



基于量子通信的电力业务调度算法

于卓智, 张叶峰, 韩冰洋, 陈文伟, 王栋
(北京中电飞华通信股份有限公司, 北京 100070)

摘要: 量子通信能够有效提高电力业务传输的可靠性与安全性, 但由于量子密钥成码率低, 难以满足重要电力业务的加密需求, 因此, 需要一种队列调度算法对量子通信中的待加密电力业务进行合理调度。提出了一种改进的加权公平队列 (weighted fair queuing, WFQ) 算法 LD-WFQ, 算法通过估计待加密数据分组的预计耗时, 优先处理即将超时的待加密数据分组, 在保持高优先级业务量子加密时延迟标率的基础上, 有效降低了低优先级业务的量子加密超时率。与 WFQ 算法进行仿真对比, 结果证明了 LD-WFQ 算法的优越性。

关键词: 电力系统量子通信; 量子密钥分发; 队列调度; WFQ 算法; 超时比率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019279

Power services scheduling algorithm based on quantum communication

YU Zhuozhi, ZHANG Yefeng, HAN Bingyang, CHEN Wenwei, WANG Dong
Beijing Fibrlink Communications Co., Ltd., Beijing 100070, China

Abstract: Quantum communication could effectively improve the transmission's reliability and security of power system services. However, limited by the generating rate of quantum key, it was difficult to meet the encryption requirements of important services. Therefore, a queue scheduling algorithm was required to legitimately schedule the power system services which need to be encrypted in quantum communication. An improved weighted fair queuing (weighted fair queuing, WFQ) algorithm LD-WFQ was proposed. By estimating the expected delay of the data packets to be encrypted, sending the packets that would soon be timeout, the proposed algorithm effectively reduced the timeout ratio of the packets and improved the effective utilization of quantum keys, while maintaining the timeout ratio of the packets in high priority queue at a low level. Compared with the WFQ algorithm, the simulation result proves the superiority of LD-WFQ algorithm.

Key words: quantum communication in power system, quantum key distribution, queue scheduling, WFQ, timeout ratio

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-11-10

通信作者: 王栋, hanbingyang@sgitg.sgcc.com.cn

基金项目: 北京市科技重大专项 (No.Z171100001217002)

Foundation Item: Beijing Science and Technology Major Project (No.Z171100001217002)

1 引言

随着对量子加密技术的研究、推广和应用,越来越多对安全性和保密性有较高要求的行业开始重视量子加密技术^[1]。电力通信系统是电力系统运营的重要支撑系统,是电网运营智能化、电网管理信息化和电力调度自动化的重要基础^[2]。随着电网的不断发展壮大,承担了电网控制、运维信息的电力通信系统也在不断复杂化,电力通信系统的安全与电网安全密切相关,特别是以特高压电网为核心、各级电网协调发展的坚强智能电网建设,对通信系统传输的安全性和可靠性提出了更高要求^[3]。

为提高电力通信系统的安全性和保密性,将量子加密应用于其中有着重要的意义。目前,基于量子加密的电力通信加密体系正受到广泛的关注^[4-6],但目前仍难以实现容量大、速率高的保密通信。因此,如何高效地利用量子通信技术成为研究热点之一,其中,量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)是发展得最为良好、有望最早达成商用化的技术^[7]。QKD技术将数字信息通过单光子进行传输,生成更具安全性和可靠性的密钥,由于单光子不可再分原理、海森堡不确定关系、测量塌缩原理和量子不可克隆定理等量子物理学基本原理,量子密钥具有理论上的绝对安全性^[8]。但量子密钥的成码率较低,这限制了采用量子通信技术传输密钥的容量,难以对电力系统业务实现全面加密传输,需要在电力业务中选择业务重要度较高的部分业务进行量子加密,以保证其安全传输。

由于量子密钥成码率有限,在按照传统单队列先入先出的顺序进行加密时,业务的时延要求往往难以得到保证,而电力通信网中的电力业务大多对时延要求敏感。因此,有必要研究一种基于Diffserv的调度算法对待加密电力业务进行调度,为不同时延要求的业务提供有区分的服务:在满足业务时延要求的前提下,通过调整调度顺

序,均衡各业务的时延,降低其加密超时比率,尽可能满足重要电力业务的加密需求;在量子密钥成码率受限的情况下,实现对量子密钥更高效的利用,并在一定程度上缓解目前量子密钥成码率低的问题。

传统的队列调度算法中,严格优先级(strict priority, SP)算法在高优先级队列不为空的情况下,优先调度优先级高的队列,虽然能很好地保证高优先级业务的时延要求,但可能出现低优先级业务得不到调度的“饥饿”现象^[9],造成低优先级队列中的大量数据分组超时;轮询调度(round robin, RR)算法和加权轮询调度(weighted round robin, WRR)算法虽然能让所有队列都得到调度,但数据分组长度的不同会导致带宽分配不均衡的情况,较大的数据分组实际上将占用更多的带宽^[10];加权公平队列算法解决了数据分组大小不同导致的不均衡问题^[11],却无法对时延进行直接控制。

参考文献[12]基于模糊理论提出了一种利用模糊逻辑对WFQ算法的权值进行动态调整的改进算法,算法根据时延和吞吐量调整权值,从而提高公平性和QoS;参考文献[13]降低了WFQ算法的复杂度,并根据队列缓存区长度动态调整队列的权值,实现了对各队列时延的均衡;参考文献[14]在低时延队列(low latency queueing, LLQ)算法的基础上添加一个SP队列,使得算法能优先满足两类高优先级业务的需求,提高了高优先级业务的QoS,却进一步增加了低优先级队列发生“饥饿”现象的可能性。现有算法无法对时延进行直接控制优化,难以保证各队列的QoS,而与SP算法结合的复合算法虽然能保证高优先级队列的QoS,却不能避免低优先级队列的“饥饿”现象。

针对这一问题,本文对WFQ算法进行改进,提出了一种应用于电力系统量子加密业务的时延优化队列调度(low delay-weighted fair queueing, LD-WFQ)算法,在尽可能满足各队列时延要求



的前提下,调整调度顺序,均衡各队列的时延,提高时延达标率。

2 队列调度模型

电力通信系统中有多种业务需要进行量子加密,但由于量子密钥成码率低,无法满足大量业务的加密需求,因此,需要把业务按照其重要度进行排序^[15],选择其中重要度高的部分业务进行量子加密,保证其高安全性。

部分电力业务传输要求及所属安全区见表1。

表1 电力业务特性

电力业务	时延要求	误码率要求	安全区
广域代理服务	100 ms	10^{-6}	I
广域测量	30 ms	10^{-9}	I
调度电话	150 ms	10^{-3}	I
调度自动化	100 ms	10^{-6}	I
安稳系统	30 ms	10^{-7}	I
保护信息管理	15 min	10^{-5}	II
电能计量遥测	秒级	10^{-6}	II

鉴于电力通信网中的业务路由是由人工配置的,不会发生动态变化,因此,根据路由跳数和业务端到端时延要求可计算出各业务在某节点的转发时延要求。队列调度系统由多个队列组成,其中每个队列都是先入先出(first in first out, FIFO)型队列,并且各队列有不同的调度优先级(权值),调度器按照队列调度算法对队列进行调度,决定当前应执行出队操作的队列。根据不同业务在某节点的转发时延要求为其分配队列,转发时延要求相同的业务在排队时进入同一个队列。

量子密钥的生成速率 r_q 和数据分组加密所需量子密钥长度 L' 决定了单位时间内能加密的数据分组的个数,而数据分组加密完成后经由经典信道发送的速率 r_c 和数据分组本身的大小 L 则决定了单位时间内能发送的数据分组个数。由此建立量子通信队列调度系统,具体如图1所示。

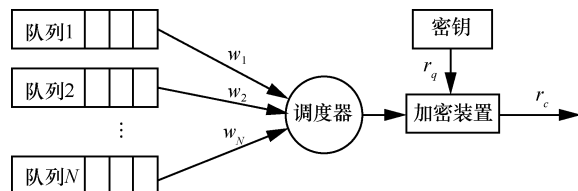


图1 量子通信队列调度系统模型

其中, N 为队列个数,各队列权值为 $w_i(i=1,2,\dots,N)$ 。当待加密数据分组经过排队并最终被选择出队时,认为调度器在此时响应了该数据分组的加密请求,之后生成的指定长度的量子密钥将用于对该数据分组进行加密。为确保量子密钥的安全性,不对密钥进行存储,进行加密时所需要的密钥是即时生成的。

不同于传统通信网中的业务,电力业务对时延更敏感,传统通信网中业务时延较大往往只会降低用户体验,而电力通信网中关键业务的超时将导致失效,并可能带来一定的安全隐患,因此本文以时延作为参数计算各队列权值,使时延要求较高的业务得到更多的调度机会。由于不同电力业务的时延要求相差较大,采用线性函数计算权值将使得权值相差过大,导致时延要求较低的业务几乎得不到调度机会,业务之间的公平性得不到保证,故本文按式(1)计算队列权值:

$$w_i = \frac{1/\lg T_i}{\sum_{j=1}^N 1/\lg T_j}, i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

其中, $T_i(i=1,2,\dots,N)$ 为各队列对应业务的转发时延要求,权值越大则表示该队列在调度系统中的优先级越高。

3 队列调度算法

3.1 WFQ 算法

WFQ 算法旨在趋近通用处理器共享(generalized processor sharing, GPS)理论模型^[16]。在理想情况下,希望调度系统的带宽公平地分配给每个非空队列,因此,GPS 模型假设了调度器能为多个队列同时进行服务,且各队列中数据分

组可以被无限细分, 此时任意时间段内发送的数据量能够严格按照比例(权重)分配给每个队列。但 GPS 模型在实际情况中是无法实现的, 因此, 便有了分组环境中的 GPS 近似算法, 其中的 WFQ 算法得到了广泛应用。

WFQ 算法定义了虚拟时标, 每当一个事件发生时, 更新虚拟时标 $V(t)$:

$$V(t_{j-1} + \tau) = V(t_{j-1}) + \frac{r\tau}{\sum_B w_i} \quad (2)$$

其中, 数据分组的到达和离开统称为事件, t_j 表示第 j 个事件发生的时间; τ 表示事件 t_j 与 t_{j-1} 发生的时间间隔; w_i 为队列 i 的权值, r 为服务速率(带宽); B 为非空队列集合; 虚拟时标的初值 $V(0)$ 为 0。

每个数据分组到达队列时, 将被赋予一个虚拟到达时间 s_i^k 和一个虚拟离开时间 F_i^k :

$$s_i^k = \max\{F_i^{k-1}, V(\alpha_i^k)\} \quad (3)$$

$$F_i^k = s_i^k + \frac{L_i}{w_i} \quad (4)$$

其中, i 表示数据分组所属队列, k 表示数据分组在该队列中的编号; α_i^k 表示队列 i 第 k 个数据分组到达的实际时间; L_i 为各队列数据分组的长度; F_i^{k-1} 为上一个数据分组的虚拟离开时间, 其初值 F_i^0 为 0。

WFQ 算法每次调度时均选择虚拟离开时间最小的数据分组进行调度。由于 WFQ 算法考虑了数据分组的长度, 数据分组的长度越长则调度机会越少。因此, 相比于加权轮询算法更能公平地分配带宽, 进而更好地均衡各队列的时延, 但 WFQ 算法仍无法直接对时延进行控制和优化, 无法保障高优先级队列的时延。

3.2 LD-WFQ 算法

本文将 WFQ 算法的基本思想应用于电力系统量子通信队列模型中, 针对 WFQ 算法无法对时延进行直接控制优化来保障高优先级队列的时

延, 而与 SP 算法相结合的复合算法又无法避免低优先级队列“饥饿”现象的不足, 提出了 LD-WFQ 算法, 该算法通过估计待加密数据分组在加密系统中的预计耗时并与其转发时延要求进行比较, 优先调度即将达到转发时延要求的待加密数据分组, 通过调整调度顺序, 均衡各队列的时延, 提高业务的时延达标率。

为了方便预计耗时的计算, 数据分组进入队列时不再计算其虚拟到达时间和虚拟离开时间, 只添加一个时间标签记录其到达队列的时间 α_i^k , 虚拟到达时间和虚拟离开时间的计算在该数据分组到达队头时进行。此时由调度器计算并储存队列中各队列队头数据分组的虚拟到达时间和虚拟离开时间, 记为 S_i 和 F_i :

$$S_i = \max\{F_i^-, V(\alpha_i^k)\} \quad (5)$$

$$F_i = S_i + \frac{L_i}{w_i} \quad (6)$$

其中, F_i^- 表示队列 i 上一个数据分组的虚拟离开时间, 其初值为 0。

待加密数据分组在队列调度系统中的转发时延由数据分组在队列调度系统中的时延 t_Q 和加密后发送数据分组的时延 t_D 两部分构成, t_Q 则可进一步分为待加密数据分组从进入系统至到达所属队列队头的时延 t_q 、从到达队头到被选择出队的时延 t_s 和生成加密所需量子密钥的时延 t_g 3 个部分。其中, t_D 为数据分组大小 L 与经典信道发送速率 r_c 的比值, t_q 可由待加密数据分组到达队头的时刻减去其进入队列调度系统的时刻得到, t_g 则为加密所需密钥量 L' 和量子密钥生成速率 r_q 的比值, 而 t_s 等同于队列中数据分组的出队间隔, 会随着非空队列集合 B 改变, 因此, 欲估计待加密数据分组的转发时延, 只需对 t_s 进行估计。

设两个相邻事件 t_m 和 t_{m+1} , 当 $t \in (t_m, t_{m+1})$ 时, 非空队列集合 B 不变, 此时队列 i 所占的加密带宽 r_i 为:



$$r_i = \frac{w_i r_q}{\sum_{i \in B} w_i} \quad (7)$$

时间间隔 $\tau (\tau = t_{m+1} - t_m)$ 内该队列的输出密钥比特数 D_i 为:

$$D_i = r_i \tau = \frac{w_i r_q \tau}{\sum_{i \in B} w_i} \quad (8)$$

输出密钥个数 N_i 为:

$$N_i = \frac{D_i}{L'} = \frac{w_i r_q \tau}{L' \sum_{i \in B} w_i} \quad (9)$$

由此得出, 对于非空队列集合 B , 队列 i 的出队间隔 Δt_i 为:

$$\Delta t = \frac{\tau}{N_i} = \frac{L' \sum_{i \in B} w_i}{w_i r_q} \quad (10)$$

其中, Δt 可看作是基干当前非空队列集合 B 对 t_z 的估计值。

每完成一次加密传输, 若有新到达队头的数据分组则计算其预计耗时 $t_e(i)$:

$$\begin{aligned} t_e(i) &= t_Q(p_i^{H_i}) + t_D(p_i^{H_i}) = \\ &= t_q(p_i^{H_i}) + t_s(p_i^{H_i}) + t_g(p_i^{H_i}) + t_D(p_i^{H_i}) = \\ &= t - a_i^{H_i} + \frac{L' \sum_{i \in B} w_i}{w_i r_q} + \frac{L'}{r_q} + \frac{L_i^{H_i}}{r_c} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, H_i 为队列 i 的队头数据分组的编号, $p_i^{H_i}$ 为队列 i 的队头数据分组。

比较各队列队头数据分组的预计耗时 $t_e(i)$ 和相应业务的单跳时延要求 T_i , 如果预计耗时大于时延要求, 则说明该数据分组即将超时, 此时需要对即将超时的数据分组进行优先发送。在多个队列的队头数据分组的时延都将超过转达时延要求的情况下, 则选择优先级最高的队列为其提供优先调度。

优先调度虽然能有效避免数据分组超时, 但也打乱了原有的调度顺序, 这将导致该数据分组

所属队列的虚拟离开时间增大, 可能超出其余队列的平均水平, 使得该队列在一定时间内得不到调度, 因此, 为了使各队列在优先调度之后仍能公平地接受调度, 需要对优先调度的队列的虚拟离开时间进行修正:

$$F_i = F_i^0 - \frac{L_i}{w_i} \quad (12)$$

其中, F_i^0 为修正前的 F_i 的值。

若各队列的预计耗时均小于其转发时延的要求, 则与 WFQ 算法相同, 选择虚拟离开时间最小且优先级高的队列进行调度。

LD-WFQ 算法对队列调度系统中各队列队头数据分组的转发时延进行估计, 对即将超出转发时延且优先级高的待加密数据分组进行优先调度, 通过调整待加密数据分组的发送顺序, 均衡各队列的时延来优先满足即将超时的数据分组的转发时延要求, 有效降低了超时数据分组比率, 从而更加高效地进行量子加密。

4 仿真分析

本文基于 Matlab 2014a 仿真平台, 选取 4 个队列进行仿真分析, 设各队列的转发时延要求分别为 $T_1=100$ ms、 $T_2=20$ ms、 $T_3=300$ ms、 $T_4=40$ ms; 待加密数据分组加密所需密钥长度为 $L'=128$ bit; 量子密钥生成速率 $R=1$ Mbit/s^[17], 各队列中待加密数据分组的到达符合泊松分布且到达率相同, 4 个队列密钥请求速率之和为 1 Mbit/s。由于一般情况下, 数据分组通过传统信道发送所造成的时延远小于其转发时延要求, 因此, 仿真中忽略这部分时延。

由式 (1) 得出各队列权值 $w_1=0.3258$ 、 $w_2=0.2504$ 、 $w_3=0.2205$ 、 $w_4=0.2033$; 仿真过程中各队列均有 3 000 个待加密数据分组到达, 由于队列调度系统的复杂性, 待加密数据分组转发时延的随机性较强, 因此, 取 30 次仿真结果的平均值并与 WFQ 算法以及参考文献[13]所提算法进行比较, 如图 2 所示。

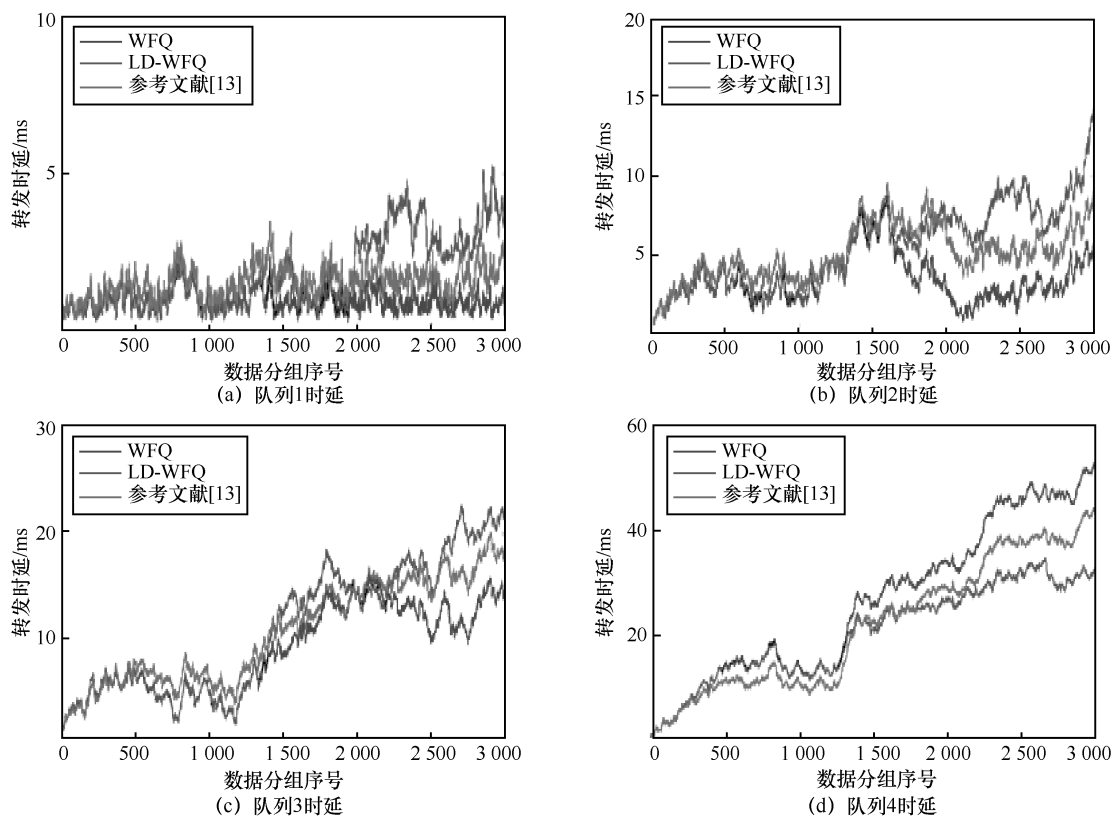


图2 WFQ和LD-WFQ算法下各队列加密时延

由图2可以看出,在使用WFQ算法进行调度时,由于高优先级队列的权值更高,其得到调度的机会更多,队列中待加密数据分组的出队间隔更小,因此转发时延普遍较低;但优先级较低的队列4由于其权值较小,待加密数据分组的出队间隔较大,数据分组进入队列后往往得不到及时处理而造成拥塞,且随着时间推移,拥塞情况不断加重,并最终导致待加密数据分组的转发时延超过其转发时延要求。而参考文献[13]所提算法在队列长度较大时适当增加该队列的权值,能够在队列4出现拥塞时增加其得到调度的机会,有效降低其时延,但也会使得前3个队列的时延略微增加,采用该算法进行调度时各队列的时延更加均衡,但仍无法有效避免低优先级队列的平均时延超过阈值。

由于高优先级队列的转发时延普遍低于其转发时延要求,这为通过调整调度顺序来减少低优

先级队列待加密数据分组的超时率提供了可能性。采用本文算法进行调度后,当调度器检测到某队列中待加密数据分组的转发时延即将超出其时延要求时,则调整调度顺序,优先为即将超时的数据分组提供加密服务,从而避免超时。优先调度将不可避免地引起其他队列中待加密数据分组的转发时延增加,从图2中可以看出,为了减少队列4中超时数据分组的个数,前3个队列中待加密数据分组的转发时延均略高于其他两种算法,但这也使得队列4中平均时延低于阈值,能够有效缓解待加密数据分组超时的情况。

当多个队列中的待加密数据分组均即将超时的时,算法将优先调度优先级较高的队列,因此不会出现为了降低低优先级队列数据分组超时比率而牺牲了高优先级队列数据分组超时比率的情况。本文算法在不造成更高优先级队列中数据分组超时比率上升的前提下,以转发时延为代价降低超时比率,



能够实现对量子密钥更高效的利用,这是值得的。

为探究不同数据分组到达率下算法对超时率的优化能力,通过不断改变数据分组到达率对算法进行仿真分析,同时为了减小因队列调度系统的高随机性造成的误差,取 30 次结果的平均值,如图 3 所示。为了更直观地呈现算法效果、反映密钥请求速率与量子密钥生成速率之间的关系,图 3 中横坐标为密钥请求速率,其值为 4 个队列按一定到达率到达时单位时间内产生的密钥请求总量。

图 3 (a) ~ (d) 依次为队列 2、队列 3、队列 4 和队列调度系统总超时数据分组比率,由于队列 1 中超时数据分组极少,故不在图 3 中列出。其中,队列 2 由于得到调度放入机会较多,只有少量数据分组超时,故其 30 次仿真的平均结果仍具有较强随机性,其余队列的超时数据分组比率曲线则更平缓。参考文献[13]所提算法虽然能较好地均衡各队列的时延,但由于未能对转发时延进

行直接地限制和有针对性地优化,虽然能通过均衡时延来降低超时数据分组比率,但优化效果并不突出,并且在密钥请求速率较大时算法性能较差。

采用本文算法进行调度后,当密钥请求速率小于量子密钥生成速率时,超时数据分组较少,本文算法能够有效降低超时比率,将超时比率维持在较低水平;而当密钥请求速率大于量子密钥生成速率时,队列调度系统大概率处于拥塞状态,其中,队列 3 和队列 4 拥塞严重,本文算法能够在调整调度顺序以尽可能满足队列 3 和队列 4 中数据分组转发时延要求的同时,不会对高优先级队列的超时比率造成任何明显的负面影响,并在此基础上有效降低了超时数据分组比率。仿真结果表明,本文算法虽然对各队列中待加密数据分组的时延的均衡效果一般,但能够有效降低待加密数据分组的超时比率,并且在不同密钥请求速率下均能取得较好的优化效果,由于电力通信网中

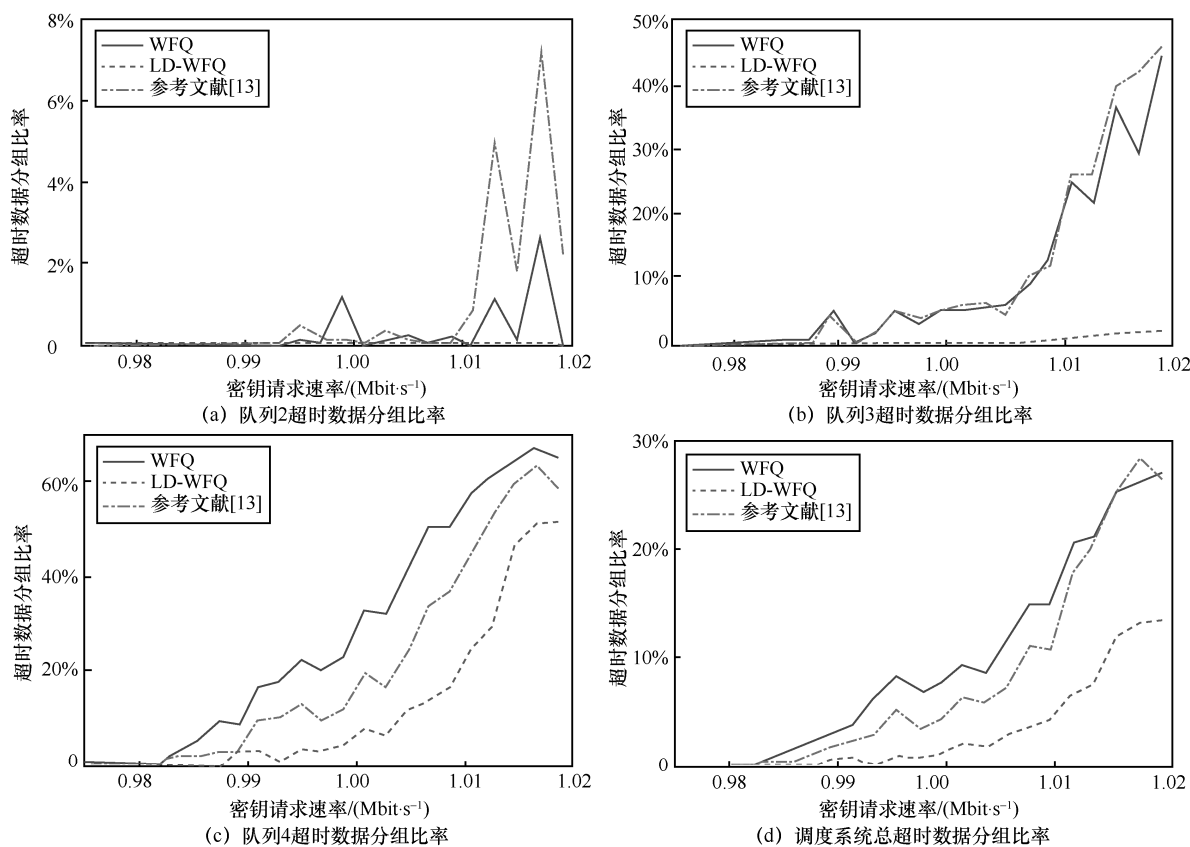


图 3 超时数据分组数统计

的电力业务更加注重加密的有效性而非时延,本文算法在时延允许范围内可控地增加时延以换取更高的时延达标率,能够更好地满足电力业务的加密需求,提高量子密钥的有效利用率,更加具有实际意义。

5 结束语

量子加密技术应用于电力通信系统时,由于受量子密钥成码率较低的限制,只能满足部分重要电力业务的需要,因此,需要运用调度算法进行量子加密带宽的分配。本文提出了一种电力系统量子通信密钥分配的队列调度模型,并将WFQ算法的基本思想应用于该模型中,提出了一种电力系统量子加密业务时延优化的队列调度算法即LD-WFQ算法,通过估计待加密数据分组的预计耗时,优先调度即将超时的待加密数据分组,降低待加密数据分组的超时率,并且不会造成高优先级队列待加密数据分组超时比率的明显恶化。在成码率一定的情况下,LD-WFQ算法可以更好地满足待加密业务的时延需求,能为更多待加密数据分组进行有效加密,提高了量子密钥的有效利用率,这也在一定程度上缓解了量子密钥成码率低的问题。仿真结果表明,LD-WFQ算法在保持高优先级业务时延达标率的基础上,有效降低了低优先级业务的量子加密超时率,提高了加密效率,能够更好地满足电力业务的加密需求,具有更加优越的性能。

参考文献:

- [1] 李俊杰. 通信迈入量子安全时代[N]. 人民邮电, 2016-09-13(5).
LI J J. Communication enters the era of quantum security[N]. The People's Posts and Telecommunications, 2016-09-13(5).
- [2] 苗新, 陈希. 电力通信网的安全体系架构[J]. 电力系统通信, 2012, 33(1): 34-38.
MIAO X, CHEN X. Security architecture of electric power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(1): 34-38.
- [3] 张翼英, 张素香. 量子通信及其在电力通信的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2016(9): 7-11.
ZHANG Y Y, ZHANG S X. Quantum communication and its application in power communication[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016(9): 7-11.
- [4] 苗新, 张亮, 马平, 等. 量子密钥分发的变电站间测控信号一次一密光纤传输方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 212-217.
MIAO X, ZHANG L, MA P, et al. Optical fiber transmission solution of measurement and control signal between substations based on quantum keydistributionandone-timepad[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 212-217.
- [5] 王智东, 王钢, 童晋方, 等. 智能变电站的密钥管理方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 121-127.
WANG Z D, WANG G, TONG J F, et al. Key management method for intelligent substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 121-127.
- [6] ZHANG R, CHEN X. Prospects of fiber quantum key distribution technology for power systems[C]//International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, June 10-13, 2013, Stockholm, Sweden. London: IET, 2013: 1-4.
- [7] 赖俊森, 吴冰冰, 汤瑞, 等. 量子通信应用现状及发展分析[J]. 电信科学, 2016, 32(3): 123-129.
LAI J S, WU B B, TANG R, et al. Analysis on the application and development of quantum communication[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(3): 123-129.
- [8] HONGWEI L I, WEI C, HUANG J Z, et al. Security of quantum key distribution[J]. Scientia Sinica, 2012, 6(1): 1-127.
- [9] ISLAM M Z, ISLAM M S, HAQUE A K M F, et al. A comparative analysis of different real time applications over various queuing techniques[C]//International Conference on Informatics, Electronics & Vision, May 18-19, 2012, Dhaka, Bangladesh. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1118-1123.
- [10] BALOGH T, MEDVECKY M. Performance evaluation of WFQ, WF2Q+ and WRR queue scheduling algorithms[C]//International Conference on Telecommunications and Signal Processing, August 18-20, 2011, Budapest, Hungary. Piscataway: IEEE Press, 2011: 136-140.
- [11] MUSTAFA M E G, TALAB S A. The effect of queuing mechanisms first in first out (FIFO), priority queuing (PQ) and weighted fair queuing (WFQ) on network's routers and applications[J]. Wireless Sensor Network, 2016, 8(5): 77-84.
- [12] AKASHDEEP. Intelligently modified WFQ algorithm for IEEE 802.16 resource allocations[C]//First International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems[M]. Berlin: Springer, 2016: 115-124.
- [13] PATEL Z, DALAL U. Implementation and evaluation of dynamically weighted low complexity fair queuing(DWLC-FQ) algorithm for packet scheduling in WiMAX networks[J]. China Communications, 2016, 13(5): 128-140.
- [14] RUKMANI P, GANESAN R. Enhanced low latency queuing algorithm for real time applications in wireless networks[J]. International Journal of Technology, 2016, 7(4): 663.
- [15] 樊冰, 唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1191-1197.
FAN B, TANG R L. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1191-1197.
- [16] SARAVANASELVI P, LATHA P, SARAVANASELVI P, et al. Weighted fair queue scheduling algorithm for IEEE802.16 wireless networks[C]//International Conference on Recent



Trends in Computational Methods, Communication and Controls, April 19-21, 2012, Chennai, India. Cambridge: Cambridge University Press, 2016: 479-493.

- [17] 孙咏梅, 程先柱, 纪越峰. 用于可信任中继量子密钥分配网络的差异化服务提供机制[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 74-78.

SUN Y M, CHENG X Z, JI Y F. A differentialized service providing scheme on trusted relay quantum key distribution networks[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 74-78.

[作者信息]



于卓智(1966-), 女, 北京中电飞华通信股份有限公司高级工程师、副总经理, 主要研究方向为信息通信。



张叶峰(1986-), 男, 北京中电飞华通信股份有限公司工程师, 主要研究方向为信息通信。



韩冰洋(1991-), 女, 北京中电飞华通信股份有限公司助理工程师, 主要研究方向为信息通信。



陈文伟(1991-), 女, 北京中电飞华通信股份有限公司助理工程师, 主要研究方向为信息通信。



王栋(1995-), 男, 北京中电飞华通信股份有限公司助理工程师, 主要研究方向为量子通信。