

工业无线传感网混合关键性业务带宽分配算法

王 军¹, 王秋石², 王金涛^{2,3}

(1 中国石油化工股份有限公司 天津石化分公司, 天津 300271; 2 中国科学院 沈阳自动化研究所
工业控制网络与系统研究室, 辽宁 沈阳 110016; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在工业无线传感网中, 对业务传输的实时性和可靠性都有较高的要求. 本文基于广义的最大-最小效用公平准则, 通过线性分段函数对计算过程进行简化, 提出基于线性分段函数的一种带宽分配方法. 该方法基于集中式控制的结构, 既保障高关键性业务的及时传输, 又不会对高实时性低带宽需求的业务造成影响. 通过部署在天津石化的无线数据采集网络对算法性能进行测试, 验证了算法的有效性和可行性.

关键词: 工业控制网络; 数据采集; 实时性; 带宽分配; 软件定义网络

中图分类号: TN915.85

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)04-0022-04

The Bandwidth Allocation Algorithm for Mixed-criticality Traffic in Industrial Wireless Sensor Networks

WANG Jun¹, WANG Qiu-shi², WANG Jin-tao^{2,3}

(1 China Petroleum and Chemical Corporation, Tianjin Branch, Tianjin 300271, China;

2 Industrial Control Networks and Systems Department, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In industrial wireless sensor networks, it has higher requirements in real-time and reliability. based on the generalized UMM fair principles, using the ideas of piecewise linear function to simplify the calculation, we presents a resource allocation algorithm based on piecewise linear function. The method is based on the structure of centralized control, and can ensure timely transfer of the high time critical traffic, but not affect the traffic with high real-time and low bandwidth requirements. Finally, through the wireless data acquisition network deployed in Tianjin Chemical Corporation, we test the performance of algorithm.

Key words: industrial control network; data acquisition; real-time; bandwidth allocation; SDN

1 引言

传统的基于 QoS(Quality of Service)优先级划分的方式在带宽受限工业无线网络^[1]中存在着严重丢包的问题^[2], 如图 1 所示为在带宽受限的工业无线网络中不同业务的丢包率. 其中 BE1 为尽最大努力(best effort)投递的业务, AF1 和 AF2 为两个具有 QoS 优先等级的实时性保障业务. 从图 1 中可以看出, 当达到网络容量的限制时, 即使高 QoS 等级

的业务仍然具有很高的丢包率. 因此, 传统的基于 QoS 的方法无法在带宽受限的网络中保障业务的实时性. 另外, 同一种业务具有不同的关键性级别^[3]. 传统的基于 QoS 的方法在处理该类混合关键性业务时也缺乏有效性.

本文基于广义的最大最小效用(UMM)公平准则, 通过线性分段函数^[4]对计算过程进行简化, 而提出基于线性分段函数的一种带宽资源分配方法.

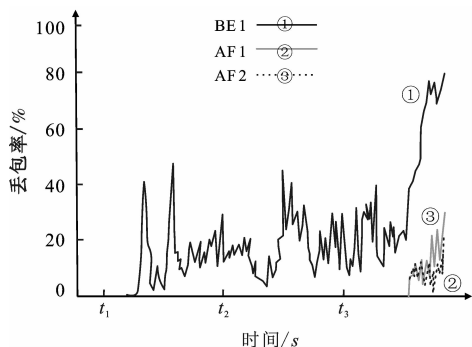


图1 TCP丢包率

2 问题描述与模型建立

在工业应用中,各传感器节点和现场设备采集到的信息需要传输到数据中心进行处理和分析。由于采用分布式网络结构,各节点需单独进行传输规则的设置和调整,缺乏灵活性。当网络需求出现变化时,无法及时满足变化的需求,在控制速度和粒度上都缺乏精确性。也无法做到在不影响低带宽高实时业务的传输下传输高关键性的业务^[5]。

文献[6]第一次提出了效用的概念,并根据网络的特征和业务的相似性,把网络中所有的业务分成四类,并给出其各自的效用函数。效用函数是基于效用的资源分配研究的基础。但其效用函数粒度过粗,无法区分同种业务中的不同情况,如同种业务具有不同关键性时则无法处理。因此,本文在此基础上提出针对关键性区分的效用函数。

SDN (Software Defined Network) ^[7-8]通过集中式的控制器能够实现灵活和快速的响应,既保障高关键性业务的及时传输,又不会对高实时性低带宽需求的业务造成影响。因此,本文基于SDN网络架构,进行网络传输优化。

通过对不同业务和同种业务的分析对比,我们发现:属于同种业务的不同数据流除具有该类型业务的共性特点外,还具有其个性特点。例如,高清晰度视频与普通清晰度的视频效用函数的函数曲线相似,但是带宽需求却不同。同理,对于关键性不同的同类业务,其效用函数的函数表达式相似,但某些参数不同。因此,基于效用函数的该类性质,我们采用类效用函数对具有不同关键性的同类业务进行描述。由某种业务中所有具有不同关键性的业务组成类效用函数。

定义1 类效用函数。同种业务在不同关键性情况下,由于选用不同参数而导致效用函数出现差

异,这些不同的效用函数就构成了此种业务的类效用函数,从而可以通过设置效用类函数中的某些参数来对同种业务的不同关键性进行有效区分。

关键性不同的业务带宽需求也不同,所以在进行效用区分时,将带宽需求作为同种业务不同关键性区分的参数。据此,本文对同种业务在不同关键性时的带宽需求作为关键性区分的依据。其中,业务的最大带宽需求为:业务达到最大效用(效用函数进行统一的归一化处理)时能够分配到的带宽最小值。最小带宽需求为:能使业务的效用值大于0时所分配的最小带宽。若实际分配给某业务的带宽小于该业务的最小带宽需求,那么定义此时该业务得到的效用值是0。

由于在不同关键性时同种业务的带宽需求不同,因此,基于效用函数进行带宽分配时,用 $b_{\max i, j}$ 、 $b_{\min i, j}$ 分别表示业务 t 在关键性级别为 j 时的最大最小带宽需求。记 $B_{\min i}$ 、 $B_{\max i}$ 分别代表业务类型 i 实际的最小、最大带宽需求,从而得到整个网络业务 i 实际的最小和最大带宽需求分别为:

$$B_{\min i} = \sum_{j=1}^{n_i} b_{\min i, j} \quad (1)$$

$$B_{\max i} = \sum_{j=1}^{n_i} b_{\max i, j} \quad (2)$$

本节将结合文献[6]中不同应用协议下业务的效用函数,针对工业传感网中的各业务类型,对各种业务的类效用函数和及其表达式进行设计。其中, u_{ij} ($i \in \{1, 2, 3\}$) 表示第 i 类业务在关键性为 j 时业务的效用函数, $b_{i, j}$ 是第 i 类业务在关键性为 j 实际分配到的带宽。

3 基于分段线性函数的 UMM 公平分配算法

分段线性函数是通过连接原来函数曲线中的一些点构成折线来对原函数进行模拟的一种近似方法。其优点是方法的通用性好,几乎能够模拟所有的函数。记 $y = f(x)$ 为连续单调不减函数,其相应分段函数根据坐标值的大小进行由小到大排列所生成的向量记做 $\vec{V} = ((x_s, y_s), (x_{s+1}, y_{s+1}), \dots, (x_t, y_t))$, 式中 $s, t \in N, s < t, \forall i \in N, s \leq i < t$ 且 $x_i < x_{i+1}$, $y_i = f(x_i), y_i \leq y_{i+1}$, 从而分段线性函数的表达式可表示为: $\forall x \in [x_i, x_{i+1}], i \in N, s \leq i < t$, 有 $y = y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i)$ 。

设业务流的集合为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, 可满足业务流需求的带宽分配下限和上限分别为 $B_{\min i}$ 和 $B_{\max i}$, ($B_{\min i} \leq B_{\max i}$)。业务流的效用函数 $u_i(x)$ 为定义在 $[B_{\min i}, B_{\max i}]$ 上的单调递增连续函

数,可得 $u_i(x)$ 有反函数 $u_i^{-1}(y)$, 函数定义域 $[u_i(B_{\min i}), u_i(B_{\max i})]$, $U_M = \min(u_i(B_{\min i}); f_i \in F)$, $U_P = \max(u_i(B_{\min i}); f_i \in F)$.

假设网络可分配的最大可能带宽为 R_P , 并有 $R \leq R_P$. 对 $\forall f_i \in F$, 若 $B_{\max i} > R_P$, 那么, 使 $B_{\max i} = R_P$. $y = U_M + \frac{k}{K} \cdot (U_P - U_M)$, 其中 $k = 0, 1, \dots, K$ 是对效用值进行等分的等分线, 其数量为 $K + 1$ 条, 将效用值等分为 $[U_M, U_P] \cdot K$ 份.

取 $u_i(x)$ 到 $[u_i(B_{\min i}), u_i(B_{\max i})]$ 区间中效用等分线与函数 $u_i(x)$ 的交点坐标集合 P_i , 记 P_i^* 为 P_i 中各起点与终点的集合, 有

$$P_i^* = P_i \cup \{(B_{\min i}, u_i(B_{\min i})), (B_{\max i}, u_i(B_{\max i}))\}.$$

将 P_i^* 中各点的坐标值按照从小到大顺序排列构成向量 $\vec{P}_i^*$, 则 $\vec{P}_i^*$ 代表的函数即 $u_i(x)$ 各分段效用函数, 记做 $PLu_i(x)$.

定义 2 分段线性效用反函数. 集合 P_i^* 中的各个点关于函数 $y = x$ 的对称点坐标构成集合 Q_i^* , 有 $Q_i^* = \{(y_j, x_j) | (x_j, y_j) \in P_i^*\}$, 将集合 Q_i^* 中各个点的坐标值由小到大排列构成向量 $\vec{Q}_i^*$, 则 $\vec{Q}_i^*$ 表示的函数即可作为与 $u_i^{-1}(y)$ 对应分段函数的效用反函数, 记做 $PLu_i^{-1}(y)$.

定义 3 分段线性扩展函数. 记 Q_i^M 为 $[U_M, PLu_i(B_{\min i})]$ 内的效用等分线与 $x = B_{\min i}$ 的交点的坐标集合, Q_i^P 为 $[PLu_i(B_{\max i}), U_P]$ 内的效用等分线与 $x = B_{\max i}$ 的交点的坐标集合. 存在 $PLu_i(x) \in [U_M, PLu_i(B_{\min i})]$, $PLu_i(x) = PLu_i(B_{\min i})$. 存在 $PLu_i(x) \in [PLu_i(B_{\max i}), U_P]$ 内, 令 $PLu_i(x) = PLu_i(B_{\max i})$, $Q_i^E = Q_i^* \cup Q_i^M \cup Q_i^P$. 将 Q_i^E 中的各点根据坐标值由小到大顺序构成向量 $\vec{Q}_i^E$, 则 $\vec{Q}_i^E$ 对应的函数 $PLu_i^{-1}(y)$ 可表示在区间 $[U_M, U_P]$ 上分段函数的线性扩展函数 $PLeu_i^{-1}(y)$. 其中, 函数 $PLu_i(x)$ 、 $PLu_i^{-1}(y)$ 为严格的连续单调递增函数, $PLeu_i^{-1}(y)$ 为定义在区间 $[U_M, U_P]$ 的单调不减连续函数.

根据定义 3 可得函数 $PLeu_i^{-1}(y)$ 在坐标集合 Q_i^E 上的各点效用值集合

$$Y_i = \{PLu_i(B_{\min i}), PLu_i(B_{\max i})\} \cup \left\{U_M + \frac{k}{K} \cdot (U_P - U_M) | k = 0, 1, \dots, K\right\}$$

定义 4 分段线性系统效用函数. 设向量 $\vec{Q}_i^{E+} = ((y_1, x_{i,1}), (y_2, x_{i,2}), \dots, (y_{|Y|}, x_{i,|Y|}))$ 为各点按坐标值升序排列后形成的向量. 当 $PLeu_i^{-1}(y) > B_{\max i}$ 时, 令 $PLeu_i^{-1}(y) = B_{\max i}$, 当

$PLeu_i^{-1}(y) < B_{\min i}$ 时, 令 $PLeu_i^{-1}(y) = B_{\min i}$. 利用函数 $\sum_{i=1}^N PLeu_i^{-1}(y)$ 表示向量 $((y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_{|Y|}, x_{|Y|}))$, 并有 $x_j = \sum_{i=1}^N x_{i,j}$, 且 $j = 1, 2, \dots, |Y|$, 则向量 $((y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_{|Y|}, x_{|Y|}))$ 关于函数 $y = x$ 的对称的向量 $((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{|Y|}, y_{|Y|}))$ 所代表的函数即为网络的分段线性效用函数 $PLu(x)$.

$PLu(x)$ 表达式可表示为:

$$PLu(x) = \begin{cases} y_1, & x = x_1 \\ y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i), & x \in (x_i, x_{i+1}] \\ x_i \neq x_{i+1}, & i = 1, 2, \dots \end{cases}$$

基于以上的定义和讨论, 本文给出一种基于线性分段函数比例公平带宽分配方法 PM-UMM, 如该方法的执行过程如算法 1 所示.

算法 1: PM-UMM 算法

0. 假设系统已预知各用户分段线性效用函数及反函数;
1. $\forall f_i \in F$, 在区间 $[U_M, U_P]$ 求分段扩展函数 $PLu_i^{-1}(y)$;
2. 求网络分段效用函数 $PLu(x)$;
3. 求网络带宽为 R 时的网络效用函数值 $PLu(R)$;
4. if $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} B_{\min i,j} = R$
5. $\{ \forall f_i \in F, x_{i,j} \leftarrow B_{\min i,j} \}$; // 带宽仅能满足最低要求
6. else if $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} B_{\max i,j} < R$
7. $\{ \forall f_i \in F, x_{i,j} \leftarrow B_{\max i,j} \}$; // 带宽过剩
8. else
9. if $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} B_{\min i,j} > R$
10. 依次舍弃第 2 类业务中的低关键性业务、第 3 类业务中的低关键性业务、第三类业务中的高关键性业务, 直到使 $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} B_{\max i,j} \leq R$;
11. end if
12. for $\forall f_i \in F$
13. if $PLu(R) \geq PLu_{i,j}(B_{\max i,j})$
14. $x_{i,j} \leftarrow B_{\max i,j}$;
15. else if $PLu(R) \leq PLu_{i,j}(B_{\min i,j})$
16. $x_{i,j} \leftarrow B_{\min i,j}$;
17. else $x_{i,j} \leftarrow PLu_i^{-1}(PLu(R))$;
18. end if
19. end for
20. end if

该算法的思想是: 如果当前网络可提供的总带宽只能满足业务的最低带宽需求时, 为各业务分配其带宽需求下限; 如果当前网络带宽能满足各业务

的最大带宽需求时,为各业务分配其带宽需求上限;如果网络可提供的带宽介于各业务的最大带宽需求和最小带宽需求之间时,则求各业务的分段效用函数 $PL_u(x)$,然后据此计算得到各业务在现有网络带宽资源中可以得到的扩展效用,再依据扩展效用反推得到各业务应该得到的带宽,最终就可以求得现有的网络带宽条件下各业务可以分配到的带宽大小.如果网络的带宽对所有业务的最低带宽要求都无法满足时,则舍掉其中的部分低关键性的业务,直到网络带宽资源能够满足系统最小带宽需求,然后根据分段线性系统效用函数进行重新计算.

4 实验验证与结果分析

我们通过部署基于 WIA-PA 工业无线技术的无线网关、路由、适配器组成烯烃厂无线局域网,通过无线 Mesh 网络实现烯烃部现场能源仪表的数据无线远传.

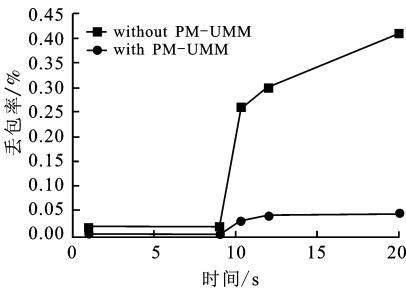
项目根据计量仪表及电源接入点的分布特征,规划为 5 个无线局域网,其分别为质检大楼无线局域网、计量间无线局域网、水务部大楼无线局域网,加油站无线局域网、乙二醇无线局域网,如图 2 所示.各局域网采集到的数据通过无线 Mesh 网络传输到数据中心.



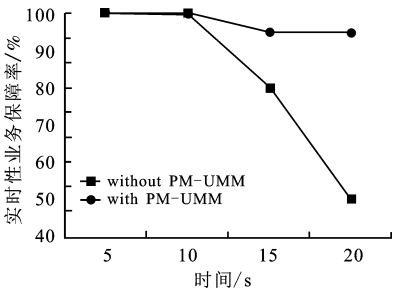
图 2 厂区布局图

我们比较所搭建的网络在常规运行模式下和拥塞情况下的性能,并将分别在采用和不采用 PM-UMM 算法下网络业务的丢包率和实时性保障的性能进行对比,所得结果如图 3 所示.

图 3(a)为网络业务的丢包率在出现拥塞时候的变化情况,图 3(b)为网络出现拥塞时实时性业务的保障情况.在第 10s 时网络出现拥塞.本文用实时性业务保障率 η 来表示, η 的定义为网络中能够保证的实时性业务流数与网络中所有的有实时性需求的业务流总数之比.



(a)网络业务的丢包率在出现拥塞时候的变化情况



(b)网络出现拥塞时实时性业务的保障情况

图 3 网络测试结果

从图中可以看出,当网络出现拥塞导致带宽不足时,采用 PM-UMM 算法在能够将网络的业务丢包率始终保持在 5%之内,而实时性保障率则能够保持在 96%以上,从而有效保障了网络性能.

5 结束语

针对传统的基于优先级划分的方式无法保证带宽受限网络中无法保证网络性能.本文利用分段线性函数提出了一种基于分段线性函数的带宽分配算法.通过集中式控制的结构,既保障高关键性业务的及时传输,又不会对高实时性低带宽需求的业务造成影响.最后,将该方法在部署在天津石化的无线数据采集网络对算法性能进行了验证.

参考文献:

[1] 基于萤火虫算法的无线传感器网络移动 sink 节点路径规划方法[J] 微电子学与计算机, 2016, 33(5): 47-51.

[2] Gaj Piotr, Jurgen Jasperneite, Max Felser. Computer communication within industrial distributed environment; A survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 182-189.

[3] 谷传才,关楠,于金铭,等. 多处理器混合关键性系统中的划分调度策略[J]. 软件学报, 2014, 25(2): 284-297.

- [6] Waser R, Dittmann R, Staikov G, et al. Redox-based resistive switching memories-nanoionic mechanisms, prospects, and challenges [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(25/26):2632-2663.
- [7] Guo X, Schindler C, Menzel S, et al. Understanding the switching-off mechanism in Ag⁺ migration based resistively switching model systems [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(13):042107.
- [8] Lin S, Zhao L, Zhang J, et al. Electrochemical simulation of filament growth and dissolution in conductive-bridging RAM (CBRAM) with cylindrical coordinates [C]//*Proceedings of the Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2012 IEEE International. San Francisco, CA, USA, IEEE, 2012, 26(3):1-4.
- [9] Sato Y, Kinoshita K, Aoki M, et al. Consideration of switching mechanism of binary metal oxide resistive junctions using a thermal reaction model [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(3):033503.
- [10] Bersuker G, Gilmer D C, Veksler D, et al. Metal oxide RRAM switching mechanism based on conductive filament microscopic properties [C]//*Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2010 IEEE International. San Francisco, California, USA, IEEE, 2010, 19(6):1-4.
- [11] Guan W, Liu M, Long S, et al. On the resistive switching mechanisms of Cu/ZrO₂: Cu/Pt [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(22):223506.
- [12] Russo U, Ielmini D, Cagli C, et al. Self-accelerated thermal dissolution model for reset programming in unipolar resistive-switching memory (RRAM) Devices [J]. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2009, 56(2): 193-200.
- [13] Huang J J, Hou T H, Hsu C W, et al. Flexible one diode-one resistor crossbar resistive-switching memory [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(4S):04DD9.
- [14] Li H, Chen H Y, Chen Z, et al. Write disturb analyses on half-selected cells of cross-point RRAM array [C]//*Reliability Physics Symposium*, 2014 IEEE International. Piscataway, NJ: IEEE, 2014.
- [15] Li Y, Chen W, Lu W, et al. Impact of coupling capacitance on read operation of RRAM devices in 1D1R crossbar architectures [C]//*Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 989-992.

作者简介:

李云女, (1991-), 硕士. 研究方向为数字集成电路设计和测试.

张锋(通讯作者) 男, (1977-), 研究员. 研究方向为高速低功耗存储器件设计. E-mail: zhangfeng_ime@ime.ac.cn.

(上接第 25 页)

- [4] Kohli, Nidhi, Jeffrey R. Harring. Modeling growth in latent variables using a piecewise function [J]. *Multivariate behavioral research*, 2013, 48(3): 370-397.
- [5] Georgia Giannopoulou, Nikolay Stoimenov, Pengcheng Huang, et al. Mixed-criticality scheduling on cluster-based manycores with shared communication and storage resources [J]. *Real-Time Systems*, 2016, 52(4): 399-449.
- [6] Shenker Scott. Fundamental design issues for the future Internet [J]. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 1995, 13(7): 1176-1188.
- [7] Feamster, Nick, Jennifer Rexford, Ellen Zegura. The road to SDN: an intellectual history of programmable networks [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(2): 87-98.
- [8] Hwang, Renhung, Huiping Tseng. Load balancing and routing mechanism based on software defined network in data centers [C]//*2016 IEEE International Computer Symposium (ICS)*. Coogee Beach, Sydney, Australia, 2016: 165-170.

作者简介:

王军男, (1965-), 高级工程师. 研究方向为工业控制网络与系统.

王秋石男, (1984-), 助理研究员. 研究方向为工业无线传感器网络.

王金涛(通讯作者) 男, (1986-), 博士研究生. 研究方向为工业无线控制网络及无线 mesh 网络.

E-mail: wangjintao@sia.cn