quad (7)$$

$$\Delta T_4(n) - d_r(n) + d_r(n-1) = [1 + \alpha(n)] \Delta T_3(n), \quad (8)$$

通过转换得到

$$\epsilon(n) = d_l(n) - d_l(n-1) = [1 + \alpha(n)] \Delta T_2(n) - \Delta T_1(n), \quad (9)$$

$$\gamma(n) = d_r(n) - d_r(n-1) = \Delta T_4(n) - [1 + \alpha(n)] \Delta T_3(n), \quad (10)$$

式中:  $\epsilon(n)$  与  $\gamma(n)$  为延迟测量值的一阶差分。将  $\epsilon_s(n)$  与  $\gamma_s(n)$  定义为

$$\epsilon_s(n) = \epsilon_s(n-1) + \epsilon(n) = \epsilon_s(n-1) + d_l(n) - d_l(n-1) = \epsilon_s(0) + d_l(n) - d_l(0), \quad (11)$$

$$\gamma_s(n) = \gamma_s(n-1) + \gamma(n) = \gamma_s(n-1) + d_r(n) - d_r(n-1) = \gamma_s(0) + d_r(n) - d_r(0), \quad (12)$$

式中:  $\epsilon(0) = \gamma(0) = 0$ 。可以发现  $\epsilon(n)$  或  $\gamma(n)$  为第  $n$  次的延迟值与第  $n-1$  次延迟值的差值,以此作为判断最小包的依据,并得到一系列  $\epsilon_s$ 、 $\gamma_s$  值,通过求解  $\min \{ \epsilon_s \}$  与  $\min \{ \gamma_s \}$ , 动态地得到  $P_{\min}$ 。

##### 3.1.2 基于滑动窗口求解时钟频差

同步节点的时钟频率会随着时间的变化缓慢波动,用  $\beta(k)$  表示主从时钟之间的相对时钟频差,即

$$\beta(k) = \frac{d[C^r(t)]}{d[C^s(t)]}, \quad (13)$$

式中:  $C^r(t)$  和  $C^s(t)$  分别表示从时钟的时间与主时钟的时间。

为准确计算相对时钟频差,采用滑动窗口机制来优化计算时钟频差,该方法首先读入  $\omega/2$  个测试样本,利用凸集理论得到所有测试样本凸包的集

合。接收端每收到一个新的数据包,则将该数据包加入到计算窗口内,计算一次时钟频差。当样本数量超过窗口宽度  $\omega$  时,将最左端的数据移出并重新计算。

### 3.2 基于 ERTCQD 算法的补偿

#### 3.2.1 基于线性时钟频差的改进

虽然 RTCQD 算法考虑了时钟频差对于排队延迟估算的影响,但由于实际过程中很难同时获得准确的主从时钟的时间,因此该算法所采用的相对时钟频差的估计方法并不实用。为解决该问题,本文对 RTCQD 所采用的时钟频差计算方法进行了改进。由于主从时钟速率是缓慢变化的,时钟频差也可以视为不变。实验证明,在忽略网络拥塞和时钟重置的情况下,时钟频差会导致时延随时间呈线性增大,通过估计出时延随时间变化的直线斜率即可

得时钟频差<sup>[19]</sup>,以主从前向路径为例,用 $\beta(k)$ 来表示服务器与客户机间的时钟频差:

$$\beta(k) = \frac{dO_{wd}(k)}{dT_1(k)} = \frac{[T_2(k+1) - T_1(k+1)] - [T_2(k) - T_1(k)]}{T_1(k+1) - T_1(k)}, \quad (14)$$

式中: $O_{wd}(k)$ 为单向链路的延迟; $k$ 表示第 $k$ 轮对时; $T_2(k+1)$ 、 $T_2(k)$ 分别为从时钟接收到来自主时钟的消息的相邻时刻; $T_1(k+1)$ 、 $T_1(k)$ 分别为主时钟发出时间同步请求的相邻时刻。

### 3.2.2 改进算法复杂度分析与效果验证

通过对比分析改进前后的算法,发现算法的开销主要集中在三个部分,分别是对排队延迟最小数据包的求解、对时钟频差的求解和对排队延迟的测算。考虑最坏条件下的时间开销,补偿前三个部分的算法复杂度分别为 $O(n)$ 、 $O(\omega)$ 、 $O(n)$ ,因此 RTCQD 算法的复杂度为 $T(n) = O(2n + \omega)$ ,由于 $\omega \ll n$ ,因此其最终的算法复杂度为 $O(n)$ ,其中 $n$ 为链路中同步包的数量, $\omega$ 为滑动窗口优化时钟频差时的宽度。改进后三个部分的算法复杂度分别为 $O(n)$ 、 $O(1)$ 、 $O(n)$ ,因此 ERTCQD 算法的复杂度也为 $T(n) = O(2n + 1) = O(n)$ 。虽然改进后的算法复杂度为 $O(n)$ 且该值与改进前同阶,但是改进后时钟频差计算的算法复杂度为 $O(1) [ < O(\omega) ]$ ,这降低了算法复杂度,提升了算法的实时性<sup>[20-21]</sup>。

使用 OPNET 网络仿真软件对改进算法与文献[13]中的 RTCQD 算法进行对比分析,仿真共持续 2500 s,设置 15 个发送节点,4 个接收节点,链路带宽为 2 Mbit/s。设置节点统计量,统计端到端的排队延迟的方法为 QUE,改进算法为 ERTCQD。将三者结果进行对比,如图 3 所示。

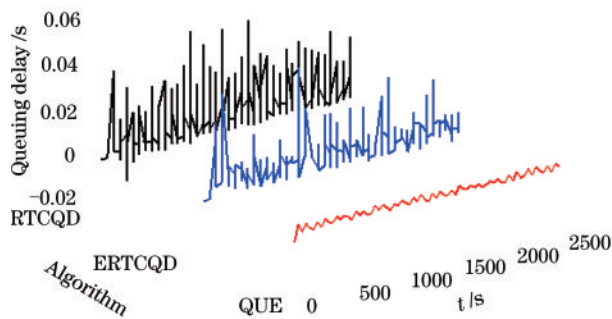


图 3 排队延迟的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of queuing delay

图 3 中横坐标表示仿真的时间,纵坐标表示各个算法,竖坐标表示各自算法所测得的排队延

迟。算法对排队延迟的估算误差如表 2 中所示。

表 2 算法表现

Table 2 Algorithm performance

Algorithm	Average queuing delay /ms	Average error /ms	Std
RTCQD	8.92	2.63	6.9
ERTCQD	8.20	0.22	5.8

在仿真测试结果中,RTCQD 算法的平均误差为 2.63 ms,ERTCQD 算法的平均误差为 0.22 ms,相比之下 ERTCQD 算法对于排队延迟的估计更为准确,这表明改进算法的有效性和准确性。

### 3.2.3 延迟不对称补偿

同步过程中时钟频率会缓慢发生波动,而且铁路时间同步网采用的是高稳态晶振,实际中这种频偏非常接近<sup>1[22]</sup>。因此相对于延迟不对称来说,这种变化可以忽略不计,即可将(4)式中的 $\alpha$ 近似为 0,得到时钟偏差计算式为

$$\theta = \frac{1}{2} \overbrace{[T_2(k) + T_3(k) - T_1(k) - T_4(k)]}^{\theta_r} + \frac{1}{2} \underbrace{(Q_r - Q_l)}_{\theta_q}, \quad (15)$$

式中: $\theta_r$ 是在假设延迟对称的前提下 NTP 计算出的时钟偏差; $\theta_q$ 为由排队延迟所产生的时钟偏差。接着利用补偿后的时钟偏差对延迟进行补偿,以降低收发双向时延的不对称性。该方案的流程图如图 4 所示。

在经过前 $N$ 轮对时后,获取排队延迟最小数据包 $P_{min}$ ,然后求取时钟频差,利用 $P_{min}$ 和时钟频差对排队延迟进行初步估算。完成初步的补偿后,动态检测 $P_{min}$ ,实时进行排队延迟估算,进而利用排队延迟进行实时补偿。

## 4 OPNET 仿真模型搭建

### 4.1 站局级网络拓扑模型

由于链路中铁路局与众多的车站之间设备众多,因此根据铁路时间同步网三级主从拓扑结构在

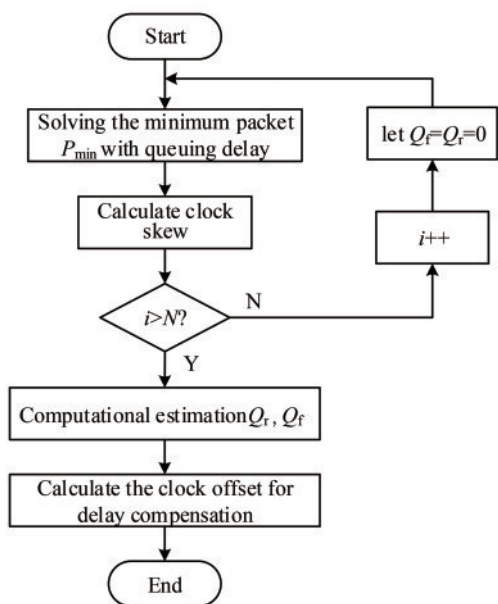


图 4 ERTCQD 补偿算法流程图

Fig. 4 Flow chart of ERTCQD compensation algorithm

OPNET 网络仿真平台设计一个四局十五站的网络模型。服务器配置 NTP 作为其对时协议, 对时接口带宽为 2 Mbit/s<sup>[5]</sup>, 用 100Base-T 连接各服务器与路由器, 在链路中发送基于 NTP 的 UDP (User Datagram Protocol) 对时数据包, 同步周期设置为 5 min。考虑实际同步过程中时钟速率的不一致, 模型中将二级时间节点与三级时间节点设置为不同的服务器。在同步过程中, 需要向所有上级节点发送对时数据包<sup>[23-24]</sup>, 以此计算时钟偏差和延迟确定过程相对客户机而言最为精确的时间源。为模拟该过程产生的数据流量, 将路由器以点对多点的形式连接。

图 5 为站局级网络拓扑模型。整个网络拓扑中, node\_1~node\_14 节点作为时间同步过程中的终端节点, 周期性地发送对时报文以与服务器节点进行交互操作, 最终满足本地时钟与时间服务器节点的时钟保持同步的需求。

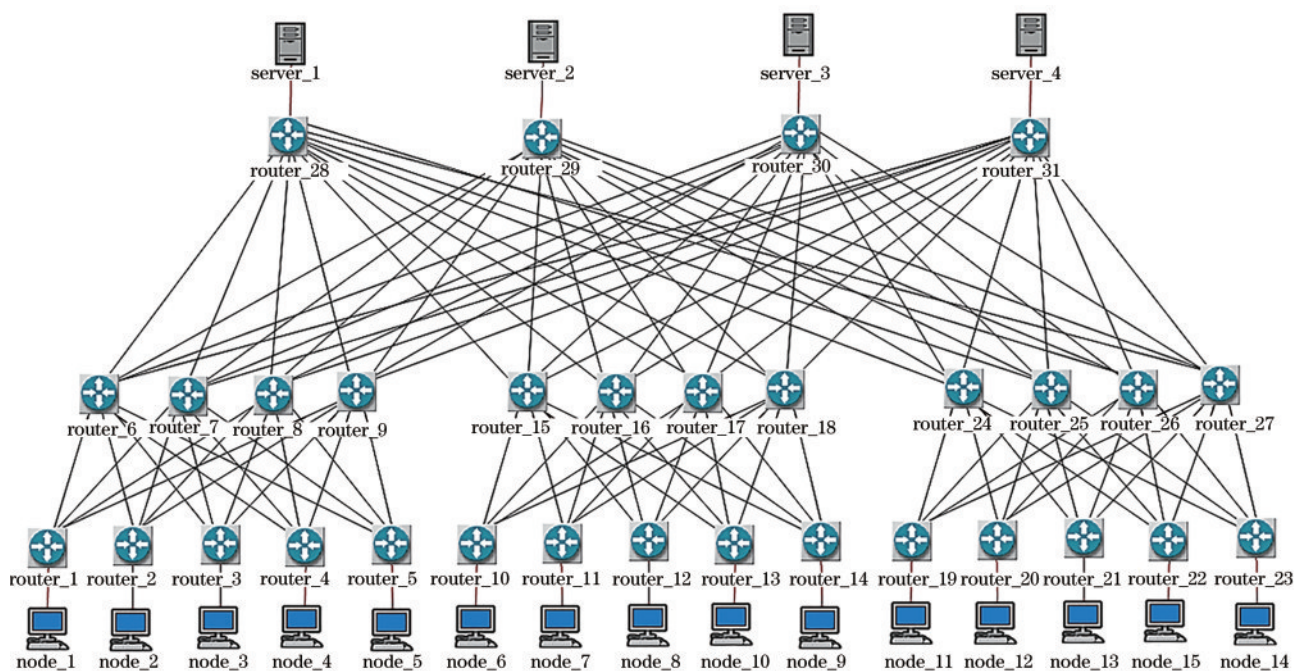


图 5 站局级网络拓扑模型

Fig. 5 Network topology model of station bureau level

#### 4.2 节点域模型

上述网络拓扑模型中的服务器节点和客户机所采用的节点模型如图 6 所示, 该节点包含了 OSI (Open System Interconnect) 通信协议的 5 层架构, 分别为网络层、接入层、物理层、应用层与传输层。

图 6 中, 由于 NTP 发送基于 UDP 协议的对时

数据包, 因此在 UDP 节点上的 customized\_app 节点中进行配置。模型中所设置的统计量如表 3 所示, 用于统计上述方案在模型中的表现。delay 和 ad. delay 分别统计的是补偿前、后单向延迟的值, ntp. offset 统计的是 NTP 自身对时产生的时钟偏差, 即  $\theta_r$ , ad. offset 统计补偿之后的时钟偏差即  $\theta$ , offset 是本文所设置的标准时钟偏差。

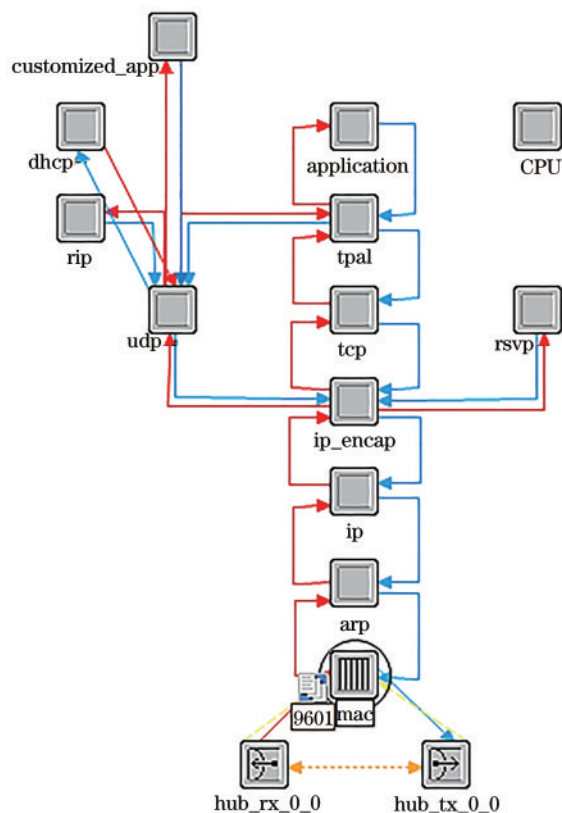


图 6 服务器、客户机节点模型

Fig. 6 Node model of servers and clients

表 3 模型中所设置的统计量的含义

Table 3 Meaning of statistics set in model

Statistic	Meaning
$Q_{ueuc.r}$	Queuing delay in downlink
$Q_{ueuc.f}$	Queuing delay in uplink
Delay	One way delay of link communication
ad. delay	One way delay after compensation
ad. offset	Clock offset after compensation
ntp. offset	Clock offset calculated in NTP
Offset	Standard clock offset

## 5 仿真结果分析

为分析 ERTCQD 算法在铁路时间同步网延迟不对称条件下的对时性能,利用上述节点模型中设置的统计量分别得到排队延迟、时钟偏差和单向延迟的曲线。在完成对该场景下排队延迟估计的基础上,对补偿效果与收发双向时延不对称性的改善情况进行分析。

### 5.1 排队延迟仿真分析

利用 ERTCQD 算法对网络拓扑模型进行仿真,仿真结果如图 7 所示,上行链路的排队延迟达到了 9.8 ms,而下行链路的排队延迟在 8 ms 左右波

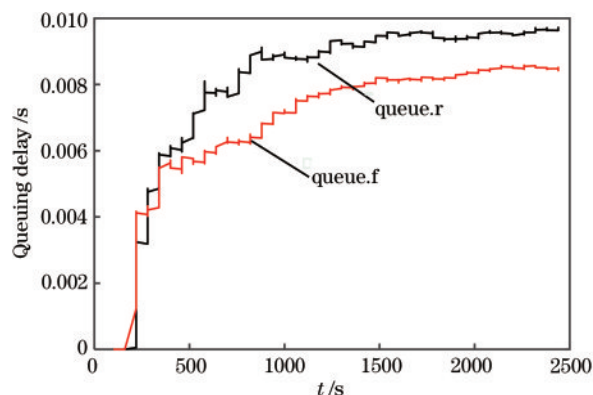


图 7 算法估计的排队延迟

Fig. 7 Queuing delay estimated by algorithm

动,上、下行链路的排队延迟最大相差 3.09 ms。

### 5.2 时钟偏差仿真分析

对于时间同步网来说,时钟偏差的准确估计可以使得客户机选取更精确的时间源,从而提升对时精度。图 8 所示为补偿前后的时钟偏差值。

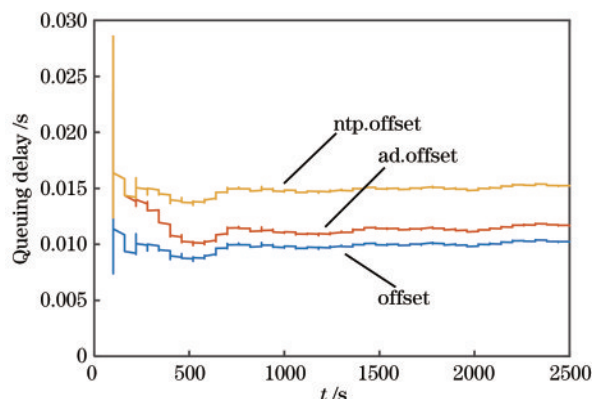


图 8 补偿前后的时钟偏差

Fig. 8 Clock offset before and after compensation

由图 8 可知,标准时钟偏差 offset 一直在 10 ms 左右浮动,且补偿前后的时钟偏差都能准确地反映曲线的变化。但是补偿后平均时钟偏差为 11.54 ms,补偿前的平均时钟偏差为 14.94 ms,补偿后的时钟偏差明显更接近标准值。

为描述仿真补偿前、后时钟偏差误差精度的改善情况,本文用偏差误差来评价补偿效果,偏差误差表示仿真的时间内,每秒估测时钟偏差  $O_e$  与真实时钟偏差  $O_r$  的偏离状况<sup>[9]</sup>,可表示为

$$\gamma = |O_e - O_r| \quad (16)$$

通过计算得到如表 4 所示的数据,  $\gamma_1$  与  $\gamma_2$  分别表示补偿后与补偿前的偏差误差。相对于补偿前,补偿后的偏差误差平均值降低了 73.2%,时钟偏差误差精度提升了 3.769 ms。时钟偏差的计算精度

表 4 偏差误差  
Table 4 Deviation error

Deviation error	Maximum / ms	Minimum / ms	Average / ms
$\gamma_1$	1.578	1.157	1.373
$\gamma_2$	5.495	4.972	5.142

获得了很大提高。

由于 NTP 对时方案是基于收发双向时延对称的假设条件下进行时间同步的,因此链路中时延的对称程度直接决定着对时精度的高低。此外,《铁路时间同步网技术条件》中也明确提到要尽可能避免收发双向时延的不对称性<sup>[4]</sup>,由此可见,收发双向时延的对称性对于时间同步网至关重要。由于从时钟记录了对时过程中的  $T_1 \sim T_4$  共 4 个时间戳,因此随机选取 node\_1 进行分析,然后得到如图 9 所示的补偿前、后的收发延迟。

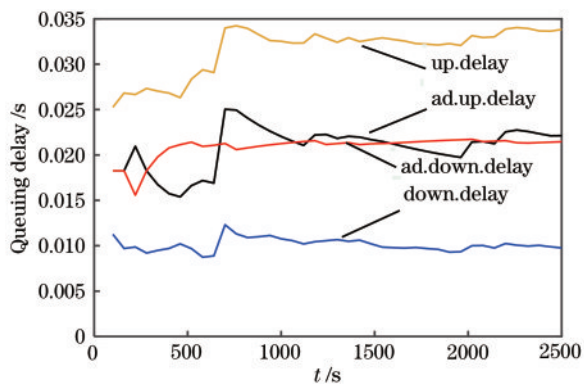


图 9 补偿前后的延迟

Fig. 9 Delay before and after compensation

补偿前上行链路的延迟平均值达到了 34.23 ms,下行链路的延迟则达到了 12.32 ms,补偿后的上行链路的延迟平均值达到 21.05 ms,下行链路的延迟则达到 20.31 ms。

为更直观地展示补偿前、后收发双向延迟对称性的变化,将收发双向延迟的差值绘制成如图 10 所示的图形。

明显看到,补偿后的差值曲线要更接近零值,且在零值所在的虚线上下波动。通过具体分析可发现,对比于补偿前的延迟来说,收发双向延迟平均相差 22.42 ms,最大相差 24.75 ms,极具不对称性。补偿后的延迟收发双向延迟平均相差 1.29 ms,最大相差 5.46 ms,相对于补偿前来说不对称性降低了 94.24%,收发双向时延的对称性获得了较大改善。

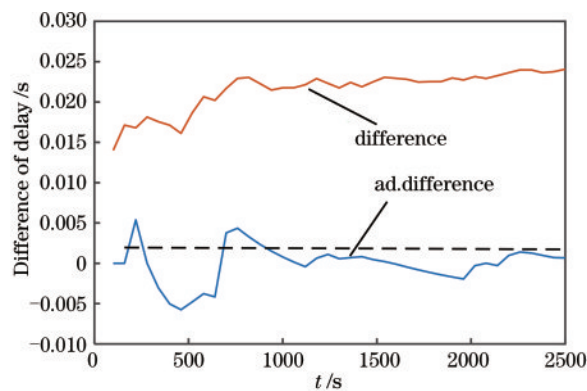


图 10 补偿前后延迟差值

Fig. 10 Delay difference before and after compensation

## 6 结 论

针对延迟不对称造成铁路时间同步网对时精度下降的问题,进行时延分析、算法改进和延迟补偿,提出基于 ERTCQD 的延迟不对称补偿算法,并通过仿真验证了该算法。基于理论与仿真结果,可以得出以下结论:

1) 改进算法考虑时钟频差参数难以准确获取的问题,依据时钟频差的时间规律对时钟频差计算改进。ERTCQD 算法对于排队延迟的计算误差更低,为 0.22 ms,这对于避免由排队延迟导致的延迟不一致有十分重要的意义。

2) 对铁路时间同步网链路进行时延分析后得出铁路时间同步网时钟模型,并依据该模型和改进算法进行排队延迟估计与补偿。经补偿,对时精度提升了 73.2%,本文方案对于时钟偏差的估计更准确,有效解决了排队延迟造成的时钟精度不足的问题。

3) 排队延迟主要造成收发双向延迟的不对称,而本文方案能够使不对称性降低 94.24%,从而满足了铁路时间同步网技术条件中对于避免收发双向时延不对称的要求。

综合理论与仿真中本文方案的表现,可知该方案能为铁路时间同步网在不对称条件下的延迟补偿提供技术参考。

## 参 考 文 献

[1] Qu B. Introduction of railway time synchronization network [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2010, 7(4): 43-45.  
曲博. 铁路时间同步网概述[J]. 铁路通信信号工程技术, 2010, 7(4): 43-45.

[2] Zhang Y P, Li X, Lan L, et al. Research on big-data-



- based anomaly detection system of railway time synchronization network[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(2): 306-313.
- 张友鹏, 李响, 兰丽, 等. 基于大数据的铁路时间同步网异常流量检测系统的研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(2): 306-313.
- [3] Zhan X F. Design of time synchronization system for railway administration[J]. *Railway Signalling & Communication Engineering*, 2017, 14(3): 29-31.
- 詹秀峰. 铁路局时间同步系统的设计[J]. *铁路通信信号工程技术*, 2017, 14(3): 29-31.
- [4] 国家铁路局. 中华人民共和国铁路运输行业标准: 铁路时间同步网技术条件 TB/T 3283—2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Railway & train standard of the people's republic of China: technical conditions for railway time synchronization network. TB/T 3283—2015[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.
- [5] 国家铁路局. 中华人民共和国铁路运输行业标准: 铁路通信设计规范 TB 10006—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Railway & train standard of the people's republic of China: code for design of railway communication. TB 10006—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [6] Riesch C, Marinescu C, Rudigier M, et al. Measurement of egress and ingress delays of PTP clocks[C]//2013 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS) Proceedings, September 22-27, 2013, Lemgo, Germany. New York: IEEE Press, 2013: 113-118.
- [7] Chen W, Gao X J, Li D D, et al. Improved method of PTP protocol based on grey prediction[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(8): 1842-1848.
- 陈晔, 高小杰, 李胆胆, 等. 基于灰预测的 PTP 协议改进方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(8): 1842-1848.
- [8] Chaloupka Z, Alsindi N, Aweya J, et al. Clock synchronization over communication paths with queue-induced delay asymmetries[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(9): 1551-1554.
- [9] Lv S, Lu Y M, Ji Y F, et al. An enhanced IEEE 1588 time synchronization for asymmetric communication link in packet transport network [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(8): 764-766.
- [10] Karthik A K, Blum R S. Robust clock skew and offset estimation for IEEE 1588 in the presence of unexpected deterministic path delay asymmetries [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(8): 5102-5119.
- [11] Chen L, Zhu T L, Liu F, et al. Packet delay estimation with minimum queue waiting in asymmetric network[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2014, 48(10): 1394-1399.
- 陈雷, 朱天林, 刘锋, 等. 基于时延不对称网络的最小排队转发时延估计[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(10): 1394-1399.
- [12] Karthik A K, Blum R S. Estimation theory-based robust phase offset determination in presence of possible path asymmetries [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(4): 1624-1635.
- [13] Liu M Y. Research and implementation of one way network oriented time delay measurement [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2018: 19-22.
- 刘梦严. 网络单向延时测量方法的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018: 19-22.
- [14] Liang Y F, Xu J N, Wu M, et al. Research progress on optical fiber time-frequency synchronization technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050004.
- 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. 光纤时频同步技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050004.
- [15] Gu W X, Yu S Z. Novel approach to measure and estimate one-way queuing delay without clock synchronization [J]. *Journal on Communications*, 2007, 28(9): 104-111, 118.
- 古炜旋, 余顺争. 非时钟同步的单向排队时延测量估计方法[J]. *通信学报*, 2007, 28(9): 104-111, 118.
- [16] Wu Z G, Liu M Y. One-way delay measurement method based on clock synchronization [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(S1): 108-112.
- 吴志刚, 刘梦严. 基于时钟同步的单向延时测量方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(S1): 108-112.
- [17] Li W W, Zhang D F, Zeng B, et al. Queuing analysis and simulation of the measurability of end-to-end minimum packet delay [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2007, 34(4): 73-77.

- 黎文伟, 张大方, 曾彬, 等. 端到端最小包时延可测性的排队分析与仿真[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2007, 34(4): 73-77.
- [18] Qian C, Xu X, Mei J, et al. Communication path queue-induced asymmetry algorithm for clock synchronization on IEEE 1588 [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3622-3626.
- 钱超, 徐迅, 梅军, 等. 应用 IEEE 1588 的配电网终端队列时延不对称通信路径的时钟同步补偿算法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3622-3626.
- [19] Wang H B, Lin Y, Jin Y H, et al. A new approach for removing clock skew and resets from one-way delay measurement [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(4): 584-589.
- 王洪波, 林宇, 金跃辉, 等. 一个消除单向时延测量中时钟频差和时钟重置的新方法[J]. 电子学报, 2005, 33(4): 584-589.
- [20] Li Y Z, Wang M G, Guo Y X, et al. Dual-polarization carrier phase recovery algorithm based on simplified extended Kalman filter [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106005.
- 李耀祖, 王目光, 郭玉箫, 等. 基于简化扩展卡尔曼滤波的双偏振载波相位恢复算法[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1106005.
- [21] Ma S X, Liu C T, Li H C, et al. Feature extraction based on linear embedding and tensor manifold for hyperspectral image [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0412001.
- 马世欣, 刘春桐, 李洪才, 等. 基于线性嵌入和张量流形的高光谱特征提取[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0412001.
- [22] Freris N M, Graham S R, Kumar P R, et al. Fundamental limits on synchronizing clocks over networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(6): 1352-1364.
- [23] Chen M. Research and implementation of network time synchronization system base on network time protocol [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 13-22.
- 陈敏. 基于NTP协议的网络时间同步系统的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 13-22.
- [24] Mills D L. Internet time synchronization: the network time protocol [J]. IEEE Transactions on Communications, 1991, 39(10): 1482-1493.