

数据链通信实时数据传输 QoS 控制研究

董长城 吴 炜 李峻林 赵 恒
(武汉数字工程研究所 武汉 430074)

摘要 目前基于数据链通信的服务器节点大多采用 FCFS 的服务模型进行实时数据传输,并没有根据实时数据的时效性及优先级提供良好的 QoS 控制。提出一种基于数据链通信的实时数据传输 QoS 控制算法,其通过应用层对实时数据进行 QoS 分级并采用一种最早截止时间优先的优先级可控制算法(PC-EDF)进行调度,以保障在数据链通信带宽受限的条件下实时数据端到端传输的低时延以及可靠性。实验结果也验证了该方法的有效性。

关键词 数据链, QoS 控制, 实时

中图分类号 TP311 **文献标识码** A

Research on the QoS Control of the Real-time Data Transmission Based on the Tactical Data Link

DONG Chang-cheng WU Wei LI Jun-lin ZHAO Heng
(Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract In the Tactical Data Link the real-time data are translated based of the FCFS module, which is not considering about the priority and QoS control of the real-time data. QoS control of the real-time data translating based on the Tactical Data Link method was proposed. A QoS classification of the real-time data and the priority controlled earliest deadline first algorithm were provided in the application layer, which could guarantee the network end to end delay and reliability in the restricted bandwidth condition. Experimental results show that it's efficient.

Keywords Tactical data link, QoS control, Real time

1 引言

战术数据链(Tactical Data Link)是一种以无线信道为主,以格式化信息的传输、处理为主要目的,在指挥控制系统、传感器、武器平台之间完成特定战役、战术协同所需的信息系统,在传输数据时具有实时性、可靠性、安全性和有效性等特点。美军参联会对战术数据链的定义^[1]为:“通过单网或多网结构和通信介质,将两个或两个以上的指控系统和/或武器系统链接在一起,是一种适合于传送标准化数字信息的通信链路,简称 TADIL”,北约将其称为 Link。数据链可在带宽有限的条件下,高效、实时地传输格式化的有用信息,以满足不同作战单元实时交换信息的要求。

目前基于数据链通信的战术信息网节点服务器应用层对于实时数据传输采用先入先出队列配合尾部丢弃的队列控制机制,并没有根据实时数据的特性进行良好的 QoS 控制,无法为实时数据提供时延保障,存在导致战术任务信息不能实时和可靠传输的可能,使战术节点服务器成为实现数据链通信的端到端 QoS 控制的瓶颈。

近年来将 QoS 控制用于 Web 服务器应用层已经取得了一些研究成果,美国威斯康星-麦迪孙大学(University of Wisconsin-Madison)的 Alemeida 等人实现了在用户级和内核级分别通过基于优先级的请求调度来提供区分的 Web

QoS^[2]。美国南加州大学(University of Southern California)的 Eggert 和 Heidemann 提出了 3 种简单的、服务器端的、仅是应用层的机制来提供两类不同级别的 Web 服务^[3],Web 服务器可以获得明显的性能改进。可见服务器应用层的 QoS 控制是有效的,而 QoS 控制在基于数据链通信的战术信息网服务器应用层的研究较少。

本文结合排队模型提出了一种实时数据 QoS 分级算法和一种基于时延的最早截止时间优先的优先级可控制调度算法 PC-EDF(priority controlled- earliest deadline first)。基于以上算法设计了数据链通信的传输模型,在服务器的应用层提供端到端的 QoS 控制,从而保障了在数据链通信带宽受限条件下实时数据端到端传输的低时延以及可靠性。

2 数据链通信的排队模型

现阶段数据链种类比较繁多,按照各种数据链的应用范围、通用程度、在作战体系中的作用,按空间层次可以划分为卫星广域数据链、战区通用数据链和军兵种专用数据链;按功能类型可以划分为信息发布数据链、指挥控制数据链和武器协同数据链^[1]。为了减少实时数据的排队时延,同时提高数据链的利用率,对于不同特性的数据链应当使用合适的排队模型,以节点服务器对数据链的使用情况可将数据链分为 DL (Default Link, 默认类数据链)和 SL(Selection Link, 选择类数

董长城(1987-),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究方向为软件架构与系统集成、指控系统, E-mail: thegratewall@yahoo. cn; 吴 炜 男, 博士, CCF 会员, 主要研究方向为分布式计算、软件构件与复用; 李峻林 男, 研究员, 主要研究方向为软件工程、指控系统; 赵 恒 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为软件工程、分布式计算。

据链)两类。DL 用于频繁通信,带宽较高,传输距离较近,传输时延小,节点服务器默认使用 DL 通信;SL 使用频率较低,带宽较低,传输距离远,传输时延较大,当指定使用 SL 时节点服务器采用其通信。下面给出这两类数据链通信使用的排队模型。

DL 中同一个用户与服务器一般建立多条数据链,DL 采用多服务窗等待制优先级排队模型 $M/M/n$,该排队模型系统有较低的平均排队等待队长、较短的顾客等待时间,能满足一定的实时数据任务平均时延要求和吞吐量要求。假定服务器的 DL 中有 n 条数据链,且各数据链工作是相对独立的;将实时数据划分为 N 个等级,第 1 级享有最高优先权,第 2 级享有次高优先权,……,第 N 级享有最低优先权,令 λ_i 为第 i 级数据到达率;各数据链服务时间为负指数分布,平均服务率为 μ ;整个系统的平均服务率应为 $n\mu$ 。

SL 中同一用户与服务器一般建立一条数据链,对 SL 中的每条数据链采用单服务窗等待制优先级排队模型 $M/M/1$,将实时数据划分为 N 个等级,第 1 级享有最高优先权,第 2 级享有次高优先权,……,第 N 级享有最低优先权;令 λ_i 为第 i 级数据到达率, μ_i 为第 i 级数据的平均服务率;对于 SL 中的每条数据链建立一个单服务窗排队模型,有利于减少实时数据的排队时延。

下面给出计算实时数据排队等待的时间 W_q 和实时数据在系统中的时间 W_s 的 Little 公式^[4]:

$$W_q = \frac{Lq}{\lambda} \quad (1)$$

$$W_s = \frac{Ls}{\lambda} \quad (2)$$

式中, Lq 为排队等待的数据长度, Ls 为系统内数据数(包括排队等待数据和正在发送的数据), λ 为数据到达的强度。

3 实时数据传输 QoS 控制

3.1 实时数据的 QoS 分级

为了保证高优先级数据有较好的服务和数据链有较高的利用率,通过提供 QoS 的分级将实时数据进行优先级分类并按其是否指定通信使用的数据链进行分组。

本文讨论的 QoS 指标参考了 W3C 定义的 QoS 指标集^[5],该指标集包括性能集(响应时间、执行时间、延迟和吞吐量等)、可靠性、信誉度、代价、可用性、可访问、鲁棒性、异常处理、确定性、互操作性和安全性等 13 种。本文提出一种可扩展的实时数据 QoS 分类算法,目前仅从时延、响应时间、实时性、可靠性、可用性和安全性 5 个方面讨论实时数据的 QoS 值估算,并将其划分为不同的优先级进入相应队列进行调度。下面给出各 QoS 指标的定义和度量方法。

定义 1(时延, $Q_{delay}()$) 是指服务器收到请求后将数据发出去到用户收到该数据的时间间隔的平均值,记为 $Q_{delay}() = T_{queue} + T_{translate}$,其中 T_{queue} 为分组排队等候的时间间隔, $T_{translate}$ 为分组传输的时间间隔,而 $T_{translate} = Packsize/Bandwidth + L_{delay}$,其中 $Packsize$ 为分组包大小, $Bandwidth$ 为链路带宽, L_{delay} 为链路延迟,实际当中 $Q_{delay}()$ 主要由 T_{queue} 决定。

定义 2(响应时间, $Q_{response}()$) 是指用户向服务器提交请

求到用户收到响应的时间间隔,记为 $Q_{response}() = T_{receive} - T_{send}$,其中 $T_{receive}$ 为用户收到响应的时间戳, T_{send} 为用户发出请求的时间戳。

定义 3(实时性, $Q_{real-time}()$) 是指该类数据任务的实时性要求,可将数据任务分为强实时性、实时性、普通 3 种实时性级别, $Q_{real-time}() = \lambda \times R_{server} + \mu \times R_{customer}$,其中 R_{server} 和 $R_{customer}$ 为服务器和用户对该数据给定的实时性值,如可在 $[0, 10]$ 之间取值,值越大表明实时性要求越高, λ, μ 为平衡参数。

定义 4(可靠性, $Q_{responsible}()$) 是指服务器响应用户请求并正确执行数据访问的概率, $Q_{responsible}() = 1 - (P_{sf} + P_{pf})$,其中 $P_s = N_{uf}/n$ (其中 N_{uf} 为执行失败的次数, n 为调用次数)为系统失败率,其与服务器所处的平台配置环境和网络环境相关; $P_{pf} = N_{fa}/(N_{fa} + N_{dc})$ (N_{fa} 为执行失败/终止次数, N_{dc} 为成功提交次数)为数据传输失败率。 $Q_{responsible}()$ 的值越大服务访问失败的概率越低,可靠性越高。

定义 5(可用性, $Q_{available}()$) 是指数据可被获得的概率, $Q_{available}() = T_{available}/T_{total}$,其中 T_{total} 是测定总时间, $T_{available}$ 是数据服务在 T_{total} 中的可用时间。

参照以上 QoS 指标定义与度量方法,根据实际应用需求并结合数据链通信的特性,可以扩展其他 QoS 指标,实现多 QoS 指标的度量,如可以扩展代价、确定性和互操作性等 QoS 指标的定义和度量。

定义 6 数据 I 的综合 QoS 为一个 N 元组, n 表示 QoS 指标的个数,如上则数据 I 的综合 QoS 为五元组,则 $QoS(I) = (Q_{delay}(I), Q_{response}(I), Q_{real-time}(I), Q_{responsible}(I), Q_{available}(I))$ 。

多实时数据的 QoS 指标集构成了 1 个二维矩阵,每增加 1 个新的实时数据,就在矩阵中新增 1 行;每个实时数据扩展一个 QoS 指标,就在矩阵中新增一列。表 1 为多实时数据 QoS 指标集二维矩阵示例。

表 1 实时数据 QoS 指标集二维矩阵示例表

	时延	响应时间	实时性	可靠性	可用性	...
数据 A	15	35	8	7	7	...
数据 B	13	33	7	8	9	...
...

考虑 QoS 属性间并没有统一的度量标准,有必要将 QoS 指标规格化到区间 $[0, 1]$ 。下面给出 QoS 指标规格化和综合 QoS 估算方法。

(1) 规格化

将 QoS 指标形式化为三元组 $\langle Q_{name}, Q_{direction}, Q_{valueRange} \rangle$,其中, Q_{name} 为 QoS 指标名; $Q_{direction}$ 为 QoS 指标取值方向,包括积极度量指标和消极度量指标两类,通常积极度量指标值越大,说明数据传输服务性能越好,本文讨论的实时性、可靠性和可用性等就属于积极度量指标范畴;消极度量指标则是取值越大性能越差,如响应时间、时延等; $Q_{valueRange}$ 为 QoS 指标的取值范围 $[Q_{min}, Q_{max}]$ 。鉴于大多数 QoS 评价指标 $Q_{valueRange}$ 与度量指标之间的线性关系,考虑补偿不同计量单位之间的 QoS 值之间的差异,采用线性规范化将原始值域空间 $[Q_{min}, Q_{max}]$ 变换到 $[0, 1]$ 区间上,这样就统一了各 QoS 指标值域区间。由于各 QoS 指标的不同取值方向,规格化积极度量指标 $Q_{positive}$ 和消极度量指标 $Q_{negative}$ 如下:

$$Q_{positive} = \begin{cases} \frac{q_i - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}}, & Q_{min} < q_i < Q_{max} \\ 1, & q_i \geq Q_{max} \\ 0, & q_i \leq Q_{min} \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{negative} = \begin{cases} \frac{Q_{max} - q_i}{Q_{max} - Q_{min}}, & Q_{min} < q_i < Q_{max} \\ 1, & q_i \leq Q_{min} \\ 0, & q_i \geq Q_{max} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 综合 QoS 估算

由于 QoS 指标的可扩展性,为了准确地计算出各任务 I 的综合 QoS 值,必须考虑实时数据的各 QoS 指标的权重。假定各 QoS 指标的权重 $W_j \{w_1, w_2, w_3, \dots\}$ 加起来等于 1,则对应 QoS 指标值矩阵 q_{ij} 将存在一个 QoS 指标权重矩阵 w_{ij} ,由 QoS 估算函数 $Score(q_{os}) = q_{ij} \times w_{ij}$ 可得 QoS 值矩阵。

最后根据各实时数据的 QoS 估算值矩阵中的值 Q_i ,将其划分为 1~N 级优先级,实时数据优先级计算公式为 $Q_{priority}(i) = N - Q_i$, $Q_{priority}(i)$ 越小表示其优先级越高,并根据其是否指定了通信的数据链进行划分,若指定了通信的数据链为 SL,则由选择类的分组调度管理器对实时数据进行分组调度;若未指定通信的数据链或指定为 DL,则由默认类的分组调度管理器对实时数据进行分组调度。

例如,给定 A、B、C 3 类实时数据的 QoS 指标值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 15 & 35 & 8 & 7 & 7 \\ 13 & 33 & 7 & 8 & 9 \\ 20 & 38 & 4 & 9 & 8 \end{bmatrix}, \text{各列分别为时延、响应时间、实时性、可}$$

靠性、可用性。规范化后的 QoS 指标值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 1 & 0.7 & 0.7 \\ 0.7 & 0.7 & 0.8 & 0.8 & 1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 1 & 0.8 \end{bmatrix}, \text{给定的 QoS 指标权重矩阵为}$$

$$\begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.3 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}, \text{计算得 A、B、C 3 类实时数据}$$

的 QoS 值矩阵为 $\begin{bmatrix} 0.63 \\ 0.82 \\ 0.49 \end{bmatrix}$ 。若将优先级分为 10 级,根据 A、

B、C 3 类实时数据的 QoS 估算值可将其优先级分别定为 4 级、2 级、5 级。

3.2 最早截止时间优先的优先级可控制调度算法

最早截止时间优先的优先级可控制调度算法 PC-EDF (priority controlled-EDF) 是一种基于时延的算法,常见的基于时延的算法有 EDF (earliest deadline first)^[6]、RCS (rate-controlled service)^[7]、Delay-EDD^[8]、Jitter-EDD^[9]、RC-EDF (rate controlled EDF)^[10]、DC-EDF (deadline-curve based EDF)^[11]、EEDF (earliest effective deadline first)^[12]。基于轮循和 GPS (generalized processor sharing, 广义处理器共享) 的调度算法可以看成是基于速率的调度算法,即通过为每一队列提供一定的速率保证来获得时延保证,而基于时延的算法是直接以排队时间作为参数,并以提供时延保证为目的。基于时延算法的基本思想是给每个队列分配一个时延参数 $Delay$ 作为时延上界,为每一个到达的任务计算时间标签 $Deadline = ArriveTime + Delay$ 并将其作为到期时间,其中 $ArriveTime$ 是任务到达时间。每次调度具有最小到期时间 $Dead-$

$line$ 的分组,因而具有 $O(\lg N)$ 的时间复杂度。EDF 算法是一种动态优先级调度算法,能提供实时数据的时延要求保证,相比静态优先级算法解决了低优先级任务长期得不到调度的问题。

3.2.1 PC-EDF 算法思想与描述

PC-EDF 算法的基本思想是当最高优先级队列队头的 $Deadline$ 并未超期(指 $Deadline$ 大于或等于当前时刻 $Tnow$,即时延已经到达了上界 $Delay$) 时按照 EDF 进行调度;若最高优先级队列有数据的 $Deadline$ 已经超期,则抢占正在调度的其他队列,等待最高优先级队列的超期的任务调度完后,再以 EDF 进行调度,保证最高优先级队列数据最好的 QoS。算法描述如下:

Algorithm PC-EDF

```
//创建 N 个优先级队列
//以下用 queue_i 表示 queue_0 到 queue_N-1 的每个队列
1. Queue * queue_i = Queue.createQueue();
//入队,计算数据包的 Deadline 并依据优先级压入 queue_i
2. enqueue(Packet * p)
3. {
4.   if(p != NULL && p->prio match queue_i)
5.   {
6.     p->Deadline = p->ArriveTime + Delay_i;
7.     queue_i->enqueue(p);
8.   }
9. }
//出队,以 EDF 方式出队 queue_i 队头数据包
10. Packet * dequeue()
11. {
12.   if(queue_0->top->Deadline >= Tnow)
13.   {
14.     return queue_0->dequeue();
15.   }
16.   return findEarliestDeadline(queue_i);
17. }
```

算法第 1 行创建了 $queue_0, \dots, queue_{N-1}$ 共 N 个优先级队列;第 2 行到第 9 行是入队函数,第 4 行根据数据包的优先级划分所属队列,第 6 行根据数据包的到达时间和所属队列的时延计算该包的 $Deadline$,第 7 行将数据包压入相应队列;第 10 行到第 17 行是出队函数,第 12 行到第 15 行若可抢占队列 $queue_0$ 有数据包的 $p \rightarrow Deadline$ 超期,则马上出队,否则依据 EDF 方式使 N 个队列中 $Deadline$ 最小的包出队。

由于各队列时延上界 $Delay$ 可调整,通过设置 $Delay$ 为数据分组任务提供一个动态优先级的 $Deadline$,同时结合 QoS 分级算法中指标权重可分配,实现了数据分组的优先级可控制,以保证较高优先级实时数据任务较好的 QoS。PC-EDF 调度算法,以最早截止时间为调度参数,以时延的保证为高优先级的实时数据提供 QoS 保证,算法时间复杂度为 $O(\lg N)$ 。

3.2.2 DL 通信分组调度管理

根据实际使用情况将队列划分为 1~N 级优先级队列,数字越小表示优先级越高,1 级队列为可抢占优先级队列,并未对每级队列分配合适的时延上界,各实时数据任务按优先

级依据一定规则进入队列,若实时数据传输任务指定了使用 DL 中某条数据链通信,则可将该实时数据任务优先级提高并分配到可抢占优先级队列。按照 PC-EDF 调度实时数据,并根据 DL 中的各数据链路传输速率的高低以及是否是允许发送的状态优先选择速率最高的数据链进行传输。

3.2.3 SL 通信分组调度管理

对于指定了使用 SL 通信的实时数据,为每条数据链建立优先级的排队模型并使用 PC-EDF 调度,对于每个排队模型,由于只有一个数据链作为服务窗,每次调度时分组调度管理器则根据数据链是否是允许发送的状态发送实时数据,若可抢占优先级队列有任务的截止时间已超期,则可抢占数据链优先发送。

4 实验验证

采用 NS2 网络模拟仿真软件进行验证,模拟了带宽受限条件下的数据链通信环境,根据上述 QoS 分级算法以及 PC-EDF 调度算法实现了实时数据传输 QoS 控制的分级分类器和分组调度器,将优先级划分 0~9 十个优先级,将缓冲队列划分为逻辑上三级优先级队列,分别为:1. 可抢占优先级队列;2. 优先级队列;3. 普通队列。1 级队列分配时延上界为 2ms,2 级队列分配时延上界为 40ms,3 级队列分配时延上界为 400ms。实验模拟了不同负载条件下算法的性能,比较了三级优先级队列与先入先出队列在分组到达强度一样条件下的排队队长,如图 1 所示,纵坐标表示队列长度,横坐标表示分组到达持续时间,

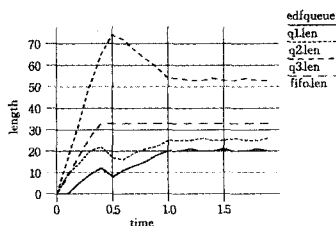


图 1 PC-EDF 三级队列与 FIFO 队列队长比较

实验结果表明,最早截止时间优先三级队列长度在不同负载条件下均趋于稳定,可抢占队列平均队长小于 2 级队列队长,而且都小于先入先出队长和 3 级队列队长。由 Little 式(1),在到达强度一致条件下,队长越小则排队等待时间越短,可抢占队列有最小的排队等待时间,1 级、2 级队列排队等待时间都小于先入先出队列和 3 级队列,可见 PC-EDF 比 FIFO 能提供更好的 QoS 分级并能提供时延保证。

结束语 本文在基于数据链通信的应用层提出了一种实

时数据传输 QoS 控制方法,包括可扩展的 QoS 分级算法和一种基于最早截止时间优先的优先级可控制调度算法 PC-EDF。仿真结果显示,提出的调度模型和算法相比传统的先来先服务模型具有更高的性能,能保证高优先级的实时数据传输任务较好的 QoS。实现基于数据链通信端到端的实时数据传输 QoS 控制是一种全局概念,本文仅在数据链通信服务器的应用层做了 QoS 控制研究,将应用层的 QoS 控制与数据链网络层 QoS 控制相结合是下一步的研究工作。

参考文献

- [1] 骆光明,杨斌,邱致和,等. 数据链[M]. 北京:国防工业出版社, 2010
- [2] Alemeida J, Dabu M, Manikutty A, et al. Providing differentiated level of service in Web content hosting[C]//Proceedings 1998 SIGMETRICS Workshop on Internet Server Performance. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998
- [3] Eggert L, Heidemann J. Application-level differentiated services for Web servers[J]. World Wide Web Journal, 1999, 2(3): 133-142
- [4] 陆传贵. 排队论(第 2 版)[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2009
- [5] QoS for Web services. Requirements and Possible Approaches [EB/OL]. <http://www.w3c.org.kr/kr-office/TR/2003/ws-qos>, 2011-01-05
- [6] Liu, Layland j. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment[J]. Journal of ACM, 1973, 20(1): 46-61
- [7] Zhang H, Ferrari D. Rate-controlled service disciplines [J]. Journal of High Speed Networks, 1995, 3(4): 389-412
- [8] Ferrari D, Verma D C. A scheme for real-time channel establishment in wide-area networks[J]. IEEE JSAC, 1990, 8(3)
- [9] Verma D, Zhang H, Ferrari D. Delay jitter control for real-time communication in a packet switching network[C]//Proceedings of the TriComm'91. Chapel Hill, NC, Mar. 1991
- [10] Georgiadis L, Guerin R, Peris V, et al. Efficient network QoS provisioning based on per node traffic shaping[C]//IEEE/ACM Trans on Networking. 1996, 4(4)
- [11] Zhu Kai, Zhuang Yan, Yannis V. Achieving end-to-end delay boundes by EDF scheduling without traffic shaping[J]. IEEE INFOCOM, 2011
- [12] Liebeherr J, Yilmaz E. Work-conserving vs. nonworkconserving packet scheduling: An issue revisited[C]//Proceedings IEEE/IFIP 7th International Workshop on Quality of Service(IWQoS'99). June 1999

(上接第 264 页)

- [4] Xie Min, Haenggi M. Towards an end-to-end delay analysis of wireless multihop networks[J]. Ad hoc Networks, 2009, 7: 849-861
- [5] Cui Shu-guang, Madan R, Goldsmith A J, et al. Energy Minimization and Delay Analysis in TDMA-based Sensor Networks [Z]. Wireless Communications, 2004
- [6] Yue Wu-yi, Takahashi Y, Takagi H. Advances in Queueing Theory and Network Applications[M]. NY USA: Springer Science + Business Media, 2009: 70-82, 182-196

- [7] Scalable Network Technologies. QualNet [EB/OL]. <http://www.scalable-networks.com/content/products/qualnet>
- [8] Nordic Semiconductor. nRF24L01 single chip 2.4GHz transceiver product specification[EB/OL]. <http://www.nordic-semi.no>, 2007. com, 2012-12-19
- [9] Texas Instruments. CC1100 Single Chip Low Cost Low Power RF Transceiver[EB/OL]. <http://www.ti.com/cn/general/cn/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=cc1100&fileType=pdf>, 2012-12-19